

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

第5卷8号

Vol. 5 No. 8

(通卷第30号)

資料係
文献複写
禁持出

港湾における鋼材腐食の研究 (第1報)

腐食速度推定法に関する研究……………善 一章

1966年6月

運輸省港湾技術研究所



港湾における鋼材腐食の研究（第1報）

——腐食速度推定法に関する研究——

目 次

1. まえがき	I
2. 港湾における鋼材腐食の研究	4
2-1 鋼製構造物の腐食	4
2-1-1 鋼製構造物	4
2-1-2 鋼製構造物用鋼材	13
2-1-3 腐食環境	28
2-1-4 腐食現象	38
2-2 鋼材腐食調査	43
2-2-1 鋼材厚み測定法ならびに厚み計	43
2-2-2 これまでの鋼材腐食調査	48
2-2-3 腐食速度の経年変化	75
2-3 腐食に対する鋼製構造物設計法の現状	79
3. 埋設鋼材の腐食速度推定法ならびに腐食計の開発に関する研究	86
3-1 緒 言	86
3-1-1 推定法の検討で使用する諸記号	86
3-1-2 腐食計と厚み計の相違	86
3-2 これまでに行なわれた推定法ならびに腐食計に関する検討	87
3-3 ミクロ腐食速度推定法ならびにミクロ腐食計の開発に関する実験	99
3-3-1 実験の概要	99
3-3-2 室内実験	102
3-3-3 室内実験結果およびその解析	107
3-3-4 野外実験	110
3-3-5 野外実験結果および考察	117
3-4 マクロ腐食速度推定法の開発に関する実験	119
3-4-1 マクロ腐食	119
3-4-2 マクロ腐食速度推定に関する半理論的考察	124
3-4-3 マクロ腐食速度推定法	179
4. 結 び	180

Studies on steel corrosion at harbors (1st Report)

Study on estimating method of steel corrosion rate

Kazuaki Zen*

Synopsis

Recently, steel has been used as leading material for constructing harbor structures in the shape of sheet pile, pipe and H-shaped pile, a good deal, so that it has become to be more important than ever to make corrosion tendency of steel at harbors clear. While, until now, examinations regarding corrosion of steel structures at harbors have almost been conducted from point of so-called general corrosion, which was corrosion of steel buried in a single zone, for example, in sea water or in sand zone, and so on.

However, since steel contacts nearly with several differential zones in field, for example, under marine environment, sea water and mud zone saturated with sea water, or mud zone unsaturated with sea water and mud zone saturated with sea water, and so on, it may be supposed that another steel corrosion unlike general corrosion will occur along surface of steel passing through such differential zones.

Accordingly, to distinguish corrosion tendencies of steel in a single zone and in differential zones, in this report the former was called micro-corrosion, the latter macro-corrosion. But, the relation between micro- and macro-corrosion rates of steel has not yet been investigated quantitatively. Besides, both estimating methods of micro- and macro-corrosion rate of steel have not been developed and micro- and macro-corrosion meters, which are apparatus for estimating each micro- and macro-corrosion rates under practical condition, also have not been worked out. Consequently, to obtain a clue to the elucidation of steel corrosion problem at harbors, I started at first according to both views of micro- and macro-corrosion to arrange many data regarding steel corrosion in field once made by many engineers at many places and then to study the relation between micro- and macro-corrosion rates of steel at practical conditions and furthermore to develop estimating methods for micro- and macro-corrosion rates of steel.

As a result, I obtained the following results :

(1) Micro-corrosion rate of steel buried in neutral environments was shown by the following relation ;

$$C = K \cdot I_{KD}^a \cdot \rho^{-b} \quad (1)$$

$$C = K \cdot I_{KD}^a \quad (2)$$

where, C was micro-corrosion rate, which was corrosion rate of steel buried in a single zone, for example, sea water or sand zone unsaturated with sea water, or sand or clay zone saturated with sea water, and so on, and was calculated by weight loss, mm/yr, I_{KD} was stable value of galvanic current density obtained by the suggested measuring method and electrodes, $\mu A/cm^2$, ρ was specific resistance of corrosion environ-

Chief research engineer, Structure Division

ents, $\Omega\text{-cm}$, k was 2.12×10^{-7} , a was 3.69 and b was 0.001.

(2) As shown at the relation (2), micro-corrosion rate, C , could be expressed as function of I_{KD} measured by means of a suggested model cell, whose anode was magnesium, 12cm^2 in surface area, cathode was steel, 12cm^2 in surface area, and whose total circuit resistance was adjusted to $2,000\Omega$ constantly in various environments before measurement of I_{KD} .

To make relation between C and I_{KD} clearer, the following equation was introduced from equation (2) based upon some suppositions, i. e. in neutral environment steel corrosion type should be cathodic control and open circuit potential difference between the suggested model electrodes should be constant, and so on;

$$\gamma_c = [1.223 - 12 \times 2,000 (I_{KD} \times 10^{-6})] / (I_{KD} \times 10^{-2}) \quad (3)$$

This γ_c was named cathodic depolarization coefficient and expressed in $\Omega\text{-m}^2$, and then there was the following relation between micro-corrosion rate of steel, C (mm/yr), and cathodic depolarization coefficient, γ_c ;

$$C = k \cdot e^{-\gamma_c} \quad (4)$$

where, k was 0.34 and e was a constant.

From the relation (4), it was assumed that cathodic depolarization coefficient, γ_c , which was a value depending on degree of contamination of solution, flowing speed of solution, and so on, was a powerful controlling factor against steel corrosion rate.

Consequently, it was possible to make corrosion meter for estimating apparatus simple and useful.

(3) And it was considered that such supposition that difference of open-circuit potential of micro-corrosion cell occurred on steel surface in various corrosion environments was constant was almost right for practical use because of establishment of the relation (4).

(4) Micro- and macro-corrosion tendencies were found out from past results of examination regarding steel structures at harbors. According to my experimental results, when steel contacted with stationary solution, for example, sea water or fresh water and mud zone saturated with solution, micro-corrosion alone occurred in each zone. While, when steel passed through agitated solution and mud zone saturated with solution, and when steel passed through sand zone unsaturated with solution and mud zone saturated with solution, macro-corrosion was liable to occur. That is to say, steel in mud zone saturated with solution served as anode because steel potential in it was relatively negative against one in agitated solution or in mud zone unsaturated with solution served as cathode. And the fast agitating speed of solution or the rich entrained air in mud zone unsaturated with solution, the considerable such macro-corrosion tendency.

(5) Because both micro- and macro-corrosion occurred based upon electro-chemical reaction, it seemed that both corrosion reactions were cathodic-control type and γ_c was applied to estimate macro-corrosion rate as well as micro-corrosion rate. As a result of experiment, it was confirmed that macro-corrosion rate of steel in neutral corrosion environment could be shown by the following relation;

$$C = k' \cdot e^{-\gamma_c} \cdot A_c / A_a \quad (5)$$

where, C was macro-corrosion rate (mm/yr), which was corrosion rate of steel in relatively anodic zone

within two zones, γ_c was cathodic depolarization coefficient ($\Omega\text{-m}^2$) measured by the suggested measuring method and electrodes in relatively cathodic zone within two zones, A_c was surface area of steel in cathodic zone, A_a was surface area of steel in anodic zone, k' and e were constants and in this experiment k' became nearly equal to k . In field condition, cathodic, anodic area ratio, A_c/A_a , could be determined by using steel potential distributing diagram made from measuring steel potential value to some standard electrodes, for example, calomel electrode or sodium chloride-silver chloride electrode.

Namely, steel at negative side from center line dividing equally potential area served as anode in macro-corrosion cell, and steel at positive side as cathode. If corrosion environments consist of many zones, by applying the above relation to every two zones from top zone and by adding up macro-corrosion rates obtained regarding every two zones, macro-corrosion rate of steel buried in many zones can be estimated as well as in two zones.

Besides, many experiments with respect to corrosion of steel at harbors, for example, experiment regarding the relation between micro-corrosion rate and macro-corrosion rate, examination of steel corrosion under marine environment from micro-and macro-corrosion standpoint, investigation of utility of the developed corrosion meter, investigation of protective method for steel, and so on, are now being conducted in series at experimental room and in field condition.

港湾における鋼材腐食の研究(第1報)

—腐食速度推定法に関する研究—

善 一 章*

1. まえがき

わが国の港湾取扱貨物量に対する港湾施設の不足が数年前より著しく目立ち始めると共に、貨物運搬用の船の大型化が計られてきて戦前の2千～8千総トンの船に対して最近では6千～2万総トンの船が多くなってきた。

この結果、1万5千重量トンのオイルタンカーでは—10m、8万重量トンでは—15m、10万重量トンでは—16mの水深が必要であるためにこれからの航路、泊地の水深は従来より深くしなければならなくなった。

さらに、新産業都市建設促進法または低開発地域工業開発促進法に応ずる港湾施設も必要となっている。

しかしながら地盤が良くて水深が十分である場所はほとんどなく、これからの港湾構造物は粘土、シルトなどのような軟弱地盤に建設する場合は非常に多くなっている。したがって最近ではほとんど軟弱地盤に対処する施工法がとられている。やり方としては鋼材(鋼杭、鋼矢板)を構造物の基礎に使用するのであるが、地盤の軟弱の程度、構造物のタイプに応じて鋼杭を使用したり、鋼矢板を使用したりまたは地盤をある程度改良して鋼杭、鋼矢板を打込んだりする。

港湾における鋼製構造物建設の技術的な裏付けとして運輸省港湾技術研究所において設計計算法の研究、振動性状および耐震性の研究、地盤改良の研究などいろいろな行なわれている。まだ手掛けられなかった問題として鋼材の腐食ならびにその対策に関する研究がある。

鋼材としては鋼矢板がわが国において1920年頃から港湾で使用されているため少なからず鋼材の腐食、防食に関心が向けられてきた。一方腐食機構の一つとして異種環境間に発生する通気差電池または酸素濃淡電池があげられているが、野外環境におけるこのような異種環境間にまたがる腐食と単一環境内で発生する腐食との関係についてはまだはっきりされていない。とくに港湾では海水の存在のために腐食による侵食は避けられないしさらに鋼製構造物の建設がいちじるしく増加して行く傾向があるため、港湾における鋼材腐食の機構を解明することが腐食に対する対策を考える上においても重要であると思われる。したがって本報ではその足掛りの意味でこれまでの鋼材腐食に対する考えや調査結果を集めるとともに実際条件下における鋼材腐食傾向についての実験結果の一部を腐食速度推定法の検討結果を中心として纏めて

※構造部主任研究官

みた。

2. 港湾における鋼材腐食

これまでは単一層、たとえば海水とか粘土層などに鋼材片を埋設したときに発生する腐食の概念でいろいろな層からなる自然条件下で起る腐食を論ずる傾向が支配的であったが、以下に紹介するように港湾環境で使用する鋼材(鋼矢板、鋼杭)には別の腐食現象の発生も予想される。しかもこのマクロ腐食は従来からよく検討されているミクロ腐食とどのような関係で実際の鋼製構造物に発錆するのは全く見当がつかない現状である。

したがって港湾環境における鋼材腐食に対するこれまでの見方を実際条件によく合致するものに改めることを始める意図で本章では港湾における鋼製構造物の腐食環境、腐食現象、これまでの腐食調査例、腐食速度の経年変化および現行の鋼製構造物設計法と腐食速度との関係などについて順次述べることにする。

2-1 鋼製構造物の腐食

2-1-1 鋼製構造物

港の建設としては大別して(1)構造物の基礎地盤、(2)けい船岸、(3)防波堤の各施工がその対称となるが、このうち鋼材を使用する場合は主として(2)のけい船岸施工においてである。

したがって港湾における鋼製構造物は現在のところ大部分はけい船岸ということになるが、最近では(3)の防波堤に鋼材を使用する例も出てきている。

けい船岸はさらに次のように分けられる。

A: 矢板式

- a: 矢板式けい船岸 図—2.1
- b: 柵式けい船岸 図—2.2
- c: セル式けい船岸 図—2.3

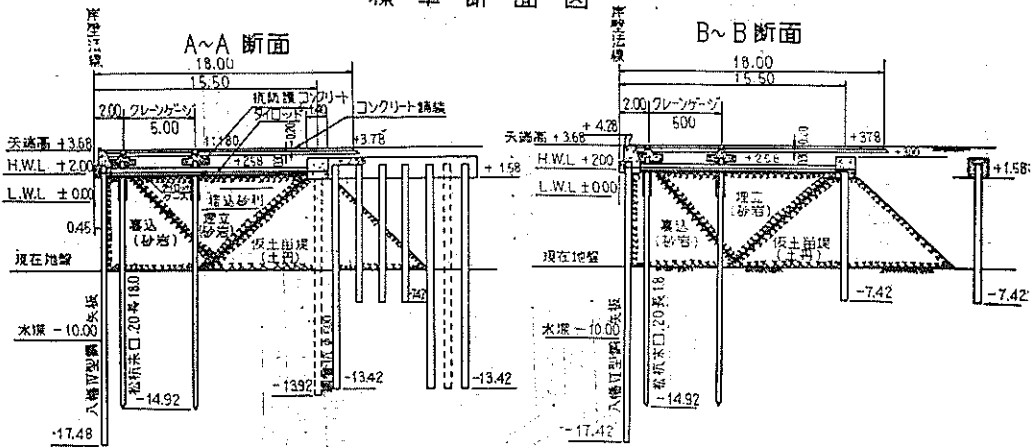
B: 杭式

- a: 横橋橋 図—2.4
- b: 突堤式けい船岸 図—2.5
- c: ディグッチド・ピア— 図—2.6
- b: ドルフィン 図—2.7
- e: 特殊けい船岸 図—2.8
- (f: 浮棧橋)

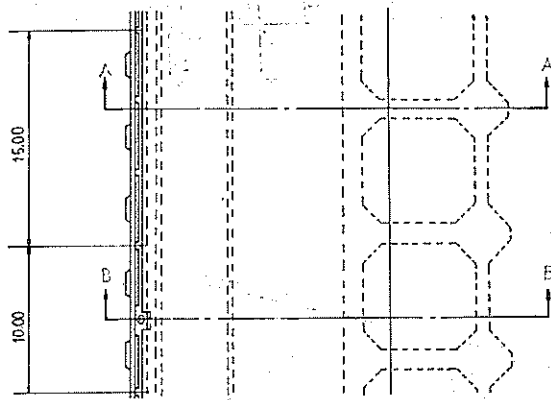
* 全面腐食と呼ばれているが本報ではこれを以下ミクロ腐食と云うことにする

**これをマクロ腐食と呼ぶことにする

標準断面図



一般平面図



タイロッド取付図

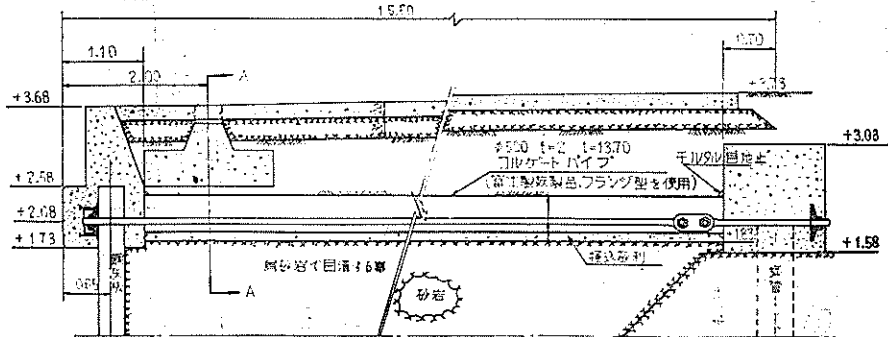
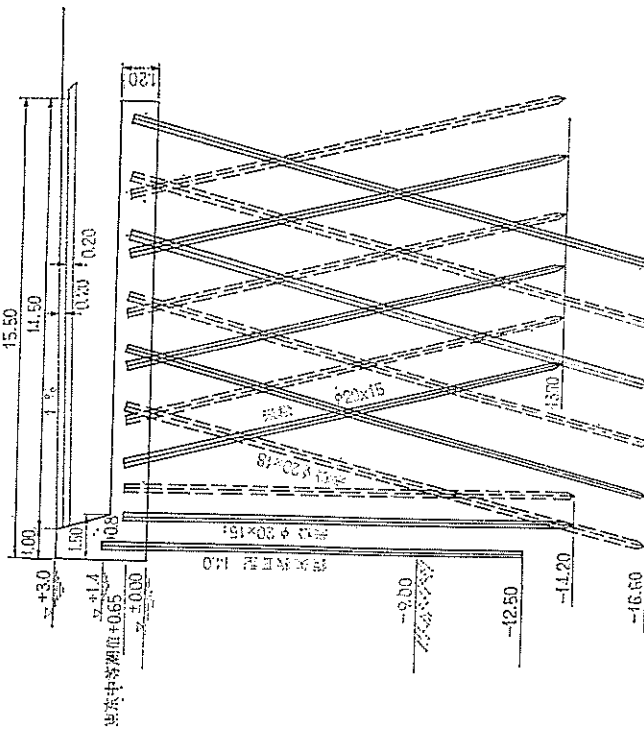


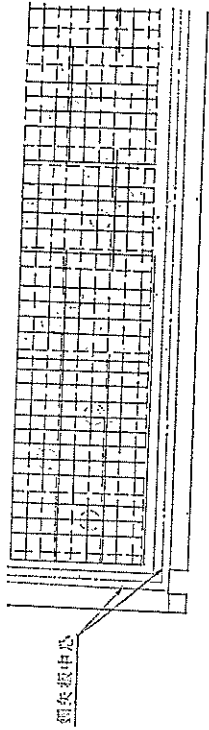
図-2.1 矢板式けい船岸例

標準断面図

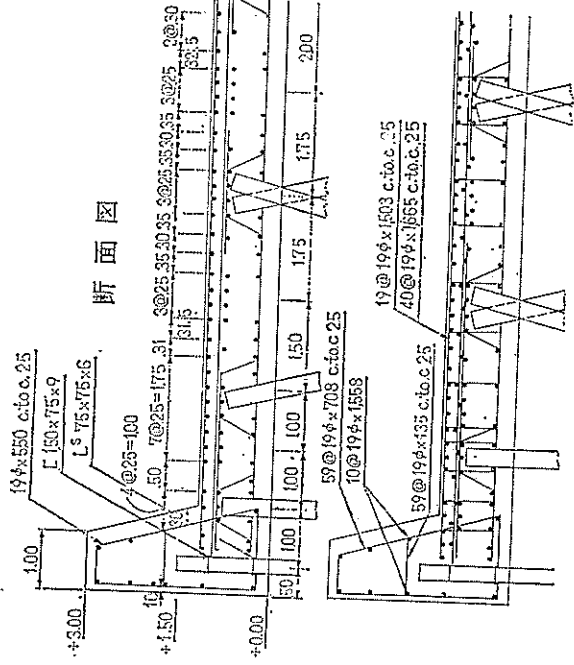


棚版配筋図

下層平面図



断面図



平面図

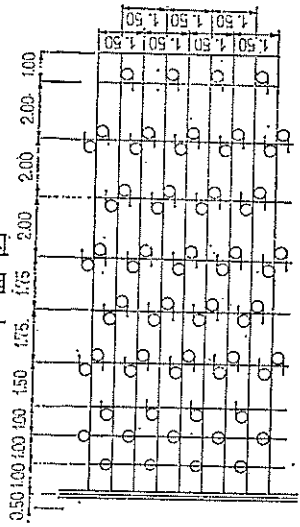
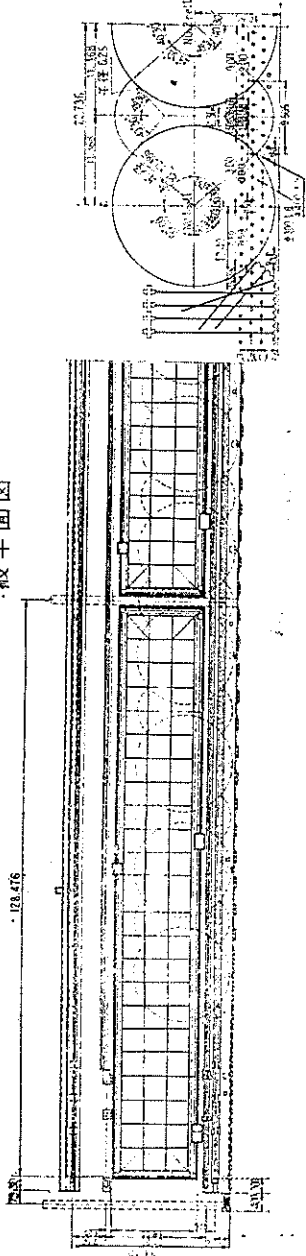
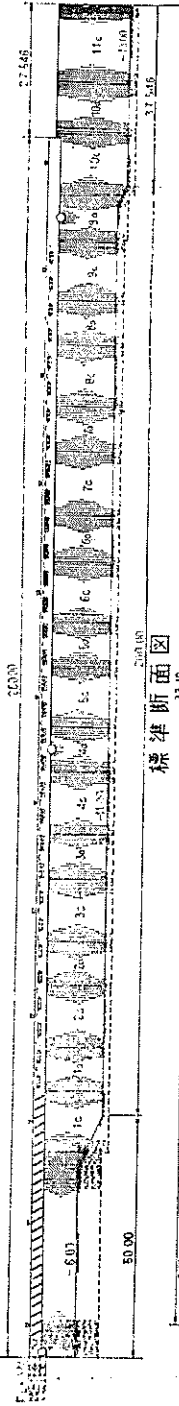


図-2.2 棚式けい船岸例

一般平面図



側面図



標準断面図

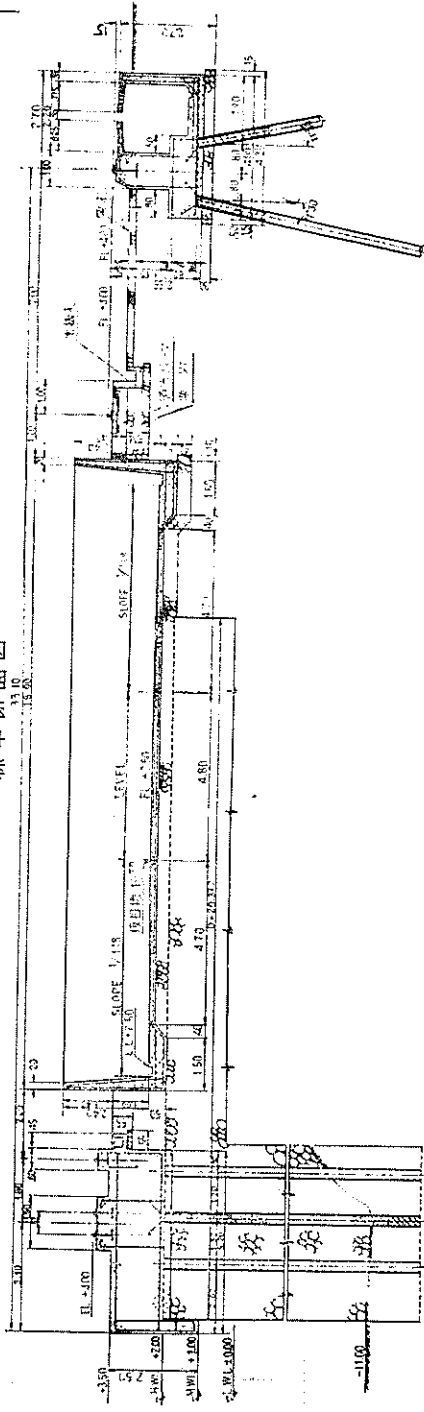


図-2.3 セル式けい船岸例

標準断面図

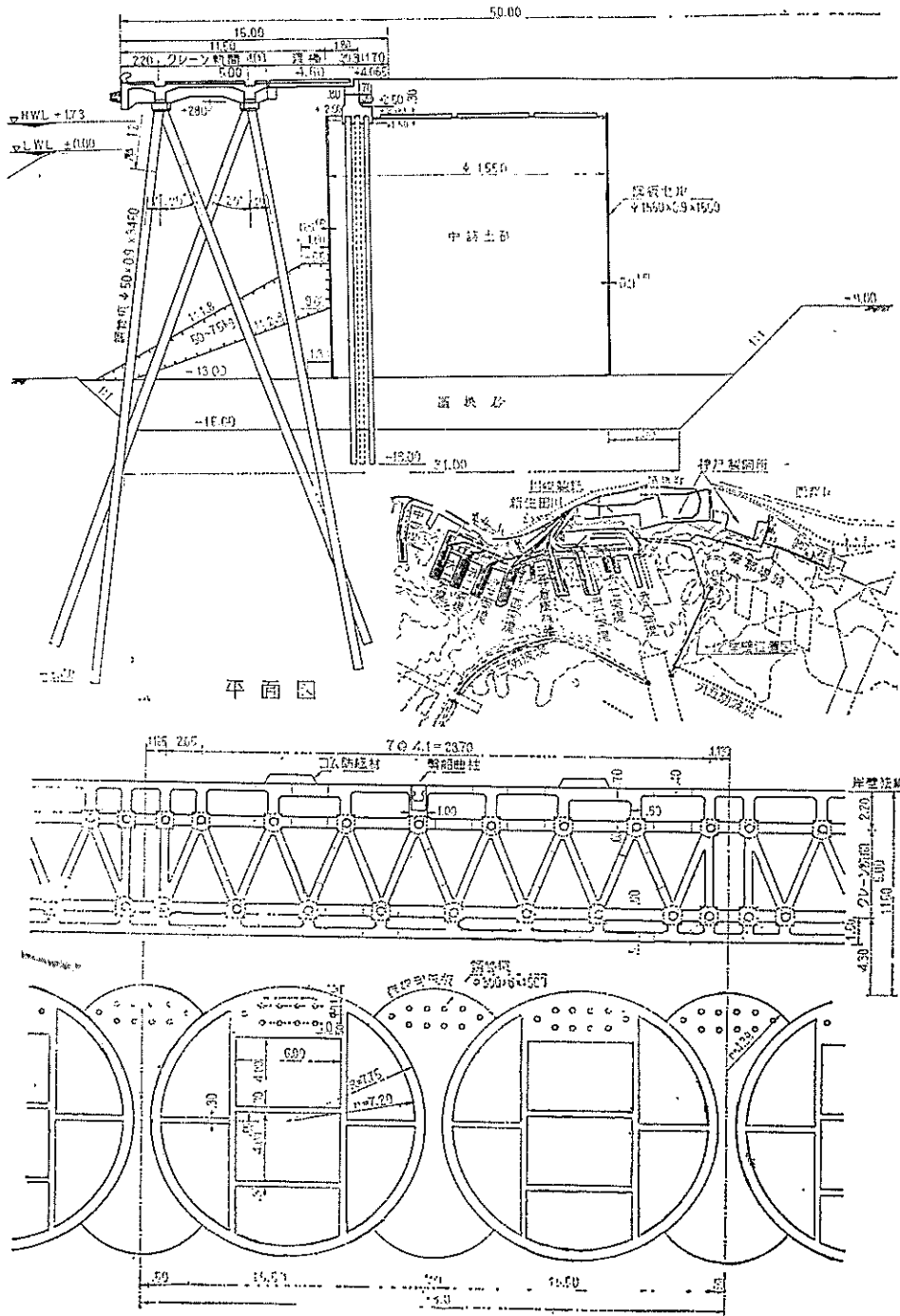
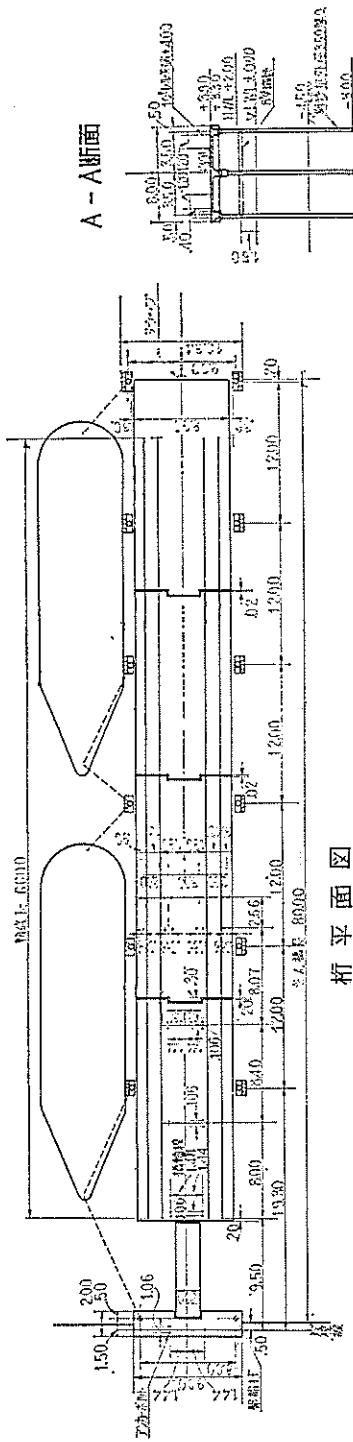


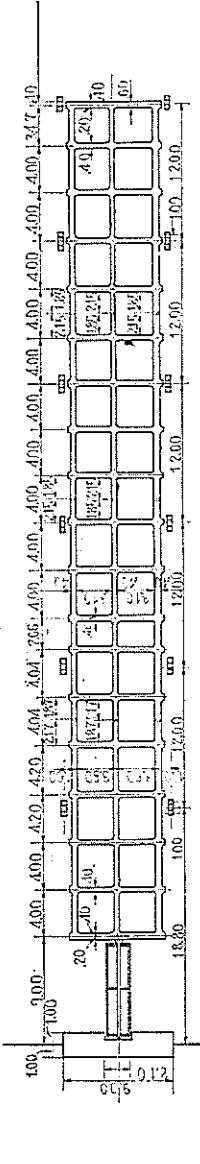
図-2.4 横棧橋例

一般構造図

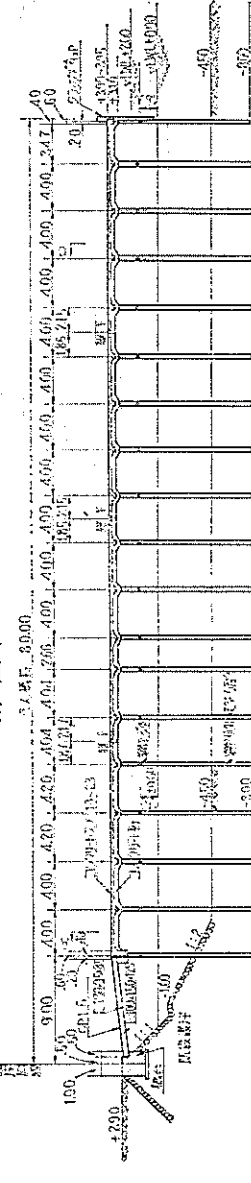
平面図



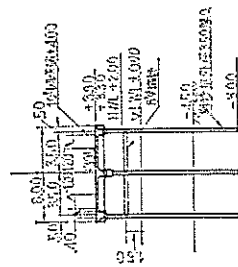
桁平面図



断面図



A-A断面



C-C断面

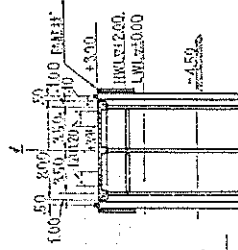
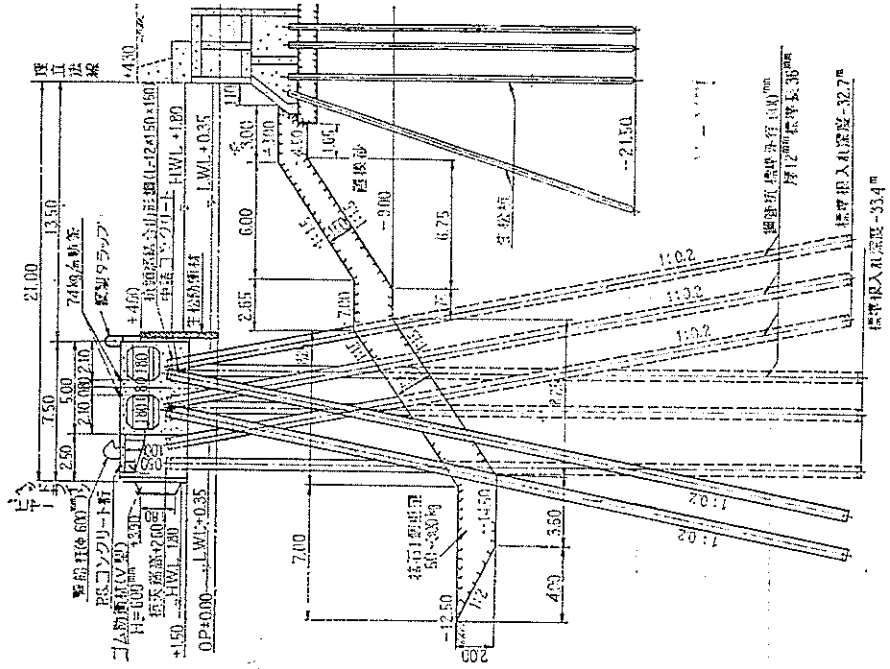


図-2.5 突堤式けい船岸例

断面図



一般構造図

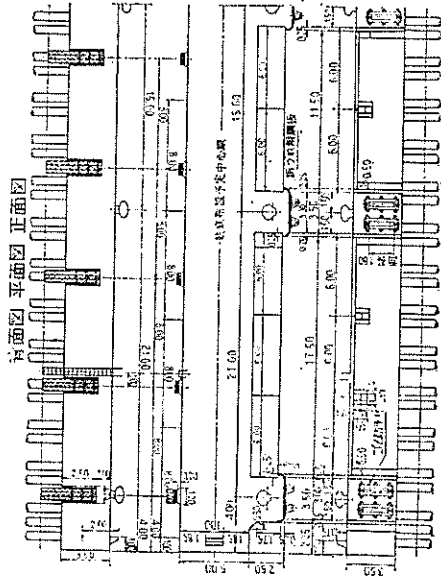


図-2.6 デタッチャド・ピア一例

2-1-2 鋼製構造物用鋼材

(1) 鋼矢板

日本では1920年頃より港湾において鋼材が鋼矢板として使用されており、したがって港湾における鋼材腐食速度の調査対象として最もとりあげられてきた。

鋼矢板にはU型（普通型）、Z型、直線型、箱型などがある。

U型

U型は普通型ともいわれるもので形状は図-2.9に示すようにU字型をしており、これを図-2.10のように互いにかみ合わせて使用する。

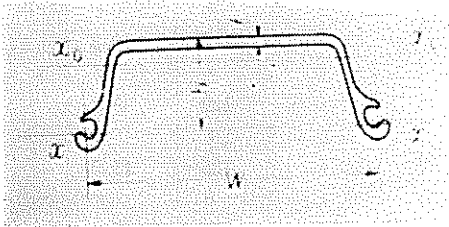


図-2.9 U型鋼矢板

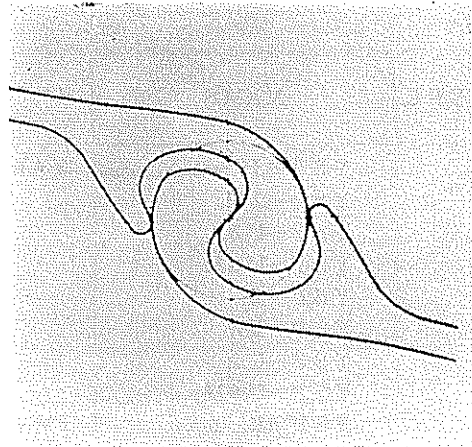


図-2.10 U型鋼矢板の噛合い部

化学成分および機械的性質は表-2.1の通りである。また寸法、重量、メーカーなどは一覧表として一括して表-2.2に示す。

表-2.1 鋼矢板の化学的、機械的性質

	化 学 組 成				機 械 的 性 質		
	S %	P %	Cu %	Nb+V %	引張強さ kg/mm ²	降 伏 点 kg/mm ²	伸 び %
1	<0.04	<0.04	>0.25		>50	>30	>18
2	<0.04	<0.04	>0.25	<0.15	>55	>40	>16

表-2.2 日本国内メーカー

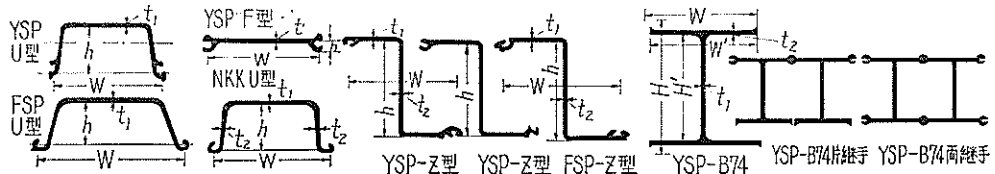
TYPE	NAME	MAKER	寸 法 (mm)				
			W	h	t ₁	t ₂	
U T Y P E S H E E T P I L E	YSP-I	YAWATA. S	400	75	8.0		
	YSP-IH	"	"	"	"		
	YSP-U5	"	"	80	7.6		
	YSP-U5H	"	"	"	"		
	YSP-II	"	"	"	100	10.5	
	YSP-IIH	"	"	"	"	"	
	YSP-U9	"	"	"	110	9.3	
	YSP-U9H	"	"	"	"	"	
	FSP-II	FWI. S	"	"	100	10.5	
	FSP-IIH	"	"	"	"	"	
	FSP-IIA	"	"	"	120	9.2	
	FSP-IIAH	"	"	"	"	"	
	YSP-III	YAWATA. S	"	"	125	13.0	
	YSP-IIIH	"	"	"	"	"	
	YSP-U15	"	"	"	150	12.2	
	YSP-U15H	"	"	"	"	"	
	FSP-III	FWI. S	"	"	125	13.0	
	FSP-IIIH	"	"	"	"	"	
	FSP-IIIA	"	"	"	150	13.1	
	FSP-IIIAH	"	"	"	"	"	
	YSP-IV	YAWATA. S	"	"	155	15.5	
	YSP-IVH	"	"	"	"	"	
	YSP-U23	"	"	"	175	14.7	
	YSP-U23H	"	"	"	"	"	
	FSP-IV	FWI. S	"	"	170	15.5	
	FSP-IVH	"	"	"	"	"	
	FSP-IVA	"	"	"	185	16.1	
	FSP-IVAH	"	"	"	"	"	
	NKK-4	NIPPON. S. P	500	180	11.0	9.0	
	NKK-特4	"	"	"	"	"	
	NKK-5	"	"	"	16.0	"	
NKK-特5	"	"	"	"	"		
YSP-V	YAWATA. S	420	175	22.0			
FSP-VL	FVJI	500	200	24.3			
YSP-VH	"	"	"	"			
Z T Y P E	YSP-Z14	YAWATA. S	400	235	9.4	8.2	
	YSP-Z14H	"	"	"	"	"	
	YSP-Z25	"	"	305	13.0	9.6	
	YSP-Z25H	"	"	"	"	"	
	YSP-Z32	"	"	344	14.2	10.4	
	YSP-Z32H	"	"	"	"	"	
	FSP-Z35	FUJI. S	"	350	14.0	10.0	
	FSP-Z35H	"	"	"	"	"	

による鋼矢板断面性能表

断面積 (cm ²) 1枚当り	重量 (kg/m)		慣性モーメント (cm ²)		断面係数 (cm ³)		降伏点強度		許容応力度	許容モー メント t-m/m
	1枚当り	型巾1m 当り	1枚当り	型巾1m 当り	1枚当り	型巾1m 当り	σ_y (kg/cm ²)	σ_a (kg/cm ²)		
46.49	36.5	91.2	429	3,820	66.4	509	3000	2700	13.8	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	18.3	
46.21	35.5	88.8	454	4,220	67.4	527	3000	2700	14.3	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	19.0	
61.18	48.0	120.0	986	8,690	121	869	3000	2700	23.5	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	31.3	
55.01	43.2	108.0	1,070	9,680	120	880	3000	2700	23.8	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	31.6	
61.2	48.0	120	1,240	8,740	152	874	3000	2700	23.6	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	31.4	
55.0	43.2	108	1,460	10,600	160	880	3000	2700	23.8	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	31.6	
76.42	60.0	150	1,920	16,400	196	1,310	3000	2700	35.5	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	46.7	
74.40	58.4	146	2,700	22,800	238	1,520	3000	2700	41.2	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	54.5	
76.42	60.0	150	2,220	16,750	223	1,340	3000	2700	36.4	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	48.0	
74.4	58.4	146	2,790	22,800	250	1,520	3000	2700	41.2	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	54.5	
97.36	76.4	191	3,690	31,900	311	2,060	3000	2700	55.8	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	73.7	
94.21	74.0	185	4,380	39,400	330	2,250	3000	2700	61.0	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	80.5	
96.9	76.1	190.2	4,670	38,641	362	2,243	3000	2700	61.6	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	81.5	
94.2	74.0	185	5,300	41,600	400	2,250	3000	2700	61.0	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	80.5	
96.81	76.0	152	6,714	36,520	374.8	2,030	3200	2700	55.0	
107.8	84.6	141	5,552	35,783	382.8	2,002	"	"	54.3	
130.4	102.0	204	5,876	51,860	399.6	2,882	"	"	78.2	
146.4	115.0	192	6,207	51,117	407.6	2,840	"	"	77.0	
134.0	105.0	250	5,950	55,200	433.0	3,150	3000	"	35.3	
138.2	108.5	217	7,960	63,000	320.0	3,150	3000	4000	113.5	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	113.5	
66.09	51.9	130	6,480	16,200	552	1,380	3000	2700	37.4	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	49.4	
90.32	74.0	185	15,300	38,300	1,000	2,510	3000	2700	68.0	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	90.0	
107.7	84.5	211	21,900	54,900	1,280	3,190	3000	2700	86.5	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	115.0	
115.2	90.4	226	24,500	61,200	1,400	3,500	3000	2700	94.8	
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	126.0	

TYPE	NAME	MAKER	寸 法 (mm)			
			W	h	t ₁	t ₂
PILE	YSP-Z38	YAWATA. S	400	364	7.2	11.4
	YSP-Z38H	"	"	"	"	"
	YSP-Z45	"	"	360	21.5	12.5
BOX SHEET PILE	YSP-B74本体	YAWATA. S	400	410	10	13.5
	YSP-B74H本体	"	"	"	"	"
	YSP-B74H本体	"	420	422	"	"
	YSP-B74H片組手	"	"	"	"	"
	YSP-B74両組手	"	"	486	"	"
	YSP-B74両組手	"	"	"	"	"
FLAT TYPE	YSP-F	YAWATA. S	400	45	9.5	—
	YSP-FH	"	"	"	"	—

許容応力および許容モーメントの値は一時荷重時についての値であって降伏点強度の90%の値を用いた。常時の場



U型は必要に応じて図-2.11, 12に示すように組合せたり、図-2.13のように円形にしたり、また図-2.14, 15のように隅角を作ったりできる。

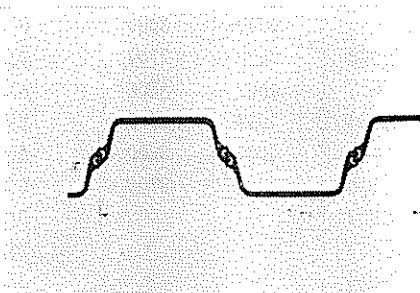


図-2.11 U字型鋼矢板使用例(1)

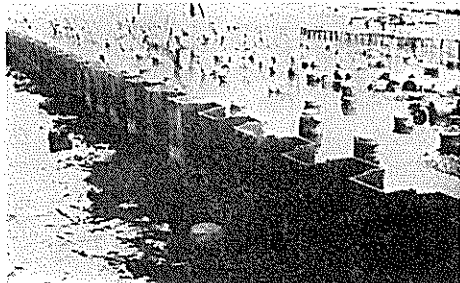


図-2.12 U字型鋼矢板使用例(2)

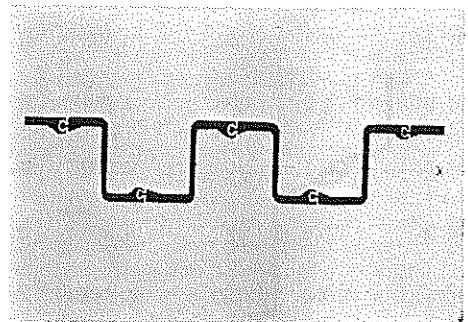


図-2.13 U字型鋼矢板使用例(3)

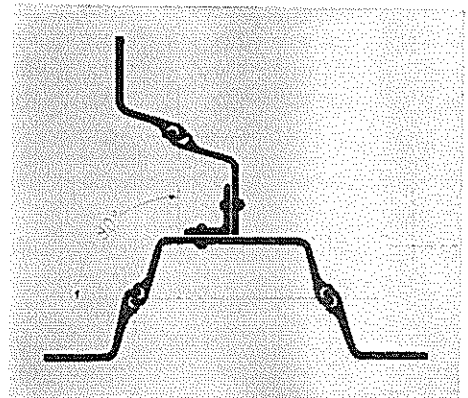
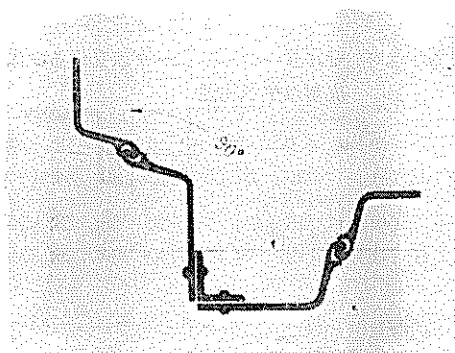


図-2.14 U字型鋼矢板使用例(4)

断面積 (cm ²) 1枚当り	重量 (kg/m)		慣性モーメント (cm ²)		断面係数 (cm ²)		降伏点強度 σ_y (kg/cm ²)	許容応力度 σ_a (kg/cm ²)	諸容モー メント t-m/m
	1枚当り	型巾 1 m 当り	1枚当り	型巾 1 m 当り	1枚当り	型巾 1 m 当り			
122.0	96.0	240	27,700	69,200	1,520	3,800	3000	2700	103.0
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	136.7
148.2	116.0	290	32,900	82,200	1,820	4,550	3000	2700	123.0
165.0	130		54,800		2,670		3000	2700	69.7/SHEET
"	"		"		"		4000	3600	96.0/SHEET
188.0	148	351	64,000	152,000	2,770	6,600	3000	2700	178.5
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	238.0
211.0	166	394	75,700	180,000	3,120	7,420	3000	2700	200.2
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	267.0
69.07	54.2	136	190	525	478	120	3000	2700	3.25
"	"	"	"	"	"	"	4000	3600	4.30

合においてはこの値の1/1.5の値を用いるものとする。

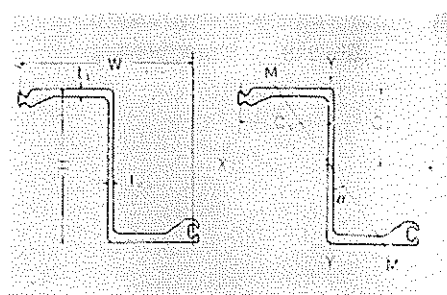


図—2.15 U字型鋼矢板使用例(5)

Z型

鋼矢板は土木・建築の基礎工事などに広く使用されているが、港湾建設用鋼材として能率的かつ安全に大型岸壁用鋼材が必要となり、運輸省港湾局および運輸技術研究所(現、港研)の指導によってこのZ型鋼矢板ができた。Z型鋼矢板は図—2.16, 17に示すように断面がZ字型をしており、図—2.18のように継手部がかみ合って連結される。

Z型鋼矢板の化学成分および機械的性質の規格はU型の規格に同じく表—2.1の通りである。寸法、重量、メ



図—2.16 Z型鋼矢板

—カーなどは表—2.2に示す。

Z型鋼矢板は図—2.19のように連結して使用される。

直線型

直線型鋼矢板はセルラー・コフアーダム(円形囲堰)として使用されるもので図—2.20に示すように直線型をしており、図—2.21のようにかみ合う。

直線型鋼矢板の化学成分および機械的性質の規格はU型の規格に同じく表—2.1の通りである。寸法、重量、メーカーなどは表—2.2に示す。

直線型鋼矢板は図—2.22のように連結される。

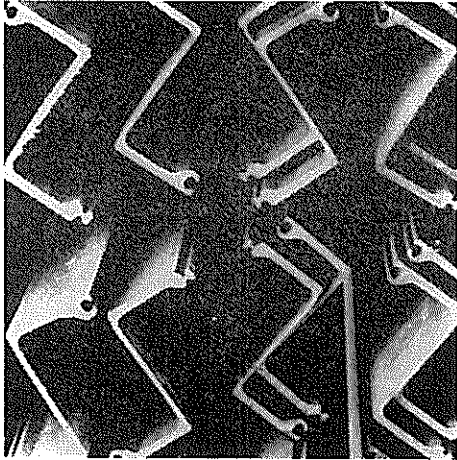


図-2.17 Z型鋼矢板

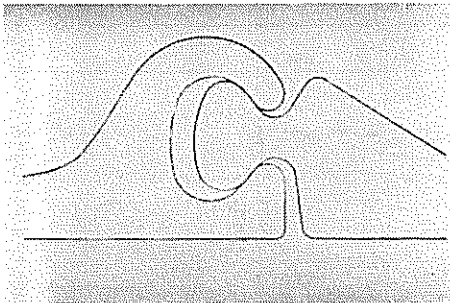


図-2.18 Z型鋼矢板継手部

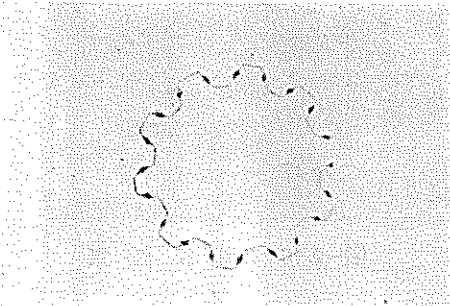


図-2.19 Z型鋼矢板連結状況

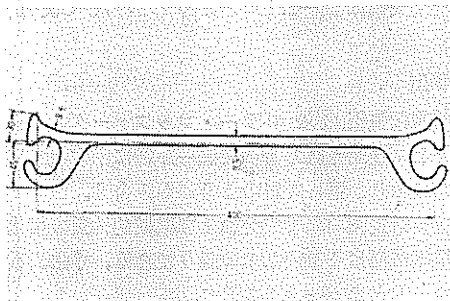


図-2.20 直線型鋼矢板

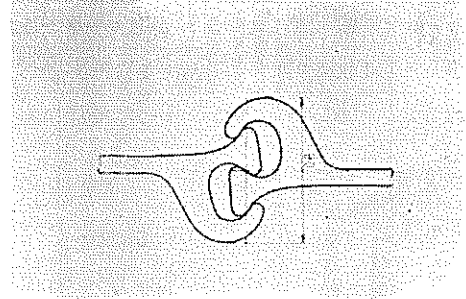


図-2.21 直線型鋼矢板継手部

円筒作成に必要な直線型鋼矢板の 所要枚数は表-2.3の通りである。

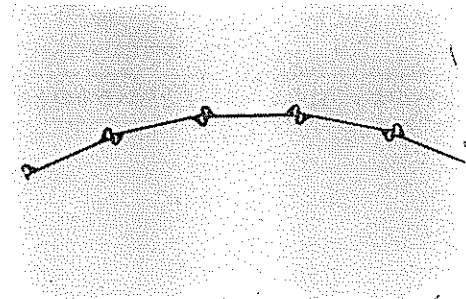


図-2.22 直線型鋼矢板連結状況

表-2.3 セルラーコッファードムを作るのに必要な矢板枚数

径 (m)	4.6	6	8	9	10	12	14	16
鋼矢板 (枚)	36	48	64	72	80	94	110	126
径 (m)	18	20	22	24	26	28	30	
鋼矢板 (枚)	142	158	174	190	204	220	236	

直線型鋼矢板を用いて作られるセルラー・コッファードムとしては図-2.23に示すように4つの型がありその一例を図-2.24に示す。

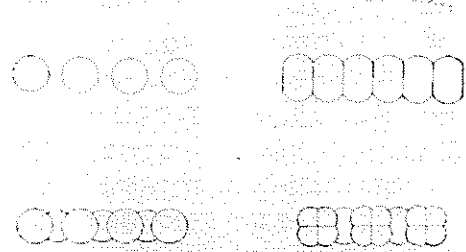


図-2.23 直線型鋼矢板によるセルラーコッファードム

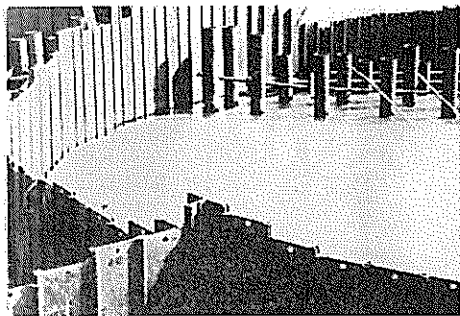


図-2.24 直線型鋼矢板使用例

箱型

以上の外に箱型鋼矢板がある。形状、寸法、重量、メーカーなどは表-2.2の通りである。

(2) 鋼管杭

最近構造物の基礎に鋼管杭が使用されている。鋼管は製造工程によってスパイラル溶接鋼管、電縫鋼管がある。寸法も要求によって各種のものが有り鋼管の外径200~3,200mm、厚さ4.5mm~50mm、長さ16mまで製造される。

鋼管杭の品質としては表-2.4、5に示す規格がある。

表-2.4 機械的性質

	Chemical Composition %					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
(1)	0.18	0.03	0.46	0.016	0.015	0.15
(2)	0.15	0.40	1.30	0.016	0.015	0.15

表-2.5 機械的性質

	JISG 3444	鋼材片	降伏点	引張り	伸び	切断
			kg/m ²	強さ		
			kg/m ²	kg/m ²	%	方所
スパイラル 鋼管	STK 41	A	31.2	41.9	36.4	C
		B	32.5	44.8	40.6	C
		B	33.0	44.2	28.0	A
	STK 50	A	34.1	54.4	37.3	C
		B	38.7	55.4	35.5	C
		B	43.8	56.6	23.0	A
溶接鋼管	STK 41	A	32.8	43.7	39.6	C
		B	—	50.3	—	A

- A : 鋼管体
- B : 鋼管溶接部
- C : 鋼管中心部

鋼管の一例を図-2.25に示す。鋼管は適宜地盤条件により図-2.26、27のように現地で溶接して長尺鋼材として打込む。打込みの終わった鋼管は図-2.28、29のように頭部加工をする。港湾では図-2.30のように棧橋や図-2.31のようにドルフィンなどに使用されているが、このほか図-2.32のように建築地盤にも打込まれている。また鋼管に図-2.33、34に示すように接手部を接続して鋼管矢板として使用する場合もある。図-2.35、36は鋼管矢板施工中の写真である。



図-2.25 鋼管杭

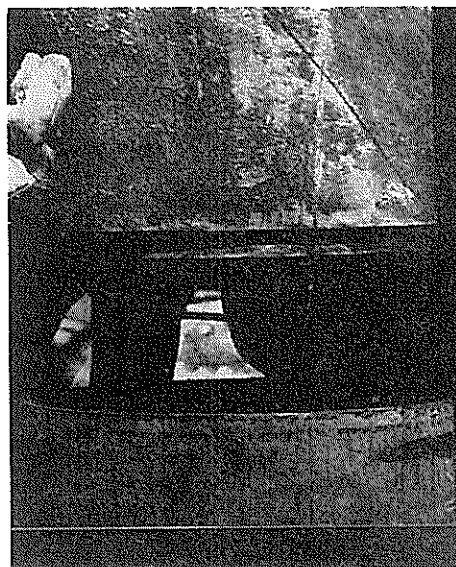


図-2.26 鋼管杭の接続



図-2.27 鋼管杭の溶接



図-2.28 鋼管杭の頭部加工（1）

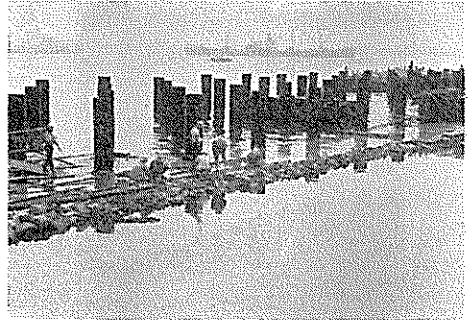


図-2.30 鋼管杭の使用例（1）棧橋

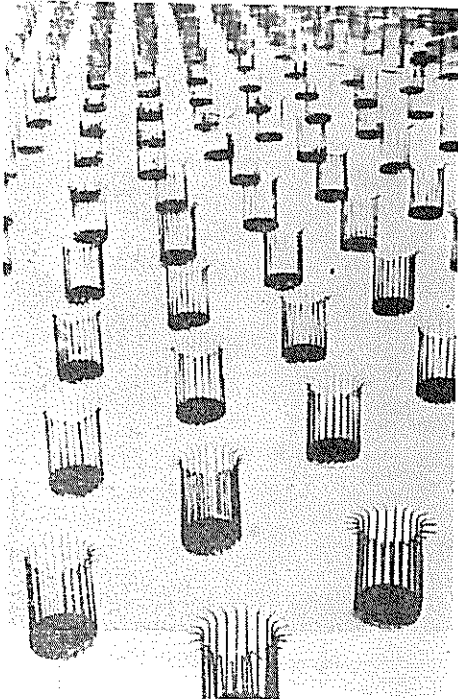


図-2.29 鋼管杭の頭部加工（2）

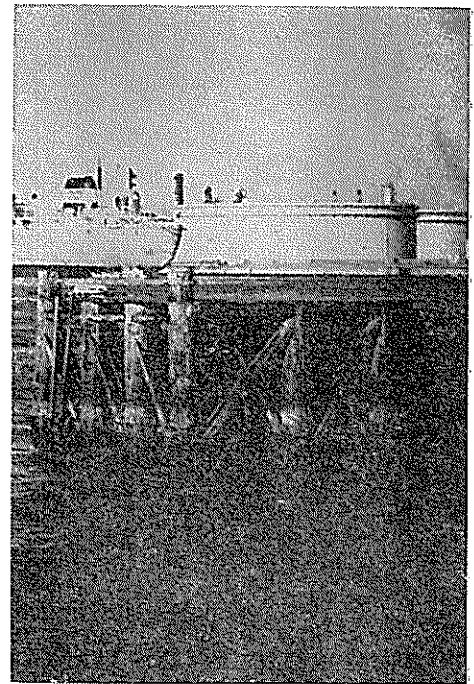


図-2.31 鋼管杭の使用例（2）ドルフィン

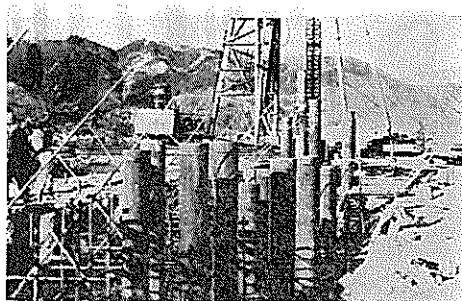


図-2.32 鋼管杭の使用例(3) 建物基礎

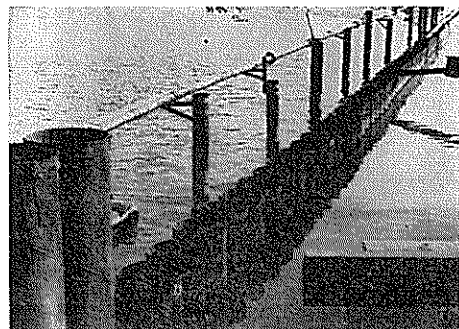


図-2.36 鋼管矢板使用例(2)

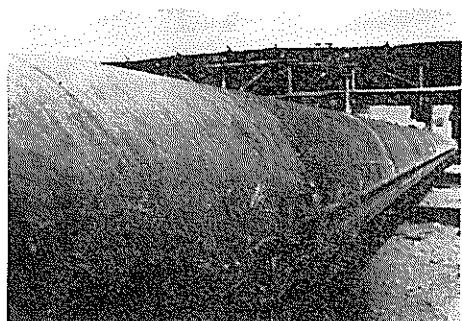


図-2.33 鋼管矢板

鋼管の頭部、先端の形状は地盤条件およびハンマーの打撃力に応じて図-2.37、38に示すタイプがある。その一例を図-2.39に示す。

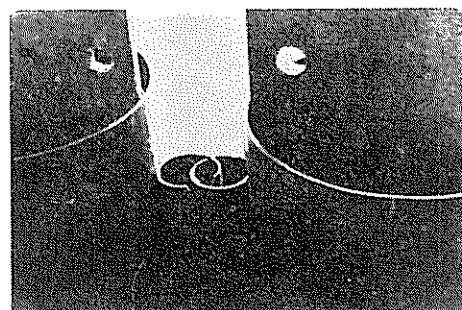


図-2.34 鋼管矢板の継手部

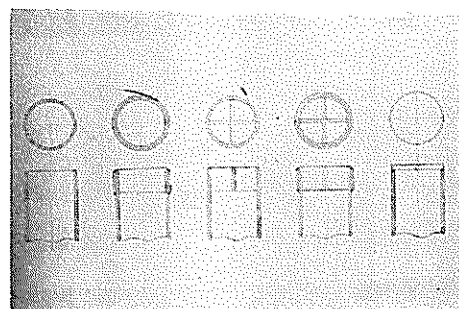


図-2.37 鋼管杭の頭部

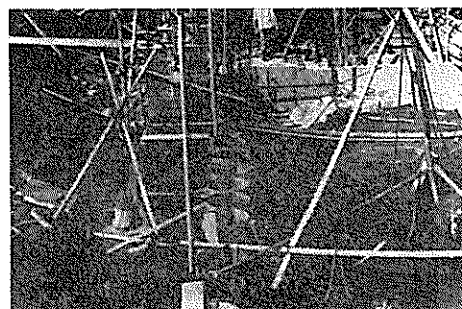


図-2.35 鋼管矢板使用例(1)

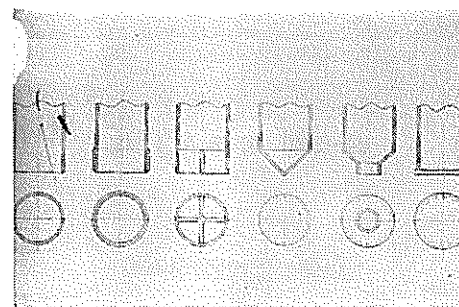


図-2.38 鋼管杭の先端部

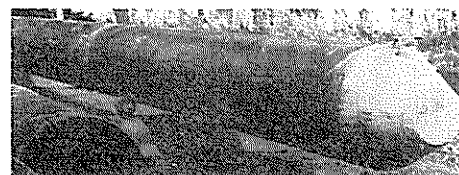


図-2.39 鋼管杭の先端部

(3) H形鋼

日本では昭和34年よりH杭が生産されて港湾関係でも使用され始めている。

H杭は断面がH形をした鋼材で用途によって構造用H形鋼(図-2.40)と基礎杭用H形鋼(図-2.41)とに分けられる。H形鋼の製造方法としては図-2.42に示すような単一圧延と図-2.43に示すようにフランジとウェブを溶接する方法がある。H形鋼の形状、寸法はいろいろでウェブ高さ1,000mm, フランジ巾で400mmまでの寸法は製造されている。

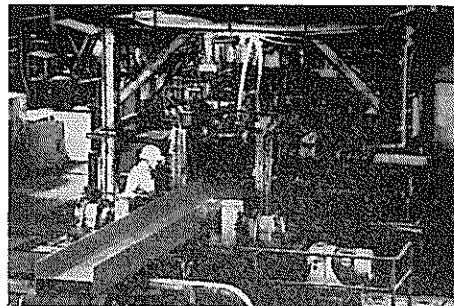


図-2.42 単一圧延によるH杭

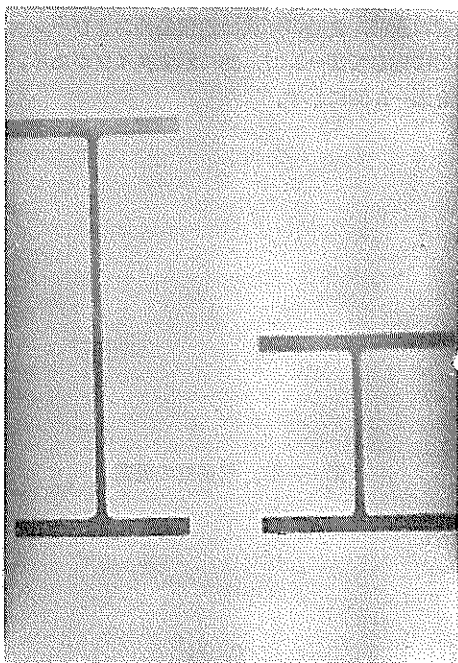


図-2.40 構造用H杭

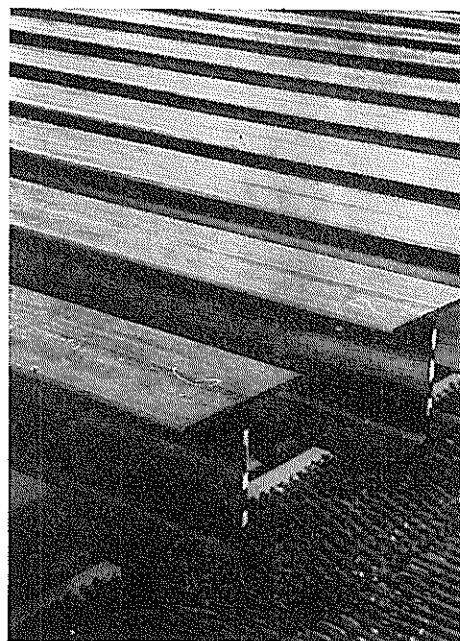


図-2.43 溶接によるH杭

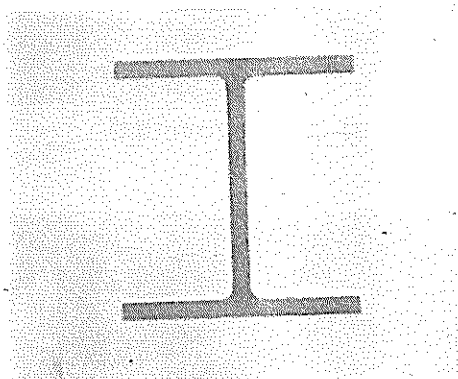


図-2.41 基礎杭用H杭

H形鋼は次の方法で打込まれる。

- (イ) ディゼル・ハンマーによる打込み 図-2.44
- (ロ) スチーム・ハンマーによる打込み 図-2.45
- (ハ) ドロップ・ハンマーによる打込み 図-2.46
- (ニ) 振動杭打機による打込み 図-2.47
- (ホ) 鋼製槽による打込み 図-2.48
- (ヘ) クローラ・クレーンによる打込み 図-2.49

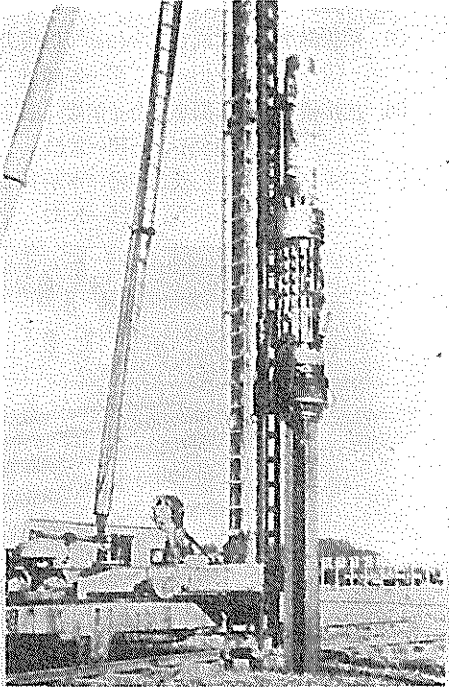


図-2.44 ディーゼル・ハンマーによる打込み

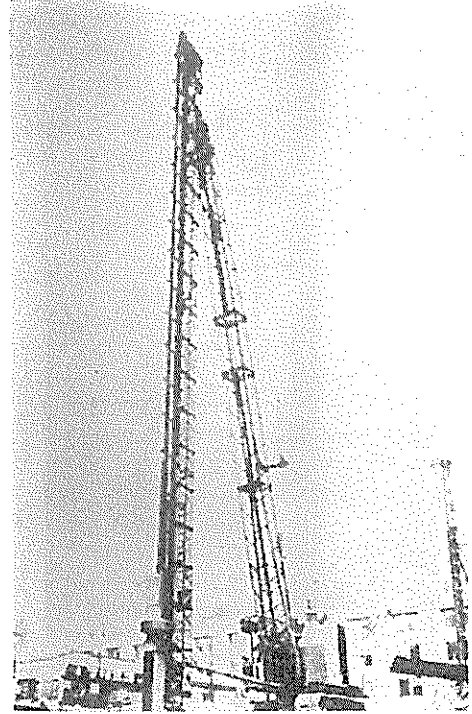


図-2.46 ドロップ・ハンマーによる打込み

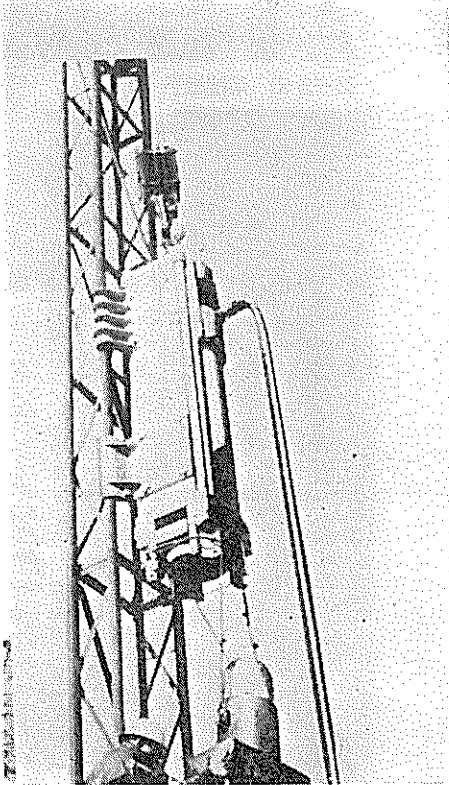


図-2.45 スチーム・ハンマーによる折込み

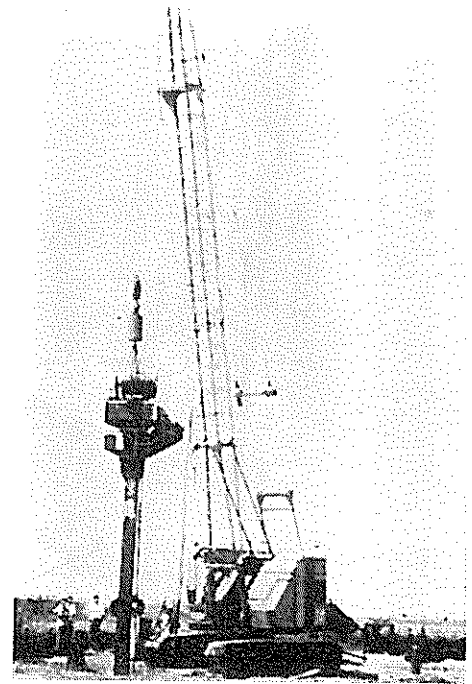


図-2.47 振動杭打機による打込み

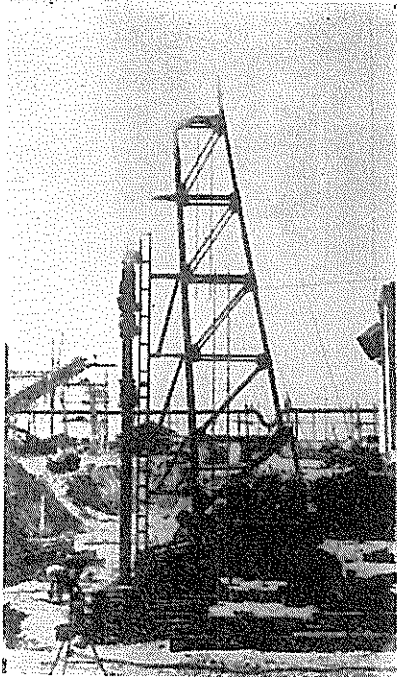


図-2.48 鋼製槽による打込み

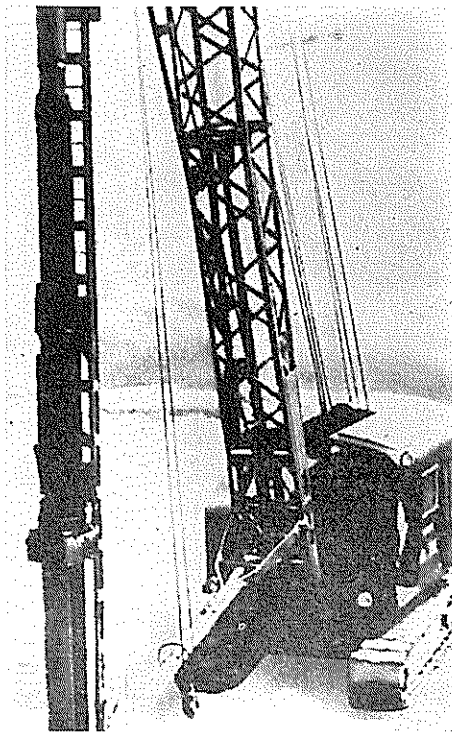


図-2.49 クローラ・クレーンによる打込み

H形鋼は次の方法で接続されて打込まれる。

- (イ) 溶接継手：全断面を突合わせて溶接する。 図-2.50
- (ロ) 溶接継手：全断面を突合せ溶接に添接板を併用する。 図-2.51
- (ハ) ボルト継手：添接板と一緒にボルトで締める。 図-2.52

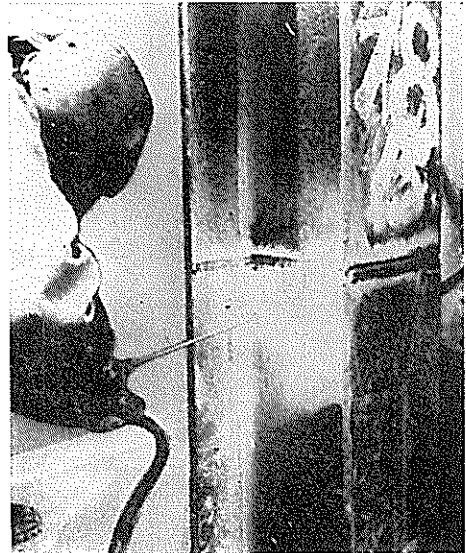


図-2.50 溶接継手(1)



図-2.51 溶接継手(2)

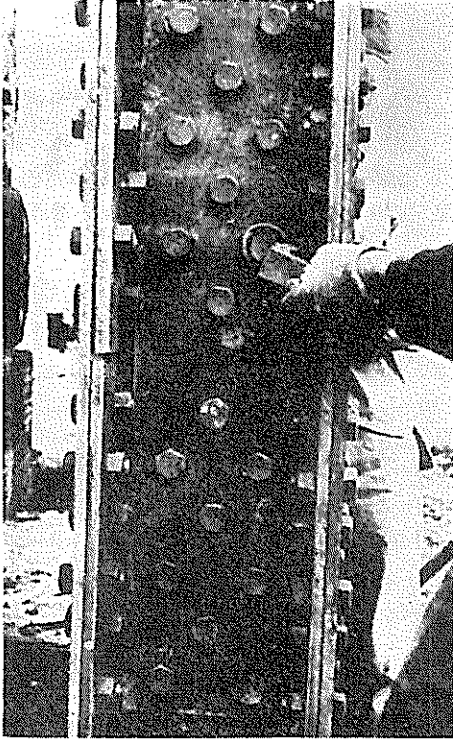


図-2.52 ボルト継手

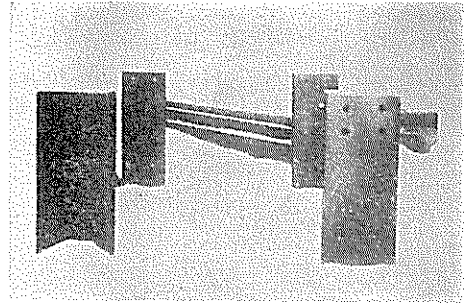


図-2.54 H杭頭部(2)

H形鋼の頭部はいろいろの目的のために次のように加工される。

- (イ) ハンマーの平均打撃応力が杭の全断面に対してスチールの降伏点強度以下の場合には図-2.53のように鋼板を溶接して補強する。

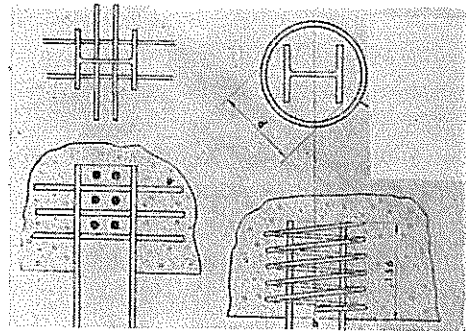


図-2.55 H杭頭部(3)

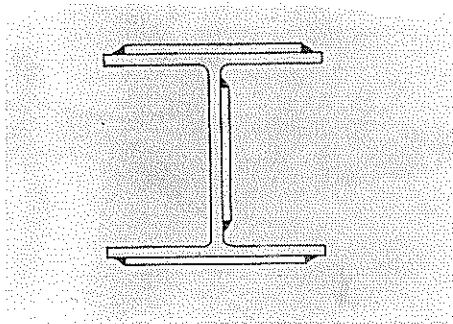


図-2.53 H杭頭部(1)

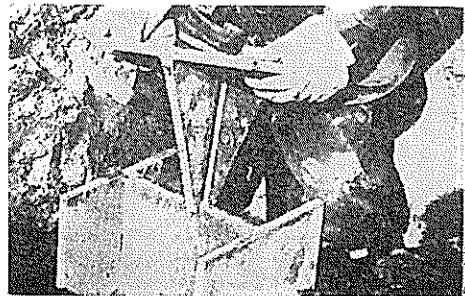


図-2.56 H杭頭部(4)

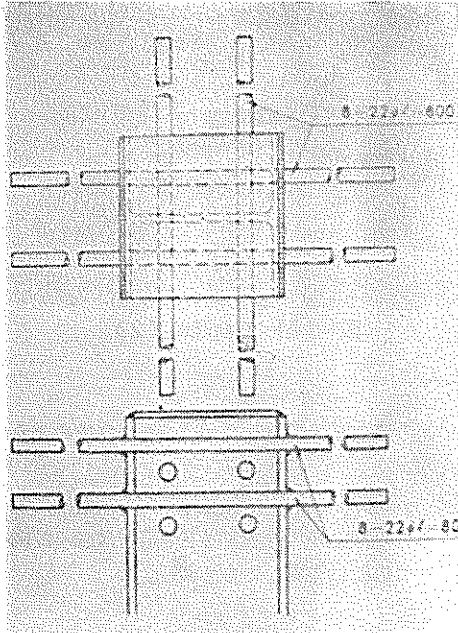


図-2.57 H 杭 頭 部

- (㉑) 杭と上部基礎との結合をよくするために図-2.54のように杭の頭部に鉄筋挿入用の穴をあけて図-2.55のように固定する。(上部基礎との結合部が短いとき)
- (㉒) 杭の頭部が底版中に埋め込まれる場合は図-2.56, 57のように鉄板を平に溶接して上部基礎との接触面積を大きくする。

港湾におけるH形鋼の使用例は次の通り。

- (イ) ドックの導杭に使用 図-2.58
- (ロ) 矢板打込み用導杭に使用 図-2.59
- (ハ) 波除堤に使用 図-2.60
- (ニ) 棧橋に使用 図-2.61
- (ホ) 橋脚に使用 図-2.62

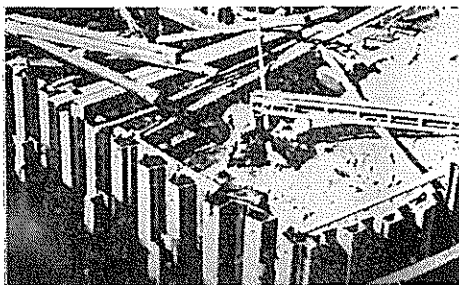


図-2.58 H杭使用例(1) ドックの導杭

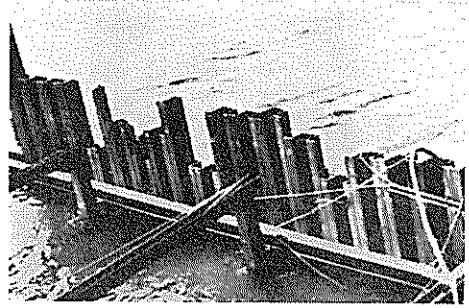


図-2.59 H板使用例(2) 矢杭打込み用導杭

H形鋼の材質は次の通りである。

- 一般構造用圧延鋼材 (JIS G3101)…SS41, SS50
- 溶接構造用圧延鋼材 (JIS G3106)…SM41, SM50
- 溶接性高張力鋼

(4) コルゲート・セル

港湾では上述した鋼矢板セルの外にコルゲート部材を用いるコルゲート・セルがある。これは図-2.63に示すようなコルゲート部材を用いてセルを陸上で組立て図-2.64, 65のように施工地点に設置する。次に図-2.66, 67のように砂の中詰めの上部は粗石を入れてコンクリートで固める。セルの裏側は図-2.68のように砂を1m程度盛る。

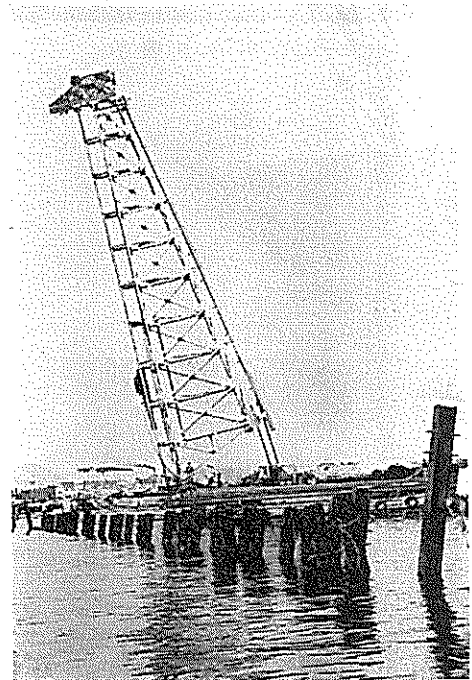


図-2.60 H杭使用例(3) 波除堤

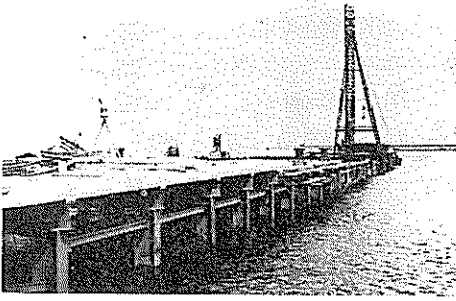


図-2.61 H杭使用例(4) 棧橋

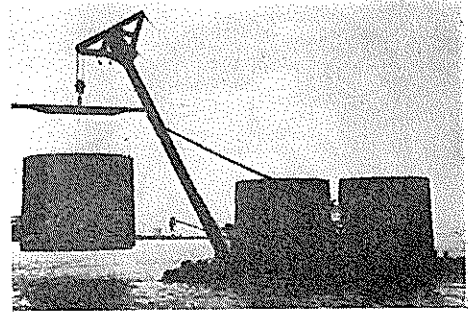


図-2.64 コルゲート・セルの設置(1)

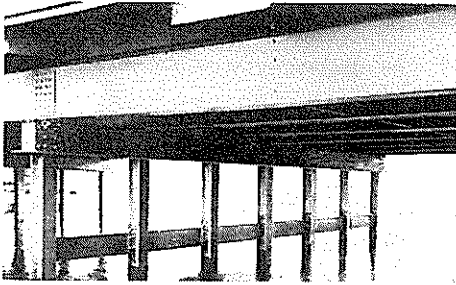


図-2.62 H杭使用例(5) 橋脚

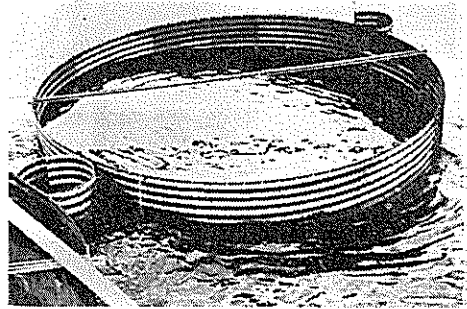


図-2.65 コルゲート・セルの設置(2)



図-2.63 コルゲート・セルの組立て



図-2.65 コルゲート・セルの中詰め

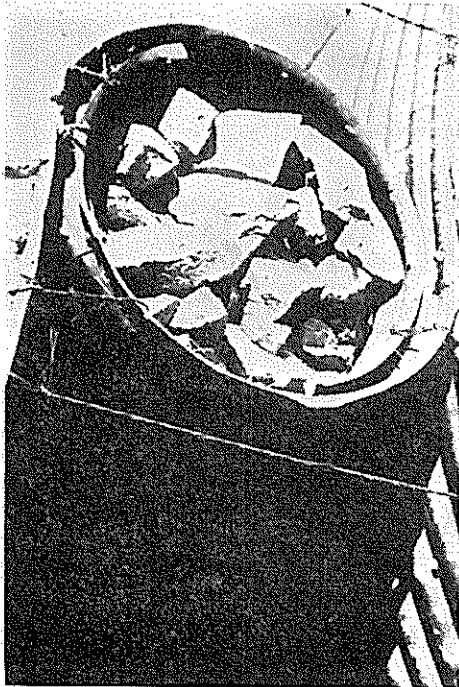


図-2.67 コルゲート・セル継手部の中詰め

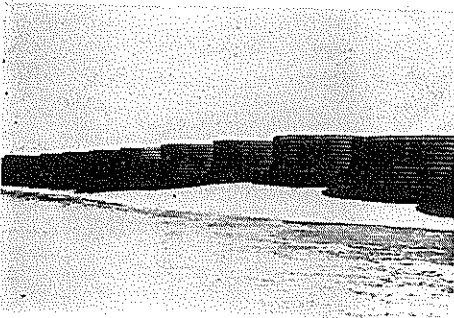


図-2.68 コルゲート・セルの裏側

(5) タイロッド

鋼矢板の前傾を防ぐために図-2.69に示すようにタイロッドで鋼矢板を陸側に引張る。

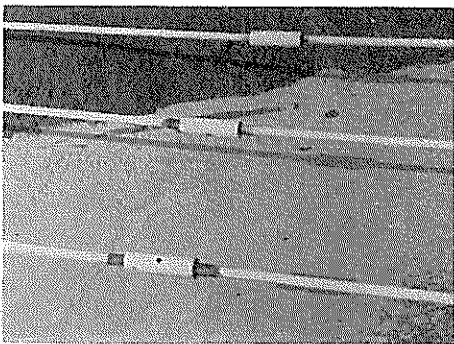


図-2.69 タイロッド

2-1-3 腐食環境

港湾における腐食環境は次のように分けられるが港湾鋼製構造物に対しては通常(2)~(5)が考えられる。

- (1) Atmospheric zone (海気帯)
- (2) Spray and splash zone (H.W.L. 以上)
(飛沫帯)
- (3) Tidal zone (H.W.L.~L.W.L.)
(干満帯)
- (4) Submerged zone (海水帯)
- (5) Mud zone (泥層帯)

この外河口港では(4)として河水帯(実際は海水と河水より成る場合が多い)がある。

一方、各種けい船岸は鋼材腐食の立場から

- (1) 裏込めのある岸壁タイプ
- (2) 裏込めのない棧橋タイプ に大別される。

この状況は図-2.1~8に示されている。

各種けい船岸がおかれる腐食環境の例を表-2.6~13に示す。

以上のように港湾で使用する鋼材は海水との接触を避けることができないので、以下海水の諸性質について述べておく。

(1) pH

天然の海水は pH 値を比較的一定に保ち得る一種の緩衝液である。通常塩分および大気中と水中における動植物が発する炭酸ガスの分圧により pH は 8.1~8.3の間に保たれるが、一般には7.5~8.4の範囲にある。

塩水は一般に希釈することによってその pH は中性(7.0)に近づくが、硫化水素が存在しているときは pH 値が低く(すなわち酸性と)なる。

日本の港湾における海水の pH は表-2.17~表-2.20に示すように大体 8.0 前後と考えられるが今後工業港では局地的に酸性のものも次第に多くなるのではないかと予想される。

(2) 溶存酸素

酸素の海水への溶解度は塩分濃度および温度によって異なる。河水に接する場合もあるので水および塩水に対する酸素の溶解度を表-2.14、15に示す。

表-2.14、15を参照すると塩水濃度が減少するにつれて溶存酸素量は増加してくるが河水や海水中の溶存酸素量は一般に 8 P P m 程度であると考えられる。

これを裏付けるために日本の港湾の海水についての定量値を紹介しておく。運輸省第四港湾建設局小倉材料検査場(現、小倉調査設計事務所、調査課)において各地で採取した海水を水道協会協定法としての「水中の溶存酸素定量法」で分析したところ、表-2.16に示す試験結

果を得た。同表によれば海水試料採取時の条件（干潮，満潮，水深，温度，河川の影響その他）が明らかではないが，日本の港湾における海水中の溶存酸素量は8～10ppmの範囲にあるようである。

(3) 比抵抗

海水の比抵抗は常温付近では25Ω-cm，水道水の比抵抗は 1×10^4 Ω-cm程度である。河水の比抵抗は海水の比抵抗の約50～250倍である。（厳密には比抵抗は温度の影響を受け海水の場合15～25°Cでは25～18Ω-cmのようになる。）

海底泥層の比抵抗は500Ω-cm程度以下と考えられる。（この測定値は昭和39年度に港湾建設局と港湾技術研究所とが着手した現地共同実験で得られたもので詳細は本報の続報を参照されたい。）

(4) 海水組成

日本の港湾の海水組成としては日本専売公社が三田尻海岸で製塩のために行なった分析結果で代表することにする。分析結果は表—2.17, 18, 19, 20, の通りである。これら各表によれば海水の組成，比重，pHは，四季，干潮，満潮による変化はほとんどないようである。ただ温度のみは夏冬の差が約20°Cある。

しかし表に示す海水は製塩のために綺麗であるが，工場廃水の流入する付近の海水は非常に汚染されておりpH，溶存酸素量などが異なる。

(4) 鋼材表面への付着生成物

鋼材表面への付着生成物は種類，付着生成量は場所および水深によっていろいろ異なるが，フジツボ (barnacle)，海草 (grass)，イガイ (mussel)，イソギンチャク (sea-anemone)，石灰質虫 (calcareous worm) などがある。

表-2.6 矢板式

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L.	L.W.L.	天端高	A
		現 在	所 定	(m)	(m)	(m)	(m)
1	宮古港出崎埠頭	-3.00	-4.00	+1.50	±0.00	+2.80	1.30
2	千葉港内港物揚場	-4.00	-4.00	+2.00	±0.00	+3.00	1.00
3	横須賀港小川3号物揚場	-4.00	-4.00	+2.00	±0.00	+3.00	1.00
4	富岡港神崎製紙KK物揚場	-4.00	-4.00	+1.80	±0.00	+3.00	1.20
5	豊橋港東都製鉄物揚場	-4.00	-4.00	+2.90	-0.20	+3.10	0.20
6	酒田港物揚場	-4.50	-4.50	+0.70	±0.00	+1.90	1.20
7	広島港浅上航運倉庫岸壁	-4.50	-4.50	+2.90	+0.95	+4.90	2.00
8	酒田港西埠頭	-8.00	-6.00			+2.10	
9	八戸港日石岸壁	-6.50	-6.50	+1.50	±0.00	+2.70	1.20
10	八戸港内港1号岸壁	-6.50	-6.50	+1.50	+0.13	+2.90	1.40
11	名古屋港東海製鉄岸壁	-7.50	-7.50	+2.60	±0.00	+4.50	1.90
12	戸畑港第1号岸壁	-7.50	-7.50	+2.00	±0.00	+3.50	1.50
13	津久見港小野田セメント岸壁	-8.00	-8.00	+1.90	±0.00	+4.88	2.98
14	苫小牧港西埠頭		-9.00	+1.50	±0.00	+3.70	2.20
15	小名浜港中央埠頭	-9.00	-9.00	+1.70	+0.10	+3.00	1.30
16	小名浜港西埠頭		-9.00	+1.70	±0.00	+3.00	1.30
17	小松島港金磯埠頭	-4.00 ? -7.00	-9.00	+1.80	±0.00	+3.50	1.70
18	徳山下松港東洋鋼板岸壁	-7.50	-9.00	+3.10	+0.39	+4.50	5.90
19	八幡港八幡製鉄西八幡岸壁	-9.00	-9.00	+2.00	±0.00	+4.50	2.50
20	釧路港中央埠頭	-9.00	-10.00	+1.45	±0.00	+3.00	1.55
21	横浜港山下第5バース	-10.00	-11.00	+2.00	±0.00	+3.68	1.68
22	室蘭港富士製鉄岸壁	-13.00	-13.00	+1.50	+0.47	+4.00	2.45
23	神戸港神戸製鋼灘浜岸壁	-13.00	-13.00	+1.70	±0.00	+3.50	1.80

A: スブラッシュ・ゾーン B: タイダル・ゾーン C: 海水 D: 泥層

表-2.7 棚式

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L.	L.W.L.	天端高	A
		現 在	所 定	(m)	(m)	(m)	(m)
1	若津港物揚場	-2.00	-3.00	+4.38	±0.00	+5.00	0.62
2	衣浦港物揚場	-3.50	-3.50	+2.30	±0.00	+3.20	0.90
3	留萌港物揚場	-2.50	-4.00	+2.30	±0.00	+1.50	
4	田子の浦港鈴川埠頭		-5.50	+1.60	±0.00	+3.50	1.90
5	四日市港富州原南岸壁	-6.00	-5.50	+2.57	±0.00	+3.00	0.43
6	坂出港杭打棚式岸壁	-7.00	-7.00	+3.60	±0.00	+4.10	0.50
7	大船渡港1万t岸壁	-9.00	-9.00	+1.40	±0.00	+3.00	1.60
8	千葉港川崎製鉄岸壁	-9.50	-9.50	+2.10	±0.00	+4.00	1.90
9	横浜港昭和電工岸壁	-10.00	-10.00	+1.50	±0.00	+3.30	1.80

A: スブラッシュ・ゾーン B: タイダル・ゾーン C: 海水 D: 泥層

け い 船 岸

B (m)	C (m)	D (m)	矢 板			裏込め 土	前 面 土	施 工
			長 (m)	種 類	材 質			
1.50	3.00	4.00	8.50	Y. S. P. - II	SS41	砂	砂	S. 35
2.00	4.00	4.00	10.00	Y. S. P. - III	SS41	砂, 山土	砂	S. 26
2.00	4.00	5.00	8.00	Y. S. P. - III	SS41	土丹岩	土砂	S. 29
			13.00					
1.80	4.00	5.00	11.00	Y. S. P. - II	SS41	砂	砂	S. 34
2.70	3.80	4.85	10.00	Y. S. P. - III	SS41	砂	砂	S. 34
0.70	4.50	4.40	10.00	Y. S. P. - III		砂	砂	S. 36
1.95	3.55	5.50	15.00	Y. S. P. - III	SS39	砂	砂	S. 36
			6.30	14.00	Y. S. P. - III		砂	砂	S. 10
1.50	6.50	5.50	13.00	N. K. K. U - 50	SS41	砂	砂	S. 36
1.47	6.47	5.50	13.50	Y. S. P. - IV	SS41	砂	砂	S. 37
2.60	7.50	3.70	14.00	Y. S. P. - IV	SS41	シルト質 砂	シルト質 砂	S. 35
		6.70	17.00					
2.00	7.50	2.50	11.30	Y. S. P. - IV	SS41	栗石および雑石	礫混り 砂質ローム	S. 36
1.90	8.00	6.00	14.00	製鉄 AW		粗石	砂	S. 26
1.50		6.50	18.00	Y. S. P. - Z45	SS41	粗砂	細砂	S. 37
1.60	8.90	6.50	17.00	Y. S. P. - V	SS41	土丹	細砂	S. 29
1.70		6.40	17.50	Y. S. P. - V		土丹	細砂	
1.80	-4.00	6.00	17.00	Y. S. P. - V	SS41	土砂	土砂	S. 36
	-7.00							
2.71	7.11	6.00	16.50	Y. S. P. - Z	SS41	砂	礫混り 砂質ローム	S. 35
2.00	9.00	6.00	16.00	Y. S. P. - Z45	SS50	砂	砂	S. 35
1.45	9.00	7.20	19.00	Y. S. P. - V	SS41	砂質土	砂質土	S. 37
2.00	10.00	6.48	20.00	Y. S. P. - Z	SS50	土丹	シルト質 粘土	S. 34
1.08	12.53	8.50	23.00	Y. S. P. - Z	SS41	砂質土	砂質土	S. 36
1.70	13.00	8.50	22.00	Y. S. P. - Z	KBC50	山土	山土	S. 36

け い 船 岸

B (m)	C (m)	D (m)	矢 板			裏込め 土	前 面 土	施 工
			長 (m)	種 類	材 質			
4.38	2.00	4.50	9.00	Y. S. P. - III		砂	シルト混 り砂	S. 33
2.30	3.50	5.00	9.50	Y. S. P. - III		砂	シルト混 り砂	S. 31
2.30	2.50	5.00	9.00	Y. S. P. - II	SS41	砂 礫	砂, 粘土 粘土	S. 33
		1.60	2.70	9.70					Y. S. P. - II
2.57	6.00	5.50	12.50	Y. S. P. - III		土砂 粗砂	粘 土	S. 32
		7.50	14.50					
3.60	7.00	5.00	13.00	Y. S. P. - III				S. 22
1.40	9.00	3.50	14.00	Y. S. P. - III		砂, 粘土	粘 土	S. 35
2.10	9.50	8.00	19.00	鋼管矢板	SS41	砂シルト	砂	S. 37
1.50	10.00	10.00	23.00	Y. S. P. - V	SS41	砂混り シルト	シルト	S. 37

表-2.8 セ ル 式

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L. (m)	L.W.L. (m)	天端高 (m)	A (m)
		現 在	所 定				
1	浜 田 港 岸 壁	-7.50	-7.50	+0.70	±0.00	+1.80	1.10
2	名古屋港 6 号地物揚場	-9.00	-9.00	+2.70	±0.00	+4.20	1.50
3	田子の浦港岸壁	-7.50	-9.00	+1.60	±0.00	+4.00	2.40
4	横浜港日清製粉セル式ドルフィン	-10.00	-10.00	+2.50	±0.00	+4.00	1.50
5	直江津港西埠頭	-9.00	-10.00	+0.65	+0.10	+2.40	1.75
6	戸畑港八幡製鉄戸畑鉾石岸壁	-11.00	-11.00	+0.20	±0.00	+3.50	3.30
7	千葉港川崎製鉄第2岸壁	-12.00	-12.00	+2.10	±0.00	+4.00	1.90

A : スブラッシュ・ゾーン B : タイダル・ゾーン C : 海水 D : 泥層

表-2.9 横 棧

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L. (m)	L.W.L. (m)	天端高 (m)	A (m)
		現 在	所 定				
1	清水港村松埠頭第2バース	-9.00	-9.00	+1.60	±0.00	+2.70	1.10
2	清水港村松岸壁	-9.00	-9.00	+1.60	±0.00	+2.70	1.10
3	塩釜港貞山埠頭2号岸壁	-9.00	-9.00	+1.50	±0.00	+3.10	1.60
4	舞鶴港第4埠頭	-10.00	-10.00	+0.50	±0.00	+1.80	1.30
5	広島港第2バース	-10.00	-10.00	+3.90	±0.00	+5.00	1.10
6	室蘭港西2号埠頭	-10.00	-10.00	+1.55	±0.00	+3.00	1.45
7	横浜港山下埠頭7, 8バース	-10.00	-11.00	+2.00	±0.00		
8	神戸港摩耶埠頭	-12.00	-12.00	+1.73	±0.00	+4.00	2.27
9	小倉港小倉セメント積出棧橋	-4.50	-4.50	+2.00	±0.00	+3.90	1.90
10	大船渡港小野田セメント野島棧橋	-9.50	-9.50	+1.40	±0.00	+3.40	2.00

A : スブラッシュ・ゾーン B : タイダル・ゾーン C : 海水 D : 泥層

表-2.10 突 堤 式

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L. (m)	L.W.L. (m)	天端高 (m)	A (m)
		現 在	所 定				
1	小倉港小倉セメント積出棧橋	-4.50	-4.50	+2.00	±0.00	+3.90	1.90
2	大船渡港小野田セメント野島棧橋	-9.50	-9.50	+1.40	±0.00	+3.40	2.00

A : スブラッシュ・ゾーン B : タイダル・ゾーン C : 海水 D : 泥層

け い 船 岸

B (m)	C (m)	D (m)	矢 板			中 詰 め 材 料	前 面 土	施 工
			長 (m)	種 類	材 質			
0.70	7.50	5.00	14.00	Y. S. P.-F		栗 石	細 砂	S. 37
2.70	9.00	5.20	15.00~ 17.50	Y. S. P.-F		砂	砂	S. 37
1.60	7.50	2.00	13.00~ 16.00	Y. S. P.-F		砂 礫 粘 土	砂 礫	S. 35
2.50	10.00	6.50	18.50	Y. S. P.-III		鉍 滓 コン クリート	砂 質 シルト	S. 27
0.55	8.90	5.00	12.00 14.00 16.00	Y. S. P.-F		砂質土	砂質土	S. 36
0.20	11.00	1.00 0.50	14.00 16.00			鉍 滓 パラス	砂	S. 32
2.10	12.00	2.00	16.00 ~ 12.00	直線型		砂	砂	S. 35

橋

B (m)	C (m)	D (m)	鋼 杭				中 詰 め 材 料	施 工
			長 (m)	φ(mm)	t(mm)	材 質		
1.60	9.00	10.00	21.00	800	16			S. 37
1.60	9.00	16.80	22.00	600 500	9~19	S S 41	土 砂	
1.50	9.00	9.00~ 11.00	10.00~ 23.00	500	6.9	S S 41		S. 36
0.50	10.00	17.90~ 18.00	28.00					S. 36
3.90	10.00	16.00 } 24.00	30.00	400 500 610		S S 41		S. 33
1.55	10.00	7.50~ 19.50	25.00	600	9	S S 41		S. 36
2.00	10.00	4.70	19.00	700	12, 19	S S 41	コンクリート	S. 37
1.73	12.00	20.00~ 25.00	34.50	500	9			S. 35
2.00	4.50	2.30 } 7.50	12.00	350	9	S S 41	鉄 筋 コンクリート	
1.40	9.50	19.00	35.00	800	12			S. 36

棧 橋

B (m)	C (m)	D (m)	鋼 管 杭				中 詰 め 材 料	施 工
			長 (m)	φ(mm)	t(mm)	材 質		
2.00	4.50	2.30 } 7.50	12.00	350	9	S S 41	鉄 筋 コンクリート	
1.40	9.50	19.00	35.00	800	12			S. 36

表-2.11 デ タ ッ チ ト・

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L. (m)	L.W.L. (m)	天端高 (m)	A (m)
		現 在	所 定				
1	戸畑港八幡製鉄焼結岸壁	-6.00	-6.00	+2.00	±0.00	+3.50	1.50
2	大阪港石炭埠頭	-10.00	-10.00	+1.60	+0.05	+6.60	5.00
3	堺港石炭埠頭	-12.50	-12.50	+1.80	+0.35	+5.00	3.20

A: スブラッシュ・ゾーン
 B: タイダル・ゾーン
 C: 海水
 D: 泥層

表-2.12 ド ル

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L. (m)	L.W.L. (m)	天端高 (m)	A (m)
		現 在	所 定				
1	四日市港三重火力重油棧橋	-6.00	-6.00	+2.57	±0.00	+4.00	1.43
2	四日市港大協石油出荷棧橋	-6.40	-6.50			+5.00	
3	四日市港三菱棧橋	-6.30	-6.70	+2.57	±0.00	+4.50	1.93
4	徳山下松港日石ドルフィン	-6.70	-7.00	+3.60	±0.00	+4.90	1.30
5	小名浜港中央埠頭石炭岸壁		-7.50	+1.70	±0.00	+3.00	1.30
6	四日市港第4, 6号棧橋	-8.00	-8.00	+2.72	±0.00	+4.50	1.78
7	川崎港日本鉱業棧橋	-10.50	-10.50	+2.59	±0.00	+4.50	1.91
8	名古屋港名古屋油槽所棧橋	-11.00	-11.00	+2.20	±0.00	+3.40	1.20
9	川崎港No. 1棧橋ドルフィン	-12.00	-12.00	+2.60	±0.00	+4.00	1.40
10	徳山下松港原油棧橋	-12.00	-12.00	+3.48	±0.00	+5.00	1.52
11	四日市港大協石油塩浜油槽所棧橋	-12.00	-12.00	+2.67	±0.00	+5.00	2.33
12	室蘭港鉱石専用岸壁	-12.00	-12.00	+1.55	+0.47	+3.50	1.95

A: スブラッシュ・ゾーン
 B: タイダル・ゾーン
 C: 海水
 D: 泥層

表-2.13 特 殊

No.	名 称	水 深 (m)		H.W.L. (m)	L.W.L. (m)	天端高 (m)	A (m)
		現 在	所 定				
1	川崎港 No. 4 棧橋	-3.40	-3.40	+2.60	±0.00	+3.50	0.90
2	神戸港三菱石油棧橋	-5.00	-5.00	+2.00	±0.00	+4.64	2.64
3	川崎港第2棧橋	-7.00	-7.00	+2.60	±0.00	+3.80	1.20

A: スブラッシュ・ゾーン
 B: タイダル・ゾーン
 C: 海水
 D: 泥層

ピ ア ー

B (m)	C (m)	D (m)	鋼 管 杭				中 詰 め 材 料	施 工
			長 (m)	φ(mm)	t(mm)	材 質		
2.00	6.00	21.00		355				S. 36
1.55	6.55	17.20 } 22.00	32.00		9, 12	SS41	砂	S. 34
1.80	12.50	23.50	36.00	600	12		コンクリート	S. 36

フ ィ ン

B (m)	C (m)	D (m)	鋼 杭				中 詰 め 材 料	施 工
			長 (m)	φ(mm)	t(mm)	材 質		
2.57	6.00	17.10	28.00	482	12		な し	S. 33
		6.00	17.50	300	9.5	SS41	コンクリート	S. 32
2.57	6.30	19.50		485	12		な し	S. 35
3.60	6.70	10.00		500×500×12		鋼 板	な し	
1.70		8.00 } 12.50	18.00	600	12	SS41	砂	S. 37
2.72	8.00	14.00	26.50	500	16 } 19	高張力 鋼	な し	S. 34
2.59	10.50	9.50	24.00	498	16		コンクリート	S. 28
2.20	11.00	9.00	17.00 } 23.00	300		ガス管	な し	S. 30
2.60	12.00	11.00	27.00	500			な し	S. 33
3.48	12.00	10.00	24.50	400	13		な し	S. 31
2.67	12.00	16.00	33.00	485	12. 16	SS41	な し	S. 33
1.08	11.53	19.90					鉍 滓	S. 36

け い 船 岸

B (m)	C (m)	D (m)	鋼 杭				中 詰 め 材 料	施 工
			長 (m)	φ(mm)	t(mm)	材 質		
2.60	3.40	5.10	11.50	280	9		な し	S. 33
2.00	5.00	6.00	14.00 15.00	300 400			コンクリート	S. 28
2.60	7.00	6.00 7.00	16.00 17.00	300 381		SS41 SS50	コンクリート	S. 27

表-2.14 水に対する空気の溶解度

°C	溶解空気量		°C	溶解空気量	
	cc/l ※	溶解空気中の酸素量 vol %		cc/l ※	溶解空気中の酸素量 vol %
0	29.18	34.91	16	20.14	34.21
1	28.42	34.87	17	19.75	34.17
2	27.69	34.82	18	19.38	34.12
3	26.99	34.78	19	19.02	34.08
4	26.32	34.74	20	18.68	34.03
5	25.68	34.69	21	18.34	33.99
6	25.06	34.65	22	18.01	33.95
7	24.47	34.60	23	17.69	33.90
8	23.90	34.56	24	17.38	33.86
9	23.36	34.52	25	17.08	33.82
10	22.84	34.47	26	16.79	33.77
11	22.34	34.43	27	16.50	33.73
12	21.87	34.38	28	16.21	33.68
13	21.41	34.34	29	15.92	33.64
14	20.97	34.30	30	15.64	33.60
15	20.55	34.25			

※ 760mmHg における水 1 立中の空気の容積 (cc)

表-2.15 塩水に対する酸素の溶解度

塩素分 %	°C	酸素濃度	
		ml/l	p. p. m
0	0	49.2	70.4
0	12	36.8	52.5
0	24	29.4	42.1
16	0	40.1	56.0
16	12	30.6	42.9
16	24	24.8	34.8
20	0	38.0	52.8
20	12	29.1	40.4
20	24	23.6	32.9

表-2.16 日本の港湾における海水中の溶解酸素測定結果

試料	溶解酸素量 (ppm)
油津港における海水 (1)	8.63
" (2)	9.50
志布志港における海水	9.50
串木野港における海水	8.75
七尾港における海水	8.63
新潟港における海水 (1)	8.38
" (2)	10.33
小倉港における海水 (1)	10.08
" (2)	9.08
" (3)	9.38
門司港における海水 (1)	9.88
" (2)	8.63
下関港における海水 (1)	9.38
" (2)	9.25
洞海湾における海水 (1)	9.20
" (2)	8.70
水道水	9.00
蒸溜水	9.50

表-2.17 海水組成 (1)

(1932. 7. 7)

採水時刻	sp, gr	°C	pH	CaSO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	KCl	NaCl	Total	Cl
10.00 (low water)	1.019	27.5	8.3	0.10	0.16	0.24	0.06	1.93	2.49	1.806
10.30	1.019	27.5	8.4	0.11	0.17	0.26	0.06	2.01	2.61	1.804
11.00	1.019	27.5	8.4	0.10	0.15	0.25	0.06	1.92	2.48	1.804
12.00	1.022	27.5	8.6	0.12	0.19	0.29	0.07	2.26	2.93	1.805
13.00	1.023	27.5	8.6	0.13	0.19	0.31	0.07	2.39	3.09	1.802
14.00	1.023	27.5	8.5	0.12	0.19	0.31	0.07	2.35	3.04	1.802
15.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.48	3.20	1.802
16.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.33	0.07	2.47	3.20	1.801
16.30 (high water)	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.47	3.19	1.801
上層	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.47	3.19	1.801
中層	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.47	3.19	1.801
下層	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.47	3.19	1.801
17.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.33	0.07	2.46	3.19	1.801
18.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.33	0.07	2.46	3.19	1.801
19.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.33	0.07	2.47	3.20	1.800
20.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.33	0.07	2.46	3.19	1.800
21.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.47	3.19	1.801
22.00	1.024	27.5	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.47	3.19	1.800
" (low water)	1.024	27.5	8.4	0.12	0.19	0.33	0.07	2.40	3.11	1.796

表-2.18 海水組成(2)

(1932. 8.17)

採水時刻	sp.gr.	°C	pH	CaSO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	KCl	NaCl	Total	Cl
8.45	1.025	27.0	8.4	0.13	0.21	0.33	0.07	2.52	3.20	1.798
9.45	1.025	27.0	8.3	0.13	0.21	0.33	0.07	2.53	3.27	1.801
10.45	1.025	27.0	7.7	0.13	0.21	0.33	0.07	2.53	3.27	1.801
11.45	1.025	27.0	8.4	0.13	0.21	0.33	0.07	2.53	3.27	1.801
12.45	1.025	27.0	8.4	0.13	0.21	0.33	0.07	2.53	3.27	1.800
13.45	1.022	27.0	8.4	0.12	0.18	0.31	0.07	2.24	2.92	1.797
14.45	1.023	27.0	8.4	0.12	0.19	0.33	0.07	2.34	3.05	1.797
15.00	1.022	27.0	8.4	0.11	0.18	0.31	0.06	2.22	2.88	1.797
15.10 (high water)	1.025	27.0	8.4	0.13	0.20	0.33	0.07	2.51	3.24	1.798
15.20	1.025	27.0	8.6	0.13	0.20	0.33	0.07	2.56	3.29	1.800
15.30	1.024	27.0	8.6	0.12	0.19	0.32	0.07	2.36	3.06	1.799
15.50	1.025	27.0	8.6	0.13	0.20	0.33	0.07	2.51	3.24	1.798
16.00	1.023	27.0	8.6	0.12	0.19	0.30	0.07	2.31	2.99	1.800
16.30	1.025	27.0	8.6	0.13	0.21	0.31	0.07	2.46	3.18	1.808
17.00	1.024	27.0	8.6	0.12	0.19	0.31	0.07	2.39	3.08	1.800
17.15	1.027	27.0	8.6	0.15	0.21	0.35	0.08	2.68	3.47	1.801
17.30	1.027	27.0	8.6	0.14	0.23	0.34	0.08	2.69	3.48	1.808
18.00	1.017	27.0	8.5	0.09	0.15	0.21	0.05	1.71	2.21	1.812
18.30	1.022	27.0	8.5	0.12	0.20	0.25	0.07	2.26	2.93	1.811
19.00	1.024	27.0	8.5	0.12	0.21	0.30	0.07	2.41	3.11	1.811
19.30	1.022	27.0	8.3	0.11	0.17	0.25	0.06	2.17	2.79	1.799
20.00	1.024	27.0	8.4	0.12	0.19	0.30	0.07	2.37	3.05	1.802
20.30	1.025	27.0	8.4	0.13	0.20	0.32	0.07	2.45	3.17	1.801
21.30	1.025	27.0	8.4	0.13	0.21	0.32	0.07	2.54	3.27	1.801

表-2.19 海水組成(3)

(1933. 8. 7)

採水時刻	sp.gr.	°C	pH	CaSO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	KCl	NaCl	Total	Cl
8.45 (high water)	1.025	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.53	3.25	1.800
9.45	1.025	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.52	3.24	1.799
10.45	1.025	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.55	3.27	1.802
11.45	1.025	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.55	3.27	1.800
12.45	1.025	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.55	3.27	1.802
13.45	1.025	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.55	3.27	1.802
14.45	1.024	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.45	3.17	1.800
15.45 (low water)	1.022	28.5	8.3	0.13	0.20	0.32	0.07	2.50	3.22	1.801
16.15	1.023	28.5	8.3	0.12	0.19	0.31	0.07	2.30	2.99	1.799
16.45	1.026	28.5	8.5	0.13	0.21	0.33	0.07	2.57	3.31	1.801
17.00	1.022	28.5	8.3	0.11	0.17	0.28	0.06	2.15	2.77	1.801
17.15	1.027	28.5	8.6	0.14	0.21	0.35	0.08	2.68	3.46	1.800
17.30	1.027	28.5	8.2	0.14	0.22	0.35	0.08	2.74	3.53	1.802
17.45	1.025	28.5	8.2	0.13	0.20	0.32	0.07	2.48	3.26	1.801
18.00	1.023	28.5	8.2	0.12	0.19	0.30	0.07	2.33	3.01	1.804
18.10	1.021	28.5	8.2	0.11	0.16	0.27	0.06	2.04	2.64	1.800
18.30	1.017	28.5	8.1	0.09	0.13	0.22	0.05	1.66	2.15	1.800

採水時刻	sp.gr	°C	pH	CaSO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	KCl	NaCl	Total	Cl
19.30	1.025	28.5	8.2	0.13	0.19	0.32	0.07	2.49	3.20	1.800
20.00	1.025	28.5	8.2	0.13	0.20	0.32	0.07	2.49	3.21	1.800
20.30	1.025	28.5	8.2	0.13	0.20	0.33	0.07	2.52	3.25	1.799
21.00	1.025	28.5	8.2	0.13	0.20	0.33	0.07	2.52	3.25	1.799
21.30 (high water)	1.025	28.5	8.2	0.13	0.20	0.33	0.07	2.54	3.27	1.800

表—2.20 4季による海水組成変化

(1932)

季節	Sample No.	sp. gr.	°C	pH	CaSO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	KCl	NaCl	Total
冬	1~30	1.024	11.2	8.1	0.14	0.19	0.34	0.07	2.43	3.17
春 (4.1~4.30)	1~30	1.022	15.3	8.2	0.12	0.18	0.30	0.06	2.26	2.92
夏 (7.1~7.31)	1~31	1.021	28.9	8.1	0.12	0.18	0.30	0.06	2.28	2.94
夏 (8.1~8.31)	1~31	1.020	28.3	8.0	0.11	0.17	0.28	0.06	2.13	2.75
秋 (10.1~10.31)	1~31	1.024	17.8	8.3	0.13	0.20	0.34	0.07	2.46	3.20

2-1-4 腐食現象

港湾においては古くから鋼矢板がけい船岸建設のために使用されているために鋼材腐食に対する関心は少なかつた。たとえば、海水を入れた容器中にまたは直接海水中に鋼材片を浸漬して腐食速度の測定、海水の分析、スプラッシュ・ゾーンの腐食を観察したりすることから、最近では試作した鋼板厚み計を用いる鋼矢板腐食速度の測定（ただし海底泥面上）までいろいろと数多くの人々によって行なわれている。港湾で使用する鋼材は長尺ものであるために海水や泥層を貫通する。このような長尺鋼材の腐食を説明するために海水や泥層単一層における鋼材腐食をマイクロ腐食、海水と泥層のような異種環境間にまたがる鋼材に発生する腐食をマクロ腐食と呼ぶことにする。したがってマイクロ腐食はこれまでの全面腐食、マクロ腐食は局部腐食の現象に相当する。以下本報ではマイクロ腐食とマクロ腐食の表現で行くことにする。いま海水と泥層中における鋼材のマイクロ腐食速度を比較するために一例として後述する表—2.40を参照してみると前者は0.12mm/yr、後者は0.01mm/yrである。したがって港湾で鋼材を使用する場合には海水中は腐食による危険度は高いが、海底泥中の腐食は無視し得る程度であるとされ、この考えにもとづいて鋼鉄製構造物の腐食対策、防食対策が行われてきた。

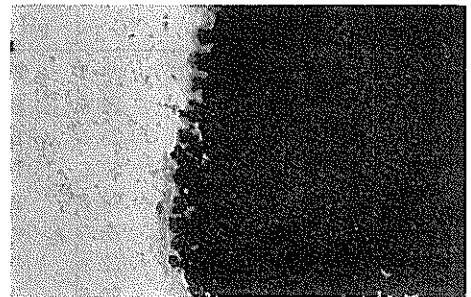
浮棧橋のように腐食環境として海底泥がない場合は海水中のマイクロ腐食の考えのみで処理できるが、浮棧橋などはむしろ例外のケースで大部分の鋼製構造物は海水と海底泥層を貫く。

このため実際条件における腐食現象をはっきりさせる

ことが港湾で鋼材を使用するに当たってまず必要なことであるので、以下のようにいろいろ検討を加えた。

(1) 腐食環境が2層のとき

ガラス水槽の半分が粘土層、他の半分が砂層（水分10~20%）となるように粘土と砂を詰め、次に研磨鋼材片が両層を貫くように埋設する。埋設20日後に鋼材片を引き上げてみると図—2.70のようになった。すなわち、図—2.70に示されるように左半分の粘土層に埋設された鋼材部分は激しい腐食を受けたが右半分の砂層に埋設された鋼材部分は埋設時の研磨面が保たれている。



図—2.70 マクロ腐食現象(1)

このとき図—2.70に示すような粘土層と砂層の両層を貫く鋼材とは別にそれぞれの層に鋼材片を単独に埋設してマイクロ腐食速度を測定したところ砂層中が大きく粘土層中では小さかった。

図—2.70にみられる現象の機構は3—4—1マクロ腐食とマイクロ腐食の項でも触れるが、G.V. Akimov⁷⁵⁾などが述べているように酸素含有量の差（砂層中の酸素含

有量は粘土層中に比べて大きい) にもとづいて粘土層中の鋼材がアノード、砂層中の鋼材がカソードとなるマクロ的な腐食電池が両層にまたがって発生した結果である。このようにマクロ・セルによる腐食をマクロ腐食といい、単一層内で発生するマイクロ・セルによる腐食をマイクロ腐食と呼んで区別する。

粘土層と砂層が相接するときにはマクロ腐食が発生する傾向が確かめられたので、次に港湾では避け難い海水と泥層の両層について腐食現象を検討した。

木箱(30cm×30cm×30cm)に砂を詰めこの砂中に研摩鋼材片を押し込んで立てる。このとき研摩鋼材片の下半分は砂中に埋まり上半分は空中に出ている恰好とする。こうした木箱を久里浜湾(神奈川県・横須賀市)底に沈めた。研摩鋼材片は結局下半分が海水を飽和した砂、上方が海水に接することになる。鋼材を一定期間毎に一枚宛引き上げて観察してみるといずれも砂層中の鋼材部分が腐食しており海水中は研摩面のままであった。腐食期間が30日ときの鋼材片を図-2.71に示す。

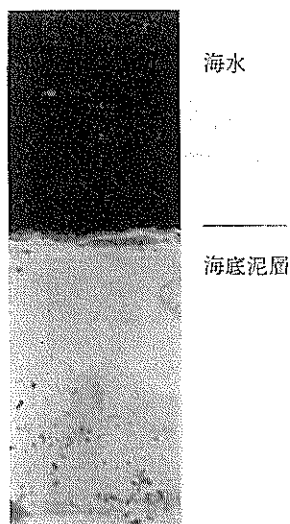


図-2.71 マクロ腐食現象(2)

海底に沈めた木箱のうち波によって倒されたものもあった。したがって倒れた木箱に立てられていた鋼材片は傾き、海水のみに触れていた鋼材面の一部に砂が接触した。このような鋼材片を図-2.72に示す。

図-2.72によれば最初砂層中に埋設されていた鋼材部分は図-2.71と同じく腐食しており、箱の転倒によって砂が接触した部分も腐食しているが一貫して海水のみに囲まれていた部分は相変わらず最初の研摩面のままである。このマクロ腐食現象は砂によって動き難い海水と波によって流動する海水との間の酸素拡散速度の差にもと



図-2.72 マクロ腐食現象(3)

づくマクロ・セルの発生によるものである。

したがって波による流動の代わりに酸素供給剤を使用しても上と同じ現象がおこる。たとえば、ガラス容器に半分ほど砂を詰めた後上から海水を注いで行って容器を満水させる。

これに下半分が砂層中、上半分が海水中となるように研摩鋼材片を埋設する。次に砂面上の海水中に過酸化水素水を添加してやる。このような条件下の腐食現象は図

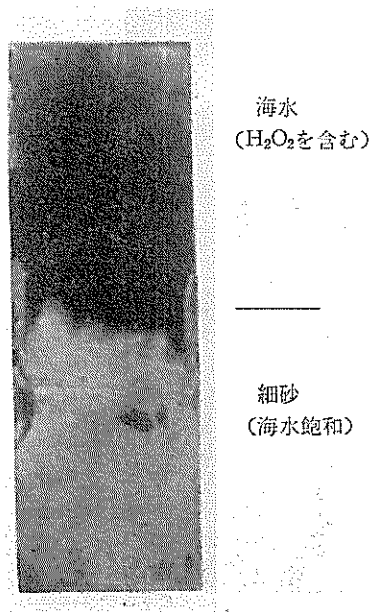


図-2.73 マクロ腐食現象(4)

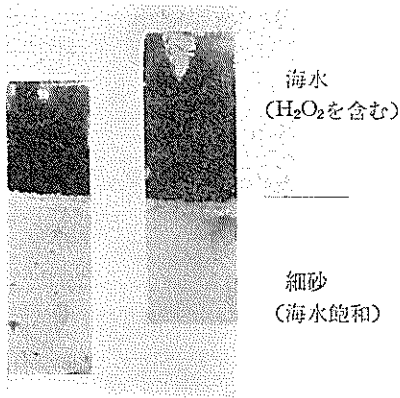
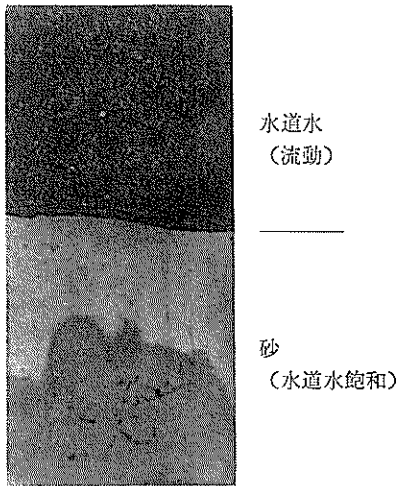


図-2.74 マクロ腐食現象 (5)

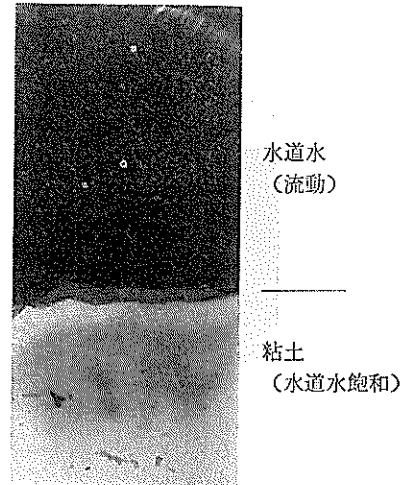
—2.73, 74の通り砂中の鋼材部分は腐食しているが海水（過酸化水素水を含む）中の鋼材部分は研摩面のままである。

また海水の代わりに水道水を用いてこれを流動させてやるとやはりマクロ腐食が発生する。ガラス水槽に砂を半分ほど詰め上から水道水を流下し続ける。これに下半分が砂層中、上半分が水道水中となるように研摩鋼材片を埋設する。砂面上の水道水は流下し続けるので絶えず動いている。このときの腐食現象は図-2.75の通りである。

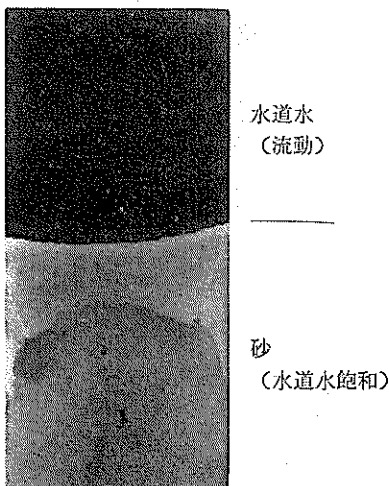
すなわち、砂中に埋設された部分は腐食しているが水道水（流動している）中の部分は研摩面が保たれている。砂の代わりに粘土を用いた場合は図-2.76のように粘土中の部分が腐食しているが、やはり水道水中の部分には腐食がみられない。



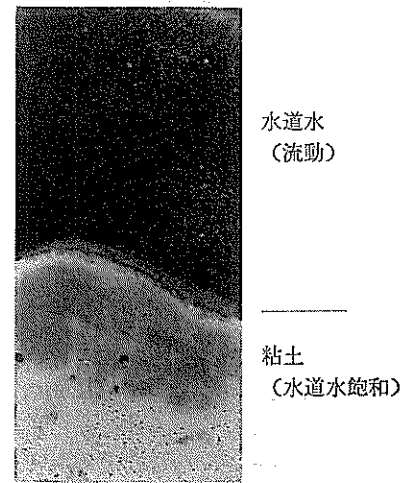
(表)



(表)



(裏)

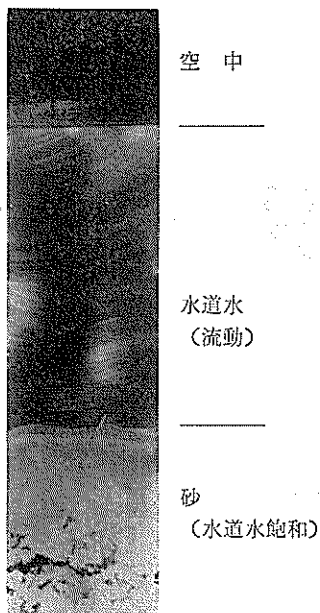


(裏)

図-2.75 マクロ腐食現象 (6)

図-2.76 マクロ腐食現象 (7)

次に、棧橋用鋼材と同じように水面上に鋼材がでるよう
に埋設してみた。砂を3分の1ほど詰めたガラス容器
に水道水を満水した後もさらに少量ずつ流下し続ける。
この水槽内に長い研磨鋼材片を垂直に埋設して研磨鋼材
片が下から砂（水道水で飽和）中、水道水（流動）中お
よび空中の3種類の環境に接するようにする。埋設中の
鋼材片を観察すると（ただしこのときの観察カ所は砂面
より上の部分に限られる）水道水中の片面は研磨面のま
まであるが他の片面には局部的に発錆してざらざらにな
って行く。砂中の状況はみえないので鋼材片を引き上げ
てみると図—2.77の通りである。

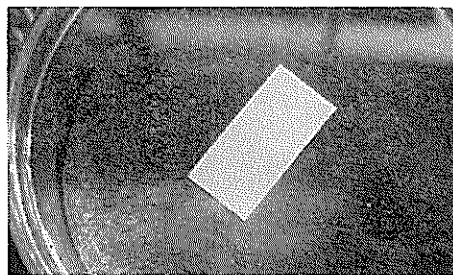


図—2.77 マクロ腐食現象(8)

上述の場合と同じく砂中の鋼材は溶出している（いわ
ゆる腐食している）。水道水（流動状態）中の鋼材は大
部分腐食していないが一部に発錆が見られた。一方空中
は野ざらし状態の鋼材面と同じような腐食をしている
が、水面上数ミリは表面張力によって水に接しているた
めに空中部分のようにがさがさとなっていないで水道水
中と同じようにマクロ腐食の影響が見受けられる。この
ときの水道水中と砂層中の面積比は2：1であり、水道
水はごく少量流下している状態である。この条件下で水
道水中鋼材に一部発錆したこと、すなわち水道水中鋼材
には砂層中がアノード、水道水中がカソードとなるマク
ロ腐食の外に水道水中にもアノードが発生したことは、
注目すべき現象であると考えられる。この点については
さらに後述のように検当してみた。

岸壁タイプでは棧橋タイプと異なって裏込めの影響が
考えられるのでその腐食傾向を探るために次のような実
験をした。

ガラス水槽に半分ほど砂を入れ上から水道水を注いで
満水にする。水道水はさらに流下し続けて水槽よりあふ
れさせておく。このようにした砂層の表面上に研磨鋼材
片を片面が砂に他の片面が水道水（流動）に接するよう
におく。この状況を図—2.78に示す。



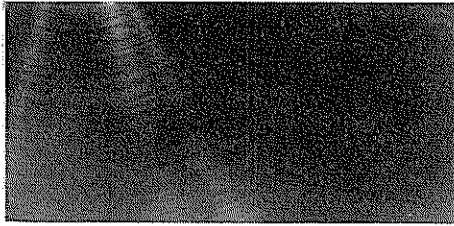
図—2.78 マクロ腐食現象(9)

観察を続けると水道水（流動）に接している鋼材面は
腐食せずに最初の研磨面のままである。砂に接している
側の変化は最初のうちはわからないが、次第に鋼材片の
周囲にいわゆる鉄錆が図—2.79のように見え始めてく
る。

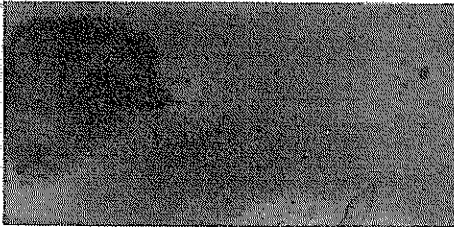


図—2.79 マクロ腐食現象(10)

これは砂側の鋼材面が溶解しているためで鋼材片を取
り出してみるとこの事実がはっきりする。このときの鋼
材の両面は図—2.80の通りである。



表（水道水に接した鋼材面）



裏（泥面に接した鋼材面）

図-2.80 マクロ腐食現象（11）

砂の代りに粘土を用いても同様な現象が確かめられた。水道水について確かめられたこのような現象は水道水よりも非常に電気伝導性の良い海水を伴う港湾においては抵抗の面からだけではマクロ腐食の発生に都合がよいと考えられる。

(2) 腐食環境が2層以上のとき

2層以上の異種環境が互層となっているときの代表例として3層の場合をとりあげ、これについて腐食現象を検討した。

ガラス容器に下から砂、粘土、砂を填めてこの3層を貫通するように研磨鋼材片を埋設した。鋼材片を引き上げてみると図-2.81に示すように中央の粘土層に埋設さ

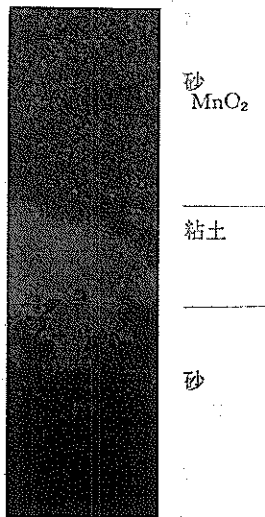
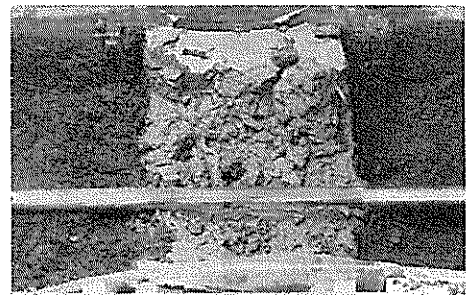


図-2.81 マクロ腐食現象（12）

れていた鋼材部分のみに腐食が集中して上・下の砂層中の鋼材部分は大部分は研磨状態のままであるが、少量の砂粒のあとに発錆がみられた。すなわち、粘土層中の鋼材部分がアノード、砂層中の鋼材部分がカソードとなっている。

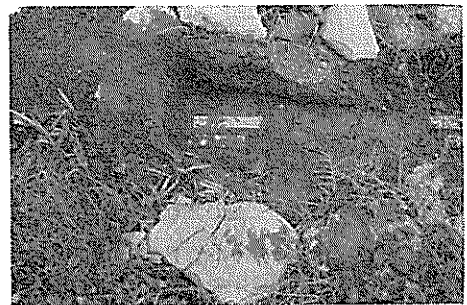
次に、左右両層が砂層、中央が粘土層より成る3層に研磨鋼管が貫通する状態で埋設したときも上と同じく中央の粘土層がアノード、両端の砂層がカソードとなるマクロ腐食が発生する。このときの現象は図-2.82の通りである。



砂層 | 粘土層 | 砂層

図-2.82 マクロ腐食現象（13）

さらに野外においても検討してみた。中央が粘土層、左が砂利、右が砂利層より成る互層を貫く状態で研磨鋼材片を埋設すると図-2.83に示すように中央の粘土層中の鋼材部分が腐食して左右両層中の鋼材部分は研磨面が保たれている。（部分的には骨材の接触部分が発錆している。）



砂層 | 粘土層 | 砂利層

図-2.83 マクロ腐食現象（14）

したがって3層（もしくは多層）を貫通した状態で埋設される鋼材の腐食力所は2層を貫通した鋼材の腐食力所と同じく全環境中で酸素拡散速度が相対的に遅いところに埋設された鋼材部分がアノードとなり、酸素拡散速度が相対的に速いところに埋設された鋼材部分がカソード

となるマクロ・セルの発生によりマクロ腐食が進行する傾向のあることが明らかとなった。

以上の実験結果によれば、棧橋タイプと岸壁タイプの鋼材では裏込めの有無による腐食現象の違いはあるが、裏込めは海底泥層の延長したものであると考えれば（厳密には海水飽和の裏込めと海水不飽和の裏込め間に発生するマクロ腐食が加わるが）港湾で使用する鋼材の腐食は海水面下では海水と海底泥層間の溶存酸素量の差にもとづくマクロ腐食が発生することが考えられる。しかし、上の実験で水道水中でも局部的に発錆したこと（ゆるい流速で水道水中と砂層中の鋼材面積比が2:1のとき）はカソード域にもある条件によって局部的な腐食が発生することを示している。これはマクロ腐食が溶存酸素の差によっておこるものであればマクロ腐食電池のカソード表面をたとえば防舷材で覆ったりカキが付着して砂層中のように酸素が鋼材表面に拡散してくる速度を減らしてやれば当然おこり得るものである。このようにカソード域でどのような条件のときに発錆し易いのか、実験で使用した泥層と海底泥層との相異、海底泥層相互間にマクロ腐食が発生する傾向、またマクロ腐食の進行を泥層の種類によっては阻止したりまたは阻止しなかったりする傾向が長年月の中に生ずるものかどうかなどの諸点を日本の港湾環境の代表的地点何点かで実際に比較してみることが室内実験とともに鋼製構造物の設計上必要なことであると考えられる。

一方、輸送管や貯蔵タンクにとっては孔食が最も危険であるが、港湾における鋼製構造物にとっては鋼材の有効断面積の減少が集中することが一番危険である。さらにもしこの有効断面積の減少が集中する部分と基礎鋼材に働く曲げモーメントが最大である部分とが重なるときは鋼製構造物の破壊が懸念される。

鋼矢板、鋼柱の外にタイ・ロッドの腐食がある。タイ・ロッドは先述した鋼矢板の前傾を防ぐための鋼棒で一般にH. W. L. の直上付近に水平の状態で裏込め土壌に埋設される。したがってタイ・ロッドは海水不飽和土壌中に埋設されることになるので海水飽和土壌中鋼材に対してカソードとなる傾向のあることが考えられるため、タイ・ロッドが傾斜して一部が海水飽和土壌中に没すればこの没した鋼材部分がマクロ・セルのアノードとなることも想定される。

2-1 鋼材腐食調査

港湾環境における鋼材腐食速度の野外測定例を中心として使用された厚み計ならびにその他参考となる室内測定例について述べる。

2-1-1 鋼材厚み測定法ならびに厚み計

港湾で建設された鋼矢板岸壁について事後診断の意味で鋼材の腐食速度の測定がいろいろと行なわれてきているが何れも次の関係から算出される。

$$\text{鋼矢板腐食速度 (mm/yr)} = \frac{T_1 \text{鋼矢板のカタログ厚み (mm)} - T_2 \text{鋼矢板の現有厚み (mm)}}{t \text{腐食期間 (yr)}} \quad (2.1)$$

上式の鋼矢板の現有厚み (mm) を測定するために次のような厚み計を使用する方法があるが測定範囲は海底泥面上に限られ、海底泥中には適用できない。

(1) 磁気不飽和型鋼板厚み計による方法

磁気不飽和型鋼板厚み計は旧運研・港湾施設部（現港研）で開発された厚み計で図-2.84に示すように測定器本体（中央）、ピックアップ（右）および電源（左）とからなっている。

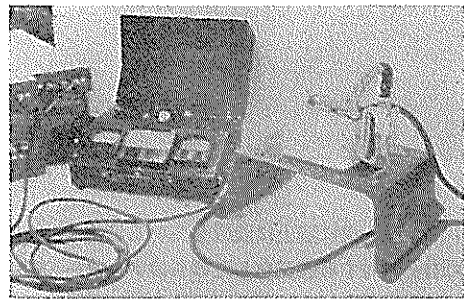


図-2.84 磁気不飽和型鋼板厚み計

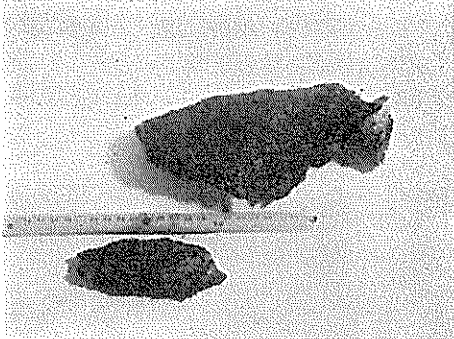
磁氣的に鉄板の片方からその厚さを測ろうとするとき、まず継鉄を被測定鉄板に押しあてて鉄板を磁化し鉄板の厚さに関係する因子を取り出す。このようにするとき作られる磁気回路にとっては(a)継鉄（図2.84のピックアップ底面の鉄板）と鉄板の間の空隙量、(b)鉄板の厚さ、(c)鉄板の材質の3因子が重要である。このとき(b)の鉄板の厚さを取り出すために(a)、(c)の因子を処理する方法によって磁気飽和型厚み計と磁気不飽和型厚み計とに分かれる。

飽和型は(a)、(c)の因子に対して不感とするために鉄板を磁気飽和させる方法がとられ実用的な厚み計が作られているが、ピックアップが重くなるのが難点である。これに対して不飽和型はピックアップを小型軽量とし得るのであるが、(a)、(c)両因子の修正を必要とする。すなわち、(c)の鉄板の材質の因子に対しては材質差および磁気履歴によってかなり問題があると考えられるが同一材質の鉄板の多数に適用するときにはその材料に対して修正を行なう。(a)の因子に対しては継鉄と鉄板間の空隙量を測定するかまたは調整をしなければならない。

伊村氏⁴⁾が開発したこの磁気不飽和型鉄板厚み計は

ピックアップ付属の調整ネジで磁気的に空隙は常に一定に調整できるようになっており、磁気飽和型に対して軽量化されて被測定鉄板の厚みが6～22mm適用できるピックアップの重量は19kg、厚みが3～15mmまでなら13kgである。

本器による測定方法は次の通りである。まず鋼矢板の測定力所に付着しているもの（貝殻、錆などで例を図—2.85に示す）を除去し、除去した鋼矢板部分にピックアップを押しあてる。測定部分が海水中であれば作業は潜



図—2.85 除去した錆の例

水夫が行なう。次に陸上に設置している測定器本体で(a)、(c)因子に対する修正をしたのちのメーターの読みを求め、この値を本厚み計用の換算曲線に適用して鋼矢板の現有厚み T_2 (mm) を $1/10$ mmまで算出する。

腐食速度算出の一例で示してみる。

鋼矢板の種類：Larssen III
 カタログ厚み $T_1=14.5$ mm
 現有厚み $T_2=11.3$ mm
 腐食期間 $t=29$ yr
 (2・1)式より

$$\text{腐食速度 (mm/yr)} = \frac{14.5 - 11.3}{29} = \frac{3.2}{29} = 0.11$$

T_2 測定の誤差は ± 0.5 mm以下⁴⁾といわれる。一方 T_1 の誤差は 0.7 mm以下⁵⁾と現在は規定されている。しかし空隙量を測るときの引力はそれほどでもないが厚さを測るため直流を流すと非常に大きな引力が生じてこのために調整ネジの足の先が鉄板の錆にめり込む。したがって空隙量測定時のときと空隙量が違って来るから厚さの測定に誤差が生ずることになることが問題のようである。また材質差の影響もチェックする必要がある。

この磁気不飽和型鉄板厚み計は水中にも使用できるように工夫されて2—2—2で紹介するように函館港、根室港、釧路港などの鋼矢板岸壁の腐食速度測定のために用いられている。

(2) T—M式厚み計⁶⁾による方法

T—M式厚み計は八幡製鉄KKで開発された厚み計で図—2.86に示す計測部分と図—2.87に示すピックアップよりなる。この厚み計の測定範囲は5mm～15mmで測定誤差は 0.3 mm以下⁷⁾といわれる。本器の機構に関する詳細は特許出願中のため明らかでないが、カタログには特長として次の点があげられている。

(a) 厚み計のピックアップと被測定鉄板との間の空隙または多少の介在物の存在（ただし、 1 mm以下）は測定値には影響しない。

(b) 被測定鉄板の材質による変化の影響を受けない。

(c) 空气中、水中で使用し得る。

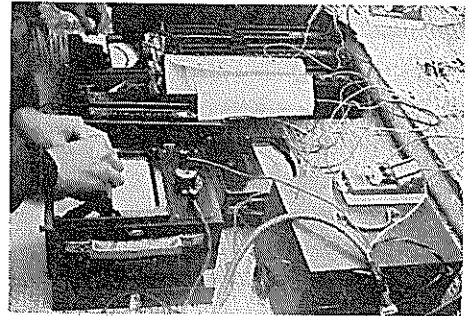
(d) 測定誤差が 0.3 mm以下であるがピックアップの重量が約 25 kgである。

(e) 被測定鉄板の厚みが 15 mmを越えるときさらに大型厚み計、 5 mm以下の薄いときには小型厚み計とする必要がある。

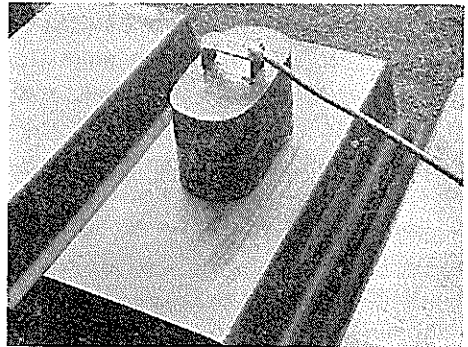
T—M式厚み計による腐食速度測定方法は次の通りである。

測定する鋼矢板の表面付着物をまず除去する。

面積は $25\text{cm} \times 35\text{cm}$ 程度でここにピックアップを図—2.88(鋼矢板岸壁天端付近)、図—2.89 (L. W. L. 付近)に示す要領で押しあてる。次に図—2.86に示すように陸



図—2.86 T—M式厚み測定器(1)計測部分



図—2.87 T—M式厚み測定器(2)ピックアップ

上に設置してある計測部分でメーターの読みを図-2.90に示す鉄板厚さ更生曲線に適用して鉄板の現有厚み T_2 (mm) を求める。 T_2 (mm) を (2.1) 式に代入して鋼矢板の腐食速度を算出する。

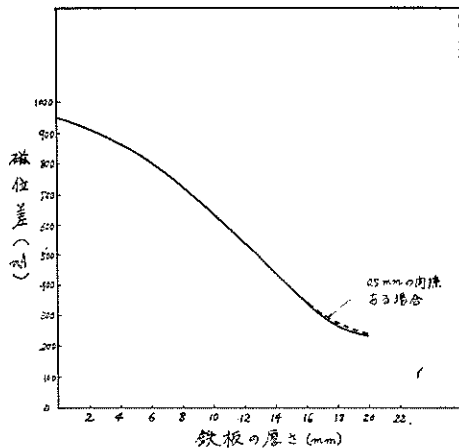


図-2.90 T-M 式鉄板厚さの更生曲線

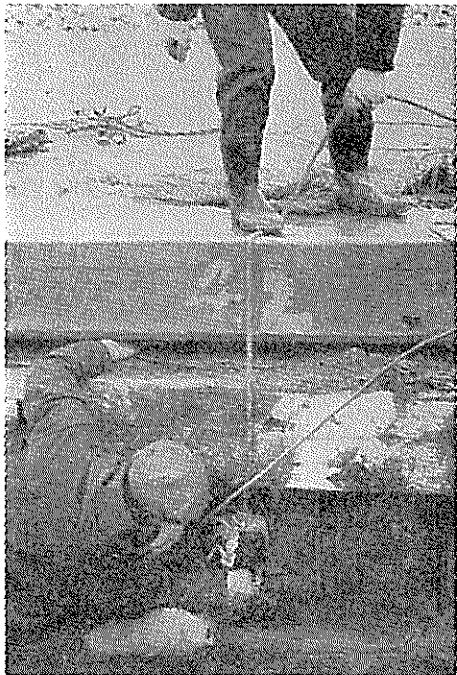


図-2.88 鋼矢板岸壁天端付近の厚み測定

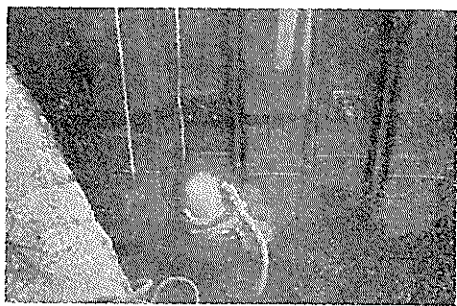


図-2.89 鋼矢板岸壁 L. W. L. 付近の厚み測定

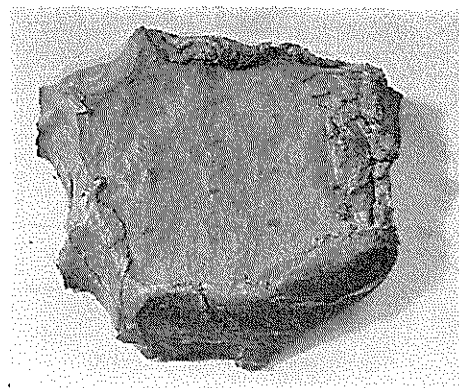


図-2.91 鋼矢板岸壁 (海水中) より切り取った鋼材片 (海側)

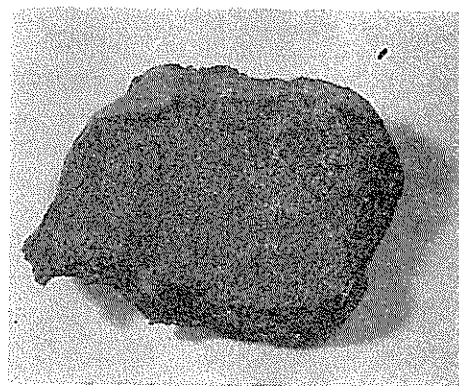


図-2.92 裏込めの影響 (裏込め側)

T-M式厚み計の精度を検討する一方法として次のようにマイクロ・メーターと比較された。

八幡製鉄所の鋼矢板岸壁のいくつかについて上述したT-M式厚み計による方法で鋼矢板の現有厚み T_2 (mm) を測定し、次にその部分を水中ガス切断した約 50cm^2 の鋼矢板片を酸洗いしてマイクロ・メーターで現有厚み T'_2 (mm) を測定した。酸洗いた鋼矢板片の1例を図-2.91, 92に示す。

T-M式厚み計による現有厚み T_2 (mm) を表-2.21に、マイクロ・メーターによる現有厚み T'_2 (mm) を表-2.22, 23, 24, 25, 26に示す。

表-2.21 T-M 式厚み計による鋼矢板現有厚み T_2

測定個所	戸畑鉱石第3バース		洞岡南(13) 岸壁A		洞岡南(13) 岸壁B		中央(12) 岸壁A		中央(12) 岸壁B	
	計器の読み		計器の読み		計器の読み		計器の読み		計器の読み	
	mA	mm	mA	mm	mA	mm	mA	mm	mA	mm
No. 1	662	9.5	412	14.6	341	16.0	457	13.6	422	14.3
No. 2	652	9.6	374	15.3	378	15.3	356	15.7	351	15.7
No. 3	651	9.6	388	15.0	363	15.6	340	16.0	364	15.6
No. 4	651	9.6	—	—	—	—	—	—	—	—

表-2.22 マイクロ・メーターによる厚み T_2'

(1) 戸畑鉱石第3バース 単位 mm

資料 回数	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
	1	9.550	9.530	9.550	9.480
2	9.550	9.510	9.490	9.480
3	9.550	9.510	9.480	9.560
4	9.575	9.495	9.480	9.560
5	9.590	9.500	9.460	9.480
6	9.575	9.630	9.450	9.520
7	9.590	9.550	9.440	9.560
8	9.590	9.500	9.515	9.560
9	9.550	9.505	9.575	9.520
10	9.540	9.500	9.475	9.490
平均値	9.57	9.52	9.49	9.52
R	0.04	0.14	0.13	0.08
酸洗前平均値	9.87	9.72	9.65	9.68

〔注〕

R : 最大値と最小値との差

表-2.23 マイクロ・メーターによる厚み T_2'

(2) 洞岡南岸壁A 単位 mm

資料 回数	No. 1	No. 2	No. 3
	1	14.945	15.115	15.135
2	14.805	15.075	15.135
3	14.855	15.245	15.090
4	14.940	15.250	15.215
5	14.720	15.150	15.180
6	14.860	15.155	15.125
7	14.860	15.270	14.990
8	14.845	15.215	15.135
9	14.850	15.060	15.090
10	14.865	15.110	15.140
平均値	14.87	15.17	15.12
R	0.23	0.21	0.23

酸洗前平均値	15.40	15.33	15.31
--------	-------	-------	-------

表-2.24 マイクロ・メーターによる厚み T_2'
(3) 洞岡南岸壁B 単位 mm

資料 回数	No. 1	No. 2	No. 3
	1	15.840	8.920	6.870
2	15.815	8.920	6.530
3	15.805	8.980	6.610
4	15.900	9.110	7.065
5	15.870	9.035	6.505
6	15.805	8.955	6.360
7	15.815	8.725	6.405
8	15.805	9.125	6.850
9	15.810	8.955	6.355
10	15.830	8.740	6.285
平均値	15.83	8.95 15.53	6.58
R	0.09	1.17	0.47

酸洗前平均値	15.86	15.38	15.93
--------	-------	-------	-------

表-2.25 マイクロ・メーターによる厚み T_2'
(4) 中央岸壁A 単位 mm

資料 回数	No. 1	No. 2	No. 3
	1	13.440	15.610	15.475
2	14.080	15.680	15.400
3	13.675	15.820	15.435
4	13.675	15.840	15.360
5	13.540	15.940	15.315
6	13.300	15.610	15.385
7	13.760	15.710	15.400
8	12.795	15.620	15.435
9	13.190	15.750	15.210
10	13.510	15.850	15.510
平均値	13.80	15.74	15.39
R	1.30	0.33	0.30
酸洗前平均値	13.92	15.73	15.51

表-2.26 マイクロ・メーターによる厚み T_2'
(5) 中央岸壁B 単位 mm

資料 回数	No. 1	No. 2	No. 3
	1	15.080	15.095	15.105
2	14.775	15.090	15.015
3	12.915	15.020	15.005
4	12.735	14.970	14.995
5	13.230	15.150	15.130
6	13.375	14.970	15.185
7	15.060	15.080	15.140
8	15.070	15.075	15.045
9	12.855	15.020	15.010
10	13.000	15.075	15.030
平均値	13.81	15.06	15.07
R	2.35	0.18	0.19
酸洗前平均値	14.05	15.19	15.18

T-M式厚み計とマイクロメーターによる厚み測定 値を比較してみると表-2.27のようになる。

表-2.27 T-M式厚み計とマイクロメーターによる測定値の比較

測定位置	戸畑磯石		洞岡南岸壁A		洞岡南岸壁B		中央岸壁A		中央岸壁B	
	測定器の測定値	マイクロメーターの実測値	測定器の測定値	マイクロメーターの実測値	測定器の測定値	マイクロメーターの実測値	測定器の測定値	マイクロメーターの実測値	測定器の測定値	マイクロメーターの実測値
No. 1	9.5	9.57	14.6	14.87	16.0	15.83	13.6	13.80	14.3	13.81
No. 2	9.6	9.52	15.3	15.17	15.3	15.53	15.7	15.74	15.7	15.06
No. 3	9.6	9.49	15.0	15.12	15.6	15.90	16.0	15.39	15.6	15.07
No. 4	9.6	9.52	—	—	—	—	—	—	—	—

T-M式厚み計による鋼矢板岸壁の腐食速度測定は2-2-2に示すように八幡製鉄KK岸壁や秋田港, 下関港, 門司港, 小樽港の各岸壁について行なわれた外, 電気防食効果の検討を始めるための基準厚み測定に対して小名浜港, 神戸港などで使用された。

(3) 電気抵抗式厚み計

本器はスメックゲージとも呼ばれ三菱重工株式会社で開発されたものである。(特願 昭和37-27079, 昭和38-57187) 測定原理は次の通りである。図-2.93に示すように一直線上に等間隔に配置した電流, 電圧接触子を金属板上に置いた場合, 電圧接触子(P₁, P₂)間の電位差は次のようになる。

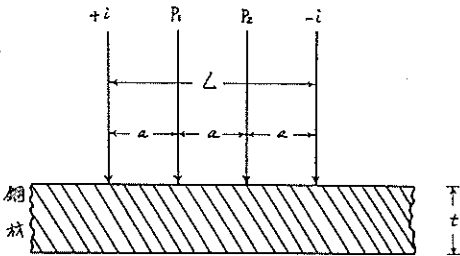


図-2.93 スメックゲージの接触子

$$E = \frac{\rho i}{2\pi t} \{f(\theta_1) - f(\theta_2)\}, \theta_1 = \frac{a}{2t}, \theta_2 = \frac{a}{t} \dots (2.2)$$

いま θ_1 と $f(\theta_1) = f(\theta_2)$ との関係は図-2.94のようになって $a/t \geq 1.65$ ($\leq 5t$)の範囲では $f(\theta_1) - f(\theta_2)$ の値は一定値を示し a/t には無関係になる。このことは $2\pi \cdot Et / \rho i =$ 一定すなわち極間電位差 E が肉厚 t に完全に反比例することになり, この結果スミックゲージは被測定体に電流を流して電位差を測定から被測定体の肉厚を直読出来る。

スメックゲージの利点はカタログによれば次の通りである。

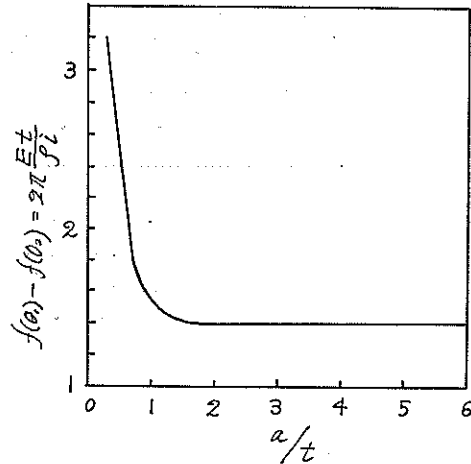


図-2.94 極間電位差 E ~肉厚 t の関係

- (イ) 測定には熟練をほとんど要しなく1回の測定時間は数秒である。
- (ロ) 被測定材料に応じた接触子の選択は不要である。
- (ハ) 測定するとき被測定面は錆を軽く除去する程度で十分である。
- (ニ) 接触子を均等な圧力で押し当てる。このとき表面に多少の凹凸があっても接触子の接触端にはスプリングが付いているため接触子を押し当てるだけで先端の針は完全に被測定体に接触し容易に測定できる。また被測定体裏面の状態(凹凸, 海水, 土砂などの充填物, 腐食生成物など)の影響はない。
- (ホ) 接触子は片手で軽く持てるくらいのものである。
- (ヘ) 金属の加工法や粒子の粗密にかかわらず導体であれば測定できる。
- (ト) 被測定物の曲率がどんなに小さくても測定可能である。
- (チ) 測定範囲は最大測定肉厚50mm以下(常用30mm以下), 最小測定肉厚1mm以下の薄肉鋼板でも測定で

きる。

(9) 測定精度は肉厚 1~2 mm の場合で最小肉厚精度 0.05 であるが肉厚が大きくなるほど感度は落ちる。

(x) 測定器と接触子の距離は 50m 以上離し得る。

以上のようにいろいろの利点があげられるが現在市販されてスメック ゲージは陸上測定を対象としている。したがって港湾で使用する場合接触子を水密型とすることが必要である。

(4) Ultrasonic を利用した厚み計による方法

このタイプの厚み計は Resonance と Pulse による二つに分けられる。(7)(8)

Resonance を利用した厚み計による方法

ピックアップの水晶振動子により超音波を被測定鉄板の一面から送り込んで超音波の定常波を作って共振させる。このとき音速が v (一定), 鉄板厚みが t , 共振の次数が n とすると共振周波数 f_n は次式で表わせる。

$$f_n = n \cdot \frac{v}{2t} \dots\dots\dots (2.3)$$

これらの高調波がブラウン管面に $\Delta f = v/2t$ の間隔で現われてくるので、共振周波数間隔の間隔 Δf , または第一次共振周波数 $f_1 (\Delta f = f_1)$ を知れば鉄板厚み t が求められる。以上の原理にもとづく鉄板厚み計でピックアップと計測部分とからなる。

日本では川崎製鉄 KK の超音波厚み計がある。測定誤差は鉄板の厚みが 0.4~200mm の範囲では $\pm 2\%$ 以下, 2.5~50mm では $\pm 1\%$ 以下などである。

また帝國通信工業 KK の超音波厚み計 (水中用と改良してある) があり 1965 年~1966 年にかけて日本の港湾に適用された例がある。

その外にデンマークで鋼矢板岸壁の スブラッシュ・ゾーン の腐食調査に使用された例がある⁹⁾。調査結果は 2-2-2 で述べることにする。

Pulse-echo を利用した厚み計による方法

$1/1,000 \sim 1/10,000$ c/s の超音波を鉄板の表面にあてたとき、鉄板表面から裏面に達した表面に戻ってくるに要する時間を測定する。この所要時間はオシロスコープに記録し、これを標準厚み鉄板で検定して被測定鉄板の厚みを求める。

この方法の誤差は $\pm 0.254\text{mm} (1/100\text{in})$ で普通 $6.35\text{mm} (1/4\text{in})$ 以上の厚みの鉄板に対して使用される。

(5) マイクロ・メーターによる方法

マイクロ・メーターはありふれた厚み計で $1/1,000\text{mm}$ まで測定可能であるが、鋼製構造物に直接には適用できなくて小片を切り取る必要がある⁶⁾。マイクロ・メーターの接触部分の形状はいろいろあるが両面球状のもの

がよく使用されている。

(6) 重量減量から算出する方法

室内実験ではよく使用されるが野外における長尺鋼材から切断してきた鋼材片に対してもしばしば適用されている。

$$C(\text{mm/yr}) = \frac{3650 \times x}{7.86 \times a \times t} \dots\dots\dots (2.4)$$

x : 重量減量(g)

a : 鋼材片の表面積(cm^2)

t : 腐食期間(day)

7.86: 鋼材の比重(g/cm^3)

(7) 腐食電流による方法

この方法は後述するようにマクロ腐食電流のように腐食電流が測定可能なときに応用できる。

$$C(\text{mm/yr}) = \frac{9.128 \times 10^{-2} \times i}{7.86 \times Aa} \dots\dots\dots (2.5)$$

i : 電池電流(μA)

Aa : アノード表面積(cm^2)

9.128: 鋼材の溶解量($\text{kg/A} \cdot \text{yr}$)

7.86: 鋼材の比重(g/cm^3)

(8) その他

放射性同位元素を使用する方法が開発されている例⁹⁾ やパイプの肉厚変化を連続して測定する方法ならびに同用計測器が紹介されている¹⁰⁾ が、港湾環境での実用性に乏しいのでここでは単に文献の紹介のみにとどめる。

以上のように各種厚み計があり精度および適用法がそれぞれ異なるため各種厚み計による測定値について一度比較、検討しておくことが過去の、または今後の厚み測定値を利用する上においてもっとも大事なことと考えられる。幸い大型鋼による現地腐食速度測定実験を実施しているので比較、検討してみる予定である。

2-2-2 これまでの鋼材腐食調査

鋼製構造物の腐食調査はおのずから調査の範囲が限定され、港湾環境においては比較的観察し易い海面上からせいぜい潜水夫を使用できる海水中までである。したがって泥中の鋼材腐食に関する調査については港湾以外の環境における調査例も引用した。以下に紹介する調査結果はそれぞれの文献に発表された測定値を比較し易い形に整理し直したものである。

(1) 函館港における調査¹¹⁾

調査対象物: 鋼矢板岸壁

調査カ所: スブラッシュ・ゾーン

H.W.L.

海水中

腐食速度測定法:

$$\text{腐食速度 (mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$

T_1 : カタログに示されている鋼矢板の厚み (mm)

T_2 : 鋼矢板の現有厚み (mm) で磁気不飽和型鉄板厚

み計で測定

t : 腐食期間(yr), 21~24yr

調査結果は表-2.28, 29に示す。

表-2.28 函館市海岸町岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	A		B		C		腐食期間 (yr)
No.	種類	カタログ厚み (mm)		位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/y.)	
1	ラ ル ゼ ン III 型	14.5	-2.1	+1.5	—	+0.85	0.09	-1.1	—	24
2		14.5	-2.1	+1.5	0.14	+0.85	0.12	-1.1	0.08	24
3		14.5	-2.1	+1.5	0.33	+0.85	0.15	-1.1	—	24
4		14.5	-2.1	+1.5	0.26	+0.85	0.23	-1.1	0.10	24
5		14.5	-2.1	+1.5	0.28	+0.85	0.06	-1.1	—	24
6		14.5	-2.1	+1.5	0.26	+0.85	0.10	-1.1	0.04	24
7		14.5	-2.1	+1.5	0.19	+0.85	—	-1.1	—	24
8		14.5	-2.1	+1.5	0.26	+0.85	0.20	-1.1	0.04	24
9		14.5	-2.1	+1.5	0.35	+0.85	0.08	-1.1	—	24
10		14.5	-2.1	+1.5	0.27	+0.85	0.14	-1.1	0.05	24
11		14.5	-2.1	+1.5	0.20	+0.85	0.07	-1.1	—	24
12		14.5	-2.1	+1.5	0.26	+0.85	0.07	-1.1	0.04	24
13		14.5	-2.1	+1.5	0.43	+0.85	0.13	-1.1	—	24
14		14.5	-2.1	+1.5	0.52	+0.85	—	-1.1	0.10	24
15		14.5	-2.1	+1.5	0.28	+0.85	—	-1.1	—	24
16		14.5	-2.1	+1.5	0.26	+0.85	—	-1.1	0.05	24
17		14.5	-2.1	+1.5	0.26	+0.85	0.13	-1.1	—	24
18		14.5	-2.1	+1.5	0.34	+0.85	0.16	-1.1	0.05	24
平均					0.29		0.12		0.06	

A : スブラッシュゾーン

B : 測定時の海水面 (H.W.L.), (L.W.L = ± 0)

C : 海水中

(2) 根室港における調査⁽¹⁾

調査対象物 : 鋼矢板岸壁

調査カ所 : スブラッシュ・ゾーン

H.W.L.

海水中

腐食速度測定法 :

$$\text{腐食速度 (mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$

T_1 : カタログ厚み(mm)

T_2 : 現有厚み(mm)で磁気不飽和型鉄板厚み計で測定

t : 腐食期間(yr), 21yr

調査結果は表-2.30に示す。この外に海底泥層面付近の矢板材が既に全く腐食流出していたところがあった。

(3) 釧路港における調査⁽¹⁾

調査対象物 : 鋼矢板岸壁

調査カ所 : スブラッシュ・ゾーン

H.W.L.

腐食速度測定法 :

表-2.29 函館市西浜町岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	A		B		C		腐食期間 (yr)
No.	種類	カタログ厚 み(mm)		位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	
1		14.5	-7.3					-6.3	0.05	24
2		14.5	-7.3					-6.3	0.12	24
3	ラ	14.5	-7.3					-6.3	0.15	24
4		14.5	-7.3					-6.3	0.22	24
5	ル	14.5	-7.3					-6.3	0.04	24
6		14.5	-7.3					-6.3	—	24
7	ゼ	14.5	-7.3					-6.3	0.06	24
8		14.5	-7.3					-6.3	0.03	24
9	ン	14.5	-7.3					-6.3	0.09	24
10		14.5	-7.3					-6.3	0.10	24
11	Ⅲ	14.5	-6.4					-5.4	0.10	24
12		14.5	-6.4					-5.4	0.05	24
13	型	14.5	-6.4					-5.4	0.04	24
14		14.5	-6.4					-5.4	0.10	24
15		14.5	-6.4					-5.4	0.03	24
16		10.5	-3.6	+1.5	0.18			-2.6	0.14	21
17		10.5	-3.6	+1.5	0.23			-2.6	0.10	21
18	ラ	10.5	-3.6	+1.5	0.11			-2.6	0.25	21
19	ル	10.5	-3.6	+1.5	0.20			-2.6		21
20	ゼ	10.5	-3.6	+1.5	0.21			-2.6		21
21	ン	10.5	-3.6	+1.5	0.15			-2.6		21
22		10.5	-3.6	+1.5	0.09			-2.6		21
23	Ⅱ	10.5	-3.6	+1.5	0.17			-2.6		21
24	型	10.5	-3.6	+1.5	0.10			-2.6		21
25		10.5	-3.6	+1.5	0.20			-2.6		21
平均					0.16				0.10	

A : スブラッシュ・ゾーン
 B : 測定時の海水面 (H.W.L.)
 C : 海水中
 L.W.L.=± 0, H.W.L.=+0.85

表-2.30 根室港船入澗調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	A		B		C		腐食期間 (yr)
No.	種類	カタログ厚 み (mm)		位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	
1	テ ル ・ ル I ジ ユ II 型	10.0	+0.3	+2.5	0.28	+1.2	0.15	+0.9	0.30	21
2		10.0	-1.9	+2.5	0.19	+1.2	0.19	-0.3	0.21	21
3		10.0	-2.0	+2.5	0.11	+1.2	0.18	-1.4	0.13	21
4		10.0	-1.6	+2.5	0.21	+1.2	0.18	± 0	0.16	21
5		10.0	-1.6	+2.5	0.23	+1.2	0.20	± 0	0.25	21
6		10.0	-2.2	+2.5	0.22	+1.2	0.15	-1.6	0.20	21
7		10.0	-2.5	+2.2	0.31	+1.2	0.12	-1.9	0.19	21
8		10.0	-2.5	+2.2	0.30	+1.2	0.19	-1.9	0.17	21
9		10.0	-0.4	+1.5	0.19	+1.2	0.18	+0.2	0.35	21
10		10.0	-2.3	+1.5	0.12	+1.2	0.10	-1.7	0.15	21
11		10.0	-1.4	+1.5	0.18	+1.2	0.13	-0.8	0.23	21
12		10.0	-0.5	+1.5	0.21	+1.2	0.18	+0.1	0.16	21
13		10.0	-1.1	+1.5	0.08	+1.2	0.09	-0.5	0.29	21
14		10.0	-3.1	+1.5	0.11	+1.2	0.12	-2.5	0.12	21
15		10.0	-2.5	+1.5	0.14	+1.2	0.13	-1.9	0.31	21
16		10.0	-2.6	+1.5		+1.2	0.15	-2.0	0.18	21
17		10.0	-3.0	+1.5	0.19	+1.2	0.18	-2.4	0.25	21
18		10.0	-2.8	+1.5	0.15	+1.2	0.14	-2.2	0.18	21
19		10.0	—	+1.5	0.26	+1.2	0.19	—	—	21
20		10.0	-0.9	+1.5	0.08	+1.2	0.10	-0.3	0.22	21
21		10.0	-0.9	+1.5	0.08	+1.2	0.12	-0.3	0.31	21
22		10.0	-1.8	+1.5	0.09	+1.2	0.13	-1.2	0.12	21
23		10.0	-2.5	+1.5	0.15	+1.2	0.11	-1.9	0.24	21
24		10.0	-1.6	+1.5	0.10	+1.2	0.10	-1.0	0.25	21
平均					0.17		0.15		0.22	

A : スブラッシュ・ゾーン

B : 測定時の海水面 (H.W.L.=+1.2), (L.W.L.=±0)

C : 海水中

表-2.31 釧路港物揚場調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	A		B		C		腐食期間 (yr)
No.	種類	カタログ厚み (mm)		位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	
1	八幡製鉄Ⅲ号矢板	13.0	-3.0	+1.7	0.31	+1.2	—			22
2		13.0	-3.0	+1.7	0.36	+1.2	—			22
3		13.0	-3.0	+1.7	0.28	+1.2	—			22
4		13.0	-3.0	+1.7	0.24	+1.2	0.32			22
5		13.0	-3.0	+1.7	0.25	+1.2	0.28			22
6		13.0	-3.0	+1.7	0.25	+1.2	0.25			22
7		13.0	-3.0	+1.7	0.29	+1.2	—			22
8		13.0	-3.0	+1.7	0.28	+1.2	0.30			22
9		13.0	-3.0	+1.7	0.30	+1.2	0.21			22
10		13.0	-3.0	+1.7	0.44	+1.2	0.41			22
11	13.0	-3.0	+1.7		+1.2	0.31			22	
12	八幡製鉄Ⅱ号矢板	10.5	-3.0	+1.7	0.17	+1.2	0.15			22
13		10.5	-3.0	+1.7	0.21	+1.2	0.15			22
14		10.5	-3.0	+1.7	0.19	+1.2	0.16			22
15		10.5	-3.0	+1.7	0.20	+1.2	0.21			22
16		10.5	-3.0	+1.7	0.18	+1.2	0.18			22
17		10.5	-3.0	+1.7	0.20	+1.2	0.21			22
平均						0.26		0.24		

A : スプラッシュ・ゾーン
B : 測定時の海水面

$$\text{腐食速度(mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$

T_1 : カタログ厚み(mm)

T_2 : 現有厚み(mm)で磁気不飽和型鉄板厚み計で測定

t : 腐食期間(yr), 22yr

調査結果は表-2.31に示す

(4) 秋田港における調査⁽²⁾

調査対象物: 鋼矢板岸壁

調査カ所: タイダル・ゾーン

M.W.L.

海水中

腐食速度測定法:

$$\text{腐食速度(mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$

T_1 : カタログ厚み(mm)

T_2 : 現有厚み(mm)でT-M式厚み計で測定

t : 腐食期間(yr), 27~30yr

調査結果は表-2.32, 2.33に示す。

(5) 下関港における調査⁽³⁾

調査対象物: 鋼矢板岸壁

調査カ所: タイダル・ゾーン

M. W. L

海水中

腐食速度測定法:

$$\text{腐食速度(mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$

T_1 : カタログ厚み (mm)

T_2 : 現有厚み(mm)でT-M式厚み計で測定

t : 腐食期間(yr), 5~10yr

調査結果は表-2.34, 35に示す。

(6) 門司港における調査⁽³⁾

調査対象物: 鋼矢板セル式岸壁

調査カ所: タイダル・ゾーン

L.W.L.

表-2.32 秋田港北埠頭岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	A		B		C		D		腐食期間 (yr)
No.	種類	カタログ厚み (mm)		位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	
1	YSP-II	10.5	-4.6	+0.5	0.08	±0	0.13	-3.1	0.01	-4.1	0.01	27
2	YSP-II	10.5	-4.6	+0.5	0.08	±0	0.06	-3.1	—	-4.1	0.04	27
3	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.09	±0	0.13	-6.0	0.16	-7.0	0.07	30
4	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.10	±0	0.17	-6.0	0.12	-7.0	0.06	30
5	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.09	±0	0.09	-6.0	0.10	-7.0	0.10	30
6	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.17	±0	0.17	-6.0	0.09	-7.0	0.17	30
7	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.06	±0	0.11	-6.0	0.09	-7.0	0.03	30
8	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.10	±0	0.18	-6.0	0.06	-7.0	0.08	30
9	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.21	±0	0.17	-6.0	0.06	-7.0	0.04	30
10	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.18	±0	0.17	-6.0	0.09	-7.0	0.11	30
11	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	—	±0	—	-6.0	—	-7.0	—	30
12	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	—	±0	—	-6.0	—	-7.0	—	30
13	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.09	±0	—	-6.0	—	-7.0	—	30
14	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.09	±0	0.10	-6.0	0.13	-7.0	0.11	30
15	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	—	±0	0.08	-6.0	—	-7.0	0.10	30
16	YSP-IV	15.5	-7.5	+0.5	0.16	±0	0.20	-6.0	—	-7.0	—	30
17	ラルゼンII	10.5	-7.5	+0.5	—	±0	0.05	-6.0	0.05	-7.0	0.08	30
平均					0.12		0.13		0.09		0.08	

- A : タイダル・ゾーン
 B : 測定時の海水面 (M.W.L.=±0)
 C : 海水中 (海底泥面より1.5m上)
 D : タイダル・ゾーン (海底泥面より0.5m上)

表-2.33 秋田港南埠頭岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	泥面下 (m)	Ac/Aa	A		B		C		D		腐食期間 (yr)
No.	種類	カタログ厚み (mm)				位置 (m)	腐食速度 (mm/yr)	位置 (m)	腐食速度 (mm/yr)	位置 (m)	腐食速度 (mm/yr)	位置 (m)	腐食速度 (mm/yr)	
1	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.08	±0	0.09	-3.1	—	-4.1	—	30
2	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.08	±0	0.12	-3.1	0.12	-4.1	0.07	30
3	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.12	±0	0.12	-3.1	0.09	-4.1	0.08	30
4	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.12	±0	0.12	-3.1	0.08	-4.1	0.07	30
5	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.13	±0	0.12	-3.1	0.12	-4.1	0.12	30
6	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.12	±0	0.12	-3.1	0.12	-4.1	0.12	30
7	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.12	±0	0.13	-3.1	0.12	-4.1	0.08	30
8	ラルゼンII	10.5	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.14	±0	0.14	-3.1	0.11	-4.1	0.09	30
9	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.13	±0	0.14	-3.1	0.09	-4.1	0.04	30
10	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	—	±0	0.09	-3.1	0.04	-4.1	0.09	30
11	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.07	±0	0.05	-3.1	0.08	-4.1	0.04	29
12	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.07	±0	0.12	-3.1	0	-4.1	—	29
13	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.10	±0	0.06	-3.1	0.05	-4.1	0	29
14	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.06	±0	—	-3.1	0.04	-4.1	0.01	29
15	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.10	±0	0.04	-3.1	0.04	-4.1	0.04	29
16	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.06	±0	0.06	-3.1	0.04	-4.1	0.04	29
17	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.07	±0	0.06	-3.1	0.04	-4.1	0.03	29
18	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.09	±0	0.08	-3.1	0.08	-4.1	0.04	29
19	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.09	±0	0.08	-3.1	0.07	-4.1	0.09	29
20	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.09	±0	0.09	-3.1	0.09	-4.1	0.08	29
21	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.10	±0	0.03	-3.1	0.03	-4.1	0.03	29
22	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.09	±0	0.09	-3.1	0.03	-4.1	0.04	29
23	ラルゼンIIa	8.0	-4.6	-3.0	0.43	+0.5	0.04	±0	0.04	-3.1	0.03	-4.1	0.04	29
平均							0.09		0.09		0.07		0.06	

- A : タイダル・ゾーン
 B : 測定時の海水面 (M.W.L.=±0)
 C : 海水中 (海底泥面より1.5m上)
 D : 海水中 (海底泥面より0.5m上)
 Ac : 鋼矢板の海水接触面積
 Aa : 鋼矢板の泥層接触面積

表-2.34 下関港物揚場調査結果

No.	種類	測定鋼矢板 カタログ厚み(mm)	海底泥面 (m)	泥面下 (m)	Ac/Aa	A		B		C		腐食期間 (yr)
						位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	
1	YSP-II	13.0	-3.0	-7.0	0.18	+1.0	0.02	±0	0.03	-1.5	0.08	10
2	YSP-II	13.0	-3.0	-7.0	0.18	+1.0	0	±0	0	-1.5	0	10
3	YSP-III	13.0	-3.0	-7.0	0.18	+1.0	0.13	±0	0.12	-1.5	0.04	10
4	YSP-III	13.0	-3.0	-7.0	0.18	+1.0	0.11	±0	0.03	-1.5	0.02	10
平均							0.07		0.05		0.04	

A : タイダル・ゾーン
 B : 測定時の海面 (L.W.L.=±0)
 C : 海水中
 Ac : 鋼矢板の海水接触面積
 Aa : 鋼矢板の泥層接触面積

表-2.35 下関港第2突堤調査結果

No.	種類	測定鋼矢板 カタログ厚み(mm)	海底泥面 (m)	泥面下 (m)	Ac/Aa	A		B		C		D		腐食期間 (yr)※
						位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	位置(m)	腐食速度 (mm/yr)	
1	YSP-Z45	12.5	-10.0	-10	0.33	+1.0	0.22	±0	0.24	-5.0	0.22	-8.5	0.22	5
2	YSP-Z45	12.5	-10.0	-10	0.33	+1.0	0.18	±0	0.24	-5.0	0.18	-8.5	0.22	5
3	YSP-Z45	12.5	-10.0	-10	0.33	+1.0	0.18	±0	0.20	-5.0	0.18	-8.5	0.18	5
4	YSP-Z45	12.5	-10.0	-10	0.33	+1.0	0.12	±0	0.20	-5.0	0.18	-8.5	0.16	5
5	YSP-Z45	12.5	-10.0	-10	0.33	+1.0	0.28	±0	0.28	-5.0	0.28	-8.5	0.26	5
6	YSP-Z45	12.5	-10.0	-10	0.33	+1.0	0.20	±0	0.22	-5.0	0.18	-8.5	0.22	5
7	YSP-Z45	12.5	-10.0	-10	0.33	+1.0	0.02	±0	0.12	-5.0	0.18	-8.5	0.18	5
平均							0.17		0.21		0.20		0.21	

A : タイダル・ゾーン
 B : 測定時の海面 (L.W.L.=±0)
 C : 海水中
 D : 海水中
 Ac : 鋼矢板の海水接触面積
 Aa : 鋼矢板の泥層接触面積
 *後半の2年は電気防食法を実施

海水中
 腐食速度測定法：

$$\text{腐食速度(mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$
 T_1 : カタログ厚み(mm)
 T_2 : 現有厚み(mm)でT-M式厚み計で測定
 t : 腐食期間(yr), 5yr

調査結果は表-2.36に示す。

(7) 小樽港における調査⁽⁴⁾

調査対象物：鋼矢板岸壁
 調査カ所：海水中(表2.37)
 スブラッシュゾーン(表-2.38)

タイダル・ゾーン(表-2.38)

腐食速度測定法：

$$\text{腐食速度(mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$

T_1 : カタログ厚み(mm)

T_2 : 現有厚み(mm)でT-M式厚み計で測定

t : 腐食期間(yr), 29~34yr

調査結果は表-2.37, 38に示す。

(8) 八幡製鉄KK岸壁調査⁽⁶⁾

調査対象物：鋼矢板岸壁
 調査カ所：スブラッシュ・ゾーン
 L.W.L.

表-2.36 門司港田野浦セル岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面(m)	根入長(m)	Ac/Aa	A		B		C		D		腐食期間(yr)
No.	種類	カタログ厚み(mm)				位置(m)	位置(mm/yr)	位置(m)	位置(mm/yr)	位置(m)	位置(mm/yr)	位置(m)	位置(mm/yr)	
1	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.16	±0	0.18	-5.0	0.18	-8.0	0.18	5
2	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.24	±0	0.18	-5.0	0.16	-8.0	0.18	5
3	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.18	±0	0.18	-5.0	0.16	-8.0	0.18	5
4	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.18	±0	0.18	-5.0	0.18	-8.0	0.18	5
5	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.16	±0	0.16	-5.0	0.18	-8.0	0.12	5
6	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.16	±0	0.10	-5.0	0.10	-8.0	0.10	5
7	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.14	±0	0.12	-5.0	0.10	-8.0	0.10	5
8	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.10	±0	0.10	-5.0	0.10	-8.0	0.18	5
9	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.12	±0	0.16	-5.0	0.10	-8.0	0.14	5
10	YSP-F	9.5	-10.0	-10.0	0.33	+2.0	0.16	±0	0.18	-5.0	0.20	-8.0	0.16	5
平均							0.16		0.15		0.15		0.15	

A : タイダル・ゾーン
 B : L.W.L.=±0
 C : 海水中
 D : 海水中
 Ac : 鋼矢板の海水接触面積
 Aa : 鋼矢板の泥層接触面積

表-2.37 小樽港麻町岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面(m)	根入長(m)	Ac/Aa	A		B		C		腐食期間(yr)
No.	種類	カタログ厚み(mm)				位置(m)	位置(mm/yr)	位置(m)	位置(mm/yr)	位置(m)	位置(mm/yr)	
1	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.03	-4.0	0.03	-6.0	0.02	29
2	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.10	-4.0	0.06	-6.0	0.03	29
3	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.03	-4.0	0.08	-6.0	0.08	29
4	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.07	-4.0	0.04	-6.0	0.06	29
5	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.08	-4.0	0.07	-6.0	0.08	29
6	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.12	-4.0	0.08	-6.0	0.12	29
7	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.06	-4.0	0.06	-6.0	0.06	29
8	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.06	-4.0	0.05	-6.0	0.06	29
9	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.08	-4.0	0.10	-6.0	0.07	29
10	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.09	-4.0	0.09	-6.0	0.11	29
11	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.04	-4.0	0.08	-6.0	0.05	29
12	ラルゼン IIIa	11.0	-7.5	-3.5	0.52	-0.5	0.09	-4.0	0.11	-6.0	0.10	29
平均							0.07		0.07		0.07	

A : 海水中 (L.W.L.=0, H.W.L.=+0.45)
 B : 海水中
 C : 海水中
 Ac : 鋼矢板の海水接触面積
 Aa : 鋼矢板の泥層接触面積

表-2.38 小樽港国鉄岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	根入 (m)	Ac/Aa	A		B		C		腐食期間 (yr)
No.	種類	カタログ厚み(mm)				位置(m)	(mm/yr)	位置(m)	(mm/yr)	位置(m)	(mm/yr)	
1	テル・ル ー ジュII	10.0	* -2	-6	0.2	+1.1	0.09	+0.7	-	+0.2	-	34
2	テル・ル ー ジュII	10.0	-2	-6	0.2	+1.1	0.03	+0.7	0.14	+0.2	-	34
3	テル・ル ー ジュII	10.0	-2	-6	0.2	+1.1	0.09	+0.7	0.25	+0.2	-	34
4	テル・ル ー ジュII	10.0	-2	-6	0.2	+1.1	0.05	+0.7	0.04	+0.2	-	34
5	テル・ル ー ジュII	10.0	-2	-6	0.2	+1.1	0.08	+0.7	0.05	+0.2	-	34
6	テル・ル ー ジュII	10.0	-2	-6	0.2	+1.1	0.01	+0.7	-	+0.2	0.24	34
7	テル・ル ー ジュII	10.0	-2	-6	0.2	+1.1	0.05	+0.7	0.07	+0.2	0.27	34
平均							0.06		0.11		0.26	

* 施工水深は4.0mであったが、その後埋設により現在は約2m

A: スブラッシュゾーン (L.W.L.=±0, H.W.L.=+0.45)

B: スブラッシュゾーン

C: タイダルゾーン

Ac: 鋼矢板の海水接触面積

Aa: 鋼矢板の泥層接触面積

表-2.39 八幡製鉄岸壁調査結果

測定鋼矢板			海底泥面 (m)	根入 (m)	A		B		C		D		腐食期間 (yr)
岸壁	種類	カタログ厚み(mm)			位置(m)	(mm/yr)	位置(m)	(mm/yr)	位置(m)	(mm/yr)	位置(m)	(mm/yr)	
I	YSP-F	9.5	-13.0		+1.0	0	±0	0	-4.5	0	-5.0	0	4
II	YSP-IV	15.5	-7.5		-	-	±0	0.027	-4.5	0.010	-5.0	0.013	30
II	YSP-IV	15.5	-7.5		-	-	±0	0	-4.5	0.003	-5.0	0	30
III	ラルゼンIV	15.5	-6.0		-	-	±0	0.062	-5.0	0	-5.5	0	29
III	ラルゼンIV	15.5	-6.0		-	-	±0	0.052	-5.0	0.003	-5.5	0.007	29
平均								0.028		0.003		0.004	

I: 戸畑磯石岸壁

II: 洞岡南岸壁

III: 中央岸壁

L.W.L.=±0

A: スブラッシュゾーン

B: L.W.L.

C: 海水中

D: 海水中

表—2.40 日本におけるマイクロ腐食速度例

腐食環境	平均腐食度 (mm/yr)	孔食係数
工業地域 (軟鋼)	0.25	2~10
海水 (軟鋼)	0.12	2~30(50)
海水 (鋳鋼)	0.10	2~15
水道水 (軟鋼)	0.05	2~5
土壌 (軟鋼)	0.01	2~25

海水中

腐食速度測定法:

$$\text{腐食速度 (mm/yr)} = \frac{T_1(\text{mm}) - T_2(\text{mm})}{t(\text{yr})}$$

T_1 : カタログ厚み(mm)

T_2 : 現有厚み(mm)でT-M式厚み計とマイクロメーターで測定した平均値

t : 腐食期間(yr), 4~30yr

調査結果は表—2.39に示す。

(9) 日本におけるマイクロ腐食代表例⁽⁵⁾

日本国内でこれまでに広く行なわれたマイクロ腐食速度に関する試験・調査結果の代表値は表—2.40の通りである。

(10) 東京湾水域における調査⁽⁶⁾

石川島播磨重工業KK・技術研究所がSS41について実施した試験によれば、東京湾水域(品川—羽田間)の汚濁水および泥土中におけるマイクロ腐食速度は表—2.41に示す通りである。

(11) Kure Beach における調査⁽⁷⁾

Kure Beach において3年7カ月埋設された鋼矢板の腐食速度測定結果は図—2.95の通りである。また本文の著者(B.C.Lattin)が収集した各地の鋼材腐食調査結果として次のような値が示されている。

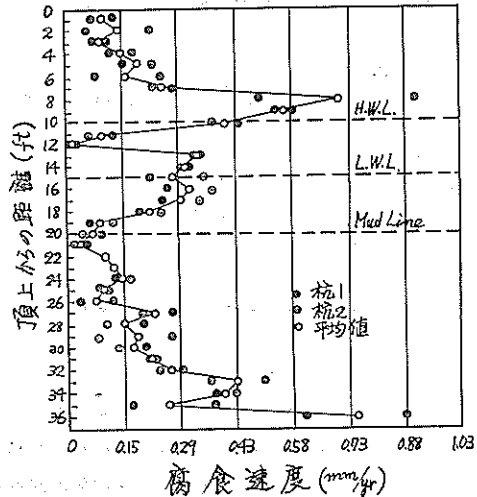
海水中に吊した鋼材片 …0.03~0.18mm/yr
 鋼杭のタイダル・ゾーンの部分 …0.25~0.76mm/yr
 鋼杭のスプラッシュ・ゾーンの部分…0.89mm/yr以上

(12) Andersonの調査⁽⁸⁾

地中に埋設された鋼材の腐食は地下水位面下では大したことはないが、海水が存在するとき、地下水が塩分を多量に含むときまたは乾湿交替があるときには防食措置をとらなければならない。

(13) Hool and Kinnie の調査⁽⁹⁾

地中に埋設された鋼管杭の腐食速度は無視し得る程度であり25年間で0.4mm(0.016mm/yr)の肉厚減少があった。また地下水位面下の鋼矢板の腐食速度は僅少である。



図—2.95 Kure Beach, N.C. における鋼杭の腐食速度 (腐食期間3年7カ月)

(14) Mason and Ogle の調査⁽¹⁰⁾

Nebraska における橋梁基礎鋼杭について数多く調査したところ、河水面または地下水位面下約0.5m以下では腐食速度は小さかった。たとえば、塩分含有量が非常に多い土壌の場合は別として腐食による鋼杭断面の減少は20年間で1%以下であった。しかし塩分の多い場所では2~2.5%の断面減少が見られた。

(15) The Harbor Commissioners of Quebec City の調査⁽¹¹⁾

16年間経過した St. Charles River における鋼矢板について調査したところ、砂や土壌や水中に埋設された部分の腐食速度は空中曝露の部分の腐食速度より小さいことがわかった。このときの調査は地面下0.6mの鋼矢板1本について行なわれたもので鋼矢板に付着していた錆こぶはサンド・ブラストで除去した。

(16) The Los Angeles Department of Engineering の調査⁽¹²⁾

コンクリートの中詰めしたφ1.2mの鋼管で作られて39年経過した棧橋が取りこわされた。鋼管は12.3mが地中に埋設されており、このうち3.3mは地下水面より下にあり残りの9mは砂と砂利中にあった。砂と砂利の一部は乾湿を繰り返す。

表—2. 41 東京湾水域における調査結果

腐食環境	腐食速度 (mm/yr)	
	腐食期時1カ月	腐食期間7カ月
大気中	0.21	0.08
乾湿交番	1.39	0.65
海水中	0.60	0.42
泥土中	0.12	0.13

地下水面の最大孔食深さは 1.6mm であり、地下水面上の平均孔食深さは 1.6mm であった。

(17) Gallaway の調査²³⁾

推ひや泥炭を除いた一般の土壤中にその地下水面下まで打込まれた鋼杭はほとんど腐食されなかったが、地下水面から 0.6m ないし 0.9m までの鋼材部分は腐食した。

しかし B.M. Gallaway はこのような結論を導いた測定値を発表していないし、また推ひや泥炭中の腐食速度について触れていない。

(18) Greulich の調査²⁴⁾

Texas Harbor (Houston) の砂層と粘土層とを貫らぬいて 21.6m の深さまで打込まれて 12 年間経過した H 杭 (12-in, 72lt) について腐食調査をしたところ、泥面下 0.3~0.6m 間の腐食は大したことなくて安全設計荷重 17,000psi (65t 負荷重) を許容しなくなるまでには 85 年かかることがわかった。また、Bonnet Care Spillway (Louisiana) で施工された腐食期間 17 年の H 杭 (36.6m) を引抜いたところほとんど腐食していなかった。

(19) Brouillette and Hanna の調査²⁵⁾

米国 6 カ所の軍港で 13~27 年経過した鋼杭についての調査であり、調査範囲は海底泥面より 0.9m 下から感潮面上の空中までである。したがって鋼杭の腐食環境は上から空中、スブラッシュ・ゾーン、タイダル・ゾーン、海水中および海底泥中(ごく一部で 0.9m の長さだけ)にまたがるが、調査の結果スブラッシュ・ゾーンの腐食速度が最大であった。

海底泥中の腐食速度は表—2. 42 に示す。

表—2. 42 鋼杭の現有厚み (最初の厚みに対する%)

測定位置 (m)	測定地点											
	Boston		Puget Sound		San Diego		Norfolk		Pearl Harbor ^a		Coco Solo ^a	
	平均 ^b	最小 ^c	平均 ^b	最小 ^c	平均 ^b	最小 ^c	平均 ^b	最小 ^c	平均 ^b	最小 ^c	平均 ^b	最小 ^c
海底泥面下 0	78.1	63.7	96.4	88.6	94.3	90.4	91.0	82.4	93.2	86.6	88.5	72.2
" -0.3	92.8	84.8	95.3	89.6	92.5	89.4	94.0	84.6	96.8	88.0	93.8	81.6
" -0.9	81.6	78.2	95.1	88.0	64.6	56.2	93.6	88.4	96.0	82.0	94.4	80.6
腐食期間 yr	17		13		17		27		13		24	

a : 瀝青質塗料を使用

b : 重量減量測定による平均値

c : 肉厚測定による最小値で、最大腐食値を示す。

(20) Lipp の調査²⁶⁾

Miami Beach に打込まれている鋼矢板について腐食調査をしたところ、砂面から下の部分は 8 年前の施工時と同じ状態であったが砂面より上の部分では鋼矢板の厚みが 14% 減少した。

(21) Ross の調査²⁷⁾

Palm Beach (Fla.) における鋼矢板 (3/8in) 防波堤について腐食調査をしたところ、表—2. 43 に示す結果を得た。

(22) Rayner and Ross の調査²⁸⁾

大西洋岸とメキシコ湾沿岸の 94 コの鋼矢板構造物 (大体 25 年以上経過) について腐食調査をしたところ、次のような結果を得た。

隔壁の場合、一時的にまたは全期間通じて裏込めがなくなったところでは腐食速度は大きかった。一方、裏込めの砂が十分詰められるにしたがって腐食速度は急減した。

防波堤や突堤では鋼矢板の両面が砂などで覆われたとき以外は腐食は不均一で激しい。したがって砂などで鋼材面を覆うことは海岸で使用する鋼材の腐食速度を減ず

表—2.43 Palm Beach (Fla.) における調査結果

腐食環境	腐食速度 (mm/yr)	鋼矢板 ($\frac{3}{8}$ ") の推定寿命 (yr)
大気中	0.28	34
タイダル・ゾーン	0.13	75
海底砂層面	2.97	3
海底砂層	0.03	375

るものであり、鋼材の両面を覆うと実際上腐食は無視し得る。

また、Miamiで10年間経過した3グループとStanfordで18年間経過した1グループの計4グループの鋼矢板を引抜いて腐食調査を行なった。このときの地中に埋設されていた深さは約3mであった。

4グループの平均腐食速度は0.02~0.06mm/yrであり、腐食速度が最大カ所は地面下0.6~0.9m間で0.08mm/yrであった。

㉓ Bjerrum の調査²⁹⁾

Norwayの3地点で引抜かれた鋼杭についての調査で次のような結果が得られた。

(イ) 2,000~4,000 Ω -cmのシルト質粘土中に17年間埋設された鋼杭(長さ5.1m)の腐食速度は0.08mm=0.005mm/yrであった。

(ロ) 海水を含む粘土中に18年間埋設された鋼杭(長さ5.1m)の腐食速度は、粘土の比抵抗が50 Ω -cmであるにかかわらず0.25~0.50mm=0.015~0.03mm/yrであった。

(ハ) 低抵抗の海水を含む粘土中に6.5年間埋設された鋼杭の最大腐食速度は2.54mm=0.39mm/yrで、地面下-3.3~-5.1mの1.8mの間隔内の平均腐食速度は0.25mm/yr以上であった。一方、この1.8m層の上下では0.51mm=0.08mm/yr以下であった。この調査では地下水位については検討されていないが、Bjerrumは自分のもつ鋼杭調査の経験から腐食は地下水位面に集中する可能性のあることを予想している。

㉔ Romanoff の調査³⁰⁾

The American Iron and Steel Institute と The National Bureau of Standards and the U.S. Corps of Engineers の共同で行なわれたもので、調査内容は

(イ) 埋設地盤の試験

(ロ) 埋設鋼杭を引抜いて鋼杭表面の観察および腐食速度の測定

(ハ) 埋設鋼杭の周囲をある深度まで掘って鋼杭表

面の観察などである。

調査結果は表—2.44に示す。

㉕ Larrabee の調査⁽¹⁾³¹⁾

Santa Barbara (California) 近くの棧橋の部材として23年間使用されたH杭が棧橋とりこわしのために図—2.96に示すように引抜かれた。



図—2.96 23年経過した鋼杭棧橋の取りこわし状況 (Santa Barbara, California)

測定カ所はL.W.L.と海底泥面上1.5mの2地点で、野外では20本の鋼杭のフランジの厚みをマイクロ・メーターで測定した。一方、室内では9本の鋼杭から切りとった鋼材片について重量とマイクロ・メーターでフランジとウェブの厚みを測定した。腐食前の厚みは上部コンクリート中の鋼杭の厚みを用いて上記現厚みとの肉厚減少量、さらに腐食速度を算出した。

調査結果は表—2.45に示す。

調査結果(本調査より前に行なわれた調査結果も含めて)からLarrabeeは奇麗な海水中に建設された鋼製構造物の腐食速度は、最初の20年間で2mils/yr=0.05mm/yr、20年以後は1mil/yr=0.025mm/yrであらうと推定している。

㉖ Uhlig の調査³²⁾

鉄および鋼の海水中のマイクロ腐食速度を自然条件下で測定した結果86例を表—2.46のように示している。

㉗ デンマークの港湾における調査³³⁾

デンマークの港湾はほとんど鋼矢板岸壁であり、使用されている鋼矢板はラルゼン型である。図—2.97にデンマークの港湾における鋼矢板の腐食傾向の例を示す。腐食速度はこの測定のためにとくにデンマークで開発されたResonanceを利用した厚み計で行なわれた。厚み計のピック・アップは図—2.98に示すように潜水夫が測定カ所の矢板面に押しつけた。測定カ所は海水面直下で測定結果は図—2.99の通りである。

㉘ San Diego 港における調査³³⁾

12"×12"×1/16" (30.5cm×30.5cm×0.15cm)の軟鋼板をSan Diego港内に浸漬してマイクロ腐食速度を測

Location	Age of piling	Soil types	Piling exposed			Soil resistivity		pH	
			Above water table	In water table zone	Below water table	Mini- mum	Maxi- mum	Mini- mum	Maxi- mum
Extracted Piles: Bonnet Carre Spillway Sparrows Point, Md.	Yr 17 18	Sand, organic silt and clay Fill-cinders, slag and sand	X X	X X	X X	Ohm-cm 400 1,130	Ohm-cm 1,050 1,400	6.7 3.7	8.1 6.6
		Natural-sand, silt and clay			X	1,370	12,000	4.9	7.3
Ouaehita River Lock No.8 Grenada Dam; North side	40 12	Silty clay and clay Fill-sandy loam and silty sand			X	1,540	3,200	4.3	6.2
		Natural-shale and organic clay	X X			2,800 3,800	15,400	4.9 3.6	4.9 4.9
Sardis Dam	20	Fill-riprap Natural-sand and lguitic clay			X X		610 1,690		3.0 2.9
Chef Menteur Pass Wilmington Ma. rine Terminal	32 23	Silty sand and clay Fill-cinders		X	X	300	440	6.9	7.8
		Natural-organic silt, sand, clay		X	X				
Lumber River	37	Sandy loam and silty clay		X	X	1,100	4,900	2.3	5.9
Piles in excavations. Memphis Floodwa- ll, Sta.56+14g	7	Clay and silty clay	X	X		1,000	8,600	7.6	7.8
Memphis Flood- wall, Sta.60+00	7	Clay and silty clay	X	X		1,030	7,000	6.8	7.8
Vicksburg Flood- wall, Sta.16+32	7	Sandy loam clay and cinders	X	X		850	7,000	7.4	8.2
Vicksburg Flood- wall, Sta.23+83	7	Silty sand, clay and cinders	X	X		625	9,200	7.1	8.6
Sardis Dam	20	Fill-sandy loam Natural-clay	X		X	10,000 3,000	50,000 7,510	5.4	6.0
Grenada Dam, North side	11	Fill-csacy sand and silt loam	X			1,700	16,500	4.0	4.4
Grenada Dam, South side	11	Fill-sandy sand Natural-silty loam	X X			2,400 4,300	8,000 11,000	4.4	6.4
Berwick Lock, West side	11	Fill-silty clay	X			800	1,550		6.9
		Natural-clay	X	X	X	680	1,220		8.5
Berwick Lock, East side	11	Fill-clay	X			950	1,610		8.1
		Natural-clay		X	X	750	1,610	7.9	8.1
Algiers Lock	12	Fill-silty clay (above piling)							
		Natural-silty clay and organic clay		X		345	1,300	7.7	8.4
Enid Dam	12	Silty clay, sand and silt	X			8,000	10,200	5.1	5.3

a See sections 4.1 and 4.2 for additional information pertaining to location, type and length of piling examined.

b An "Y" indicates the soil level with reference to the water table in which piling was examined. The water table zone includes 2 ft above and below the water line. A dash indicates that piling was not examined at that level.

c Includes all soil resistivity determinations measured by Shepard Canes, 4-pin method, or in the laboratory.

d Condition of piling is described in accordance with the following code:

U, no corrosion, surface is on tirely unaffected as indicated by the presence of mill scale over practically the entire surface. The surface may be roughened in small areas but no pits have a depth greater than the thickness of the mill scale.

M, uniform metal attack indicated by removal of mill scale over large areas and roughening of the surface. Pit depths do not exceed the thickness of the mill scale.

食 調 查 例

Partial chemical composition (mg-co/100g Soil)				Condition of piling			Surface with original mill scale intact			Maximum reduction of thickness in local areas		
CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	Above water table	In water table zone	Below water table	Above water table	In water table zone	Below water table	Above water table	In water table zone	Below water table
0.53	1.40	11.94	0.04	U	M	U	Percent 95+	0	95+	Percent Nil	Nil	Nil
				P, 35	P, 112	S	50+	0	90+	3	29	Nil
						U			95+			Nil
						S			95+			Nil
				P, 122			30			S		
				M			75			Nil		
						P, 60 P, 30						19 11
				P, 150	M	P, 145		75	85		Nil	Nil
					P, 75	M			90+	10	10	Nil
					P, 60	P, 60		0	20		40	12
.00	0.52	0.08	.59	U	P, 35		95+	95+		Nil	Nil	
.00	.43	.03	.21	U	U		90+	90+		Nil	Nil	
.01	.35	.04	.00	P, 40	P, 45		30	40		6	4	
.05	1.24	.03	.00	M	M		70	70		Nil	Nil	
.00	0.08	.00	.00	M			90			Nil		
.00	.00	.03	.02		M	S		90	90		Nil	4
.00	.02	.04	1.10	P, 108			20			16		
				P, 172			70					
.00	.04	.06	0.00	P, 160			50			19		
				P, 61			40			S		
.03	.79	.05	.14	S	S	S	60	60	60	Nil	Nil	Nil
				P, 90			40			11		
.01	.83	.04	.03		P, 75	S		40	75		S	Nil
					P, 40			85			4	
.02	.63	.05	.00				90			Nil		
				M								

S, shallow metal attack, sufficient corrosion to have removed a perceptible amount of metal in localized areas. Pits do not exceed 25 mils in depth.

P, pitting, grooving or scaling to a depth greater than 25 mils. The numbers indicate the maximum pit depth (in mils).

e It should be noted that the average reduction in thickness does not refer to the entire section of piling, but to a very small area, usually 1 in. 2 of the most corroded area of the piling. Refer to section 3,4 for further explanation. "Nil" indicates that the reduction in thickness is negligible.

f Pilings passed through a sand and gravel stratum at a depth of about-116 ft. A 3-ft section of the pile at this level showed moderate corrosion as indicated in section 4.1.

g This was the only coated piling inspected.

表-2.45 鋼杭海水中部の平均腐食速度 (mm/yr)

鋼杭本数	測定カ所	測定場所	腐食期間 (yr)	肉厚減少量 (mm/yr)
20	フランジ	野外	23.6	0.039±0.005
9	フランジ	室内	"	0.034
9	ウエブ	室内	"	0.044
平均値	重量測定	室内	"	0.037±0.006

表-2.46 自然海水中における鉄鋼腐食速度(1)

Line	Composition of Steel, %										Original Condition of Surface	Duration of Exposure, years	Weight Loss		Maximum Depth of Pitting, inches	Geographical Location	Reference (see p. 429)
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Other	mdd			ipy				
														Steel Specimens—Continuously Immersed			
1	.07	.31	.02	.06	.11	.....	.....	.....	.....	.....	.....	2	31	.0058	Sandy Hook, N.J.	1
2	.20	.69	.005	.055	.06	.04	.....	.....	.....	.....	.....	4	23	.0042	Bristol Channel, Westian-super-Mare	2
3	.08	.40	.05	.02	.024	.09	.....	.....	.....	.....	.....	1	21	.0038	Dunkerque, France	3
4	.08	.40	.05	.02	.024	.09	.....	.....	.....	.....	.....	1	18	.0033	Concarneau, France	3
5	.08	.40	.05	.02	.024	.09	.....	.....	.....	.....	.....	1	23	.0042	Le Havre, France	3
6	.08	.40	.05	.02	.024	.09	.....	.....	.....	.....	.....	1	42	.0077	Brest, France	3
7	Average of carbon steels included in tests										15	26	.0048	Halifax, N.S.	4		
8	" " " " " "										15	23	.0043	" "	4		
9	" " " " " "										15	17	.0030	Aukland, N.Z.	4		
10	" " " " " "										15	18	.0033	" "	4		
11	" " " " " "										15	13	.0024	Plymouth, Eng.	4		
12	" " " " " "										15	13	.0024	" "	4		
13	" " " " " "										15	20	.0036	Colombo, Ceylon	4		
14	" " " " " "										15	21	.0039	" "	4		
15	Average of 9 mild steels submitted										3	27	.005	Eastport, Me.	5		
16	.20	.59	.02	.04	.02	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1.2	27	.0049	Gosport, Eng.	6
17	.21	.61	.03	.04	.48	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1.2	28	.0051	" "	6
18	.21	.61	.03	.04	.48	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0.5	33	.0060	" "	6
19	" " " " " "										1	23	.0041	Kill-van-Kull, N.J.	7		
20	" " " " " "										1	36	.0066	San Francisco Calif.	7		
21	" " " " " "										1	20	.0038	Cape May, N.J.	7		
22	.16	.60	.017	.032	.025	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1	27	.005	Freeport, Texas	7
23	.16	.60	.017	.032	.025	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1	22	.004	" "	7
24	.13	.51	.....	.021	.013	.05	.....	.....	.....	.....	.....	5	33	.0060	Kure Beach, N.C.	7
25	.13	.51	.....	.021	.013	.05	.....	.....	.....	.....	.....	7.5	33	.115	" "	7
26	.10	.52	.10	.04	.05	.34	.....	.....	.....	.....	.....	6.5	30	.005	" "	7
27	.08	.61	.27	.04	.05	.....	.....	.....	.....	.....	.....	6.5	13	.002	" "	7
28	.08	.40	.19	.04	.05	.....	.....	.....	.....	.....	.....	6.5	13	.003	" "	7

表-2.46 自然海水中における鉄鋼腐食速度(2)

Line	Steel Specimens—Continuously Immersed										Maximum Depth of Pitting, inches	Geographical Location	Reference (see p. 429)			
	Composition of Steel, %						Duration of Exposure, years	Weight Loss		Original Condition of Surface						
	C	Mn	Si	S	P	Cu		Ni	Cr					Other	mdd	ipy
29	.06	.39	.....	.03	.016	.....	2.15	.....	.....	.....	7.5	26	.005	.094	KureBeach, N. C.	7
30	.18	.66	.27	.016	.016	.....	1.80	.26	.....	.....	7.5	23	.004	.063	Bristol Channel	7
31	1.36	1.92	.23	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	4	19	.0035	.029	Weston-super-Mare	2
32	Carbon steel pipe, 6 ft diam.										10	...	.0045	.084	KureBeach, N. C.	7
33	Steel piling										31	...	.001	.....	Dry Tortugas Island	8
34	Steel piling										7.5	...	.0037	.098	Boston, Mass.	9
Wrought Iron Specimens—Continuously Immersed																
35	.04	.10	.10	.028	.018	.06	.....	.....	.....	.....	4	19	.0035	.031	Bristol Channel, Weston-super-Mare	2
36	.015	.02	.15	.013	.11	.....	.....	.....	.....	.....	15	25	.0046	.060	Halifax, N. S.	4
37	.015	.02	.15	.013	.11	.....	.....	.....	.....	.....	15	12	.0022	.040	Auckland, N. Z.	4
38	.015	.02	.15	.013	.11	.....	.....	.....	.....	.....	15	11	.0020	.061	Plymouth, Eng.	4
39	.015	.02	.15	.013	.11	.....	.....	.....	.....	.....	15	17	.0031	.108	Colombo, Ceylon	4
40	.03	.02	.12	.017	.08	.....	.....	.....	.....	.....	6.5	28	.0051	.139	KureBeach, N. C.	7
41	.025	.05	.15	.014	.031	.01	.....	.....	.....	.....	4	28	.0052	.022	Bristol Channel, Weston-super-Mare	2
42	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0.5	33	.0061	.....	San Francisco, Calif.	7
43	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	6	35	.0065	.191	San Francisco, Calif.	7
44	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	7.5	37	.0069	.164	KureBeach, N. C.	7
Cast Iron Specimens—Continuously Immersed																
45	3.52	.88	1.5	.09	.17	.....	.....	.....	.....	.....	4	21	.0040	.25	Bristol Channel, Weston-super-Mare	2
46	3.41	.74	1.73	.07	.48	.....	.....	.....	.....	.....	15	32	.0059	.058	Halifax, N. S.	4
47	3.41	.74	1.73	.07	.48	.....	.....	.....	.....	.....	15	14	.0026	.198	Plymouth, Eng.	4
48	3.41	.74	1.73	.07	.48	.....	.....	.....	.....	.....	15	46	.0085	G	Colombo, Ceylon	4
49	Average of 8 cast irons in test										3	24	.0048	.....	Eastport, Me.	5
50	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0.5	34	.0068	.....	San Francisco, Calif.	7
51	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	0.2	32	.0065	.....	East River, New York, N. Y.	7

G=Severe graphitic corrosion.

表-2.46 自然海水中における鉄鋼腐食速度(3)

Line	Composition of Steel, %										Original Condition of Surface	Duration of Exposure, years	Weight Loss		Maximum Depth of Pitting, inches	Geographical Location	Reference (see p. 429)
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Other	mdd			ipy				
														Steel Specimens—Exposed at Half-Tide Level			
52	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	6	103	.021	G	Kure Beach, N.C.	7
53	3.0	1.2	1.7	.....	.....	6.5	15.0	2.0	.....	.....	.....	6	4	.0008	0	"	7
54	2.8	1.0	1.7	.....	.....	.....	20.0	2.5	.....	.....	.....	6	8	.0016	0	"	7
Steel Specimens—Exposed at Half-Tide Level																	
55	.13	.55	.12	.06	.04	.....	.....	.....	.....	.....	.....	3	9.4	.0017	.....	Southampton, Eng.	10
56	Average of carbon steels included in test										Pickled	15	15	.0028	.124	Halifax, N.S.	4
57	Average of carbon steels included in test										Mill scale	15	16	.0029	.126	"	4
58	Average of carbon steels included in test										Pickled	15	5	.0009	.023	Auckland, N.Z.	4
59	Average of carbon steels included in test										Mill scale	15	3	.0006	.022	"	4
60	Average of carbon steels included in test										Pickled	15	23	.0042	.049	Plymouth, Eng.	4
61	Average of carbon steels included in test										Mill scale	15	14	.0026	.082	"	4
62	Average of carbon steels included in test										Machined	3	17	.0031	.....	Eastport, Me.	5
63	.17	.52	.....	.03	.02	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1	71	.013	.....	Pacific Ocean, Panama	7
64	Steel piling										Sandblasted	21	.....	.0044	.....	Glenwood Landing, N.Y.	8
65	Steel piling										Mill scale	7.5	.....	.0055	.....	Boston, Mass.	7
66	Carbon steel										Pickled and with mill scale	1	52	.0096	.....	Seabright, N.S.	14
67	.09	.63	.14	.028	.098	.58	.36	.50	.....	.....	.....	1	42	.0077	.....	"	14
68	.09	.37	.68	.028	.141	.39	.....	1.00	.....	.....	.....	1	48	.0086	.....	"	14
69	.09	.47	.14	.022	.008	1.09	1.89	.....	.....	.....	.....	1	39	.0072	.....	"	14
70	.09	.78	.....	.020	.010	1.10	1.32	.....	10Mo	.....	.....	1	44	.0081	.....	"	14
71	.10	.40	.03	.025	.08	.60	.70	.....	.08	.....	.....	1	38	.0070	.....	"	14
72	Copper steel										"	1	53	.0098	.....	"	14
73	Carbon steel										"	1	29	.0058	.....	Esquimalt, B.C.	14

G=Severe graphic corrosion

表-2.46 自然海水中における鉄鋼腐食速度(4)

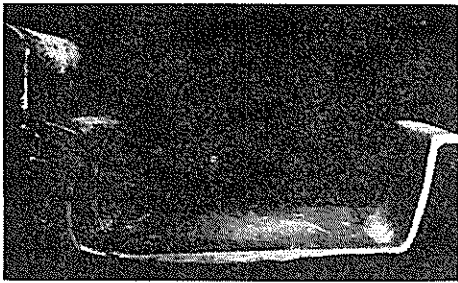
Steel Specimens—Exposed at Half-Tide Level																	
Line	Composition of Steel, %							Original Condition of Surface	Duration of Exposure, years	Weight Loss		Maximum Depth of Pitting, inches	Geographical Location	Reference (see p. 429)			
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni			Cr	Other				mdd	ipy	
74	.09	.63	.14	.028	.098	.58	.36	.50	...	Pickled and with mill scale	1	25	.0046	.....	Esquimalt, B. C.	14
75	.09	.37	.68	.028	.141	.39	.....	1.00	...	"	1	20	.0037	.....	"	14
76	.09	.47	.14	.022	.008	1.02	1.89	.....	...	"	1	26	.0048	.....	"	14
77	.09	.78	.....	.020	.010	1.10	1.32	.....	1.0Mo	"	1	28	.0051	.....	"	14
78	.10	.40	.03	.025	.08	.60	.70	.....	.08 "	"	1	28	.0051	.....	"	14
79	Copper steel										"	1	28	.0051	"	14

Wrought Iron Specimens—Exposed at Half-Tide Level																
Line	Composition of Steel, %							Original Condition of Surface	Duration of Exposure, years	Weight Loss		Maximum Depth of Pitting, inches	Geographical Location	Reference		
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni			Cr	Other				mdd	ipy
80	.015	.02	.15	.013	.11	.....	.....	.....	.....	Pickled	15	13	.0024	.059	Halifax, N. S.	4
81	.015	.02	.15	.013	.11	.....	.....	.....	.....	Pickled	15	4	.0007	.026	Auckland, N. Z.	4
82	.015	.02	.15	.013	.11	.....	.....	.....	.....	Pickled	15	19	.0035	.043	Plymouth, Eng.	4
83	.06	.10	.12	.03	.27	.06	.....	.....	.....	Mill scale	3	7	.0014	.....	Southampton, Eng.	10

Cast Iron Specimens—Exposed at Half-Tide Level																	
Line	Composition of Steel, %							Original Condition of Surface	Duration of Exposure, years	Weight Loss		Maximum Depth of Pitting, inches	Geographical Location	Reference			
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni			Cr	Other				mdd	ipy	
84	3.41	.74	1.73	.07	.48	.....	.....	.....	.....	As cast	15	8	.0015	.052	Halifax, N. S.	4
85	3.41	.74	1.73	.07	.48	.....	.....	.....	.....	As cast	15	11	.0020	.180	Plymouth, Eng.	4
86	Average of 9 cast irons in test										Machined	3	8	.0015	Eastport, Me.	5

表一2.47 海中でのミクロ腐食速度
(San Diego港, 155日浸漬)

No	重量減量			孔食	
	全量(gr)	g/dm ²	mm/yr	平均(mm)	最大(mm)
A	51	6	0.18	0.43	0.48
	50	6	0.18	0.48	0.51
	44	5	0.15	0.33	0.48
	48	6	0.18	0.46	0.46
	47	5	0.15	0.61	0.76
	45	5	0.15	0.48	0.64
平均	47	5	0.15	0.46	0.51



図一2.97 デンマークの港湾で使用した鋼矢板の腐食傾向



図一2.98 デンマークの港湾で使用している鋼矢板岸壁の現有厚み測定状況

表一2.48 海中でのミクロ腐食速度
(San Diego 港, 361日浸漬)

No	重量減量			孔食	
	全量(gr)	g/dm ²	mm/yr	平均(mm)	最大(mm)
B	78	9	0.12	0.91	1.19
	80	9	0.12	0.81	0.81
	74	8	0.10	0.84	0.84
	85	10	0.13	1.12	1.12
	85	10	0.13	1.19	1.19
	81	9	0.12	0.91	0.91
C	78	9	0.12	0.66	0.74
	77	9	0.12	0.51	0.61
D	86	10	0.13	1.35	1.40
	87	10	0.13	1.42	1.52
E	77	9	0.12	0.66	0.76
	85	10	0.13	0.97	1.07
平均値	81	9	0.12	0.94	1.14

定したところ、表2.47, 48, 49のような結果を得た。

(29) Maracaibo 湖における調査³⁴⁾

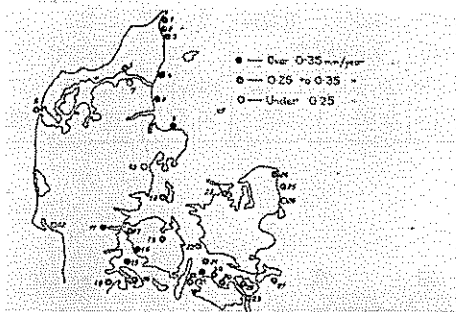
Maracaibo湖 (Western Venezuela) は酸素含有量が多く(湖水面で4~6 cc/l, 深部で2 cc/l以上)さらに高温のために、ミクロ腐食速度は他の地域に比べたら表2.50に示すように非常に大きい。

鋼材の腐食環境として

- Atmospheric zone
- Splash zone
- Wave zone
- Submerged zone
- Mud line
- Mud zone

表—2.49 海中中のミクロ腐食速度
(San Diego 港, 525日浸漬)

No.	重量減量			孔食	
	全量(gr)	g/dm ²	mm/yr	平均 (mm)	最大 (mm)
F	114	13	0.11	0.81	0.97
	115	13	0.11	0.89	1.14
	128	15	0.13	1.09	1.24
	116	13	0.11	0.61	0.66
	115	13	0.11	0.97	1.14
	123	14	0.12	1.04	1.27
平均	118	14	0.12	0.89	1.14



図—2.99 デンマークの港湾における鋼材腐食調査結果 (スプラッシュ・ゾーンにおける鋼矢板の腐食速度)

表—2.50 Maracaibo 湖における鋼材腐食速度と他場所における鋼材腐食速度との比較

場 所	腐食度 mm/ yr	侵食度 mm/ yr	Maracaibo湖 に対する比	
			腐食度	侵食度
Lake Maracaibo	0.41	1.65	1.0	1.0
Panama Canal Zone				
Gatum Lake(水)	0.11	0.43	3.8	3.9
Fort Amador(海水)	0.10	0.70	4.1	2.4
United States				
Monongahela River	0.10	0.13	3.9	12.5
Allegheny River	0.07	0.37	5.7	4.4
Mississippi River	0.03	0.20	14.5	8.3
海水(平均値)	0.13	0.19	3.2	8.7

の6通りをとりあげ、各環境内の腐食速度が図示されて

いるがこれはミクロ腐食速度に基づいて書かれたものか実物についての測定値なのか判断としないのでここでは省くことにした。

(30) The U. S. National Bureau of Standards の調査^{35) 36)}

いくつかの材質の鋼材片をいろいろの種類 of 土壌中に埋設してある期間後の鋼材表面観察ならびにミクロ腐食速度を測定している。

(イ) 高抵抗の土壌中のミクロ腐食速度は埋設後2~3年すると減少するが低抵抗の土壌中では一定である。

(ロ) 材質を低合金にすると初期の腐食速度を低下させるのに役立つが、孔食の進行を増す効果がある。

(31) Forgeson らの調査³⁷⁾

10種類の材質の鋼材片を海水中、平均潮位面、湖水中に浸漬して1, 2, 4, 8年後のミクロ腐食速度をそれぞれ測定した。

測定結果は表2.51~57に示す。

測定結果から次のような腐食傾向が考えられる。

(イ) 低炭素鋼の海水中のミクロ腐食速度は試験地点 [Panama, Kure Beach (North Carolina), Port Hueneme (California)] における地域差はない。

(ロ) Panama における腐食環境 (海水中、平均潮位面、湖水中) に8年間浸漬したときのそれぞれのミクロ腐食速度間には15%の差があった。

ミクロ腐食速度の経年変化は海水中では直線的に湖水中では次第に減少、平均潮位面では増加して行く。

(ハ) ミルスケール付の低炭素鋼は海水中に浸漬すると孔食が激しいが、湖水中と平均潮位面ではミルスケール付、酸処理、研磨の表面状態による差はなく8年後の孔食、重量減少量は同じであった。

(ニ) Copper-bearing steel と低炭素鋼の腐食タイプ、腐食速度は3環境 (海水中、湖水中、平均潮位面) と同じであった。

(ホ) 構造用鋼に2%と5%のニッケルを添加しても湖水中および平均潮位面における腐食抵抗は増加しなかった。海水中では反対にニッケルの添加によって重量減少と孔食が促進された。

(ヘ) 構造用鋼に3%と5%のクロムを添加すると湖水に対する腐食抵抗が増すが、海水中では孔食発生頻度が著しく増す。平均潮位面では重量減少は軟鋼と同じであるが孔食は軟鋼の2倍激しい。

(ト) 低合金鋼は低炭素鋼より水中腐食に対する抵抗は大きくなくある条件下では非常に劣るので、水中構造物に低合金鋼を使用することは明らかに経済的ではない。

(チ) 腐食速度の経年変化は各腐食環境によって異なる

表-2.51 腐食環境組成

成 分 と 性 質	湖 水※			海 水※※					
				± 0			- 14 ft		
	最 大	最 小	平 均	最 大	最 小	平 均	最 大	最 小	平 均
電気伝導度 (mos×10 ⁻³)	0.12	0.091	0.11	51.7	21.3	42.2	51.7	35.4	45.4
含 泥 量 (ppm)	165	69	113	42,776	22,613	35,832	41,480	26,390	35,735
懸濁 泥 (ppm)	23	0.0	7.6	220	0	64	173	0	49
濁 度 (ppm)	<5	<5	<5	20	<5	<5	25	<5	<5
酸 素 飽 和 度 (%)	98	78	90	105	62	90	103	64	87
酸 素 消 費 量 (ppm)	2.4	0.7	1.4	2.5	0.6	1.6	2.6	0.4	1.6
生 物 酸 素 所 要 量 (ppm)	2.2	0.1	1.0	3.4	0.2	1.6	2.3	0.0	1.5
pH (比 色 法)	8.0	6.9	7.5	8.4	7.8	8.2	8.4	7.8	8.1
有 機 物 (ppm)	65	6.6	34	10,379	2,150	6,226	10,632	2,759	6,236
硫 酸 塩 (ppm)	7.2	0.0	2.6	3,240	1,590	2,431	3,177	1,837	2,437
塩 化 物 (ppm)	12.5	0.0	7.6	20,098	11,300	17,415	19,949	10,379	17,357
硝 酸 塩 (ppm)	痕跡	0.0	痕跡	0.01	0.00	痕跡	0.01	0.00	痕跡

※ Gatun Lake
 ※※ Pacific Ocean

表-2.52 鋼材組成

鋼	タ イ プ	仕 様	組 成 (%)								
			C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
A※	低炭素鋼	QQ-S-741, Type II	0.24	0.48	0.040	0.027	0.008	0.03	0.051	0.080	...
D	Copper Bearing	Grade A, Class 1	0.22	0.44	0.019	0.033	0.009	Trace	0.14	0.35	...
E	Ni (2%)	Class 2 RR-SPECS-3-A	0.20	0.54	0.012	0.023	0.18	0.15	0.94	0.63	...
F	Ni (5%)	SAE-25-15 5%Ni Steel	0.13	0.49	0.010	0.014	0.16	0.10	5.51	0.062	...
G	Cr (3%)	Max. 0.10% CHot Rolled	0.08	0.44	0.010	0.017	0.13	3.16	0.16	0.11	0.02
H	Cr (5%)	AISI Type 501D	0.08	0.41	0.020	0.019	0.20	5.06	0.11	0.062	0.52
I	Low-Alloy	Proprietary Cu-Ni	0.08	0.47	0.007	0.026	0.060	None	1.56	0.84	...
J	Low-Alloy	Proprietary Cu-Cr-Si	0.15	0.45	0.113	0.026	0.47	0.68	0.49	0.42	...
K	Low-Alloy	Proprietary Cu-Ni-Mn-Mo	0.78	0.75	0.058	0.022	0.04	Trace	0.72	0.72	0.13
L	Low-Alloy	Proprietary Cr-Ni-Mn	0.13	0.60	0.089	0.21	0.55	0.55	0.30	0.30	0.059

※ Aの外にA₁ A₂についても試験した
 A₁: 低炭素鋼 (鋼ミルスケール:)
 A₂: 低炭素鋼 (machinary)

ので本当の腐食速度は短期間では決められない。

(9) ある合金の腐食抵抗を小さくする効果はその合金を使用せる環境内に長い期間曝露してからわかるものであるから、熱帯の海水中で使用する鋼材を選定するに当り合金の害について考慮すべきである。

② British Institute of Civil Engineer の調査³⁸⁾

鋼材片 (12.7mm, 1000cm²) のスブラッシュ・ゾーン、タイダル・ゾーン、海水中におけるマイクロ腐食速度を4地点で測定した。マイクロ腐食速度は重量減少量より算出されたもので鋼材表面はミルスケールがないものとミルスケールが付いたものの2種類である。

測定結果は表-2.58の通りである。

表—2.53 鋼材(ミクロ)腐食速度の経年変化

鋼	場所	重量減量 (g/dm ²)				鋼	場所	重量減量 ((g/dm ²)			
		1yr.	2yr.	4yr.	8yr.			1yr.	2yr.	4yr.	8yr.
D	1※	11.76	18.26	29.10	55.29	J	1	13.62	22.27	27.69	85.70
	2※	22.43	22.55	22.98	48.26		2	21.44	19.49	24.16	41.89
	3※	15.43	24.24	35.18	46.36		3	11.33	17.17	23.56	33.11
E	1	14.79	18.29	35.08	56.04	K6	1	12.80	19.06	22.97	50.85
	2	17.70	17.88	27.52	45.58		2	21.11	30.33	37.30	49.34
	3	14.71	25.31	34.69	40.18		3	14.50	22.57	31.73	44.62
F	1	12.50	20.05	33.20	63.68	L	1	12.57	21.93	41.56	87.35
	2	15.56	17.23	25.44	39.82		2	18.17	17.95	21.53	40.86
	3	13.11	24.57	35.52	46.78		3	10.68	16.27	25.31	31.08
G	1	4.13	10.92	35.61	80.44	A	1	11.84	16.55	31.39	50.88
	2	22.11	23.56	29.05	51.08		2	18.85	18.51	25.39	46.30
	3	4.84	7.29	10.79	19.30		3	15.22	23.72	33.95	43.68
H	1	5.34	12.13	33.54	63.49	A ₁	1	8.38	15.53	30.09	46.49
	2	23.32	22.63	24.85	48.59		2	18.39	22.48	26.28	36.85
	3	3.80	4.49	7.10	17.09		3	12.58	18.99	27.23	37.67
I	1	11.66	16.88	41.23	52.64	A ₂	1	11.01	18.04	29.81	53.93
	2	23.68	26.00	29.95	79.29		2	21.05	21.73	30.51	49.25
	3	12.07	19.67	26.04	32.62		3	15.02	23.21	31.75	40.52

※ 1：海水中
2：平均潮位
3：海水中

㉓ Mexico における調査³⁵⁾

Dry Tortugas Islands (The Gulf of Mexico)で31年経過 (1902~1933) した棧橋に用いられていた鋼杭(φ6-in)の断面減少を測定した。

測定結果は表—2.59に示す。

㉔ Long Island における調査³⁵⁾

The Long Island Lighting Co. (Glenwood Landing, Long Island, N. Y.)の海水施設に使われている鋼杭から鋼材片を切りとって調査した。鋼杭(8/3in)は片面のみが海水で洗われている状態であり、鋼材片を切りとった場所はタイダル・ゾーン(干満差は210cmでH. W. L. より30~46cm下のところ)である。腐食期間が20年の鋼材片の厚み減少量は2.4mm=0.12mm/yrであった。また腐食期間が10年の鋼材片では1.2mm/yrの腐食速度であった。

㉕ Larrabee の調査⁽²⁾³⁹⁾

これは既設鋼製構造物についての調査ではなくて材質改良による耐食性鋼材開発のために鋼矢板鋼、構造

用炭素鋼、構造用合銅鋼、各種ニッケル、銅、燐を含む低合金鋼の腐食速度を測定したものである。耐食性鋼材についての詳細は別報で述べるのでここでは主として長さ20ft (=6m)の鋼板を海水中に打込んだときの腐食速度について紹介すると定める。

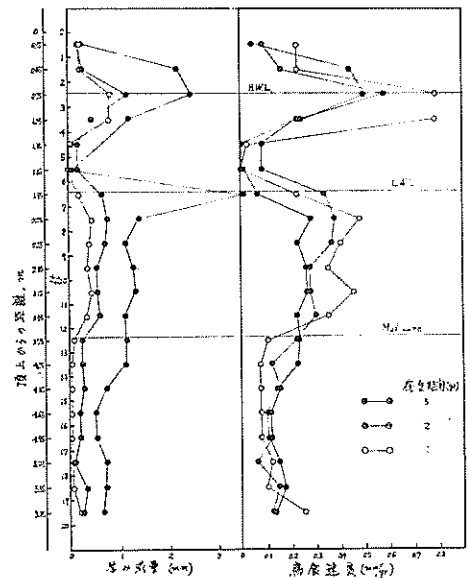
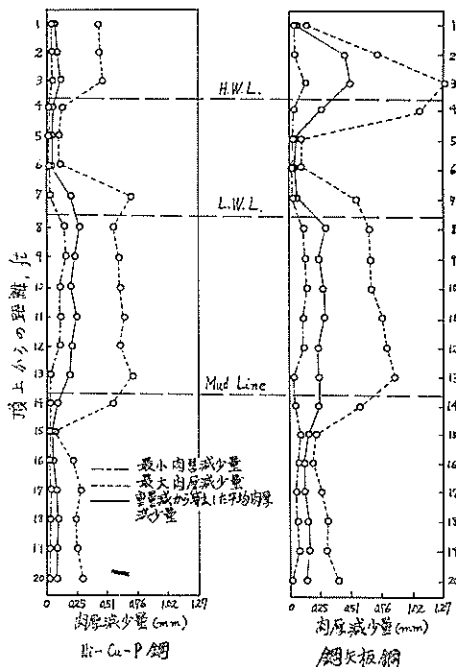
テストピースは長さ6ft、巾6in (=152.4mm)、厚さ250mils (=6.25mm)である。打込み後1年、2年、5年後にテストピースを引抜いて1ftの長さに切り取ってから脱錆する。脱錆後マイクロメーターで肉厚測定するとともに重量を秤量した。図—2.100にマイクロメーターで測定した肉厚および重量減量から算出した肉厚を示す。また重量減量から算出した腐食速度を表—2.60~表—2.66、図—2.101—図2.107に示す。

㉖ Sudrabinの示す調査⁴⁰⁾

長期間埋設された鋼材を引抜いた調査結果について次のように述べている。このときH杭の埋設地点はBonnet Carre Spillway, New Orleans, La. (埋設期間17年), Sparrows Point, Md. (埋設期間18年)であり、

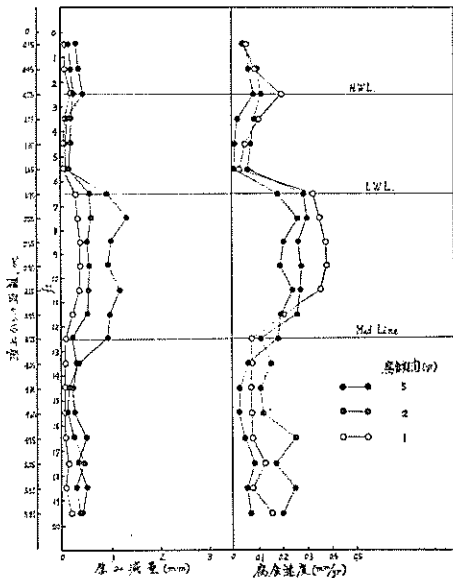
表—2.54 侵 食 度 (平均 値)

鋼	場所	侵 食 度 (mils)				鋼	場所	侵 食 度 (mils)			
		1yr.	2yr.	4yr.	8yr.			1yr.	2yr.	4yr.	8yr.
D	1	5.9	9.2	14.6	27.7	J	1	6.8	11.2	14.0	43.2
	2	11.3	11.3	11.5	24.2		2	10.8	9.8	12.2	21.1
	3	7.9	12.2	17.6	23.3		3	5.7	8.7	11.9	16.7
E	1	7.5	9.2	17.2	31.7	K	1	6.5	9.6	11.5	25.5
	2	8.9	9.0	13.9	22.9		2	10.8	15.2	18.7	24.8
	3	7.4	12.4	17.4	20.2		3	7.3	11.3	15.9	22.4
F	1	6.3	10.1	16.7	32.0	L	1	6.3	11.0	20.9	43.9
	2	7.8	8.7	12.8	20.0		2	9.1	9.0	10.8	20.5
	3	6.6	12.3	17.8	23.5		3	5.4	8.2	12.8	15.6
G	1	2.1	5.5	18.0	40.5	A	1	6.0	8.3	15.8	25.5
	2	11.2	11.9	14.7	25.7		2	9.5	9.3	12.5	23.2
	3	2.4	3.7	5.5	9.7		3	7.8	12.2	17.0	21.9
H	1	2.7	6.1	17.0	32.0	A ₁	1	4.2	7.8	15.1	23.4
	2	11.8	11.4	12.5	24.5		2	9.3	11.3	13.2	18.9
	3	1.9	2.3	3.6	8.7		3	6.3	9.6	13.7	18.9
I	1	5.8	8.5	20.7	26.4	A ₂	1	5.5	9.1	15.0	21.1
	2	11.9	13.1	15.0	39.7		2	0.6	10.9	15.3	24.9
	3	6.1	9.9	13.1	16.4		3	7.5	11.7	16.0	20.2

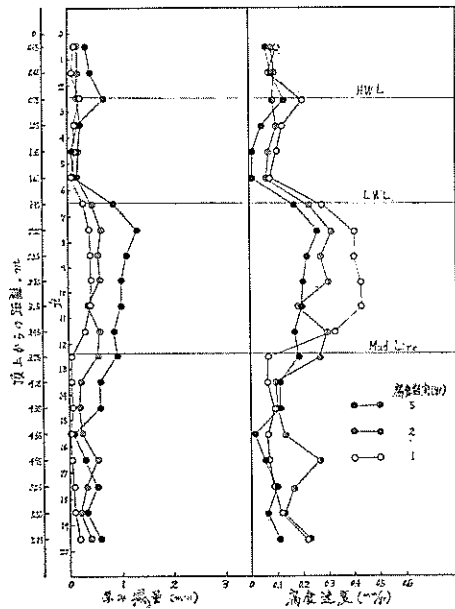


表一.2.55 侵食度 (大きい侵食度20口の平均値)

鋼	場所	侵食度 (mils)				鋼	場所	侵食度 (mils)			
		1yr.	2yr.	4yr.	8yr.			1yr.	2yr.	4yr.	8yr.
D	1	36	44	56	63	J	1	31	50	61	80
	2	25	18	7	45		2	20	0	30	47
	3	21	35	48	63		3	40	55	63	79
E	1	32	51	50	94	K	1	23	37	36	56
	2	20	0	22	39		2	17	36	34	40
	3	19	40	43	64		3	24	43	55	31
F	1	30	50	77	117	L	1	26	47	64	97
	2	0	0	30	39		2	16	0	24	39
	3	19	44	58	69		3	36	67	82	12
G	1	16	31	39	65	A	1	41	47	66	66
	2	23	24	56	82		2	18	16	27	40
	3	24	27	32	54		3	20	38	45	58
H	1	27	29	42	63	A ₁	1	55	77	108	168
	2	30	41	70	88		2	16	18	23	43
	3	23	29	35	52		3	29	43	34	48
I	1	54	62	37	82	A ₂	1	38	61	57	58
	2	0	0	84	70		2	21	21	35	58
	3	18	33	48	68		3	22	37	53	61



図一.2.102 鋼種No. BO1458の腐食状況



図一.2.103 鋼種 No. BO1389 の腐食状況

表-2.56 侵食度(最大値)

鋼	場所	侵食度(mils)				鋼	場所	侵食度(mils)			
		1yr.	2yr.	4yr.	8yr.			1yr.	2yr.	4yr.	8yr.
D	1	61	121	120	108	J	1	46	79	79	175
	2	38	28	10	63		2	27	...	43	54
	3	32	47	75	82		3	56	63	89	93
E	1	51	86	84	179	K	1	44	105	81	139
	2	32	...	67	50		2	23	69	43	94
	3	29	54	62	89		3	33	55	81	120
F	1	57	84	195	214	L	1	36	76	118	259
	2	...	...	64	75		2	22	...	31	50
	3	33	55	77	100		3	47	85	111	146
G	1	20	38	49	78	A	1	62	61	113	86
	2	32	45	72	93		2	27	23	55	65
	3	28	36	38	63		3	24	46	66	71
H	1	91	50	51	90	A ₁	1	104	113	158	263
	2	37	45	81	99		2	21	30	40	75
	3	29	35	42	58		3	40	67	51	74
I	1	85	89	68	152	A ₂	1	64	157	118	157
	2	...	...	185	134		2	40	29	57	124
	3	31	55	74	85		3	26	47	62	88

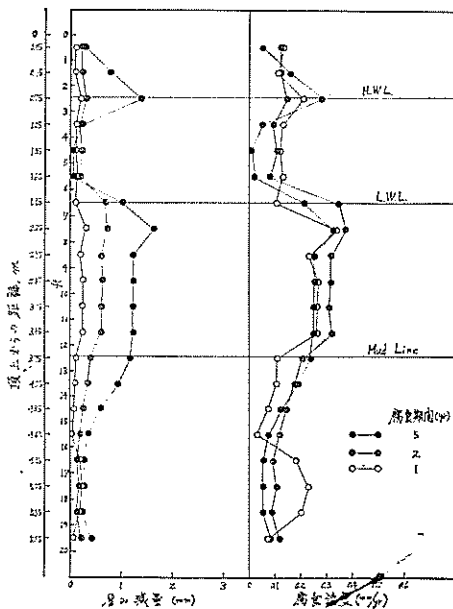


図-2.104 鋼種 No. BO 1457 の腐食状況

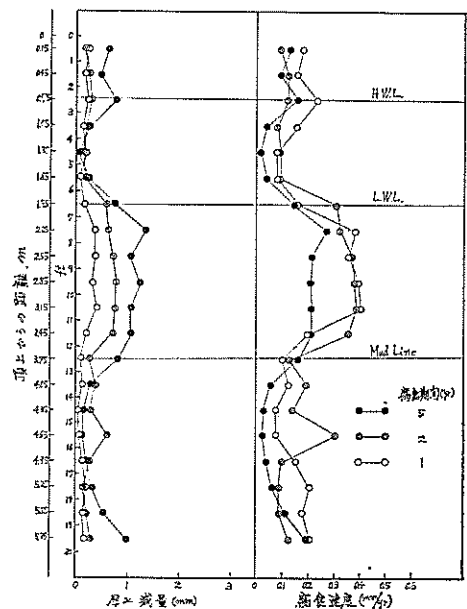
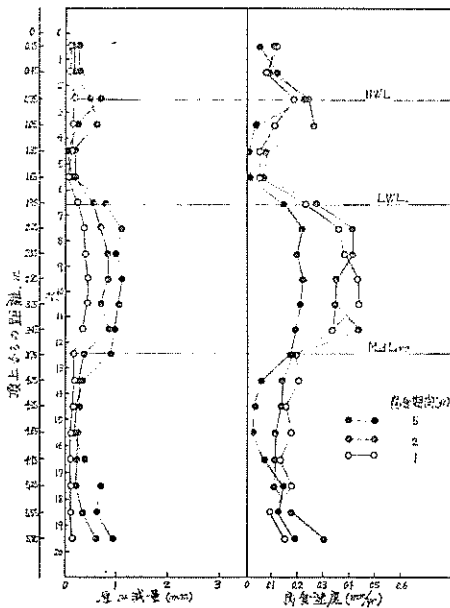


図-2.105 鋼種 No. BO 1459 の腐食状況

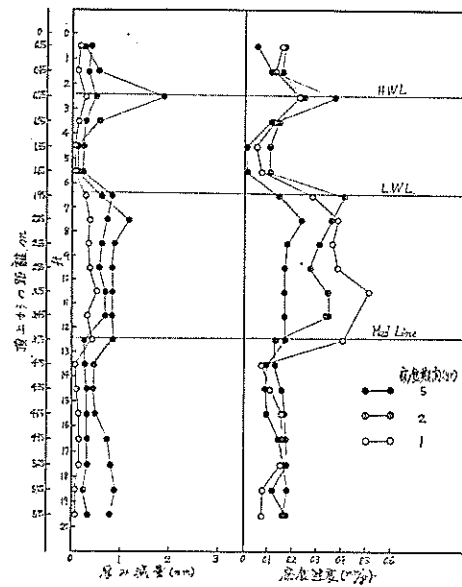
表—2.57 孔食係数および腐食様式

鋼 場所	孔 侵 係 数				腐 食 様 式	鋼 場所	孔 食 係 数				腐 食 様 式		
	1yr.	2yr.	4yr.	8yr.			1yr.	2yr.	4yr.	8yr.			
D	1	10	13	8	4	RAQH	J	1	7	7	6	4	RAHF
	2	3	2	1	3	AR		2	3	...	4	3	E
	3	4	4	4	4	EF		3	10	7	7	6	EQ
E	1	7	9	5	5	ARHQF	K	1	7	11	7	5	ARHQLF
	2	4	...	5	2	AFR		2	2	5	2	4	RALF
	3	4	4	4	4	EQF		3	5	5	5	5	RF
F	1	9	9	15	...	RAHQ	L	1	6	7	6	6	RH
	2	...	...	5	4	AR		2	2	...	3	2	RA
	3	5	4	4	4	EQ		3	9	10	9	9	RQ
G	1	10	7	3	2	R	A	1	10	7	7	3	RAHQ
	2	3	4	5	4	DR		2	3	2	4	3	ERH
	3	12	10	7	6	RAQH		3	3	4	4	3	E
H	1	34	8	3	3	R	A ₁	1	25	14	10	11	QKHF
	2	3	4	6	4	DR		2	2	3	3	4	E
	3	15	15	12	7	RAK		3	6	7	4	4	EK
I	1	15	10	3	6	RAHQ	A ₂	1	12	17	8	6	RAQH
	2	...	...	12	3	RA		2	4	3	4	5	RAQ
	3	5	6	6	5	R		3	3	4	4	4	EH

A : Uniform Attack, D : Pitting Attack (Uniform), E : Localized Attack (Uniform), F : Stress, H : Concentration Cell, K : No Visible Attack, L : Defect in Metal, Q : Pitting Attack (Random), and R : Localized Attack (Random)



図—2.106 鋼種 No. BO 1467 の腐食状況



図—2.107 鋼種 No. BO 1456 の腐食状況

表-2.58 鋼杭腐食速度測定結果

測定場所	mm/yr					
	スブラッシュ・ゾーン		潮位間		海水中	
	ミルスケール付	ミルスケールなし	ミルスケール付	ミルスケールなし	ミルスケール付	ミルスケールなし
Plymouth	0.160	0.035	0.058	0.104	0.058	0.071
Halifax	0.027	0.022	0.050	0.083	0.114	0.114
Auckland	0.058	0.040	0.015	0.022	0.093	0.101
Colombo	0.259	0.320	0.220	0.200	0.114	0.114

表-2.59 メキシコ湾における調査結果

杭頭からの位置(mm)	測定位置	31年間の腐食量(mm)	腐食速度(mm/yr)
76.3	H.W.L. 上 0.87m	6.350	0.206
304.8	H.W.L. 上 0.18m	5.588	0.180
609.6	タイダル・ゾーン	1.524	0.048
914.4	L.W.L.	1.524	0.048
1,219.2	海水中	0.762	0.025

鋼矢板の埋設地点は6カ所（埋設期間7年～40年）である。この外に他の11地点の切通しに部分的に曝らされた鋼杭の調査結果も含まれている。

(イ) 攪乱されない自然土壤中に打込まれた鋼杭の腐食量およびタイプは土壌の性質には関係なく支持杭として作用する鋼材の寿命にはほとんど影響しない。

(ロ) 何本かの鋼杭では地下水面上の土中部分に中位の腐食が見られた。

(ハ) 大抵の腐食は酸素濃淡電池による。地下水面下2～3フィートの酸素不足の不攪乱土中の鋼材部分にはほとんど腐食は発生しなかった。しかし Sparrows Point では-116 フィートにおけるH杭には中位の腐食が進行したが、これはその付近の地下水、砂、砂利層中に溶解した炭酸ガス作用に起因した。

(ニ) 攪乱土中のパイプラインに対して技術者が広く行なう調査方法は不攪乱土壤中に打込まれた鋼杭には適用できない。もし標準調査技術が適用されるならば一般に過度の腐食が推定される。

Sudrabin は土中鋼材の腐食機構として図-2.108に示す例をあげている。

図-2.108 のAは土中に打込まれた単杭の場合である。この場合地下水面下の酸素不足の土中鋼材の電位はかなり卑となり、たとえば地表面から80ft (=24m) のところでは-780mV（飽和甘汞電極に対して）であった。

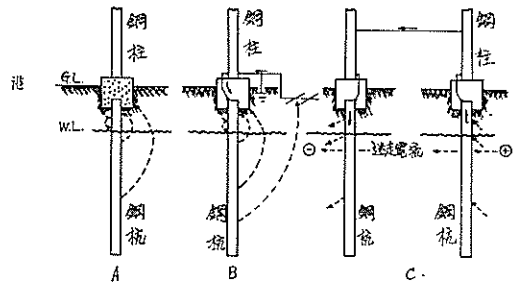


図-2.108 基礎杭の腐食機構 (L.P. Sudrabin)

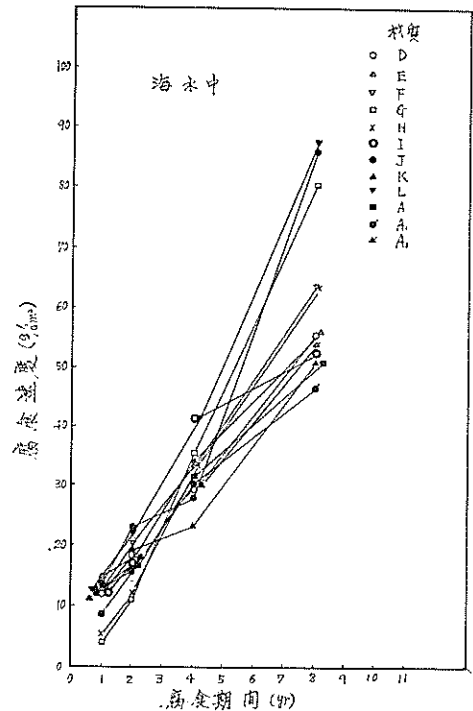


図-2.109 海水中におけるマイクロ腐食速度の経年変化

表—2.60 Average Decrease in Thickness of 20-Foot Specimens in Sea Water※

Steel No. BO1468 (Sheet-Piling Steel)

Avg. Distance From Top		Decrease in Thickness (mils)			Decrease in Thickness (mm)			Corrosion Rate (mm/yr)		
ft	m	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr
※※										
0.5	0.15	9	7	9	0.229	0.178	0.229	0.229	0.089	0.046
1.5	0.45	9	13	87	0.229	0.330	2.210	0.229	0.165	0.442
2.5	0.75	31	46	98	0.787	1.168	2.489	0.787	0.584	0.498
3.5	1.05	31	18	48	0.787	0.457	1.219	0.787	0.229	0.244
4.5	1.35	1	7	1	0.025	0.178	0.025	0.025	0.089	0.005
5.5	1.65	0	7	2	0	0.178	0.050	0	0.089	0.010
6.5	1.95	9	27	14	0.229	0.686	0.356	0.229	0.343	0.071
7.5	2.25	19	30	56	0.483	0.762	1.422	0.483	0.381	0.284
8.5	2.55	16	29	45	0.406	0.737	1.143	0.406	0.369	0.229
9.5	2.85	14	22	52	0.356	0.559	1.321	0.356	0.280	0.264
10.5	3.15	18	22	53	0.457	0.559	1.346	0.457	0.280	0.269
11.5	3.45	14	24	45	0.356	0.610	1.143	0.356	0.305	0.229
12.5	3.75	4	10	46	0.102	0.254	1.168	0.102	0.127	0.234
13.5	4.05	3	10	45	0.076	0.254	1.143	0.076	0.127	0.229
14.5	4.35	3	12	29	0.076	0.305	0.737	0.076	0.153	0.147
15.5	4.65	3	9	21	0.076	0.229	0.533	0.076	0.115	0.107
16.5	4.95	3	9	22	0.076	0.229	0.556	0.076	0.115	0.112
17.5	5.25	5	5	30	0.127	0.127	0.762	0.127	0.064	0.152
18.5	5.55	4	14	30	0.102	0.356	0.762	0.102	0.178	0.152
19.5	5.85	10	10	27	0.254	0.254	0.686	0.254	0.127	0.137

Note : Approximate Mean High Tide 2 to 3 feet from tops of Specimens; approximate Mean Low Tide about 6 feet from tops of specimens.

※ Specimens were exposed in 1951; figures quoted were calculated from losses of weight.

※※ Unrealistic values because of partial protection from top supporting member

(注一般に電気防食電位は飽和甘汞電極基準では -770 mV であるからこの深度では裸鋼材のまま防食電位に達したことになる。) これに対して地下水面上の土中鋼材は酸素豊富のため地下水下の鋼材に対して貴な電位であるから図—2.108A に示す方向に電流が流れる。このとき地下水下の鋼材部分の面積が地下水面上の鋼材部分の面積に対して大きいため地下水下鋼材の腐食は小さいと述べマクロ腐食の傾向について触れていることは注目されよう。また地下水面上の土中鋼材では別にこの部分だけの腐食も起ることを意味している。

図2.108B はAの単杭が地下鋼材に電気的に接続された場合である。この場合は地下水下の鋼材から流出する電流の流入表面積が大きくなったため単杭のときよりマクロ腐食が大きくなることが予想される。

図—2.108C は組杭となったときに迷走電流の影響が加わった場合である。この場合はA、Bとは異って迷走電流による腐食が主である。

2—2—3 腐食速度の経年変化

鋼製構造物の設計にあたっては腐食速度の経年変化が重要である。過去の測定データから腐食速度の経年変化を眺めてみると次のようになる。

B. W. Forgesonら³⁷⁾は11種類の鋼材片を海水中、平均潮位間、湖水中に浸漬したときのマイクロ腐食速度を重量減量から求めた。このときの腐食期間は1, 2, 4, 8年である。

表—2.53から海水中、平均潮位、湖水中における腐食速度の経年変化は図—2.109, 110, 111 のようになる。

次に各材質毎に腐食速度の経年変化を求めてみると図

表-2.61 Average Decrease in Thickness of 20-Foot Specimens in Sea Water
Steel No. B01458 (Ni 0.54%, Cu 0.52%, P 0.12%)

Avg. Distance From Top		Decrease in Thickness (mils)			Decrease in Thickness (mm)			Corrosion Rate (mm/yr)		
ft	m	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr
0.5	0.15	3	4	11	0.076	0.102	0.279	0.076	0.051	0.056
1.5	0.45	3	7	13	0.076	0.178	0.330	0.076	0.089	0.066
2.5	0.75	8	9	17	0.203	0.229	0.432	0.203	0.115	0.086
3.5	1.05	4	7	4	0.102	0.178	0.102	0.102	0.089	0.020
4.5	1.35	2	6	1	0.050	0.152	0.025	0.050	0.076	0.005
5.5	1.65	1	5	1	0.025	0.127	0.025	0.025	0.064	0.005
6.5	1.95	13	23	37	0.330	0.584	0.940	0.330	0.292	0.188
7.5	2.25	14	24	52	0.356	0.610	1.321	0.356	0.305	0.264
8.5	2.55	15	21	41	0.381	0.533	1.041	0.381	0.267	0.208
9.5	2.85	15	22	38	0.381	0.559	0.965	0.331	0.280	0.193
10.5	3.15	14	22	48	0.356	0.559	1.219	0.356	0.280	0.244
11.5	3.45	8	21	39	0.203	0.533	0.991	0.203	0.267	0.198
12.5	3.75	3	9	37	0.076	0.229	0.940	0.076	0.115	0.188
13.5	4.05	3	12	13	0.076	0.305	0.330	0.076	0.153	0.666
14.5	4.35	3	9	6	0.076	0.229	0.152	0.076	0.115	0.030
15.5	4.65	3	10	5	0.076	0.254	0.127	0.076	0.127	0.026
16.5	4.95	3	20	10	0.076	0.508	0.254	0.076	0.254	0.051
17.5	5.25	5	14	18	0.127	0.356	0.457	0.127	0.178	0.061
18.5	5.55	3	20	12	0.076	0.508	0.305	0.076	0.254	0.061
19.5	5.85	6	16	15	0.152	0.406	0.381	0.152	0.203	0.076

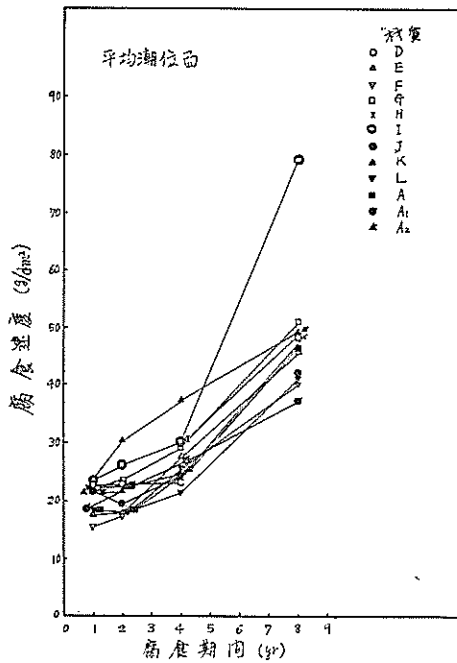


図-2.110 平均潮位面におけるミク口腐食速度の経年変化

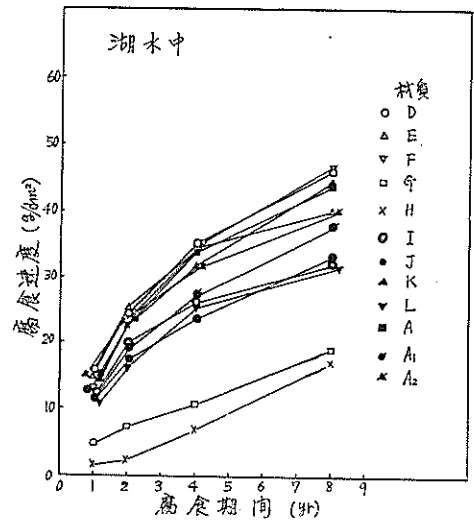


図-2.111 湖水中におけるミク口腐食速度の経年変化

表-2.62 Average Decrease in Thickness of 20-Foot Specimens in Sea Water

Steel No. B01389 (Ni 0.55%, Cu 0.22%, P 0.17%)

Avg. Distance From Top		Decrease in Thickness (mils)			Decrease in Thickness (mm)			Corrosion Rate (mm/yr)		
ft	m	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr
0.5	0.15	4	7	12	0.102	0.178	0.305	0.102	0.089	0.061
1.5	0.45	3	7	16	0.076	0.178	0.406	0.076	0.089	0.081
2.5	0.75	8	7	26	0.203	0.178	0.660	0.203	0.089	0.132
3.5	1.05	5	8	9	0.127	0.203	0.229	0.127	0.102	0.046
4.5	1.35	4	6	2	0.102	0.152	0.051	0.10	0.076	0.010
5.5	1.65	3	5	2	0.076	0.127	0.051	0.076	0.064	0.010
6.5	1.95	11	18	34	0.279	0.457	0.864	0.279	0.229	0.173
7.5	2.25	16	25	52	0.406	0.635	1.321	0.406	0.318	0.264
8.5	2.55	16	22	44	0.406	0.556	1.118	0.406	0.278	0.224
9.5	2.85	17	24	41	0.432	0.610	1.041	0.432	0.305	0.208
10.5	3.15	17	15	40	0.432	0.381	1.026	0.432	0.191	0.205
11.5	3.45	13	24	35	0.330	0.610	0.889	0.330	0.305	0.178
12.5	3.75	3	22	38	0.076	0.556	0.965	0.076	0.278	0.193
13.5	4.05	3	8	24	0.076	0.203	0.610	0.076	0.102	0.122
14.5	4.35	4	9	24	0.102	0.229	0.610	0.102	0.115	0.122
15.5	4.65	3	11	5	0.076	0.279	0.127	0.076	0.140	0.026
16.5	4.95	3	22	13	0.076	0.556	0.330	0.076	0.278	0.066
17.5	5.25	4	14	22	0.102	0.356	0.556	0.102	0.178	0.111
18.5	5.55	5	10	15	1.127	0.254	0.381	0.127	0.127	0.076
19.5	5.85	9	18	24	0.229	0.457	0.610	0.229	0.229	0.122

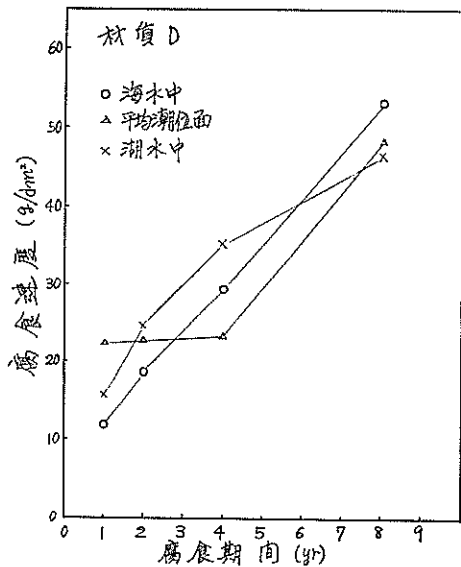


図-2.112 鋼材(D)ミクロ腐食速度の経年変化

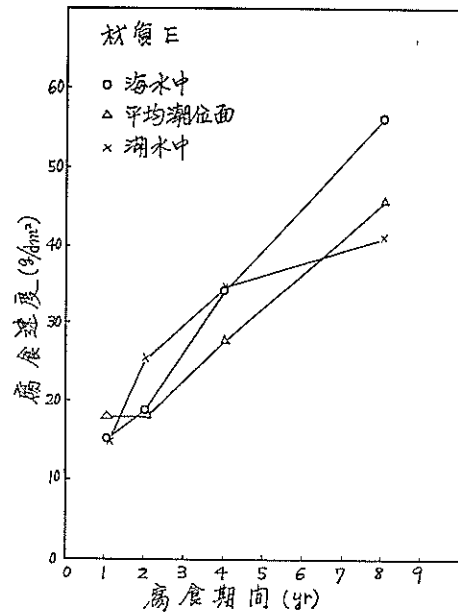


図-2.113 鋼材(E)ミクロ腐食速度の経年変化

表-2.63 Average Decrease in Thickness of 20-Foot Specimens in Sea Water

Steel No. B01457 (Ni 0.54%, Cu 0.20%, P 0.11%)

Avg. Distance From Top		Decrease in Thickness (mils)			Decrease in Thickness (mm)			Corrosion Rate (mm/yr)		
ft	m	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr
0.5	0.15	5	9	9	0.127	0.229	0.229	0.127	0.115	0.046
1.5	0.45	4	9	30	0.102	0.229	0.762	0.102	0.115	0.152
2.5	0.75	8	11	54	0.203	0.279	1.372	0.203	0.140	0.274
3.5	1.05	5	7	9	0.127	0.178	0.229	0.127	0.089	0.046
4.5	1.35	4	8	1	0.102	0.203	0.025	0.102	0.102	0.05
5.5	1.65	5	6	2	0.127	0.152	0.050	0.127	0.076	0.010
6.5	1.95	4	27	41	1.102	0.686	1.041	0.102	0.343	0.208
7.5	2.25	13	29	64	0.330	0.737	1.626	0.330	0.369	0.325
8.5	2.55	9	25	49	0.229	0.635	1.245	0.229	0.313	0.249
9.5	2.85	10	25	49	0.254	0.635	1.245	0.254	0.313	0.249
10.5	3.15	10	24	49	0.254	0.610	1.245	0.254	0.305	0.249
11.5	3.45	10	25	49	0.254	0.635	1.245	0.254	0.318	0.249
12.5	3.75	4	16	46	0.102	0.406	1.168	0.102	0.203	0.234
13.5	4.05	4	14	37	0.102	0.356	0.940	0.102	0.178	0.188
14.5	4.35	3	11	24	0.076	0.279	0.610	0.076	0.140	0.122
15.5	4.65	2	9	14	0.025	0.229	0.356	0.025	0.115	0.071
16.5	4.95	7	7	11	0.178	0.178	0.279	0.178	0.089	0.056
17.5	5.25	9	8	10	0.229	0.203	0.254	0.229	0.102	0.051
18.5	5.55	8	7	10	0.203	0.178	0.254	0.203	0.089	0.051
19.5	5.85	3	9	17	0.076	0.229	0.432	0.076	0.115	0.086

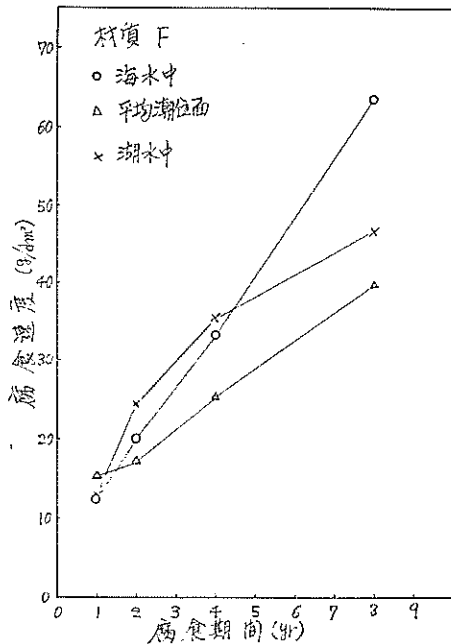


図-2.114 鋼材 (F) ミクロ腐食速度の経年変化

-2.112~123の通りである。

普通鋼材の海水中の腐食速度の経年変化を3地点で測定したところ表-2.67, 図2.124 のようになった。

San Diego Port におけるミクロ腐食速度の経日変化は図-2.125 の通りである。

実際に海中に打込まれた鋼材の H.W.L. 上のスプラッシュ・ゾーンにおける腐食速度の経年変化は図-2.126 のようになる。

表-2.46に示す Uhlig の調査結果にもとづいて Larra bee³¹⁾ は「海水中の鋼材ミクロ腐食速度は 5 mils/yr = 0.127mm/yr であり, 腐食速度は腐食期間に対して一次的に増加すると考えられると述べている。

また1本の実験用鋼材としての鋼種による腐食速度の経年変化の模様は図-2.101~107 に示してある。A. S. Krisher³²⁾ は腐食速度の経年変化をテストピースによる場合と電気抵抗測定から継続測定した場合を比較して図-2.127 のように示しており途中変化を示すものとして興味深い。

以上のように腐食速度の経年変化は多少図示できる

表—2.64 Average Decrease in Thickness of 20-Foot Specimens in Sea Water

Steel No. B01459 (Ni 0.55%, Cu 0.20%, P 0.14%)

Avg. Distance From Top		Decrease in Thickness (mils)			Decrease in Thickness (mm)			Corrosion Rate (mm/yr)		
ft	m	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	6yr
0.5	0.15	7	7	24	0.178	0.178	0.610	0.178	0.089	0.122
1.5	0.45	6	9	18	0.152	0.229	0.457	0.152	0.115	0.091
2.5	0.75	9	9	30	0.229	0.229	0.762	0.229	0.115	0.152
3.5	1.05	6	6	7	0.152	0.152	0.178	0.152	0.076	0.036
4.5	1.35	3	6	2	0.076	0.152	0.050	0.076	0.076	0.010
5.5	1.65	3	7	7	0.076	0.178	0.178	0.076	0.089	0.036
6.5	1.95	6	24	29	0.152	0.610	0.737	0.152	0.305	0.148
7.5	2.25	15	25	53	0.381	0.635	1.346	0.381	0.318	0.269
8.5	2.55	14	29	42	0.356	0.737	0.067	0.356	0.369	0.213
9.5	2.85	15	30	49	0.381	0.762	1.245	0.381	0.381	0.209
10.5	3.15	16	31	42	0.406	0.787	1.067	0.406	0.394	0.213
11.5	3.45	8	28	42	0.203	0.711	1.067	0.203	0.356	0.213
12.5	3.75	4	10	32	0.102	0.254	0.813	0.102	0.127	0.162
13.5	4.05	5	15	11	0.127	0.381	0.279	0.127	0.191	0.056
14.5	4.35	3	11	6	0.076	0.279	0.152	0.076	0.140	0.030
15.5	4.65	3	24	5	0.076	0.610	0.127	0.076	0.305	0.025
16.5	4.95	6	8	7	0.152	0.203	0.178	0.152	0.102	0.036
17.5	5.25	8	7	12	0.203	0.178	0.203	0.203	0.089	0.061
18.5	5.55	7	7	22	0.178	0.178	0.556	0.178	0.089	0.111
19.5	5.85	8	10	39	0.203	0.203	0.991	0.203	0.127	0.198

が、これからは腐食条件をできるだけ正確にした測定結果を数多く集めて行くことが大切であろう。

2-3 腐食に対する鋼製構造物設計法の現状

港湾における鋼製構造物はすでに防食手段がいろいろ施されているが、本文では防食に入るための基礎を固める意味で腐食の問題に焦点を絞って防食については本文に続いて後日述べることにしているので本章でもこの方針を守ることにする。

港湾施設の建設は計画部門から出された対象物を設計部門で設計をし、設計にしたがって施工するルートで行なわれる。設計部門では対象物のおかれる設計条件（一般条件としては天端高、H.W.L., L.W.L., 水深、上載荷重、エブロン巾、荷役機械、設計震度などがあり、その他の条件としては地盤条件がある）を考えて対称とする構造物の設計計算を行なう。設計計算としてはいろいろな計算があったが、ごく大まかに言えばまず比較設計によって与えられた設計条件に適する構造物のタイプ（たとえば、矢板式とか杭式など）を決める。次に外力

（大きな外力としてはほとんど地震）に対して安定な基礎と上部工を設計する。このとき矢板式や杭式けい船岸のように鋼材を使用する構造物の場合には、構造物の設計強度を支えるに必要な鋼材の肉厚と長さ（とくに海底泥面下に埋設される長さでこれを根入れ長と呼んでいる）を算出する。

こうして求められた鋼材の厚みを t_1 (mm) とする。いま一つ問題となるのは施工時の衝撃力に対して必要な鋼材の厚みである。たとえば外径 50cm の鋼杭に働く鉛直荷重が 100 t とすると、 t_1 は 4 mm ですむが鋼杭を打込むときの条件からこのときの鋼杭肉厚 t_3 を 9 mm とする。すなわち、施工するときの肉厚は設計荷重より求められた肉厚より 5 mm (= 9 mm - 4 mm) も大きい。両肉厚の差を t_2 (mm) とすると設計時に決める鋼材の肉厚は $(t_1 + t_2)$ (mm) となる。

t_1 (mm) は構造物の安定のためには是非必要な肉厚であるが、 t_2 (mm) は施工後は構造物の安定には直接には関係しないものであるから一般に腐食しろと考えられて

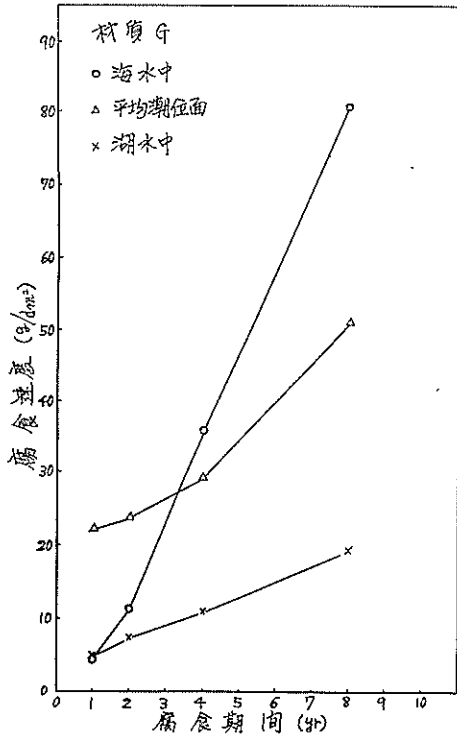


図-2.115 鋼材 (G) ミクロ腐食速度の経年変化

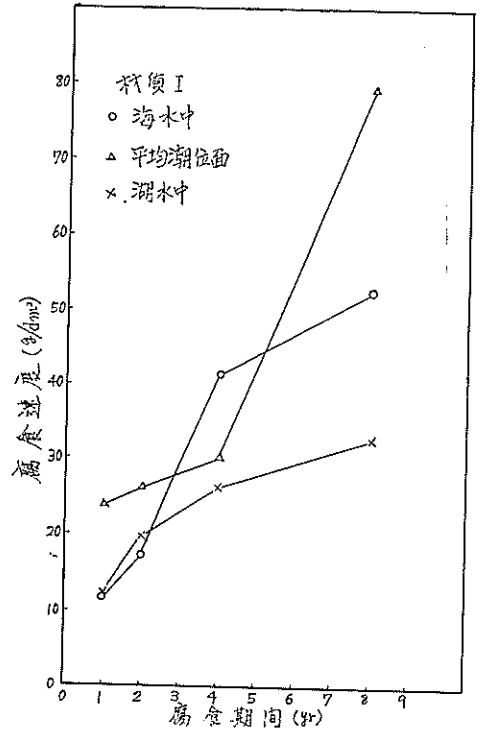


図-2.117 鋼材 (I) ミクロ腐食速度の経年変化

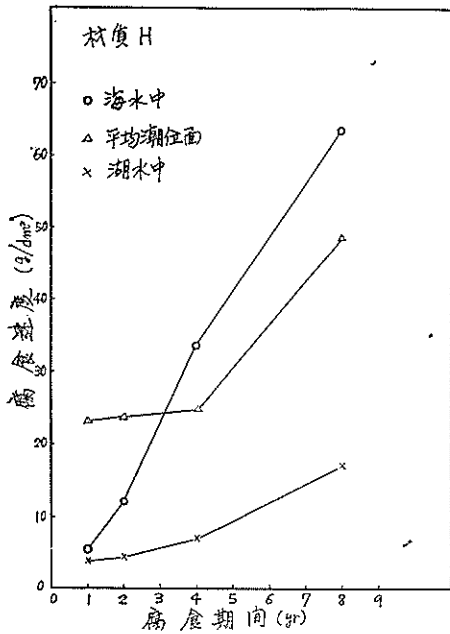


図-2.116 鋼材 (H) ミクロ腐食速度の経年変化

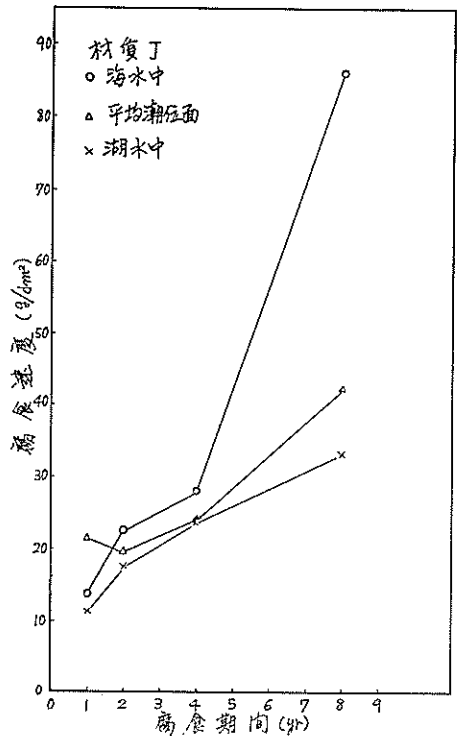
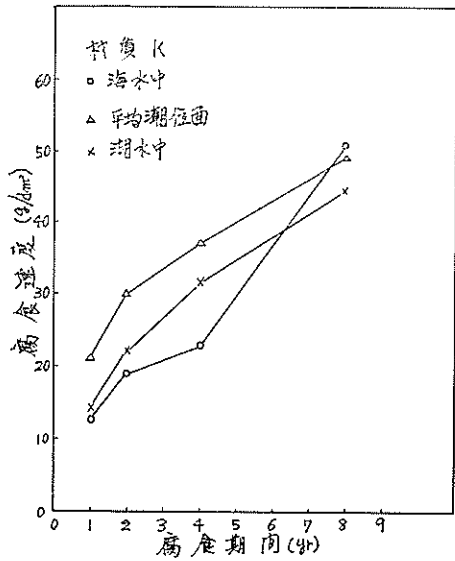
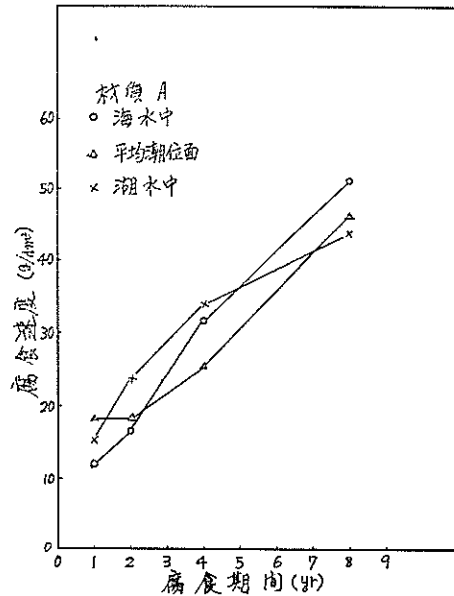


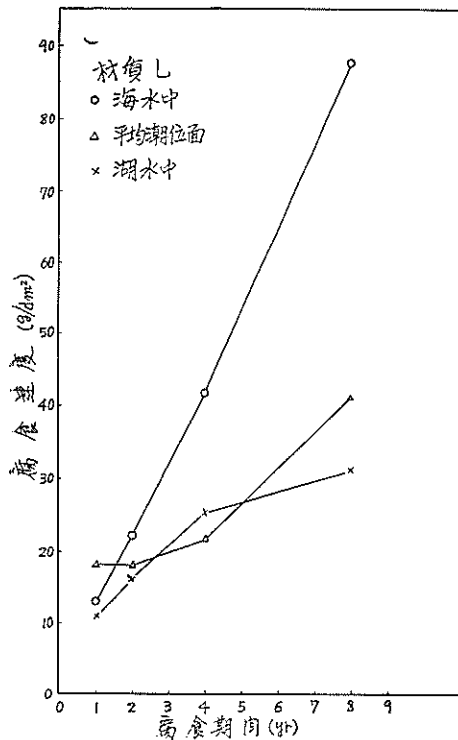
図-2.118 鋼材 (J) ミクロ腐食速度の経年変化



図一2.119 鋼材 (K) ミク口腐食速度の経年変化

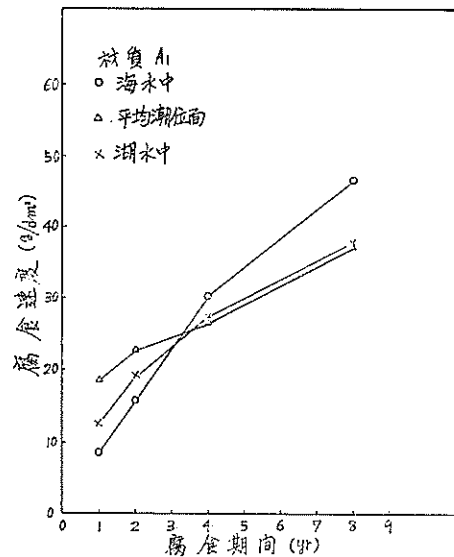


図一2.121 鋼材 (A) ミク口腐食速度の経年変化



図一2.120 鋼材 (L) ミク口腐食速度の経年変化

いる。いま地盤が硬くて $t_3 > t_1$ であるとき鋼製構造物の設計寿命 Y (yr) までの腐食による厚み減少量を C_y (mm) とすれば、 C_y (mm) $\leq t_2$ (mm) のときはとくに防



図一2.122 鋼材 (A₁) ミク口腐食速度の経年変化

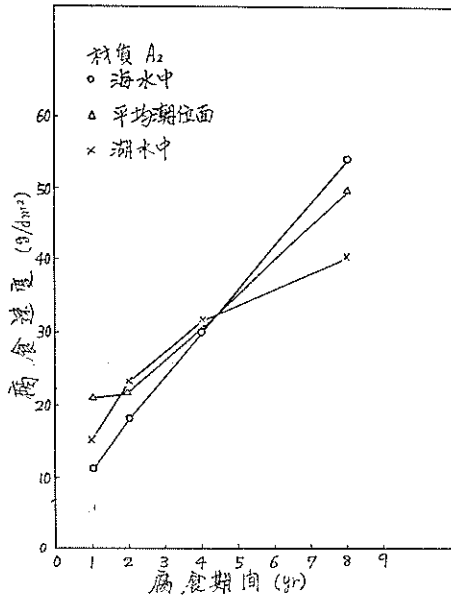
食手段を施さなくても腐食しろ t_2 (mm) を利用する腐食対策で構造物の安全は保たれることになる。反対に C_y (mm) $\gg t_2$ (mm) のときには何らかの防食対策を施すかまたは耐食性のさらにすぐれた材質の鋼材を使用しなければならない。

したがって鋼製構造物を設計するには C_y と t_2 の関係をはっきりさせることが必要であるが、これまでは各施

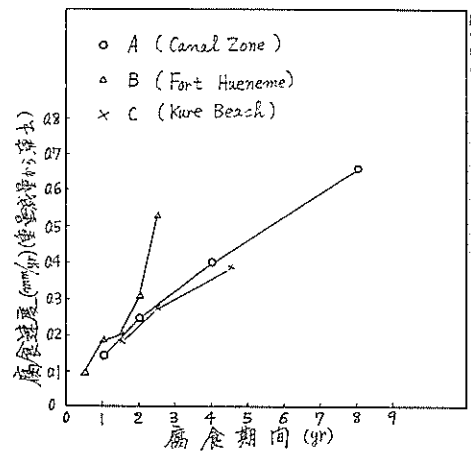
表—2.65 Average Decrease in Thickness of 20-Foot Specimens in Sea Water

Steel No. B01467 (Ni 0.28%, Cu 0.20%, P 0.14%)

Avg. Distance From Top		Decrease in Thickness (mils)			Decrease in Thickness (mm)			Corrosion Rate (mm/yr)		
ft	m	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr
0.5	0.15	4	8	9	0.102	0.203	0.229	0.102	0.102	0.046
1.5	0.45	3	7	21	0.076	0.178	0.533	0.076	0.089	0.107
2.5	0.75	7	18	45	0.178	0.457	1.143	0.178	0.229	0.229
3.5	1.05	4	20	6	0.102	0.508	0.152	0.102	0.254	0.030
4.5	1.35	2	5	1	0.050	0.127	0.025	0.064	0.064	0.005
5.5	1.65	2	5	3	0.050	0.127	0.076	0.064	0.064	0.010
6.5	1.95	9	21	28	0.229	0.533	0.711	0.267	0.267	0.142
7.5	2.25	14	27	42	0.356	0.686	1.067	0.356	0.343	0.213
8.5	2.55	15	32	38	0.381	0.813	0.965	0.381	0.407	0.193
9.5	2.85	17	32	43	0.432	0.813	1.092	0.432	0.407	0.218
10.5	3.15	17	27	41	0.432	0.686	1.041	0.432	0.343	0.208
11.5	3.45	13	34	37	0.330	0.864	0.940	0.430	0.432	0.188
12.5	3.75	7	14	35	0.178	0.356	0.889	0.178	0.178	0.178
13.5	4.05	8	11	12	0.203	0.279	0.305	0.203	0.140	0.061
14.5	4.35	6	11	7	0.152	0.279	0.178	0.152	0.140	0.036
15.5	4.65	7	9	6	0.178	0.229	0.152	0.178	0.115	0.030
16.5	4.95	5	9	15	0.127	0.229	0.381	0.127	0.115	0.076
17.5	5.25	7	9	28	0.178	0.229	0.711	0.178	0.115	0.142
18.5	5.55	4	14	25	0.102	0.356	0.635	0.102	0.178	0.127
19.5	5.85	6	24	38	0.152	0.610	0.965	0.152	0.305	0.193



図—2.123 鋼材 (A₂) ミク口腐食速度の経年変化

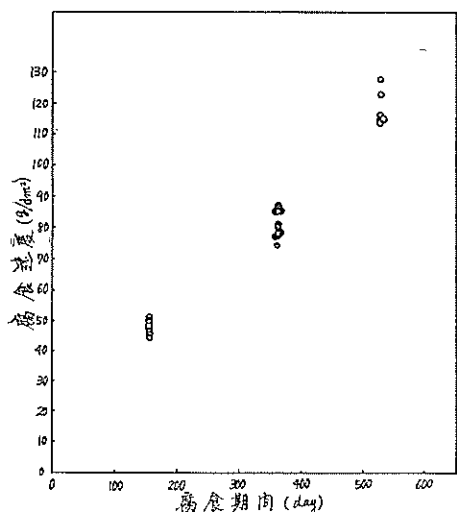


図—2.124 海水中 (3地点) における鋼材ミク口腐食速度の経年変化

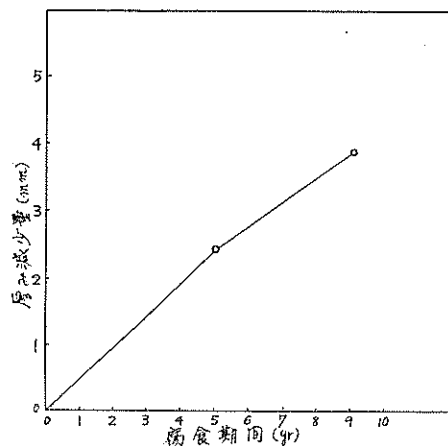
表—2.66 Average Decrease in Thickness of 20-Foot Specimens in Sea Water

Steel No. BO1456 (Ni 0.28%, Cu 0.22%, P 0.17%)

Avg. Distance From Top		Decrease in Thickness (mils)			Decrease in Thickness (mm)			Corrosion Rate (mm/yr)		
ft	m	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr	1yr	2yr	5yr
0.5	0.15	6	13	10	0.152	0.330	0.254	0.152	0.165	0.051
1.5	0.45	5	12	21	0.127	0.305	0.533	0.127	0.153	0.107
2.5	0.75	9	19	73	0.229	0.483	1.854	0.227	0.242	0.371
3.5	1.05	5	11	22	0.127	0.279	0.556	0.127	0.140	0.112
4.5	1.35	2	8	2	0.050	0.203	0.050	0.050	0.102	0.010
5.5	1.65	3	8	2	0.076	0.203	0.050	0.076	0.102	0.010
6.5	1.95	11	32	24	0.279	0.813	0.610	0.279	0.407	0.142
7.5	2.25	15	28	46	0.381	0.711	1.168	0.381	0.356	0.234
8.5	2.55	14	25	34	0.356	0.610	0.864	0.356	0.305	0.173
9.5	2.85	15	21	32	0.381	0.533	0.813	0.381	0.267	0.163
10.5	3.15	20	27	32	0.508	0.686	0.813	0.508	0.343	0.163
11.5	3.45	13	27	32	0.330	0.686	0.813	0.330	0.343	0.163
12.5	3.75	16	10	33	0.406	0.254	0.838	0.406	0.127	0.168
13.5	4.05	3	10	18	0.076	0.254	0.457	0.076	0.127	0.091
14.5	4.35	4	12	17	0.102	0.305	0.432	0.102	0.153	0.086
15.5	4.65	6	13	18	0.152	0.330	0.457	0.152	0.165	0.091
16.5	4.95	6	13	28	0.152	0.330	0.711	0.152	0.165	0.142
17.5	5.25	6	13	31	0.152	0.330	0.787	0.152	0.165	0.158
18.5	5.55	3	9	34	0.076	0.229	0.864	0.076	0.115	0.173
19.5	5.85	3	11	31	0.076	0.330	0.787	0.076	0.165	0.158



図—2.125 ミク口腐食速度の経日変化 (San Diego Port)



図—2.126 H.W.L. 直上の腐食速度変化 (Harbor Island)

工条件における鋼材腐食速度を推定することは不可能であったために次のようないろいろな方法がとられている。

表-2.67 海 水 中 の 腐 食 速 度

地 点	肉 厚 減 mils							
	0.5yr	1yr	1.5yr	2yr	2.5yr	4yr	4.5yr	8yr
A		5.6		9.5		15.0		25.6
B	3.7	7.2	7.8	11.5	20.6			
C			7.0		10.6		15.0	

地 点	腐 食 速 度 mm/yr							
	0.5yr	1yr	1.5yr	2yr	2.5yr	4yr	4.5yr	8yr
A		0.14		0.24		0.39		0.65
B	0.09	0.18	0.20	0.30	0.52			
C			0.18		0.27		0.38	

A : Tropical sea wates, Fort Amador, Canal zone
 B : Temperate sea water, Fort Hueneme, California
 C : Temperate sea water, Kure Beach, Notrh Carolina

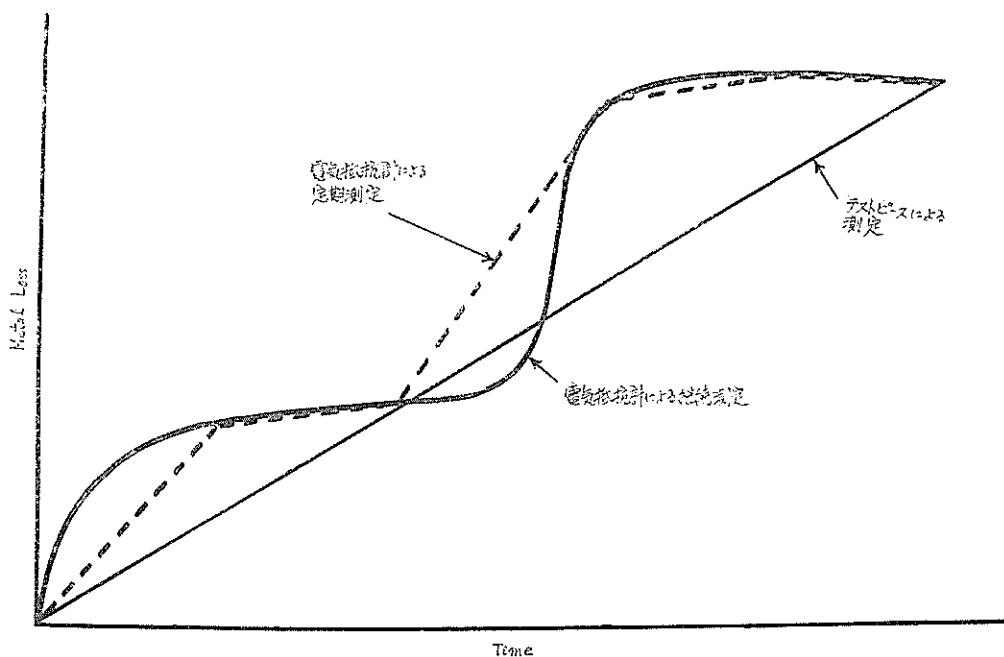


図-2.127 腐食速度の経年変化曲線の比較

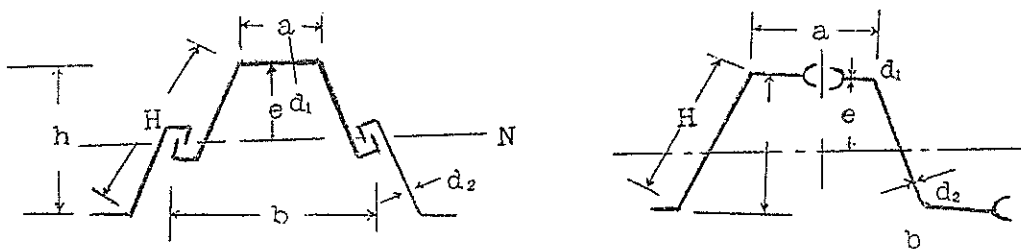


図-2.128 鋼矢板断面の寸法

(1) 鋼矢板の前傾を防ぐためのタイ・ロッドの設計は50年間に0.1mm/yrの腐食による肉厚減少があると見込んでタイ・ロッドの直径を安定計算上必要な肉厚に5mm増している。腐食しろのとり方は全般的に共通ではなく腐食についての考え方の統一を欠いている。⁴¹⁾

(2) 大蔵省令に定める税法上の耐用年数(固定資産の耐用年数に関する省令)によれば鋼矢板岸壁の耐用年数は25年である。⁴²⁾

(3) 国土総合開発審議会案による港湾施設の耐用年数は鋼矢板岸壁の耐用年数を35年としている。⁴³⁾

(4) 港湾環境における鋼材腐食速度の想定値の一例⁴⁴⁾

腐食環境	腐食速度(mm/yr)	
海側	L. W. L. 以上	0.3
	L. W. L. と海底間	0.2
	海土中	0.05
陸側	残留水位以上	0.1
	残留水位以下	0.05

(5) 腐食速度の経年変化

生成する鉄錆は密度が小さいため相当に厚くなり、これが表面に付着して外部からの酸素の供給を妨げるので鋼材の腐食速度は時間とともに小さくなるといわれている。この考え方にもとづいて腐食速度の経年変化を表わす関係式を求めた。⁴⁵⁾

$$y = c \times t^{0.6}$$

v: 鋼材腐食速度

c: 係数で大気中、地中、淡水中では0.1、海水中では0.3

t: 腐食期間(yr)

(6) 鋼管棧橋では一般に上部工との取付部に最大モーメントを生ずるから鋼材腐食速度として H. W. L. 付近の値0.3mm/yrを取り、鋼管内部からの腐食を無視すれば腐食しろで33年もつことになる。

一般に鋼管杭の断面決定の際は設計値に腐食しろとか防食手段によって30~50年程度の寿命ののびが考えられる。⁴⁵⁾

(7) 一般に初期の腐食速度は大きいものであるが、直線的に変化するものとみなしている。⁴⁶⁾

(8) 鋼矢板の腐食による耐用年数の推定

鋼矢板が腐食する場合、断面積および断面係数の減少により与えられた外力に対する耐用年数には限度がある。この推定方法として P. Leimdorff が次のように述べている。

鋼矢板の各寸法は図-2.128 に示す。

曲げモーメントに対する耐用年数は次式で表わされる。⁴⁶⁾

$$n = \frac{b}{a \times e + 0.167 \times h \times H} \times \frac{(1-\alpha)S}{t}$$

ただし

$$S(\text{断面係数}) = \frac{d_1 \times a \times e + 0.167 \times d_2 \times h \times H}{b}$$

$$\alpha(\text{実耐率}) = \frac{S - \Delta S}{S}$$

$$\Delta S(\text{断面係数の減少}) = \frac{\Delta d(a \times e + 0.167 \times h \times H)}{b}$$

Δd : 腐食による肉厚減少量

(9) 鋼矢板の腐食速度は海側と裏込め側ともに等しいとする。⁴⁶⁾

3. 埋設鋼材の腐食速度推定法ならびに腐食計の開発に関する研究

3-1 緒言

マイクロ腐食速度の推定については以下に紹介するよう
にいろいろと検討されてきているがいずれにしても港湾
の現地条件下で使用できる推定方法ならびに同用計測器
すなわちマイクロ腐食計は存在しない。

さらにマクロ腐食速度を推定する方法ならびに同用計
測器すなわちマクロ腐食計はまだ開発されていない。

本章では港湾環境におかれる鋼材の腐食速度を推定す
るためにまずマイクロ腐食とマクロ腐食の関係から検討を
加え、順次開発したマイクロ腐食速度推定法ならびにマク
ロ腐食速度推定法に触れることにする。

3-1-1 推定法の検討で使用される諸記号

検討内容をすつきりさせるために次のように記号を統
一した。

C = ミクロ腐食速度 (mm/yr) またはマクロ腐食速
度 (mm/yr) (マクロ腐食電池を形成するとき
アノード環境内に埋設される鋼材の腐食速度)

E_a = アノード開路電位 (V)

E_c = カソード開路電位 (V)

ΔE = 開路電位差 (V)

R = 回路全抵抗 $= R_0 + R_e + R_d$ (Ω)

R_0 = 可変抵抗 (Ω)

R_e = 腐食環境の抵抗 (Ω)

R_d = 電線抵抗 (Ω)

R_a = アノード分極抵抗 (Ω)

R_c = カソード分極抵抗 (Ω)

τ_a = アノード分極係数* ($\Omega\text{-m}^2$)

τ_c = カソード分極係数* ($\Omega\text{-m}^2$)

* 以下に述べる研究結果によれば腐食電流はカ
ソード分極特性に大きく支配されたので便宜上
単位面積当たりの分極にもとづく電気抵抗を分極
係数と名づけるもので、アノード分極に対する
ものをアノード分極係数、カソード分極に対す
るものをカソード分極係数とする。

単位は $\Omega\text{-m}^2$ で表わす。

A_a = アノード表面積 (cm^2)

A_c = カソード表面積 (cm^2)

I = 測定電流 (A)

i_a = アノード電流密度 (A/cm^2)

i_c = カソード電流密度 (A/cm^2)

I_{KD} = ガルバニック電流密度 ($\mu A/\text{cm}^2$)

ρ = 腐食環境の比抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)

l = 測定電極 ($Mg\sim Fe$) 間の距離 (cm)

$1/k$ = ρ を算出するときの係数 = 1.4

3-1-2 腐食計と厚みの相違

腐食計と厚み計はどちらも腐食に関する計測器である
ことには間違いはないが、両者を混同しているむきもま
だありそうなので簡単に両者の相違を明らかにしておく。

(1) 目的

腐食計は施工地点にこれから建設する鋼製構造物の腐
食による危険カ所を指摘するとともに腐食速度を推定し
て、もつとも合理的な腐食対策または防食対策を選定す
ることを可能とするものである。

厚み計はすでに建設されている鋼製構造物の現有厚み
を測定し (2.1) 式から腐食速度を算出する。厚み計の
精度から少くとも数年以上経過した鋼製構造物に使用さ
れる。

(2) 使用時期

腐食計は構造物の施工前に使用する。

厚み計は構造物の施工後に使用する。

(3) 使用範囲

腐食計は測定電極の挿入または打込み可能なところ、
厚み計は接触子をあてることができるところで港湾の場
合海底泥面上に限られる。

(4) 測定方法

腐食計は海水中または陸上に測定電極を打込んで行
く。所定の深度に電極が達するたびに地上に設置した腐
食計本体で推定に関する項目についての読みを求め、こ
の読みにもとづいて電極打込み地点の鋼材腐食速度を推
定する。

厚み計は既設鋼製構造物の表面に (あらかじめ表面付
着物を除去してから) 厚み計のピック・アップを押しあ
てる。測定場所が海水中のときにはこの作業は潜水夫が
行なう。厚み計本体で鋼板厚み測定の関係する項目につ
いての読みを求め、この読みにもとづいてピック・アッ
プを押しあてたところの平均的現有厚みを換算曲線より
算出する。

(5) 計測器

腐食計は打込み可能な電極部分と計測部分より成る。

厚み計はピック・アップと計測部分より成る。

(6) 測定値

腐食計は推定値であり推定値の符号は mm/yr である。

厚み計はまず鋼板の現有厚み (mm) を実測する。さら

にこの現有厚み (mm) を用いて鋼材腐食速度 (mm/yr) を算出する。

(7) 対象とする鋼製構造物

腐食計の場合は区別はない。

厚み計のうち(1)磁気不飽和型厚み計と(2) T-M 式厚み計はピックアップの大きさから被測定カ所の表面積が25 cm×35cm 程度必要であるため適用できる鋼材は鋼矢板または鋼板に限られる。一方、(3)電気抵抗式厚み計は接触子として存在する4点端子はスプリングにより鋼板や曲率半径の小さなものにも押しあてられるため鋼矢板、H杭、鋼管杭などどれにも適用できる。また(4)超音波厚み計は接触子のφが3cm程度であるから鋼矢板、H杭や曲率半径の大きな鋼管杭などには適用できる。

3-2 これまでに行なわれた推定方法ならびに腐食計に関する検討

推定法に対する検討としてはマイクロ腐食速度推定法の適用、腐食に関する土質調査法、数多くの現地腐食調査結果から何らかの推定ルールを見出すこと、ある限られた条件内で腐食速度を支配する因子を求めることなど非常に広範囲に考えられるが、ここでは現地で実用された推定法の外は推定方法の現状というものを簡潔に把握することに役立つもののみを取り上げることにした。

(1) ミクロ腐食計(1)

ノルウェーの土質工学会で用いられている腐食計に N. G. I. コロージョン・サウンド⁴⁷⁾⁴⁸⁾がある。

Norwegian Geotechnical Institute がオスロ市の海底粘土 (marine clay) について行なつた腐食研究にもとづいて Rosengvist は次の関係式を提案した。

$$K = \frac{kE}{\log_e K} \cdot f \left(\frac{dE}{dx} \right) \cdot f \left(\frac{dR}{dx} \right) \cdot f(q) \cdot f(T) \quad (3.1)$$

K = 鋼材腐食速度

k = 恒数 (ノルウェーの土に対しては大体 1/30)

E = 起電力

R = 比抵抗

x = 深度

q = 地下水の流速

T = 地下水の温度

検討の結果このうちノルウェーの土質条件では q と T が無視できるものであり、また dR/dx もあまり K に影響しないことがわかつた。したがつて N. G. I. 法は (3.1) 式の代りに (3.2) 式から鋼材腐食速度 (K) を推定するものといえる。

$$K = kE / \log_e R \quad (3.2)$$

計測器としては地中に押し込む電極部分 (これをコロ

ージョン・ポイントと呼んでいる) と地上で操作する計測部分より成っており、両者をあわせてコロージョン・サウンドという。コロージョン・ポイントは 図-3.1 に示すようにマグネシウムをアノード、鉄をカソードとする。

単位: mm

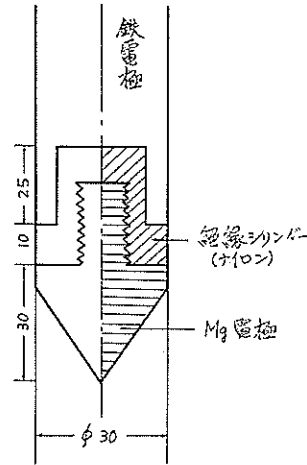


図-3.1 コロージョン・ポイント

N. G. I. コロージョン・サウンドによる埋設鋼材の腐食速度の推定は次のようにして行なわれる。

まずコロージョン・ポイントを測定しようとする地盤に挿入する。もともとこの方法はオスロ市の海底粘土に対して出発したものであるから 図-3.1 からわかるように粘土のような軟弱地盤には挿入できるが、一般の地盤には打込めない。日本には昭和36年11月にノルウェー、Geonor 社製が使用されているがロータリー式ボーリング機で測定しようとしている深度 50cm 以内まで穴を掘り、この穴の中にコロージョン・ポイントを 50cm 押し込んでいる。

図-3.2 に示すように電極が測定深度に達したら両電極 (マグネシウムと鉄) から出ている測定電線を計測部分に接続する。まず電流計 (図-3.2 に示すⒶ) により両極を短絡したときのカルバニック電流 I_p を測定する。電流測定が終つたらスイッチを抵抗測定 (図-3.2 に示すⒷ) に切り換えて両極間の抵抗 R_j を 600% の A. C. ブリッジで分極を起さないように測定する。抵抗測定装置としては4個の抵抗ブリッジがある。単位は1000, 100, 10, 1オームである。以上のようにして測定したガルバニック電流 $I_p (mA)$ 、抵抗 $R_j (\Omega)$ を用いて(3.3)式か

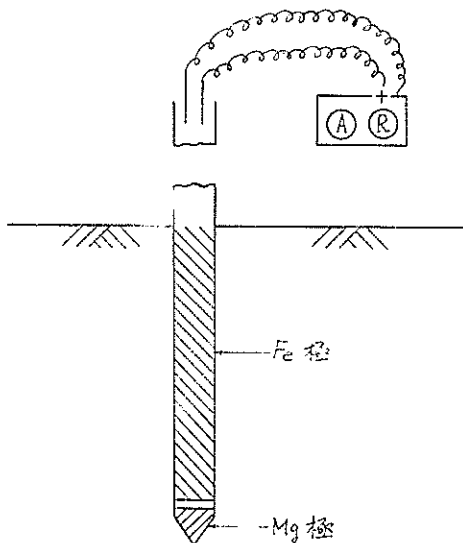


図-3.2 コロージョン・サウンド

ら起電力 $E_p(V)$ を算出する。

$$E_p = I_p \times 10^{-3} \times R_j \quad (3.3)$$

さらに起電力 E_p を(3.4)式に代入して復極率 $N(\%)$ を求める。

$$N = E_p / E_{uo} \times 100(\%) \quad (3.4)$$

ただし E_{uo} は $1.20(V)$ とする。

次に(3.5)式から腐食環境の比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$ を算出する。

$$\rho = \mu \times R_j \quad (3.5)$$

ただし μ は換算係数

以上のようにして求めた復極率 $N(\%)$ と比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$ を図-3.3に示すN. G. I. コロージョン・サウンドの指針図に適用してコロージョン・ポイント挿入地点における鋼材のマイクロ腐食速度 $C(\text{mm}/\text{yr})$ を推定する。

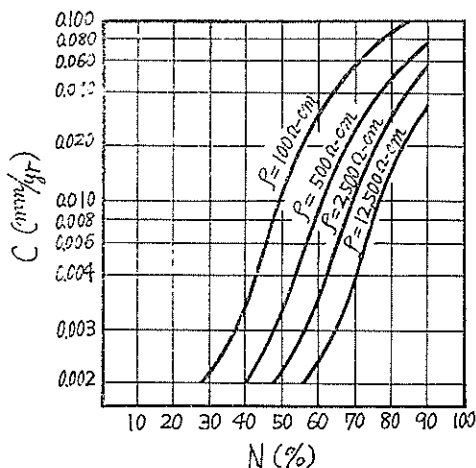
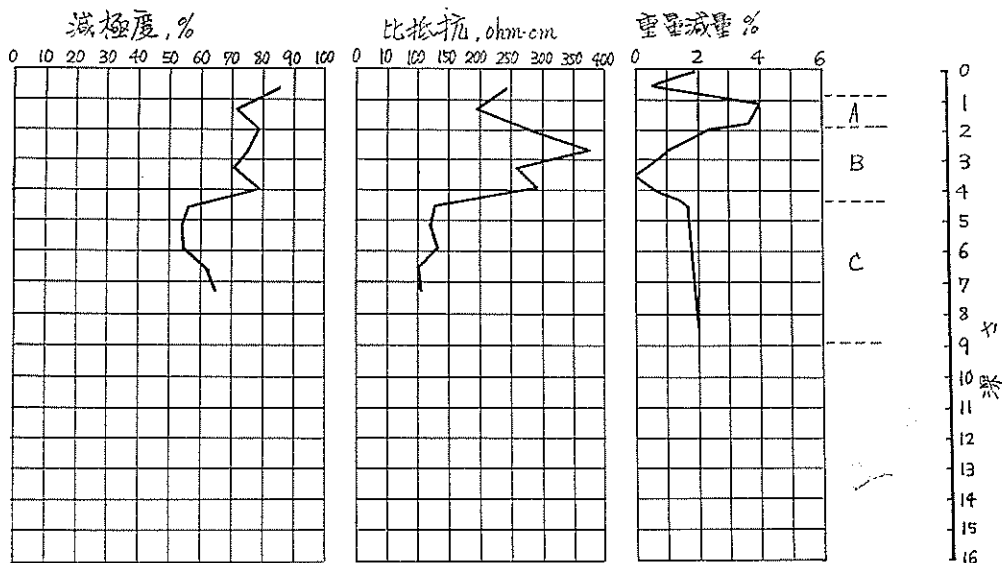


図-3.3 N. G. I. コロージョン・サウンド推定曲線

N. G. I. コロージョン・サウンドによる鋼材腐食速度の推定はノルウェーの外に英国でも行なわれた。その一例を図3.4に示す。



- A : 減極度中位, 比抵抗低い
- B : 減極度低位, 比抵抗高い
- C : 減極度中位, 比抵抗非常に低い

図-3.4 N. G. I. コロージョン・サウンドによる鋼材腐食速度推定例(1)

日本では昭和36年末頃から使用された。その一例として東京電力KK東品川サービス・ステーションの基礎に使用する予定の鋼杭(H=400mm×400mm×12.5mm×

11mm×30mm)の腐食速度を推定するために行なわれたものがある。

推定結果は表-3.1, 図3.5の通りである。

表-3.1 NGI コロージョン・サウンドによる腐食速度推定例

深度 (-m)	計 算 値		超 電 力 $E_p(V)$	減 極 率 $N(\%)$	比 抵 抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$	腐 食 速 度 (mm/yr)
	$I_p(A)$	$R_j(\Omega)$				
2	3.8×10^{-3}	226	858.8×10^{-3}	71.6	4,200	0.0105
4	≈ 0	865				
6	2.5×10^{-3}	230	575 "	47.9	4,250	0.001
8	2.4 "	236	566.4 "	47.2	4,250	0.001
10	6.6 "	119	785.4 "	65.45	1,950	0.0092
12	19.0 "	52	988 "	82.3	870	0.048
14	12.0 "	83	996 "	83.0	1,400	0.047
16	29.0 "	33	957 "	79.75	550	0.048
18	30.0 "	31	930 "	77.5	520	0.042
20	24.0 "	33	792 "	66.0	550	0.018
22	27.0 "	35	945 "	78.8	590	0.046
24	23.0 "	39	897 "	74.8	650	0.035
26	21.0 "	45	945 "	78.8	790	0.044
28	15.0 "	59.5	892.5 "	74.4	1,000	0.028
30	6.0 "	144	864 "	72.0	2,600	0.011

推定例-1

深度：-6m

土質：見殻混りシルト質細砂

$$I_p = 2.5mA = 2.5 \times 10^{-3}A$$

$$R_j = 230\Omega$$

$$E_p = I_p \times 10^{-3} \times R_j = 2.5 \times 10^{-3} \times 230 = 0.575V$$

$$N = E_p / E_{uo} \times 100 = 0.575 / 1.20 \times 100 = 47.9\%$$

$$\rho = \mu^* \times R_j = 18.5 \times 230 = 4250$$

復極率 $N(\%)$ と比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$ の値を図-3.3の換算曲線に代入すると深度-6mの地点に鋼材片**を埋設したときのマイクロ腐食速度は 0.001mm/yr すなわち1,000年間で1mmの厚みが減少することになる。

推定例-2

深度：-18m

土質：貝殻混りシルト

$$I_p = 30mA = 30 \times 10^{-3}A$$

$$R_j = 31\Omega$$

$$E_p = I_p \times 10^{-3} \times R_j = 30 \times 10^{-3} \times 31 = 0.930V$$

$$N = E_p / E_{uo} \times 100 = 0.93 / 1.20 \times 100 = 77.5\%$$

$$\rho = \mu^* \times R_j = 16.8 \times 31 = 520\Omega\text{-cm}$$

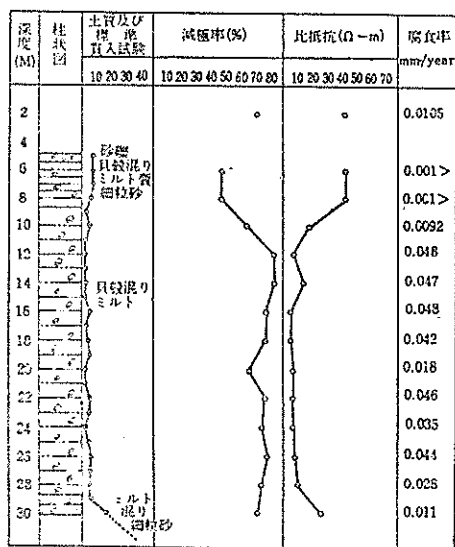


図-3.5 NGIコロージョンサウンドによる鋼材腐食速度推定例(2)

表3.1に示す測定値にもとづいて鋼材腐食速度を推定する計算例を2, 3示す。

図-3.3に $N=77.5\%$ と $\rho=520\Omega\text{-cm}$ を代入するとマイクロ腐食速度は $0.042\text{mm}/\text{yr}$ が求められる。

すなわち-18mの深度のところ鋼材片**を埋設すると100年間で4mmの肉厚減少が起るであらうことを示している。

推定例-3

深度：-30m

土質：シルト混り細砂

$$I_p = 6mA = 6 \times 10^{-3}A$$

$$R_j = 144\Omega$$

$$E_p = I_p \times R_j = 6 \times 10^{-3} \times 144 = 0.864V$$

$$N = E_p / E_{uo} \times 100 = 0.864 / 1.20 \times 100 = 72.0\%$$

$$\rho = \mu^* \times R_j = 18.1 \times 144 = 2,600\Omega\text{-cm}$$

図-3.3に $N=72.0\%$ と $\rho=2,600\Omega\text{-cm}$ を代入するとマイクロ腐食速度は $0.011\text{mm}/\text{yr}$ が得られる。

すなわち深度-30mのところ鋼材片**を埋設すると100年間で1mmの厚みが減少するであらうことを意味している。

* μ の値は常数であるのが上例1, 2, 3では何れも異なっている。これは引用したTable-3.1に示されている比抵抗(例1では $4,250\Omega\text{-cm}$, 例2では $520\Omega\text{-cm}$, 例3では $2,600\Omega\text{-cm}$)の値をそのまま使用して μ の値(例1では18.5, 例2では16.8, 例3では18.1)を逆算したためである。

**N. G. I. 法による推定はマイクロ腐食速度であるために推定された腐食速度(例1では $0.001\text{mm}/\text{yr}$, 例2では $0.042\text{mm}/\text{yr}$, 例3では $0.011\text{mm}/\text{yr}$)は使用予定のH杭($l=30\text{m}$)の各深度(例1では-6m, 例2では-18m, 例3では-30m)における腐食速度ではなくて、小さな鋼材片を各推定深度毎に埋設したとき小さな鋼材片が各推定深度の単一土壌内(例1では貝殻混りシルト質細砂, 例2では貝殻混りシルト, 例3ではシルト混り細砂)において腐食する量、すなわちマイクロ腐食速度を推定しているにすぎない。

したがって図-3.5に示された腐食速度(mm/yr)は以上のような考えで見ることが必要である。

以上述べたようにN. G. I. コロージョンサウンドによる推定はいろいろ行なわれているが、次のような難点があ

ず考えられるので港湾における実用性は乏しい。

(イ) 海水中の推定値は $0.007\text{mm}/\text{yr}$ 程度で実測値($0.1 \sim 0.2\text{mm}/\text{yr}$)との差が大きい。

(ロ) 推定の対象はマイクロ腐食速度である。マイクロ腐食は単一層内で発生する腐食であるが、鋼製構造物を建設する野外環境はいろいろな層からなる複合層でありたとえ均一土壌層であつても地下水表面を挟んで水分不飽和、水分飽和の2層に分けられるために異種環境間にマクロ腐食が発生する。したがって腐食計として必要なことはマイクロ腐食速度とマイクロ腐食速度の両者が推定できることであるので、この点からN. G. I. コロージョン・サウンドの実用性はうすい。

(ハ) 図-3.3に示す指針図から明らかなように鋼材腐食速度の推定可能な範囲は $0.01\text{mm}/\text{yr}$ を中心とした $0.001\text{mm}/\text{yr} \sim 0.1\text{mm}/\text{yr}$ である。しかしながら海水中のマイクロ腐食速度はむしろ $0.1\text{mm}/\text{yr}$ 以上である。

(ニ) N. G. I. 法の開発を検討したときの腐食環境が海底粘土であるためにコロージョン・ポイントの打込み強度が劣る。そのため粘土のような軟弱地盤以外ではボーリングと併用して挿入しなければならない。

(2) ミクロ腐食計(2)

ソ連科学アカデミーのN. D. Tomashov らの考案したマイクロ腐食計⁴⁹⁾で、Zvenigored 地方の数種類の土壌とSaratov からMoscow に至るガス管路に沿つて使用された。

このマイクロ腐食計の原理は次の通りである。

後述するように実験室内では鋼材の分極特性から腐食電流(すなわち腐食速度)を求める方法が行なわれている。たとえばSchwerdtfeger and Mc Dorman⁵⁰⁾はこの方法を土壌中の鋼材に適用している。彼らの実験によれば5種類の土壌中に鋼材を埋設したとき埋設前後の重量変化から求めた鋼材のマイクロ腐食速度と、同じ土壌中の鋼材分極特性から求めた腐食速度とは3.9%以下の誤差範囲で一致することが確かめられた。

このような分極特性から鋼材のマイクロ腐食速度を推定する方法を野外でも使用できるように工夫したのがN. D. Tomashov らの腐食計である。したがって推定の根拠は(3.6)式で示される。

$$I_{corr} = K \cdot \frac{I_a \cdot I_K}{I_a + I_K} \quad (3.6)$$

I_{corr} : 鋼材のマイクロ腐食速度 (mm/yr)

K : 常数

I_a : 陽極電位の最初の値からある特定変化に関する陽極電流密度

I_K : 陰極電位の最初の値からある特定変化

に関する陰極電流密度

腐食計は地中に挿入する電極部分と計測部分とから成っている。電極部分は (3.6) 式の I_a , I_k を測定するための電極 (陽極も陰極もともに鉄) が取り付けられた図-3.6に示す形状のものである。

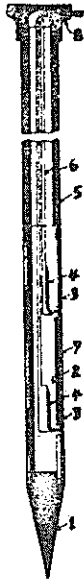


Figure 4—Diagram of soil rod. 1 = screwed on iron head, 2 = iron ring electrodes, 3 = copper-sulfate reference electrodes, 4 = thick-walled pipe sections screwed together, 5 = conductors from electrodes and half-cells, 6 = electrode packings.

図-3.6 N. D. Tomashov らが開発した腐食計の電極

電極部分には打撃に弱い硫酸銅電極が照合電極として同封されているために打込みに対する機械的強度が劣り推定深度は-2m以内に限られている。

推定は次のように行なわれる。

図-3.6に示す電極を地中に挿入する。電極より出てい

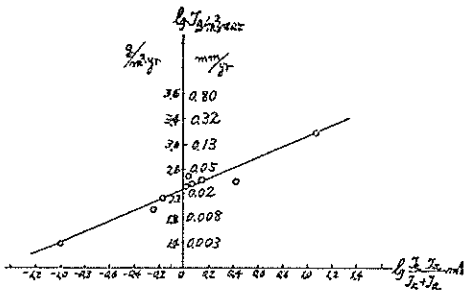


図-3.7 N. D. Tomashov らが開発した腐食計の推定曲線

る測定用電線を計測部分に接続し, $I_a(mA)$, $I_k(mA)$ をそれぞれ測定する。次に I_a, I_k を用いて $I_a \cdot I_k / I_a + I_k$ を算出して図-3.7に示す換算曲線より電極挿入地点における鋼材のミクロ腐食速度(mm/yr) を算出する。

推定結果の1例を表3.2に示す。

表-3.2にもとづいてミクロ腐食速度推定の計算例を示す。

表-3.2 Tomashov らの腐食計によるミクロ腐食速度推定値

測定環境	推定鋼材腐食速度		
	g/m ² /yr	mg/dm ² /day	mm/yr
砂と塩類, 水分7~10%	1,572	43.1	0.200
沃土質土壌と砂	252	6.9	0.032
下水溝の沈泥	270	7.4	0.034
灰色粘土, 水分多量	252	6.9	0.032
水分多量の粘土, 砂土壌	214	5.9	0.027
小石混入			
灰色粘土, 水分7~10%	120	3.3	0.015

推定例-1

土質: 塩分を含む砂, 水分7~8%

$$I_a = 30mA$$

$$I_k = 20mA$$

$$I_a \times I_k / I_a + I_k = 30 \times 20 / 30 + 20 = 600 / 50$$

$$= 12.0$$

$$\log I_a \cdot I_k / I_a + I_k = 1.0792$$

$\log I_a \cdot I_k / I_a + I_k = 1.0792$ を図-3.7に代入するとミクロ腐食速度は0.20mm/yrとなる。すなわち電極を挿入したところに鋼材片を埋設するとミクロ腐食のために鋼材片*の肉厚が10年間で2mm減少するであろうことを推定している。

推定例-2

土質: 灰色粘土, 水分7~10%

$$I_a = 2.0mA$$

$$I_k = 1.0mA$$

$$I_a \cdot I_k / I_a + I_k = 2 \times 1 / 2 + 1 = 2 / 3 = 0.67$$

$$\log I_a \cdot I_k / I_a + I_k = -1.1739$$

$\log I_a \cdot I_k / I_a + I_k = -1.1739$ を図-3.7に代入するとミクロ腐食速度は0.015mm/yrとなる。すなわち灰色粘土(水分7~10%)中に鋼材小片*を埋設すると100年後に1.5mm肉厚が減少するであろうことを意味している。

推定例-3

土質：下水溝の沈泥

$$I_a = 2.8 \text{ mA}$$

$$I_k = 3.5 \text{ mA}$$

$$I_a \cdot I_k / I_a + I_k = 2.8 \times 3.5 / 2.8 + 3.5 = 9.8 / 6.3 = 1.56$$

$$\log I_a \cdot I_k / I_a + I_k = 0.1931$$

$\log I_a \cdot I_k / I_a + I_k = 0.1931$ を図-3.7 に代入するとマイクロ腐食速度は0.034mm/yrとなる。

すなわち下水溝の沈泥中に鋼材片*を埋設するとマイクロ腐食のために100年後3.4mm肉厚減少が推定される。

*腐食計(2)も腐食計(1)と同じく推定の対象は鋼材のマイクロ腐食速度であるから、いろいろな野外環境を貫いて埋設されるガス管そのものの推定地点における腐食速度の推定値ではなくて推定地点に鋼材片を埋設したときの鋼材片の腐食速度を推定しているに外ならない。

図-3.7に示す換算曲線をいちいち利用するのは面倒であるので推定を簡便するために次のような大まかな分類が使用されることもある。

$I_a \cdot I_k / I_a + I_k$	腐食速度
0 ~ 0.1	小さい*
0.1 ~ 1.0	普通**
1.0以上	大きい***

* 0.004mm/yr以上

** 0.004~0.02mm/yr

*** 0.02mm/yr以上

N. D. Tomashovらの開発した腐食計も次のような難点がある。

- (1) 推定の対象が鋼材のマイクロ腐食速度のみである。
- (2) 打込みに対する機械的な強度が劣る。
- (3) 推定できる深度が-2m以内である。
- (3) 数多くの腐食調査結果から推定に対する何らかのルールを見出す方法の一例

これまでに鋼材腐食速度を推定することに多くの人々が取り組んできたが野外の腐食条件があまり複雑なためにはつきりした解がでていない。そこで野外における多数の腐食調査結果を統計的に解析して腐食速度推定に関する何らかのルールを引出すことが試みられた。

R. F. Stratfull¹⁵⁾ は米国カルフォルニア州の暗渠数千についての腐食調査結果と彼の提案した新しい試験法(鋼材のマイクロ腐食速度を支配する因子としてpHと最小抵抗値(Ω-cm)を考えて土壌に対する両因子の試験法を規制した。ここにいう最小抵抗値とは次のような

抵抗のことである。いま土壌に蒸留水を添加して行きながら土壌の比抵抗を測定すると比抵抗値が最小となる水分のところがあ。この水分のときの比抵抗値を供試土壌の最小抵抗値と呼んでいる。)による試験結果、すなわちpHと最小抵抗値の三者間の関係を統計的に解析して図-3.8に示すような鋼材マイクロ腐食速度推定曲線を1961年に発表した。

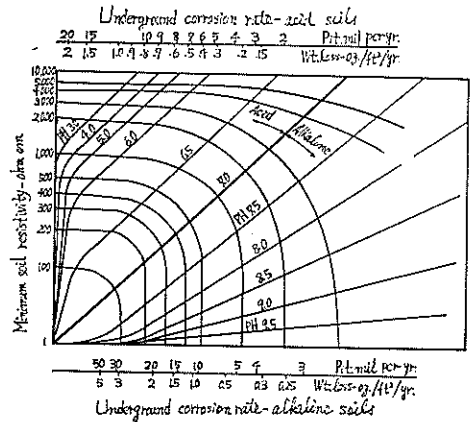


図-3.8 埋設鋼管のマイクロ腐食速度推定図 (by R. F. stratfull)

図-3.8では上の横軸目盛には酸性土壌(pH=3~7)中における鋼材のマイクロ腐食速度が、下の横軸目盛にはアルカリ土壌(pH=7~9.5)中における鋼材のマイクロ腐食速度がそれぞれ目盛つてある。図の中央付近に約45度の角度で酸性土壌とアルカリ性土壌との境界線が太く引いてある。たとえば推定しようとする土壌のpHが6.5であれば境界線より左上部の区画内の6.5の線に、まれpHが8.5であるならば境界線より右下部の区画内にある8.5の線に相当する最小抵抗値の読みとの交点を求める。酸性土壌の場合は交点に相当する上横軸の目盛を、アルカリ性土壌の場合は交点に相当する下横軸の目盛を読むとそのときの鋼材腐食速度が得られる。

pH=6.5, 最小抵抗値=1,000Ω-cmとすると上の横軸目盛から0.55 oz/ft²/yr* = 0.022mm/yrとなり, pH=8.5, 最小抵抗値=1,000Ω-cmとすると下の横軸目盛より0.4 oz/ft²/yr = 0.016mm/yrとなる。

図-3.8の特異な点としてはpH=7.0のときである。pH=7.0で最小抵抗値が1,000Ω-cmのときは上の横軸目盛からは0.3 oz/ft²/yr = 0.012mm/yrが求められるが、下の横軸目盛からは0.6 oz/ft²/yr = 0.024mm/yrが得られる。すなわちpH=7.0を境として腐食速度の推定値に断層がある。この原因ははつきりしない。

*oz/ft²/yr は次式によつて mm/yr に換算される。

$$C \text{ mm/yr} = \frac{28.35 \times 10 \times x(\text{oz/ft}^2/\text{yr})}{30 \times 30 \times 4.86} \\ = 0.04 \times x(\text{oz/ft}^2/\text{yr}) \quad (3.7)$$

図3.8は R. Stratful も断わつているようにマイクロ腐食を対象としたものであつてマクロ腐食が発生する実地条件下に適用することはむづかしい。

ここでは過去のデータを統計的に解析する方法の一例として R. F. Statful の報文を紹介したが、この外にも統計的手法を用いて腐食測定結果を解析した例はいろいろ^{52) 53) 54)}ある。

(4) 鋼材腐食調査法の一例

鋼材腐食速度に影響をおよぼすと考えられた要因は数多く、電気化学的、化学的、生物学的と巾が広いために鋼材腐食速度を推定する目的で行なわれる土質調査としてもいろいろな項目がある。したがって古くから多くの人々によって行なわれてきた検討、調査例をことごとく掲げることにはいたずらに繁雑さを増すだけであるから、これまでの鋼材腐食に関する土質調査の概要を知ることが次の一例ですませることにする。

土質調査内容は表—3.3⁷⁾に示す。表—3.3の各調査項目についての測定方法および腐食速度との関係について以下に述べる。

表—3.3 腐 食 調 査 項 目 例

Property to be measured	Field	Laboratory
Soil and ground water pH	Long cable probes to electrometer pH meter	Standard electrometer pH meter. Tests on soil at different moisture contents. Extrapolation to natural moisture content.
Electrical resistivity of soil	Probe, two-electrode or Wenner four electrical. Multilayer interpretation by curve fitting (Mooney and Wetzel)	Minute probes, two and four electrodes. Conductivity cell
Depolarising ability	Norwegian, corrosion sound	
Oxygen content of soil water	Polarograph in field or laboratory on carefully taken and preserved sample. Preferable to make measurements on freshly taken samples on site	
Redox potential	Preferably by redox probe	On 'undisturbed soil samples' as deck on culture medium in bacteriological tests
Bacteriology activity		Laboratory 'activity' tests with Baars medium for sulphate reducers
Permeability	Rising and falling head in boreholes (horizontal permeability)	Falling head or constant head on either 'undisturbed' or reconstituted samples

Current drainage tests if cathodic protection scheme is proposed

(i) pH

pHを測定するには直読型のpHメーターと比色計による方法があるが一般にはpHメーターが用いられている。pHを測定するものが溶液の場合は問題がないが(着色液の場合はpHメーターがよい)土壌のときには希釈する方法を検討する必要がある。

B. O. Skipp⁴⁷⁾は希釈によるpHの変化を抑えるために緩衝液で希釈しながらpHを測定して行き、添加緩衝液量が零のとき、すなわち土壌の自然条件のときのpHをグラフより求める方法で測定した。

pHと鋼材腐食速度との関係はいろいろ検討されている。たとえば図—3.9⁵⁵⁾に示す関係がある。またpHとミ

クロ・セルのアノードとカソードの面積比との関係が W. Stumm⁵⁶⁾ によって図-3.10のように示されている。

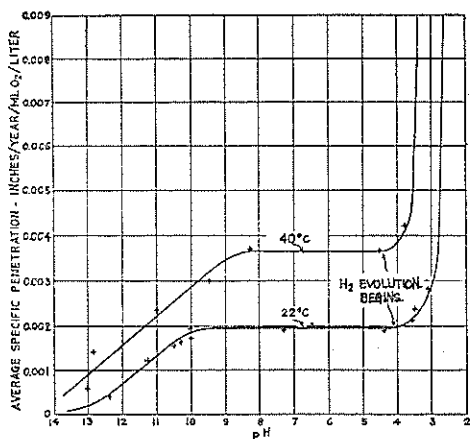


図-3.9 pHとマイクロ腐食速度との関係

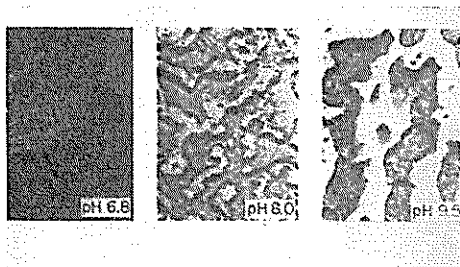


図-3.10 カソード、アノード面積割合におよぼすpHの影響

(四) 抵抗

抵抗を測定するには交流ブリッジの方式⁵⁷⁾で求める。

表-3.4 比抵抗値による腐食性の分類

resistivity (Ω-cm)	classification of corrosion
0~ 900	very severely corrosive
901~ 2,300	severely corrosive
2,301~ 5,000	moderately corrosive
5,001~10,000	mildly corrosive
10,000	very mildly corrosive

これは抵抗を測るために直流を使うと金属の表面に分極を生じて正しい値が得られないためである。実用されている方法としては4点法(Wenner法)と2点法(単棒式)がある。

抵抗は腐食にとって重要な因子であるために両者の関係についてはいろいろと検討されている。一例として表-3.4に示す関係が F. O. Waters⁵⁸⁾ によって示されている。

(イ) 復極率

3-2で紹介した N. G. I. コロージョン・サウンドは腐食環境の復極率N(%)と比抵抗ρ(Ω-cm)の2因子からこの腐食環境に鋼材片を埋設したときのマイクロ腐食速度を推定するマイクロ腐食計であった。ここで使用する復極率N(%)は先述の(3.4)式で表示される。

すなわち、

$$N = Ep/Euo \times 100 (\%) \quad (3.4)$$

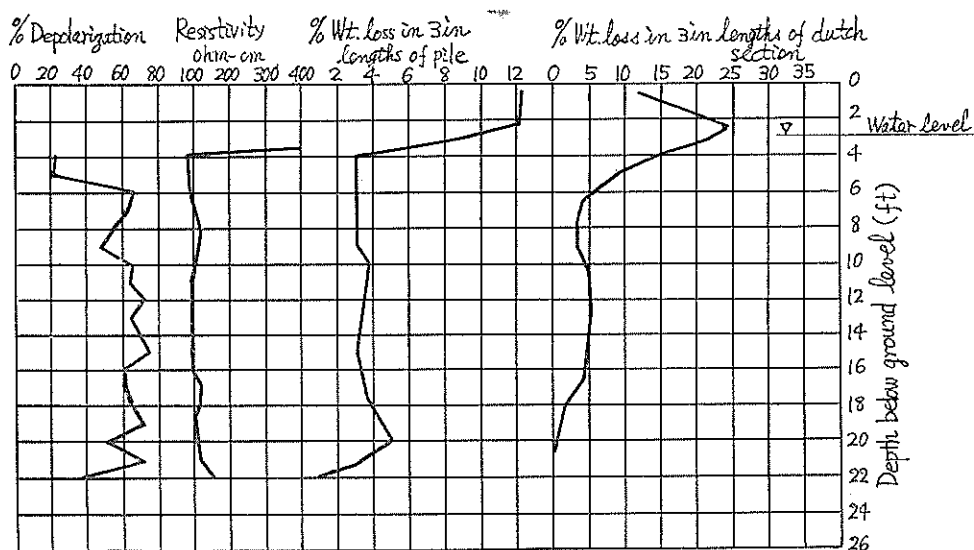


図-3.11 N. G. I. コロージョンサウンドによる測定例(3) (1957) (引抜鋼板の腐食期間28yr)

(3.4) 式の E_p はコロージョン・ポイントを腐食環境に挿入してコロージョン・ポイントに取りつけてあるアノード（マグネシウム）とカソード（鉄）両極を短絡したときの起電力（V）である。 E_{uo} はアノード（マグネシウム）とカソード（鉄）の開路電位差で一定（1.20V）とする。

N. G. I. 法では酸素を飽和した海水を基準として $N=100\%$ としている。

復極率 N (%) と鋼材のマイクロ腐食速度との関係は図—3. 3に示されている。

Fawley (Hampshire, Great Britain) で約28年間埋設した鋼材の腐食速度と N. G. I. 法による推定値との比較試験が行なわれた。その結果は図—3. 11に示す通りである。

(二) 溶存酸素

水中に溶存している全酸素量を測定するには従来から Winkler 法と Miller 法とがある。Winkler 法は亜酸化物質、鉄塩、有機物質にいちじるしく影響される。両法の外に日本では水道協会協定法がある。これは Miller 法と柴田博士が瘻水試験用に改案したものであるがこの方法も遊離塩素を含む水に対してはそのままでは応用が難しい。表—2. 16に示している日本の港湾の海水中の溶存酸素量の測定は海水中の遊離塩素を亜硫酸ソーダで中和してから水道協会協定法に準じて行なわれた。（このとき遊離塩素を中和しないで水道協会協定法を適用すれば溶存酸素量は多目となる）。

溶存酸素の迅速、正確な定量法としてはポーラロ・グラフィによる方法があり現在では一般に行なわれている。これは1922年 Heyrovský によって創始された一種の溶液電気分解法で上述の方法に比して試料溶液の非常に少なくてすむことも特色である。

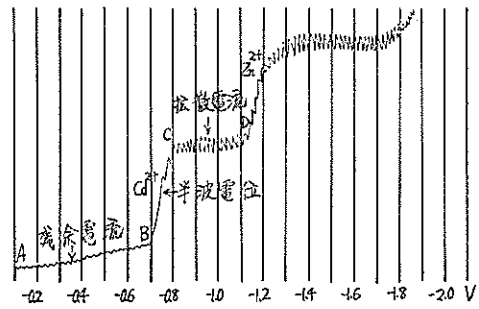
ポーラロ・グラフィによる定量方法は概略次のような内容のものである。

分極性の微小電極（水銀滴下電極や白金回転微小電極などがある）と非分極性の広面積対極（静止水銀面対極や甘汞電極など）との間に漸次増加する電圧を与え、それに対応する電解電流を記録する。このとき得られる加電圧—電解電流曲線、すなわちポーラロ・グラムの解析から対称とする物質量を定量する方法である。

定量する物質が酸素であれば支持電解質が $0.1N-KCl$, HCl または $NaOH$ (O_2) のときの半波電位は $-0.1(V)$ と $-0.9(V)$ であり、また支持電解質が $0.1\sim 1N-KNO_3$ (OH^-) のときの半波電位は $+0.03$ である。

ポーラロ・グラムの一例を図—3. 12に示す。

図3. 12からわかるように与えられた支持電解質では物

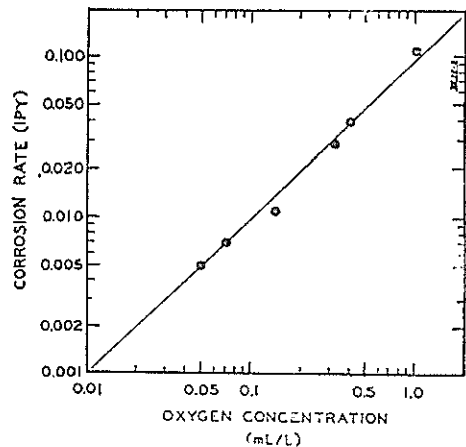


図—3. 12 ポーラログラムの例

質固有の半波電位があるので半波電位のチェックによって含有物質の定性分析ができる。さらに半波電位のところでみられる上昇曲線の高さ、すなわち電流量を含有量がわかっている試料のものと比較することによって定量分析ができる。

酸素の定量でとくに注意すべきことは測定を現地で行なわないと採取試料が実験室に持込まれるまでに酸素量に変化することである。

水中に溶存する酸素量と鋼材のマイクロ腐食速度との間関係は多く検討されている。その一例を図—3. 13⁵⁹⁾に示す。

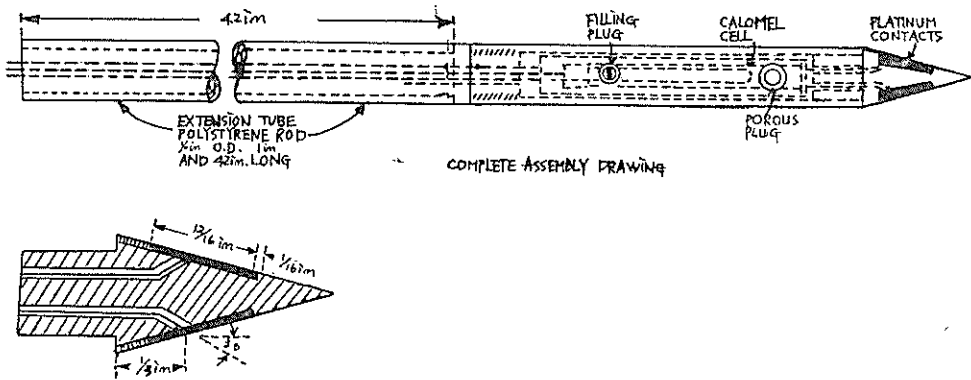


図—3. 13 溶存酸素量とマイクロ腐食速度との関係

海水中、水中の溶存酸素量は、表2. 14~2. 16に示されている。

(三) Redox potential

Redox potential は図3. 14に示す Redox probe⁶⁰⁾（白金電極と甘汞電極を組んでいる）を土中に差し込んだときに発生する白金電極と甘汞電極間の起電力として求められるもので、従来土壌のバクテリア腐食性を表示する目安として測定されてきた。



図—3.14 The Redox probe as modified by Deuber

Redox potential の大きいほど土中の酸素含有量が大きいことを表わし、反対に Rodox potential の小さいほど酸素含有量の小さいことを表わすものである。したがって Redox potential の小さいことは嫌気性バクテリアの増殖に好ましい環境であることを意味している。たとえば Redox potential $< 100\text{mV}$ では嫌気性バクテリアによる腐食は激しいといわれる。⁶⁰⁾

(-) Bacteriology activity

硫酸塩還元バクテリアの活性度を測定するためにバクテリア・テストが National Chemical Laboratory(Teddington) で開発された。この方法は採取した土壌を直ちにガラスなどの容器に移して空気が入らないようにして実験室に持ち帰り Baars 媒体を植えつける。これを 30°C に保温してかえす。もし硫酸塩還元バクテリアが供試土壌中に存在していたときは硫化第一鉄が生成するために媒体が黒く着色する。たとえば多量に存在するときには 2~3 日で媒体は黒くなる。

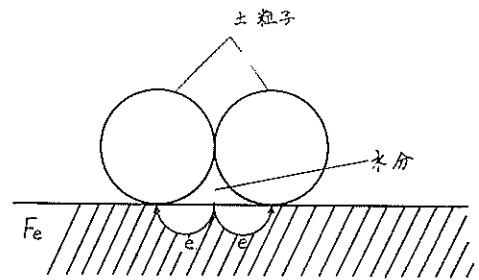
(f) 透水性

地盤に試掘孔を掘って地下水面の上下を調査する。

(5) 土壌中の含有水分から行なう鋼材腐食速度推定例

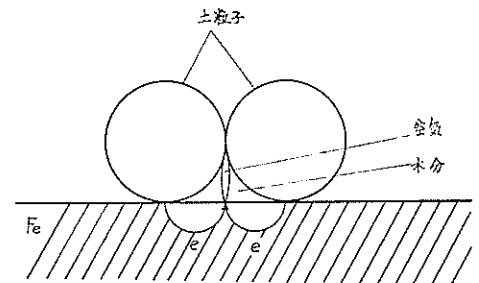
単一土壌中に鋼材片を埋設したときの腐食、すなわちマイクロ腐食について腐食機構や腐食速度などがいろいろ検討されてきている。

その一例として、T. Markovic^{61) 62)} は土壌中に埋設される鋼材の腐食速度を支配する因子としては土壌中の水分、空気量、pH、電気抵抗などがあるがこのうちでもとくに水に対する土壌の吸着力はもっとも重要な因子であると述べている。すなわち、土壌水分が飽和していない場合は 図—3.15⁶²⁾ に示すように土粒子と鋼材との接触部分がアノードとなって腐食する。この場合 図—3.15 からわかるように孔食となる。



図—3.15 水分不飽和の土壌に接する鋼材の腐食

一方水分が飽和した土壌中では 図—3.16⁶²⁾ に示すように均一腐食となる。



図—3.16 水分飽和の土壌に接する鋼材の腐食

以上の結果にもとづいて47種類の米国の土壌中に埋設したときの鋼材腐食速度と平均年間雨量(併せて pH も測定)との関係を検討したところ 図—3.17 に示すような関係が得られた。

また鋼材腐食速度と土中水分との間の関係を求めたところ次のような式が得られた。

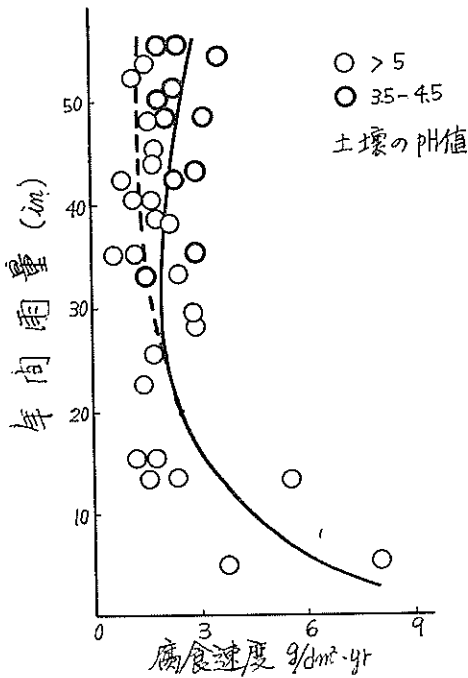


図-3.17 年間降雨量と腐食速度との関係

$$g = K \cdot W^b \cdot e^c \cdot W \quad (3.8)$$

g : 鋼材のマイクロ腐食速度

k, b, c : 定数

W : 含水量

(3.8) 式の各定数を求めると (3.9) 式となる。

$$g = 0.00553 \cdot W^{1.9} \cdot e^{-0.04W} \quad (3.9)$$

したがって土壌中に埋設される鋼材片のマイクロ腐食速度は含水量 W を測定することによって推定できる。

(3.9) 式による推定値と実測値との比較をしてみると

図-3.18 のようになる。

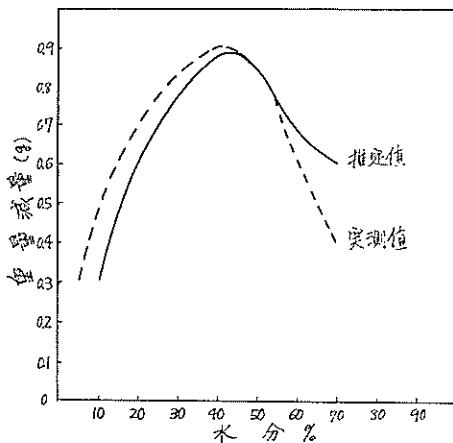


図-3.18 (3.9) 式による推定値と実測値との比較

(6) 流れがあるときの腐食速度推定例

Finely⁶³⁾ は Maracaibo 湖にある Creole Petroleum Corporation のガス圧縮装置のパイプの腐食速度を推定する検討を行なったところ、次の関係式を得た。

$$R = A \cdot Re^B \cdot P^C \quad (3.10)$$

ただし、 R = 腐食速度 (m/yr)

Re = レイノルズ数

P = 炭酸ガスの分圧 (atm)

$$A = 1.19 \times 10^{-23}$$

$$B = 3.620$$

$$C = 0.219$$

32コのコロージョン・プローベをクーラーに取りつけて腐食速度を推定しこの値を実測した腐食速度と比較した。その結果を表-3.5に示す。

表-3.5 (3.10)式による腐食速度推定値と実測値の比較

Equipment	No	Re × 10 ⁻⁶	Conosion rate (mm/yr)		Ratio Meas/Calc
			Calculated (by Eq. (1))	Meas-ured	
Cooler outlet ell	1	64.9	1.52	2.29	1.50
	2	6.71	1.73	2.64	1.53
	3	6.82	2.06	3.05	1.48
	4	5.96	0.79	1.78	2.25
	5	6.55	1.27	1.50	1.18
Outlet header	1	5.20	0.69	0.69	1.00
	2	6.21	1.45	1.47	1.00
	3	7.00	1.42	1.78	1.25
	4	7.44	2.03	2.26	1.11
Coupon in cooler thermowell	1	5.26	0.64	0.76	1.20
	2	6.49	1.52	1.52	1.00

この外に以下の(9)のところ述べる分極特性による方法を適用した例もある。これは分極の抵抗 $\Delta E / \Delta I$ ($\Omega^{-1} \text{cm}^{-2}$) を測定し、これの逆数と腐食速度との関係を求めたところ図-3.19⁶⁴⁾ に示す関係を得た。

(7) 電気抵抗計による腐食速度推定

あらかじめ測定電極について電気抵抗値の変化と腐食速度との関係を検討しておいて測定電極を測定対象物に取りつける。この測定電極を利用して順次抵抗値の変化を遠隔測定して行き、あらかじめ検討してある関係から抵抗測定値時の鋼材腐食速度を求めるという電気抵抗計による腐食速度推定法がある。

この方法はいろいろ検討されてきているが^{64) 65) 66)} 港湾における鋼製構造物には適用し難い。

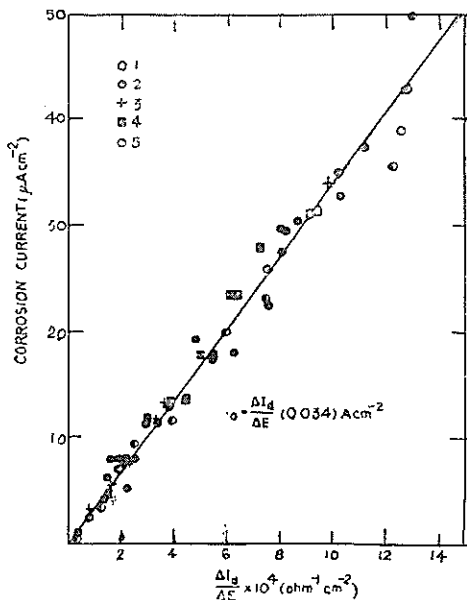


図-3.19 腐食速度 (μAcm^{-2}) と減極抵抗 ($\text{ohm}^{-1}\text{cm}^{-2}$) の逆数との関係

もし激しい孔食が起ればあらかじめ検討していた電気抵抗と腐食速度との関係からはずれが、この問題は測定電極の良好な設計と電極片に対する肉眼観察にもとづく説明とによって処理できるという考へもある。

この方法の誤差は測定電極薄片を絶縁、固定している保護被覆材の劣化や長期間にわたる応力のくり返しなどによって起る。

したがってこの方法の適用対象物としては誤差発生の比較的少ない船体などが考えられる。

(8) 鋼製構造物施工地点における推定例

(i) 推定例(1)⁴⁷⁾

1958年に鋼矢板岸壁 (Hebburn-on-Type, Durham) の腐食速度を推定するための現地調査が行なわれた。

土壌調査の結果

pH = 4.1

$\text{SO}_3^{--} = 1,120$ parts/100,000

$\text{SO}_4^{--} = 1,050$ parts/100,000

裏込めの水位: 潮位に非常に敏感

渚付近におけるプローベによる調査:

地面 ~ -3ft: 好気性菌による腐食度は大

-4ft ~ -17ft: 腐食度は小

-17ft以下: 腐食度は中

裏込めの抵抗 (Wenner 法による): 海水飽和のために抵抗は低い。

調査結果にもとづく防食対策

(a) 鋼矢板はコンクリート, タイ・バーはペー
スト巻きつけによる防食が提案されたけれど
も, 調査結果によればコンクリートが設計年
数50年はもたないほど腐食性の激しい環境で
あった。

(b) さらに Rendhex pile が使用される予定で
あった。

(c) したがって海側, 陸側の鋼矢板には電気防
食法がすすめられた。

(ii) 推定例(2)⁴⁷⁾

Nunez River 河口にあるピア地点 (Dougoufissa, Republic of Guinea) にプローベによる調査が行なわれた。

土壌調査の結果

バクテリア・テスト: potopoto のような嫌
気性硫酸塩還元バクテリアが非常に活性
電気抵抗: 50~200Ω-cm

復極度: 大きい

透水性: 非常に低い (10^{-9}cm/sec 程度)

pH : 6.7~6.8

SO_3^{--} : 129~140 parts/100,000

地下水の硬度: 低い (1 part/100,000)

遊離の炭酸: 1.8~2.7 parts/100,000

Dougoufissa の 旧河口の粘土の抵抗: 180~
216Ω-cm

Dougoufissa の 旧河口の粘土の復極度: 64~
80%

調査結果にもとづく防食対策

(a) 好気性菌による腐食度は中から大である。

(b) 嫌気性菌による腐食度は非常に大である。

(c) 好気性菌と嫌気性菌による腐食度がともに
激しい土壌はむしろ特異な条件である。

(d) potopotoの存在, pH値, 硫酸塩の量など
はポルトランド・セメントに対して腐食性で
ある。

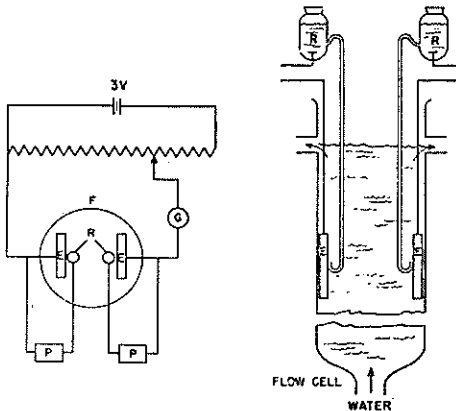
(e) このような土壌に埋設される鋼材の防食に
は電気防食法が適当である。

(9) 分極特性による推定

分極特性から鋼材のマイクロ腐食速度を求める方法は実
験室内においていろいろ検討されてきており^{67) 68) 69) 70)},
その精度も確かめられている。⁵⁰⁾

とくにカソード分極特性の測定は電気防食技術者にと
っては不可欠の手段でもある。しかしながらこの分極特
性による推定方法をそのまま野外に適用するにはあまり

にも打撃に対する機械的強度が弱い。図—3.20に実験室内でこの方法によるマイクロ腐食速度測定装置の一例⁵⁶⁾を示す。したがってこの方法をそのまま現地に適用することはかなり限定されてせいぜい3—2で紹介したマイクロ腐食計(2)程度であろうと考えられる。



図—3.20 分極特性からマイクロ腐食速度を求め
る装置の1例

しかしながら分極特性を利用する方法は腐食機構を検討するにはもっとも有力な方法であり、腐食速度推定のみならず材質による防食性の検討⁷¹⁾、電気防食⁷²⁾、腐食抑制剤の効果⁶⁹⁾の検討など多方面に利用されている。

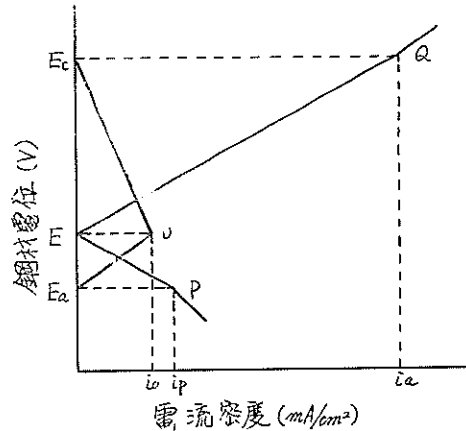
次節で述べる実験方法に関連があるので以下簡単に分極特性から鋼材マイクロ腐食速度を推定する方法を説明しておく。

実験室内においては鋼材のマイクロ腐食速度は普通次のようにして求められる。

まず鋼材をカソード、鋼材とは別に設けた電極をアノードとなるように腐食環境中に設置してから外部電源に接続する。別に照合電極と電位差計によって鋼材表面の電位が測定されるように準備しておき、外部電流密度とこれに応ずる電極電位を測定して行く。こうして求めた電流・電位曲線は図—3.21に示すような曲線EPとなりP点で屈折する。このP点は鋼材表面に発生していたマイクロ・セルの消滅を意味する。P点に相当する電位をEaとすればEaは鋼材面のマイクロ・セルのアノード開路電位である。

次に鋼材をアノード、外部電極がカソードとなるように短絡したときの電流・電位曲線を上と同じ要領で求めると図—3.21の曲線EQとなつてQ点で屈折する。

Q点に相当する電位をEcとすればEcはマイクロ・セルのカソード開路電位であり、Q点においてもマイクロ・セル



図—3.21 電流-電位曲線図

は消滅する。鋼材を腐食環境中においたとき発生するマイクロ・セルは短絡していわゆる腐食電流が流れる。このためにマイクロ・セルのアノード、カソードはそれぞれの開路電位Ea, Ecから分極して腐食電流に相当する電位となる。このことは図—3.21ではアノード分極曲線EaQ, カソード分極曲線EcPがO点で交ることで示される。O点に相当する電位Eが鋼材の腐食電位(または自然電位ともいい、腐食環境に埋設された鋼材片の単極電位である)であり、またO点に相当する電流i₀が鋼材のマイクロ腐食電流(腐食速度)で次式から求められる。

$$i_0 = \frac{i_0 \cdot i_p}{i_0 + i_p} \quad (3.11)$$

i₀, ipはそれぞれQ点, P点まで分極させるに必要な外部電流密度であり実測される値である。

図—3.21から明らかなように腐食電流は両分極曲線の形状によって決まる値である。

この外に埋設鋼材の分極特性を求めて腐食・防食の基礎資料を得るものに通電試験がある。

水中ならびに土中における鋼材のマイクロ腐食速度を推定する現行の手法の概略を以上述べたが、マイクロ腐食速度を野外条件下で推定することはむづかしい問題でマイクロ腐食計として使用されたものはN. G. I. コロジョン・サウンドのなど1, 2のようである。

しかしながら本節で指摘したようにこれらも港湾環境には適用し得ない。

一方マイクロ腐食よりも実際には重要であるマクロ腐食についてはその推定方法は全く解明されていない。

3—3 ミクロ腐食速度推定法ならびにミクロ腐食計の開発に関する実験

3—3—1 実験の概要

3-2で紹介したようにマイクロ腐食速度の推定に関してはいろいろと検討されてきているがいずれも港湾条件での使用には不向きである。また現地条件下ではマイクロ腐食速度推定よりもマクロ腐食速度推定の方がその必要性が高いけれどもマクロ腐食計は開発されていない。したがってここでは港湾環境用腐食計の開発をめざしてまず港湾用マイクロ腐食速度推定方法ならびにマイクロ腐食計の開発に関する検討を次のように行なった。

鋼材腐食の検討としては Pourbaix らが pH~電位の関係図を図-3.22のように作成しており、これによって熱力学的な意味で腐食が進行する可能性の有無を大体判断することができるけれども図-3.22からでは腐食速度は推定できないしまたその反応機構もわからない。鋼材腐食速度を推定するにはやはり3-2(9)で一寸触れたように反応速度論的な立場から取扱われる分極特性を追求することが必要である。

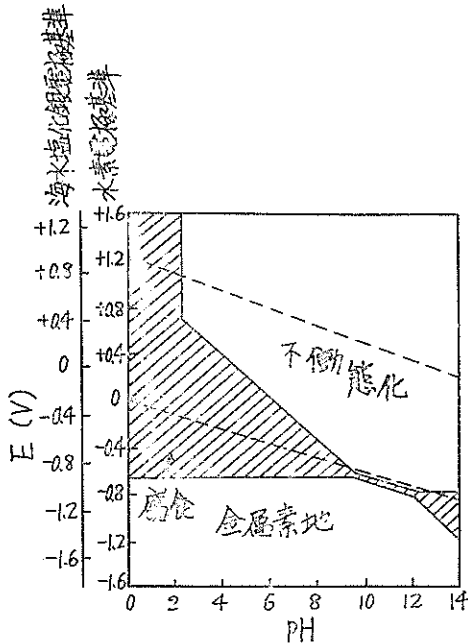


図-3.22 Pourbaix 図

これに対して Evans⁷⁴⁾ は実際の過程に対する分極曲線を図3.23のように示している。同図の縦軸はアノード(陽極)、カソード(陰極)の可逆電位であり、横軸はアノード、カソード反応の速度を電流で表わしたものの対数である。また $E_k(I)$, $E_k(II)$, $E_k(III)$ は初期陰極電位 E_k° から始まる3本の陰分極曲線である。曲線 $E_k(I)$ は大気中の酸素が中程度に溶存している pH5~9の溶液中の陰分極曲線であり、曲線 $E_k(II)$ は激しい

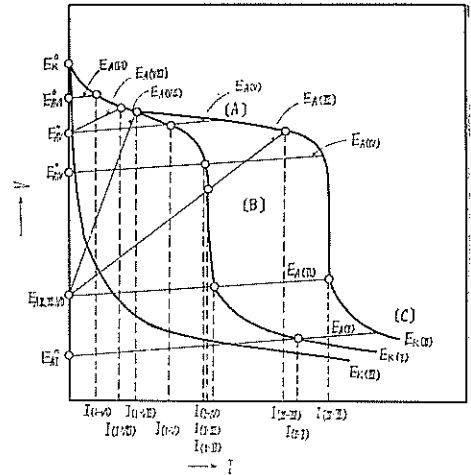


図-3.23 Evans 図

攪拌などによって陰面に酸素が多く供給されるとき陰分極曲線である。また曲線 $E_k(III)$ はほとんど酸素がないときの陰分極曲線である。陰分極曲線は傾斜によって[A]部、[B]部、[C]部の3部分けられる。一方陽分極曲線は $E_A(I)$, $E_A(II)$, $E_A(III)$ など示されるようにほとんど直線に近い曲線である。

腐食反応はアノード反応量とカソード反応量が等量であるという一つのルールが成立するため陰分極曲線と陽分極曲線の交点はその腐食電池の電流すなわち腐食速度に相当する。いま陽極初期電位が陰極初期電位にほぼ等しいときは両分極曲線の交点は[A]部にあたるため腐食過程は酸素の復極作用によりその速度は陰極における中和(放電)に支配される。 $[E_k(I)$ と $E_A(VI)]$ 。陽極が一層卑になれば交点は[B]部に生じて腐食過程は酸素復極作用に支配されその速度は酸素の陰極への拡散速度に左右される。 $[E_k(I)$ と $E_A(IV)]$ 。さらに陽極が十分に卑となったときには交点は[C]部に生じて腐食過程は水素復極によって進行する。 $[E_k(I)$ と $E_A(I)]$ 。また他の条件が等しければ陽分極がいちじるしいほど腐食過程は酸素復極作用によるようになり、その速度は陰極における放電速度による。 $[E_k(I)$ と $E_A(VII)$, $E_k(I)$ と $E_A(III)$, $E_k(I)$ と $E_A(II)$ 参照]。陰分極曲線と陽分極曲線の交点が[A]部または[C]部にあるとき最大腐食電流は陽分極の勾配が等しいと陽極初期電位に支配され、同一の陽極初期電位 E_A° のときは陽分極の勾配に左右される。 $[E_k(I)$ と $E_A(IV)$, $E_k(I)$ と $E_A(V)$ および $E_k(I)$ と $E_A(V)$, $E_k(I)$ と $E_A(VIII)$ 参照]。しかし腐食過程が[B]部のように酸素の拡散速度に支配されるときは最大腐食電流は陽極初期電位にも陽分極にも影響されない。

$[E_k(I)$ と $E_A(II)$, $E_k(I)$ と $E_A(IV)$; $E_k(I)$ と $E_A(II)$
 $E_k(I)$ と $E_A(III)$ 参照]。

図-3.23より陰分極曲線と陽分極曲線の交点に相当する電流、すなわちマイクロ腐食速度はもっぱら陰分極曲線の型によって左右されることがわかる。M. Stern⁷¹⁾は「陽分極曲線の形状は金属系に特有な性質と考えられるが陰分極曲線の形状は腐食環境の諸因子に影響される」と述べている。このとき環境的諸因子としては(i)カソード(陰極)における被還元種をその酸化状態から還元状態まで変化させるに必要な活性化エネルギー、(ii)被還元イオンのカソードへの拡散速度の2因子をあげている。

一方N.D. Tomashov & Y.N. Mikhailovsky⁴⁹⁾は腐食環境が土壌である場合について次のように述べている。

(i) アノード支配である土壌

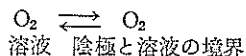
- (a) 乾燥土, 砂土
- (b) 乾燥沃土

(ii) カソード支配である土壌

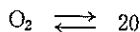
- (a) 砂と塩類, 水分7~10%
- (b) 沃土質土壌と砂
- (c) 下水溝の沈泥
- (d) 灰色粘土, 水分多量
- (e) 水分多量の粘土, 砂土壌, 小石混入
- (f) 灰色粘土, 水分7~10%

したがって Evans, N. D. Tomashov その他のこれまでの検討結果から海水, 海水飽和泥層などが含まれる港湾環境における鋼材の分極曲線は Evans 図の $E_k(I)$ と $E_A(VI)$ で示されるカソード支配の型であると考えられる。この結果カソード分極曲線の型は M. Stern が示すように腐食環境の種類によって異なるため各種環境中の鋼材腐食速度を推定, 比較するにはカソード分極曲線を利用することがもっとも便利である。G.V. Akimov⁷⁵⁾によればカソードにおける反応は次のように示される。

(i) 陰極分極(溶液から陰極への酸素の拡散)



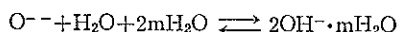
(ii) 酸素の吸着と分子の原子への解離



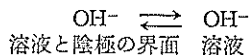
(iii) イオン化



(iv) 水酸イオンの生成

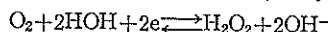


(v) 水酸イオンの陰極から溶液への移動



まとめると

$O_2 + 4e + 2H_2O + 4mH_2O \rightleftharpoons 4OH^- + mH_2O$ となる。
 なお2次的の反応として次の反応が示されている。



中性環境中で鋼材表面に発生するマイクロ腐食電池の陰, 陽分極曲線は図-3.23に示す [B] 部において交り $[E_k(I)$ と $E_A(IV)$ 参照] 交点に相当する腐食速度は環境中の溶存酸素の拡散速度に支配されるが, これは一連のカソード面における反応の中で(i)の反応速度がもっとも遅いことを意味する。

以上の分極特性についての検討結果にもとづいて腐食速度推定への考察を進めるために図-3.22より中性環境(pH5~9)における分極曲線を取り出してみると 図-3.24の $E_k(2)$ と E_A のようになる。 E_k は腐食電池のカソード

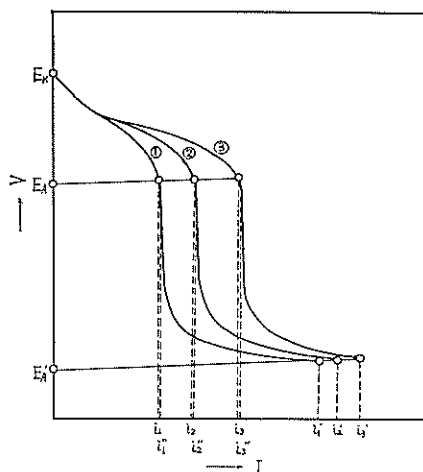


図-3.24 中性環境における分極曲線図

電位, E_A はアノード電位であり短絡と同時にそれぞれ分極をおこして②で交る。このときの腐食電流は i_2 である。環境種を変えて①, ③とすればこれまでのカソード分極特性についての検討結果より $E_k(1)$, $E_k(3)$ となることが予想できる。(ただし E_k =一定とした)。これに対してアノード分極曲線は M. Stern が示すように腐食環境に左右されないものでまた中性環境ではカソード分極にくらべて非常に小さいため $E_A(2)$ で表わされ, $E_k(1)$, $E_k(3)$ と $E_A(2)$ との交点に相当する電流をし, i_1 , i_3 とする。しかしN. D. Tomashov らが考察した測定桿による分極特性から i_1 , i_2 , i_3 を測定する方法は前節で述べたように機械的強度が弱くて操作が複雑で測定時間が長くなるなどの欠点がある。したがってこのような欠点がなく i_1 , i_2 , i_3 が推定できる方法が必要である。いま鋼材がカソード, 鋼材より十分卑な電位 (E_A') を示す金属がア

ノードとなる一つの模型電池を考える。この模型電池を中性環境①, ②, ③で短絡するときカソード, アノード分極曲線の交点は図—3.24の[C]部の水素復極反応が支配的なところに生じ交点①', ②', ③'に相当する腐食電流は i_1', i_2', i_3' となる。いま i_1, i_2, i_3 と i_1', i_2', i_3' を比較してみると次のようないちじるしい相違点がある。

(イ) i_1', i_2', i_3' の方が i_1, i_2, i_3 よりかなり大きくそれぞれの比が同一ではない。

(ロ) i_1, i_2, i_3 は環境中の溶存酸素の拡散速度に支配されるが i_1', i_2', i_3' の律速反応は水素復極作用である。

(ハ) G. V. Akimov によれば水素復極と酸素復極の過程では陰極部が全く異なる。すなわち水素復極のときは鋼中のセメントト Fe_3C が陰極部となるが酸素復極のときは中性溶液中で維持されている酸化皮膜であろう。

したがってまず模型電池反応を中性環境中における鋼材腐食反応と同じ酸素復極支配とすることが必要である。次に酸素拡散速度によるカソード分極は水素分極と同じくそのとき流れる電流密度の函数であるために模型電池の電流密度を自然環境中の鋼材腐食電流密度とあまり違わないことが必要である。このような問題点を解決するために模型電池の回路に可変抵抗を挿入してみるとこのときの短絡前の全抵抗は $R=R_0+R_a+R_d$ となり短絡時の全抵抗は $R'=R_a+R_c+R_0+R_d$ となる。

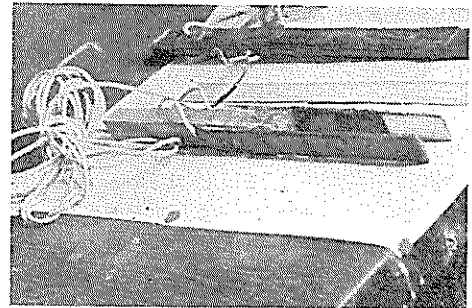
ただし R_0 は可変抵抗, R_a は環境の抵抗, R_d は導線抵抗, R_c はアノード分極による抵抗, R_e はカソード分極による抵抗である。一般に港湾環境では海水の存在のために R_0 はかなり小さい。したがって i_1', i_2', i_3' を i_1, i_2, i_3 付近に移すには R_0 は R_c より相当大きな値とする必要がある。一方図—3.24からわかるように[B]部すなわちカソード反応が酸素の拡散速度によるカソード分極曲線部分では腐食電流は電気抵抗の広い範囲の変化にもほとんど影響されないという特長がある。したがっていま仮りに環境①の中で模型電池の回路にカソード, アノード分極曲線の交点が[B]部に生ずるように R_0 を挿入してみると交点に相当する電流 i_1'' は i_1 に近似することになる。このことは環境②, ③についても成立し $i_2''=i_2, i_3''=i_3$ となる。またさらにこのとき $R=R_0+R_a+R_d$ 一定とすることも考えられる。いま R —一定とすると $R'=R_c+R_a+R$ となって任意の環境内で流れる模型電池の電流は (R_c+R_a) の函数と考えられるが中性環境における分極特性はカソード支配であるため $R_c \gg R_a$ とみられる。この結果 R —一定とすることは各種環境内の R_c を取り出しやすくすることになりしたがって R_c に左右されると考えられる腐食電流すなわち腐食速度を推定, 比較するのに有効な措置ではないかと予想できる。

したがって以下の室内実験で上のように仮定した推定方法が実際に成り立つものであるかどうかを検討することにし, さらに野外実験では室内実験結果にもとづいて試作した測定電極の打込み強度ならびに推定方法の測定精度などの実用性に関することを検討した。

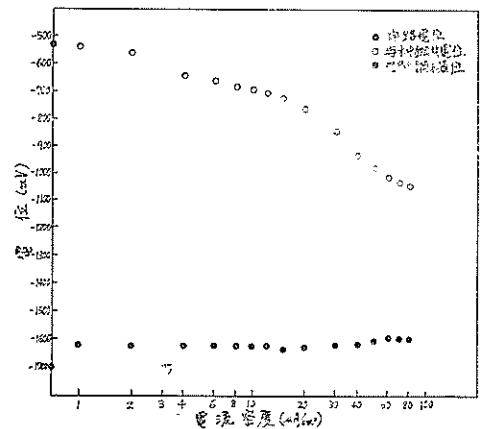
3—3—2 室内実験

(1) 測定電極

模型電池のアノードは電気防食の流電陽極の一種であるマグネシウム金属, カソードは鋼材を用いて次のように加工して室内で使用できるタイプとした。マグネシウム板(1.7mm×20mm×200mm)および軟鋼板(2mm×20mm×200mm)の一端にそれぞれ測定用電線を接続する。次に電極補強の意味で両金属板の片面にベークライト板(3mm×25mm×200mm)を一枚づつ有機合成樹脂(リゴラック, 注型用, 理研合成の製品)で絶縁・接着する。こうしたベークライト板を両金属面が表面積1対1で向きあって対立するように一定間隔で固定した。このように加工したものを室内用測定電極と呼び図—3.25に示す。また測定電極の材質, 形状, 寸法は表—3.6の通りである。試みに模型電極を海水中に浸漬したとき



図—3.25 室内用測定電極



図—3.25' 模型電池(Mg—Fe)の通電量による電位変化

の両極の電位変化を求めてみると図—3.25'のようになり、模型電池のアノードであるマグネシウムの電位は安定していることが確かめられた。

表—3.6 室内用電極の形状・寸法

電 極	材 質	形状・寸法 (mm)	電 極 間 隔 (mm)
アノード	Mg	20×60	24
カソード	SS41	20×60	

(2) 腐食環境の調整

港湾環境に類似させるために実験で使用する腐食環境は海水などを加えて比較的電気伝導性を良くした。表—3.7 に示すような各種土壌を採取して腐食環境の調整に使用した。

表—3.7 腐食環境調整用土壌

土 壌	採 取 場 所
黒褐色砂質沈泥	横須賀市 田浦
砂	神奈川県 鶴沼
黒褐色沈泥	横須賀市 池上
赤褐色粘土質沈泥	横須賀市 平作
黄褐色砂質沈泥	横須賀市 浦賀
黒褐色砂質沈泥	横須賀市 川間
黒色沈泥	横須賀市 浦賀
黒褐色沈泥	横須賀市 川間
土炭粉	横須賀市 川間
へドロ	横須賀市 川間
粘土	横 濱 市 高島

このうち土丹粉はφ10~30cm程度の塊りであるために粗・細粉砕機にかけて微粉末とした。腐食環境の調整は次のように行なった。

まず採取した土壌に調整用の溶液を加えてから手で十分に混合したが、とくに粘土など粘着性のあるものは混合機にかけて混合した。

次に混合された土壌類はガラス容器（1ℓ入り瓶または10ℓ入り水槽）に詰めてから振盪機で十分締め固めた。締め固めた後1週間放置したものを供試腐食環境とした。その組成は表—3.8に示す。

同表に示す二酸化マンガ（MnO₂）や二酸化鉛（pb₂o₂）はこれらの存在によってカソード分極が減少するのではないかと考えて添加したものである。

表—3.8 腐 食 環 境 組 成

No.	腐 食 環 境	含 水 比 (wt. %)	貯蔵容器
1	黒褐色砂質沈泥～蒸溜水	飽 和	A
2	土炭粉～蒸溜水	飽 和	A
3	粗砂～水道水	29	B
4	黒色沈泥、標準砂～蒸溜水	飽 和	A
5	沈泥質砂～蒸溜水	飽 和	A
6	粘土、砂～水道水	26	B
7	粘土～海水	飽 和	A
8	粘土、細砂～水道水	61	B
9	土炭粉～蒸溜水	飽 和	A
10	赤褐色粘土質沈泥～海水	飽 和	A
11	へドロ	飽 和	A
12	細砂～水道水	23	B
13	粗砂～水道水	10	A

No.	腐 食 環 境	含 水 比 (wt. %)	貯藏容器
14	細砂, 粗砂~水道水	19	A
15	細砂~水道水	16	A
16	黒褐色沈泥, 粒状MnO ₂ ~水道水	飽 和	A
17	黒褐色砂質沈泥, 粒状MnO ₂ ~海水	飽 和	A
18	細砂, 粗砂~水道水	15	B
19	砂~水道水	15	B
20	粗砂~水道水	7	B
21	細砂~水道水	18	B
22	細砂~海水	13	B
23	細砂, 粗砂~水道水	11	B
24	黒褐色沈泥, 粉末MnO ₂ ~修酸溶液	飽 和	A
25	粉末MnO ₂ ~修酸溶液	飽 和	A
26	黒褐色砂質沈泥, 粒状MnO ₂ ~海水	飽 和	A
27	黒褐色沈泥, 粒状MnO ₂ ~海水	飽 和	A
28	黒褐色沈泥, pbO ₂ ~修酸溶液	飽 和	A
29	酸素飽和海水	飽 和	A
30	粒状MnO ₂ ~海水	飽 和	A

A : 1 ℓ 広口瓶

B : φ25cm, 深サ20cm, ガラス水槽

(3) 実験方法

(1)の測定電極を(2)の腐食環境に適用して比抵抗とガルバニック電流密度を測定する方法を以下に述べるように規制した。さらに鋼材片を(2)の腐食環境に埋設してマイクロ腐食速度を重量減量から実測した。

(イ) 比抵抗の測定

測定電極（アノードとカソード）からでている測定用電線を A. C. ブリッジに接続して測定電極を垂直にアノードとカソード表面が完全に埋没するように腐食環境中に挿入する。この状況を図-3.26, 27に示す。

A. C. ブリッジは小型発振器 (OV-1020C型) と A. C. ブリッジ本体とから成っており抵抗測定範囲は0.1Ω から 1MΩ までである。

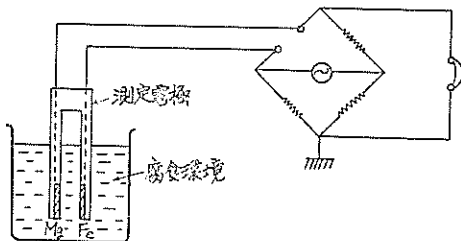


図-3.26 A.C.ブリッジによる腐食環境の抵抗測定回路

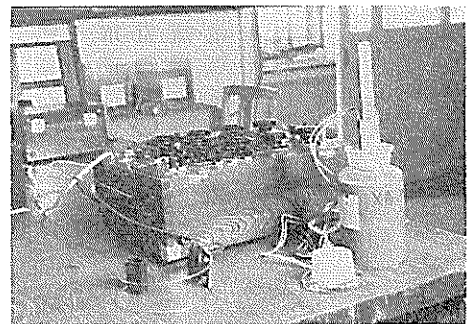


図-3.27 腐食環境の抵抗測定状況

電極挿入後は素早く A. C. ブリッジで電極（マグネシウムと軟鋼）間の抵抗 $Re(\Omega)$ を測定する。A. C. ブリッジは抵抗を測定するときに電極間の分極抵抗が入ってこないようにするために用いるものである。

$Re(\Omega)$ を次式に代入して腐食環境の比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$ を算出する。

$$Re(\Omega) = \rho \times k \times l / Aa \quad (3.12)$$

$$\therefore \rho(\Omega\text{-cm}) = Re \times l / k \times Aa \quad (3.13)$$

ただし、

Aa : アノード表面積でこの場合カソード表面積 Ac と等しく 12cm^2

l : アノードとカソード間の距離で 2.4cm

$1/k$: 定数で1.4

(3.12)式に $Aa=12\text{cm}^2$, $\ell=2.4\text{cm}$, $1/k=1.4$ を代入すると(3.14), (3.15)式となる。

$$\rho=12/2.4 \times 1.4 \times Re (\Omega\text{-cm}) \quad (3.14)$$

$$=7 \times Re (\Omega\text{-cm}) \quad (3.15)$$

なお比抵抗測定のために腐食環境中に測定電極を挿入したときを本実験で規制した測定法の最初であるとみなしてストップ・ウォッチによって計時を始めておく。

(イ) ガルバニック電流密度の測定

腐食環境中で測定電極のアノード、カソードを短絡すれば両極間にいわゆるガルバニック電流が流れる。しかし短絡後電流に応じた分極作用が電極面(とくにカソード面)に働くため次第にガルバニック電流は低下して行く。この低下の模様を観察すれば次のようになる。すなわち、測定電極を腐食環境中に挿入したときから最初の3分間は30秒間隔で、3分以上30分までは1分間隔で電流値を記録して行くとガルバニック電流の減少変化は大体0~10分間で改まり、10~20分はごく僅かづつ低下して20分以後はほぼ一定の値に落ちつく。

したがってガルバニック電流密度を測定する場合、両極短絡後の経過時間を指定する必要がある。もともとガルバニック電流密度を測定するのはマイクロ・セルのガルバニック電流(すなわち腐食電流)密度との関係を求めるためであるから、経過時間をどうするかということは腐食電流について考えることにする。

腐食電流は鋼材表面に発生するマイクロ・セルのアノードとカソードが短絡して両極部分の間に流れるガルバニック電流で長期間継続して流れるものである。このため模型電池のアノード、カソード両極間に流れるガルバニック電流も当然アノード、カソード短絡後の安定したガルバニック電流値を測定しなければならない。(この外短絡時のガルバニック電流値は同一腐食環境についてもばらつきが非常に大きくて再現性に乏しいことも認められた。)

次に問題となるのは模型電池のアノードとカソードを短絡するときの回路全抵抗 $R(\Omega)$ をどのような値とすることである。先述したように港湾環境における鋼材のマイクロ腐食速度を $0.1\text{mm/yr} \sim 0.2\text{mm/yr}$ と想定するとこの腐食速度に相当する電流(すなわち腐食電流)は $8.6\mu\text{A/cm}^2/\text{yr} \sim 17.2\mu\text{A/cm}^2/\text{yr}$ となる。

一方模型電池のアノード(マグネシウム)とカソード(鋼材)の海水中の電位差を $1.2(\text{V})$ と仮定すると、海水中の測定電極の抵抗 Re は数 Ω 程度であるからもし分極がなければ $10^4\mu\text{A/cm}^2$ のオーダーのガルバニック電流密度が得られることになり、港湾における腐食電流密度

の $10^4\mu\text{A/cm}^2$ よりはるかに大きな値である。したがって模型電池のガルバニック電流密度を腐食電流密度の $10^4\mu\text{A/cm}^2$ のオーダーに近づけるため回路に可変抵抗 R_v をいろいろ変えて挿入してみた。可変抵抗 R_v を挿入して R の値を $1,000\Omega$, $2,000\Omega$, $3,000\Omega$ とすると、もし分極がなければガルバニック電流密度はそれぞれ $100\mu\text{A/cm}^2$, $50\mu\text{A/cm}^2$, $33\mu\text{A/cm}^2$ となり大体 $10^1\mu\text{A/cm}^2$ のオーダーとなる。そこで $1,000\Omega \sim 3,000\Omega$ の範囲内の R でいろいろ調整した腐食環境について短絡後安定した測定電極間のガルバニック電流密度を測定してみると $R=2,000\Omega$ 付近が今後の測定に都合が良さそうであるから $R=2,000\Omega$ とすることに決めた。

すなわち $R=2,000\Omega$ とすると(3.15)式から明らかなように比抵抗 ρ は $14,000\Omega\text{-cm}$ まで測定できることになる。港湾環境の比抵抗は海水が存在するために一般に小さい(海水の比抵抗は $25\Omega\text{-cm}$) が、比抵抗の測定範囲が $14,000\Omega\text{-cm}$ まであれば海岸に近い陸地にも十分適用できると考えられる。

上の検討結果にもとづいてガルバニック電流密度は次のようにして測定することにした。

(イ)の操作で腐食環境の抵抗 $R_e(\Omega)$ が求まったら回路に可変抵抗 $R_v(\Omega)$ を挿入して A. C.ブリッジを用いて回路全抵抗 $R=R_e+R_v+R_d$ が $2,000\Omega$ になるように可変抵抗を加減する。

次に $R=2,000\Omega$ の条件で測定電極のアノード、カソードを直流電流計に接続して短絡する。一方(イ)の操作の始めから始動しているストップウォッチが30分になったときの直流電流計の読みを求める。このときの直流電流計の読みを(ロ)のガルバニック電流密度として $I_{kd}(\mu\text{A/cm}^2)$ の符号で表わす。

ガルバニック電流密度 $I_{kd}(\mu\text{A/cm}^2)$ 測定の状況は図-3.28, 29, 30, 31に示す。

なお室内実験における(イ)比抵抗および(ロ)ガルバニック電流密度の測定は腐食環境の鋼材埋設期間の変動をチェックする意味で埋設期間の前後に行なって、その前後の平均値で示すことにした。

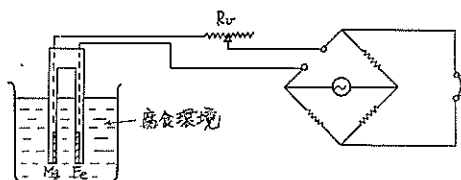


図-3.28 可変抵抗 R_v を挿入して全抵抗を一定 ($2,000\Omega$) とするときの回路

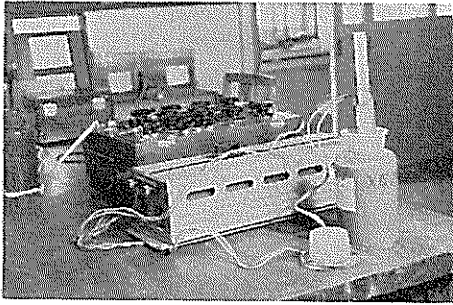


図-3.29 回路全抵抗を一定(2,000Ω)としたときの状況

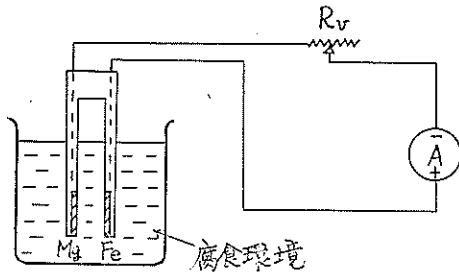


図-3.30 全抵抗一定(2,000Ω)としてガルバニック電流を測定する回路

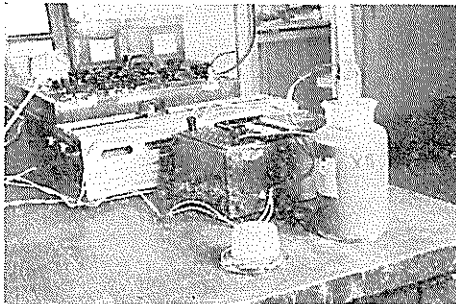


図-3.31 ガルバニック電流測定状況

(イ) ミクロ腐食速度の測定

比抵抗およびガルバニック電流密度の測定が終了した腐食環境中に重量既知の研摩鋼材を約30日間埋設し、以下に述べる要領で鋼材のミクロ腐食速度を重量減少から算出した。

まず市販の軟鋼板(SS41)から50mm×90mm×2mmの寸法の鋼材片を切り取りこれをディスク・サンダーで研摩する。ディスク・サンダーは図-3.32(左)に示す研摩機であって回転輪に固定したサンド・ペーパーの上に鋼材片を押さえながら一面づつ研摩するもので、サンド・ペーパーは粗目のものから次第に細目のものへ取り替えて行く。研摩に使用したサンド・ペーパーは井2, 1

M, 1F, 0, 3/0, 5/0の6種類である。

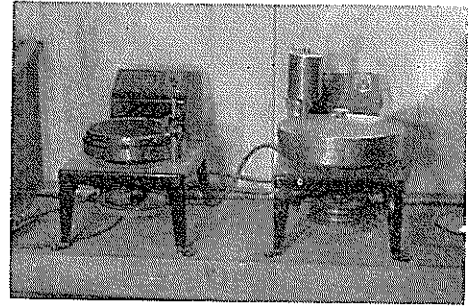


図-3.32 研摩機(左)と琢磨機(右)

ディスク・サンダーで研摩した鋼材片はさらに図-3.32(右)に示す琢磨機で仕上げ研摩を行なった。琢磨機は羊皮を張った回転輪の上に研摩材として酸化クローム懸濁液を滴下しながら鋼材片をこれに押しあてて仕上げ研摩するものである。次に仕上げ研摩した鋼材片を有機溶剤(トリクロール・エチレン)で洗浄して完全に脱脂後、乾燥し、重量を図-3.33に示す直示型天秤で素早く正確に秤量する。

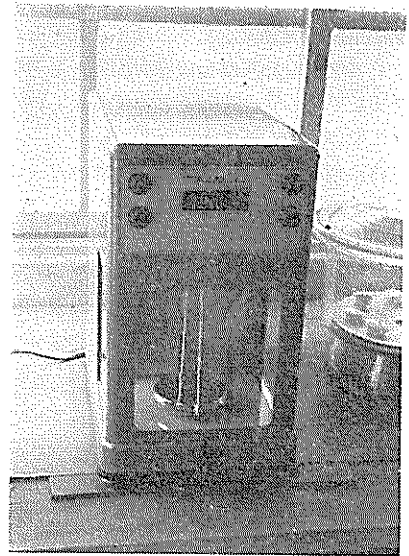
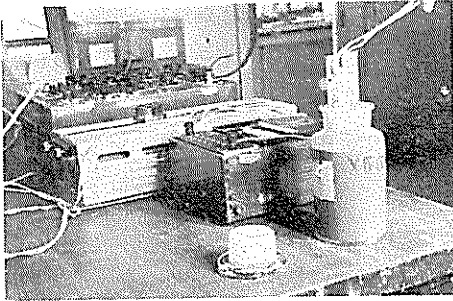


図-3.33 直示型天秤

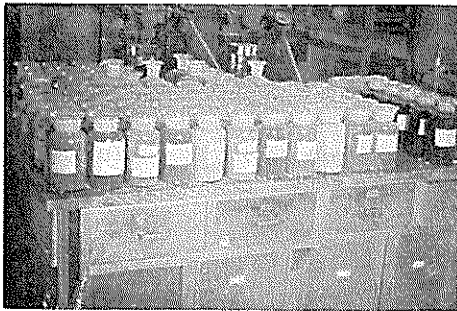
以上のように処理した鋼材片を各腐食環境に図-3.34のように埋設する。鋼材片を埋設した腐食環境容器に蓋をしてから振動のほとんど感じられない室内に図-3.35のように静置した。

約30日間静置後、図-3.36に示すような要領で取出して鋼材表面に付着している腐食環境を水で十分に洗い落とし、さらにクエン酸アンモニウム10%溶液で完全に脱

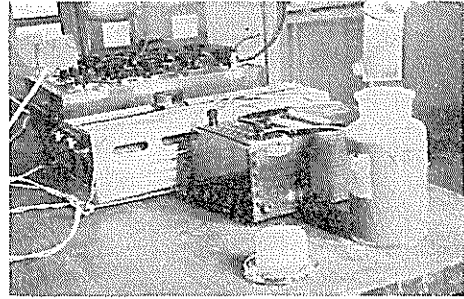
錆する。



図—3.34 研磨鋼材片の埋設



図—3.35 埋設鋼材片の静置



図—3.36 腐食試験片の引上げ

次に鋼材片を水洗いおよびアルコールで洗浄，乾燥後再び直示型天秤で素早く重量を秤る。

埋設前後の重量変化から次式により鋼材のマイクロ腐食速度 C (mm/yr) を算出する。

$$C(\text{mm/yr}) = \frac{3,650 \times x}{7.86 \times a \times t} \quad (3.16)$$

x : 重量減少量(g)

a : 鋼材片の表面積(cm^2)

t : 腐食期間 (day)

埋設の期間は7月～8月にかけてであり，同期間中における静置場所の温度変化は13時において $26 \sim 32^\circ\text{C}$ の範囲であった。

3—3—3 室内実験結果およびその解析

測定結果は表—3.9の通りである。

表—3.9 室内測定結果一覧表

環境 No.	電極間抵抗 $R_e(\Omega)$	比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$	ガルバニック電流 $I_k(\mu\text{A})$	ガルバニック電流 密度 $I_{kD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	重量減量から求めた腐食速度	
					mg/dm ² /day	mm/yr
1	94	658	170	14.2	1.9	0.009
2	66	462	250	20.8	3.3	0.015
3	56	392	256	21.3	2.6	0.012
4	550	3,850	280	23.3	4.7	0.022
5	247	1,729	265	22.1	3.7	0.017
6	100	700	260	21.7	2.4	0.011
7	9	63	270	22.5	4.7	0.022
8	51	354	270	22.5	3.1	0.014
9	42	294	300	25.0	4.1	0.019
10	10	70	320	26.7	6.9	0.032
11	12	84	319	26.3	5.3	0.025
12	52	364	325	27.1	10.7	0.050
13	100	700	346	28.8	15.0	0.070
14	600	4,200	360	30.0	14.4	0.067
15	640	4,480	370	30.8	17.7	0.082
16	36	252	400	33.3	18.0	0.084

環境 No.	電極間抵抗 Re(Ω)	比抵抗 ρ(Ω-cm)	ガルバニック電流 I _k (μA)	ガルバニック電流 密度I _{kD} (μA/cm ²)	重量減量から求めた腐食速度	
					mg/dm ² /day	mm/yr
17	6	42	390	32.5	25.7	0.119
18	400	2,800	390	32.5	21.2	0.098
19	750	5,250	370	30.8	13.6	0.063
20	600	4,200	385	32.1	16.8	0.078
21	466	3,260	388	32.3	17.8	0.083
22	300	2,100	400	33.3	13.5	0.063
23	800	5,600	410	34.2	21.6	0.100
24	8	56	420	35.0	24.9	0.116
25	12	84	415	34.6	16.7	0.078
26	20	140	425	35.4	18.3	0.085
27	8	56	436	36.3	26.0	0.121
28	28	196	460	38.3	29.3	0.136
29	8	56	500	41.7	79.5	0.369
30	4	28	600	50.0	98.5	0.457

同表に示す比抵抗 ρ (Ω-cm) は (3.15) 式より求めたものであり、ガルバニック電流密度 I_{kD} (μA/cm²) は測定電流 I (μA) を電極表面積 12cm² で割った数値である。鋼材のマイクロ腐食速度 C (mm/yr) は (3.16) 式より求めた。

同表にもとづいてガルバニック電流密度 I_{kD} (μA/cm²)、比抵抗 ρ (Ω-cm) およびマイクロ腐食速度 C (mm/yr) (実測値) 三者間の相関性を 1% の有意水準で検定したところ、ガルバニック電流密度は単独でもマイクロ腐食速度に有意にひびくが比抵抗はガルバニック電流密度と一緒にあってマイクロ腐食速度に影響をおよぼしていることが明らかとなった。検定の結果を表-3.10, 11, 12に示す。

表-3.10 重相関係数 r_{z, xy} の検定結果

r _{z, xy}	F ₀	F ₂₇ ² (0.05)	F ₂₇ ² (0.01)
0.95	130.12**	3.35	5.49

表-3.11 偏相関係数 r_{zy, y} の検定結果

t ₀	t(27, 0.05)	t(27, 0.01)
0	2.042	2.750

表-3.12 偏相関係数 r_{zy, x} の検定結果

t ₀	t(27, 0.05)	t(27, 0.01)
15.938**	2.042	2.750

次に三者の関係を表わす実験式を求めると (3.17) 式のようになる。

$$C(\text{mm/yr}) = k \times I_{kD}^a \times \rho^{-b} \quad (3.17)$$

$$\text{ただし, } k = 2.12 \times 10^{-7}$$

$$a = 3.69$$

$$b = 0.001$$

b が a に比べて小さくて無視できそうなので ρ^{-b} が C に影響する度合を調べてみる。

ρ = 1 Ω-cm のとき

$$C = k \times I_{kD}^a \times 1 \quad (3.18)$$

ρ = 10 Ω-cm のとき

$$C = k \times I_{kD}^a \times 0.9977 \quad (3.19)$$

ρ = 100 Ω-cm のとき

$$C = k \times I_{kD}^a \times 0.9955 \quad (3.20)$$

ρ = 1,000 Ω-cm のとき

$$C = k \times I_{kD}^a \times 0.9933 \quad (3.21)$$

ρ = 10,000 Ω-cm のとき

$$C = k \times I_{kD}^a \times 0.9909 \quad (3.22)$$

(3.18~22) 式からわかるように ρ の範囲が 1 ~ 10⁻⁴ Ω-cm であっても ρ^{-b} は 1 ~ 0.99 程度の差であり、C (mm/yr) に対しては小数第二位にはほとんど影響しないので (3.17) 式のうち ρ^{-b} は無視できる。したがって (3.17) 式は (3.23) 式となる。

$$C = k \times I_{kD}^a \quad (3.23)$$

(3.23) 式に表-3.9の値を代入して鋼材のマイクロ腐食速度を算出して表-3.9の実測値と比較してみると表-3.13のようになる。(3.23) より算出した腐食速度は推定値である。

表-3.13 ミク口腐食速度の実測値と推定値の比較

No.	ガルバニック電流密度 I_{KD} ($\mu A/cm^2$)	腐食速度($mg/dm^2/day$)		腐食速度(mm/yr)	
		実測値	推定値	実測値	推定値
1	14.2	1.9	0.8	0.009	0.008
2	20.8	3.3	3.3	0.015	0.016
3	21.3	2.6	3.6	0.012	0.017
4	23.3	4.7	5.1	0.022	0.024
5	22.1	3.7	4.2	0.017	0.019
6	21.7	2.4	3.9	0.011	0.018
7	22.5	4.7	4.5	0.022	0.021
8	22.5	3.1	4.5	0.014	0.021
9	25.0	4.1	6.6	0.019	0.031
10	26.7	6.9	8.4	0.032	0.039
11	26.3	5.3	7.9	0.025	0.037
12	27.1	10.7	8.9	0.050	0.041
13	28.8	15.0	11.1	0.070	0.052
14	30.0	14.4	12.9	0.069	0.055
15	30.8	17.7	14.2	0.082	0.066
16	33.3	18.0	19.0	0.084	0.088
17	32.5	25.7	17.3	0.119	0.081
18	32.5	21.2	17.3	0.098	0.081
19	30.8	13.6	14.2	0.063	0.066
20	32.1	16.8	16.6	0.078	0.077
21	32.3	17.8	16.9	0.083	0.079
22	33.3	13.5	19.0	0.063	0.088
23	34.2	21.6	20.9	0.100	0.097
24	35.0	24.9	22.8	0.116	0.106
25	34.6	16.7	21.8	0.078	0.101
26	35.4	18.3	23.8	0.085	0.110
27	36.3	26.0	26.1	0.121	0.121
28	38.3	29.3	31.8	0.136	0.148
29	41.7	79.5	43.5	0.369	0.202
30	50.0	98.5	85.0	0.457	0.395

推定値(すなわち推定曲線)と実測値との偏りを図示すると図-3.37の通りである。

次に(3.23)式の推定曲線を3-1-1で紹介したN.G.I法の推定曲線とを比較してみる。このとき図-3.3と図-3.37を参照するとわかるように本実験の測定項目 I_{KD} を N.G.I. 法の復極率 $N(\%)$ に換算する必要がある。そこで $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ を次式に代入して $N(\%)$ を算出する。

$$N = \frac{2.000(\Omega) \times 12(\text{cm}^2) \times I_{KD}(\mu A/\text{cm}^2) \times 10^{-6}}{1.20(\text{V})} \quad (3.24)$$

算出結果を表-3.14に示す。

表-3.14 N.G.I. 方法から算出した減極度 $N(\%)$

環境No.	ガルバニック電流密度 I_{KD} ($\mu A/cm^2$)	減極度 $N(\%)$	環境No.	ガルバニック電流密度 I_{KD} ($\mu A/cm^2$)	減極度 $N(\%)$
1	14.2	28	16	33.3	67
2	20.8	42	17	32.5	65
3	21.3	43	18	32.5	65
4	23.3	47	19	30.8	62
5	22.1	44	20	32.1	64
6	21.7	43	21	32.3	64
7	22.5	45	22	33.3	67
8	22.5	45	23	34.2	68
9	25.0	50	24	35.0	70
10	26.7	53	25	34.6	69
11	26.3	52	26	35.4	71
12	27.1	54	27	36.3	73
13	28.8	58	28	38.3	77
14	30.0	60	29	41.7	83
15	30.8	62	30	50.0	100

(3.24)式にもとづいて本実験の推定曲線をN.G.I.法で表わすと図-3.38のようになる。

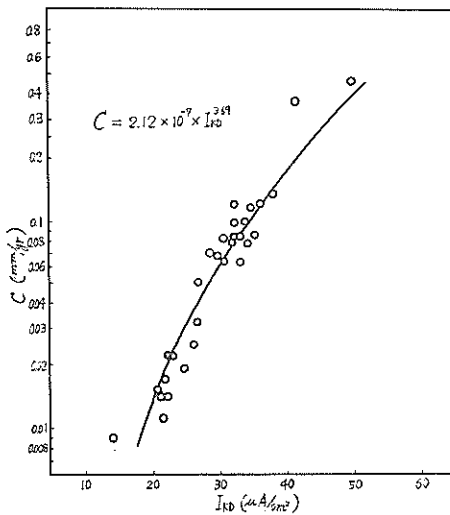


図-3.37 ミク口腐食速度実測値の推定曲線からの偏り

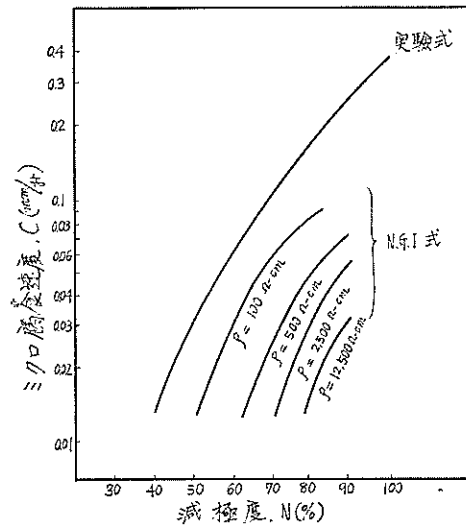


図-3.38 実験式とN.G.I.式との比較

図—3. 38について鋼材マイクロ腐食速度に対する両推定法を比較してみると、N. G. I. 法の推定曲線には ρ の影響がかなり入っているのに反して本実験の推定曲線には1本の曲線で表わされているという大きな違いがある。この原因はN. G. I. コロージョン・サウンドのところまで述べたようにN. G. I. 法は腐食環境中でコロージョン・ポイントのアノード（マグネシウム）とカソード（鋼材）をそのまま短絡するのであるが、本実験の推定法ではアノード（マグネシウム）とカソード（軟鋼）を短絡するときはあらかじめ回路全抵抗を一定（2,000 Ω ）とした点である。（その外にN. G. I. 法は短絡時のガルバニック電流を測定するが、本法では短絡後安定したガルバニック電流を求めるという点も異なる。）

本法の推定曲線が1本であるということは腐食環境の抵抗に関係なく鋼材のマイクロ腐食速度が推定できるために本法にもとづくマイクロ腐食計は直読型とすることができて実用に便利である。さらにもう一つ大きな特色は本法の考え方を利用することによってこれまで未解決であったマクロ腐食速度の推定が可能となる見通しが得られたことである。

次に図—3. 38で両推定法の適用範囲をみてみよう。N. G. I. 法は ρ が小さいところでも0.1mm/yr程度であってこれがN. G. I. 法の上限であるが、本法の推定曲線は上下に延長することによって適用範囲をいくらかも広げることができる。この結果、実用に便利なこと、機械的強度やマクロ腐食速度推定への利用性などの利点を除いてただマイクロ腐食速度の推定範囲のみに焦点を絞ってみても、N. G. I. 法は0.1mm/yr以上の腐食環境（たとえば港湾環境）には適用できないが本法によれば十分推定できる。（N. G. I. 法による推定範囲は図—3. 3によれば0.001mm/yr～0.1mm/yrであり、海底粘土中のマイクロ腐食速度のように0.01mm/yr付近を中心としている。）

結局港研式腐食計はN. G. I. コロージョン・サウンドと同じくカソード分極抵抗を取り出す方法であるが、さらにN. G. I. コロージョン・サウンドの考え方を広げて(1)適用範囲を港湾環境までおよぼしたこと、(2)模型電池のガルバニック電流密度を実際の腐食電流密度に近づけて水素発生のような激しい状況を避けたこと、(3)復極率などの面倒な計算を略してガルバニック電流値から腐食速度が推定できるようにしたことなどが港研式の特色といえよう。

3—3—4 野外実験

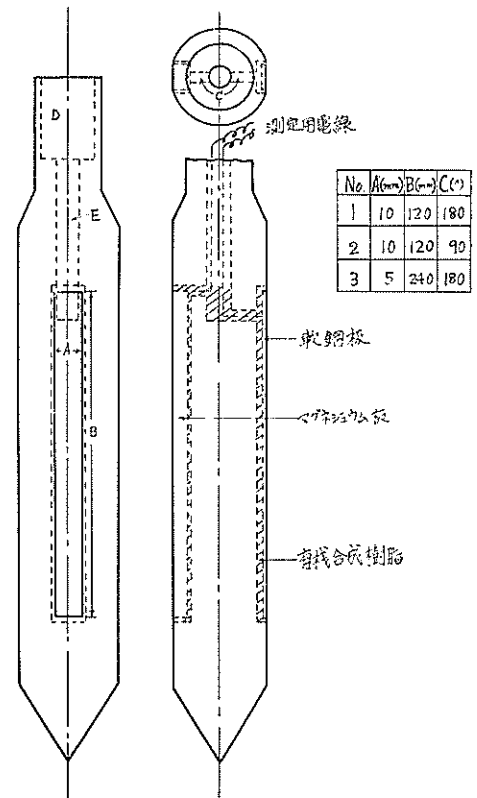
室内実験で検討した推定方法によって港湾環境に埋設する鋼材のマイクロ腐食速度が推定できることが確かめられたので、室内実験結果が現地に適用できるタイプの測

定電極を試作して野外における実用性を検討した。（測定電極という用語が3—3—2室内実験のところでも出ているが、3—3—2では室内用測定電極を3—3—4では野外用測定電極のことを指すが比較するためなどで室内および野外用電極を一緒に述べるところでは混乱しない程度に区別することとする。）

(1) 測定電極

測定電極は機械的強度に秀れるという点が要求されるために、とくに打込み作業に耐え得るもので腐食環境の比抵抗測定範囲が室内用測定電極と同じ程度とすることを目指した。測定電極のアノードとカソードには室内のときと同じくマグネシウムと軟鋼を用いてアノード、カソード表面積比は1：1とした。アノードとカソードの形状・寸法は表面積が12cm²（室内用電極は2×6＝12cm²）となるようにして適当にかえることにしたが予備実験の結果にもとづいて1cm×12cmと0.5cm×24cmの2種類に決めた。

室内用電極はアノード（マグネシウム）とカソード（鋼材）表面が図—3. 25のように向き合っていたが野外用としては打込みのために図—3. 39に示すようにアノード



図—3. 39 野外用測定電極例

(マグネシウム)とカソード(鋼材)がそれぞれ鋼棒(φ40~60mm)表面に埋め込まれた。このとき図-3.39からわかるようにアノードとカソード面は鋼棒面に揃えて打込み時に無理がないような状態で取りつけることにした。鋼棒面にはあらかじめアノード、カソードの寸法(巾×長さ×高さ)より1.5mm程度大きな寸法の穴をあけておく。たとえばアノード、カソードの巾×長さが10mm×120mmのときには穴の巾×長さは $(10+1.5\times 2)\text{mm}+(120+1.5\times 2)\text{mm}$ となる。アノード(マグネシウム)の場合はカソード(鋼)より軟かいためにカソードの2mmに対して強度を増すために6mmとしたので穴の深さだけは異なる。すなわち、アノードが埋設される方の穴の深さは $(6+1.5)\text{mm}$ であるがカソードの方の穴の深さは $(2+1.5)\text{mm}$ である。鋼棒の上端部分は打込み時に鋼棒に接続するための溝Dがきいてあり、溝Dの底部にはφ8mm×200mmの細孔Eが通っている。細孔Eの下部は両極埋め込み用の穴にそれぞれ枝状の細孔によって通じている。溝Dにネジによって接続される鋼棒は図-3.40に示すように1本が主に3mもの(測定深度によっては2mものも使用する)でこれら鋼棒同志は図-3.41に示す接手金物で連結される。

電極(アノード、カソード)板には鋼棒に埋め込む前にあらかじめ測定用電線をD、Eの穴からそれぞれの埋め込み穴に通しておく。このでできた電線を1本づつアノード、カソード板それぞれの片面に接続してから図-3.39に示すように両電極面とも鋼棒面からはみでないようにして埋め込みはリゴラック樹脂を電極板の周囲に流し込んで接着・固定する。リゴラック樹脂は絶縁効果が大きいので両電極とも鋼棒と絶縁されていることになる。

以上の要領で試作した測定電極例を図-3.42, 43, 44に示す。これらについて実用性の面から次のようにいろいろ検討した。

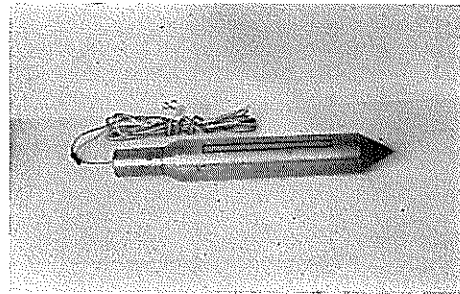


図-3.42 野外用測定電極(2)

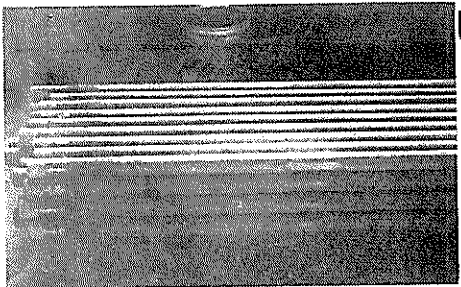


図-3.40 野外用測定電極接続用鋼管(φ60mm, l300mm, t9mm)

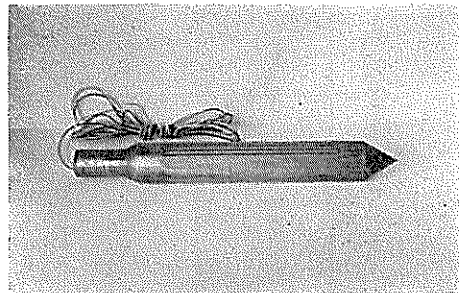


図-3.43 野外用測定電極(3)



図-3.41 測定電極より出ている電線は各継ぎ用鋼管および各ジョイントの中を通り組立鋼管杭の頭部より出る

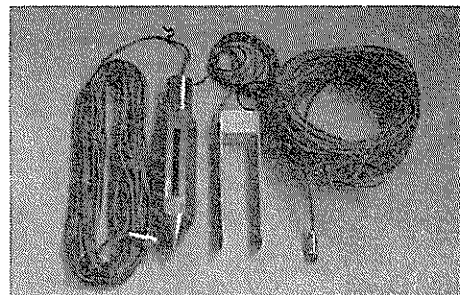


図-3.44 野外用測定電極(4)(左)と室内用測定電極(右)

(1) ガルバニック電流密度測定

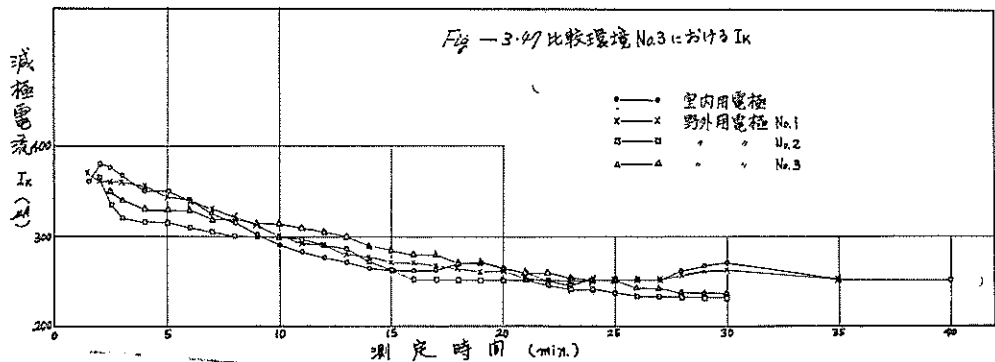
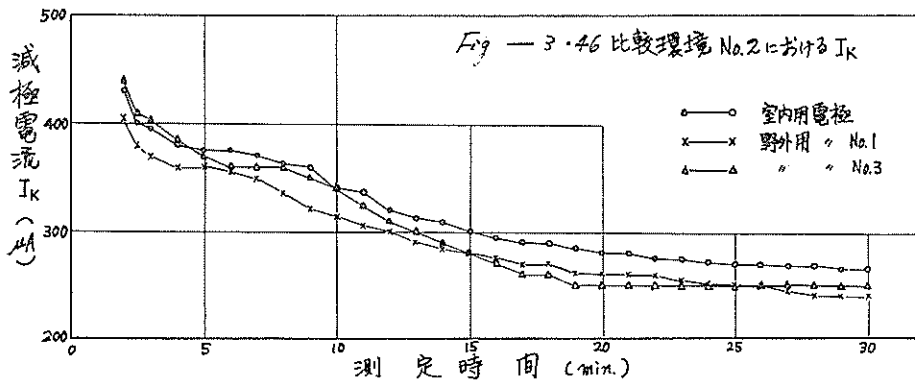
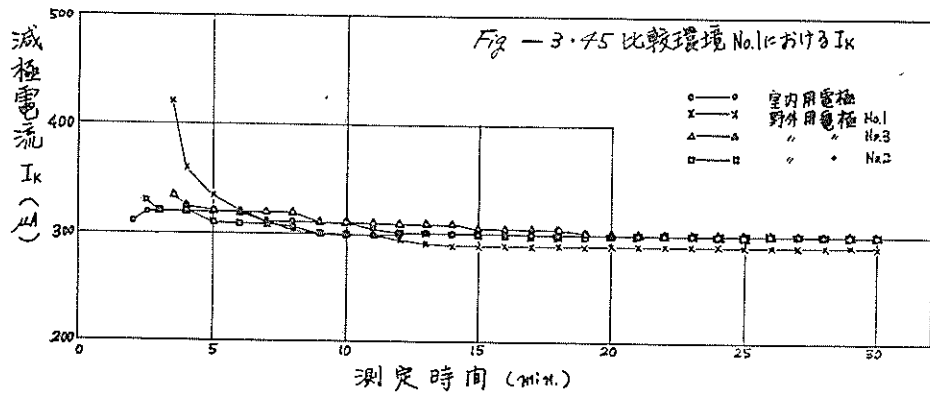
測定電極によりガルバニック電流密度を測定するときにはまず室内用電極によるガルバニック電流密度との一緻性が問題となる。

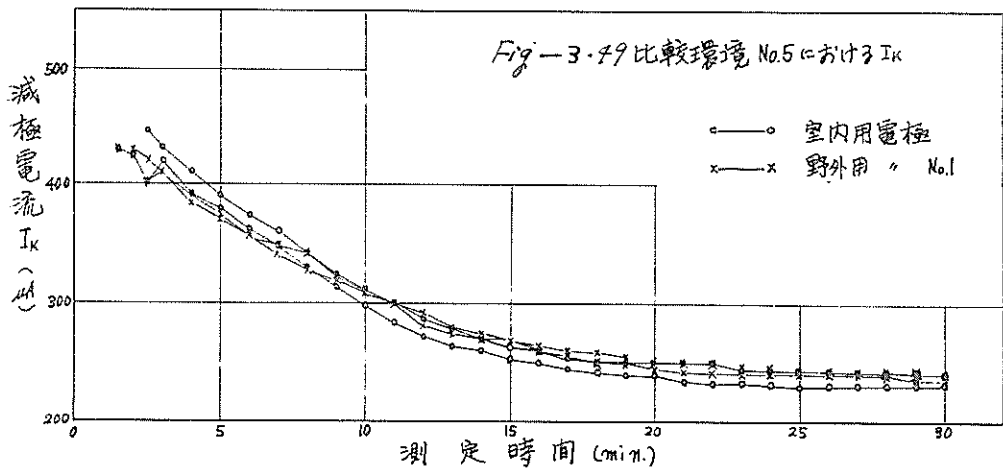
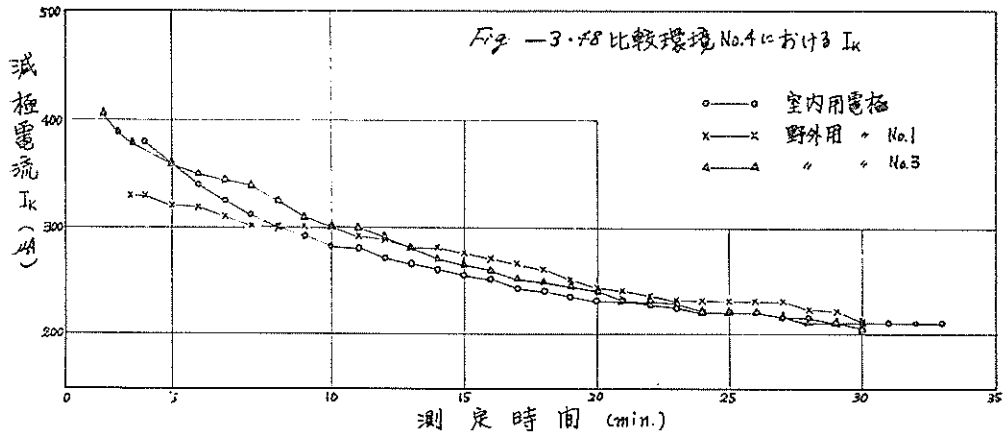
表-3.15に示す比較環境を調整してこれらについて測定した。内径50cm、深さ40cmのガラス水槽5コに供試溶液No.1~No.5を入れてそれぞれについて室内用電極と野外用電極(No.1, 2, 3)でガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ を測定した。測定の様子は図-3.45, 46, 47, 48, 49, 示す通りであり、30分後の値すなわち I_{KD}

($\mu A/cm^2$) はよく一致した。

表-3.15 比較試験用環境

No.	環 境
1	海 水
2	(2カ月室内で放置した)塩化アンモニウム溶液
3	ヨードと海水を含む蒸溜水
4	海水を少量含む水道水
5	水 道 水





次に野外用電極について電極板を取りつけている鋼棒部分がガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ 値におよぼす影響について検討した。

まず野外用電極 No.1 を用いて水道水、海水混液中の $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ を測定する。次に測定電極 No.1 のアノード（マグネシウム）、カソード（軟鋼）面以外の鋼棒表面を完全にパラフィンで被覆してから水道水、海水混液中の $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ を測定した。以上のようにして求めた $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ を比較した結果最初に懸念された測定電極のアノード、カソード面以外の金属（鋼棒部分）の存在が $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ 値におよぼす影響はほとんどないことがわかった。

(四) 比抵抗の測定

表-3.15に示す5種類の溶液について室内用電極と野外用電極 No.1, No.3でそれぞれのアノード、カソード間の抵抗を A. C.ブリッジで測定した。その結果を表-

3.16に示す。

表-3.16 比較試験用環境の抵抗(Ω)

環境 No.	室内用電極	野外用電極	
		No. 1	No. 3
1	4	2.6	1.8
2	380	255	171
3	400	268	180
4	800	536	360
5	1,220	817	549

表-3.16によれば測定電極のタイプによって抵抗が異なることがわかる。すなわち室内用電極と野外用電極とによる同一環境の抵抗値を比べてみると室内用電極で測定した抵抗の方が野外用電極で求めた抵抗よりも大きい。また同じ野外用電極でも差があり No.1 で求めた抵

抗の方がNo.3で求めたものより大きい。このような傾向を一そうはっきりさせるために室内用電極で測定した抵抗を基準としてこれに対する比を算出してみると表-3.17のようになる。

表-3.17 電極による測定抵抗比

電 極	抵 抗 比
室内用電極	1×R
野外用電極 No.1	0.67×R
野外用電極 No.3	0.45×R

表-3.17からわかるように野外用電極のアノード、カソードの形状・寸法を変えてやることによって腐食環境に対する測定電極の適用範囲が調節できる。すなわち、たとえば電極板(アノード、カソード)の表面積が同一(12cm²)であっても電極板を細長くする(No.1は1cm×12cm, No.3は0.5cm×24cm)ほど測定抵抗値は小さくなる。ところが先の室内実験のところで述べたようにガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ は全抵抗 $R=2,000\Omega$ として測定するために、極端に云えば $Re=R$ の抵抗をもって腐食環境にまでは $I_{KD}(\mu A/cm^2)$ が測定できることになり $Re=R$ が適用の限界条件ということになる。

この関係を野外用電極に適用してみる。いま測定電極No.1が適用できる腐食環境の抵抗の限界を $R_1(\Omega)$ 、比抵抗の限界を $\rho_1(\Omega-cm)$ とし、No.3による値を $R_3(\Omega)$ 、 $\rho_3(\Omega-cm)$ とすると、 R_1 、 R_3 は次のように表わされる。

$$R_1=0.67R \quad (3.25)$$

$$R_3=0.45R \quad (3.26)$$

このとき R は同一環境に対する室内用電極の抵抗である。ガルバニック電流密度 I_{KD} 測定のために全抵抗を $2,000\Omega$ とすることは野外用電極No.1, 3に対しては R_1 、 R_3 を $2,000$ とするところが測定限界に相当することになる。したがって (3.25)、(3.26) はそれぞれ次のような関係となる。

$$R_1=2,000(\Omega)=0.67\times R \quad (3.27)$$

$$\therefore R=2,000/0.67=3,000(\Omega) \quad (3.28)$$

$$R_3=2,000(\Omega)=0.45\times R \quad (3.29)$$

$$\therefore R=2,000/0.45=4,444(\Omega) \quad (3.30)$$

(3.28) と (3.30) 式を (3.11) 式に代入することにより野外用電極No.1, No.3の適用限界は次のようになる。

すなわちNo.1では $3,000\times 7=21,000(\Omega-cm)$

No.3では $4,444\times 7=31,108(\Omega-cm)$

以上検討してきた室内用電極と野外用電極No.1, No.3の通用範囲をはっきりさせるために一覧表として表-3.

18に示す。

表-3.18 測定電極による抵抗測定範囲

電 極	比抵抗 ($\Omega-cm$)
室内用電極	<14,000
野外用電極 No.1	<21,000
野外用電極 No.3	<31,000

本研究は港湾環境を対称としているので測定電極による比抵抗の測定範囲は $10,000\sim 15,000\Omega-cm$ までで十分と思われる。少し余裕をみても野外用電極のタイプとしてはNo.1が適当であろうと考えられる。

(イ) 有機合成樹脂の絶縁・接着効果

電極板(アノードはマグネシウム板, カソードは軟鋼板)を鋼棒に埋め込んで測定電極を作成するが、電極板は鋼棒とは絶縁された状態で固定されることが必要である。この目的のために本実験では有機合成樹脂(リゴラック注型用, 理研合成製品)を使用した。とくに静的状態よりも測定電極を測定地盤に打込むときの衝撃によっても絶縁・固定状態が保たれることが必要であるから、次のような方法で有機合成樹脂の絶縁・接着効果を検討した。

図-3.50に示すような電極板埋め込み溝に未硬化の有機合成樹脂を充填して硬化させる。硬化した樹脂の表面を仕上げ用研摩紙でできるだけ平滑に磨く。この状況を図-3.51に示す。

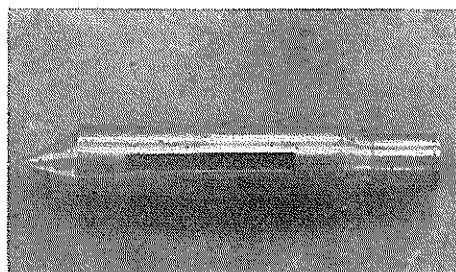


図-3.50 電極(マグネシウムまたは鋼材)取付け用溝

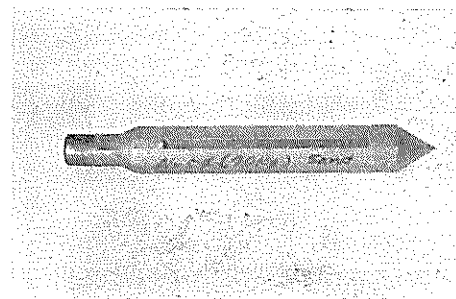
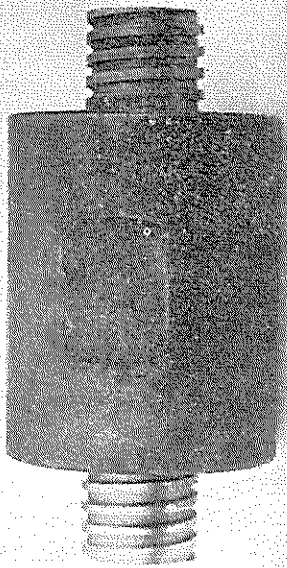
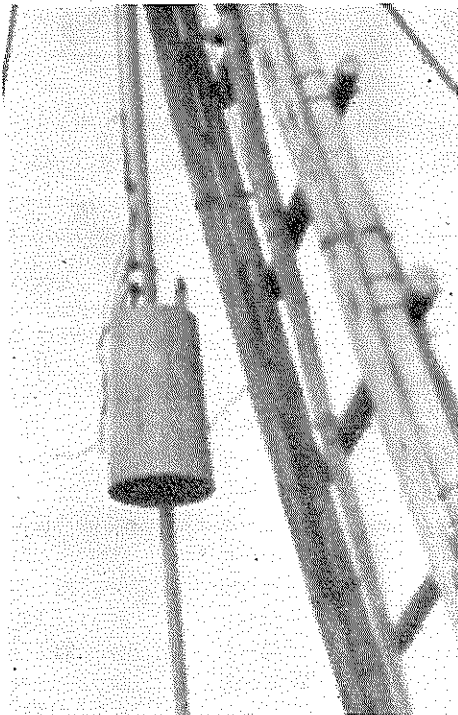


図-3.51 電極取付け用溝に充填された有機合成樹脂



図—3.52 重 錘 受



図—3.53 重 錘

図—3.51に示すように準備した測定電極に鋼棒を接続して十分に締め固めた砂地盤に打込む。打込みの方法は土質試験で行なう標準貫入試験錐の打込み方法と同じく鋼棒の一部分に図—3.52に示すような重錘受をはめ込みここを図—3.53に示す重錘でたたく。

重錘は70kgで重錘の落下距離は100cmであった。地盤の条件によって打撃回数が54回で打込み深度は130cmとなったとき打込みを中止し測定電極を引抜いた。

引抜いた電極の樹脂表面を観察したところ微かな短い傷痕が散見される程度で鋼棒との接着性は全く異常はなかった。さらにこのような打込み、引抜き、観察の操作を繰り返したが使用した有機合成樹脂の耐衝撃性、耐摩耗性および接着性は良好であることが確かめられた。

次に絶縁性を検討した。検討のために用いた測定電極のタイプはNo.1とNo.3である。測定電極の打込み地盤は実験の効果をはっきりさせるために電気伝導性がよくて十分に締め固められた砂地盤とした。このとき電気伝導性を良くするために砂地盤に海水を散布した。

一方打込みに先立ってあらかじめ電極板（マグネシウムと軟鋼）間および電極板と鋼棒間の絶縁状態をメガで確かめておく。また電極板に接続している測定用電線は打込み用鋼棒の一方から通して他方から出しておき、打込み用鋼棒を測定電極に接続する。こうした測定電極を砂地盤の上に立てて上と同じ要領で打込む。130cm～150cm硬い砂地盤に打込んだところでこれを引抜く。引抜き後測定用電線を用いて、両電極板（すなわちマグネシウムと軟鋼）間および電極板と鋼棒間の電気絶縁性をメガで測定したところ何れの場合も打込みによる影響はみられず抵抗は無量大であった。さらに打込み、引抜きを何回も繰り返して打込みによる絶縁抵抗の変化を測定して行ったところ何れの場合も抵抗は無量大を示した。以上の検討をNo.1に続いてNo.3についても実施したところNo.1の場合と同じく衝撃によって電気絶縁性は低下しないことが確かめられた。

(=) 打込み抵抗

腐食計の測定電極は鋼材使用予定地点に打込まれてその地点での鋼材腐食速度を推定するために使用される。

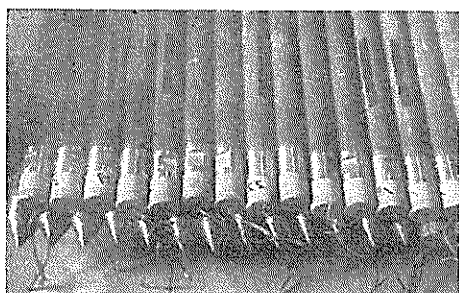
したがって測定電極の打込み抵抗は小さい方が望ましいので試作した測定電極の打込み抵抗の目安をつけるために標準貫入試験錐と比較してみた。測定電極 No.1と標準貫入試験錐とを十分に締め固めた砂地盤に打込み、打込み深度—45cm～—75cm までの30cm および—75cm～—105cm までの30cm の距離を標準貫入試験法で打込むに要する打撃数をそれぞれ求めた。測定電極 No.1と標準貫入試験錐の打撃数は表—3.19に示す通りである。

表—3.19 野外用電極と標準貫入試験錐の打撃数の比較

	打 撃 数	
	—45cm～ —75cm	—75cm～ —105cm
測定電極 No.1	14	14
土質試験用標準電極	10	10

表—3.19によれば測定電極 No.1 の打込み抵抗は標準貫入試験錐の1.4倍であることがわかる。測定電極部の外径を図—3.42に示すように鋼棒の外径より大きくしたのは測定電極を打込むときに測定電極が泥と容易に置き換って打込みの抵抗が小さくなることを期待したためであるが、表—3.19の結果より標準貫入試験錐のように測定電極部の外径を鋼棒の外径に合わせる方がよいことがはっきりした。

そこで図—3.39に示すタイプの測定電極を図—3.54に示すタイプに改めた。なお図—3.44に示すように測定電極を角形にしたのは引抜き抵抗を小さくすることを期待して作ったものである。



図—3.54 野外用測定電極(5)

以上のように測定電極の実用性を念頭に置いていろいろ検討した結果、次の諸事項が確かめられた。

(i) 電極（アノードがマグネシウム、カソードが鋼）面が相対立している室内用測定電極を野外測定電極のように電極面が相対立せず外側を向くよう鋼棒に取り付けてもガルバニック電流密度 I_{KD} ($\mu A/cm^2$) は同じように測定できる。

(ii) 電極板を鋼棒に取り付けるために使用した有機合成樹脂は測定電極用としての絶縁材料および接着、固定材料として適当である。

(iii) 野外用測定電極は室内用測定電極よりも比抵抗測定範囲が大きい。

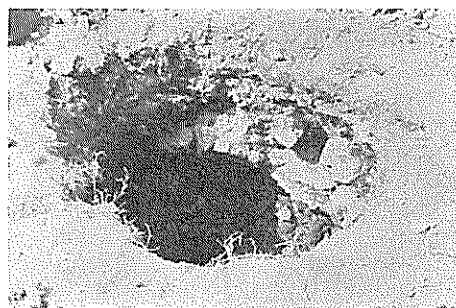
(iv) 室内実験で規制したガルバニック電流密度 I_{KD} ($\mu A/cm^2$) 測定方法は測定回路の全抵抗を一定とするために測定電極のタイプに左右されない。

(v) 打込み時の土の逃げを容易にして測定電極の打込み抵抗を小さくすることを目的として測定電極部の外径を鋼棒の外径よりいくらか大きくすることは深く打込むにしたがって測定電極部と鋼棒部とが曲がる恐れがあるので、測定電極と鋼棒の外径は揃えることが望ましい。

(vi) 測定電極の形状としては被測定環境に電極表面が十分接するようにすることがもっとも必要である。この点は水分飽和と土壌の場合はあまり問題とならないがとくに水分不飽和と土壌のときには重要である。

(2) 実験方法

久里浜地区の土丹地盤には直接測定電極を打込むことは困難であるので打込み地盤を次のように作った。図—3.55に示すようないろいろな大きさの穴（径150cm、深さ150cmまたは径70cm、深さ70cmなど）を掘り、この穴の中に各種土壌を充填する。



図—3.55 野外実験用穴

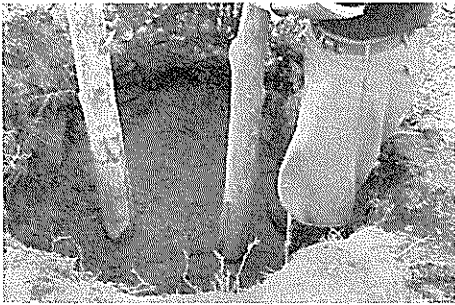
充填の要領は小さい方の穴には粘土などのように比較的容易に電極が打込める土壌を詰め、大きい方の穴には

表—3.20 野 外 環 境

No.	腐 食 環 境			含 水 比 (%)		
1	砂	～海	水	—		
2	砂	～雨	水	12		
3	砂	～雨	水	9		
4	砂	～海	水	11		
5	砂	～海	水	—		
6	砂	～水	道 水	飽 和		
7	粘	土～海	水	120		
8	沈	泥～海	水	27		
9	沈	泥～海	水	飽 和		
10	粘	土～水	道 水	82		
11	沈	泥～水	道 水	飽 和		
12	ポ	ゾ	ラ	ン～海	水	—
13	ポ	ゾ	ラ	ン～水	道 水	56

比較的電極の打込みが困難な砂などを詰めることにした。穴に詰めた土壌は表—3.20に示す種類のものである。

砂は普通の河砂でこれに海水を撒布してショベルで入念に混合したために十分に空気が混入されている。粘土はあらかじめガラス容器中で海水または水道水を加えてある程度混ぜておき、これをさらに混合機にかけて固まり部分のないようによく混合して均一とした。ポゾランは土木、建築方面でセメントの一部をこれで置き換えるために使用されるもので、微粉炭燃焼物でねずみ色をした粉末である。これは吸湿性は少く水を添加すると容易にスラリー状となるので、ガラス容器中にあらかじめ海水または水道水を入れておきこの中にポゾランを加えて攪拌、混合する。このように調整した土壌類をそれぞれ穴の中に詰める。とくに砂は図—3.56に示す要領で十分密に突き固めた。



図—3.56 砂の充填

以上のように調整した各種土壌中に測定電極 No. 1 を(1)と同じ方法で打込む。打込み後鋼棒上部より出ている測定用電線2本(1本はマグネシウムに1本は鋼板に接続されている)を測定計器に接続して室内実験と同じ方法で比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$ およびガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ を測定した。

土壌類の含水比は測定電極 No. 1 を打込んだときと引抜いたときの2回測定してその平均値で示す。含水比というのは水分の表示のために土質試験法でしばしば使用されるもので次式より算出する。

$$\text{含水比(\%)} = \frac{\text{試料}-110^{\circ}\text{Cで乾燥後残った重量}}{\text{試料}} \times 100 \dots\dots\dots(3.11)$$

測定電極を土壌中に打込むに先立ってあらかじめメジャーで電極板(アノードのマグネシウム、カソードの軟鋼)と電極板を取り付けている鋼棒間の絶縁抵抗が無量大であることを確かめてから使用した。

3—3—5 野外実験結果および考察

野外における測定結果は表—3.21に示す通りである。ガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ の値を(3.23)式に代入して鋼材のマイクロ腐食速度 (mm/yr) を推定すると表—3.21に示す値となる。このときの推定値は測定電極を打込んだ土壌中に鋼材片を埋設するとき鋼材片が腐食する速度を事前に推定したものである。

表—3.21 野外における推定結果

No.	比抵抗 $\rho(\Omega\text{-cm})$	ガルバニック電流 $I_K(\mu\text{A})$	ガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	腐食速度 (mm/yr)
1	7,448	500	41.7	0.202
2	7,084	490	40.8	0.186
3	7,497	480	40.0	0.173
4	5,460	460	38.3	0.147
5	4,494	418	34.8	0.104
6	1,393	370	30.8	0.066
7	217	360	30.0	0.060
8	210	330	27.5	0.043
9	199	315	26.3	0.037
10	861	310	25.8	0.034
11	232	290	24.2	0.027
12	280	270	22.5	0.021
13	1,036	250	20.8	0.015

表—3.21からわかるように測定電極で求めたガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ は土壌の調整方法によって異なる。砂はショベルで十分に混合して空気泡が大量に混入されているが、粘土やポゾランは砂に比べて空気泡はほとんど連行されていない状態である。砂中のガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ は水分が飽和していなくて十分に空気泡が混入している場合は $35\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上であるが表—3.9からわかるように含水比が増加するとともにショベルによる攪拌を行なわないときは $30\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下で次第に小さくなる。一方粘土質のものは空気の混入が少いためにガルバニック電流密度 $I_{KD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$ の値はさらに小さく $20\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 台である。したがって鋼材のマイクロ腐食速度を(3.23)式から求めてみると水分が飽和しない砂中では $0.1\text{mm}/\text{yr}$ 以上であり、含水比が増すにつれて $0.1\text{mm}/\text{yr}$ 以下となって行く。表—3.9を参照すれば水分飽和の砂中に埋設したときの鋼材片のマイクロ腐食速度は $0.05\text{mm}/\text{yr}$ 以下となって粘土の値とあまり大差ないようである。粘土の場合は含水比、攪拌の程度によって粘土中に埋設する鋼材片の腐食速度は大体 $0.06\sim 0.02\text{mm}/\text{yr}$ となる。ポゾラン中の鋼材片の腐食速度は粘土中とあまり変わらず $0.02\text{mm}/\text{yr}$ 前後である。

このように鋼材のマイクロ腐食速度は腐食環境の調整によって異なることは、Evans や E. Schasl and G. A. Marsh⁷⁶⁾ が指摘しているように普通の腐食環境 (pHが5～9 でいわゆる中性環境) では腐食環境中の酸素量が鋼材のマイクロ腐食速度を律速するというを参照すれば調整の割合によって腐食環境中に連行される酸素量が異なるために自明のことと考えられる。

次に、N. D. Tomashov & Y. N. Mikhailousky⁴⁹⁾ がガス管路のように比較的表地面から浅く埋設する鋼材のマイクロ腐食速度を推定するために、3-2(2)マイクロ腐食計(2)で推定した値を引用してみると表-3.2の通りである。表-3.2と表-3.21から類似している組成の腐食環境中における鋼材のマイクロ腐食速度を比較してみるとよく近似していることがわかる。

以上のように試作した測定電極によって室内実験で規制した鋼材のマイクロ腐食速度推定方法が野外においても十分行い得ることが確かめられた。しかしながら野外実験での測定電極打込み深度は地表面から-2m 足らずであったのでさらに深く打込んでみる必要がある。このため港湾環境に試作腐食計を適用してみた。これは試作腐食計の実用性に関する実験として行なわれているもので詳細は続報として発表する予定であるのでここでは1, 2の推定例を示すにとどめる。

図-3.57は運輸省第2港湾建設局、京浜港扇島付近の

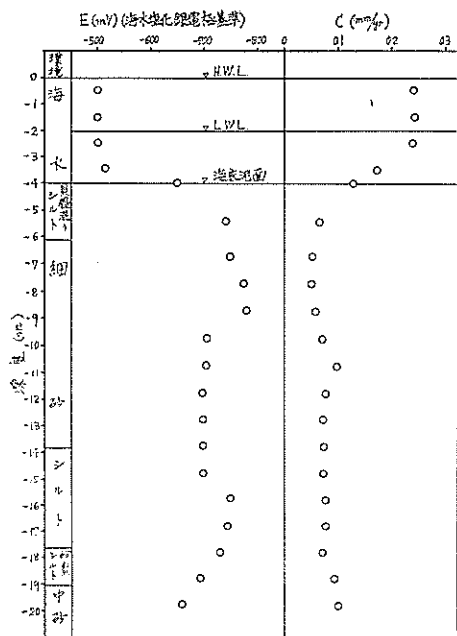


図-3.57 港研式腐食計による測定例(1)

海面に腐食計電極が海底泥面下16mまで打込まれたときの各深度毎のマイクロ腐食速度推定結果の1例である。

また表-3.58は運輸省第5港湾建設局名古屋港稲永第2埠頭物揚場下の海面に腐食計が適用されたときのマイクロ腐食速度推定結果の1例である。

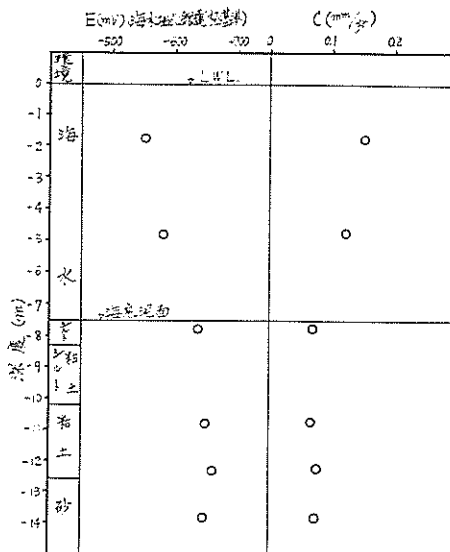


図-3.58 港研式腐食計による測定例(2)

ここで注意すべき図-3.57および図-3.58に示す推定値はいずれもマイクロ腐食速度であるから各推定深度毎に鋼材片を浸漬あるいは埋設したときの腐食速度に相当するものであるということである。したがってこの場所に打込まれる鋼材の腐食速度を知るには次節で述べるマクロ腐食速度推定方法によらねばならない。なお図-3.57図-3.58に示す鋼材電極電位はマクロ腐食速度に必要となるものであるために測定したのであるが参考としてここに示した。

また現地測定は室内実験結果にもとづいて試作された携帯用の港研式腐食計(図-3.59)によった。

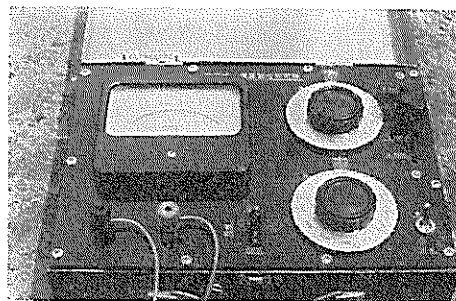


図-3.59 港研式腐食計(本体)

3-4 マクロ腐食速度推定法の開発に関する実験

3-4-1 マクロ腐食

2-1-3で述べたように鋼製構造物の基礎部分の腐食としてはマイクロ腐食よりもむしろマクロ腐食の方がより実地的であると考えられる。したがってまずこれまでの文献に示されているマクロ腐食に触れてみよう。

たとえば B. B. Morton⁷⁷⁾ は潮位間付近における鋼材腐食について図-3.60のように示している。図-3.60の

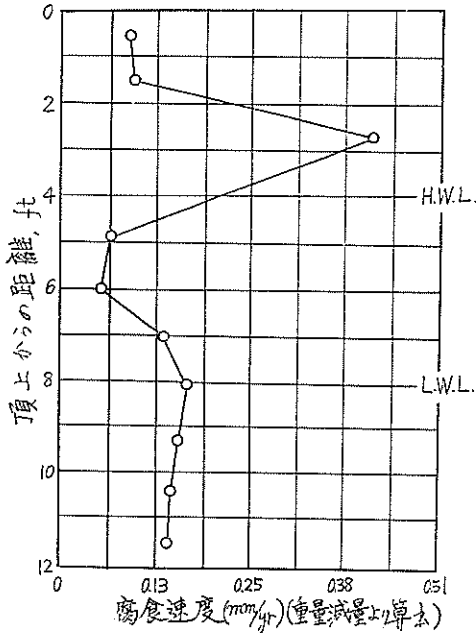


図-3.60 タイダルゾーンにおける鋼材腐食状況 (by B. B. Morton)

ように潮位間(H.W.L. ~L.W.L.間)はL.W.L.以下にくらべて約1/3の腐食速度となっている。このような現象について H. A. Humble⁷⁸⁾ は潮位間の鋼材部分がL.W.L.以下の鋼材部分に対してカソードとなったためであると述べている。また G. V. Akimov⁷⁹⁾ は図-3.61のように水と砂(水分飽和)の2層よりなる腐食環境に鋼材

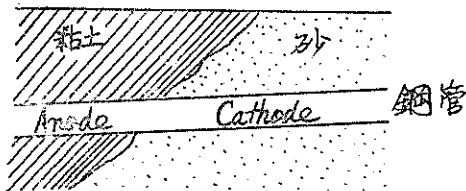


図-3.61 マクロ腐食例

を押し込んだとき砂層中鋼材部分がアノード、水中鋼材部分がカソードとなる通気差電池が発生する。この通気差電池がここでいうマクロ腐食電池である。Akimovはこのとき通気差電池が発生する原因は図-3.62に

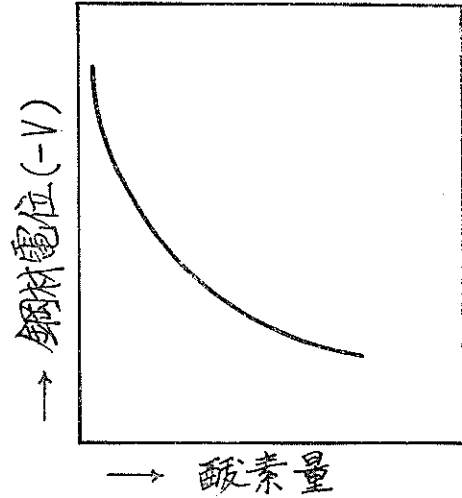


図-3.62 中性容液における酸素量と鋼材電位との関係 (by G. V. Akimov)

示すように中性環境中の鋼材面上では酸素濃度によって電極電位が変化するためであり、これは酸素があるときは鋼材面の保護被膜の安定性が増加することに関係する

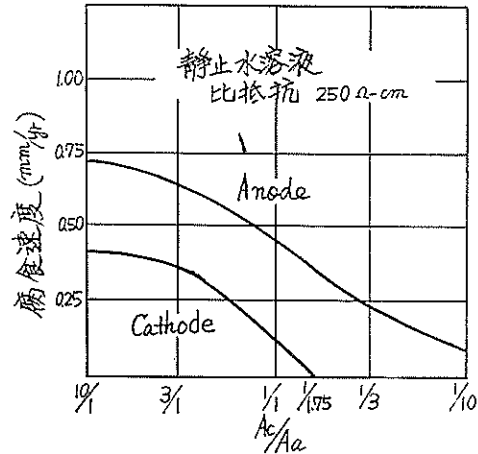


図-3.63 A_c/A_a と腐食速度の関係 (by E. Schashl & G. A. Marsh)

と述べている。そして一般に通気差電池は静止している水中で起りやすいとしており、また図-3.63のように土中でも土質差による通気差電池が発生することを述べて

いる。この点については L. P. Sudrabin⁴⁰⁾ も図—2. 108 のように述べている。

次に 2—2—2 で紹介したこれまでの腐食調査結果からマクロ腐食と見られる例を拾ってみると次の通りである。

(イ) 根室港船入瀬における鋼矢板岸壁(腐食期間21年)腐食調査のとき一部の鋼矢板底部附近がなくなってしまっていた。この地点は砂の移動のはげしいところであるためにこのような鋼矢板底部の消耗現象は砂の移動に伴う機械的摩耗によるものであろうと考えられてきている。しかしながら 2—1—4 で紹介したようにマクロ腐食現象は砂が移動しない場合や砂の代りに粘土やシルトの場合にも発生することや、漂砂のときの機械的摩耗力が鋼材表面研磨のときに使用するサンドブラッシュの摩耗力に比べたら問題にならないほど小さいことなどを考え合わせると鋼矢板底部消失現象はマクロ腐食現象で説明がつくように思われる。

(ロ) 八幡製鉄岸壁に使用した鋼矢板(腐食期間4~30年)の海水中の腐食速度は表—2. 39に示すように零に近い。

(ハ) 表—2. 42に示す腐食調査結果は腐食期間が13~27年の鋼材の海底泥面から泥面下—9.9mの間の肉厚減少量である。ただし腐食前の肉厚を100%とした百分比で示す。このうちとくに San Diego においては海底泥面下—0.9mのところでは17年後の鋼材肉厚が最初の60%となった。鋼杭の最初の肉厚を t mm とすると平均腐食速度は $t \times 0.6$ mm を腐食期間で割った値であるから $t=10$, 15mm とすると腐食速度は次のようになる。

$$t=10\text{mm}, \text{腐食速度}=10\text{mm}/17\text{yr}=0.59\text{mm/yr}$$

$$t=15\text{mm}, \text{腐食速度}=15\text{mm}/17\text{yr}=0.88\text{mm/yr}$$

(ニ) Santa Barbara における鋼杭棧橋をとりこわすことになったので鋼杭(H杭, 腐食期間23.6年)を引抜いて腐食速度を測定した結果が表—2. 45に示してある。同表によれば海水部分の腐食速度はわずか0.03~0.05 mm/yr であった。このためH杭は別の地点で再使用するために転売されたとのことである。腐食が少なかった理由として調査者は施工地点の海水が奇麗であったためであろうと述べているが、このケースもマクロ腐食によるものではないかと考えられる。

(ホ) Mexico 湾に31年間打込まれた鋼杭の腐食調査結果(表—2. 59)によれば海水中の腐食速度は0.025mm/yr, タイダルゾーンの腐食速度は0.048mm/yr である。この場合の腐食傾向はマクロ腐食によるものと思われる。一方ブラッシュゾーンでは0.2mm/yr である。

(ヘ) 土中埋設鋼材の腐食は図—2. 108Aのように Sudrabin によって示されている。この場合地下水位面を境

とするはっきりしたマクロ腐食の発生が予想される。

(ト) 京浜港における電位測定(図—3. 57)によれば海底砂層中鋼材がアノード、海水中鋼材がカソードとなるマクロセルの発生が予想される。

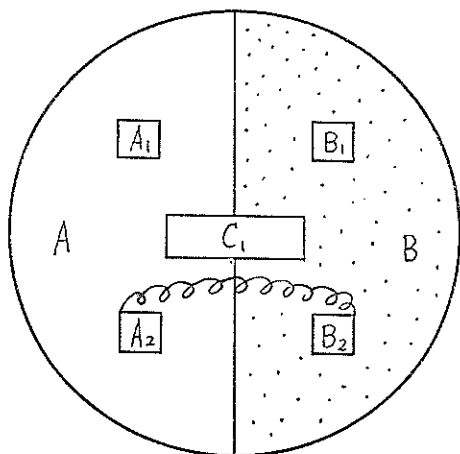
以上のように過去の腐食調査結果からマクロ腐食の見方で説明がつきそうな腐食現象が見受けられるが、これらの調査がマクロ腐食の考えで行なわれたものでないために調査事項が不完全でありさらにくわしく検討を進めることできないのは止むを得ないことである。したがって上の例のようにマイクロ腐食の考えでは説明のつかないケースにおつかったときにはこれまで異常な腐食の原因としてたとえば漂砂による機械的摩耗, pH, バクテリアの存在, 電気伝導性, 含有イオン量などが指摘されてきた。

これに対して E. Schashl & G. A. Marsh²⁶⁾ がマクロ腐食について定量的な検討を行なった。(これは定量的な検討は水について行ないこの結果から土壌の場合を類推している。一方定性的な検討は砂と水からなる2層について行っておりマクロ腐食は長電池作用と表現されている。)

E. Schashl & G. A. Marsh の報文の要旨はマクロ腐食の定量化は全く行なわれていなかったこと、pH が5~9の範囲の一般中性環境では鋼材腐食速度は溶存酸素量に支配されること、マクロ腐食現象に気づかずにマイクロ腐食の考えで腐食調査にあたったためにマイクロ腐食の考えでは説明がつかない調査結果に対していろいろ苦しい説明を編みだしたこと(たとえばいまAという単一土壌中に鋼材片を埋設したときに発生するマイクロ腐食速度を C_A mm/yr とする。 C_A が非常に小さいときにはこれまでの腐食調査法から判定すれば土壌の鋼材腐食性は不活性ということになる。しかし現地条件下ではA単一層ということはほとんど存在せず互層として存在する。いまA土壌に接する土壌をB, B層中のマイクロ腐食速度が C_B で $C_B \gg C_A$ と仮定する。そうすれば従来の調査方法によれば土壌Bの鋼材腐食性は活性ということになる。したがってA, B両層を貫いて長尺鋼材が埋設されるときこの長尺鋼材の腐食による危険カ所はB土壌中と考えられていた。しかしながら腐食調査の結果、マイクロ腐食の考えにもとづく予想と異なって長尺鋼材の危険カ所はA土壌中の鋼材部分であることがわかって調査者達はこの現象に対するいろいろな説明を考えた。たとえば土壌Aを分析したところバクテリアの存在が認められるとマイクロ腐食速度の小さい土壌A中の鋼材部分が激しく腐食したのはこのバクテリアの作用によるものであるとした)、マクロ腐食のカソード、アノードの腐食量は静止水溶液中では図—3. 63のようになることなどである。

以上のように現地におけるマクロ腐食の傾向や定量的な検討があるがまだマクロ腐食速度推定方法ならびにマクロ腐食計については検討されていない。E. Schasl & G. A. Marsh の報文は参考文献のところで示すように1963年11月に Corrosion 誌に発表されているが以下に述べて行くマクロ腐食速度推定法の開発に関する検討の一部は1963年10月に発表されている。⁷⁹⁾⁸⁰⁾またマクロ腐食の検討に進む足掛りとなったミクロ腐食速度推定法に関する結果の一部も発表されている。⁸¹⁾⁸²⁾一方マクロ腐食の見方で行なった鋼材防食法に関する結果⁸³⁾⁸⁴⁾もある。以下マクロ腐食速度の推定について述べて行くのであるが港湾におけるマクロ腐食現象をはっきりさせるために次のような実験を行なった。

図—3. 64に示すように同一ガラス容器(直径50cm, 深さ40cm)内にA(海水を含む粘土), B(海水を含む砂)2種の環境を填め, その中に研磨鋼材片A, B, C, を埋めたところA, B, はミクロ腐食計実験の結果と一致してA₁よりもB₁の方が激しく腐食された。



図—3. 64 鋼材片埋設状況

一方, C₁ではB₁に該当する環境B中の部分にはほとんど腐食は見られずにA₁に該当する環境A中の部分だけが激しい腐食を受けた。

次にC₁を2片に分けてA₂, B₂とし, これを電線でつないで図—3. 64のようにA, B両層にまたがって埋設した。この結果C₁と同じくA層中のA₂が激しく腐食し, B層中のB₂はほとんど腐食しないことがわかった。腐食の状況は図—3. 65の通りである。

図—3. 65の上2片が左からA₁, B₁, 中央の一枚がC₁であり, 下2片が左からA₂, B₂である。A₁は黒く見えるが光線の具合でそう見えるのであって始めの研磨面が保たれている。B₁は白っぽく見えているが鉄がFe⁺⁺と

して溶出したために地肌が表われていることを示している。C₁はA, B両層の境界線の左と右とはっきりと色が異なっており, 左半分すなわちA層中に埋設された部分はFe⁺⁺が溶出したことを示しているが, 右半分すなわちB層中に埋設された部分は最初の研磨面のままである。A₂はC₁のA層中の鋼材と同じく溶出しておりB₂はC₁のB層中の鋼材に等しく研磨面のままである。

図—3. 65からわかるようにA₂, B₂には片隅に小さな穴(φ1mm)が1つつづあけてあるが, この穴の中に電線の一端をそれぞれ被覆をはいで裸電線として通してよじり裸電線と穴の部分は測定電極の試作のところで用いた有機合成樹脂(リゴラック樹脂, 注型用)で完全に被覆・絶縁する。こうして電線で連結したA₂, B₂をAはA層, B₂ B層にそれぞれ埋設してやるとA₂, B₂両片は丁度A, B両層にまたがって埋設されている(現地における鋼杭のように)C₁がA, B両層の境界線から2分されたことに相当する。C₁では, A, B両層間にまたがって発生するマクロ・セルによる腐食すなわちマクロ腐食に関する測定としてはC₁のA, B各層中の肉厚減少測定しかできないし, 肉厚減少測定も長期間を要する。しかしA₂, B₂の形にしてやればA₂, B₂間の電流, すなわちマクロ腐食電流が直接測定できる外に, A₂, B₂の短絡時, 開路時の電位, A₂, B₂間の抵抗, A₂, B₂を回収して重量減少からA₂, B₂の腐食速度など測定できるためにマクロ腐食の機構を検討して行くには好ましい恰好である。このようなテストピースの作成およびテストピースを使っての腐食実験はまだ例がないように思えるのでここに紹介してその有利さを述べておくとともに, 以下のマクロ腐食速度推定に関する一連の実験ではひんばんに用いたので少し触れておく。

またA, B両層を図—3. 64のように接する場合, 次のような要領で調整した。ガラス容器の中央に仕切り板を立てるとともに2分された容器の一方の底部を4~5cm上げ底とする。このように上げ底とした片半分の側面, 底部に濾紙をしきこの中にスラリー状の粘土を流し込んでしばらく放置する。放置するにつれて濾紙を通してスラリー状の粘土中の水分が逃げて行き, 仕切り板をはずしても粘土が倒れない程度の固さになる。こうなると仕切り板をはずして仕切り板に接していたところの濾紙を取り除き, 空いている片方に適当に調整した砂を詰める。こうしてできたのが図—3. 64に示すA, B両層より成る環境である。ただしA, Bのうち一方が液体(たとえば海水)であるときは容器の下半分ほど泥層を詰め, その上から液体を注いで容器を満水した。

次にA, B 両層の種類をいろいろ変えてそれぞれA₁,

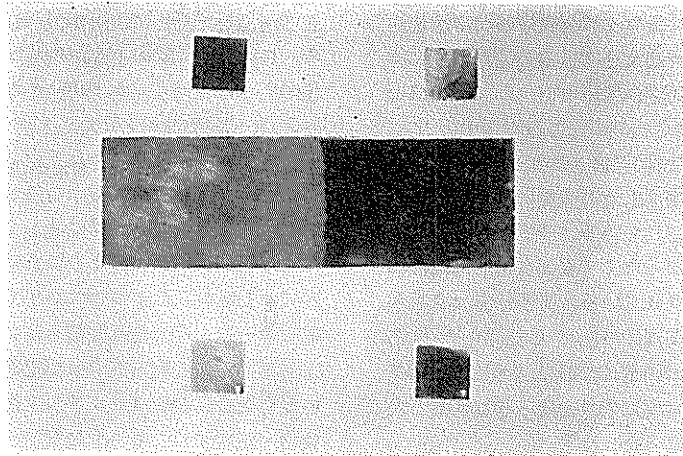


図-3.65 ミクロ腐食とマクロ腐食の関係

表-3.22 腐食環境が2層の場合の腐食速度

No.	埋設方法	ア ノ ー ド (A)				カ ソ ー ド (B)			
		腐食環境	減量 (gr)	表面積 (cm ²)	腐食速度 (mm/yr)	腐食環境	減量 (gr)	表面積 (cm ²)	腐食速度 (mm/yr)
1	短絡 単独	砂, 3% NaCl 溶液	0.0734	32.97	0.069	3%NaCl溶液 (静止)	0	33.81	0
			0.0076	33.14	0.007		0.1254	33.14	0.117
2	短絡	粘土, 3%NaCl溶液	0.1271	66.12	0.060	砂, 3%NaCl溶液	0.0627	65.89	0.030
			0.0723	32.94	0.068		0.0392	32.81	0.037
			0.0196	8.61	0.070		0.0272	8.57	0.037
	単独		0.0445	66.34	0.021		0.3357	66.34	0.157
0.0060		8.74	0.021	0.0592	8.74	0.200			
3	短絡	粘土, 3%NaCl溶液	0.4741	66.10	0.222	砂, 3%NaCl溶液	0.0661	66.10	0.031
			0.2434	32.89	0.229		0.0347	32.85	0.033
			0.0543	8.53	0.142		0.0052	8.63	0.014
	単独		0.1262	66.34	0.059		0.4658	66.34	0.217
			0.0210	33.14	0.020		0.2879	33.14	0.269
			0.0039	8.74	0.014		0.0859	8.74	0.304
4	短絡	粘土, 水道水	0.2995	66.08	0.140	砂, 水道水	0.1017	66.11	0.048
			0.1621	32.83	0.153		0.0553	32.90	0.052
			0.0485	8.29	0.181		0.0107	8.58	0.039
	単独		0.1500	66.34	0.070		0.3232	66.34	0.151
			0.0278	33.20	0.026		0.1728	33.20	0.161
			0.0117	8.74	0.030		0.0807	8.74	0.207

B₁, A₂, B₂を上上の要領で埋設し、埋設前後の重量変化からA₁, B₁, A₂, B₂の腐食速度を算出した。

A, B両層の種類および測定結果は表—3. 22に示す通りである。

A, Bの表面積は表—3. 22に示してあるように大体66cm², 32cm², 8cm²の3通りあるが、4cm×8cm, 4cm×4cm, 2cm×2cmの寸法の鋼板を使用した。埋設は同一寸法のAとB(たとえば66cm²のAとB)を電線で連結して行なったので、何れの場合もAとBの表面積比は1:1である。表—3. 22によればA₁, B₁の腐食速度(すなわちA層中のマイクロ腐食速度とB層中のマイクロ腐食速度)とA₂, B₂の腐食速度(すなわちA, B両層腐にまたがるマクロ・セルのアノードの腐食速度とカソードの腐食速度)とは相反することがわかる。ただし腐食環境 No.1 の場合のみはこの関係があまり顕著ではないが、これはB層にあたる海水が静止していたためにA層とB層との環境の差(とくに酸素拡散速度の差)がかなり縮まったためと解釈される。何故ならば静止海水を流動させてやるか、流動の代りに酸素の供給を過酸化水素で肩代りしても同じくA₁, B₁の腐食速度とA₂, B₂の腐食速度との逆関係は顕著となる事実が確かめられた。このように水と泥層2層のとき水が静止しているときよりも流動しているときの方がマクロ腐食の発生は有利と見られるが G. V. AKimov は通気差電池は水が静止のとき有利といっているのは実状にそぐはないようである。

B層が静止水溶液のときよりも攪拌または過酸化水素水を添加したときの方がマイクロ腐食とマクロ腐食の関係がはっきりとするのは、水溶液が海水であるときに限らず水道水のときでも同じである。

以上のようにB₁のマイクロ腐食速度がA₁のマイクロ腐食速度よりも大きい(たとえばB₁が砂層中の鋼材片, A₁が粘土層中の鋼材片と考えると理解が容易になろう)とき、A₁, B₁を電線で連結した形のA₂, B₂ではA₂の腐食速度の方がB₂の腐食速度よりも大きくなるというマクロ腐食の発生するということがはっきりした。このようなマクロ腐食発生の因は図—3. 62に示す環境差にもとづく電位差であるが港湾環境について測定した値の1, 2例を示してみる。鋼材の電位は海水中、海水飽和泥層中では表—3. 23, 3. 24のような値であるが時間の経過とともに次第に卑となって行く。いま鋼材を海水と海水飽和泥層の2層を貫いて埋設するとき鋼材表面が研摩状態であっても発錆状態であっても泥層中鋼材部分の電位が海水中鋼材部分の電位にくらべて30~100mV程度卑となることが予想される。この傾向は図—3. 57からもわ

かるように実際の港湾条件下でも見られる。また L. P. Sudrabin も地表面下—24m付近の攪乱されないところの鋼材電位として—780mV(飽和甘汞電極基準)を示している。地表面下の電位は京浜港および名古屋港におけ

表—3. 23 海水中鋼材電位変化
(海水塩化銀電極基準)

研 摩 鋼 材			発 錆 鋼 材	
浸漬時間 (min)	浸漬時間 (hr)	電 位 (—mV)	浸漬時間 (min)	電 位 (—mV)
0		390	0	200
1		415	1	230
2		418	6	300
3		418	10	360
4		410	15	390
5		410	20	415
10		414	25	420
15		422	30	422
20		430	60	450
25		438	90	470
30		444	120	483
60		485	157	495
120		508	180	500
180		530	210	518
	74	630	1,530	600
	148	640	2,970	620
	172	653	2,850	650
	197	640	7,290	654
			10,170	670
			30,330	670

る測定によっても地下水面上は—500mV(海水塩化銀電極基準)台、地下水 面下は—700mV(海水塩化銀電極基準)台であった。

港湾をはじめ野外環境では実験室内で調整したような単一層のみで存在することはまず考えられずほとんど複合層より成る。たとえば港湾の場合を例にとると海側では海水(H. W. L以下)、海水飽和泥層、陸側では水分飽和泥層(地表面から地下水 面まで)、水分飽和泥層などの複合層より成っている。したがって野外環境に埋設される鋼材の腐食についてはマクロ腐食とマイクロ腐食の発生関係をはっきりすべきであることがわかる。このような異種環境間に発生する腐食電池を通気差電池、長電池などと呼んでいるが本報ではマクロセル(macro-cell), またマクロセルによる腐食をマクロ腐食(macro-corrosion)と呼ぶことにする。一方単一層中の腐食は一般に全面腐食(general corrosion)といわれるが本

表—3.24 海水飽和泥層中鋼材の電位変化
(海水塩化銀電極基準)

研 摩 鋼 材			発 錆 鋼 材			
浸漬時間		電 位 (-mV)	浸漬時間		電 位 (-mV)	電 位 (-mV)
min	hr		min	hr		
0		430	0		570	560
1		495	60		600	585
2		515	120		610	600
3		554	180		620	615
4		575	80		620	615
5		592	240		622	620
10		620		300	628	622
15		635		27	660	676
20		650		50	672	690
25		655		79	683	703
30		660		98	690	700
60		700		122	692	706
120		720				
180		725				
	74	735				
	148	740				
	172	740				
	197	740				

報ではマクロ腐食に対比させるためにマイクロ腐食 (micro-corrosion) と統一した。

腐食反応は常に鋼材表面上の相対的に単の電位の部分がアノードとして鉄が溶出する。マイクロ腐食はアノード、カソード部が絶えず動いて一見全面腐食となる現象を示すがマクロ腐食ではほとんど環境差によってカソード、アノード部が決まるために腐食はアノードとなる環境中鋼材に集中する。ガス管、水道管のような輸送管やタンクのように貯蔵を目的とする鋼材に対しては孔食 (pitting corrosion) がもっとも危険であるが、鋼製構造物の基礎鋼材にとってはむしろマクロ腐食のように断面積を急減さず侵食が一番危険である。

3-4-2 マクロ腐食速度推定に関する半理論的考察

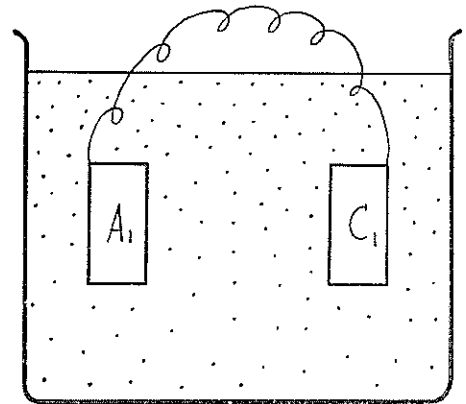
マクロ腐食は港湾における鋼製構造物に限らず全般の

鋼製構造物にとって好ましくないものであり、その発生の概要が以上の実験によって明らかとなった。これをさらに一歩進めて定量的な検討を加えてマクロ腐食速度を推定できるようにすることが、鋼製構造物の腐食対策、防食対策を立てるためには是非必要である。しかしながらマクロ腐食速度の推定はこれまでは全く検討されていない分野である。

一方、前節の実験研究によってこれも未解決であった港湾環境における鋼材のマイクロ腐食速度推定法ならびにマイクロ腐食計を開発したが、上述の通りマクロ腐食もマイクロ腐食と同じく電気化学的な原因で発生するので、マクロ腐食速度の推定法に関する研究を進展するに当たってまずその緒端を開く意味でマイクロ腐食速度推定法の開発で得た技術と資料にもとづいて次のようにマクロ腐食速度推定に関する半理論的考察を行なった。

(1) カソード分極係数

考察を進めて行く便宜上図—3.66に示す腐食機構図を考えてみる。



図—3.66 腐食機構説明図

いま図—3.66のようにガラス容器中に電解質 (実際には土壌、または海水) を詰め、この電解質中に鋼材片 A₁, C₁ を電線でつないでから埋設し A₁ がアノード、C₁ がカソードとなったとする。

A₁, C₁間に流れる電流 I は (3.32) 式で示される。

$$I = \Delta E / \Sigma R = \Delta E / (R_a + R_c + R_e + R_d) \dots\dots\dots (3.32)$$

$R_a = r_a / A_a$, $R_c = r_c / A_c$ で表わせるから (3.32) 式は (3.33) 式となる。

$$I = \Delta E / (r_a / A_a + r_c / A_c + R_e + R_d) \dots\dots\dots (3.33)$$

先に開発したマイクロ腐食計 (港研式マイクロ腐食計) では

A₁: マグネシウム

C_1 : 鋼材
 $Re+Rd=2,000\Omega$
 $Aa=Ac=12\text{cm}^2$
 $ic=I_{KD}\times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$
 $\Delta E=1.2\text{V}$

であるから、この条件を (3.33) 式に代入すると (3.34) 式となる。

$$12 \times (I_{KD} \times 10^{-6}) = 1.2 / (r_a/12 + r_c/12 + 2,000) \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

マイクロ腐食計の実験では鋼材片を埋設する腐食環境に腐食計の測定電極を挿入して測定電極のマグネシウム (アノード) と軟鋼 (カソード) 間に流れるガルバニック電流密度 I_{KD} を測定する。この I_{KD} を (3.23) 式に代入することによって鋼材片のマイクロ腐食速度が推定できた。

この事実と 3-3-1 実験の概要のところでも述べた仮定 (すなわち、港湾環境における鋼材の分極特性はカソード支配である) とを考え合わせると鋼材のマイクロ腐食速度を支配するものは r_c と考えてよさそうである。したがって $r_c \gg r_a$ とおくと (3.34) 式は (3.35) 式となる。

$$r_c = [1.2 - 12 \times 2,000 (I_{KD} \times 10^{-6})] / (I_{KD} \times 10^{-6}) \quad (\Omega\text{-cm}^2) \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

計算を便利にするために (3.35) 式に 10^{-4} を掛けてやると (3.36) 式となる。

$$r_c = [1.2 - 12 \times 2,000 (I_{KD} \times 10^{-6})] / (I_{KD} \times 10^{-2}) \quad (\Omega\text{-m}^2) \quad \dots\dots\dots (3.36)$$

(3.36)式から求められるカソード分極係数 r_c はマイクロ腐食計測定電極のカソード (鋼材) 面についての値であるが、(3.36) 式による r_c はマイクロ腐食速度を推定しようとする鋼材面で発生するマイクロ・セルのカソード部分の r_c と全く同じであると仮定する。この仮定にもとづいてマイクロ腐食計に関する実験結果 (表-3.9) を次のように解析した。表-3.9に示されているガルバニック電流密度 I_{KD} を (3.36) 式に代入して r_c ($\Omega\text{-m}^2$) を算出すると表-3.25に示す通りの値を得た。

表-3.25よりカソード分極係数 r_c ($\Omega\text{-m}^2$) とマイクロ腐食速度 C (mm/yr) との関係の求めると (3.37) 式となる。

$$C = 0.327 e^{-1.0207r_c} \quad \dots\dots\dots (3.37)$$

(3.37) 式からわかる通りこの場合の開路電位差 ΔE は 1.20 (V) である。しかし $\Delta E=1.20$ (V) はあまり確実とはいえないので $\Delta E=1.15$ (V) および $\Delta E=1.25$ (V) とした場合の r_c と C との関係の求めてみる。ただし $\Delta E=1.20$ (V) でなければ (3.26) 式はそのまま使え

表-3.25 ミクロ腐食計よりの算出値

No.	I_{KD} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	r_c ($\Omega\text{-m}^2$)	C (mm/yr)
1	20.8	3.46	0.015
2	21.3	3.24	0.012
3	23.3	2.75	0.022
4	22.1	3.03	0.017
5	21.7	3.13	0.011
6	22.5	2.93	0.022
7	22.5	2.93	0.014
8	25.0	2.40	0.019
9	26.7	2.10	0.032
10	26.3	2.17	0.025
11	27.1	2.03	0.050
12	28.8	1.77	0.070
13	30.0	1.60	0.067
14	30.8	1.49	0.082
15	33.3	1.20	0.084
16	32.5	1.29	0.119
17	32.5	1.29	0.098
18	30.8	1.49	0.063
19	32.1	1.34	0.078
20	32.3	1.30	0.083
21	33.3	1.20	0.063
22	34.2	1.11	0.100
23	35.0	1.03	0.116
24	34.6	1.07	0.078
25	35.4	0.99	0.085
26	36.3	0.91	0.121
27	38.3	0.73	0.136
28	41.7	0.48	0.369
29	50.0	0	0.457

ないのでそれぞれ修正して、 $\Delta E=1.15$ (V) のときは (3.38) 式より、 $\Delta E=1.25$ (V) のときは (3.39) 式より r_c を算出した。

$$r_c = [1.15 - 12 \times 2,000 (I_{KD} \times 10^{-6})] / (I_{KD} \times 10^{-2}) \quad (\Omega\text{-m}^2) \quad \dots\dots\dots (3.38)$$

$$r_c = [1.25 - 12 \times 2,000(I_{KD} \times 10^{-6})] / (I_{KD} \times 10^{-2})$$

$$(\Omega - m^2) \dots \dots \dots (3.39)$$

(3.38), (3.39) 式から算出した r_c を表-3.26 に示す。

表-3.26 (3.38), (3.39) 式による r_c

No.	I_{KD} ($\mu A/cm^2$)	r_c^* ($\Omega - m^2$)	r_c^{**} ($\Omega - m^2$)	C (mm/yr)
1	20.8	3.22	3.70	0.015
2	21.3	3.00	3.47	0.012
	23.3	2.53	2.96	0.022
4	22.1	2.81	3.26	0.017
5	21.7	2.90	3.36	0.011
6	22.5	2.71	3.16	0.022
7	22.5	2.71	3.16	0.014
8	25.0	2.20	2.60	0.019
9	26.7	1.91	2.28	0.032
10	26.3	1.98	2.36	0.025
11	27.1	1.85	2.21	0.050
12	28.8	1.60	1.94	0.070
13	30.0	1.43	1.77	0.067
14	30.8	1.33	1.66	0.082
15	33.3	1.05	1.35	0.084
16	32.5	1.14	1.45	0.119
17	32.5	1.14	1.45	0.098
18	30.8	1.33	1.66	0.063
19	32.1	1.18	1.50	0.078
20	32.3	1.15	1.46	0.083
21	33.3	1.05	1.35	0.063
22	34.2	0.96	1.26	0.100
23	35.0	0.89	1.17	0.116
24	34.6	0.92	1.21	0.078
25	35.4	0.85	1.13	0.085
26	36.3	0.77	1.05	0.121
27	38.3	0.60	0.86	0.136
28	41.7	0.36	0.60	0.369
29	50.0	—	0.10	0.457

* (3.36) 式による値

** (3.37) 式による値

表-3.28にもとづいて r_c と C との関係を検討すると、 $\Delta E = 1.15$ (V) のときは (3.40) 式で表わせる。

$$C = 0.286 e^{-1.062 r_c} \dots \dots \dots (3.40)$$

また $\Delta E = 1.257$ (V) のときは (3.41) 式となる。

$$C = 0.358 e^{-0.976 r_c} \dots \dots \dots (3.41)$$

(3.37), (3.40), (3.41) の3式からわかるように $\Delta E = 1.15$ (V), 1.20 (V), 1.25 (V) のときどれも次のような一般式で示される。

$$C = k_1 \cdot e^{-k_2 r_c} \dots \dots \dots (3.42)$$

ただし k_1, k_2 は定数

$\Delta E, k_1, k_2$ を整理してみると次のようになる。

ΔE (V)	k_1	k_2
1.15	0.286	-1.052
1.20	0.327	-1.020
1.25	0.358	-0.976

この関係から $\Delta E = 1.20$ (V) とすると r_c と C との関係は、 k_1, k_2 より (3.43) 式が正しいように考えられる。

$$C = 0.342 \cdot e^{-r_c} \dots \dots \dots (3.43)$$

しかし厳密には $\Delta E = 1.20$ (V) ではないので $\Delta E, k_2$ の関係から ΔE を算出してみると $\Delta E = 1.223$ (V) となる。

したがってカソード分極係数 r_c を求める (3.36) 式は修正されて (3.44) 式となる。

$$r_c = [1.223 - 12 \times 2,000(I_{KD} \times 10^{-6})] / (I_{KD} \times 10^{-2})$$

$$(\Omega - m^2) \dots \dots \dots (3.44)$$

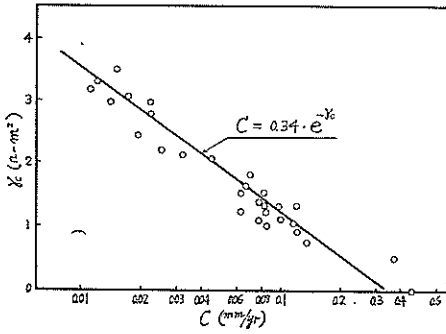
マイクロ腐食計による測定値 (表-3.9) を (3.43) 式に代入して r_c を算出すると表-3.27 のようになる。

表-3.27 (3.43) 式による r_c

No.	I_{KD} ($\mu A/cm^2$)	r_c ($\Omega - m^2$)	No.	I_{KD} ($\mu A/cm^2$)	r_c ($\Omega - m^2$)
1	20.8	3.48	16	32.5	1.36
2	21.3	3.34	17	32.5	1.36
3	23.3	2.85	18	30.8	1.57
4	22.1	3.14	19	32.1	1.41
5	21.7	3.24	20	32.3	1.39
6	22.5	3.04	21	33.3	1.27
7	22.5	3.04	22	34.2	1.18
8	25.0	2.49	23	35.0	1.09
9	26.7	2.18	24	34.6	1.14
10	26.3	2.25	25	35.4	1.05
11	27.1	2.11	26	36.3	0.97
12	28.8	1.85	27	38.3	0.79
13	30.0	1.68	28	41.7	0.53
14	30.8	1.57	29	50.0	0.05
15	33.3	1.27			

表-3.27の r_c と C との関係を求めると図-3.67の通りになる。

このように腐食環境に鋼材片を埋設したときのマイクロ腐食速度 C (mm/yr) と、同じ環境内に挿入したマイクロ腐食計の測定電極から求めたカソード分極係数 r_c ($\Omega - m^2$) との間には (3.45) 式の関係があることがわかった。マイクロ・セルは単一層に埋設した鋼材面上に発生す



図—3.67 $r_c \sim C$ の関係

るがアノード、カソード間の距離があまりにも微小であるとともに両部分が混在するために、アノード、カソードをそれぞれとり出してマイクロ・セルの反応機構を直接に検討することは不可能である。したがって上の実験から導いた (3.43) 式の関係を足掛かりとしてマイクロ・セルの機構を類推してみる。

マイクロ腐食計の測定電極、すなわち模型電池に対しては次の仮定をしてきた。

(1) 模型電池の港湾環境中における分極特性はカソード支配であるとみなして $r_c \gg r_a$ と仮定する。

(2) 模型電池の開路電位差は一定と仮定する。

さらに模型電池とマイクロ・セルとを関連づけるものとして

(3) 模型電池のカソード分極係数 r_c はマイクロ・セルの分極係数 r_c と同じであると仮定する。

これらの仮定にもとづく以上の検討によって(3.43)式が成立することから、港湾環境におけるマイクロ・セルはカソード支配であり、またマイクロ・セルの開路電位 ΔE は一定であるという仮説は実用上ほぼ正しいと考えても差支えなさそうである。

したがって港研式マイクロ腐食計は各環境におけるカソード分極の大きさを数値として簡単な操作で求め得る計測器であるともいえる。

次に図—3.66の A_1 , C_1 が次第に小さくなり段々と接近した場合の極限がマイクロ腐食と考えると、このときの $Re + Rd$ は無限に小さな値となるので (3.33) 式は (3.45) 式となる。

$$I = \Delta E / (r_a / A_a + r_c / A_c) \dots\dots\dots(3.45)$$

マイクロ・セルの A_a , A_c は極めて小さくなり、 ΔE は鋼材面上の同じ電解質中のアノードとカソードの電位差で前述の仮説から一定と見られまた r_c は模型電池のときもマイクロセルのときも同じと考えられるので (3.45)

式は (3.46) 式となる。

$$I = \Delta E / (r_a + r_c) \dots\dots\dots(3.46)$$

先に仮定した $r_c \gg r_a$ より (3.46) 式は (3.47) 式となる。

$$I = \Delta E / r_c \dots\dots\dots(3.47)$$

(3.47) 式は (3.48) 式に変形される。

$$\Delta E = I \times r_c \dots\dots\dots(3.48)$$

仮説によれば ΔE は一定であるので (3.48) 式の関係をマイクロ腐食計の実験値 (表—3.9) について検討してみる。このときファラデーの法則によれば 1 cm^2 当りの 1 mm/yr は $86 \mu\text{A/cm}^2/\text{yr}$ に相当するので (3.48) 式の代わりに (3.49) 式を検討することにした。

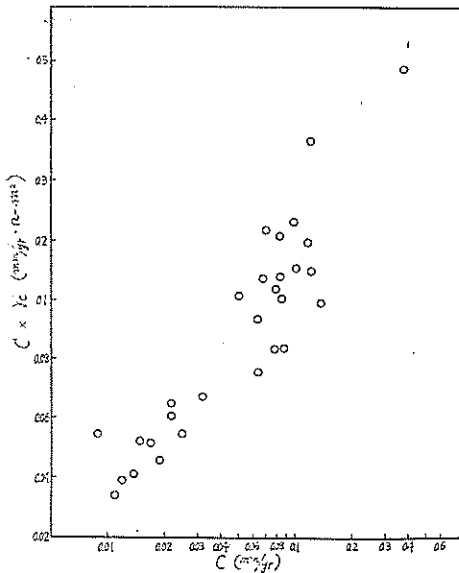
$$\Delta E = C \times r_c \dots\dots\dots(3.49)$$

表—3.9から算出した $C \times r_c$ の値を表—3.28に示す。

表—3.28 $C \times r_c$ 算出値

No	C (mm/yr)	r_c ($\Omega\text{-m}^2$)	$C \times r_c$ (mm/yr)-($\Omega\text{-m}^2$)
1	0.015	3.46	5.19×10^{-2}
2	0.012	3.24	3.89×10^{-2}
3	0.022	2.75	6.05×10^{-2}
4	0.017	3.03	5.15×10^{-2}
5	0.011	3.13	3.44×10^{-2}
6	0.022	2.93	6.45×10^{-2}
7	0.014	2.93	4.10×10^{-2}
8	0.019	2.40	4.56×10^{-2}
9	0.032	2.10	6.72×10^{-2}
10	0.025	2.17	5.43×10^{-2}
11	0.050	2.03	10.15×10^{-2}
12	0.070	1.77	12.39×10^{-2}
13	0.067	1.60	10.72×10^{-2}
14	0.082	1.49	12.22×10^{-2}
15	0.084	1.20	10.08×10^{-2}
16	0.119	1.29	15.35×10^{-2}
17	0.098	1.29	12.64×10^{-2}
18	0.063	1.49	9.39×10^{-2}
19	0.078	1.34	10.45×10^{-2}
20	0.083	1.30	10.79×10^{-2}
21	0.063	1.20	7.56×10^{-2}
22	0.100	1.11	11.10×10^{-2}
23	0.116	1.03	11.95×10^{-2}
24	0.078	1.07	8.35×10^{-2}
25	0.085	0.99	8.42×10^{-2}
26	0.121	0.91	11.01×10^{-2}
27	0.136	0.73	9.93×10^{-2}
28	0.369	0.48	17.71×10^{-2}
29	0.457	0	0

$C \times r_c$ = 一定の関係を—そう明らかにするために C と $C \times r_c$ との関係を表—3. 28にもとづいて図示すると、図—3. 68のようになって $C \times r_c$ は一定とはならない。



図—3. 68 $C \times r_c \sim C$ の関係

この理由として考えられることは上の検討でとり扱ってきたカソード分極係数 r_c はカソードとアノードの表面積比が1（すなわち、港研式マイクロ腐食計の電極表面積比は1である）のときの r_c であるが、実際に鋼材面に発生するマイクロ・セルのカソードとアノードの表面積比は1であるとは限らないということである。

したがって腐食電池のカソード、アノード表面積比と腐食速度との関係を以下検討して行く。

(2) 表面積比と腐食速度との関係

腐食電池のカソード、アノード表面積比 A_c/A_a と腐食速度との関係を確かめるために、まず2層より成る腐食環境について次の実験を行なった。

実験1 砂と粘土の2層の場合(1)

表—3. 29に示す形状、寸法の鋼材片 A_2 、 B_2 をA、B層に埋設する。このとき A_2 、 B_2 は図—3. 66に示す要領で A_2 はA層に B_2 はB層に埋設されて A_2 、 B_2 は電線で連結されている。 A_2 、 B_2 の表面積がそれぞれ異なるため A_2 、 B_2 の表面積比 A_c/A_a は表—3. 29に示す通りに1をはさんで適当に変化している。

表—3. 29 テストピース形状寸法およびカソード、アノード表面積比

No.	Anode (A_2) (cm)	Cathode (B_2) (cm)	Surface area ratio A_c/A_a
1 } 8	4.5×7 ×0.2	2 ×3 ×0.2	0.2
	4.5×7 ×0.2	4.5×7 ×0.2	1
	2 ×3 ×0.2	4.5×7 ×0.2	5
9 } 16	4 ×8 ×0.1	2 ×2 ×0.1	0.125
	4 ×4 ×0.1	2 ×2 ×0.1	0.25
	2 ×2 ×0.1	4 ×2 ×0.1	1
	2 ×2 ×0.1	4 ×4 ×0.1	4
17 } 18	4 ×8 ×0.1	2 ×2 ×0.1	0.125
	4 ×4 ×0.1	2 ×2 ×0.1	0.25
	2 ×4 ×0.1	2 ×2 ×0.1	0.5
	2 ×3 ×0.1	2 ×2 ×0.1	0.67
	2 ×2 ×0.1	2 ×2 ×0.1	1
19	2 ×2 ×0.1	2 ×3 ×0.1	1.5
	2 ×2 ×0.1	2 ×4 ×0.1	2
	2 ×2 ×0.1	4 ×4 ×0.1	4
	2 ×2 ×0.1	4 ×8 ×0.1	8
	4 ×8 ×0.1	1 ×1 ×0.1	0.03
	4 ×5 ×0.1	1 ×1 ×0.1	0.05
	2.5×4 ×0.1	1 ×1 ×0.1	0.1
	2 ×3 ×0.1	1 ×1 ×0.1	0.17
	2 ×2 ×0.1	1 ×1 ×0.1	0.25
	1 ×2 ×0.1	1 ×1 ×0.1	0.5
20 } 21	1 ×1 ×0.1	1 ×1 ×0.1	1
	1 ×1 ×0.1	1 ×2 ×0.1	2
	1 ×1 ×0.1	2 ×2 ×0.1	4
	1 ×1 ×0.1	2 ×3 ×0.1	6
	1 ×1 ×0.1	2.5×4 ×0.1	10
	1 ×1 ×0.1	4 ×5 ×0.1	20
	1 ×1 ×0.1	4 ×8 ×0.1	32
	4 ×8 ×0.1	1 ×1 ×0.1	0.03
	4 ×5	1 ×1 ×0.1	0.05
	4 ×2.5	1 ×1 ×0.1	0.1
2 ×3	1 ×1 ×0.1	0.17	
2 ×2	1 ×1 ×0.1	0.25	
1 ×2	1 ×1 ×0.1	0.5	
1 ×1.5	1 ×1 ×0.1	0.67	
1 ×1 ×0.1	1 ×1 ×0.1	1	
1 ×1 ×0.1	1 ×1.5×0.1	1.5	

表—3.29 (続)

No.	Anode (A ²) (cm)	Cathode (B ²) (cm)	Surface area ratio, Ac/Aa
20	1 × 1 × 0.1	1 × 2 × 0.1	2
	1 × 1 × 0.1	2 × 2 × 0.1	4
	1 × 1 × 0.1	2 × 3 × 0.1	6
	1 × 1 × 0.1	4 × 2.5 × 0.1	10
21	1 × 1 × 0.1	4 × 5 × 0.1	20
	1 × 1 × 0.1	4 × 8 × 0.1	32

A, B の環境は表—3.30に示すように21通りである。

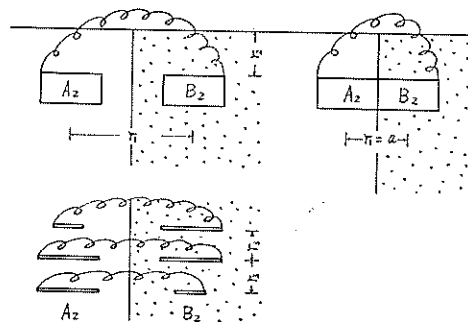
表—3.30 腐食環境

No.	アノード環境	カソード環境
1	粘土～1%NaOH溶液	細砂, MnO ₂ ～海水
2	粘土～1%NaOH溶液	細砂～水道水
3	粘土～水道水	細砂, MnO ₂ ～水道水
4	粘土～水道水	細砂
5	粘土～水道水	粗砂～3% <chem>H2O2</chem> 溶液
6	粘土～海水	細砂～海水
7	粘土～水道水	細砂～海水
8	粘土～水道水	粗砂～水道水
9	粘土～水道水	砂～海水
10	粘土～水道水	砂～水道水
11	粘土～海水	砂～海水
12	粘土～水道水	砂～水道水
13	粘土～水道水	砂～水道水
14	粘土～水道水	砂～水道水
15	粘土～1/100N酒石酸溶液	砂～1/100N酒石酸溶液
16	粘土～1/100N酒石酸溶液	砂～1/100N酒石酸溶液
17	粘土～海水	砂～海水
18	砂を含む粘土～海水	砂～海水
19	粘土～水道水	砂～水道水
20	粘土～海水	砂～海水
21	粘土～水道水	砂～水道水

これら21通りの環境を表—3.31に示す21コの容器に容器の中央がA, B両層の境界面になるように填める。いまA, B層の境界面からA₂, B₂の中央までの距離をr₁cm, A, B層の表面からA₂, B₂の中央までの距離をr₂cm, 同一容器内のA₂間の距離またはB₂間の距離をr₃cmとすると、図—3.69に示す要領でr₁, r₂, r₃は表—3.31に示す距離になるようにA₂, B₂を埋設する。

表—3.31 テストピースの埋設位置

No	埋 設 容 器	r ₁ (cm)	r ₂ (cm)	r ₃ (cm)
1	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
2	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
3	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
4	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
5	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
6	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
7	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
8	内径30cm, 深サ20cm	a	5	5
9	内径50cm, 深サ40cm	5	5	5
10	内径50cm, 深サ40cm	5	5	5
11	内径50cm, 深サ40cm	5	5	5
12	内径50cm, 深サ40cm	5	9	5
13	内径50cm, 深サ40cm	7	9	5
14	70cm×130cm×30cm, 40cm	15	5	8
15	内径50cm, 深サ40cm	5	5	5
16	内径50cm, 深サ40cm	5	5	5
17	50cm×60cm×30cm	5	9	5
18	内径50cm, 深サ40cm	5	9	5
19	70cm×130cm×30cm	15	5	5
20	70cm×130cm×30cm	11	5	5
21	70cm×130cm×30cm	15	5	5



図—3.69 鋼材片の埋設状況

結局A₂, B₂は実験槽No.1～8は3通り, No.9～16は5通り, No.17～18は9通り, No.19は13通り, No.20～21は15通りの表面積比でA, B層にまたがった恰好で埋設されたことになる。

このように埋設したA₂, B₂の埋設前後の重量変化からA₂, B₂の腐食速度を求めると表—3.32の通りである。

表-3.32 Ac/Aa と腐食速度との関係

No.	Anode (A ₂)			Cathode (B ₂)			Ac/Aa	腐食期間 (day)
	Aa (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)	Ac (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)		
1	69.3	0.2571	0.082	16.7	0.0024	0.003	0.24	21
	86.7	0.9146	0.232	51.2	0.0341	0.015	0.59	21
	18.9	0.3884	0.454	62.5	0.0334	0.012	3.31	21
2	63.4	0.2511	0.084	20.7	0.0020	0.002	0.33	22
	64.8	0.4367	0.142	69.1	0.0201	0.006	1.07	22
	16.7	0.2854	0.361	67.9	0.0298	0.009	4.07	22
3	59.5	0.4347	0.148	24.0	0.0048	0.004	0.40	23
	73.2	0.3812	0.105	64.1	0.1491	0.047	0.88	23
	17.8	0.4862	0.551	65.2	0.0330	0.010	3.66	23
4	64.2	0.5528	0.182	21.3	0.0098	0.010	0.33	22
	69.5	0.3451	0.105	64.9	0.0541	0.018	0.93	22
	14.5	0.3077	0.448	68.8	0.0257	0.008	4.74	22
5	66.2	0.4285	0.116	18.1	0.0099	0.010	0.27	26
	67.5	0.5877	0.155	69.8	0.2713	0.069	1.03	26
	21.5	0.2227	0.185	62.4	0.0199	0.006	2.90	26
6	61.4	0.5499	0.166	22.1	0.0009	0.001	0.36	25
	62.6	0.7406	0.220	74.2	0.0107	0.003	1.19	25
	13.8	0.2018	0.272	78.8	0.0271	0.006	5.71	25
7	64.4	0.2551	0.071	17.9	0.0091	0.009	0.28	26
	63.0	0.4478	0.127	72.1	0.0794	0.020	1.14	26
	18.5	0.3681	0.355	65.4	0.0369	0.010	3.54	26
8	58.6	0.2617	0.083	25.7	0.0229	0.017	0.44	25
	70.3	0.3047	0.081	64.1	0.0682	0.020	0.91	25
	15.7	0.3314	0.392	66.5	0.0778	0.037	4.24	25
9	76.59	0.061	0.025	8.14	0.0013	0.005	0.11	15
	33.45	0.105	0.097	8.58	0.0006	0.002	0.26	15
	9.92	0.048	0.150	7.37	0.0102	0.043	0.74	15
	10.18	0.089	0.271	31.83	0.0289	0.028	3.13	15
	10.24	0.224	0.677	74.48	0.093	0.039	7.27	15
10	76.30	0.522	0.212	8.49	0.002	0.007	0.11	15
	33.29	0.257	0.239	8.86	0.0003	0.001	0.27	15
	8.43	0.037	0.136	8.39	0.0031	0.011	1.00	15
	8.35	0.094	0.349	33.77	0.0164	0.015	4.04	15
	9.00	0.142	0.488	75.88	0.0582	0.024	8.43	15
11	76.23	0.145	0.059	8.63	0.0003	0.001	0.11	15
	33.37	0.048	0.045	8.63	0.0001	0.0003	0.26	15
	8.88	0.063	0.220	8.31	0.0029	0.011	0.94	15
	8.62	0.102	0.366	33.46	0.0153	0.014	3.88	15
	10.11	0.132	0.404	74.86	0.1888	0.078	7.40	15

表—3.32 (続)

No.	Anode (A ₂)			Cathode (B ₂)			Ac/Aa	腐食期間 (day)
	Aa (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)	Ac (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)		
12	73.75	0.1656	0.07	8.44	0	0	0.11	15
	32.73	0.0607	0.06	8.52	0.0007	0.003	0.26	15
	8.50	0.0413	0.15	8.62	0.0031	0.01	1.01	15
	8.52	0.0690	0.25	32.99	0.0805	0.08	3.87	15
	8.52	0.0798	0.29	73.70	0.2882	0.12	8.65	15
13	74.00	0.0954	0.040	8.57	0.0025	0.009	0.12	15
	32.97	0.0723	0.068	8.58	0.0022	0.008	0.26	15
	8.58	0.0520	0.188	8.58	0.0044	0.016	1.00	15
	8.54	0.0875	0.317	32.92	0.0245	0.023	3.85	15
	8.41	0.1244	0.458	74.05	0.1587	0.066	8.80	15
14	73.98	0.2677	0.099	8.47	0.0043	0.014	0.11	17
	32.97	0.0724	0.060	8.61	0.0041	0.013	0.26	17
	12.85	0.1084	0.273	8.61	0.0118	0.037	0.67	17
	8.58	0.0388	0.124	8.53	0.0174	0.056	0.99	17
	8.45	0.0583	0.188	12.64	0.0199	0.043	1.50	17
	8.61	0.0634	0.201	32.98	0.0726	0.060	3.83	17
	8.61	0.0763	0.420	73.93	0.2548	0.094	8.59	17
15	32.96	0.0596	0.056	8.57	0.0002	0.001	0.26	15
	12.80	0.0475	0.115	8.59	0.0006	0.002	0.67	15
	8.62	0.0372	0.134	8.57	0.0008	0.003	0.99	15
	8.18	0.0567	0.215	12.91	0.0006	0.001	1.58	15
	8.57	0.0796	0.288	32.94	0.0202	0.019	3.84	15
16	32.72	0.0704	0.067	8.57	0.0001	0.0004	0.26	15
	12.73	0.0558	0.136	8.57	0.0005	0.002	0.67	15
	8.47	0.0828	0.303	8.49	0.0069	0.025	1.00	15
	8.65	0.1196	0.428	12.84	0.0071	0.017	1.48	15
	8.64	0.0934	0.335	33.01	0.0434	0.041	3.82	15
17	76.04	0.2551	0.078	8.43	0.0006	0.002	0.11	20
	32.92	0.1097	0.077	8.56	0.0008	0.002	0.26	20
	17.55	0.0233	0.031	8.56	0.0009	0.002	0.49	20
	12.29	0.0249	0.047	8.60	0.0010	0.003	0.70	20
	8.47	0.0226	0.062	8.47	0.0014	0.004	1.00	20
	8.44	0.0234	0.064	12.76	0.0007	0.001	1.51	20
	8.52	0.0375	0.102	17.59	0.0014	0.002	2.07	20
	8.21	0.0505	0.143	32.77	0.0047	0.003	3.99	20
	8.63	0.0891	0.240	76.11	0.0302	0.009	8.82	20
18	75.42	0.0517	0.016	8.43	0.0017	0.005	0.11	20
	32.69	0.0340	0.024	8.46	0.0015	0.004	0.26	20
	15.76	0.0427	0.063	8.56	0.0014	0.004	0.54	20
	10.79	0.0452	0.097	8.58	0.0015	0.004	0.80	20
	8.21	0.0256	0.072	8.51	0.0012	0.003	1.04	20

表-3.32 (続)

No.	Anode (A ₂)			Cathode (B ₂)			Ac/Aa	腐食期間 (day)
	Aa (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)	Ac (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)		
18	8.33	0.0298	0.083	12.61	0.0012	0.002	1.51	20
	8.45	0.0401	0.110	17.81	0	0	2.11	20
	8.43	0.0499	0.137	32.95	0.0042	0.003	3.91	20
	8.45	0.0970	0.267	76.13	0.0136	0.004	9.01	20
19	66.19	0.0295	0.012	2.16	0.0004	0.005	0.033	18
	41.52	0.0497	0.031	2.23	0.0031	0.036	0.054	18
	33.37	0.0178	0.025	2.28	0.0009	0.010	0.068	18
	21.13	0.0221	0.022	2.28	0.0003	0.010	0.108	18
	12.73	0.0019	0.045	2.28	0.0004	0.003	0.179	18
	8.69	0.0320	0.006	2.28	0.0009	0.005	0.262	18
	2.16	0.0084	0.100	2.05	0.0020	0.025	0.949	18
	2.17	0.0214	0.153	8.56	0.0149	0.022	3.945	18
	2.19	0.0129	0.197	12.76	0.0073	0.002	5.826	18
	2.17	0.0167	0.291	21.12	0.0010	0.004	9.733	18
	2.28	0.0245	0.242	33.47	0.0034	0.011	14.680	18
	2.27	0.0269	0.305	41.47	0.0227	0.014	18.269	18
2.18	0.0473	0.560	66.18	0.0200	0.008	30.358	18	
20	66.19	0.0307	0.014	1.87	0.0019	0.031	0.028	15
	41.57	0.0228	0.017	2.08	0.0023	0.034	0.050	15
	20.92	0.0118	0.018	1.44	0.0023	0.049	0.069	15
	12.41	0.0120	0.030	1.70	0.0251	0.457	0.137	15
	8.49	0.0090	0.033	1.86	0	0	0.219	15
	4.43	0.0074	0.033	1.60	0.0029	0.056	0.361	15
	3.27	0.0086	0.081	2.05	0.0028	0.042	0.627	15
	2.21	0.0074	0.104	2.03	0.0029	0.044	0.919	15
	1.93	0.0125	0.201	3.34	0.0018	0.017	1.731	15
	2.12	0.0114	0.166	4.22	0	0	1.991	15
	1.95	0.0167	0.266	8.64	0.0019	0.007	4.431	15
	1.68	0.0187	0.345	12.78	0.0039	0.095	7.61	15
	1.78	0.0285	0.496	20.93	0.0027	0.004	11.76	15
	2.16	0.0511	0.732	41.49	0.0127	0.009	19.21	15
2.06	0.0670	1.007	66.05	0.0164	0.008	32.06	15	
21	66.14	0.0424	0.020	2.22	0	0	0.034	15
	41.51	0.0152	0.011	2.28	0.0001	0.001	0.055	15
	20.93	0.0118	0.018	2.17	0	0	0.104	15
	12.87	0.0117	0.028	2.30	0.0013	0.018	0.179	15
	8.48	0.0073	0.027	2.22	0.0011	0.015	0.262	15
	4.28	0.0042	0.030	2.23	0.0016	0.022	0.521	15
	3.33	0.0053	0.049	2.24	0.0015	0.021	0.673	15
	2.15	0.0053	0.076	2.20	0.0014	0.020	1.023	15
	2.24	0.0070	0.097	3.36	0.0008	0.007	1.50	15

表—3.32 (続)

No.	Anode (A ₂)			Cathode (B ₂)			A _c /A _a	腐食期間 (day)
	A _a (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)	A _c (cm ²)	減量(gr)	C(mm/yr)		
21	2.23	0.0080	0.111	4.40	0.0007	0.005	1.97	15
	2.20	0.0102	0.144	8.59	0.0006	0.002	3.91	15
	2.24	0.0117	0.162	12.82	0.0062	0.015	5.72	15
	2.18	0.0135	0.192	21.06	0.0084	0.012	9.66	15
	2.28	0.0178	0.242	41.40	0.0183	0.014	18.16	15
	2.14	0.0211	0.305	66.16	0.0278	0.013	30.92	15

A₂, B₂より成るマクロ・セルのカソード(B₂)の表面積をA_c, アノード(A₂)の表面積をA_aとして、A_c/A_aとA₂, B₂との関係を表—3.32より求めてみる。まずA_c/A_aとA₂の腐食速度との関係を図示すると図—3.70のようになる。

図—3.70によればA₂(マクロ・セルのアノード)の腐食速度はA_c/A_aによって変化することがわかる。すなわち、A₂の腐食速度CとA_c/A_aの間には次の関係がある。

$$C = K \cdot (A_c/A_a)^n \dots \dots \dots (3.50)$$

次にB₂の腐食速度とA_c/A_aとの関係を図示すると図—

3.71のようになる。

図—3.71によればB₂(マクロ・セルのカソード)の腐食速度CとA_c/A_aの間にははっきりした関係を見出すことはできないが、B₂にもA₂ほど激しくないが少し腐食が発生していることがわかる。A_c/A_aが2を越えるあたりからB₂の腐食速度はA_c/A_aに多少影響される傾向があるように見受けられる。

A₂, B₂のA_c/A_aの変化模様ならびにA₂, B₂面の腐食状況をはっきりさせるためにNo.12~No.21の引上げ後のA₂, B₂の写真を図—3.72~3.81に示す。

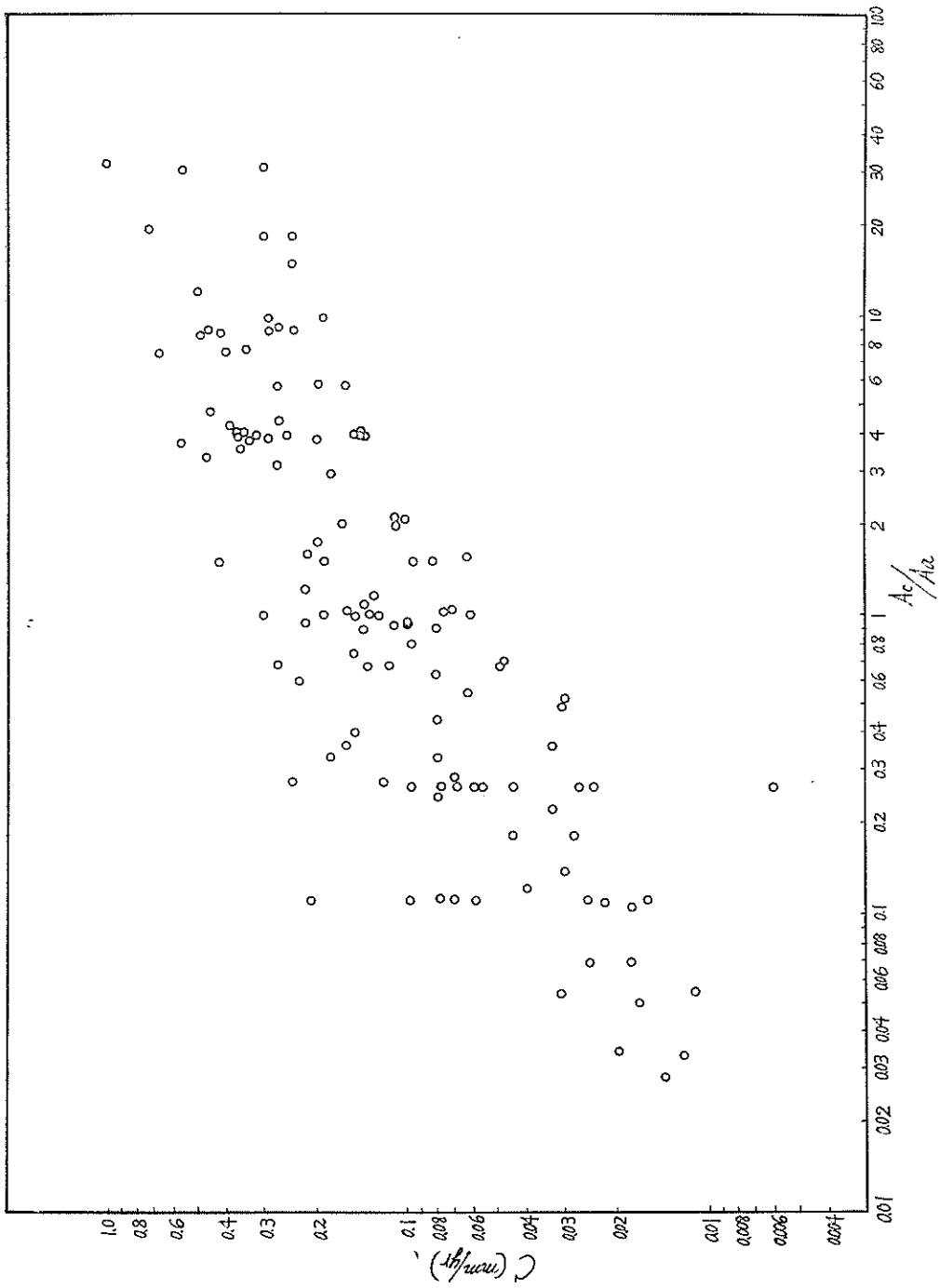
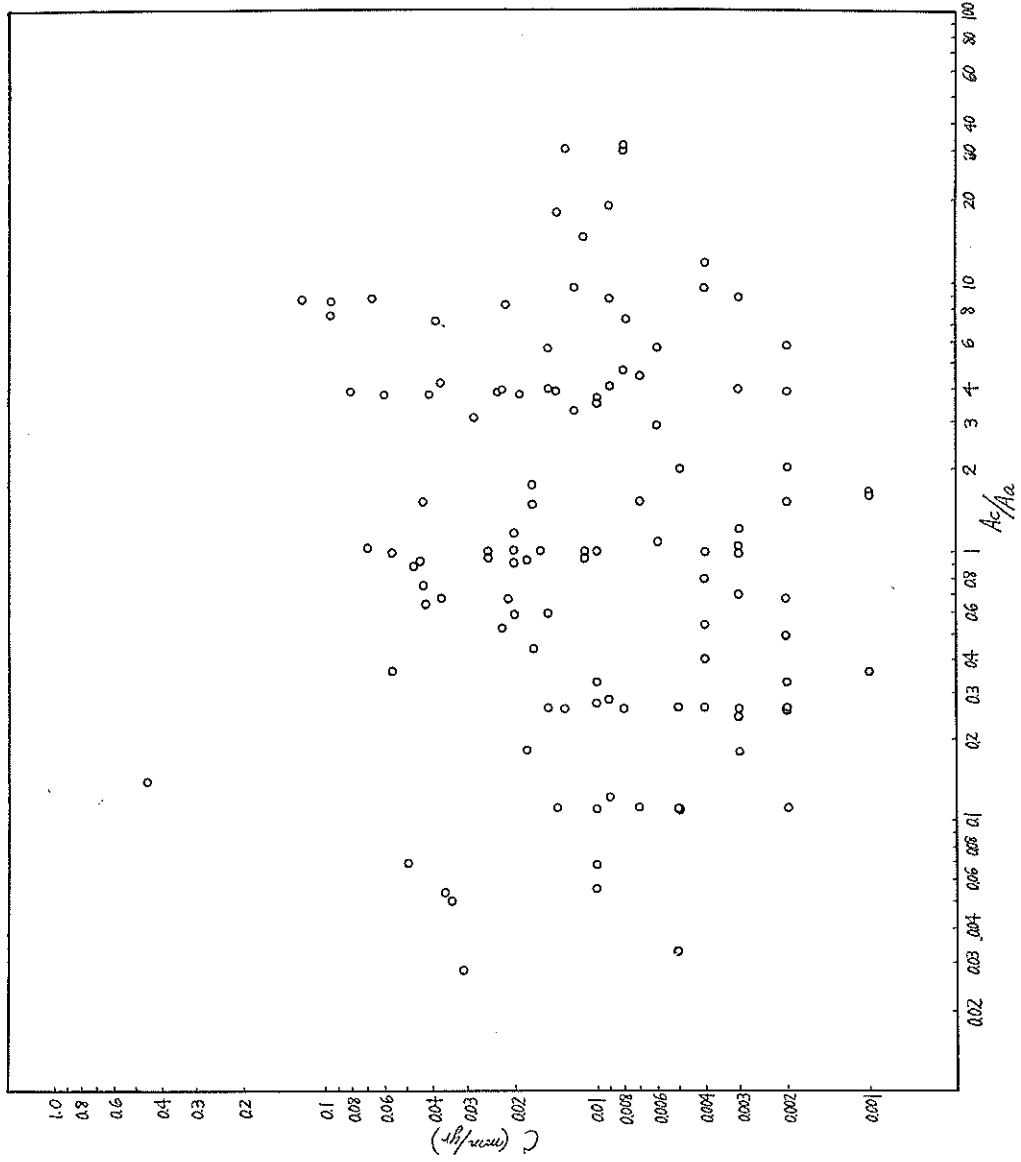
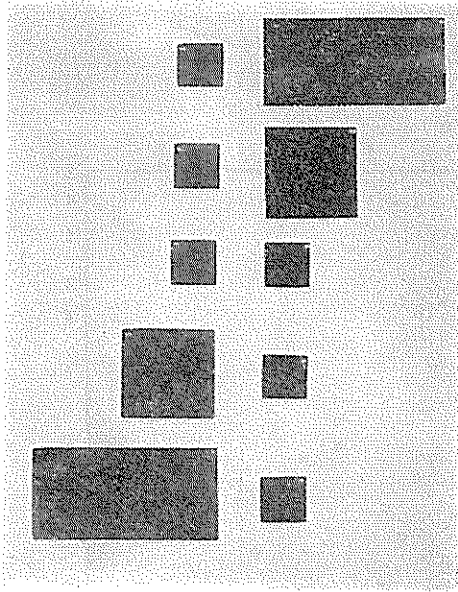


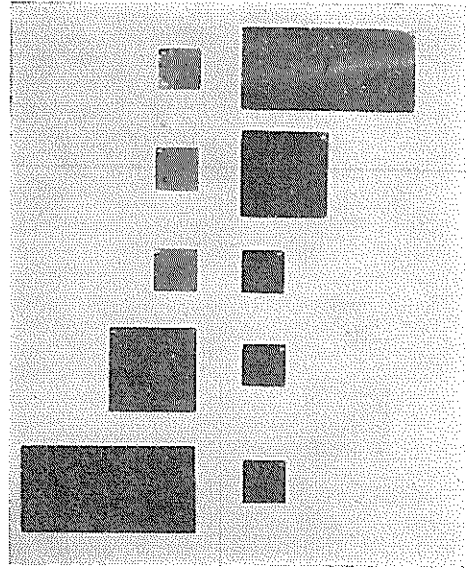
図-3.70 A_c/A_a とアノード環境(粘土層)中鋼材腐食速度の関係



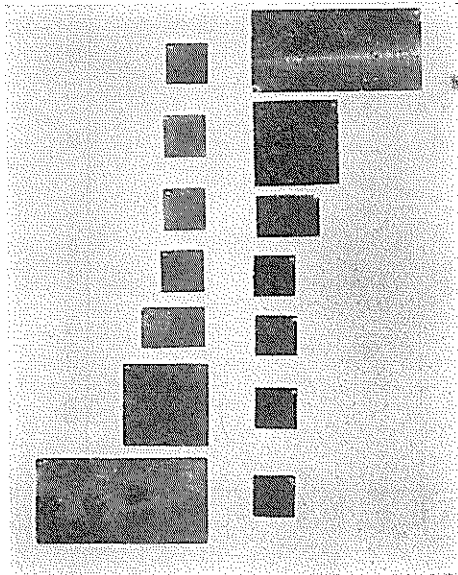
図—3.71 A_c/A_a とカソード環境（砂層中）鋼材腐食速度の関係



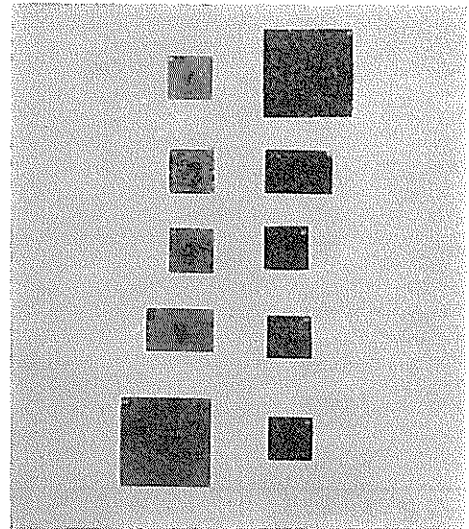
粘土層 | 砂層
 図-3.72 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況
 (No.12)



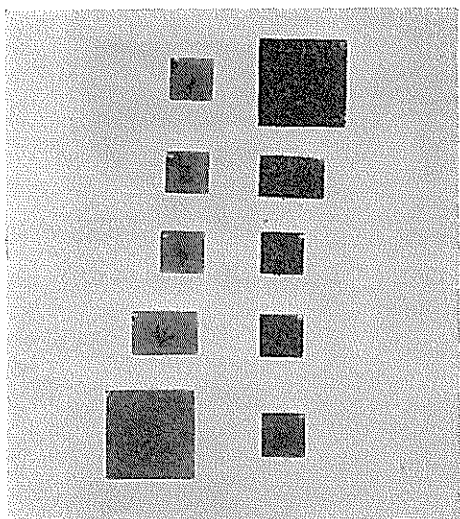
粘土層 | 砂層
 図-3.73 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況
 (No.13)



粘土層 | 砂層
 図-3.74 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況
 (No.14)

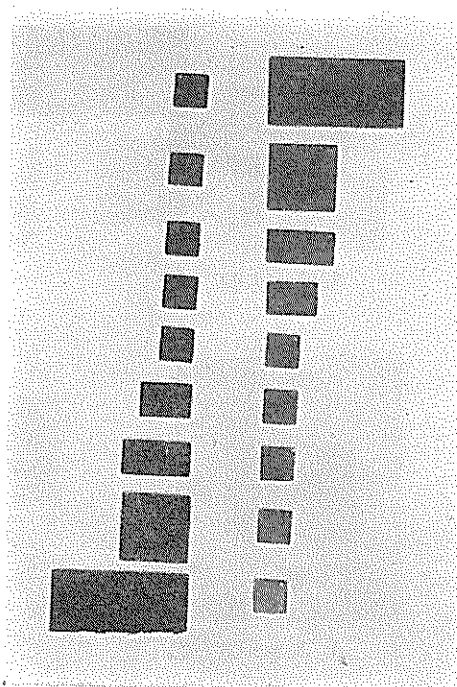


粘土層 | 砂層
 図-3.75 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況
 (No.15)



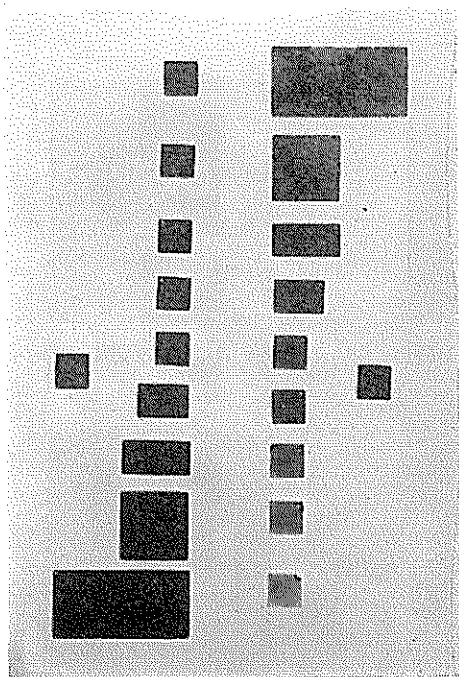
粘土層 | 砂層

図-3.76 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況
(No.16)



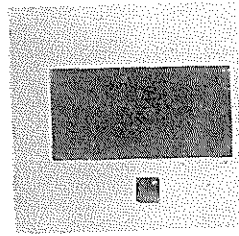
砂層 | 粘土層

図-3.77 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況
(No.17)

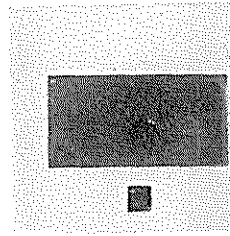


砂層 | 粘土層

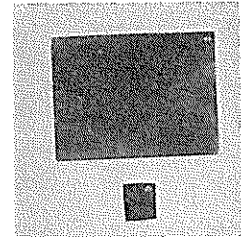
図-3.78 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況
(No. 18)



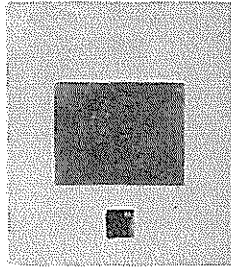
$A_c/A_1=0.033$ (表)



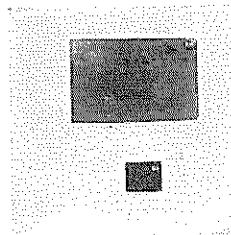
$A_c/A_n=0.033$ (裏)



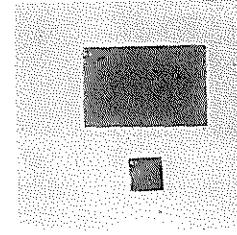
$A_c/A_n=0.05$ (表)



$A_c/A_n=0.05$ (裏)

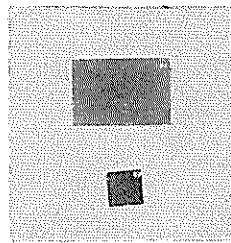


$A_c/A_n=0.069$ (表)

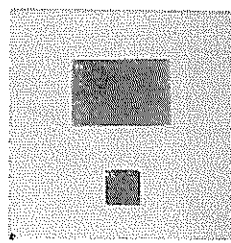


$A_c/A_n=0.069$ (裏)

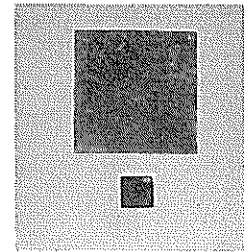
図-3.79 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (No.19) (1)



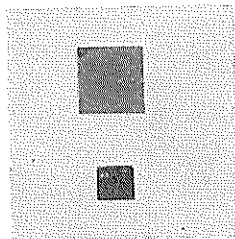
$A_c/A_n=0.108$ (表)



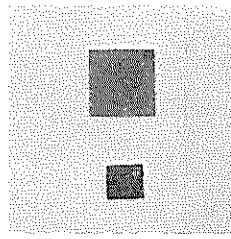
$A_c/A_n=0.108$ (裏)



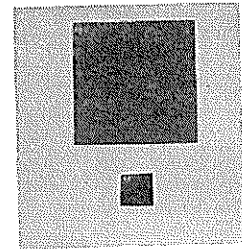
$A_c/A_2=0.262$ (表)



$A_c/A_n=0.179$ (表)

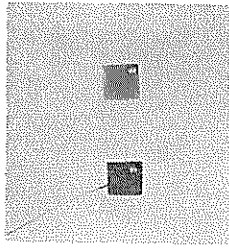


$A_c/A_n=0.179$ (裏)

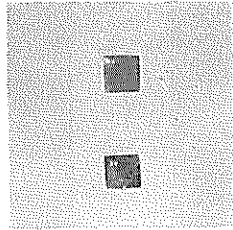


$A_c/A_n=0.262$ (裏)

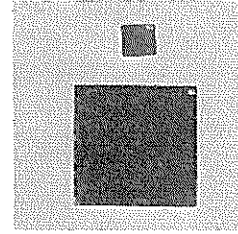
図-3.79 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (No.19) (2)



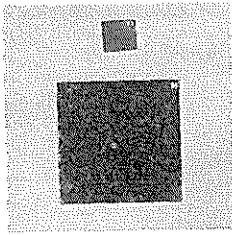
$A_c/A_n=0.949$ (表)



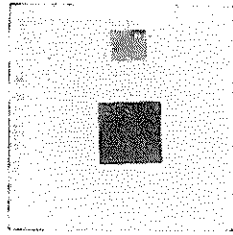
$A_c/A_n=0.949$ (裏)



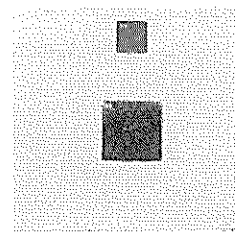
$A_c/A_n=3.945$ (表)



$A_c/A_n=3.945$ (裏)

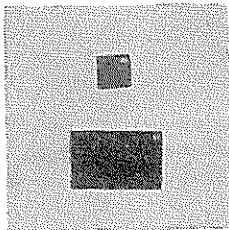


$A_c/A_n=5.826$ (表)

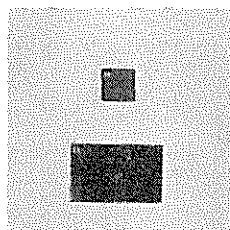


$A_c/A_n=5.826$ (裏)

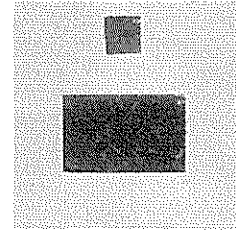
図-3.79 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (No.19) (3)



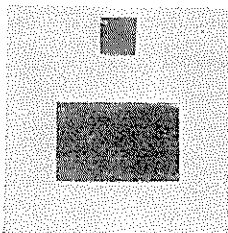
$A_c/A_n=9.733$ (表)



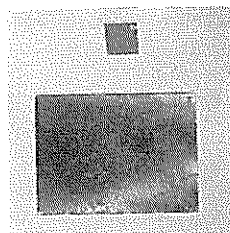
$A_c/A_n=9.733$ (裏)



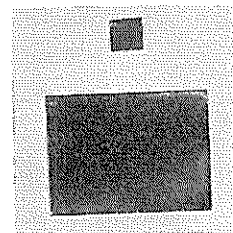
$A_c/A_n=14.680$ (表)



$A_c/A_n=14.680$ (裏)

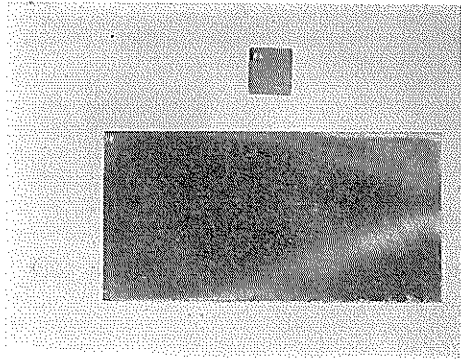


$A_c/A_n=18.269$ (表)

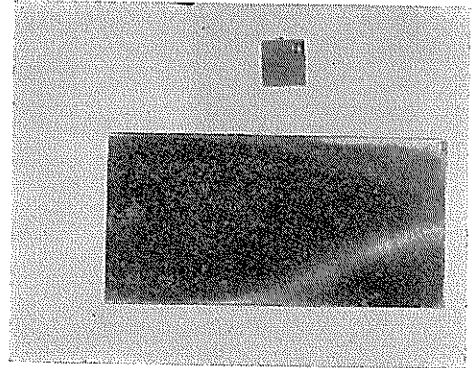


$A_c/A_n=18.269$ (裏)

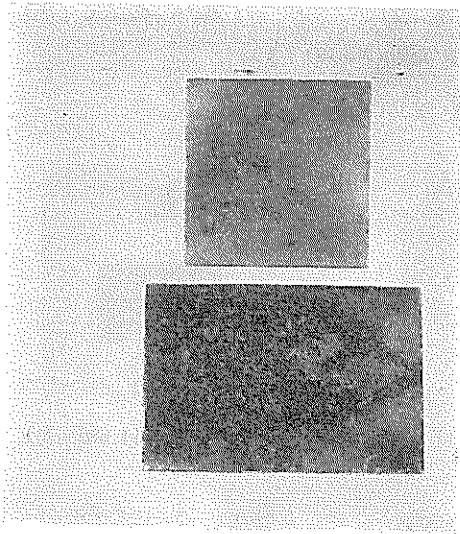
図-3.79 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (No.19) (4)



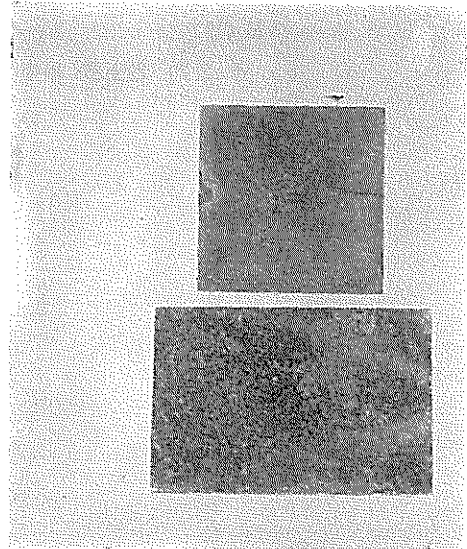
$A_c/A_n=30.358$ (表)



$A_c/A_n=30.358$ (裏)

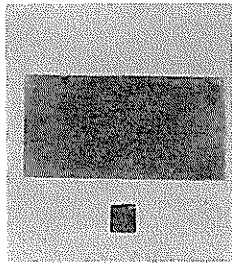


Isolated (表)

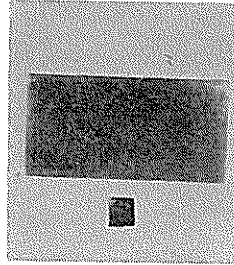


Isolated (裏)

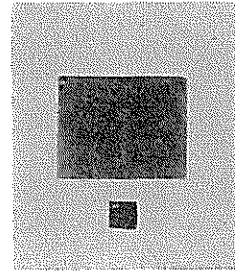
図-3.79 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況 (5)



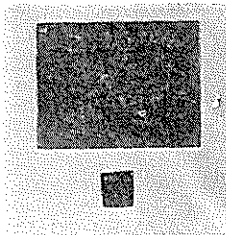
$A_c/A_a=0.028$ (表)



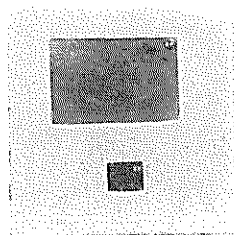
$A_c/A_a=0.028$ (裏)



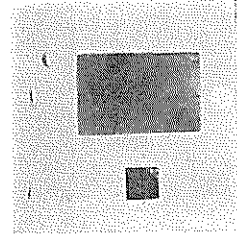
$A_c/A_a=0.050$ (表)



$A_c/A_a=0.050$ (裏)

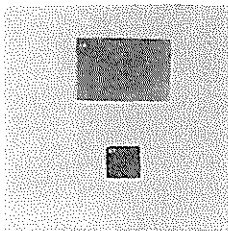


$A_c/A_a=0.069$ (表)

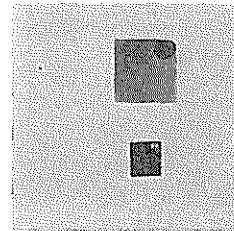


$A_c/A_a=0.069$ (裏)

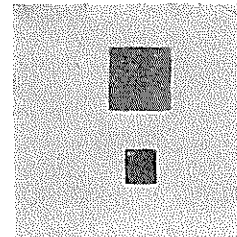
図-3.80 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (No.20) (1)



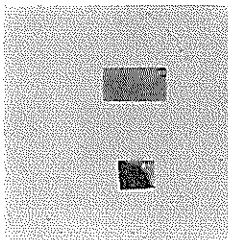
$A_c/A_a=0.137$ (表)



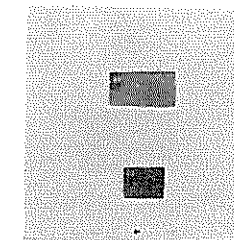
$A_c/A_a=0.219$ (表)



$A_c/A_a=0.219$ (裏)

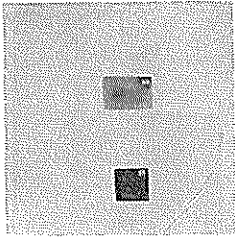


$A_c/A_a=0.361$ (表)

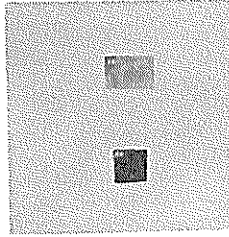


$A_c/A_a=0.361$ (裏)

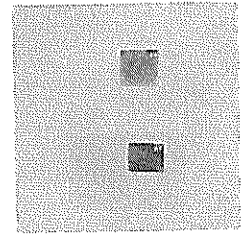
図-3.80 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (No.20) (2)



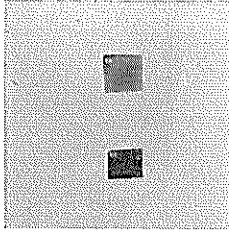
$A_c/A_n=0.627$ (表)



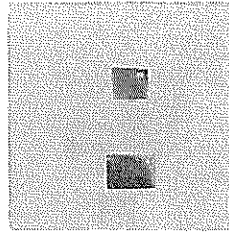
$A_c/A_n=0.627$ (裏)



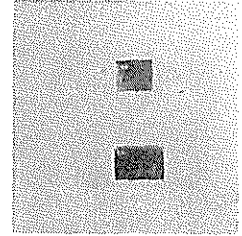
$A_c/A_n=0.919$ (表)



$A_c/A_n=0.919$ (裏)

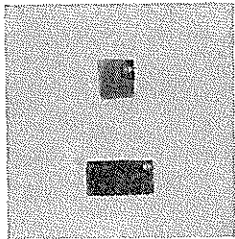


$A_c/A_n=1.731$ (表)

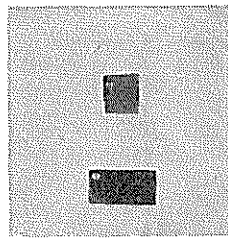


$A_c/A_n=1.731$ (裏)

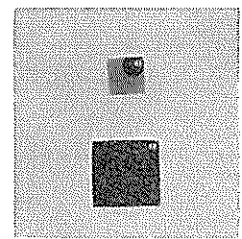
図-3.80 粘土層、砂層中鋼材の腐食状況 (No.20) (3)



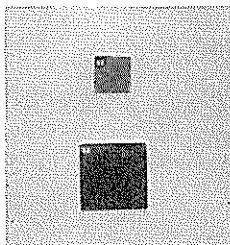
$A_c/A_n=1.991$ (表)



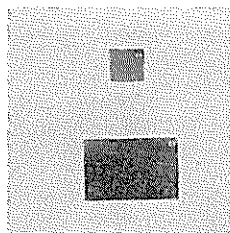
$A_c/A_n=1.991$ (裏)



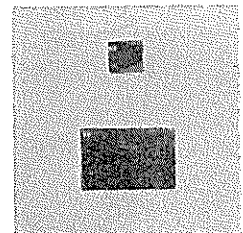
$A_c/A_n=4.431$ (表)



$A_c/A_n=4.431$ (裏)

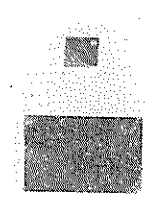


$A_c/A_n=7.61$ (表)

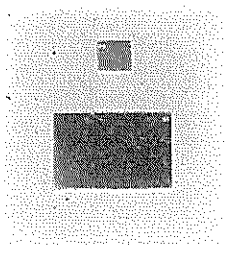


$A_c/A_n=7.61$ (裏)

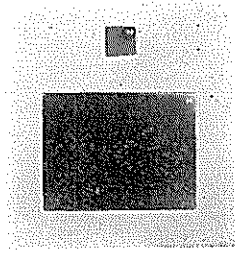
図-3.80 粘土層、砂層中鋼材の腐食状況 (No.20) (4)



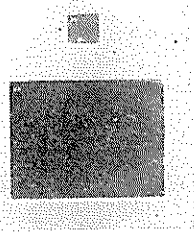
$A_c/A_n=11.76$ (表)



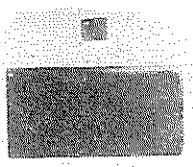
$A_c/A_n=11.76$ (裏)



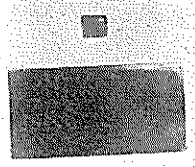
$A_c/A_n=19.21$ (表)



$A_c/A_n=19.21$ (裏)

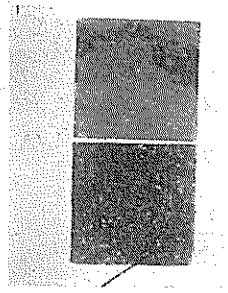


$A_c/A_n=32.06$ (表)

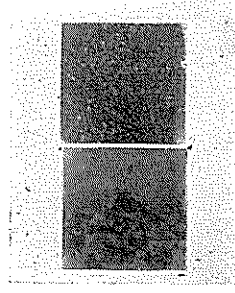


$A_c/A_n=32.06$ (裏)

図—3.80 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況 (No.20) (5)

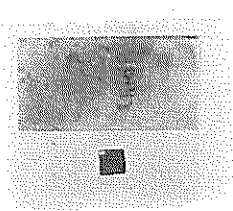


Isolated (表)

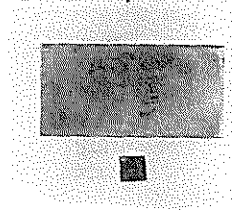


Isolated (裏)

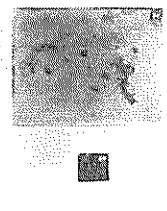
図—3.80 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況 (No.20) (6)



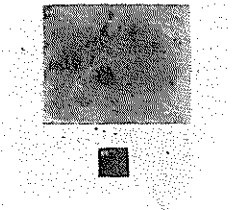
$A_c/A_n=0.034$ (表)



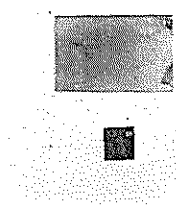
$A_c/A_n=0.034$ (裏)



$A_c/A_n=0.055$ (表)

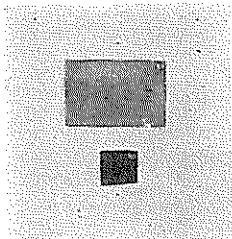


$A_c/A_n=0.055$ (裏)

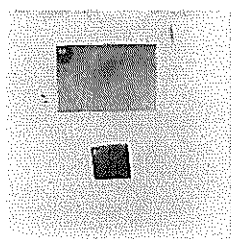


$A_c/A_n=0.104$ (表)

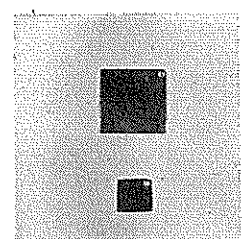
図-3.81 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況 (No.21) (1)



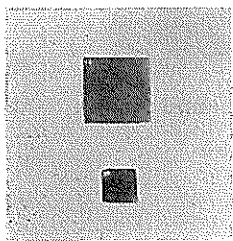
$A_c/A_n=0.179$ (表)



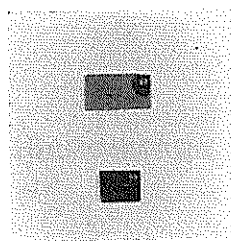
$A_c/A_n=0.179$ (裏)



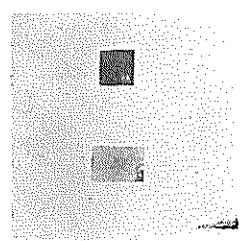
$A_c/A_n=0.262$ (表)



$A_c/A_n=0.262$ (裏)

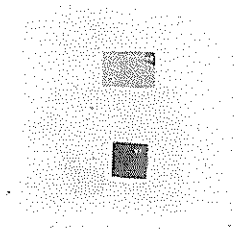


$A_c/A_n=0.521$ (表)

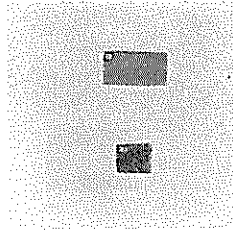


$A_c/A_n=0.521$ (裏)

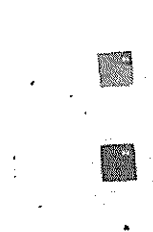
図-3.81 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況 (No.21) (2)



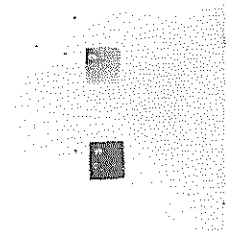
$A_c/A_n=0.673$ (表)



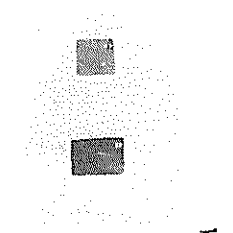
$A_c/A_n=0.673$ (裏)



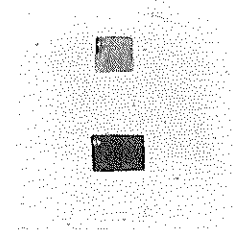
$A_c/A_n=1.023$ (表)



$A_c/A_n=1.023$ (裏)

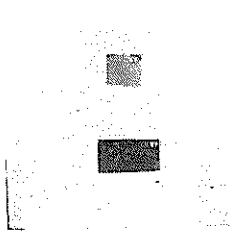


$A_c/A_n=1.50$ (表)

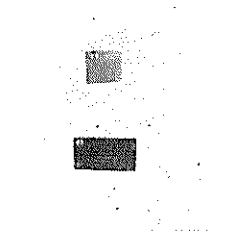


$A_c/A_n=1.50$ (裏)

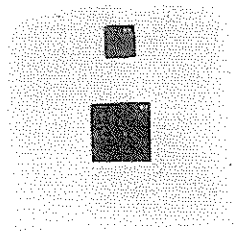
図-3.81 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況 (No.21) (3)



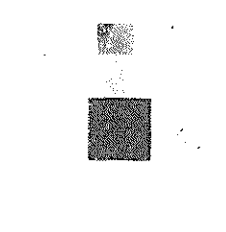
$A_c/A_n=1.97$ (表)



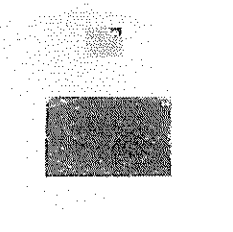
$A_c/A_n=1.97$ (裏)



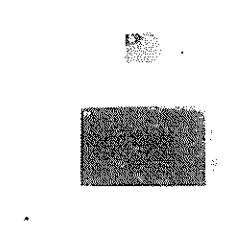
$A_c/A_n=3.91$ (表)



$A_c/A_n=3.91$ (裏)



$A_c/A_n=5.72$ (表)



$A_c/A_n=5.72$ (裏)

図-3.81 粘土層, 砂層中鋼材の腐食状況 (No.21) (4)

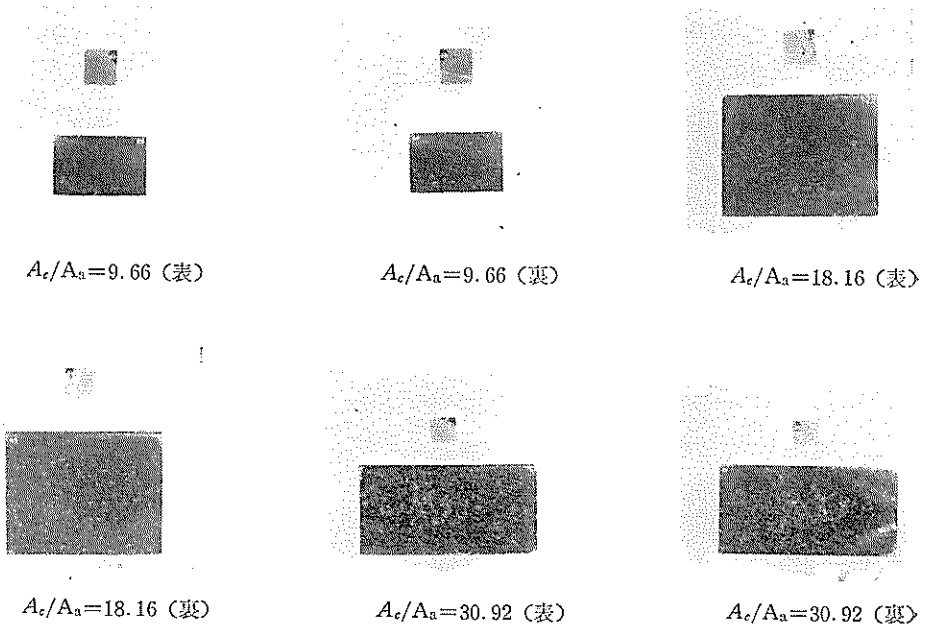


図-3.81 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (No.21) (5)

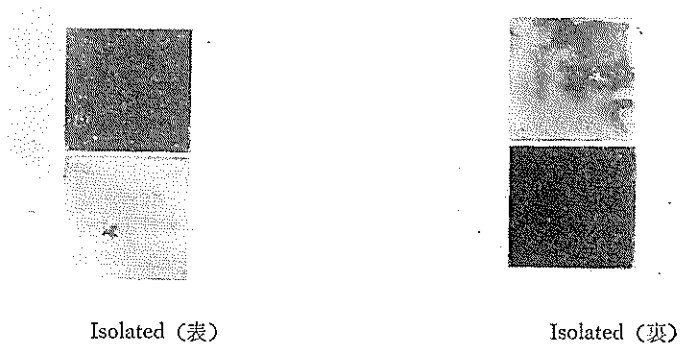


図-3.81 粘土層，砂層中鋼材の腐食状況 (6)

A₂, B₂の写真からわかるように、Ac/A_aが小さいところ（すなわちB₂が小さくてA₂が大きい）ではB₂面は発錆せずに最初の研摩状態がよく保たれているが、Ac/A_aが大きくなるにつれて（すなわちB₂が大きくてA₂が小さい）B₂面でも腐食が発生している。

B₂の研摩面は光線の具合で写真では黒く撮っており、A₂, B₂の一隅にある穴の付近の影はリゴラック樹脂による被覆の跡である。

Ac/A_aが適当に小さいところでB₂面に研摩面が保たれる傾向は、カソード表面積Acが小さくてアノード表

面積A_aが大きいためにアノード（A₂）からカソード（B₂）に流入する電流量がカソード（B₂）面に発生するマイクロ腐食を抑制するのに十分であるためと考えられる。またAc/A_aが大きくなるにつれてB₂面に発錆がみられるのは、Acに対してA_aが小さいためにアノード（A₂）からの電流量だけではカソード（B₂）面のマイクロ腐食を抑制するには不十分となって行くからであろう。

A₂, B₂の腐食速度を測定するときに参考として埋設環境A, Bの諸性質を測定した。この結果を表—3.33に示す。

表—3.33 環境抵抗および鋼材電位

No.	ρ_a (Ω -cm)	ρ_c (Ω -cm)	Ac/Aa	Rac (Ω)	Ea (-mV)	Ec (-mV)
1	291	1,518	0.24			
	291	1,518	0.59			
	291	1,518	3.31			
2	473	1,548	0.33			
	473	1,548	1.07			
	473	1,548	4.07			
3	318	1,577	0.40			
	318	1,577	0.88			
	318	1,577	3.66			
4	1,526	4,970	0.33			
	1,526	4,970	0.43			
	1,526	4,970	4.74			
5	204	10,206	0.27			
	204	10,206	1.03			
	204	10,206	2.90			
6	68	1,055	0.36			
	68	1,055	1.19			
	68	1,055	5.71			
7	1,588	897	0.28			
	1,588	897	1.14			
	1,588	897	3.54			
8	2,038	1,240	0.44			
	2,038	1,240	0.91			
	2,038	1,240	4.24			
9	2,451	3,679	0.11	104		
	2,451	3,679	0.26	23		
	2,451	3,679	0.74	230		
	2,451	3,679	3.13	25		
	2,451	3,679	7.27	127		

表-3.33 (続)

No.	ρ_a (Ω -cm)	ρ_c (Ω -cm)	Ac/Aa	Rac (Ω)	Ea (-mV)	Ec (-mV)
10	2,622	15,466	0.11	519		
	2,622	15,466	0.27	734		
	2,622	15,466	1.00	152		
	2,622	15,466	4.04	482		
	2,622	15,466	8.43	262		
11	1,176	1,696	0.11	99		
	1,176	1,696	0.26	26		
	1,176	1,696	0.94	67		
	1,176	1,969	3.88	84		
	1,176	1,696	7.40	130		
12	2,037	12,715	0.11	462		
	2,037	12,715	0.26	520		
	2,037	12,715	1.01	638		
	2,037	12,715	3.87	390		
	2,037	12,715	8.65	342		
13	2,159	19,031	0.12	542		
	2,159	19,031	0.26	602		
	2,159	19,031	1.00	656		
	2,159	19,031	3.85	432		
	2,159	19,031	8.80	394		
14	2,677	10,537	0.11	538		
	2,677	10,537	0.26	546		
	2,677	10,537	0.67	652		
	2,677	10,537	0.99	698		
	2,677	10,537	1.50	626		
	2,677	10,537	3.83	507		
	2,677	10,537	8.59	484		
15	2,200	12,538	0.26	751		
	2,200	12,538	0.67	794		
	2,200	12,538	0.99	864		
	2,200	12,538	1.58	657		
	2,200	12,538	3.84	545		
16	2,493	4,689	0.26	626		
	2,493	4,689	0.67	610		
	2,493	4,689	1.00	668		
	2,493	4,689	1.48	583		
	2,493	4,689	3.82	436		
17	122	768	0.11		670	537
	122	768	0.26		688	559
	122	768	0.49		689	562
	122	768	0.70		664	539

表-3.33 (続)

No.	ρ_a (Ω -cm)	ρ_c (Ω -cm)	Ac/Aa	Rac (Ω)	Ea (-mV)	Ec (-mV)
17	122	768	1.00		706	510
	122	768	1.51		707	584
	122	768	2.07		693	511
	122	768	3.99		682	568
	122	768	8.82		691	589
18	199	811	0.11		718	491
	199	811	0.26		710	527
	199	811	0.54		703	537
	199	811	0.80		677	515
	199	811	1.04		705	544
	199	811	1.51		700	546
	199	811	2.11		699	531
	199	811	3.91		691	586
	199	811	9.01		664	567
19	211	569	0.033		746	451
	211	569	0.054		722	458
	211	569	0.068		733	402
	211	569	0.108		735	385
	211	569	0.179		714	398
	211	569	0.262		733	403
	211	569	0.949		720	618
	211	569	3.945		713	558
	211	569	5.826		697	557
	211	569	9.733		710	562
	211	569	14.680		720	623
	211	569	18.269		697	618
	211	569	30.358		688	588
20	102	1,917	0.028		738	449
	102	1,917	0.050		737	454
	102	1,917	0.069		733	449
	102	1,917	0.137		730	437
	102	1,917	0.219		723	439
	102	1,917	0.361		724	427
	102	1,917	0.627		713	409
	102	1,917	0.919		728	424
	102	1,917	1.731		719	389
	102	1,917	1.991		716	426
	102	1,917	4.431		707	444
	102	1,917	7.61		696	440
	102	1,917	11.76		697	450
	102	1,917	19.21		680	488
	102	1,917	32.06		692	487

表-3.33 (続)

No.	ρ_a (Ω -cm)	ρ_c (Ω -cm)	A_c/A_a	R_{ac} (Ω)	E_a (-mV)	E_c (-mV)
21	1,399	6,938	0.034		720	382
	1,399	6,938	0.055		738	395
	1,399	6,938	0.104		727	383
	1,399	6,938	0.179		720	380
	1,399	6,938	0.262		717	348
	1,399	6,938	0.521		703	394
	1,399	6,938	0.673		713	368
	1,399	6,938	1.023		703	324
	1,399	6,938	1.50		703	380
	1,399	6,938	1.97		691	430
	1,399	6,938	3.91		674	312
	1,399	6,938	5.72		672	410
	1,399	6,938	9.66		681	429
	1,399	6,938	18.16		680	440
	1,399	6,938	30.92		674	447

ρ_a はA層の比抵抗、 ρ_c はB層の比抵抗で、室内用電極をそれぞれA、B層に別々に挿入して(3.15)式の関係 $\rho = 7 \times R_c$ (R_c は室内用電極間の抵抗である)から算出した。 R_{ac} は A_2 、 B_2 間の抵抗で R_e と同じくA.C.ブリッジで分極を起さないようにして測定された。 E_a 、 E_c は A_2 、 B_2 の回路を開路としたときの電位で、海水塩化銀電極に対する値である。

図-3.70、71からわかるように実験条件では B_2 の腐食速度よりも A_2 の腐食速度の方が大きく危険度が高いためここでは A_2 の腐食速度を追求することにする。

図-3.70によれば A_2 の腐食速度は土壤に含まれる水が海水であっても水道水であっても $(A_c/A_a)^n$ に比例する傾向のあることがわかったがnがどんな値になるかを見当をつけるために次のような仮定を進めてみる。

A_2 、 B_2 間の開路電位差 ΔE は(3.51)で示される。

$$\Delta E = I \times R \dots\dots\dots(3.51)$$

前に述べた仮定から $R = r_c/A_c$ とおけるので(3.51)は(3.52)となる。

$$\Delta E = I \times r_c/A_c \dots\dots\dots(3.52)$$

(3.52)はさらに(3.53)となる。

$$I = \Delta E / r_c \cdot A_c \dots\dots\dots(3.53)$$

(3.53)式の両辺を A_a で割ってやると(3.54)式となる。

$$I/A_a = \Delta E / r_c \cdot A_c/A_a \dots\dots\dots(3.54)$$

したがって(3.54)式で ΔE 、 r_c がそれぞれ一定であるならば I/A_a (A_2 の腐食速度でマクロ腐食速度とい

う)は A_c/A_a に比例することになる。この結果、本研究でこれまでに述べてきた多くの仮定がもし正しければ $(A_c/A_a)^n$ のnは1になるのではないかと推察される。しかし図-3.70からは $n = 1$ かどうかははっきりしないので、この点をはっきりさせるために次のような検討をした。

図-3.66に示した腐食機構説明図のところで触れたようにマイクロ腐食はマクロ腐食の特定のケースであるとの考えにもとづいて腐食速度 C (mm/yr) とカソード、アノード表面積比 A_c/A_a との関係を探るヒントを得るために次のような仮定の下にマイクロ腐食計の実験で得た資料(表-3.9)を解析した。

いまマイクロ腐食にも(3.54)式の関係が成立するものとする。ただしマイクロ腐食ではマクロ腐食の場合と異なってアノード、カソード部分に2分することができず、マイクロセルのアノードは単一層に埋設された鋼材表面上を転々と移って行くものである。したがって(3.54)式はマイクロ腐食の場合には(3.55)式となる。

$$I/A = \Delta E / r_c \cdot A_c/A \dots\dots\dots(3.55)$$

ただし

$$A = A_a + A_c$$

I/A : マイクロ腐食速度

表-3.9に示すマイクロ腐食計の実験結果に(3.55)式の関係を用いてマイクロ腐食速度 C と A_c/A_a との関係を求めてみる。先の検討より ΔE は一定と仮定し得るので ΔE の値としてはマクロセルを形成する A_2 、 B_2 の見掛

けの開路電位差のいくつかの測定値のうちから0.18, 0.20, 0.22 (V) を代入することにした。

(3.55) 式を変形すると (3.56) 式となる。

$$A_c/A = (I/A) \cdot r_c / \Delta E \quad \dots\dots\dots(3.56)$$

表-3.9のマイクロ腐食速度 C (mm/yr) は (3.57) 式から電流密度 I/A ($\mu\text{A}/\text{cm}^2/\text{yr}$) に換算される。

$$I/A = 86 \times C \quad \dots\dots\dots(3.57)$$

ただし

86: 常数 ($86\mu\text{A}/\text{cm}^2/\text{yr} = 1\text{mm}/\text{yr}$)

C : ミクロ腐食速度 (mm/yr)

r_c は表-3.25の値を使用する。 I/A と r_c を (3.56) 式に代入して $\Delta E = 0.18$ (V), 0.20 (V), 0.22 (V) のときの A_c/A を算出すると表-3.34のようになる。

表-3.34 (3.56) 式による算出値

No.	C (mm/yr)	I (A · yr)	I/A※ (A/cm ²)	r _c (Ω-cm ²)	I/A × r _c	(I/A × r _c) / ΔE		
						ΔE=0.18(V)	ΔE=0.20(V)	ΔE=0.22(V)
1	0.015	1.262 × 10 ⁻⁴	1.32 × 10 ⁻⁶	3.46 × 10 ⁴	4.57 × 10 ⁻²	0.254	0.229	0.208
2	0.012	0.994 × 10 ⁻⁴	1.04 × 10 ⁻⁶	3.24 × 10 ⁴	3.37 × 10 ⁻²	0.187	0.169	0.153
3	0.022	1.797 × 10 ⁻⁴	1.88 × 10 ⁻⁶	2.75 × 10 ⁴	5.17 × 10 ⁻²	0.287	0.259	0.235
4	0.017	1.414 × 10 ⁻⁴	1.48 × 10 ⁻⁶	3.03 × 10 ⁴	4.48 × 10 ⁻²	0.249	0.224	0.204
5	0.011	0.918 × 10 ⁻⁴	0.96 × 10 ⁻⁶	3.13 × 10 ⁴	3.00 × 10 ⁻²	0.167	0.150	0.136
6	0.022	1.797 × 10 ⁻⁴	1.88 × 10 ⁻⁶	2.93 × 10 ⁴	5.51 × 10 ⁻²	0.306	0.276	0.250
7	0.014	1.185 × 10 ⁻⁴	1.24 × 10 ⁻⁶	2.93 × 10 ⁴	3.63 × 10 ⁻²	0.202	0.182	0.165
8	0.019	1.567 × 10 ⁻⁴	1.64 × 10 ⁻⁶	2.40 × 10 ⁴	3.94 × 10 ⁻²	0.219	0.197	0.179
9	0.032	2.638 × 10 ⁻⁴	2.76 × 10 ⁻⁶	2.10 × 10 ⁴	5.80 × 10 ⁻²	0.322	0.290	0.264
10	0.025	2.026 × 10 ⁻⁴	2.12 × 10 ⁻⁶	2.17 × 10 ⁴	4.60 × 10 ⁻²	0.256	0.230	0.209
11	0.050	4.091 × 10 ⁻⁴	4.28 × 10 ⁻⁶	2.03 × 10 ⁴	8.69 × 10 ⁻²	0.483	0.435	0.395
12	0.070	5.734 × 10 ⁻⁴	6.00 × 10 ⁻⁶	1.77 × 10 ⁴	10.62 × 10 ⁻²	0.590	0.531	0.483
13	0.067	5.505 × 10 ⁻⁴	5.76 × 10 ⁻⁶	1.60 × 10 ⁴	9.22 × 10 ⁻²	0.512	0.461	0.419
14	0.082	6.766 × 10 ⁻⁴	7.08 × 10 ⁻⁶	1.49 × 10 ⁴	10.54 × 10 ⁻²	0.585	0.527	0.479
15	0.084	6.881 × 10 ⁻⁴	7.20 × 10 ⁻⁶	1.20 × 10 ⁴	8.64 × 10 ⁻²	0.480	0.432	0.393
16	0.119	9.825 × 10 ⁻⁴	10.28 × 10 ⁻⁶	1.29 × 10 ⁴	13.26 × 10 ⁻²	0.737	0.663	0.603
17	0.098	8.105 × 10 ⁻⁴	8.48 × 10 ⁻⁶	1.29 × 10 ⁴	10.94 × 10 ⁻²	0.608	0.547	0.497
18	0.063	5.199 × 10 ⁻⁴	5.44 × 10 ⁻⁶	1.49 × 10 ⁴	8.11 × 10 ⁻²	0.451	0.406	0.369
19	0.078	6.422 × 10 ⁻⁴	6.72 × 10 ⁻⁶	1.34 × 10 ⁴	9.00 × 10 ⁻²	0.500	0.450	0.409
20	0.083	6.804 × 10 ⁻⁴	7.12 × 10 ⁻⁶	1.30 × 10 ⁴	9.26 × 10 ⁻²	0.514	0.463	0.421
21	0.063	5.161 × 10 ⁻⁴	5.40 × 10 ⁻⁶	1.20 × 10 ⁴	6.48 × 10 ⁻²	0.360	0.324	0.295
22	0.100	8.257 × 10 ⁻⁴	8.64 × 10 ⁻⁶	1.11 × 10 ⁴	9.59 × 10 ⁻²	0.533	0.480	0.436
23	0.116	9.519 × 10 ⁻⁴	9.96 × 10 ⁻⁶	1.03 × 10 ⁴	10.25 × 10 ⁻²	0.569	0.513	0.466
24	0.078	6.384 × 10 ⁻⁴	6.68 × 10 ⁻⁶	1.07 × 10 ⁴	7.15 × 10 ⁻²	0.397	0.358	0.325
25	0.085	6.996 × 10 ⁻⁴	7.32 × 10 ⁻⁶	0.99 × 10 ⁴	7.25 × 10 ⁻²	0.403	0.363	0.330
26	0.121	9.939 × 10 ⁻⁴	10.40 × 10 ⁻⁶	0.91 × 10 ⁴	9.46 × 10 ⁻²	0.526	0.473	0.430
27	0.136	11.196 × 10 ⁻⁴	11.71 × 10 ⁻⁶	0.73 × 10 ⁴	8.55 × 10 ⁻²	0.475	0.428	0.390
28	0.369	30.390 × 10 ⁻⁴	31.79 × 10 ⁻⁶	0.48 × 10 ⁴	15.26 × 10 ⁻²	0.848	0.763	0.694

※ テストピース (5cm × 9cm × 0.1cm) の表面積 = 95.6cm²

次の条件を表-3.34の A_c/A に適用して A_c/A_a を算出する。

$$A = A_c + A_a \quad \dots\dots\dots(3.58)$$

A = 鋼材片の表面積 95.6cm²

算出した A_c/A_a を表-3.35に示す。

表-3.35 ミクロ・セルの A_c/A_a

No.	A_c/A_a			C (mm/yr)
	$\Delta E=0.18(V)$	$\Delta E=0.20(V)$	$\Delta E=0.22(V)$	
1	0.34	0.30	0.26	0.015
2	0.23	0.20	0.18	0.012
3	0.40	0.35	0.31	0.022
4	0.33	0.29	0.26	0.017
5	0.20	0.18	0.16	0.011
6	0.44	0.38	0.33	0.022
7	0.25	0.22	0.20	0.014
8	0.28	0.25	0.22	0.019
9	0.47	0.41	0.36	0.032
10	0.34	0.30	0.26	0.025
11	0.93	0.77	0.65	0.050
12	1.44	1.13	0.93	0.070
13	1.05	0.86	0.72	0.067
14	1.41	1.11	0.92	0.082
15	0.92	0.76	0.65	0.084
16	2.80	1.97	1.52	0.119
17	1.55	1.21	0.99	0.098
18	0.82	0.68	0.58	0.063
19	1.00	0.82	0.69	0.078
20	1.06	0.86	0.73	0.083
21	0.56	0.48	0.42	0.063
22	1.14	0.92	0.77	0.100
23	1.32	1.05	0.87	0.116
24	0.66	0.56	0.48	0.078
25	0.68	0.57	0.49	0.085
26	1.11	0.90	0.75	0.121
27	0.90	0.75	0.64	0.136
28	5.58	3.22	2.27	0.369

表-3.35にもとづいてマイクロ腐食速度 C (mm/yr) と A_c/A_a との関係を図示すると図-3.82, 83, 84となる。図を参照すると $(A_c/A_a)^n$ の n はほぼ1ではないかと推定される。

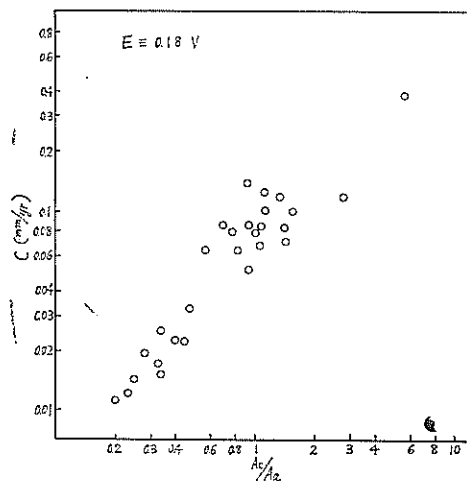


図-3.82 $A_c/A_a \sim C$ の関係 (1)

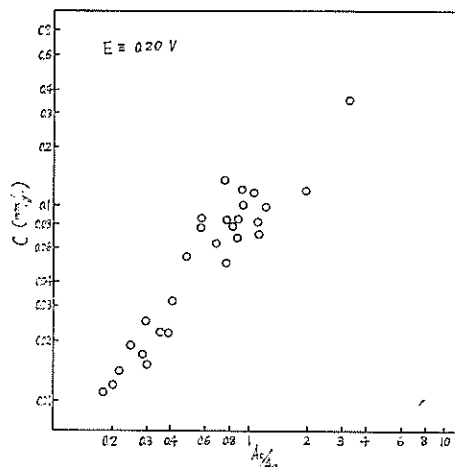


図-3.83 $A_c/A_a \sim C$ の関係 (2)

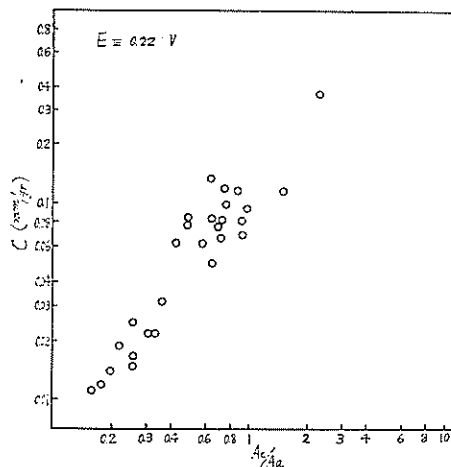


図-3.84 $A_c/A_a \sim C$ の関係 (3)

実験2 砂と粘土の2層の場合(2)

以上の推定結果を確かめるために実験2を行なった。

表-3.36に示す腐食環境A, Bを表-3.37に示す容器4コに入れ、容器の左半分がA層、右半分がB層となるようにする。このとき容器No.1には環境No.1を入れるというように容器No.と環境No.とを一致させる。

表-3.36 腐食環境

No.	アノード環境	カソード環境
1	砂質粘土~水道水	砂 ~水道水
2	粘 土~水道水	砂 ~水道水
3	粘 土~海水	砂 ~海水
4	粘土~海水を含む水道水	砂~海水を含む水道水

表-3.37 テストピース埋設位置

No.	埋 設 容 器	r ₁ (cm)	r ₂ (cm)	r ₃ (cm)
1	90cm×100cm×30cm	15	5	5
2	内径50cm, 深サ40cm	5	5	5
3	75cm×100cm×30cm	15	5	5
4	90cm×100cm×30cm	15	5	5

準備した環境A, BにA₂, B₂をA, B両層にまたがるように埋設する。A₂, B₂の形状、寸法は表-3.38の通りである。テストピースのNo.も容器および環境No.と一致させる。

表-3.38 テストピースの形状寸法と表面積比

No.	Anode (A ₂) (cm)	Cathode (B ₂) (cm)	表面積比 A _c /A _a
1	4×8 ×0.1	2×2 ×0.1	0.13
	4×4 ×0.1	2×2 ×0.1	0.25
	2×4 ×0.1	2×2 ×0.1	0.50
	2×3 ×0.1	2×2 ×0.1	0.67
	2×2 ×0.1	2×2 ×0.1	1.0
	2×2 ×0.1	2×3 ×0.1	1.5
	2×2 ×0.1	2×4 ×0.1	2.0
	2×2 ×0.1	4×4 ×0.1	4.0
2	2×2 ×0.1	4×8 ×0.1	8.0
	4×8 ×0.1	2×2 ×0.1	0.13
	4×4 ×0.1	2×2 ×0.1	0.25
	2×4 ×0.1	2×2 ×0.1	0.50
	2×3 ×0.1	2×2 ×0.1	0.67
	2×2 ×0.1	2×2 ×0.1	1.0

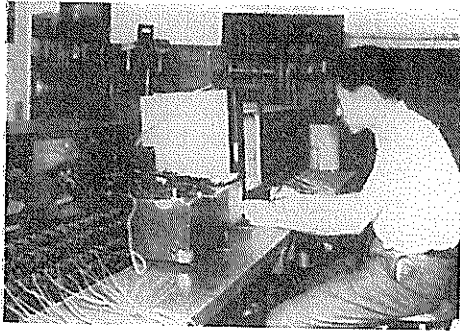
表3.38 (続)

No.	Anode (A ₂) (cm)	Cathode (B ₂) (cm)	表面積比 A _c /A _a
3	10×10 ×0.1	1×1 ×0.1	0.01
	4×8 ×0.1	1×1 ×0.1	0.03
	4×5 ×0.1	1×1 ×0.1	0.05
	1×1.5×0.1	1×1 ×0.1	0.1
	2×3 ×0.1	1×1 ×0.1	0.17
	2×2 ×0.1	1×1 ×0.1	0.25
	1×2 ×0.1	1×1 ×0.1	0.5
	1×2.5×0.1	1×1 ×0.1	0.67
	1×1 ×0.1	1×1 ×0.1	1.0
	1×1 ×0.1	1×1.5×0.1	1.5
	1×1 ×0.1	1×2 ×0.1	2.0
	1×1 ×0.1	2×2 ×0.1	4.0
	1×1 ×0.1	2×3 ×0.1	6.0
	1×1 ×0.1	4×2.5×0.1	10.0
	1×1 ×0.1	4×5 ×0.1	20.0
	1×1 ×0.1	4×8 ×0.1	32.0
1×1 ×0.1	10×10 ×0.1	100.0	
4	10×10 ×0.1	1×1 ×0.1	1.01
	4×8 ×0.1	1×1 ×0.1	0.03
	4×5 ×0.1	1×1 ×0.1	0.05
	4×2.5×0.1	1×1 ×0.1	0.1
	2×3 ×0.1	1×1 ×0.1	0.17
	2×2 ×0.1	1×1 ×0.1	0.25
	1×2 ×0.1	1×1 ×0.1	0.5
	1×1.5×0.1	1×1 ×0.1	0.67
	1×1 ×0.1	1×1 ×0.1	1.0
	1×1 ×0.1	1×1.5×0.1	1.5
	1×1 ×0.1	1×2 ×0.1	2.0
	1×1 ×0.1	2×2 ×0.1	4.0
	1×1 ×0.1	2×3 ×0.1	6.0
	1×1 ×0.1	4×2.5×0.1	10.0
	1×1 ×0.1	4×5 ×0.1	20.0
	1×1 ×0.1	4×8 ×0.1	32.0
1×1 ×0.1	10×10 ×0.1	100.0	

A₂, B₂の埋設位置は表-3.37のようにした。

r₁, r₂, r₃の示す距離は図-3.69と同じである。

このような要領で埋設したA₂, B₂はそのまま短絡せずA₂, B₂からでている電線を図-3.85に示すマクロ腐食研究用装置に接続する。



図—3.85 試作マクロ腐食速度測定装置

マクロ腐食研究用装置はマクロ腐食速度推定のために上記の仮定を十分検討する目的で試作されたもので、大別して操作盤と計測部分よりできている。計測部分によって A_2 , B_2 間のガルバニック電流 (μA), A_2 , B_2 の開路電位 ($-mV$) および短絡時の A_2 , B_2 の電位 ($-mV$), A_2 , B_2 間の抵抗 (Ω), 環境 A, B の比抵抗 ($\Omega-cm$) ならびにカソード分極係数 ($\Omega-m^2$) が随時測定できる。このうち電位は自記記録もできるようになっている。操作盤は A_2 , B_2 比抵抗ならびにカソード分極係数測定電極などを各測定項目の測定回路に直ちに切換えるものである。

もし A_2 の腐食速度 (A_2 , B_2 よりなるマクロ・セルのアノードとなる方の鋼材片 A_2 の腐食速度で以下単にマクロ腐食速度という) C が

$$C \propto k \cdot (A_c/A_a)^{n-1} \dots\dots\dots(3.59)$$

となるならば、 k すなわち $J E / r_e$ が A_c/A_a によって支配されることが推察される。しかし $J E$ は上記仮定によって一定と考えられるから結局 r_e が A_c/A_a の影響をかかえ込むことになって検討がさらに複雑となるので、各測定項目を入念にマクロ腐食研究装置を用いて測

定することにした。マクロ腐食速度 C (mm/yr) は A_2 , B_2 間に流れるガルバニック電流 i (μA) から (3.60) 式から算出するとともに最後は重量減量からも算出した。

$$C = \frac{9.128 \times 10^{-2} \times i}{7.86 \times A_a} \text{ (mm/yr)} \dots\dots\dots(3.60)$$

i : ガルバニック電流 (μA)

A_a : A_2 の表面積 (cm^2)

(3.60) 式に代入する i (μA) を任意の腐食期間に適当な電流計で測定することによって A_2 を上げなくても任意の腐食期間のマクロ腐食速度が継続的に測定できることになる。

ただし、 B_2 の腐食速度は B_2 を上げてから B_2 の埋設前後における重量変化から (2.4) 式で算出する方法によらなければならない。

操作盤の切換えによって次のように各測定を行なった。

環境の比抵抗 ρ_a (A 層の比抵抗), ρ_c (B 層の比抵抗) は室内用電極をそれぞれ A, B 層に挿入して (3.15) の関係から算出した。短絡時の A_2 , B_2 の電位は短絡した状態の A_2 , B_2 の連結点を電位計の(-)に接続し、 A_2 または B_2 の表面近くにおいて比較電極 (海水塩化銀電極) を電位計の(+)に接続して測定した。 A_2 , B_2 の開路電位は A_2 , B_2 の短絡回路を開いてから A_2 , または B_2 を電位計の(-)に接続し、A 層または B 層中に差し込んだ比較電極 (海水塩化銀電極) を電位計の(+)に接続して測定した。 A_2 , B_2 の開路電位は回路を開いてからの経過時間によって変化してある一定値に近づいて行くために、開路電位は回路を開いてから一定時間毎に一定値となるまで測定した場合と単に一定値となった値だけを測定した場合とがある。前者の測定方法はとくにマクロ・セルの分

表—3.39 電位および抵抗測定値

Ac/Aa	Ea (-mV)				Ec (-mV)				Re (Ω)			ρ_a	ρ_c	
	埋設時	35 day	84 day	359day	埋設時	35 day	84 day	359day	136day	167 day	359 day	359 day	167 day	359 day
0.13	710	729	738	514	508	392	358	342	8,659	8,700	>10,000	32,832	40,600	>70,000
0.25	707	708	725	499	480	405	362	320	8,329	8,100	>10,000	32,832	40,600	>70,000
0.50	716	710	730	530	470	382	339	331	8,734	8,500	>10,000	32,832	40,600	>70,000
0.67	731	719	731	600	464	367	319	350	8,875	8,300	>10,000	32,832	40,600	>70,000
1.0	719	710	720	568	430	380	349	382	6,842	6,400	>10,000	32,832	40,600	>70,000
1.5	742	715	729	649	482	381	292	380	7,623	7,400	9,900	32,832	40,600	>70,000
2.0	717	699	728	641	489	369	320	319	6,773	6,500	9,800	32,832	40,600	>70,000
4.0	721	704	721	500	465	339	290	270	4,515	4,500	9,400	32,832	40,600	>70,000
8.0	700	696	720	600	526	391	356	340	3,358	3,700	9,100	32,832	40,600	>70,000

表—3.40 電流値および粘土層中鋼材の腐食速度（電流値より換算）

Ac/Aa	I (μA)					C (mm/yr)				
	136 day	167 day	261 day	322 day	359 day	136 day	167 day	261 day	322 day	359 day
0.13	14	20	10	3	3	0.005	0.007	0.004	0.001	0.001
0.25	15	20	10	5	3	0.011	0.015	0.008	0.005	0.002
0.50	13	21	10	5	3	0.018	0.030	0.015	0.008	0.004
0.67	17	27	14	7	6	0.033	0.052	0.027	0.014	0.012
1.0	25	38	24	12	8	0.073	0.110	0.070	0.035	0.023
1.5	18	30	17	10	7	0.052	0.087	0.049	0.029	0.020
2.0	18	30	18	10	8	0.052	0.087	0.052	0.029	0.023
4.0	31	43	12	12	6	0.090	0.125	0.035	0.035	0.017
8.0	53	70	49	25	18	0.154	0.203	0.142	0.073	0.052

極模様を調べるためのものである。

A₂, B₂間の抵抗はA₂, B₂をA. C.ブリッジに接続して測定した。カソード分極係数は環境の比抵抗測定のためにA層またはB層に挿入した室内用測定電極を用いてガルバニック電流密度 I_{KD} を測定し、 I_{KD} を (3.44) 式に代入して算出された。

実験水槽 No.1 についてのA₂, B₂の開路電位 E_a , E_c , A₂, B₂間の抵抗 R_e , およびA層, B層の比抵抗 ρ_a , ρ_c の測定値を表—3.39に, A₂, B₂間のガルバニック電流 I および I より算出したA₂の腐食速度 C の値を表—3.40に示す。

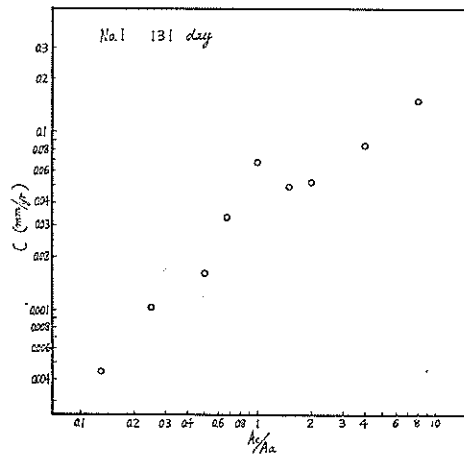
表—3.39より A_c/A_a と開路電位との関係をもてみるととくに開路電位は A_c/A_a によって変化しないようである。しかし電気伝導度の方は A_c/A_a に反比例しているが, これは A_c/A_a の小さいときすなわち大きいA₂が電気伝導性の良いA層に埋設されるからである。

また表—3.39よりA₂, B₂間の開路電位差 ΔE を求めてみると表—3.41のようになって, マクロ・セル形成後1年経ってもマクロ・セルは存在していることがわかる。

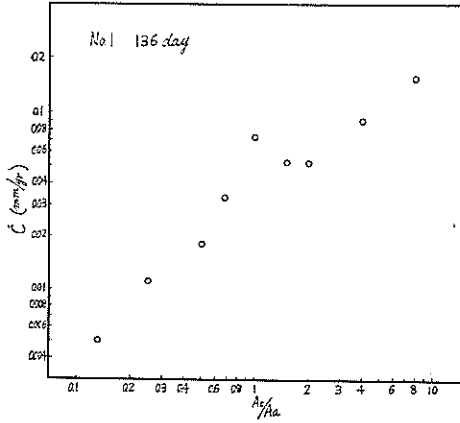
表—3.41 開路電位差

Ac/Aa	ΔE (mV)			
	埋設時	35日後	84日後	359日後
0.13	202	337	380	172
0.25	227	303	363	179
0.50	246	328	391	199
0.67	267	352	412	250
1.0	289	330	371	186
1.5	260	334	437	269
2.0	228	330	408	322
4.0	256	365	431	230
8.0	174	305	364	260

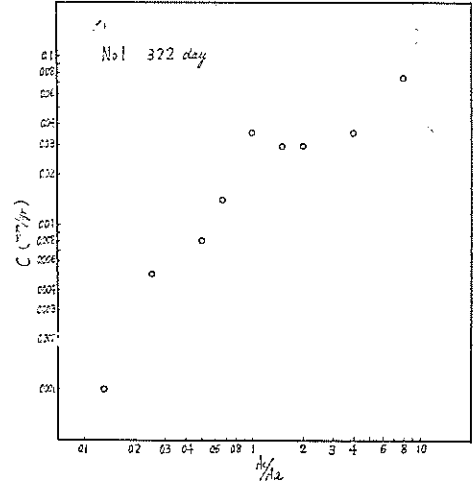
一方表—3.39の R_e , ρ_c は1年後では埋設時に比らべて大巾に増大している。 R_e 増加も ρ_c の変化を参照すると主にB層の電気伝導度低下に起因するものと推定される。 ρ_a は埋設時の値を測定していないので変化の程度が掴めない。 ρ_c の増加はB層が砂層で容器の上部を単にビニール布で覆った程度であったから砂層中の水分が次第に蒸発して行ったためと解釈される。次に表—3.40の腐食速度を参照すると埋設後260日くらいまでは腐食速度には大した変化はみられないが, 300日を越すと急減している。これは表—3.39の R_e , ρ_c の経日変化と比べると腐食環境の変質（電気伝導度の低下）にもつらよるものも考えられる。マクロ腐食速度と A_c/A_a の関係を図示すると図—3.86~91に示すようになる。



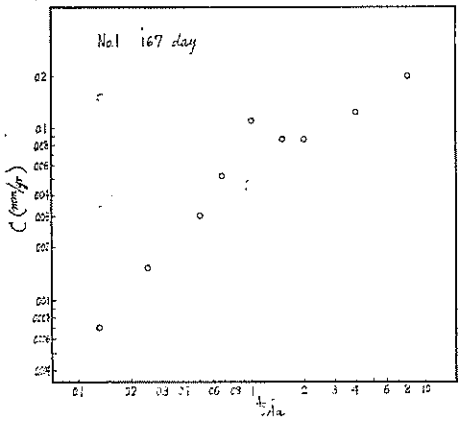
図—3.86 アノード環境（粘土層）中鋼材腐食速度と A_c/A_a の関係



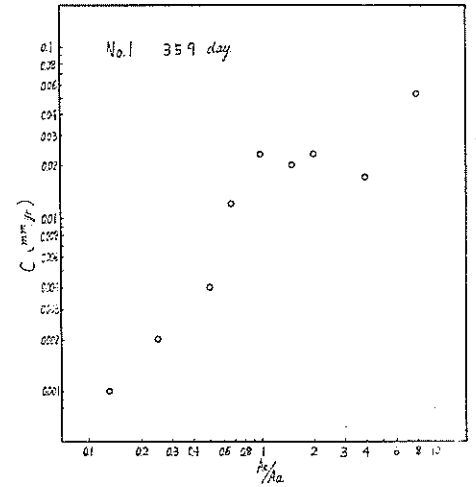
図—3.87 アノード環境（粘土層）中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



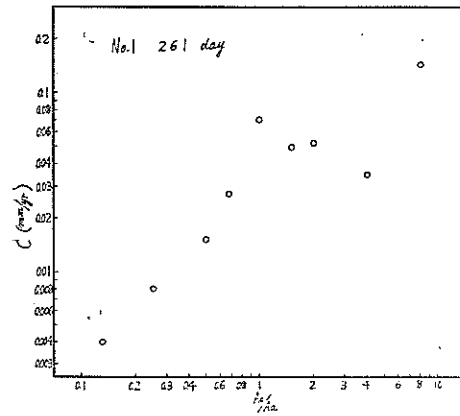
図—3.90 アノード環境（粘土層）中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.88 アノード環境（粘土層）中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.91 アノード環境（粘土層）中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.89 アノード環境（粘土層）中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

図—3.86~91によれば C と A_c/A_a の間には一次的な関係が成立すると考えられる。

実験水槽 No.2 についての A_2 、 B_2 の開路電位、 A_2 、 B_2 間の抵抗および A 、 B 層の比抵抗測定値を表—3.42 に示す。また、 A_2 、 B_2 間のガルバニック電流 I および I より算出した A_2 の腐食速度 C の値を表—3.43 に示す。

表—3.42 電位および抵抗測定値

Ac/Aa	Ea (-mV)※			Ec (-mV)※			Re (Ω)		ρa(Ω-cm)		ρc (Ω-cm)	
	埋設時	84 day	359 day	埋設時	84 day	359 day	167 day	359 day	359 day	day	167 day	359 day
0.13	761	711	733	471	399	481	1,600	2,770	1,733		40,300	43,320
0.25	760	668	684	470	400	302	2,400	2,800	"		"	"
0.50	731	675	720	548	420	450	1,580	2,100	"		"	"
0.67	754	652	670	494	389	401	2,540	3,190	"		"	"
1.00	746	722	726	541	431	594	1,800	2,960	"		"	"

※ 海水塩化銀電極基準

表—3.43 電流値および粘土層中鋼材腐食速度(電流値上り換算)

Ac/Aa	I (μA)				C (mm/yr)			
	167 day	261 day	322 day	359 day	167 day	261 day	322 day	359 day
0.13	70	2	13	12	0.025	0.0007	0.0047	0.0044
0.25	37	35	19	17	0.027	0.025	0.014	0.012
0.50	55	52	25	19	0.080	0.075	0.036	0.028
0.67	25	25	14	12	0.048	0.048	0.027	0.023
1.00	45	24	10	9	0.131	0.070	0.029	0.026

表—3.42からA₂, B₂の開路電位差ΔEを求めると表—3.44のようになる。ただしNo.2は都合によりAc/Aaが1または1以下のときの値である。

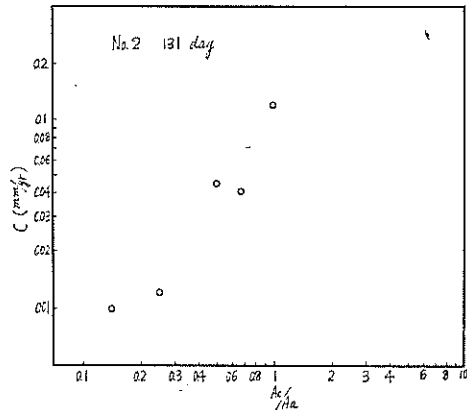
表—3.44 開路電位差

Ac/Aa	ΔE (mV)		
	埋設時	84日後	359日後
0.13	290	312	252
0.25	290	268	382
0.50	183	255	270
0.67	260	263	269
1.00	205	291	132

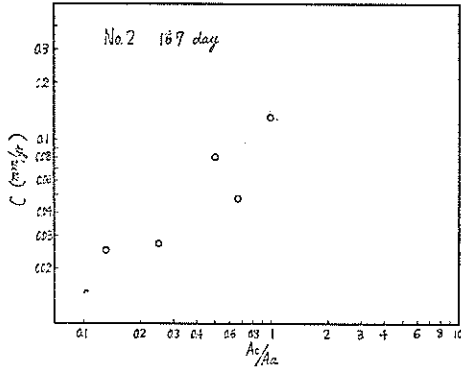
表—3.44によればNo.1と同じくNo.2の場合もマクロセルが1年後も発生していることがわかる。表—3.42よりR_cが時間の経過とともに増加していることがわかる。これはNo.1の環境と同様にNo.2の環境も水分の逸散による変質が起ったと考えられる。

Ac/AaとA₂, B₂の開路電位の関係はNo.1と同じくないようである。

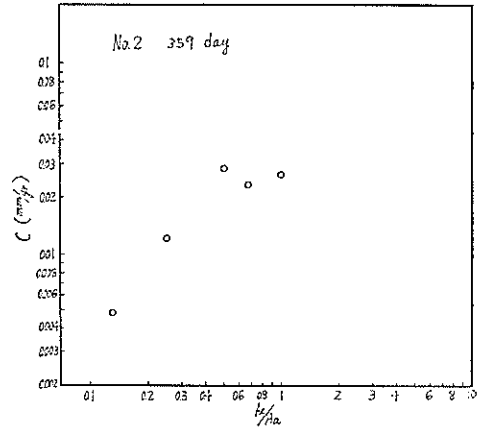
表—3.43からAc/Aaとマクロ腐食速度Cとの関係を図示すると図—3.92~96の通りである。



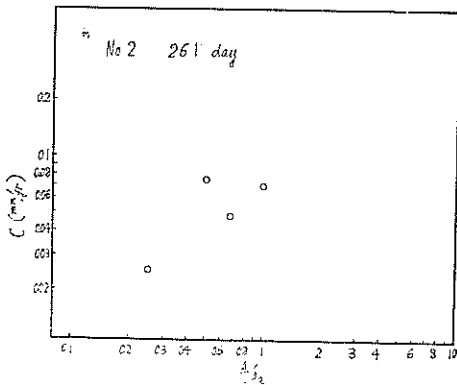
図—3.92 アノード環境(粘土層)中鋼材の腐食速度とAc/Aaの関係



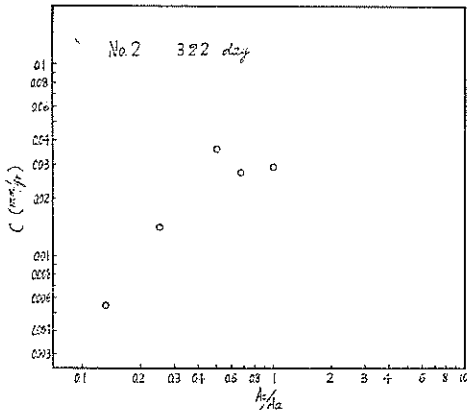
図—3.93 アノード環境(粘土層)中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.96 アノード環境(粘土層)中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.94 アノード環境(粘土層)中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.95 アノード環境(粘土層)中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

図—3.92~96によれば C と A_c/A_a との間には No.1 のときと同じく一次の関係があると思われる。

No.1, No.2 についての検討結果をさらにはっきりさせるために No.3, No.4 について以下のような測定をした。

No.3, No.4 は A_c/A_a の影響をさらにくわしく検討するために A_c/A_a の範囲を拡げて 0.01~100 とした。

まず実験水槽 No.3 についての測定結果を示す。

表—3.45 に A_2 の開路電位 E_a を示す。これは開路後安定したときの A_2 の単極電位である。ただし埋設後 21 日目の値は開路電位の外に A_2 , B_2 短絡時の A_2 の電位も測定した。また参考として A 層に単独で埋設した鋼材片 A_1 の単極電位を測定した。

表—3.46 に B_2 の開路電位 E_c , B 層中の単極電位を示す。腐食期間が 21 日では B_2 の開路電位の外に短絡時の B_2 の電位を測定した。

表—3.45, 46 から A_2 , B_2 間の開路電位差 ΔE を算出すると表—3.47 に示すようになり、腐食期間が 260 日であってもマクロ・セルはいぜんとして発生していることが明らかである。

表—3.47 によれば開路電位差 ΔE は A_c/A_a が大きくなるにつれて減少する傾向がみられる。これは A_c/A_a が大きくなるにつれて A_2 から B_2 に流入する電流量では B_2 面上に発生するマイクロ腐食を抑制することが不十分となって B_2 面上にもマイクロ腐食が発生し、 A_c/A_a が非常に大きくなるにつれて B_2 の腐食速度は B_1 の腐食速度に接近してくる。したがって B_2 の開路電位も B_1 の単極電位に近づくことになり ΔE は減少するものと考えられる。

次に開路電位を測定するために A_2 , B_2 の回路を開いた

表-3.45 ア ノ ー ド 電 位

A_c/A_a	Ea (-mV) (海 水 塩 化 銀 電 極 基 準)														
	埋設時	1日	3日	4日	7日	8日	10日	11日	13日	15日	17日	18日	21日	21日※	258日
0.01	716	734	737	735	730	732	728	730	725	725	720		722	729	709
0.03	723	739	738	741	739	741	739	738	733	732	728		733	736	710
0.05	714	735	719	722	715	718	718	720	720	725	719		718	723	720
0.10	720	735	737	732	742	737	735	734	703	706	701		706	701	688
0.17	723	732	733	731	740	739	732	730	732	731	724		704	710	716
0.25	720	730	737	729	735	736	738	731	729	730	730		724	729	709
0.50	710	729	735	729	738	737	731	731	731	730	725		726	725	709
0.67	711	724	724	721	728	729	725	730	723	719	718		717	715	701
1	705	722	729	722	729	729	726	724	725	720	718		721	702	711
1.5	706	722	722	719	723	727	723	726	720	720	715		717	695	709
2	718	726	722	721	727	730	724	726	723	720	715		722	692	699
4	713	714	721	720	724	722	714	719	716	709	713		708	676	687
6	714	714	712	716	720	721	717	719	710	713	709		711	602	679
10	715	711	708	711	720	719	708	712	703	705	700		703	653	662
20	703	708	709	705	715	717	700	710	696	696	698		701	639	690
32	695	707	695	701	707	708	691	692	687	689	683		683	602	252
100	689	703	704	701	708	708	693	689	689	689	690		688	600	692
単 独	651	740	743	740	738	740	735	636	730	733		729			

※ 短絡時の電位

表-3.46 カ ソ ー ド 電 位

A_c/A_a	Ec (-mV) (海 水 塩 化 銀 電 極 基 準)														
	埋設時	1日	3日	4日	7日	8日	10日	11日	13日	15日	17日	18日	21日	21日※	258日
0.01	409	348	357	348	321	320	266	273	310	301	299		299	711	340
0.03	380	329	339	327	289	291	263	277	290	255	279		336	731	390
0.05	349	327	293	281	241	240	220	228	238	232	229		274	715	458
0.10	395	331	313	311	271	272	250	270	263	221	245		299	698	300
0.17	453	341	327	324	290	284	258	270	260	223	261		291	712	352
0.25	414	324	315	313	300	297	259	291	281	259	280		307	712	340
0.50	492	339	501	341	326	329	301	317	321	279	310		354	716	418
0.67	390	329	307	303	262	251	305	240	232	195	219		251	702	382
1	497	334	317	287	263	269	248	310	243	244	220		250	703	347
1.5	462	347	295	280	260	256	230	231	222	213	214		234	690	301
2	388	342	307	289	263	266	236	249	244	207	225		254	684	300
4	402	339	290	247	266	216	198	198	201	185	186		195	672	150
6	454	415	377	372	350	348	249	251	242	214	211		216	661	210
10	467	439	354	322	307	304	274	271	250	218	210		216	644	191
20	535	537	498	498	452	448	429	422	408	373	368		343	626	441
32	553	584	575	571	554	551	544	542	530	468	516		508	603	490
100	547	587	578	569	553	550	549	543	534	520	522		507	583	509
単 独	504	570	562	569	547	550	552	550	533	538	541	531	529		

※ 短絡時の電位

表—3.47 開 路 電 位 差

A_c/A_a	ΔE (mV)													
	埋設時	1 日	3 日	4 日	7 日	8 日	10日	11日	13日	15日	17日	18日	21日	258日
0.01	307	386	380	387	409	412	462	457	415	424	421		423	369
0.03	343	410	399	414	450	450	476	461	443	477	431		397	320
0.05	365	408	426	441	474	478	498	492	482	493	490		444	262
0.10	325	404	424	421	471	465	485	464	440	485	456		407	388
0.17	270	391	406	407	450	455	474	460	472	508	463		413	364
0.25	306	406	422	416	435	439	479	472	448	471	450		417	369
0.50	218	390	234	388	412	408	430	414	410	451	415		372	291
0.67	321	395	417	418	466	478	420	490	491	524	499		466	319
1	208	388	412	435	466	460	478	414	422	476	498		471	364
1.5	244	375	427	439	463	471	493	495	498	507	501		483	408
2	330	384	415	432	464	464	488	477	479	513	490		468	399
4	311	375	431	473	458	506	516	521	515	524	527		513	537
6	260	299	335	344	370	373	468	470	468	499	498		495	469
10	248	272	354	389	413	415	434	438	453	487	490		487	471
20	168	171	211	207	263	269	271	281	288	323	330		358	249
32	142	123	120	130	153	157	147	148	157	221	167		175	162
100	142	116	126	132	155	158	144	140	155	169	168		181	183
単 独	147	170	181	171	191	190	183	84	197	195		198		

表—3.48 アノード電位の経時変化

A_c/A_a	E_a (-mV) (海水塩化銀電極基準)														
	259 日														
	0' ~ 10'	10' ~ 20'	20' ~ 30'	30' ~ 40'	40' ~ 50'	50' ~ 60'	60' ~ 70'	70' ~ 80'	80' ~ 90'	90' ~ 100'	100' ~ 110'	110' ~ 120'	120' ~ 130'	130' ~ 140'	140' ~ 150'
00.1	700	700	700	703	702	701	700	702	702	700	700	700	700	702	700
0.03	710	705	702	710	712	709	710	705	708	709	709	709	710	709	702
0.05	722	720	720	720	720	719	719	721	720	720	719	716	719	719	720
0.10	680	680	680	680	680	672	680	672	682	680	680	680	678	678	678
0.17	709	710	710	708	706	710	709	703	709	705	704	709	709	706	702
0.25	702	710	710	710	710	710	710	705	702	705	703	706	701	705	708
0.50	706	707	703	705	700	705	703	706	702	701	701	705	701	706	704
0.67	695	700	699	699	706	703	694	698	696	698	698	700	700	704	694
1	700	708	701	704	708	701	702	702	702	706	703	700	701	702	700
1.5	699	700	699	700	696	698	700	698	695	700	692	692	695	695	699
2	690	701	699	700	700	699	700	700	700	698	692	690	700	698	690
4	669	681	689	684	681	685	683	680	682	680	682	680	680	682	678
6	649	670	672	672	678	679	672	672	680	680	680	680	679	680	680
10	631	656	660	660	660	662	660	660	661	660	660	660	660	666	660
20	661	681	688	685	688	690	690	690	688	685	684	685	690	684	690
32	625	644	646	650	652	660	660	659	660	660	660	660	660	661	666
100	664	686	690	691	694	690	690	690	690	690	690	691	690	685	690

表-3.49 カソード電位の経時変化

A_c/A_a	$E_c (-mV)$ (海水塩化銀電極基準)														
	259 day														
	0'~ 10'	10'~ 20'	20'~ 30'	30'~ 40'	40'~ 50'	50'~ 60'	60'~ 70'	70'~ 80'	80'~ 90'	90'~ 100'	100'~ 110'	110'~ 120'	120'~ 130'	130'~ 140'	140'~ 150'
0.01	411	385	375	371	360	351	345	340	330	320	310	300	300	300	294
0.03	541	470	429	403	398	391	390	389	380	388	390	380	380	378	380
0.05	570	511	479	461	462	460	454	451	451	450	452	451	448	454	457
0.10	490	410	370	334	321	308	300	290	288	280	280	271	272	270	270
0.17	521	452	419	381	373	365	354	340	334	331	322	321	310	310	306
0.25	441	420	400	381	369	360	351	340	335	330	330	324	320	314	312
0.50	588	540	505	480	456	440	419	400	385	371	370	360	350	338	340
0.67	424	395	384	381	382	381	381	385	381	382	381	381	382	380	386
1	432	409	398	393	380	368	361	350	340	332	332	324	318	318	308
1.5	391	360	342	332	330	321	310	300	281	272	270	270	270	262	262
2	433	372	359	341	330	321	311	306	300	275	298	291	290	282	278
4	251	214	194	179	165	165	159	155	152	154	152	155	150	150	150
6	270	251	240	230	220	220	210	202	200	200	200	200	198	190	192
10	261	228	220	209	200	200	190	190	194	186	180	180	178	179	178
20	449	445	442	440	440	440	441	440	439	440	441	440	441	438	441
32	490	490	489	488	489	490	488	490	485	490	490	490	490	490	491
100	504	509	501	500	508	502	504	502	500	508	500	502	500	508	502

表-3.50 アノード環境の比抵抗変化

A_c/A_a	$\rho_a (\Omega-cm)$												
	埋設時	1日	3日	4日	7日	8日	10日	11日	13日	15日	18日	21日	258日
0.01	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
0.03	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
0.05	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
0.10	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
0.17	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
0.25	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
0.50	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
0.67	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
1	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
1.5	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
2	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
4	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
6	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
10	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
20	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
32	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
100	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	
単独	221	251	214	220	260	261	252	275	269	296	301	258	

表-3.51 カソード環境の比抵抗変化

A_c/A_a	$\rho_c (\Omega\text{-cm})$													
	埋設時	1日	3日	4日	7日	8日	10日	11日	13日	15日	18日	21日	29日	258日
0.01	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
0.03	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
0.05	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
0.10	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
0.17	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
0.25	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
0.50	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
0.67	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
1	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
1.5	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,482	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
2	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
4	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
6	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
10	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
20	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
32	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
100	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920
単 独	2,386	2,250	2,531	2,614	3,481	3,485	3,538	3,678	3,553	3,572	3,876	4,036	5,010	12,920

ときの A_2 の電位変化を測定してみると表-3.48のようになり、 B_2 の測定結果は表-3.49となる。

表-3.48によれば E_a は A_c/A_a に関係なく開路後直ちに一定値となることがわかる。一方表-3.49によれば E_c は A_c/A_a が大きくなるにつれて開路後すぐに安定した値となるが A_c/A_a が小さくなるにつれて ΔE が安定するまでの時間が長くなる傾向がみられる。

表-3.50にA層の比抵抗変化を、表-3.51にB層の比抵抗変化を示す。また、 A_2 、 B_2 間の抵抗変化を表-3.52に示す。

表-3.50によればA層の変質はほとんどないようであるが、表-3.51によればB層は水分の逸散による電気伝導度の低下が2カ月以降著しい。この傾向は表-3.52にも見られる。

A_2 、 B_2 間の電流 (A_2 が(-)、 B_2 が(+)) I を電流計で測定して、 I を(2.5)式に代入して算出した A_2 の腐食速度を表-3.53に示す。

表-3.53によればマクロ腐食速度 $C(\text{mm/yr})$ は約2カ月以後では減少しているが、これは上に述べた腐食環境(とくにB層)の変質によるものと考えられる。

表-3.53より A_c/A_a と C との関係を図示すると図-3.97~104の通りである。

表-3.52 A_2 、 B_2 間の抵抗変化

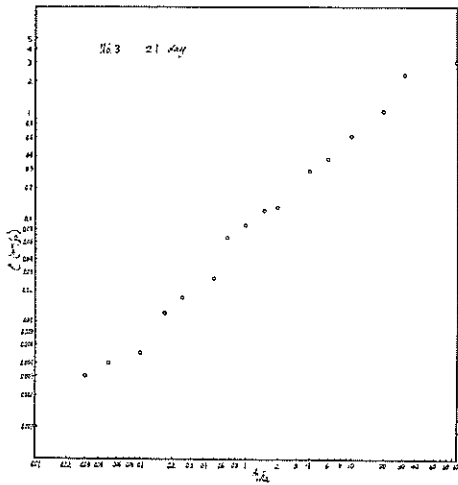
A_c/A_a	$R_c (\Omega)$				
	21day*	35day*	35day**	66day	258day
0.01	1,375	1,440	1,409	1,400	1,900
0.03	1,191	1,324	1,293	1,400	1,980
0.05	1,993	2,060	2,040	1,900	2,300
0.10	1,987	2,124	2,135	2,300	3,400
0.17	1,384	1,537	1,496	1,600	2,540
0.25	1,927	1,996	2,008	1,900	2,600
0.50	1,375	1,525	1,507	1,650	2,800
0.67	1,815	1,878	1,843	1,700	2,260
1	1,546	1,639	1,651	1,670	2,260
1.5	1,343	1,404	1,388	1,420	2,100
2	1,120	1,187	1,174	1,250	1,840
4	610	662	650	650	1,200
6	546	570	566	580	1,060
10	392	409	417	430	960
20	235	249	256	472	2,000
32	74		82	110	1,300
100	75	96	96	220	370

* 開路後1分~15分間の値

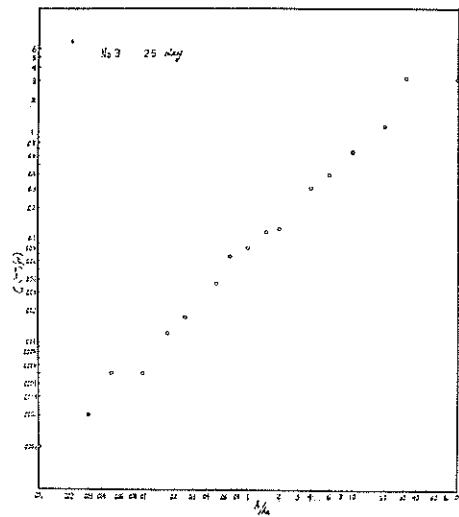
** 開路後15分~30分間の値

表—3.53 粘土層中鋼材の腐食速度 (0~1mAの電流計挿入5分後の値より換算)

A_c/A_a	$I (\mu A)$								$C (mm/yr)$							
	21日	25日	29日	35日	66日	160日	221日	258日	21日	25日	29日	35日	66日	160日	221日	258日
0.01	20	19	19	21	33	38	26	26	0.001	0.0011	0.0011	0.0012	0.0019	0.0022	0.0015	0.0015
0.03	14	13	11	12	23	30	14	17	0.0025	0.0024	0.0020	0.0022	0.0042	0.0054	0.0025	0.0031
0.05	15	16	12	14	27	30	17	22	0.0044	0.0046	0.0035	0.0041	0.0078	0.0087	0.0049	0.0064
0.10	8	8	7	6	12	20	8	8	0.0046	0.0046	0.0041	0.0035	0.0070	0.0116	0.0046	0.0046
0.17	12	12	10	12	19	26	12	12	0.012	0.012	0.010	0.012	0.018	0.025	0.012	0.012
0.25	12	12	12	14	24	34	20	18	0.017	0.017	0.017	0.020	0.035	0.049	0.029	0.026
0.50	9	9	8	8	12	20	6	8	0.026	0.026	0.023	0.023	0.035	0.058	0.018	0.023
0.67	17	17	15	16	34	48	22	23	0.066	0.066	0.058	0.062	0.132	0.186	0.085	0.089
1	15	14	12	12	24	34	21	18	0.087	0.081	0.070	0.070	0.139	0.197	0.122	0.105
1.5	21	20	17	18	30	45	25	21	0.122	0.116	0.100	0.105	0.174	0.261	0.145	0.122
2	22	21	19	19	33	54	22	16	0.218	0.122	0.110	0.110	0.192	0.314	0.128	0.093
4	50	52	42	49	78	108	50	45	0.290	0.302	0.244	0.285	0.453	0.627	0.290	0.261
6	65	70	57	65	108	146	74	66	0.377	0.406	0.331	0.377	0.627	0.848	0.430	0.383
10	106	116	91	102	158	220	99	85	0.616	0.674	0.528	0.592	0.919	1.277	0.575	0.494
20	180	197	183	177	270	87	27	18	1.045	1.144	1.063	1.028	1.568	0.505	0.157	0.105
32	400	571	221	566	672	24	0	2	2.323	3.316	1.277	3.287	3.902	0.139	0	0.012
100	525	533	410	44	8	160	12	11	3.048	3.095	2.381	0.255	0.046	0.929	0.070	0.064



図—3.97 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.98 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

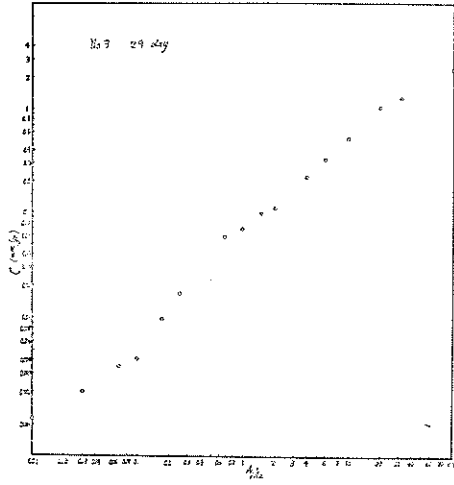


図-3.99 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

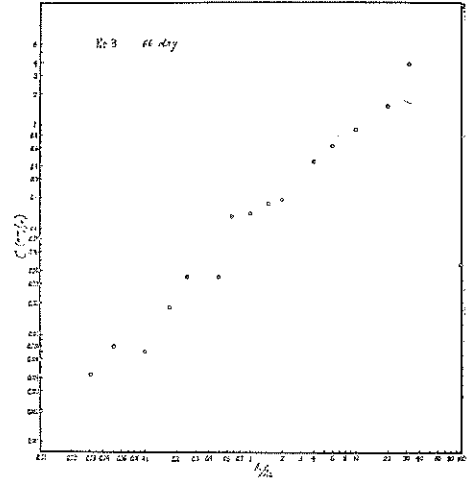


図-3.101 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

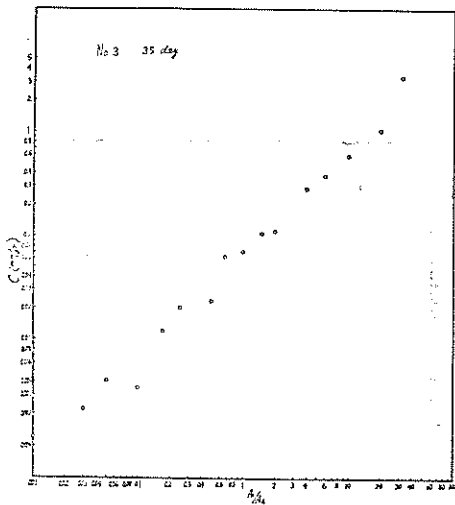


図-3.100 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

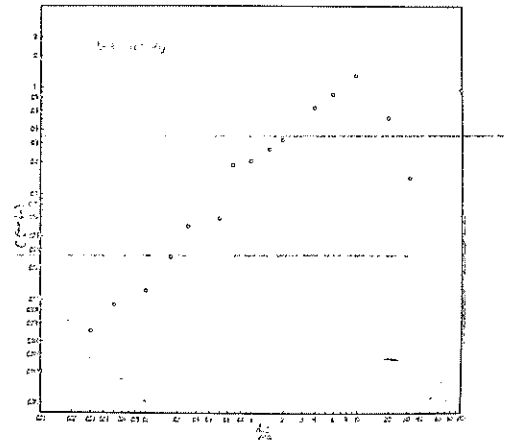


図-3.102 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

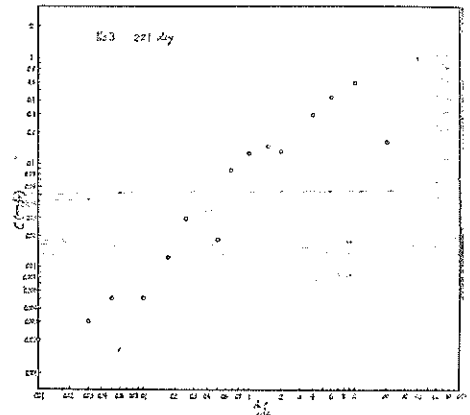


図-3.103 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

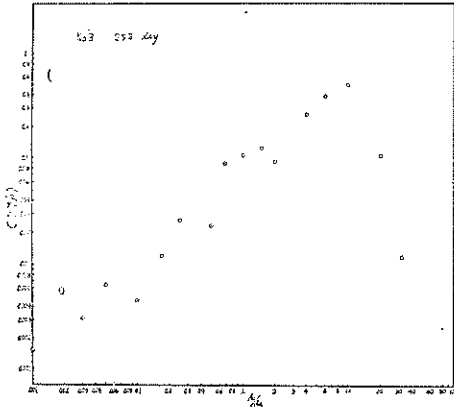


図-3.104 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

図-3.97~104を参照すると C は A_c/A_a によって一次的に変化するとみられるが、この傾向はとくに図-97~101に強い。図-102~104のように環境Bの変質に伴ってB層内の寸法が大きいですなわち A_c/A_a が大きいところでは C は A_c/A_a との一次の関係からはずれているが、B層内の寸法が小さくて変質のひどいB表層付近に触れることが比較的少ない A_c/A_a の範囲では C と A_c/A_a との間には10,000 Ω -cmの環境でも一次の関

表-3.54 アノード電位

A_c/A_a	E_a (-mV) (海水塩化銀電極基準)					
	埋設時	1 日		4 日		239 日
		25'~31'	1 日*	65'~70'	71'~76'	
0.01	734	730	729	729	731	705
0.03	748	739	729	728	731	709
0.05	748	740	734	731	731	710
0.10	743	737	730	732	730	679
0.17	734	732	727	730	729	664
0.25	737	729	714	728	723	698
0.50	733	739	711	717	718	676
0.67	745	720	697	720	717	698
1	739	717	688	714	711	664
1.5	735	720	697	718	715	679
2	735	712	689	716	716	678
4	728	713	687	712	713	652
6	729	710	673	710	713	595
10	744	704	661	708	709	628
20	720	698	650	699	699	670
32	737	694	646	699	695	322
100	738	689	619	688	696	672

* 短絡時の電位

表-3.55 カソード電位

A_c/A_a	E_c (-mV) (海水塩化銀電極基準)											
	埋設時	1 日		4 日								239 日
		25'~31'	1 日*	15'~27'	27'~39'	40'~52'	53'~63'	78'~85'	90'~96'	105'~112'	115'~120'	
0.01	593	312	726	449	463	530	554	582	589	590	591	472
0.03	585	262	730	297	316	376	427	485	503	521	534	521
0.05	575	288	731	315	310	294	309	396	440	493	512	498
0.10	585	407	721	427	466	518	535	545	547	545	549	452
0.17	581	469	718	390	436	491	515	539	544	541	549	446
0.25	594	403	711	394	456	512	530	543	550	556	554	577
0.50	591	611	705	328	310	287	270	344	416	465	482	492
0.67	592	479	696	526	525	527	528	528	530	539	538	490
1	612	435	686	438	450	462	464	471	469	485	482	406
1.5	597	522	689	488	492	493	495	512	518	527	529	534
2	582	460	685	482	484	486	487	490	497	501	497	451
4	580	501	684	490	491	492	493	493	500	502	500	440
6	608	523	667	508	508	510	509	511	511	530	520	600
10	597	576	660	563	563	567	564	568	570	573	570	534
20	620	618	648	589	589	587	589	589	587	594	588	580
32	620	615	638	589	589	587	589	590	585	587	591	500
100	592	598	613	589	589	589	588	589	588	587	590	540

* 短絡時の電位

係が存在する。

次に実験水槽No.4についての測定結果を述べる。

表-3.54に A_2 の開路電位, 短絡時の A_2 の電位を示す。また表-3.55には B_2 の開路電位, 短絡時の B_2 の電位を示す。

表-3.54, 55から A_2, B_2 間の開路電位差 ΔE を求めると表-3.56のようになり, 実験水槽No.4でもNo.3と同じくマクロ・セルが発生していることがわかる。

表-3.57に A_2, B_2 の短絡回路を開路としてからの A_2 の電位変化を, 表-3.58に B_2 の電位変化を示す。

表-3.57によれば A_2 の開路電位は開路後直ちに一定値となるが, 表-3.58によれば B_2 の開路電位は A_c/A_a が大きくなるにつれて (すなわち A_2 からの流入電流密度が減少するにつれて) 一定値となり易いが, A_c/A_a が小さくなるにつれて (すなわち A_2 からの流入電流密度が増大するにつれて) 直ちには安定しなくなる。

表-3.59に環境A, Bの比抵抗変化と A_2, B_2 間の抵抗変化を示す。

表-3.59より環境の変質, とくにB層の水分蒸発による電気伝導度の減少がみられる。

表-3.60に A_2, B_2 間の電流 I および I を (2.5) 式に代入して算出したマクロ腐食速度 C を示す。表-3.

60より C と A_c/A_a との関係を図示すると図-105~113のようになる。

表-3.56 開路電位差

A_c/A_a	ΔE (mV)			
	埋設時	1 日	4 日	239 日
0.01	141	418	149	233
0.03	163	477	246	188
0.05	173	452	335	212
0.10	158	330	185	227
0.17	153	263	190	218
0.25	143	326	180	121
0.50	142	128**	374	184
0.67	153	241	189	208
1	127	282	240	258
1.5	138	198	203	145
2	153	252	226	227
4	148	212	217	212
6	121	187	202	5
10	147	128	358	94
20	100	80	110	90
32	117	79	105	178
100	146	91	107	132

表-3.57 アノード電位の経時変化

A_c/A_a	E_a (-mV) (海水塩化銀電極基準)														
	240 日														
	0~10'	10'~20'	20'~30'	30'~40'	40'~50'	50'~60'	60'~70'	70'~80'	80'~90'	90'~100'	100'~110'	110'~120'	120'~130'	130'~140'	140'~150'
0.01	708	709	702	702	708	710	706	706	702	706	704	709	704	706	702
0.03	708	709	709	709	709	709	706	706	710	710	705	708	709	708	704
0.05	714	712	710	710	710	712	710	708	711	709	710	710	706	710	710
0.10	674	674	678	679	675	671	676	672	675	675	672	672	678	672	675
0.17	666	664	664	663	662	662	664	660	664	664	660	664	664	664	664
0.25	698	696	698	695	694	698	700	698	694	696	695	700	696	694	692
0.50	676	678	672	672	670	674	674	672	670	676	671	670	674	676	672
0.67	704	700	700	702	694	700	700	699	702	702	700	696	698	700	694
1	670	670	669	668	669	666	662	662	661	661	661	664	662	660	666
1.5	679	679	678	678	674	678	680	674	678	680	680	676	676	674	679
2	629	626	628	625	626	630	630	626	624	628	626	630	628	626	629
4	656	658	658	656	652	650	655	652	658	652	652	651	650	654	652
6	600	596	596	594	596	594	598	592	594	590	596	594	594	596	592
10	628	630	628	630	630	639	630	628	631	630	629	630	630	628	630
20	670	672	672	670	670	669	670	670	668	670	671	670	672	670	668
32															
100	480	490	490	490	488	490	490	490	486	490	490	488	490	482	482

表-3.58 カソード電位の経時変化

A_c/A_a	$E_c(-mV)$ (海水塩化銀電極基準)														
	240 日														
	0~10'	10'~20'	20'~30'	30'~40'	40'~50'	50'~60'	60'~70'	70'~80'	80'~90'	90'~100'	100'~110'	110'~120'	120'~130'	130'~140'	140'~150'
0.01	650	549	520	500	480	470	460	456	450	440	434	428	430	430	426
0.03	672	600	574	550	535	520	509	499	490	482	481	470	470	465	462
0.05	660	582	548	524	509	490	480	469	452	442	430	424	418	412	410
0.10	610	520	488	470	455	445	440	431	432	430	428	420	420	420	420
0.17	609	499	472	460	448	440	435	430	428	424	418	414	409	408	404
0.25	581	594	564	542	526	515	502	498	484	480	468	464	460	452	450
0.50	655	552	530	508	499	480	479	470	458	450	440	438	436	430	422
0.67	610	558	524	500	480	461	450	436	421	420	404	399	390	385	380
1	630	444	430	411	400	390	380	370	354	354	342	336	332	324	320
1.5	512	580	559	538	526	518	514	508	498	498	494	490	490	488	486
2	631	470	432	411	390	370	360	350	339	330	320	319	318	311	304
4	550	470	436	416	394	380	369	360	350	348	331	330	324	319	312
6	546	600	600	600	598	601	602	600	602	602	602	602	602	600	602
10	602	540	529	520	512	508	500	500	490	489	482	482	480	480	478
20	579	580	580	579	579	580	580	581	578	580	574	578	580	578	576
32	585	504	504	500	500	500	501	500	500	498	502	500	499	502	500
100	540	539	536	536	536	540	536	538	534	536	538	538	532	539	534

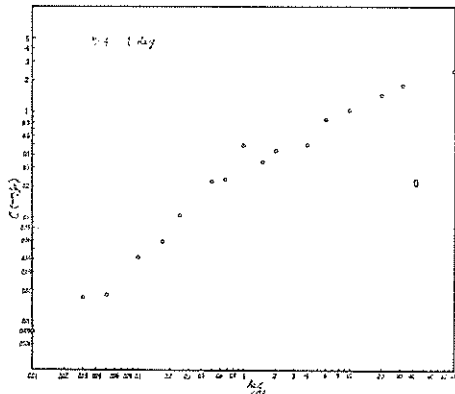
表-3.59 環境抵抗化

A_c/A_a	$\rho_a (\Omega\text{-cm})$		$\rho_c (\Omega\text{-cm})$				$R_c (\Omega)$			
	埋設時	239 日	埋設時	1 日	9 日	239 日	1 日	16 日	47 日	239 日
0.01	228	266	1,365	1,034	752	1,672	223	291	400	1,000
0.03	228	266	1,365	1,034	752	1,672	219	287	480	700
0.05	228	266	1,365	1,034	752	1,672	461	445	690	1,500
0.10	228	266	1,365	1,034	752	1,672	273	401	590	1,000
0.17	228	266	1,365	1,034	752	1,672	292	353	440	990
0.25	228	266	1,365	1,034	752	1,672	205	240	380	800
0.50	228	266	1,365	1,034	752	1,672	257	306	360	1,000
0.67	228	266	1,365	1,034	752	1,672	206	283	440	900
1	228	266	1,365	1,034	752	1,672	182	220	290	690
1.5	228	266	1,365	1,034	752	1,672	158	328	380	700
2	228	266	1,365	1,034	752	1,672	157	268	330	680
4	228	266	1,365	1,034	752	1,672	145	271	350	680
6	228	266	1,365	1,034	752	1,672	108	160	200	450
10	228	266	1,365	1,034	752	1,672	79	116	150	410
20	228	266	1,365	1,034	752	1,672	63	75	100	380
32	228	266	1,365	1,034	752	1,672	55	64	70	490
100	228	266	1,365	1,034	752	1,672	55	59	64	340

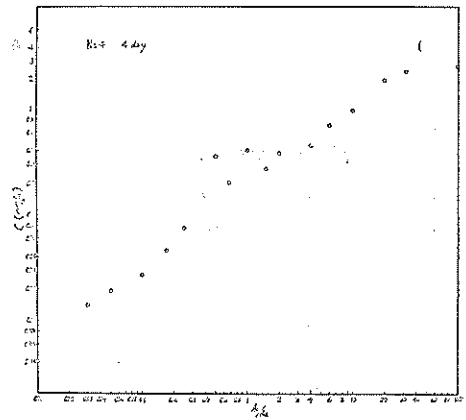
表—3.60 粘土層中鋼材の腐食速度 (0~1 mA 電流計挿入5分後の値より換算)

A_c/A_a	$I (\mu A)$										$C (mm/yr)$									
	1日	4日	5日	9日	16日	47日	141日	201日	239日		1日	4日	5日	9日	16日	47日	141日	201日	239日	
0.01	100	62	46	38	31	27	18	8	7	0.008	0.004	0.0027	0.0022	0.0018	0.0016	0.0010	0.0005	0.0004		
0.03	95	75	41	25	23	20	12	4	4	0.017	0.014	0.0074	0.0045	0.0042	0.0036	0.0022	0.0007	0.0007		
0.05	60	64	45	23	20	20	20	7	6	0.018	0.019	0.013	0.0067	0.0058	0.0058	0.0058	0.0019	0.0017		
0.10	72	46	30	20	18	20	20	9	8	0.042	0.027	0.017	0.012	0.010	0.012	0.012	0.005	0.005		
0.17	61	48	47	26	18	23	22	9	10	0.059	0.046	0.045	0.025	0.017	0.022	0.021	0.009	0.010		
0.25	73	52	42	23	18	20	19	4	4	0.106	0.075	0.061	0.033	0.025	0.029	0.028	0.006	0.006		
0.50	76	122	61	40	30	40	26	15	14	0.221	0.354	0.177	0.116	0.087	0.116	0.075	0.044	0.041		
0.67	69	52	32	22	19	25	23	10	10	0.267	0.201	0.124	0.085	0.074	0.097	0.089	0.039	0.039		
1	84	70	46	36	38	63	44	32	28	0.488	0.406	0.267	0.209	0.221	0.366	0.255	0.186	0.163		
1.5	59	46	30	22	21	32	29	9	10	0.343	0.267	0.174	0.128	0.122	0.186	0.168	0.052	0.058		
2	75	65	49	40	45	50	24	10	8	0.435	0.377	0.285	0.229	0.261	0.290	0.139	0.058	0.046		
4	85	77	55	42	45	61	37	17	12	0.494	0.447	0.319	0.244	0.261	0.354	0.215	0.099	0.070		
6	147	122	79	56	55	70	45	-7	-4	0.854	0.708	0.459	0.325	0.319	0.406	0.261				
10	182	169	122	93	91	85	80	24	22	1.057	0.981	0.708	0.540	0.528	0.494	0.465	0.139	0.128		
20	251	333	227	177	186	230	49	34	29	1.457	1.934	1.318	1.028	1.080	1.336	0.285	0.197	0.168		
32	307	404	273	216	227	346	20	-3	-2	1.783	2.346	1.584	1.254	1.318	2.009	0.116				
100	425	452	360	283	203	300	20	5	5	2.468	2.625	2.090	1.637	1.178	1.742	0.116	0.029	0.029		

図—3.105~110から C と A_c/A_a との間には一次の関係のあることがみられる。図—3.111~113では図—3.101~104と同じく腐食環境の変質により A_c/A_a が1以上のところではマクロ腐食速度 C と A_c/A_a は一次の関係からはずれている。



図—3.105 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.106 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

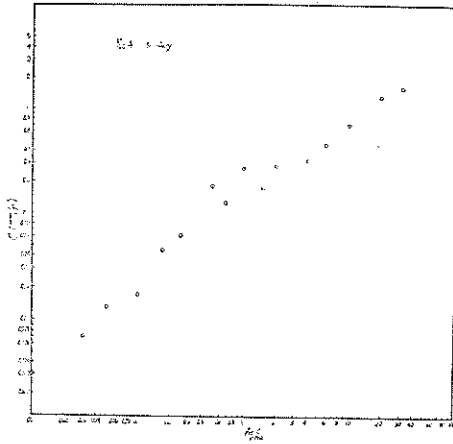


図-3.107 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

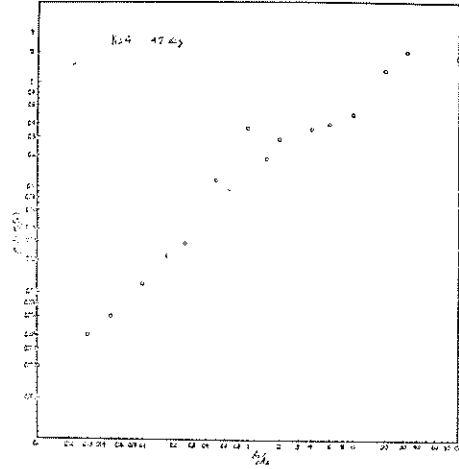


図-3.110 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

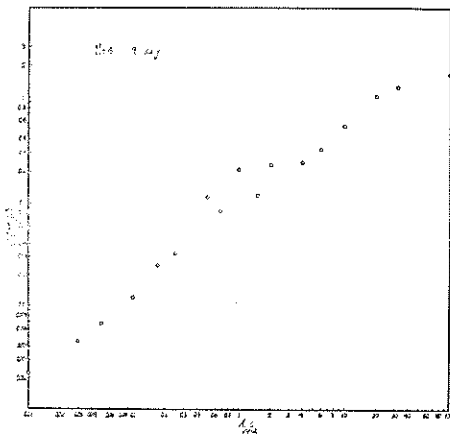


図-3.108 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

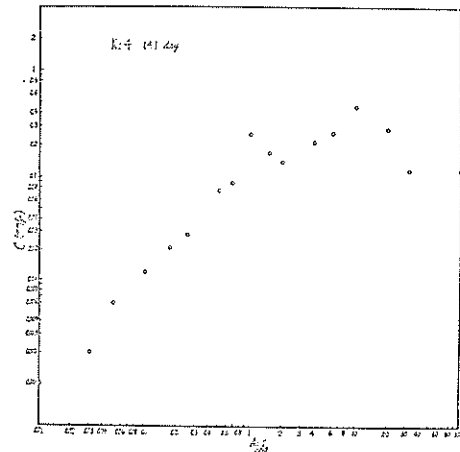


図-3.111 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

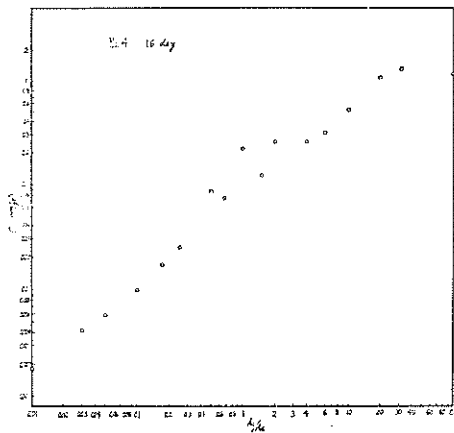


図-3.109 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

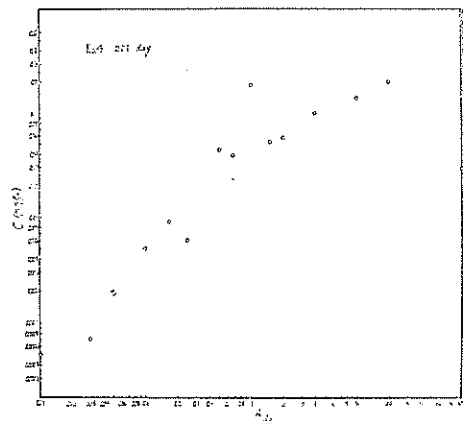
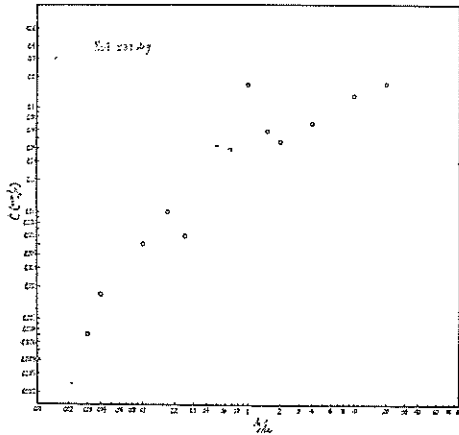


図-3.112 アノード(粘土)層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係



図—3.113 アノード（粘土）層中鋼材の腐食速度と A_c/A_a の関係

実験3 海水と海水飽和砂層の2層の場合(1)

実験1, 2では水分不飽和の砂層と粘土層の2層の場合についてマクロ腐食の傾向を検討してみたが、次に実験3としては海水～砂層のときのマクロ腐食の傾向を調べてみることにした。

実験3の供試体の内容を表—3.61に示す。

A_{sw} は海水中鋼材の表面積, A_s は砂層中鋼材の表面積, W_{sw} は海水中鋼材の重量, W_s は砂層中鋼材の重量である。実験水槽は $1\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ (深さ) の形状, 寸法でこれに海水を入れてから砂を 25cm の厚さ投入する。こうした砂層中にまず $No. a \sim No. t$ 各組の A_s の表面積をもつ鋼材片を埋設する。次に $No. a \sim No. t$ 各組の A_{sw} の表面積をもつ鋼材片を砂層中鋼材の上部海水中に浸漬する。このときの各組の海水中鋼材の間隔および砂層中鋼材の間隔はそれぞれ 10cm である。また $No. a \sim No. s$ の各組の2層中鋼材は浸漬後短絡されたが $No. t$ のみは短絡されずに開路のままである。

海水は小型モーターに取付けられた小さな回転羽根でゆるく攪拌された。

測定項目は電位, 電流, 抵抗, 重量減量および表面観察である。

電位は E_o (短絡電位), E_s (短絡前ならびに短絡後開路とされたときの砂層中鋼材の電位), E_{sw} (短絡前ならびに短絡後開路とされたときの海水中鋼材の電位) があり, いずれも海水塩化銀電極基準として電位計により測定された。単位は $-mV$ である。

表—3.61 実験 3 の 供 試 体

No.	A_{sw}/A_s	海 水 中 鋼 材			砂 層 中 鋼 材			回 路
		$A_{sw}(\text{cm}^2)$	形状寸法(cm)	$W_{sw}(\text{g})$	$A_s(\text{cm}^2)$	形状寸法(cm)	$W_s(\text{g})$	
a	10	80	$5 \times 8 \times 0.1$	31.4826	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8770	短絡
b	9	72	$4.5 \times 8 \times 0.1$	27.5425	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8692	短絡
c	8	64	$4 \times 8 \times 0.1$	28.7630	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8794	短絡
d	7	56	$4 \times 7 \times 0.1$	22.5676	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8710	短絡
e	6	48	$4 \times 6 \times 0.1$	19.0182	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8650	短絡
f	5	40	$4 \times 5 \times 0.1$	15.3490	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8670	短絡
g	4	32	$4 \times 4 \times 0.1$	14.6024	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8460	短絡
h	3	24	$3 \times 4 \times 0.1$	11.4410	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.9120	短絡
i	2	16	$2 \times 4 \times 0.1$	6.4436	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8770	短絡
j	1	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.9230	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8225	短絡
k	1/2	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.7830	16	$2 \times 4 \times 0.1$	6.4472	短絡
l	1/3	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8500	24	$3 \times 4 \times 0.1$	11.5436	短絡
m	1/4	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8935	32	$4 \times 4 \times 0.1$	14.5230	短絡
n	1/5	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8714	40	$4 \times 5 \times 0.1$	15.4084	短絡
o	1/6	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8860	48	$4 \times 6 \times 0.1$	18.9494	短絡
p	1/7	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8810	56	$4 \times 7 \times 0.1$	22.1292	短絡
q	1/8	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.7804	64	$4 \times 8 \times 0.1$	29.0800	短絡
r	1/9	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.8990	22	$4.5 \times 8 \times 0.1$	28.1040	短絡
s	1/10	8	$2 \times 2 \times 0.1$	2.9380	80	$5 \times 8 \times 0.1$	31.9700	短絡
t	1	24	$3 \times 4 \times 0.1$	11.4412	24	$3 \times 4 \times 0.1$	11.4148	開路

電流は2層中鋼材間に D.C. 電流計 (100 μA) を挿入して測定された。単位は μA である。

抵抗は2層中鋼材の抵抗を A.C. ブリッジで測定した。

単位は Ω である。

重量減量は浸漬前後の重量差として算出されるが浸漬後の鋼材重量はクエン酸アンモン10%溶液で脱錆後秤量された。

表面観察は2層中鋼材について引上げ時および脱錆後に行なわれた。

電位の測定結果を表—3. 62, 63に示す。表—3. 62を参照すると浸漬時は砂層中鋼材がアノード、海水中鋼材がカソードとなるマクロ腐食が A_{sw}/A_s に関係なく発生することがうかがわれるが、短絡期間が41日ではマクロ腐食の進行は No. a~No. s に見られ $A_{sw}/A_s=1$ をはさんで電位差にかなりの差があることがわかる。すなわち $A_{sw}/A_s < 1$ では E_{sw} は大体-500mV 付近もしくはそれより貴の値であるが (No. nのみ例外) $A_{sw}/A_s > 1$ では E_{sw} は-700mV となっている。これに対して $A_{sw}/A_s=1$ のときは両者の場合の中間の恰好で-600mV

の値を E_{sw} は示している。このような傾向は実験1, 2のときと異なって1層が海水のときにはマクロ腐食速度は A_{sw}/A_s に関係しなくなるところのあることを示唆している。

表—3. 64に電流値を、表—3. 65に海水中鋼材に流入する電流密度を、表—3. 66に砂層中鋼材より流出する電流密度を示す。

電位より見たマクロ腐食速度 $\sim A_{sw}/A_s$ の関係に制限があるという傾向は表—3. 65よりもうかがえる。

抵抗値は表—3. 67の通りである。

次に重量減量、重量減量より算出した腐食速度を表—3. 68に示す。表—3. 68より層中鋼材の腐食速度と A_{sw}/A_s の関係を図示すると図—3. 114の通りである。図—3. 114によれば砂層中鋼材の腐食速度は単独の場合は0.006mm/yrであるが短絡した場合は $A_{sw}/A_s < 1$ のところではほぼ A_{sw}/A_s に一次の関係を示す。しかし $A_{sw}/A_s=1$ 付近からは腐食速度は A_{sw}/A_s に比例しなくなる。したがって海水が存在するときはマクロ腐食速度 $\sim A_{sw}/A_s$ の関係は A_{sw}/A_s の範囲によって異なることがわかった。一方海水中鋼材の腐食速度は単独の場合は0.098.

表—3. 62 電 位 測 定 値

単位：—mV (海水塩化銀電極基準)

No.	A_{sw}/A_s	0 日			1 日			37 日			41 日		
		E_o	E_s	E_{sw}	E_o	E_s	E_{sw}	E_o	E_s	E_{sw}	E_o	E_s	E_{sw}
a	10	600	720	500	660			760			755	765	745
b	9	620	715	420	665			745			760	765	740
c	8	650	700	570	670			735			740	765	730
d	7	660	700	460	680			750			760	770	755
e	6	665	715	460	680			750			750	765	745
f	5	665	740	480	675			750			755	770	750
g	4	650	740	515	660			725			735	765	720
h	3	610	715	525	660			745			740	760	740
i	2	630	725	500	655			725			725	760	710
j	1	650	720	560	655			720			720	765	650
k	1/2	660	720	540	665			725			725	760	418
l	1/3	675	720	580	685			720			720	755	360
m	1/4	680	720	495	690			725			735	760	380
n	1/5	690	730	560	690			750			750	760	705
o	1/6	690	720	565	690			740			735	765	445
p	1/7	705	710	510	690			740			745	765	490
q	1/8	710	710	515	695			745			750	765	495
r	1/9	720	705	560	700			745			750	770	530
s	1/10	700	700	580	700			740			745	765	520
t	1		700	580		740	660		780	730		730	790

表-3.63 開路電位の経時変化（短絡期間41日） 単位：-mV（海水塩化銀電極基準）

No.	A_{sw}/A_s	E_0	0~1'		10'		20'		30'		40'	50'	
			E_s	E_{sw}	E_s	E_{sw}	E_s	E_{sw}	E_s	E_{sw}	E_{sw}	E_s	E_{sw}
a	10	755	775	750	775	750	765	740	762	740	740	765	745
b	9	760	770	750	770	750	765	740	760	740	740	765	740
c	8	740	770	735	770	740	765	725	760	725	725	765	730
d	7	760	780	765	775	760	775	760	765	745	750	770	755
e	6	750	770	755	770	750	770	750	760	740	750	765	745
f	5	755	775	760	775	760	775	755	765	750	750	770	750
g	4	735	770	730	775	730	770	725	760	720	720	765	720
h	3	740	770	745	770	745	765	740	765	730	738	760	740
i	2	725	775	730	775	720	770	715	770	715	710	760	710
j	1	720	730	715	775	670	770	655	770	655	650	765	650
k	1/2	725	770	720	765	630	760	480	760	450	430	760	418
l	1/3	720	765	710	760	460	760	400	755	370	360	755	360
m	1/4	735	770	715	760	495	760	425	760	395	380	760	385
n	1/5	750	775	745	770	720	760	710	760	710	710	760	705
o	1/6	735	770	710	760	500	760	450	760	445	460	765	470
p	1/7	745	770	720	760	550	760	510	755	490	500	765	500
q	1/8	750	770	725	765	560	760	515	760	495	500	765	500
r	1/9	750	770	730	765	585	760	580	755	530	535	770	530
s	1/10	745	765	725	760	570	760	535	755	520	525	765	525

表-3.64 電流値（0~50 μ A電流計挿5入分後の値）

No.	A_{sw} (cm ²)	A_s (cm ²)	I (μ A)			
			0 日	1 日	37 日	41 日
a	80	8	19.2	10.1	2.8	2.6
b	72	8	15.6	8.6	3.9	3.6
c	64	8	7.9	8.1	4.9	4.6
d	56	8	6.0	7.4	2.5	2.4
e	48	8	8.5	5.8	2.7	2.6
f	40	8	11.3	8.8	2.4	2.3
g	32	8	11.0	11.4	5.8	5.7
h	24	8	22.4	7.9	3.2	3.3
i	16	8	21.6	13.3	8.1	7.5
j	8	8	17.3	17.4	12.6	13.3
k	8	16	71.6	91.4	28.9	29.7
l	8	24	42.4	78.0	38.6	42.8
m	8	32	71.8	68.0	30.2	35.9
n	8	40	18.2	18.5	7.8	7.5
o	8	48	48.0	82.0	30.0	32.4
p	8	56	44.2	83.8	29.4	29.3
q	8	64	30.6	83.0	31.0	27.9
r	8	72	32.2	72.0	21.1	26.0
s	8	80	34.4	76.0	23.0	27.5

表-3.65 海水中鋼材に流入する電流密度
（0~50 μ A電流計挿5入分後の値）

No.	A_{sw}/A_s	I_{swD} (μ A/cm ²)			
		0 日	1 日	37 日	41 日
a	10	0.24	0.13	0.04	0.03
b	9	0.22	0.12	0.05	0.05
c	8	0.12	0.13	0.08	0.07
d	7	0.11	0.13	0.04	0.04
e	6	0.18	0.12	0.06	0.05
f	5	0.28	0.22	0.06	0.06
g	4	0.34	0.36	0.18	0.18
h	3	0.93	0.33	0.13	0.14
i	2	1.35	0.83	0.51	0.47
j	1	2.16	2.18	1.58	1.66
k	1/2	8.95	11.43	3.61	3.71
l	1/3	5.30	9.75	4.83	5.35
m	1/4	8.98	8.50	3.78	4.49
n	1/5	2.28	2.31	0.98	0.94
o	1/6	6.00	10.25	3.75	4.05
p	1/7	5.53	10.48	3.68	3.66
q	1/8	3.83	10.38	3.88	3.49
r	1/9	4.03	9.00	2.64	3.25
s	1/10	4.30	9.50	2.88	3.44

表-3.66 砂層中鋼材よに流出する電流密度
(0~50 μ A電流計挿入5分後の値)

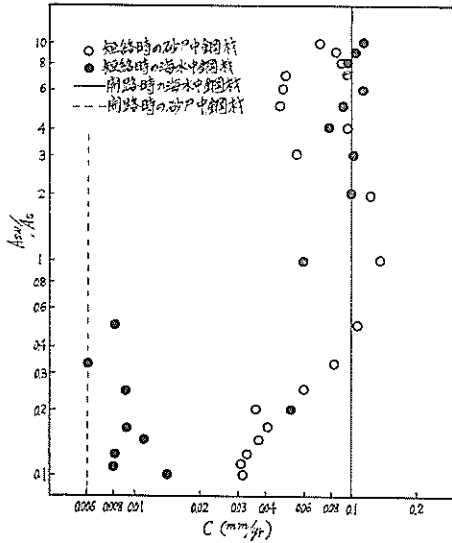
No.	A_{sw}/A_s	I_{SD} (μ A/cm ²)			
		0 日	1 日	37 日	41 日
		a	10	2.40	1.26	0.35	0.33
b	9	1.95	1.08	0.49	0.45
c	8	0.99	1.01	0.61	0.58
d	7	0.75	0.93	0.31	0.30
e	6	1.06	0.73	0.34	0.33
f	5	1.41	1.10	0.30	0.29
g	4	1.38	1.43	0.73	0.71
h	3	2.80	0.99	0.40	0.41
i	2	2.70	1.66	1.01	0.94
j	1	2.16	2.18	1.58	1.66
k	1/2	4.48	5.71	1.81	1.86
l	1/3	1.77	3.25	1.61	1.78
m	1/4	2.24	2.13	0.94	1.12
n	1/5	0.46	0.46	0.20	0.19
o	1/6	1.00	1.71	0.63	0.68
p	1/7	0.79	1.50	0.53	0.52
q	1/8	0.48	1.30	0.48	0.44
r	1/9	0.45	1.00	0.29	0.36
s	1/10	0.43	0.95	0.29	0.34

表-3.67 抵 抗 値

No.	A_{sw}/A_s	R (Ω)	
		0 日	41 日
		a	10	22.0	23.2
b	9	20.8	22.8
c	8	22.0	22.6
d	7	21.8	22.4
e	6	22.2	24.6
f	5	20.0	21.4
g	4	20.0	21.4
h	3	23.2	27.6
i	2	20.8	24.5
j	1	22.0	26.8
k	1/2	18.0	19.0
l	1/3	15.6	17.2
m	1/4	14.8	17.0
n	1/5	14.0	27.5
o	1/6	13.0	24.0
p	1/7	13.0	21.2
q	1/8	12.2	30.4
r	1/9	12.2	31.6
s	1/10	11.5	20.2
t	1	15.4	19.4

表-3.68 海水~砂層2中鋼材の腐食速度

No.	A_{sw}/A_s	海 水 中 鋼 材				砂 層 中 鋼 材			
		浸漬時の重量(g)	41日後の重量(g)	減量(g)	mm/yr	浸漬時の重量(g)	41日後の重量(g)	減量(g)	mm/yr
		a	10	31.4826	30.6886	0.7940	0.112	2.8770	2.8278	0.0492	0.070
b	9	27.5425	26.8918	0.6507	0.102	2.8692	2.8108	0.0584	0.083
c	8	28.7630	28.2570	0.5060	0.090	2.8794	2.8170	0.0624	0.088
d	7	22.5676	22.1040	0.4636	0.094	2.8710	2.8364	0.0346	0.049
e	6	19.0182	18.5478	0.4704	0.111	2.8650	2.8320	0.0330	0.047
f	5	15.3490	15.0362	0.3128	0.089	2.8670	2.8344	0.0326	0.046
g	4	14.6024	14.3890	0.2134	0.076	2.8460	2.7798	0.0662	0.094
h	3	11.4410	11.2260	0.2150	0.101	2.9120	2.8742	0.0378	0.054
i	2	6.4436	6.3326	0.1110	0.098	2.8770	2.7914	0.0856	0.121
j	1	2.9230	2.8818	0.0412	0.058	2.8225	2.7276	0.0949	0.134
k	1/2	2.7830	2.7770	0.0060	0.008	6.4472	6.2990	0.1482	0.105
l	1/3	2.8500	2.8460	0.0040	0.006	11.5436	11.3690	0.1746	0.082
m	1/4	2.8935	2.8872	0.0063	0.009	14.5230	14.3574	0.1656	0.059
n	1/5	2.8714	2.8354	0.0360	0.051	15.4084	15.2804	0.1280	0.036
o	1/6	2.8860	2.8798	0.0062	0.009	18.9494	18.7750	0.1744	0.041
p	1/7	2.8810	2.8735	0.0075	0.011	22.1292	21.9472	0.1820	0.037
q	1/8	2.7804	2.7748	0.0056	0.008	29.0800	28.8960	0.1840	0.033
r	1/9	2.8990	2.8930	0.0060	0.008	28.1040	27.9082	0.1958	0.031
s	1/10	2.9380	2.9280	0.0100	0.014	31.9700	31.7500	0.2200	0.031
t	1	11.4412	11.2340	0.2072	0.098	11.4148	11.4014	0.0134	0.006



図—3.114 海水（流動）砂層中鋼材の腐食速度と A_{sw}/A_s の関係（41day）

mm/yr であるが $A_{sw}/A_s > 1$ ではほぼ単独のときの値となる。しかし $0.5 < A_{sw}/A_s < 1$ では腐食速度は $A_{sw}/$

表—3.69 砂層中鋼材腐食速度（0～50 μA 電流計挿入5分後の値より換算）

No.	A_{sw}/A_s	C (mm/yr)			
		0 日	1 日	37 日	41 日
a	10	0.028	0.015	0.004	0.004
b	9	0.023	0.013	0.006	0.005
c	8	0.012	0.012	0.007	0.007
d	7	0.009	0.011	0.004	0.003
e	6	0.012	0.008	0.004	0.004
f	5	0.016	0.013	0.003	0.003
g	4	0.016	0.017	0.008	0.008
h	3	0.033	0.012	0.005	0.005
i	2	0.031	0.019	0.012	0.011
j	1	0.025	0.025	0.018	0.019
k	1/2	0.052	0.066	0.021	0.022
l	1/3	0.021	0.038	0.019	0.021
m	1/4	0.026	0.025	0.011	0.013
n	1/5	0.005	0.005	0.002	0.002
o	1/6	0.012	0.020	0.007	0.008
p	1/7	0.009	0.017	0.006	0.006
q	1/8	0.006	0.015	0.006	0.005
r	1/9	0.005	0.012	0.003	0.004
s	1/10	0.005	0.011	0.003	0.004

A_s が小さくなれば急激に低下する。さらに $A_{sw}/A_s < 0.5$ では再び腐食速度は A_{sw}/A_s にあまり左右されなくなるようである。

図—3.66に示す砂層中鋼材より流出する電流密度を腐食速度 (mm/yr) に換算すると表—3.69のようになる。表—3.66と表—3.69の値を比較してみると重量減量より算出した腐食速度の方が電流より算出した腐食速度より数倍大きい。

いま D. C. 電流計の測定範囲による電流値の差を比較してみると次のようになる。

D. C. 電流計		測定電流値 (μA)
測定範囲 (μA)	内部抵抗 (Ω)	
0～50	4,800	13.5
0～100	3,500	19.1
0～500	161	136
0～1000	115	141

表—3.66に示す電流は測定範囲が0～100 μA のときの読みであるので大きな内部抵抗のために小さくなり、0～1000 μA で読んだ値の1/7程度である。したがって表—3.69の腐食速度が表—3.68の値より数分の一小さいことはほぼ電流計の測定範囲によるすのではなかと考えられる。

実験4 水道水と土壌の2層の場合

実験3では海水～飽和泥層中の場合についてマクロ腐食傾向を検討したが実験4では流下ろ水道水と粘土層の2層の場合のマクロ腐食傾向を取扱った。

実験4の供試体の内容を表—3.70に示す。表—3.70の符合 A_c は粘土層（水道水飽和）中鋼材の表面積、 A_w は流下ろ水道水中鋼材の表面積であり、 W_c は粘土層中鋼材の重量、 W_w は水道水中鋼材の重量である。流下ろ水道水中および粘土層中に表—3.70に示す表面積比となるように浸漬された鋼材の組 No. a～No. g は鋼材片の一隅に接続されている測定用電線によって短絡された。したがって No. a～No. g は丁度1本の鋼杭が流下ろ水道水と粘土層中を貫通して表—3.70の各表面積比となるように打込まれたときに相当する。これに対して No. h は開路の状態で浸漬された。この結果 No. h のみは水道水中と粘土層中に単独で鋼材が浸漬された場合に相当する。環境は $\phi 30\text{cm} \times 25\text{cm}$ のガラス水槽に下半分が粘土層、上半分が水道水であり水道水は少量づつ流下されている。

測定は電位、電流、抵抗、重量減量および観察について行なわれた。

電位は E_o (短絡電位)、 E_c (短絡前または短絡後開路とされたときの粘土層中鋼材の電位)、 E_w (短絡前

表—3.70 2層（流下水道，水粘土）の供試体

No.	鋼材					回路
	表面積(cm ²)		表面積比 $A_c : A_w$	重量(g)		
	A_c	A_w		W_c	W_w	
a	4	12	1	31.4758	4.3966	短絡
b	4	8	1	21.4460	3.1660	短絡
c	4	6	1.5	1.4364	2.4000	短絡
d	4	4	1	1.4214	1.4160	短絡
e	6	4	1.5	12.3408	1.4230	短絡
f	8	4	2	13.2196	1.4596	短絡
g	12	4	3	14.8294	1.4284	短絡
h	12	12	1	14.4928	4.4802	開路

鋼材の形状寸法（厚み0.1cm）

4 cm² = 2 cm × 1 cm × 2

6 cm² = 2 cm × 1.5 cm × 2

8 cm² = 2 cm × 7 cm × 2

12 cm² = 2 cm × 3 cm × 2

鋼材表面

サンドペーパー #280 研摩，脱脂

または短絡後開路とされたときの流下水道水中鋼材の電位）がありいずれも海水塩化銀電極に対する値として示す。

単位は -mV である。ただし短絡後開路としたときの電位は No. a~No. g について測定され，開路後5分のときの値である。（363日目の値のみは30~40分後の値である）。

電流は No. a~No. g の回路に D. C. 電流計（100μA）を挿入したときの安定値である。単位は μA である。電流値 I を A_w で割った値は流下水道水中鋼材に流入する電流密度 I_{wD} (μA/cm²)， I を A_c で割った値は粘土層中鋼材より流出する電流密度 I_{cD} (μA/cm²) である。

抵抗は No. a~No. h について2層中鋼材片間の抵抗を A. C.ブリッジで分極を起さないようにして測定した。A. C.ブリッジは先に試作した港研式腐食計の抵抗測定部である。単位は Ω である。

重量減量は初期重量一浸漬後の重量で求められるが浸漬後の重量はクエン酸アンモン10%溶液で脱錆してから

表—3.71 電位測定値

単位：-mV（海水塩化銀電極基準）

No.	0 日		16 日			66 日			363 日		
	E_c	E_w	E_o	E_c	E_w	E_o	E_c	E_w	E_o	E_c	E_w
a	830	400		780	496	698	720	420	710	740	120
b	800	334		780	500	690	715	378	710	750	170
c	765	415		780	525	657	715	296	710	750	620
d	760	350		780	540	685	718	375	720	750	280
e	730	350		780	400	670	715	320	725	750	70
f	800	320		785	560	665	715	295	725	750	334
g	820	350		788	510	631	711	282	725	750	362
h	720	420		795	715		702	633		745	600

表—3.72 開路後の電位変化（短絡期間363日）

単位：-mV（海水塩化銀電極基準）

No.	A_w/A_c	E_o	1'		10'		20'		30'		40'	
			E_c	E_w	E_c	E_w	E_c	E_w	E_c	E_w	E_c	E_w
a	3	710	620	480	650	300	740	240	745	120	740	180
b	2	710	620	520	750	355	750	295	745	170	750	235
c	1.5	710	625	560	750	640	750	635	740	620	750	620
d	1	720	630	540	750	380	750	340	745	300	750	280
e	0.67	725	630	590	745	220	745	70	745	75	650	120
f	0.5	725	640	550	750	430	750	380	745	365	750	334
g	0.33	725	640	580	150	450	750	400	745	390	750	362

秤量した。

観察は流下下水道水中鋼材表面および粘土層中鋼材表面の発錆状況を肉眼で観察した。

電位の測定結果を表-3.71, 72に示す。O dayの値は2層中に鋼材を浸漬したときの電位である。浸漬時の E_C は -800mV (海水塩化銀電極基準)のようになり卑の電位であるが流下下水道水中鋼材の電位 E_W は -400mV 程度の貴の値である。これは図-3.62に示すように2層間における溶存酸素量の差にもづく現象であり、2層中鋼材を短絡することによって粘土層中鋼材がアノード、流下下水道水中鋼材がカソードとなるマクロセルが発生することが容易にうなずける。短絡電位 E_D は E_C より数十mV程度貴な値であり E_C は短絡の有無にはほとんど関係なく $-700\sim-720\text{mV}$ となっている。しかし

短絡後開路としたときの電位 E_W は -500mV より貴となっているが短絡しなかったNo. hの E_W は浸漬後卑となって -600mV より卑である。(開路後の経過時間とともに変化する傾向については文献83を参照されたい)。電位の面から見てもNo. a~No. gではマクロ腐食が長期に発生していることがわかる。

電流 I および電流密度, I_{wD} , I_{cD} を表-3.73に示す。表-3.73の I は粘土層中鋼材より流下下水道水中鋼材に流入している電流である。したがって流下下水道水中鋼材には I_{wD} の防食電流が流入する反面粘土層中鋼材からは I_{cD} のマクロ腐食電流が流出することになる。流下下水道水中鋼材には $5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度流入して丁度電気防食された恰好となっている。表-3.74に重量減量ならびに重量減量から算出した腐食速度(mm/yr)を示

表-3.73 電流値および電流密度 (測定範囲0~50 μA のD.C.電流計挿入5分後の値)

No.	A_w/A_c	$A_w(\text{cm}^2)$	$A_c(\text{cm}^2)$	66 日			357 日		
				$I(\mu\text{A})$	$I_{wD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$I_{cD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$I(\mu\text{A})$	$I_{wD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$I_{cD}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$
a	3	12	4	19	1.58	4.75	29.3	2.44	7.33
b	2	8	4	22	2.75	5.50	20.8	2.60	5.20
c	1.5	6	4	23	3.83	5.75	12.7	2.12	3.18
d	1	4	4	13	5.75	5.75	11.0	2.75	2.75
e	0.67	4	6	31	7.75	5.17	11.4	2.85	1.90
f	0.5	4	8	42	10.50	5.25	9.9	2.48	1.24
g	0.33	4	12	67	10.50	5.58	14.0	3.50	1.17
h	1	12	12						

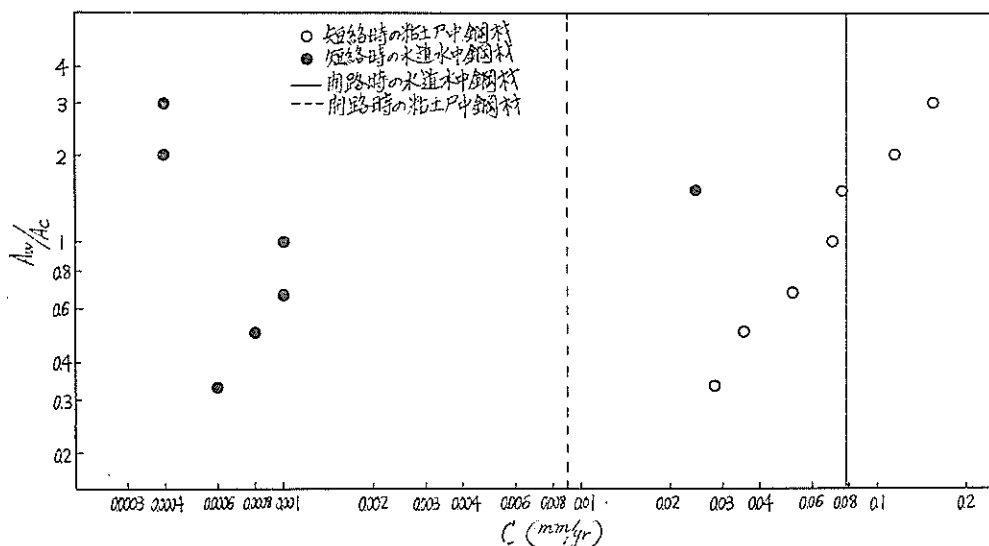


図-3.115 水道水(流下), 粘土中鋼材の腐食速度と A_w/A_c の関係(363 day)

表—3.74 水道水～粘土2層中鋼材の腐食速度

No.	A_w/A_c	水道水中鋼材				粘土中鋼材			
		浸漬時の重量(g)	363日後の重量(g)	重量減量(g)	mm/yr	浸漬時の重量(g)	363日後の重量(g)	重量減量(g)	mm/yr
a	3	4.3996	4.3960	0.0036	0.0004	1.4758	0.9928	0.4830	0.154
b	2	3.1660	3.1632	0.0028	0.0004	1.4460	1.0912	0.3548	0.113
c	1.5	1.4000	2.2875	0.1125	0.024	1.4364	1.2020	0.2344	0.075
d	1	1.4160	1.4130	0.0030	0.001	1.4214	1.2018	0.2196	0.070
e	0.67	1.4230	1.4192	0.0038	0.001	2.3408	2.0994	0.2414	0.051
f	0.5	1.4596	1.4570	0.0026	0.0008	3.2196	2.9998	0.2198	0.035
g	0.33	1.4284	1.4264	0.0020	0.0006	4.3294	4.0706	0.2588	0.028
h	1	4.4802	3.7470	0.7332	0.078	4.4928	4.4122	0.0806	0.009

す。表—3.74より腐食速度～ A_w/A_c の関係を図示すると図—3.115のようになる。図—3.115によれば短絡したNo. a～No. g の粘土層中鋼材の腐食速度すなわちマクロ腐食速度は A_w/A_c に一次の関係があり、実験3の海水の存在するときのように $A_{sw}/A_s > 1$ ではマクロ腐食速度は A_{sw}/A_s に関係しなくなるということはないようである。図—3.114と図—3.115の差は海水の存在の有無によるものであらうと考えられる。

水道水中鋼材表面に発錆が見られたのはNo. c とNo. h である。No. h は単独であるから当然であるがNo. c は片面に腐食が発錆した。発錆しない水道水中鋼材面は浸漬時の綺麗な研磨面が保たれており海水のときのように石灰質被膜は見られなかった。一方粘土層中鋼材は鉄の溶出によって地肌が出ており水道水中の発錆鋼材の局部的腐食と異なって均一な浸漬となっている。

抵抗値を表—3.75に示す。抵抗は363日後の値のみであるが海水のときより100倍抵抗が大きい環境であることがわかる。次に表—3.76に表—3.73の電流密度の単位を腐食速度の単位に直した値を示す。表—3.74と表—3.76を比較すると重量減量より算出した腐食速度の方が電流値より算出した腐食速度より2～3倍大きい。この傾

表—3.75 抵抗値

No.	A_w/A_c	R(Ω)363日
a	3	1,420
b	2	1,600
c	1.5	1,840
d	1	2,140
e	0.67	1,800
f	0.5	1,580
g	0.33	1,900
h	1	1,160

表—3.76 マクロ腐食速度

No.	A_w/A_c	C (mm/yr)	
		66日	375日
a	3	0.055	0.085
b	2	0.064	0.060
c	1.5	0.067	0.037
d	1	0.067	0.032
e	0.67	0.060	0.022
f	0.5	0.061	0.04
g	0.33	0.065	0.014
h	1		

向は海水のときと同じく電流計の内部抵抗の影響によるものであらうの思われる。

実験5 海水と土壌の2層の場合(2)

実験3では海水がゆるく流動しているときの海水と土壌2層に接する鋼材の腐食速度についての検討であったが、実験5では最初流動していた海水が時々静止した場合の海水と土壌層中鋼材の腐食速度を検討してみた。

実験5の供試体の内容を表—3.77に示す。実験の要領は実験3に準ずるが実験5では実験3と異なり海水の攪拌を一時停止した。これは2～3日間停止することを鋼材片浸漬後5日～30日の間に2～3回繰り返したもので停止のとき以外は攪拌を続けた。61日間浸漬後鋼材片は回収されたが浸漬時の電位、電流、抵抗の測定値を表—3.78に示す。表—3.78の電流値を参照すれば2～3日攪拌を停止して海水を静止させるとマクロ腐食電流はほとんど発生しなくなるようである。また測定と平行して観察を続けると海水中鋼材面一面に発錆が見られる。これは海水が静止したため海水中鋼材表面にマイクロ腐食が全面的に発生したためと思われる。次に61日後回収した鋼材の重量減量から腐食速度を算出してみると表—3.79の

表-3.77 実験5の供試体

No.	鋼材				重量(g)		回路
	表面積 (cm ²)		表面積比		W _c	W _{sw}	
	A _c	A _{sw}	A _c : A _{sw}				
a	8	32	1	4	2.8252	14.7078	短絡
b	8	16	1	2	2.8772	6.4740	短絡
c	8	12	1	1.5	3.7160	5.0865	短絡
d	8	8	1	1	3.6932	2.8304	短絡
e	10	8	1.25	1	4.0694	2.8582	短絡
f	12.8	8	1.6	1	5.4694	2.8690	短絡
g	16	8	2	1	6.5074	2.8604	短絡
h	26.6	8	3.33	1	12.5030	2.8272	短絡
i	40	8	5	1	15.5440	2.8764	短絡
j	80	8	10	1	32.3812	2.8502	短絡
k	20	20	1	1	7.7300	7.6848	開路

鋼材の形状寸法 (厚み0.1cm)

8cm²=2cm×2cm×2

10cm²=2cm×2.5cm×2

12cm²=2cm×3cm×2

12.8cm²=2cm×3.2cm×2

16cm²=2cm×4cm×2

20cm²=2.5cm×4cm×2

26.6cm²=3.5cm×3.8cm×2

40cm²=4cm×5cm×2

80cm²=5cm×8cm×2

A_c: 粘土層中鋼材表面積(cm²)

A_{sw}: 海水中鋼材表面積(cm²)

W_c: 粘土層中鋼材重量(g)

W_{sw}: 海水中鋼材重量(g)

鋼材表面: サンドペーパー研磨, 脱脂

ようになる。表-3.79に示す腐食速度 (mm/yr) を鋼材表面積比 A_{sw}/A_c に対して図示すると図-3.116のようになる。

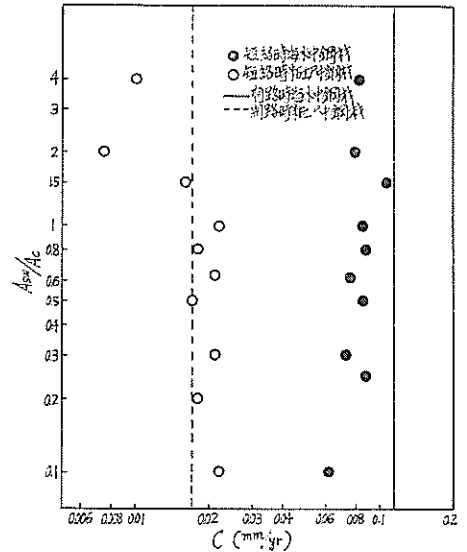


図-3.116 海水 (静止, 流動), 粘土層2層中鋼材の腐食速度と A_{sw}/A_c の関係 (61day)

表-3.78 実験5の測定値

No.	A _{sw} /A _c	E _{sw} (mV)	E _o (mV)	E _o (mV)	I (μA)				R _{sw-c} (Ω)
					3日	5日	45日	61日	
a	4	680	710	710	2.7	22	0	2	14.2
b	2	670	710	710	3.1	19	0	5	16.8
c	1.5	680	710	710	2.5	23	1	6	170
d	1	650	700	705	5.2	32	3	6	29.8
e	0.8	645	700	710	5.3	53	0	2	23.0
f	0.625	640	700	710	7.2	68	-2**	-1**	22.6
g	0.5	630	700	710	7.3	69	0	3	19.2
h	0.3	595	700	710	8.7	132	0	-2	19.6
i	0.25	640	710	720	10.6	148	10	20	17.4
j	0.1	550	710	710	17.9	261	11	19	11.2
k	1	700	E _{sw} 695 E _c 780	E _{sw} 700 E _c 720	—	—	—	—	10.0

E_{sw}: 海水中鋼材の電位 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

E_o: 短絡電位 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

I: 粘土層中鋼材より海水中鋼材に流入する電流 (1mAフルスケール D.C. 電流計で測定)

*: 50μA フルスケール電流計で測定

** : 海水中鋼材より粘土層中鋼材に流入する電流

表—3.79 海水（一時静止）～粘土 2 層中鋼材の腐食速度

No.	A_w/A_c	海 水 中 鋼 材				粘 土 層 中 鋼 材			
		浸漬時の重量(g)	61日後の重量(g)	重量減量(g)	mm/yr	浸漬時の重量(g)	61日後の重量(g)	重量減量(g)	mm/yr
a	4	14.7078	14.3660	0.3418	0.081	2.8252	2.8150	0.0102	0.010
b	2	6.4740	6.8240	0.1900	0.078	2.8772	2.8694	0.0078	0.007
c	1.5	5.0865	4.9190	0.1675	0.106	3.7160	3.6990	0.0170	0.016
d	1	2.8304	2.7420	0.0884	0.084	3.6932	3.6696	0.0236	0.022
e	0.8	2.8582	2.7680	0.0902	0.086	4.0694	4.0460	0.0234	0.018
f	0.625	2.8690	2.7902	0.0788	0.075	5.4676	5.4320	0.0356	0.021
g	0.5	2.8604	2.7720	0.0884	0.084	6.5074	6.4720	0.0354	0.017
h	0.3	2.8272	2.7521	0.0751	0.072	12.5030	12.4306	0.0724	0.021
i	0.25	2.8764	2.7848	0.0916	0.087	15.5440	15.4470	0.0970	0.018
j	0.1	2.8502	2.7866	0.0636	0.061	32.3812	32.1540	0.2272	0.022
k	1	7.6848	7.3828	0.3020	0.115	7.7300	7.6860	0.0440	0.017

図—3.116 からわかるように2～3日間海水が静止することを2～3回繰返した場合マクロ腐食の影響はあまりなくほとんど各層におけるミクロ腐食のみとなるようである。なお実験5は長期測定の一部で61日間で引上げられたときの値である。

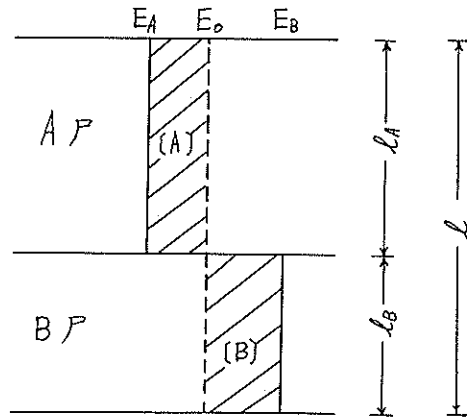
以上実験1～実験5を通してわかるように2層にマクロ腐食が発生するときマクロ腐食速度 C はカソード環境中鋼材表面積 A_c とアノード環境中鋼材表面積 A_a の比に比例する。すなわち $C \propto k(A_c/A_a)^n$ の $n=1$ とみなし得る。このことはとりもなおさず実験環境中鋼材の腐食はカソード支配であるという仮定が正しかったことを証明している。しかし海水のとき塩分の存在がカソードの保護被膜を浸すためマクロ腐食の発生が $A_c/A_a < 0.5 \sim 1$ のときに制限されたりまたは海水（または水道水⁸³⁾）が静止したときはほぼミクロ腐食のみになることなどは腐食速度の推定に当って熟知しておくことが必要である。

3-4-3 マクロ腐食速度推定法

マクロ腐食速度を推定する関係式は次のように適用される。

2 層の場合

図—3.117 のようにA, B 2 層の環境に埋設する全長 l の鋼材に発生するマクロ腐食速度を推定するにはまず腐食計電極を全長 l に相当する深度まで打込む。電極の打込み深度毎の鋼材電位を順次測定して図—3.117 に示すような電位分布図を作成する。いまマクロ腐食反応もミクロ腐食反応と同じく電気化学反応でありアノード反応量とカソード反応量は等量と見なし得るので、マクロセルのアノード、カソード部分を判定する一つの基



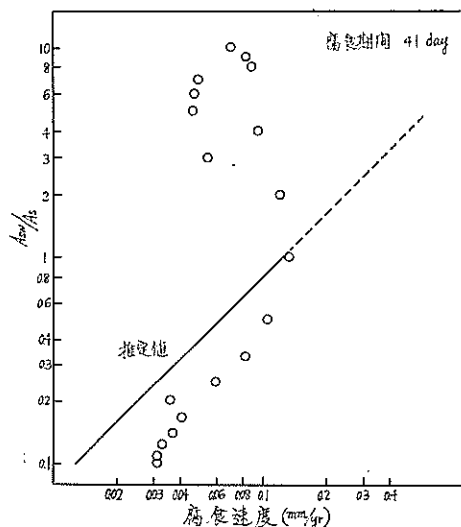
図—3.117 アノード(B)層、カソード(A)層中鋼材表面積比 (l_A/l_B) の決め方 (2 層のとき)

準電位のとり方として図—3.117 の [A] の面積と [B] の面積が等しくなるような電位 E_0 を考える。 E_B の方が E_A より卑であるとするとき B 層中鋼材がアノード、A 層中鋼材がカソードとなるマクロ・セルが発生する。マクロ腐食速度すなわちマクロ・セルにもとづく B 層中鋼材の腐食速度を推定するには次の関係が適用される。

$$C = k' \cdot e^{-\gamma_c} \cdot A_c/A_a$$

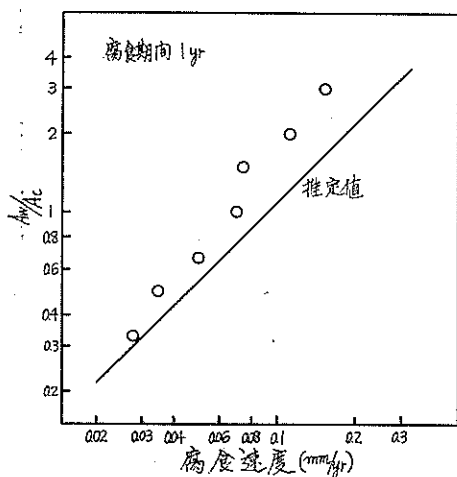
このとき、 $k' = k(=0.34)$ 、 γ_c は A 層中に腐食計の電極を挿入して測定したカソード分極抵抗、 $A_c = l_A$ 、 $A_a = l_B$ となる。

この関係を海水（ゆるく流動）～海水飽和泥層に適用してみると図—3.118 のようになる。この場合は $A_{sw}/A_s (=A_c/A_a) > 1$ ではマクロ腐食の発生が不十分のよう



図—3.118 マクロ腐食速度推定例(1)

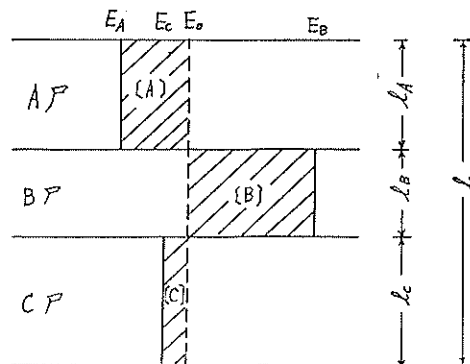
ある。また水道水(ゆるく流動)～水道水飽和泥層に推定法を適用してみると図—3.119の通りである。



図—3.119 マクロ腐食速度推定例(2)

3層の場合

A, B, C 3層に全長 l の鋼材を埋設するときの2層の場合と同様に l に相等する深度まで腐食計電極を打込んで電位分布図を図—3.120のように求める。 E_0 は $[A]+[C]$ と $[B]$ が等面積となるように分割したときの電位で E_A, E_C が E_0 より貴, E_B が E_0 より卑と仮定すると全体としてB層中鋼材がアノード, A, C層中鋼材がカソードとなるマクロ・セルが発生する。マクロ・セルにもとづく3層中鋼材の腐食速度は次のようにして推



図—3.120 アノード(B)層, カソード(A, C)層中鋼材面積比($l_A/l_B, l_C/l_B$)の決め方(3層のとき)

定される。まず, A, B 2層に $C=k' \cdot e^{-\gamma c} A_c/A_a$ の関係を適用するとこのときのB層中鋼材の腐食速度 C_1

$C_1=k' \cdot e^{-\gamma c} \cdot l_A/l_B$ となる。ただし γc はA層中に腐食計電極を挿入して求めたカソード分極抵抗である。次に, B, C 2層についてのマクロ・セルによるB層中鋼材の腐食速度 C_2 は

$C_2=k' \cdot e^{-\gamma c} \cdot l_C/l_B$ となる。ただし γc はC層中のカソード分極抵抗である。A, B, C 3層のときのマクロ・セルによるB層中鋼材の腐食速度 C は C_1 と C_2 の和で表わせる。

3層以上の多層にも上に示す要領で適用される。

なお本報で示すように室内実験では $k' \approx k$ となったが k, k' についてはさらに室内環境および現地条件下で長期的に検討している。

4 結 び

本報の結論としては次のことがいえよう。

(1)過去の腐食調査結果を参照すると湾湾における鋼材の腐食現象としてはマイクロ腐食(単一層内における鋼材腐食)とマクロ腐食(異種環境間にまたがって発生する腐食)の両者があることがわかる。

(2)マイクロ腐食とマクロ腐食には次のような発生傾向がある。

(イ)鋼材が海水と海水飽和泥層, または水道水と水道水飽和泥層に接するとき海水または水道水が静止状態であればマクロ腐食はほとんど発生せずに各層におけるマイクロ腐食のみとなる。

(ロ)海水が静止していないときは海水中鋼材がカソード, 海水飽和泥層中鋼材がアノードとなるマクロ・セルが発生するがこの傾向は両層中鋼材面積比 A_{sw}/A_s が小さいほど大きい。たとえば $A_{sw}/A_s < 0.5$ ではマク

口腐食は発生するが反対に $A_w/A_s > 0.5$ ではほとんどマイクロ腐食となる。

(イ) また水道水が静止していないときにも水道水中鋼材がカソード、水道水飽和泥層中鋼材がアノードとなるマクロセルが発生する。この傾向は両層中鋼材表面積比 A_w/A_s が小さいほど強いが海水のときよりマクロ腐食は発生しやすいようである。

(ロ) 海水が静止～流動を繰り返した場合最初に発生していた海水中鋼材がカソード、海水飽和泥層中鋼材がアノードとなったマクロセルはほとんど消滅して両層におけるマイクロ腐食のみとなる傾向がある。

(ハ) 水分不飽和砂層(海水または水道水)と水分飽和泥層の2層に鋼材が接するとき水分不飽和砂層中鋼材がカソード、水分飽和泥層中鋼材がアノードとなるマクロセルが発生する。

(3) マイクロ腐食速度は次式から推定される。

$$C = k \cdot I_{KD}^a \cdot \rho^{-b} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\Rightarrow k \cdot I_{KD}^a \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし、C: 重量減量より算出したマイクロ腐食速度 (mm/yr)

I_{KD} : C を算出した同一環境について規制した方法で測定したガルバニック電流密度 ($\mu A/cm^2$)

ρ : 環境の比抵抗 ($\Omega \cdot cm$)

$$k = 2.12 \times 10^{-7}$$

$$a = 3.69$$

$$b = 0.001$$

(4) I_{KD} は模型電池 (Fe | 環境 | Mg) の回路全抵抗を 2,000 Ω と一定にして短絡したときに流れるガルバニック電流密度の安定値であるが、 I_{KD} と C との関連性を明らかにするために一般の港湾環境では鋼材腐食反応はカソード支配であること、模型電池の開路電位は一定と見なし得ることなどを仮定して (4.2) 式を変形すると (4.3) 式となる。

$$r_c = [1.223 - 12 \times 2,000(I_{KD} \times 10^{-6})] / (I_{KD} \times 10^{-2}) \dots\dots\dots (4.3)$$

(4.3) 式で求められる r_c をカソード分極係数といい単位は $\Omega \cdot m^2$ で表わされる一つの腐食速度律速因子である。次に模型電池で求めた r_c は同一環境内で発生するマイクロセルの r_c に等しいとみなして各環境について模型電池で測定した r_c と重量減量より算出したマイクロ腐食速度 C との関係の求めると (4.4) 式ようになる。

$$C = k' \cdot e^{-r_c} \dots\dots\dots (4.4)$$

ただし、C: 重量減量より算出したマイクロ腐食速度 (mm/yr)

r_c : C と同一環境について求めたカソード分極係数

$$(\Omega \cdot m^2)$$

$$k' = 0.34$$

$e =$ 常数

この結果港湾における鋼材腐食は明らかにカソード支配であり腐食速度は r_c の測定から推定できることがわかる。

(5) また (4.4) 式の成立することからマイクロセルの開路電位差は一定とみなしても実用上あまりさしつかえないと考えられる。

(6) r_c の測定ならびに r_c の値から算出される腐食速度の単位が簡単に現地で直読できるタイプの港研式腐食計を試作した。

(7) 一方、マクロ腐食速度は (4.5) 式から求められる。

$$C = k' \cdot e^{-r_c} \cdot A_c / A_a \dots\dots\dots (4.5)$$

ただし、C: 鋼材が2層に接するときのマクロ腐食速度 (mm/yr)

r_c : カソード環境中に腐食計電極を挿入して測定したカソード分極抵抗 ($\Omega \cdot m^2$)

A_c : カソード環境中鋼材表面積

A_a : アノード環境中鋼材表面積

$$k' = k$$

$e =$ 常数

2層以上の環境中に埋設される鋼材に発生するマクロ腐食速度は多層中の各2層に順次 (4.5) 式の関係を用い、各2層について算出したマクロ腐食速度を加算してやれば求められる。

あとがき

腐食速度推定法を検討して腐食計を試作してみた。これに関連して港湾における鋼材の腐食現象ならびに腐食速度についても検討してみたがまだ港湾における鋼材腐食機構を説明するには資料不足のようである。したがって本報に示した実験に引続いて港湾における鋼材のマイクロ腐食速度とマクロ腐食速度の関係を室内および野外(新潟港、京浜港など)で検討している外、腐食速度推定法に関する実験も室内および野外(新潟港、京浜港、名古屋港など)で行なっている。この外各種厚み計の精度と適用性(たとえば水平方向の測定に有利であるとか曲率半径の小さいものにも適用できるなど)の比較ならびに適当な肉厚測定法にもとづくマイクロ腐食とマクロ腐食の立場からの腐食調査などが必要であるので今後実施して行く予定である。

なお本報ならびに防食法に関する実験⁸³⁾⁸⁴⁾にもとづいて港湾における鋼材の腐食防食の概要が文献85)に示されている。

推定法に関する室内実験を開始したのは昭和33年秋で

あるが、本報をまとめるに当たっての最大の収穫は物真似でないたった一つのことをすることが如何に大変であるかということの片鱗をうかがい知ることができたこと、および実験を次のステップへ進めることができるようになったことであると感ずる。しかしながら曲りなりにもここまで達することができたのは運輸省港湾局 岡部計画課長をはじめ港研、倉田設計基準部長、港研 林構造部長の方々の御鞭達のおかげだと思います。また現富士製鉄KK 石黒 健氏には着手当時 N. G. I. コロージョン・サウンドに関する資料を頂き、港研、土質部、柳瀬地盤改良研究室長には室内実験に使用した土壌の分類ならびに腐食計の野外打込み要領について指導して頂きました。さらにマクロ腐食速度推定法に関しては日本防蝕工業KK (花田政明氏、豊部正義氏)と昭和38年、39年度の2カ年間共同研究を行ない、とくに花田政明氏にはお世話になりました。この外、港研 構造部 阿部正美技官には測定ならびにデータの整理について協力して頂きました。擧筆するに当り以上の方々ならびに1建(新鴻港)、2建(京浜港)、5建(名古屋港)の関係方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) International Nickel Co., Corrosion reporter, 7, No. 1, (1960) July
- 2) 日本化学会編, 化学便覧(新版)(1958), p. 571
- 3) H. H. Uhlig, The corrosion handbook, 1117, John Wiley & Sons, Inc., N. Y.
- 4) 伊村勇隆, 鉄板厚み計(磁気不飽和型), 運研報告 3, No. 4, 1~7 (1953)
- 5) 運輸省港湾局編, 港湾工事共通仕様書解説, p. 110 (1964)
- 6) 八幡製鉄KK市場部, 鋼矢板厚さ測定器の現場測定の調査報告, 1~20 (1963)
- 7) C. E. Lautzenheiser, Nondestructive test methods for corrosion detection, Materials Protection, 2, No. 8, 72~76 (1963) Aug.
- 8) R. T. Nisbet, Measuring wall thickness by the pulse echo technique, Materials Protection, 2, No. 6, 66~71, (1963) June
- 9) Committee set up by the Danish Academy for Technical Sciences and the Metallurgical Laboratory of the Technical University in Copenhagen, etc, Corrosion research in Danish Harbour Works, Corrosion Prevention & Control, 9, No. 5, 35~38 (1962) May
- 10) T. R. Schmidt, Instrument promises to permit measuring wall thickness, Materials Protection, 2, No. 1, 8~14 (1963) Jan.
- 11) 運研・港湾施設部, 港湾における鋼矢板の腐食状況について(函館港, 根室港, 釧路港調査報告), 1~14 (1953)
- 12) 運輸省第1港湾建設局秋田港工事事務所, 八幡製鉄KK市場部, 秋田港における鋼矢板岸壁の腐食調査報告書, 1~22 (1963)
- 13) 運輸省第4港湾建設局小倉調設など, 八幡製鉄KK市場部, 下関港及び門司港における鋼矢板岸壁の腐蝕調査報告書, 1~30 (1964)
- 14) 北海道開発局小樽開発建設部, 八幡製鉄KK市場部, 小樽港における鋼矢板岸壁の腐蝕調査報告書, 1~20 (1964)
- 15) 多賀谷正義, 鉄鋼の局部腐食, 防蝕技術, 11, No. 7, 20~21 (1962)
- 16) 石川島播磨重工業KK・技術研究所, 防蝕技術, 12, No. 8, 表紙 (1963) Aug.
- 17) B. C. Lattin, Steel piling in sea water, 1958, June
- 18) P. Anderson, Substructure analysis and design, p. 139, 2nd Ed., The Ronald Press, New York, New York (1956)
- 19) G. A. Hool and W. S. Kinne, Foundations, abutments and footings, P. 204, 2nd Ed., Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York, N. Y., (1943)
- 20) J. G. Mason and A. L. Ogle, Steel pile foundations in Nebraska, Civil Eng., 2, No. 9, 533 (1932)
- 21) L. Beandry, Ouay wall design and construction, Eng. J. (Canada), 14, 394 (1931)
- 22) Steel shells in service 39 years still sound and serviceable, Eng. News-Record, 100, No. 15, 590 (1928) Apr.
- 23) B. M. Gallaway, A report on some factors affecting the life of steel pilings in the Texas Gulf area, Texas Transportation Institute, College Station, Texas (1955) Oct.
- 24) G. G. Greulich, Extracted steel H-piles found in good condition, Eng. News-Record, 145, No. 8, 41 (1950) Aug.
- 25) C. V. Brouillette and A. E. Hanna, Corrosion survey of steel sheet piling, Tech. Report 097, U. S. Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California (1960) Dec.
- 26) M. N. Lipp, Some data on beach protection wo-

- rks, Civil Eng. 6, No. 5291 (1936)
- 27) C. W. Ross, Deterioration of steel sheet pile groups at Palm Beach, Fla., Corrosion, 5, No. 10, 339 (1949)
 - 28) A. C. Rayner and C. W. Ross, Durability of steel sheet pilings in shore structures, Tech, Memo, No. 12, Beach Erosion Board, Corps of Engineers, U. S. Army (1952) Feb.
 - 29) L. Bjerrum, Norwegian experience with steel pile foundations to rock, J. Boston Soc. Civil Eng., 44, No. 3, 155 (1957)
 - 30) M. Romanoff, Corrosion of steel plings in soils, Journal of Research of the National Bureau of Standards-C. Engineering and Instrumentation, 66C, No. 3, 223~244 (1962) Sept.
 - 31) C. P. Larrabee, Steel has low corrosion rate during long sea water exposure, Materials Protection, 1, No. 12, 95~96 (1962) Dec.
 - 32) H. H. Uhlig, The corrosion handbook, 383~388, John Wiley & Sons, Inc., New York
 - 33) M. H. Peterson and L. J. Waldron, Investigation of mild steel corrosion rate in San Diego Harbor, Corrosion, 17, No. 4, 112~114 (1961)
 - 34) F. G. Baptista and H. F. Finely, Corrosion problems in Lake Maracaibo, Corrosion Prevention & Control, 10, No. 9, 31~37 (1963) Sept.
 - 35) The U. S. National Bureau of Standards, Underground corrosion investigation-1, Corrosion Prevention & Control, 5, No. 12, 55~58 (1958) Dec.
 - 36) The U. S. National Bureau of Standards, Underground corrosion investigation-2, Corrosion Prevention & Control, 6, No. 1, 52~54 (1959) Jan.
 - 37) B. W. Forgeson, C. R. Southwell and A. L. Alexander, Corrosion of metals in tropical environments (Part 3-Underwater corrosion of ten structural steels), Corrosion, 16, No. 3, 105t~114t (1960) March
 - 38) (), The life of steel H-piles,
 - 39) C. P. Larrabee, Corrosion-resistant experimental steels for marine applications, Corrosion, 14, No. 11, 501t~504t (1958) Nov.
 - 40) L. P. Sudrabin, Foundation piling corrosion: mechanisms and cathodic protection, Materials Protection, 2, No. 10, 54~64 (1963) Oct.
 - 41) 運輸省第1港湾建設局, 港湾構造物の耐用年数, p. 66~69 (1964)
 - 42) 運輸省第3港湾建設局, 港湾構造物の耐用年数, p. 78~79 (1964)
 - 43) 運輸省第2港湾建設局, 港湾施設の耐用年数について, p. 9 (1964)
 - 44) 運輸省第2港湾建設局, 港湾施設の耐用年数について, p. 37~52 (1964)
 - 45) 運輸省第4港湾建設局, 港湾構造物の耐用年数, p. 48~49 (1964)
 - 46) 運輸省第5港湾建設局, 港湾構造物の耐用年数, p. 21~14 (1964)
 - 47) B. O. Skipp, Corrosion and site investigation, Corrosion Technology, 8, No. 9, 269~277, (1961) Sept.
 - 48) L. Bjerrum, Norwegian experience with steel pile foundations to rock, J. Boston Soc. Civil Eng., 44, No. 3, 73~86 (1957)
 - 49) N. D. Tomashov and Y. N. Mikhailovsky, Corrosivity of soil corrosion, Corrosion, 15, No. 2, 77t~82t (1959) Fed.
 - 50) W. J. Schwerdtfeger and O. N. McDorman, Measurement of corrosion rate of a metal from its polarizing characteristics, J. Electrochem. Soc., 99, 407 (1952)
 - 51) R. F. Stratfull, A new test for estimating soil corrosivity based on investigation of metal highway culverts, Corrosion, 17, No. 10, 493t~496t (1961) Oct.
 - 52) G. G. Eldredge, Analysis of corrosion pitting by extreme-value statistics and its application to oil well tubing caliper surveys, Corrosion, 13, No. 1, 51t~60t (1957) Jan.
 - 53) P. M. Aziz, Application of the statistical theory of extreme values to the analysis of maximum pit depth data for aluminum, Corrosion, 12, No. 10, 495t~506t (1956) Oct.
 - 54) N. D. Greene and M. G. Fontana, A critical analysis of pitting corrosion, Corrosion, 15, No. 1, 25t~31t (1959) Jan.
 - 55) H. H. Uhlig, The corrosion handbook, 129, John Wiley & Sons, Inc., New York.
 - 56) W. Stumm, Estimating corrosion rates in water, Industrial and Engineering Chemistry, 61, No.

- 12, 1490 (1959) Dec.
- 57) 花田政明, 電気防食用ならびに土壌腐食測定用計器について, 防蝕技術, 13, No. 10・11, 2~9 (1964)
- 58) F. O. Waters, Soil resistivity measurements for corrosion control, Corrosion, 8, No. 12, 407~409 (1952) Dec.
- 59) F. G. Baptista and H. F. Finley, Corrosion problems in Lake Maracaibo, Corrosion Prevention and Control, 10, No. 9, 36 (1963) Sept.
- 60) L. T. Minchin, Bacterial corrosion of underground pipes, Coke and Gas, No. 9, 395 (1960) Sept.
- 61) T. Markovic, Die Bedeutung der physikalischen Eigenschaften des Bodens für den Reaktionsmechanismus der Korrosion des Eisens im Erdreich, Werkstoffe und Korrosion, 9, Ht. 10, 623~630 (1958) Okt.
- 62) T. Markovic und M. Sevdic, Beitrag zur Systematik der Korrosion der Metalle im Erdreich, I. Eisen, Werkstoffe und Korrosion, 10, Ht. 9, 547~555 (1959) Sept.
- 63) H. F. Finley, Statistical correlation of corrosion rates obtained with electrical resistance corrosion probes, Corrosion, 18, No. 2 70t~72t (1962) Feb.
- 64) D. Roller, W. R. Scott, H. S. Preiser and F. E. Cook, Corrosion measuring probes for marine applications, Materials Protection, 2, No. 1, 42~47 (1963) Jan.
- 65) E. Ford, Measuring corrosion by the electrical conductance test method, Corrosion Technology, 5, No. 10, 330~331 (1958) Oct.
- 66) W. R. Scott and D. Roller, New techniques for measuring corrosion with resistance probes, Materials Protection, 2, No. 1, 42~47 (1963) Jan.
- 67) E. H. Phelps, Electrochemical techniques for measurement and interpretation of corrosion, Corrosion, 18, No. 6, 239t~246t (1962) June
- 68) R. V. Skold and T. E. Larson, Measurement of the instantaneous corrosion rate by means of polarization data, Corrosion, 13, No. 2, 139t~142t (1957)
- 69) R. A. Legault and N. Hackerman, Corrosion inhibitor evaluation from cathodic polarization measurements, Corrosion, 15, No. 10, 517t~522t (1959) Oct.
- 70) L. M. Dvoracek and L. L. Neff, Use of the polarization technique to study corrosion in aqueous ammonia systems, Corrosion, 18, No. 3, 85t~90t (1962) March
- 71) M. Stern, Fundamentals of electrode processes in corrosion, Corrosion, 13, No. 11, 775t~782t (1957) Nov.
- 72) W. J. Schwerdtfeger, Current and potential relations for the cathodic protection of steel in a high resistivity environment, Corrosion, 16, No. 5, 209t~214t (1960) May
- 73) M. Pourbaix, Corrosion, passivity and passivation from the thermodynamic point of view, Corrosion, 5, No. 4, 121~133 (1949)
- 74) Evans, Metallic corrosion, passivity and protection (1948)
- 75) G. V. Akimov, Theory & research methods of metallic corrosion, Corrosion, 14, No. 10, 463t~483t (1958)
- 76) E. Schashl and G. A. Marsh, Some new views on soil corrosion, Material Protection, 2, No. 11, 8~17 (1963) Nov.
- 77) B. B. Morton, Splash zone protection for offshore structures, World Oil (1957) Jan.
- 78) H. A. Humble, Corrosion, 5, No. 9, 292 (1949)
- 79) 花田政明, 善一章, 豊部正義, 港湾環境における埋設鋼材の腐食速度測定(2), 第10回腐蝕防蝕討論会予稿集, 110~115 (1963) Oct.
- 80) 花田政明, 善一章, 豊部正義, 港湾環境における埋設鋼材の腐食速度測定 (第2報), 防蝕技術, 13, No. 1, 11~15 (1964)
- 81) 善一章, 港湾工事環境における鋼材の腐食速度推定に関する実験研究, 港研報告, 1, No. 1, 1~22 (1963)
- 82) 善一章, 港湾環境における埋設鋼材の腐食速度測定 (第1報), 防蝕技術, 12, No. 10, 14~18 (1963)
- 83) 善一章, 港湾における鋼材防食法の研究 (第1報), セメント硬化体による防食法, 港研報告, 5, No. 9
- 84) 善一章, 港湾における鋼材防食法の研究 (第1報), 防食法に関する基礎的実験, 防蝕技術, 15, No. 1, 12~16 (1966)
- 85) 善一章, 港湾における鋼材の腐食, 防食について, 日本材料学会第20回腐蝕防食部門委員会資料(1966)
- 86) A. S. Krisher, Measuring corrosion, Materials Protection, 4, No. 10, 8~10 (1965)

(昭和41年6月30日受付)

港湾技術研究所報告 第5卷8号

1966年6月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3-1-1

印刷所 中和印刷株式会社
東京都中央区入船町2の3