

# 港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH  
INSTITUTE MINISTRY OF TRANSPORTATION, JAPAN

第1巻 1号

Vol. 1 No. 1

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.....善 一章

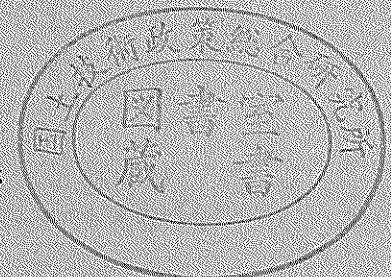
沖浜帯における波による砂移動について.....佐藤昭三・田中則男

アルミニウム粉末の混入がモルタル

およびコンクリートの強度に及ぼす影響.....小宮山正文・森口拓

1963年2月

運輸省港湾技術研究所



## 巻 頭 言

本研究所は37年4月、運輸技術研究所の港湾部門と港湾局調査設計室とを併合して世界に未だその例を見ざる港湾技術の総合研究所として発足したものであります。

かえり見ますれば、昭和21年5月、当所の前身が鉄道技術研究所の港湾研究室として発足以来多大の研究成果をあげ、港湾建設事業に大きな貢献をとげてまいりました。

近年、経済の急速な成長に伴い、港湾建設 臨海工業地域の造成 海岸防災等の事業量は増加の一途をたどっており、港湾技術の基礎研究機関として当所の果す役割は一段と重要度を加えてきました。

成立以来、一年に満ちませんが、鉄道技術研究所時代より17年間の成果をひきつぎ、研究面の充実をはかると共に国内はもとより A. A. , ラテンアメリカ諸国の研修生を受け入れ海外技術協力の一翼をになつております。

更に、38年度は設計基準部の成立が確定し、当所の特色である総合性が、尚一層発揮せられる事と確信します。

この時にあたり、研究面の成果の結晶とも云うべき研究所報告の初刊号を刊行いたします事は誠に意義ある事と思えます。

当報告書が、港湾事業関係者に広く活用せられ、港湾建設の一翼をになう事を切望してやみません。

1963年2月

港湾技術研究所長

福 内 大 正

## 目 次

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	1
§1. ま え が き	2
§2. 実 験 の 概 要	3
§3. 室 内 実 験	6
3-1 測 定 電 極	7
3-2 腐食環境の調整	7
3-3 測 定 方 法	7
3-4 測 定 結 果	11
3-5 考 察	11
§4. 野 外 実 験	15
4-1 測 定 電 極	15
4-2 測 定 方 法	19
4-3 測定結果および考察	20
4-4 考 察	20
§5. む す び	21
§6. あ と が き	21
沖浜帯における波による砂移動について	23
§1. 概 要	23
§2. 波による砂の移動限界	24
§3. 砂移動の方向	28
§4. 砂移動の形式	31
§5. む す び	33
アルミニウム粉末の混入がモルタルおよびコンクリートの強度に及ぼす影響	35
§1. 結 言	35
§2 使 用 材 料	36
2.1 セ メ ン ト	36
2.2 細 骨 材	36
2.3 粗 骨 材	36
2.4 ポ ゾ ラ ン	37
2.5 界 面 活 性 剤	37
2.6 発 泡 剤	37

§3 試験方法	37
3.1 注入モルタル	37
3.2 注入モルタルの練り混ぜ	37
3.3 空気量試験	39
3.4 流動性試験	40
3.5 強度試験	41
§4 試験結果およびその考察	41
4.1 アルミニウム粉末が注入モルタルの空気量におよぼす影響	41
4.2 アルミニウム粉末が注入モルタルの流動性におよぼす影響	42
4.3 アルミニウム粉末がモルタルおよびコンクリートの強度におよぼす影響	43
§5 結論	45

## Contents

Excerimental Study on Estimation of Corrosion Rate of Mild Steel under Maritime Enviroments .....	1
Laboratory Study of Sand Movement on offshore Zone .....	23
Effects of Powdered Aluminium as an Ingredient upon the Strengths of Mortar and Concrete.....	34

# 沖浜帯における波による砂移動について

佐藤 昭 二\*・田 中 則 男 \*

## Laboratory study of sand movement on offshore zone

Author's experiments were conducted to examine sand movement on offshore zone using a glass walled wave channel showing in Fig 1. Sand having a medium diameter of the range from 2 mm to 0.125 mm, and waves from 20cm to 7cm in height and from 6 sec to 1 sec in period were used through the experiment.

In this paper the follows are studied

1. The initiation of sand movement due to wave.
2. The direction of sand movement.
3. The mode of sand movement.

1. THE INITIATION OF SAND MOVEMENT DUE TO WAVE. For the initiation of the general movement (due to Manohar's definition), authors got a experimental equation as Eq(4), and compared this with the equation obtained from author's field studies using radioactive glass sand and other's. (see Fig 5)

2. THE DIRECTION OF SAND MOVEMENT. Authors indicate that the mode of sand movement is classified in the three states as shown

- a. The first state-net onshore transport.
- b. The second state-net offshore transport.
- c. The third state-net onshore transport.

and show the relationship between wave characteristics and property of sand, in these states turning attention to the gradient of pressure amplitude at the bottom. (see Fig. 6, 7, 9, and Eq. (11))

3. THE MODE OF SAND MOVEMENT. Using radioactive glass sand of Cr-51, and dyed sand, authors observe the mode of sand movement of the above mentioned three states, relating it to ripple movement. In Fig. 11, 13, 14 typical examples of distribution of radioactive glass sand in the three states are shown.

## §1 概 要

一般に砂浜海岸においては、沿岸砂洲の沖側、すなわち沖浜帯の海底勾配は1/100程度以下で砂の移動を論ずるとき、この部分は水平床とみなしても大差はない。このために、Manohar<sup>1)</sup>、Vincent<sup>2)</sup>、Goddet<sup>3)</sup>など多くの人々が水平床で実験を行ない、沖浜帯における砂移動の特性のいくつかを明らかにして来た。しかし、底質の移動の機構は複雑なために、なお未解決の問題も多くある。したがって、著者らも、この未解決な問題を多少なりとも明らかにするために2次元水路を用いて水平床における実験を行なった。

一般に、波の水底に作用する力がある値以下の場合、底質は静止したままであるが、この値が増加するにつ

\* 水工部 漂砂研究室長

\*\* 水工部漂砂研究室

れて次のような限界をとつて砂は移動する。

- 1) 水底の表面に比較的突出した粒子がいくつか動き出す。これを, Manohar は initial movement と名づけた。
- 2) 水底の表面の第一層の砂がほとんど動き出す。これを Manohar は general movement と名づけた。
- 3) ripple の形成
- 4) ripple の消失

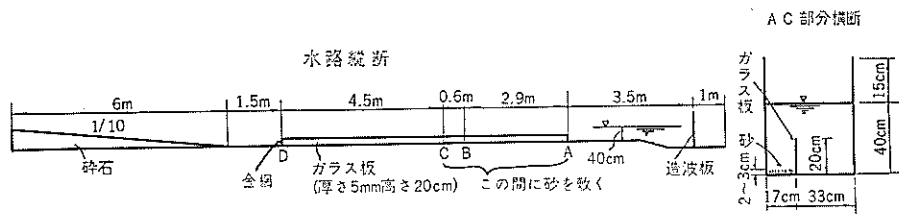
Manohar は, これらの各限界についての実験式を示した。石原・榎木両博士<sup>1)</sup>は, 層流境界層における砂移動について, 明確な理論的考察と非定常流の実験を行ない, 第一限界における Manohar の実験値を参照して移動限界水深を示す式を示した。一方, Goddet は, 10分後には弱いリッジが形成されるような弱い移動が砂表面に現われたときを初期移動限界として, そのような限界を示す実験式を求めた。著者らの実験では, 砂の粒径が 2~1mm のときには, 第2と第3の限界は区別ができたが, 0.71~0.35mm と, 0.25~0.125mm のときは, ほとんど区別することができなかつた。したがつて, 著者は, Manohar と著者らの general movement の実験結果から Goddet の実験値を参照して第2の限界を示す式を全面移動限界として求めた。次に, ripple が形成されて, 砂の移動が顕著になるがこのときの砂の移動方向は, Manohar の実験では, 常に ripple の移動方向と同じで岸向きであつたが, 著者らの実験では, ripple の移動方向は常に岸向きであり, 砂の移動方向は岸向きと沖向きの場合があつた。このような移動方向の変化の限界を示す式を実験から求めた。しかし, 移動量については, 明確な量的考察をすることはできなかつた。

最後に, ripple の一つを着色砂およびアイソトープ砂で置き換えて, ripple の移動と砂粒子の移動機構について実験的考察をした。

## §2 波による砂の移動限界

### 実験方法

水底の第一層の砂が, 表面全体に伝わつて動き出す限界を求める実験には, 幅 50cm, 深さ 65cm, 長さ 20m の木製ガラス張りフラッター式造波水路を用いた。しかし, 観測を容易にするために, 図一1に示すように, 水



図一1 実験方法

路中央 8m の部分を厚さ 5mm, 高さ 20cm のガラス板で仕切り, その中央部約 3m の間に砂を 2~3cm の厚さに敷いて, 波を当てた。反射波を消すためには, 水路の一端に水路幅一杯に 1/10 の勾配で下層は径 5cm, 上層は 2cm 程度の碎石を入れた。これによつて反射波は 1割以下にすることができた。実験に用いた砂は, 0.2~0.1cm (0.2cm のフルイ目を通して 0.1cm に止まるもの, 以下同じ), 0.071~0.035cm, および 0.025~0.0125cm で, 水深は 40cm であつた。

実験は, 造波板の振幅を一定にし, その周期を次第に短かくしてゆき, 砂表面が全体にわたつて動き始めたときの波高と周期および底層流速を測定した。しかし, この限界は明確には区別しにくく, 多少の個人的誤差はま

ぬがれない。波高は物指、周期は stop watch で測り、底層流速は trichloroethylene, benzol および塗料を混合して水より多少重めの 1~3mm の粒子を砂表面に投入して、その動きを毎秒 32 コマの写真撮影をして波による最大流速を求めた。図-2 はこのようにして求めた流速の一例である。

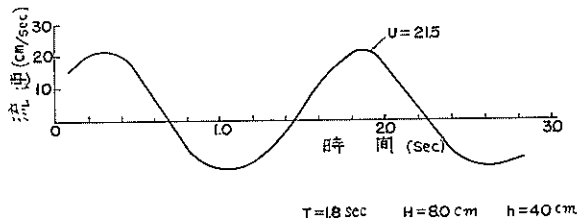


図-2

### 結果と考察

石原・樺木両博士は明確なる理論考察を行なつて、波高に比して砂粒が非常に小さい海岸底質の初期限界を論ずる場合には揚力を無視してよいことを示した。したがつて砂粒の自重による摩擦力と波による drage force の比がある値以上になると、砂層の表面における砂が動くと考え、移動始めにおいては、石原・樺木両博士が示しているように次式が成り立つ。

$$\left\{ \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d^3 \frac{\pi}{6} \tan \varphi \right\} = K \frac{\pi}{8} C_D u_b^2 d^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\sigma$  は砂粒の比重、 $\rho$  は水または海水の比重、 $g$  は重力の加速度、 $d$  は砂の粒径、 $\varphi$  は摩擦角、 $C_D$  は抵抗係数、 $u_b$  は波による砂粒頭部における最大流速、 $K$  は比例係数である。浅海波理論を用いると、層流境界層内の底より  $z$  上における波による最大流速は、Lamb<sup>6)</sup> によつて次のように与えられる。

$$u_z = U \{ 1 - e^{-0.706 \sqrt{\omega/\nu} z} \cos(0.706 \sqrt{\omega/\nu} z) \} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $U = \frac{\pi H}{T} / \sinh \frac{2\pi h}{L}$ ,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$

ここで、 $U$  は境界層の外側の最大流速、 $T$  は周期、 $H$  は波高、 $h$  は水深である。

また、砂粒頂部における最大流速  $u_b$  は式(2)における  $z$  の値として粒径に比例する値すなわち  $mb$  をとることとする。すなわち、粒径が大きければ大きいほど底から突出する高さが高くなるからである。さらに、抵抗係数  $C_D$  は一般に Reynolds 数  $Ud/\nu$  の関数であり、定常流で物質が球の場合 Reynolds 数が  $10 \sim 10^3$  の間のとき (表-1 に示すように実験値の Reynolds 数は  $10 \sim 10^3$  の間にある)、 $C_D$  は大体  $(Ud/\nu)^{-1/2}$  に比例すると考えてよいから、この場合にもこれが適用し得るものと考え、式(1)は

$$\left\{ \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d^3 \frac{\pi}{6} \tan \varphi \right\} = K \frac{\pi}{8} \frac{1}{\sqrt{Ud/\nu}} \times U^2 \{ 1 - e^{-0.706 \sqrt{\omega/\nu} md} \cos(0.706 \sqrt{\omega/\nu} md) \}^2 d^2$$

ここで、 $\tan \varphi \approx 1$  とし、整理すると、

$$\frac{U^2}{\left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \sqrt{\frac{Ud}{\nu}}} = \frac{4}{3} K' [ 1 - e^{-0.706 \sqrt{\omega/\nu} md} \cos(0.706 \sqrt{\omega/\nu} md) ]^{-2} \dots\dots (3)$$

ここで  $K'$  は比例定数である。この式を導入するに当つて、Reynolds 数が  $10 \sim 10^3$  の遷移領域に層流境界内で成立する式(2)を用いたこと、定常流力に適応されるべき抵抗係数を非定常流に用いたことなどの理論的なあいまいさがあることをつけ加えておく。

さて、左返は  $\sqrt{\omega/\nu} d$  の関数であるから、Manohar の general movement と上記の実験値および Goddet の実験結果 (これらの実験値の Reynolds 数  $Ud/\nu$  は 500 から 10 の間にある) から、 $U^2 / (\sigma/\rho - 1) g d \sqrt{Ud/\nu}$



表 - 1  $\sqrt{\frac{w}{v}} d$  と  $U^2 / \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1\right) d g \sqrt{\frac{U d}{v}}$  の計算  
 (但し、 $d=0.187$  の  $U$  は T.H. にある計算値である)

	d mm	$\left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1\right)$	T sec	H cm	U cm/sec	$\frac{U d}{v}$	$\sqrt{\frac{w}{v}} \cdot d$	$\frac{U^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1\right) d g}$	
著者の実験値 (全面移動の限界)	1.5 (2~1)	1.65	2.1 3.4	12.5 13.0	33.0 42.0	253 483	2.27 1.75	0.23 0.33	
	0.53 (0.7~0.35)	1.65	1.8 3.05	8.0 10.0	21.5 29.5	83 37	0.819 0.629	0.628 0.99	
	0.157 (0.25~0.125)	1.65	1.7 2.0 2.5	7.2 8.4 9.0	15.3 18.9 22.0	22 27 32	0.315 0.291 0.260	1.65 2.27 2.84	
	0.5 0.05	0.08	0.5 0.7 0.8	0.22 0.20 0.20	1.39 1.70 1.85	5 6 17	1.57 1.27 1.21	0.221 0.189 0.133	
	2	0.08	1.0	0.27	2.74	42	4.38	0.0738	
	0.7	0.18	0.5 1.0 2.0	0.95 0.65 1.50	3.78 3.30 6.90	20 18 37	2.20 1.57 1.10	0.260 0.208 0.634	
Goddet の実験値 (砂粒の静い変位が始まる限界)	2.5	0.18	0.7 1.0 2.0	0.65 1.60 2.25	5.15 7.35 10.30	106 140 200	6.31 5.51 3.88	0.0583 0.138 0.170	
	2.0	0.44	0.7 1.0 2.0	3.00 3.30 3.26	8.25 9.0 15.0	127 137 230	5.24 4.38 3.08	0.0788 0.0803 0.172	
	0.6	0.35	0.7 1.0 2.0	0.7 1.35 1.85	6.0 6.9 8.5	28 31 39	1.58 1.28 0.95	0.342 0.416 0.563	
	0.15	1.60	1.0 1.5 2.0	2.00 2.4 2.75	12.8 17.6 21.0	15 20 24	0.328 0.266 0.234	1.80 2.95 3.85	
	0.2	1.60	0.8 1.5 2.5 4.0	3.30 3.45 4.0 10.5	13.0 14.0 19.4 29.0	20 22 30 41	0.486 0.361 0.283 0.220	1.21 1.33 2.22 3.63	
	0.5	1.60	1.0 2.0 3.0	3.5 3.8 16.5	17.8 24.9 38.0	68 95 146	1.23 0.989 0.626	0.491 0.812 1.53	
	Mancosen の実験値 (層流に付随する general movement の始まり) $Q_b = \frac{1}{2} H \sin 2\theta$	0.147	1.65	60.0	0.42	25.0	39.0	0.098	4.29
				40.7	0.62	25.2	39.4	0.119	4.37
				12.7	1.46	18.5	29.0	0.183	2.75
				58.5	0.49	28.4	44.4	0.106	5.22
38.1				0.71	27.2	42.4	0.128	4.87	
17.8				1.26	22.4	35.0	0.170	3.65	
45.7				0.68	30.8	48.2	0.124	6.89	
25.8				0.90	23.2	36.2	0.144	3.84	
50.8				0.59	29.9	45.7	0.102	5.62	
43.2		0.63	27.4	42.8	0.121	4.93			
33.0		0.79	25.9	40.5	0.134	4.54			
0.28		1.65	60.0	0.63	37.5	113.0	0.23	2.93	
			40.7	0.85	34.5	104.0	0.268	2.58	
			12.7	1.96	24.8	74.8	0.406	1.58	
			58.5	0.603	35.3	106.3	0.226	2.67	
			38.1	0.861	32.8	98.9	0.27	2.39	
			17.1	1.490	26.5	79.9	0.355	1.74	
			45.7	0.753	34.4	103.7	0.262	2.57	
	25.8		1.160	29.9	90.2	0.313	2.09		
	50.8		0.700	35.6	107.2	0.245	2.70		
43.2	0.828	35.8	107.8	0.264	2.75				
33.0	0.990	32.3	98.0	0.288	2.36				

および  $\sqrt{w/vd}$  を計算し、図示すると図-3 のようになる。Goddet の実験値が他 2 者の実験値とともに一つの直線上にほぼなること、および実験に用いた底質の性質から考えて、Goddet の実験値の大部分が general movement の限界をほぼ示すものと考えてよいであろう。さて、この図から、全面移動始めを示す限界として次のような関係が得られる。

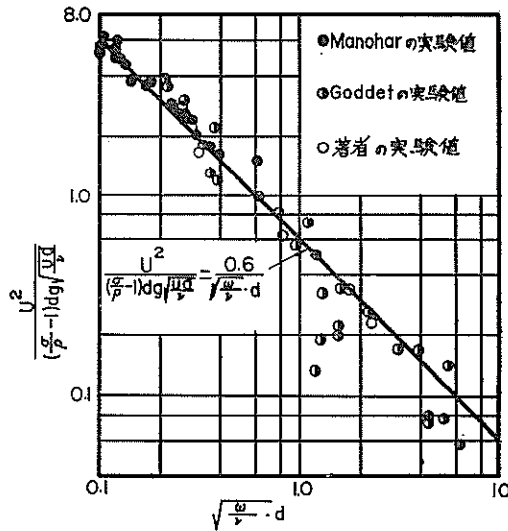


図-3 全面移動限界

$$\frac{U^2}{\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)gd\sqrt{Ud/\nu}} = \frac{0.6}{\sqrt{\omega/\nu} \cdot d} \dots\dots\dots(4)$$

石原・樫木両博士にならつてこの式に、

$$U = \frac{\pi}{T} \frac{H}{\sinh \frac{2\pi h}{L}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad T^2 = \frac{2\pi}{g} L_0$$

を代入して整理すると

$$\frac{H}{L_0} = \left\{ 0.4243 \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right) \right\}^{2/3} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L}$$

さらに  $H/L_0 = (H_0/L_0) \cdot (H/H_0)$ ,  $\sigma = 2.65$ ,  $\rho = 1.03$  を代入すると、

$$\frac{H_0}{L_0} = 0.565 \left(\frac{d}{L_0}\right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L} \cdot \frac{H_0}{H} \dots\dots\dots(5)$$

すなわち、この式は先に示したように、砂層の第一層の砂が一様に動き出す全面的移動限界を示すもので、石原・樫木両博士が示した第一層の中に特に突出した粒子が動き始める初期移動限界を示す次式とは異なる。

$$\frac{H_0}{L_0} = 0.171 \left(\frac{d}{L_0}\right)^{1/4} \sinh \frac{2\pi h}{L} \cdot \frac{H_0}{H} \text{ (石原・樫木の式)} \dots\dots\dots(6)$$

また、佐藤・岸両博士は移動の限界を示す式として

$$\sinh \frac{2\pi h}{L} = \left(\frac{2.5}{d}\right)^{1/2} \frac{\pi H}{2T} \text{ (佐藤・岸の式)} \dots\dots\dots(7)$$

なる式を示し、岩船における底質の粒径分布と、波の諸元との関係がこの式で示されることを観測から示している。この式で  $2.5 = 0.039/(\sigma-1)g$  を考慮し、同様に浅海波理論を適用すると

$$\frac{H_0}{L_0} = 10.2 \left(\frac{d}{L_0}\right)^{1/2} \sinh \frac{2\pi h}{L} \frac{H_0}{H} \dots\dots\dots(8)$$

となる。式(5), (6), (8)は同じ形の式で、異なるのは、右辺の常数と、 $d/L_0$  のべき数だけである。

また、井島・佐藤等<sup>7)</sup>は第8回海岸工学講演会でアイソトープ砂の移動観測結果から顕著な移動を示す限界を

$H_0/L_0$ ,  $h/L_0$  および粒径を用いて示した。ここでは上述の考察から、同じ資料と、鹿島港での観測資料から、 $\frac{H_0}{L_0} \left( \sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} \left( \frac{H_0}{H} \right)^{-1}$  と  $d/L_0$  の関係を示すと図-4 のようになる。図中の記号は表-2 に示すとおりである。この図から全カウント線が波向と一致して広がる場合と等カウント線の一部が波高と一致して多少広がる場合の限界すなわち工学的な見地から底質の移動が問題となる集団的移動を示す限界として次式が得られる。

$$\frac{H_0}{L_0} = 1.35 \left( \frac{d}{L_0} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L} \left( \frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots(9)$$

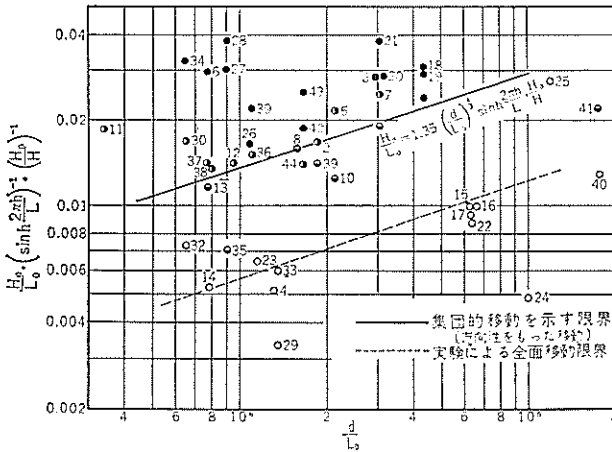


図-4 放射性ガラス砂の移動分布の種類に対する  $d/L_0$  と  $\frac{H_0}{L_0} \left( \sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{H_0}{H} \right)^{-1}$  の関係

表-2 放射性ガラス砂の移動分布区分

記号	最高カウントの位置	全体的な等カウント線の広がり方	備考
●	波の方向に移動	波の方向に広がる	潮流の方向に広がるだけの時は○とする。等カウント線の広がり全般(変らず全体的にカウント値が下る場合も●とする。
◐	波の方向に移動せず	同上	
◑	同上	一部のカウント線が波の方向に多少広がる	
○	同上	広がらない	

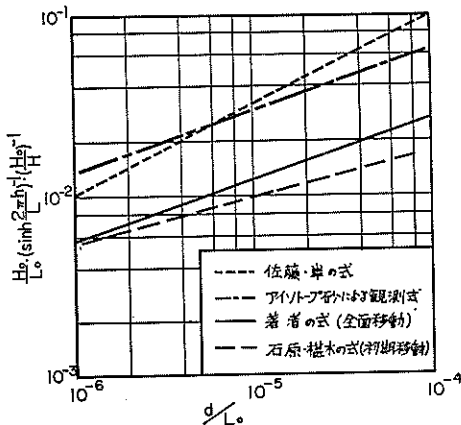


図-5 各移動限界式の比較

また、図には実験による式(5)も示してあるが、アイソトープ砂による観測結果ともほぼ一致しているようである。最後に以上の諸式を比較したのが図-5である。

### §3 砂移動の方向

実験方法、波向に直角な断面を通して単位時間に移動する砂の量すなわち砂移動量を測定するために、移動限界に関する実験と同じように、図-1に示したガラス板と水路のガラス面の間、幅 17cm の部分に砂を敷き、砂の増減を測定した。また、消波勾配から少し沖側の所には水路を横切つて仕切り断面については金網を張り、この点から岸側には砂が動いていかなないようにした。実験はまず図-1のAC部分に砂を敷き、一定の波を作用させて、表面の小さい凹凸がなくなつたとき、あるいは、ripple ができるときはそれが十分に発達し規則正しい形になつたとき、波を止め、CD間にこぼれた砂を取りのぞいた。次に、CB間の砂面の高さを 5mm 間隔でポイントゲージで測定して得た断面に幅 17cm を掛けて、最初の砂の量とした。次に15分~2時間波を当てたのち、BD間の砂の量を測定し、波を作用させる以前の砂の量と比較した。BからBCの間までの間の ripple がA B間における ripple と比較して、形状が変わつたり、ripple の谷における砂層の厚さがうすくなつたりし

て、B点をとる砂移動が測定開始時と異なると思われたときはただちに波の作用を止めた。このときの波高および周期は、抵抗線式波高計により電磁オシロに記録して測定し、底層流速は、直径2cmのプロベラ形流速計を、rippleの山の上1.5cmのところに取りつけて測定した。測定点はいずれもB点とした。

### 結果と考察

波高をパラメーターとして単位時間、単位幅当りの移動量と周期との関係を実験結果から示したものが、図-6である。岸向きの移動を+沖向きを一とした。測定方法に難点があるために正確な移動量を把握できず点は相当乱

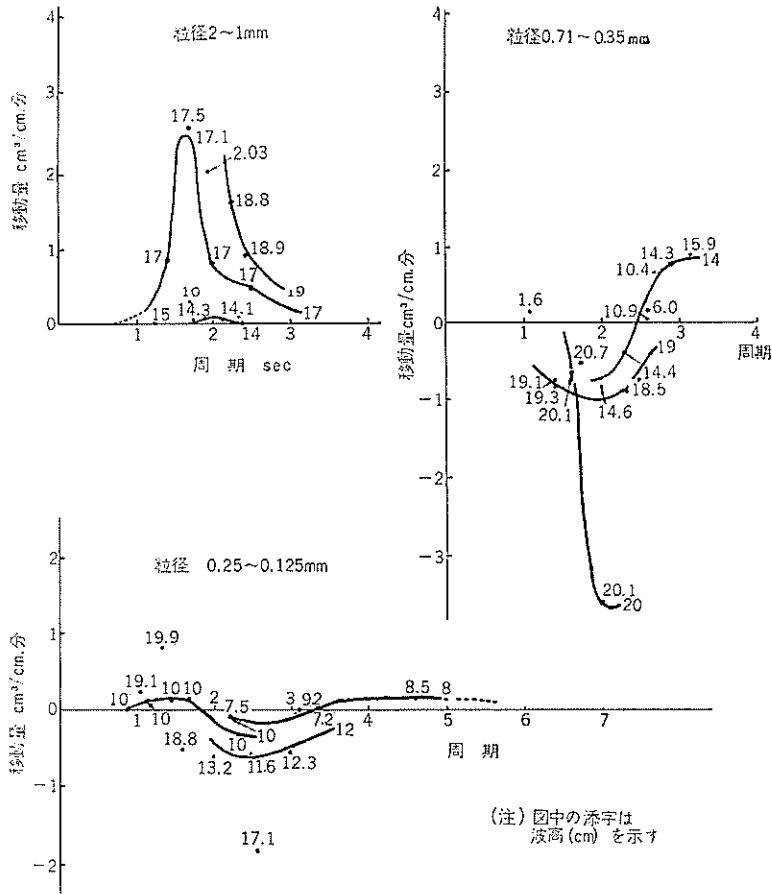
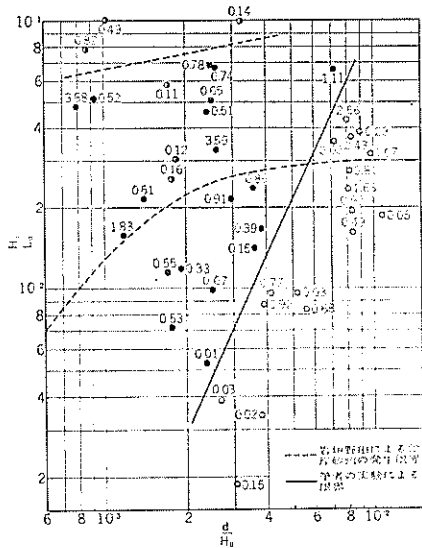


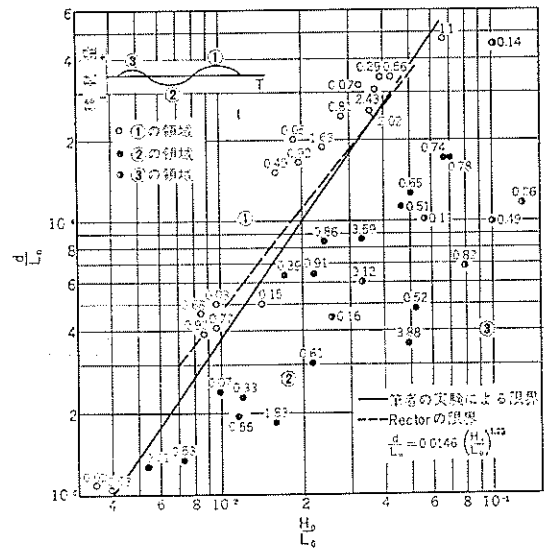
図-6 移動量と波との関係

れているが、砂の粒径が波高に対して十分小さいとき、砂移動の様相はモデル的に図-7の上方に示したようなものと推定される。すなわち、一定の波高のとき周期が減少するにつれて、移動開始（砂粒が動き始めるということではなく、岸向きの漂砂量が現われるという意味である）、岸向きに移動する①の領域、沖向きに移動する②の領域、岸向きに移動する③の領域、そして停止ということになる。実験中②と③の領域では常に ripple が形成された。実験では粒径が波高に比してさほど小さくない 0.2~0.1cm の粒径の場合には①の領域のみであつた。このことは、自然海岸で、砂利のような粒径の大きい底質は、一般に岸近くのみ存在し、沖浜には見られないことを説明することができる。しかし、0.2~0.1cm のものでも十分に大きい波高の作用によつて②はおよび③の領域も現われるものと思われる。そうして、いずれの領域でも一定の波高に対して移動量が極大になるある周期が存在するように思われる。次に、 $H_0/L_0$  と、 $d/L_0$  の関係を図示したものが図-7である。そのそばの数字

は移動量 (cm<sup>3</sup>/min·cm) である。この図を見ると、①の領域と②の領域に対する限界は区別することができるが③と③はできない。図には、Rector<sup>9)</sup>が、平衡勾配に関する実験を行なつたとき、沖側の水平なる部分の砂の増減から、傾斜部分の砂の堆積と欠沈の限界を決定した式も同時に示してある。Rector の実験は水深 1.2~0.7m, 砂の粒径は 3.4~0.2mm で行なわれたが、限界を示す線は水深 0.4m で行なつた著者の実験とほぼ一致している。



図一七 砂移動の各領域に対する  $d/L_0$  と  $H_0/L_0$  の関係



図一八 沿岸砂洲発生限界と砂移動の各領域との関係

次に、岩垣・野田の両氏<sup>9)</sup>が第8回海岸工学講演会で示した沿岸砂洲の発生限界と、著者の沖向きと岸向きの限界の関係を見るために  $d/H_0$  に対して  $H_0/L_0$  をプロットしたものが図一八である。これを見ると、沿岸砂洲が発生するときは、必ずしも沖浜における砂が沖向きになるとはかぎらない。一般に沿岸砂洲が発生するときは、前浜の砂は沖向きであり、発生しないときは岸向きであるといわれているが、沖浜における砂移動は少なくともわれわれや、Rector の実験の範囲内では沿岸砂洲の発生とは直接関係がないようである。次に図一七や図一八の表示では水深の影響を示すことができないので、Lhermitte<sup>10)</sup>が、ripple の発生限界を示すときに用いた水底における変動圧力を導入して見る。すなわち、図一七における  $H_0/L_0$  の代りに、水底における圧力振幅の水平方向の微分値をとり、 $d/L_0$  なる粒径の特性を示すものとして Reynolds 数を考える。

浅海波理論によると、水深が  $h$  のとき、水面から  $z$  の深さにおける水中の圧力は、

$$p = \frac{\rho g H}{2} \frac{\cosh k(h-z)}{\cosh kh} \sin\left(kx - \frac{2\pi}{T}t\right) + \omega z$$

これを  $x$  で微分し、 $k = \frac{2\pi}{L}$ 、 $z = h$  とすると、

$$\frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{H}{L} \frac{\pi}{\cosh(2\pi h/L)} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

したがって、 $\frac{1}{\rho g} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$  の振幅は  $\frac{H}{L} \frac{\pi}{\cosh(2\pi h/L)}$

となる。この振幅は、 $H_0/L_0$  と同じような意味を示す無次元パラメーターである。すなわち、水底における圧力

振幅勾配である。したがって、水底における砂移動を論ずる場合には、波形勾配の代りとして圧力振幅勾配を用いた方が水深の影響をよく表わすことができるように思われる。次に Reynolds 数としては、 $Ud/v$  をとつて、 $\frac{H}{L} \frac{\pi}{\cosh \frac{2\pi h}{L}}$  と

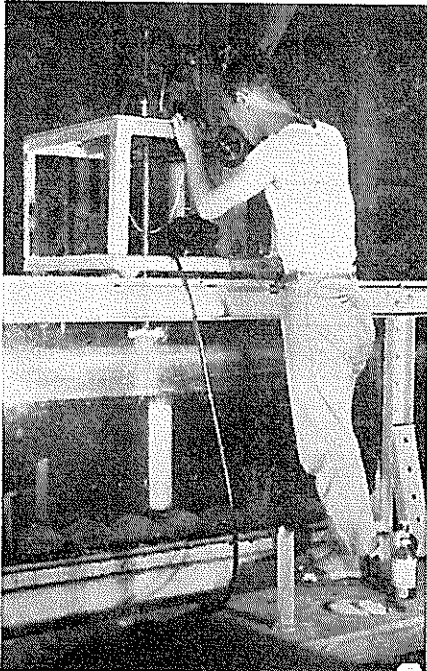
の関係を示すと図一9のようになる。  
この図から岸向きから沖向きに変わる限界を示す線を求める

$$Ud/v = 1.2 \times 10^4 \left( \frac{H}{L} \frac{\pi}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \right)^2$$

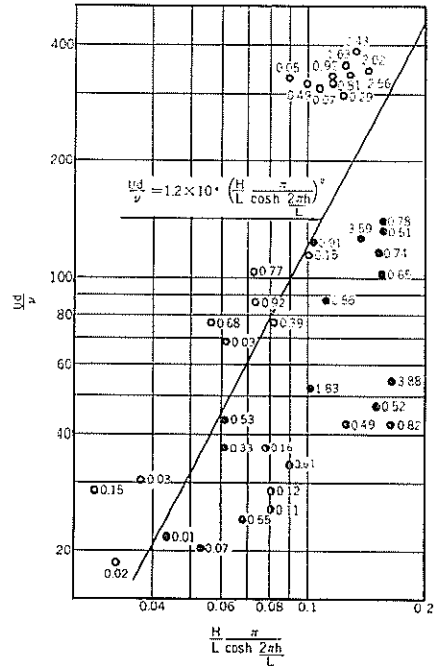
#### §4 砂移動の形式

##### 実験方法

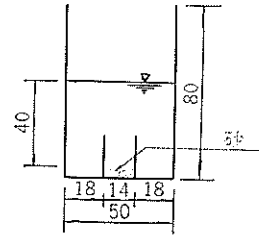
この実験には、幅 50cm、高さ 80cm、長さ 37m の鋼製ガラス張りフラッター式造波水路を用いた。この水路の造波板から 8m と 14m の間を 図一10 に示すようにガラスで仕切り、砂を 5cm の厚さに敷き、水面を砂面から 40cm にして、一定の波を当て、ripple が形成されたのち、ripple の一つを Cr-51 をふくむ放射性ガラス砂または着色砂で置き換え、その移動を調べた。Cr-51 は 27 日の半減期を持ち、0.3MeV の弱いγ線のみを放出する。



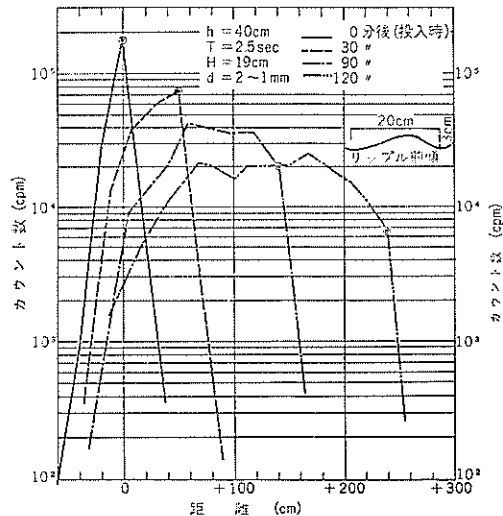
写真一 水密性シンチレーション検知器



図一9 砂移動の岸向きから沖向きに変わる限界



図一10 水路横断 (単位 cm)



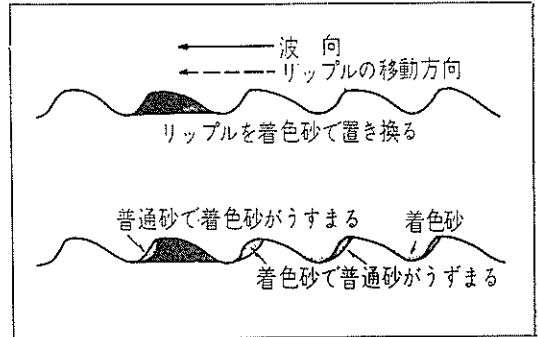
図一11 砂移動領域①に対するガラス砂の分布の一例

ガラス砂は 2.65 の比重を持ち、粒径は実験の砂と同じにした。着色砂は、実験砂を十分に洗浄乾燥したのち市販のマジックインキで着色した。実験に当つて ripple のみを置き換えたのは、最初に砂層の深さいっぱいガラス面に接して着色砂を置き換えて、波を作用させた結果、いつたん ripple が形成されれば移動する部分は ripple の厚さのみであることがわかつたからである。着色砂の移動は眼で、ガラス砂の測定は写真—1 に示すように、台車に水密性の円盤に入つたシンチレーションヘッドを取りつけその先端を砂層の上 5cm になるようにして放射能を測定する方法をとつた。

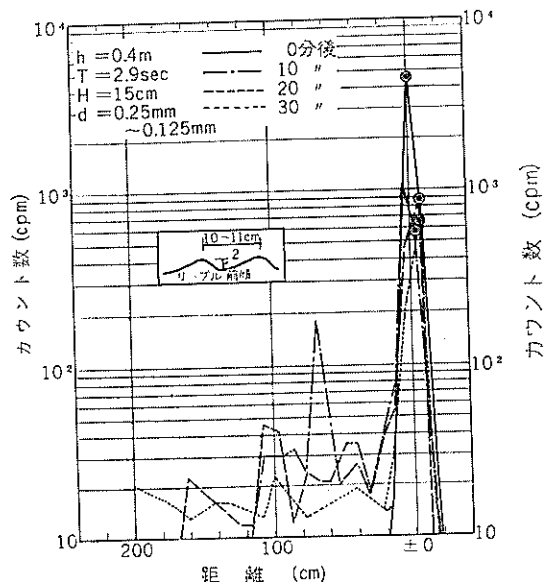
### 実験結果と考察

この実験は、図—7 の上方に示した各領域における砂移動の形態を調べることを目的としたものである。①の領域すなわち砂の移動量が岸向きであるとき、ripple の一つをガラス砂で置き換え、それに波を当てたときの放射能の分布、すなわち、毎分当りのカウント数と水路の長さ方向の関係を図11に示す。横軸の0点は最初にガラス砂で置き換えられた ripple の山の位置である。この ripple の各時間における位置は2重丸で示してある。また、横軸の+は岸向き、-は沖向きである。放射能の測定は常に ripple の山の上で行なつた。この図から最初にガラス砂で置き換えられた ripple に先行してガラス砂が岸側に移動することはないが、それよりおくれ一部ガラス砂は進む。これは、これまでの多くの実験で知られているように、浅海では、波の山が来たとき ripple の

岸側にうずがで、このうずによつて浮遊された砂は、波の谷のとき、それより沖側のいくつかの ripple の上に分散されるが、一度ある ripple 上に浮遊分散された砂は、次の波の山によつてその ripple の岸側面に集まり、その部分を越えて一つ前の ripple 上に達することはないためである。この状態は ripple の一つを着色砂で置き換えたときの分布状況を示す図 12 によつても明瞭である。すなわち、着色砂で置き換えられた ripple は、それより前方の ripple から来た砂によつて岸側面からうすめられてゆき、同時にその後方の ripple は岸側面から次第に着色されてゆく。したがつて ripple の沖側面に対する砂の供給はほとんどなく、ripple は常に前進するわけであるが、①の領域では、浮遊して沖側にもどされる砂の量は ripple の岸側面にそつて掃流される砂の量より少ないので全体として砂は岸側に向かうことになる。これに反し、②の領域では、浮遊して沖側にもどされる砂の量が岸方向に動く砂より多くなるために、全体として砂の移動は沖向きになる。そのときのガラス砂の分布状況を図—13に示す。この②の領域のときが ripple が後退する場合もあつたが、それは水路の一端にうけた消波装置が、1/10 勾配の木製であつたので、反射波の影響が現われ、ripple が不規則になつたためと思われる。これは、消波を比較的考慮した前述の砂移動の

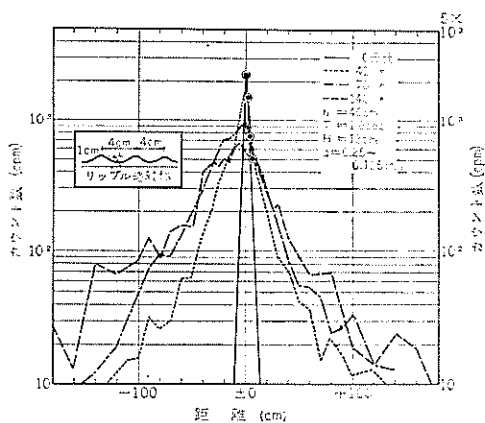


図—12 ripple 移動にもなう着色砂の分布



図—13 砂移動領域②に対するガラス砂の分布の一例

方向の実験では、常に ripple は岸向きであつたことからもうなずけることである。



図—14 砂移動領域③に対するガラス砂の分布の一例

次に③の領域の実験の例は図—14に示される。この場合は、ripple は小さかつたので、放射能の測定は、ripple の位置に関係なく等間隔で行なつた。この場合は、ガラス砂は、それが置き換えられた ripple を越して、岸側にも分散した。このときの ripple の形は、前者のように、前傾することなくほぼ対称で、ripple の上に波の山が来たときばかりでなく、谷が来たときにもうずがける。すなわち、ripple を越えて、岸側にも浮遊されるようになる。この図では、波高が小さかつたためか、全体としての砂移動はほとんど0であるが、少し波高が大きくなれば、岸向きの浮遊砂が多くなり、砂は全体として岸向きになるものと推定される。

## §5 む す び

本研究は、実験方法に多少の問題はあるが、沖浜における砂移動について、ある程度の特性を明らかにすることができた。今後は、砕波帯における砂移動の特性を調べてゆく予定である。

最後に、本研究を進めてゆくに当たり、多くの御指示を頂いた井島博士に感謝の意を表す次第である。特にアイソトープ砂の実験による集団的な移動限界を示す式は、井島博士の御指導のもとにできたものである。

## 参 考 文 献

- 1) Madhav Manohar: Mechanics of Bottom Sediment Movement due to Wave Action, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 75, 1955.
- 2) Vincent, G.E.: Contribution to the Study of Sediment Transport on a Horizontal Bed due to Wave Action, Coastal Eng. No. 6, 1958.
- 3) Goddet, J.: Étude Du Début Déentraînement Des Matriaux Mobiles sous l'Action de la Haule, la Houille Blanche No. 2 Mars-April 1960
- 4) 石原藤次郎・樫木亨: 漂砂の移動限界流速, 限界水深及び移動量について, 第7回海岸工学講演会講演集, 1960年11月
- 5) Lamb, H.: Hydrodynamics
- 6) 佐藤清一・岸 力: 漂砂に関する研究(7), 波による海底剪断力と底質の移動; 建設省土木研究所報告第85号-6昭和27
- 7) 井島・佐藤・青野・鶴川: 茨城県磯浜海岸の漂砂について, 第8回海岸工学講演会講演集, 1961年9月
- 8) 岩垣雄一・野田英明: 海岸変形の実験に於ける縮尺効果の研究, 第8回海岸工学講演会講演集, 1961年9月
- 9) Rector, R. L.: Laboratory Study of Equilibrium Profiles of Beaches, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 41, 1954.
- 10) Lhermitte, P.: Mouvements des Materiaux de Fond sous l'Action de la Houle, Proc. of 7th Coastal Engineering, 1960.