

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 13

NO. 4 (2)

DEC. 1974

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第13巻 第4号(2) (Vol. 13, No. 4(2)), 1974年12月 (Dec. 1974)

目 次 (CONTENTS)

鹿島港建設に伴う海底地形変化について—事例研究—佐藤昭二・田中則男・佐々木克博.....	3
(The Case History on Variation of Sea Bottom Topography Caused by the Construction Works of Kashima Harbour Shoji SATO, Norio TANAKA and Katsuhiro SASAKI)	

鹿島港建設に伴う海底地形の変化について

—事例研究—

佐藤 昭二*・田中 則男**

佐々木 克博***

要 旨

砂浜港湾の建設にあたって、漂砂の問題は常に重要な技術課題の一つであり、それゆえに、相当入念な事前調査が繰り返されるのが常である。しかし、工事開始後に発生した種々の漂砂問題に関しては、体系的に報告される例はきわめて稀であろう。したがって、工事实施下における貴重な数々の経験は、工事担当者間に極めて個人的に蓄積されるにとどまってしまうことになる。このような傾向の打開のために、代表的な砂浜港湾の建設過程での漂砂問題を、事例研究的に取りまとめておこうと言うのが本研究の目的である。

砂浜港湾の代表事例として、第一に鹿島港を取り挙げた。衆知のように、鹿島港は、鹿島臨海工業地帯の中核として建設中の我が国最大の砂浜掘込み港湾である。

鹿島港は昭和37年度に試験工事、38年度から本工事が着工されたが、本報告が対象とした昭和48年3月の時点で、南防波堤 4050 m (計画 4500 m)、北防波堤 1050 m が施工済みであり、浚渫土砂処分および用地造成の目的で南海岸に 3903 万 m³、北海岸に 1135 万 m³ の土砂が投棄されている。

本報告は、これらの築港工事によって港湾周辺に生じた海底地形変化について述べたものである。解析のための基本的資料は、各年数回づつ繰り返されて来た深淺測量の成果であり、波浪、流れ、底質移動等の基礎現象の観測結果は、地形変化の原因あるいは機構に関する考察のために用いられている。

* 海洋水理部長

** 水工部 漂砂研究室長

*** 前水工部 漂砂研究室

The Case History on Variation of Sea Bottom Topography Caused by the Construction Works of KASHIMA Harbour

Shoji SATO*

Norio TANAKA**

Katsuhiko SASAKI***

Synopsis

This paper is the case history on variation of sea bottom topography caused by the construction works of Kashima Harbour.

Kashima Harbour is the biggest new artificially excavated harbour under construction on long sandy beach in the Pacific Coast of Japan. Construction works were begun at April, 1961. And before April, 1973, 1050 meters of the north breakwater and about 4050 meters of the south breakwater have been constructed. Furthermore, about 50 millions cubic meters of dredged sand have been thrown away on the beach of both side of the harbour.

Due to those large scale works, sea bottom topography and shore line have been varied remarkably over wide area around the harbour. In this paper, the details of those variation of topography are mentioned on the following problems, that is,

- a) Change of topography caused by construction of the working craft basin and the relationship between accretion of this basin and the wave characteristics.
- b) Topography in the harbour before dredging of the channel, especially, the formation and the characteristics of the shore line of circular arc shape.
- c) The formation and the variation of new beach due to throwing of large amount of dredged sand.
- d) Erosion of the coast at the down drift side of the harbour and accretion around the harbour entrance.
- e) Scouring around breakwaters and the stability of the mound of composite type breakwater.

* Head of the Marine Hydrodynamics Division

** Chief of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

*** Ex-member of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

1. 序 章	7
2. 鹿島海岸の自然条件	7
2-1 地 形	7
2-2 気 象	8
2-3 波 浪	8
2-4 流 れ	9
2-5 潮 位	11
2-6 底 質 粒 径	12
2-7 漂 砂	12
3. 鹿島港建設工事の概要	12
3-1 鹿島港築造の全体計画	12
3-2 防波堤, 護岸および潜堤の築造状況	13
3-3 陸削および浚渫土砂の捨土量と捨土区域	13
4. 鹿島港建設に伴う地形変化の概要	17
4-1 昭和36年8月と昭和40年6月の地形の比較	17
4-2 昭和36年8月と昭和43年6月の地形の比較	18
4-3 昭和43年6月と昭和45年12月の地形の比較	20
4-4 昭和45年12月と昭和48年3月の地形の比較	20
5. 鹿島港建設に伴う地形変化の詳細	22
5-1 船溜完成までの地形変化の詳細	22
5-2 港内地形変化の詳細	32
5-3 南海浜における地形変化の詳細	41
5-4 北海浜における地形変化の詳細	51
5-5 港外における土量の変化	57
5-6 防波堤周辺での局所洗掘	61
6. 結 論	70
7. 謝 辞	71
参 考 文 献	71
附 録—1. 防波堤および護岸の構造断面	73
A) 北防波堤	73
B) 南防波堤	74
C) 海岸護岸	77

1. 序 章

第2次大戦後の約30年、この間における我が国港湾の発展伸長は、実にめざましいものであった。この中で、大きな役割を占めてきたのは、昭和30年代後期より苫小牧港を皮切りに、続々と行なわれた大規模な砂浜掘込港湾の建設である。

これらの砂浜掘込み港湾の建設計画に際して、漂砂問題は大きな技術的課題であった。そのため、漂砂に関する事前調査に多大な努力が払われてきたのである。著者等も、苫小牧、鹿島、新潟、仙台港等の事前調査に直接従事し、これらの海岸における漂砂特性の把握に努め、あるいは、実験的な検討なども行なって、より良い砂浜港の建設に資してきたつもりである。

以後約10年を経過した現在、これら多くの砂浜掘込み港湾の建設工事は、ほぼ完成期を迎えている。これを機会に、この10ヶ年余の間に行なったこれら建設工事の経過を漂砂の観点から振り返り、記録に止めておきたいと思う。このような発想は、第一に砂浜掘込み港湾の建設計画に参画した一技術者の自らに対する技術的責任感の問題に由来する。第二に、著者らが兼々主張してきたところであるが、漂砂問題解決の第一歩が事例の研究の積み上げにあると言う、基本的な考え方に負うところが大きい。この意味では本報告も、著者等が既に発表している報告（文献(1)(2)(3)）と同じ系列のものである。

今度の作業を始めるに当たって、2つの基本的な方針を持っていた。すなわち、第一に、起こった事象はできるだけ正しく把握すること、第二に、机上論であっても、その事象の発生するメカニズムをできるだけ考えて見ることの二つである。この二つは、研究の基本態度として当然なことである。

しかし、海底地形変化のメカニズムを考えること、特に地形変化を外力条件と関連付けることは、かなり困難な作業であった。これは一枚の深淺図が海底地形のある瞬間値を示すものでなく、長い期間をかけて測られたものであるという取り扱っている資料の質の問題に由来するものであり、また、本文において述べているように、漂砂現象の本質的な意味での難かしさに由来するものもある。すなわち、リップルやサンドウェーブなどに比べて、かなり大きなスケールの地形的特徴が、地域的に移動する事実が見られ（欠壊地域の移動は、しばしば見られるが）、このような場合には、堆積とか欠壊と言う事

象が、時間的な遅れをもって現われ伝播して行くことがある。入江等⁹⁾は地形変化の時定数と言う考え方を示しているが、地形的特徴のスケールによっては、この遅れは一荒天期間程度の長さをはかるに越えるものである。したがって、このような場合には、外力条件のみでなく、地形そのものも含めた一つのメカニズムとして現象を理解しなければならず、外力条件もかなり長期間にわたり平均化されたものとして取り扱わねばならない。著者等が近年行なっているような、深淺図とか航空写真など入手しやすい資料から、漂砂問題に関する実用的な指針を見出そうとする作業においては、瞬間的な外力特性と地形変化の関係の詳細に拘泥することが、かえって妨げとなる場合がある。鹿島の波、新潟の冬期の波、さらには日本海北部の波、太平洋東岸の波と言った感覚で外力を受け止めた方が、現象の整理を円滑にすることが多い。

この作業のような事例研究においては、生じた事実が研究対象とした港にのみ起こり得るような特殊なものなのか、あるいは、他の地域でも起こり得るような共通なものなのか、といった選別が重要であると思う。この選別のためには、生起事実の成因と機構を理解し得ること、もしくは数多くの地域について検討することが必要である。前者については前述したような事情で不満足な点が多い。この欠陥は、以後、他の港をできる限り多数検討することで補いたい。

なお、鹿島湾周辺における漂砂特性および地形変化に関しては、すでに何度か各々の段階で発表している^{9)~10)}。本報告には、それらの成果も取り入れられている。

2. 鹿島海岸の自然条件

本章では、鹿島港建設以前の地形、気象、波浪、潮位、流況、漂砂などの自然条件を、かつて著者らがとりまとめた「鹿島工業港の自然条件について（漂砂特性）¹¹⁾」を参考に簡潔に述べる。

2.1 地 形

図-1に、江名から犬吠崎に至る鹿島海岸の水深 -200 m 以浅の海底地形図を示し、図-2には、昭和36年7月に測量された鹿島港附近の建設以前の深淺図を示す。海岸線は東北東に面し、海に向かって凹形に開いた滑らかな湾曲をなしている。汀線附近の勾配は 1/10~1/30 で、沿岸砂州の良く発達している水深 -4 m~-5 m までは 1/60、それ以深の -15 m までは 1/100~1/120 である。水深 -20 m 以浅および -50 m 以深では、等深線は海岸

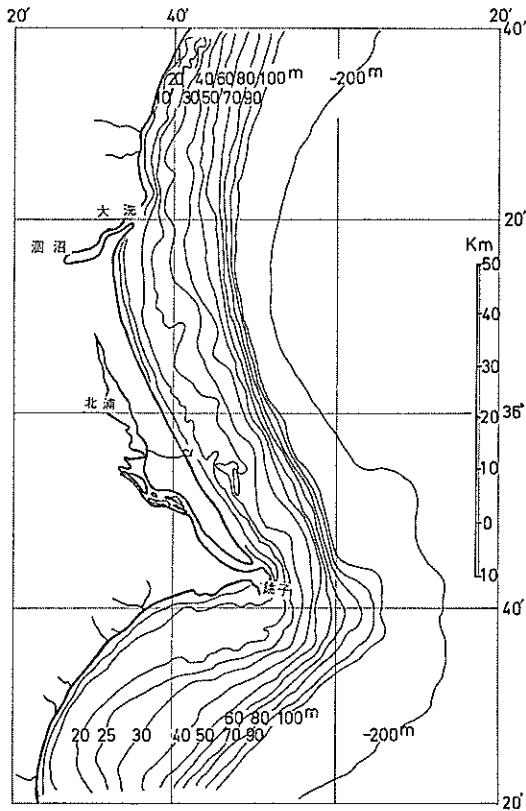


図-1 鹿島灘の海底地形

にほぼ平行に走るが、 -20 m から -50 m 附近の間の等深線は、基盤岩の露出のために港湾建設予定地点付近で乱れ、複雑な形状を捉する。後浜に海岸と平行に $+7$ m $\sim +8$ m の砂丘がつづいている。

2.2 気 象

図-3(a), (b) は、昭和37年4月から昭和40年3月の間に、鹿島港工事基準面上 27.29 m 地点に設置されたコーシンペン型風向風速計により観測された風の記録を示すものである。風の資料は、海風についてのみ整理され、継続時間別風向出現率として表わされている。これによると、海風としての卓越風向きはN方向からNE方向であり、 10 m/sec 以上の強風の場合特にこの傾向が顕著である。また、同様に図-4には、風速 10 m/sec 以上の風の継続時間別風向出現率を季節別に示した。各季節共 N \sim NE の風が卓越するが、特に夏と冬は NNE がやや多い。観測全期間で海風と陸風の発生比は、海風 57.2% 、陸風 42.8% であった。

2.3 波 浪

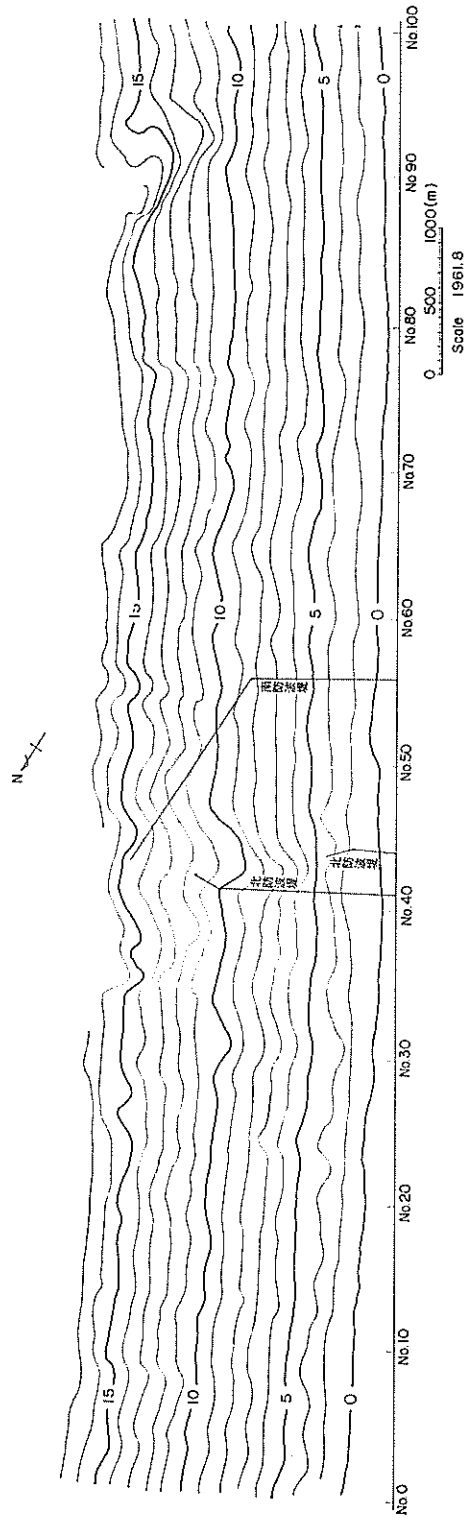


図-2 港湾建設以前の周辺深図

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

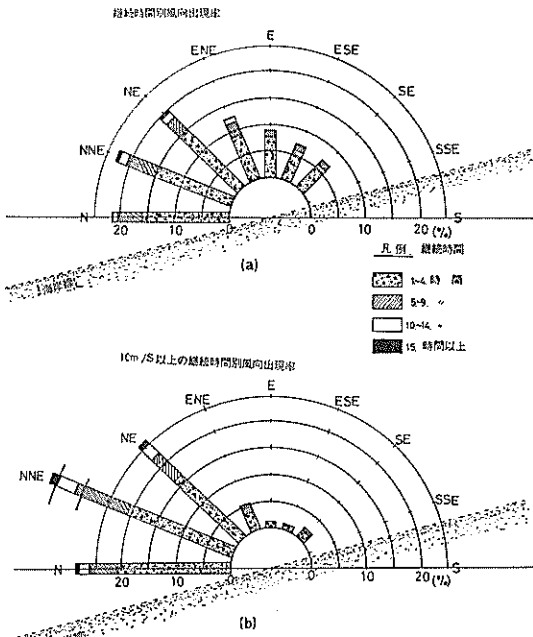


図-3 鹿島灘の海風分布 (1) 通年

図-5 は、昭和37年3月から昭和42年3月までに、水深-11mに設置された水圧式摺動抵抗型波高計により測得された有義波高 $H_{1/3}$ の未超過確率図を示す。これによると、 $H_{1/3}$ が50cm以下の静穏な日は17%にすぎず、 $H_{1/3}$ が1m以下でも58%と波高の低い波の出

現率は小さい。また、2m以上の高い波高の出現率は10%以上もある。一方、周期はほぼ7~11秒の範囲である。更に、昭和46年6月から昭和48年3月までの水深-20mに設置された超音波式波高計によって測得された $H_{1/3}$ の未超過確率と周期の超過確率を図-6に示す。これによると、波高50m以下の静穏な日が10%前後ときわめて少なく、未超過確率50%の波高でも1.5mに達する。さらに、波高2m以上の波高の出現率も20%以上もある。この様に、-20mに設置された超音波式波高計によって測得された波高は、前述した-10mに設置された水圧式波高計で測得された波高に比べ、全体的に波高が大きい。また、図-7には、季節別波高出現率を示す。図に示すように50cm以下の静穏な日は、夏期が23.4%で最も多く、春期が最も少なく11.7%である。また、2m以上の高い波の出現率は、夏期が7.3%が最も少なく、他の季節はほぼ同様で11~12%である。次に図-8には、昭和37年4月から昭和42年3月までの目視による波向別波高の出現回数を示す。これによると、波高1m以上の波では、ENEに近い方向の波が最も多く、波高が1.5m以上になると、NE方向からの出現頻度が高くなる。

2.4 流れ

昭和38年8月4日~5日に、沖合に小野式流速計を設置し、流況観測を実施した。この結果から次のようなことが報告されている。すなわち、海流および潮流による底層流は10cm/sec以下で、潮位との相別は見られない。

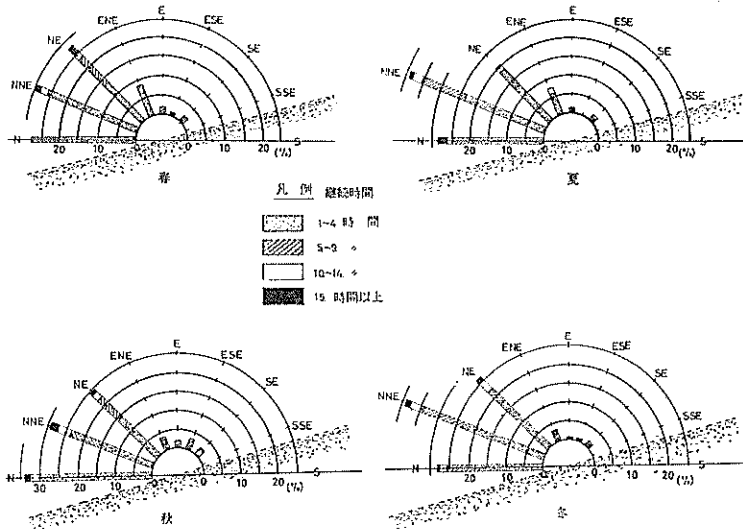


図-4 鹿島灘の海風分布 (2) 季節別

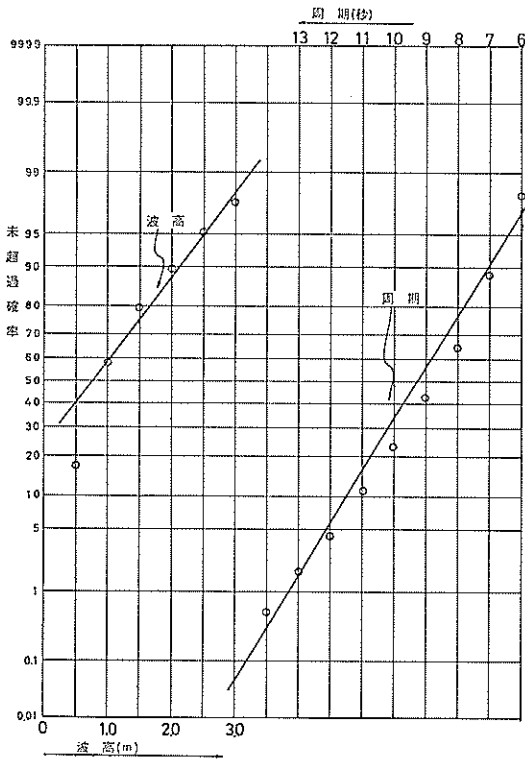


図-5 鹿島海岸における波高，周期の発生確率 (1)
水深 -11 m (水圧式波高計)

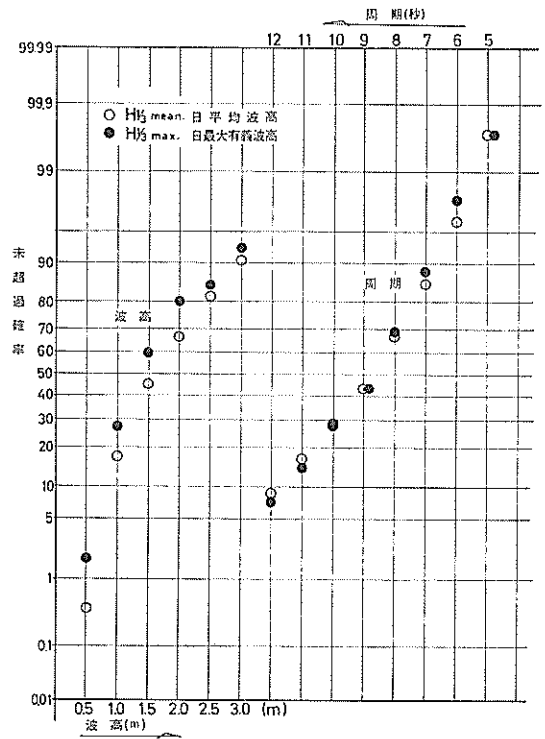


図-6 鹿島海岸における波高，周期の発生確率 (2)
水深 -20 m (超音波式波高計)

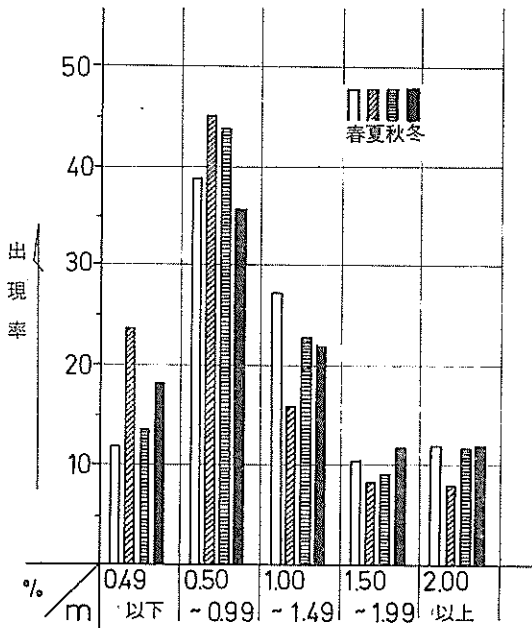


図-7 季節別の波高出現率

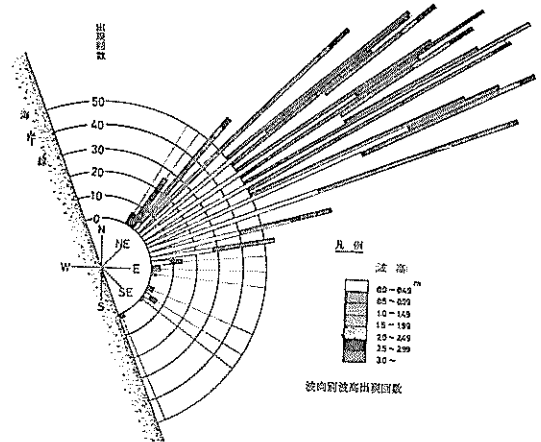


図-8 波向発生回数

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

強い流れは、波によって起こされる。そして 20 cm/sec 以上の底層流は、波高 2m 以上の波によって、50 cm/sec 以上の底層流は、3m 以上の波によって起こされる。しかし、1 m/sec を超えた流れは観測されていない。

流向については、水深 10m 付近では波向きに一致するか海岸に平行なことが多い。また、海水ボールによって観測された碎波帯における表層流は、波の輸送エネルギー

ギーの沿岸方向成分の方向と一致することが多い。

2.5 潮位

図-9 は、昭和 39 年 12 月から昭和 40 年 1 月までの 1

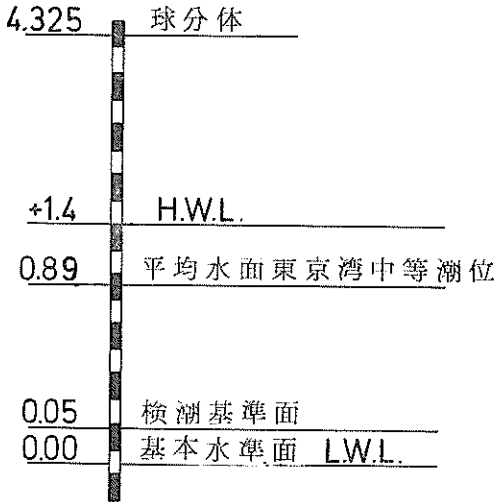


図-9 鹿島港潮汐標

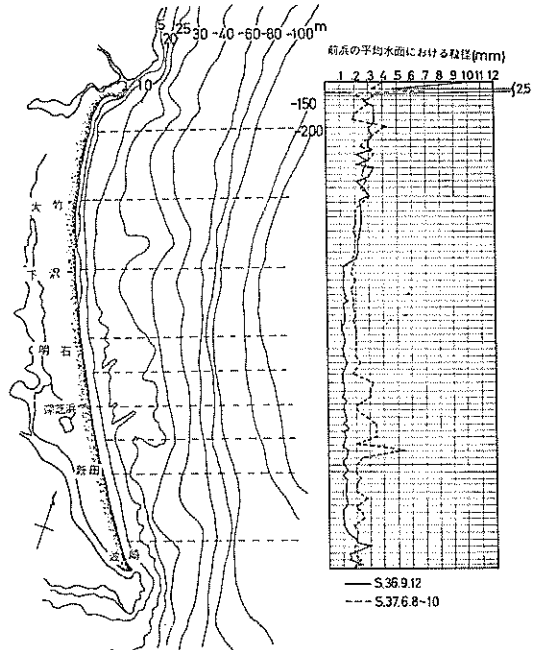


図-10 鹿島灘海岸汀線上の底質粒径分布

底質粒径分布 (S. 38. 7. 23~8. 24 採取)

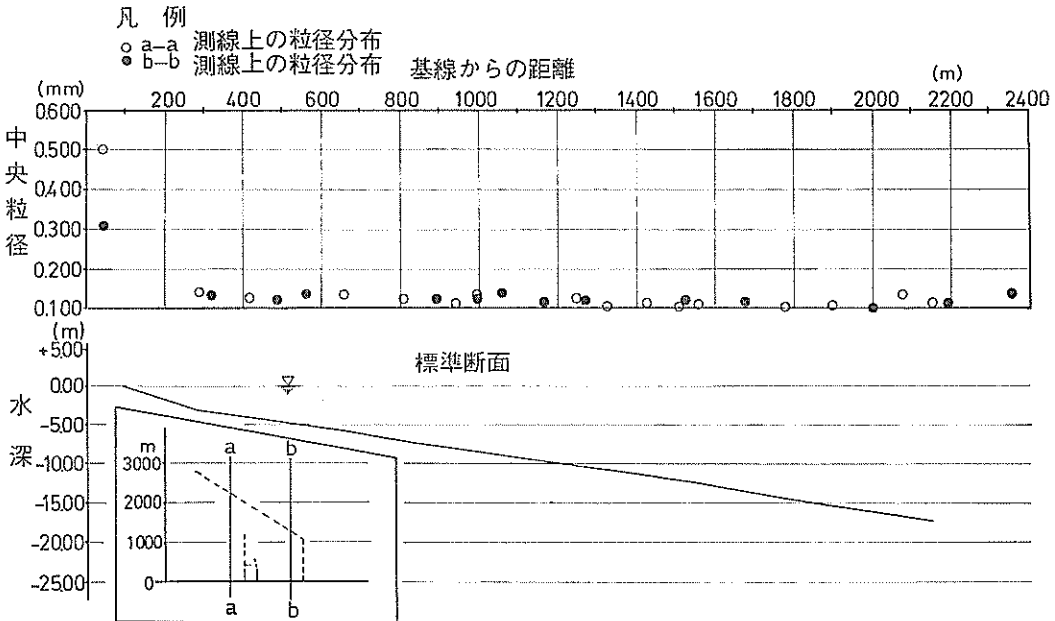


図-11 鹿島灘海岸の断面方向の底質粒径分布

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

昭和43年度に 20 万 ton 船舶を対象とした計画に改めたもので、この際外港の施設規模が大きくなった。また、工業用地の追加需要、土捨場の確保のため、北および南海浜に、大規模な埋立が計画されている。埋立の実施に伴い、南および北海岸護岸が計画され、更に南海浜の沖合には潜堤が計画されている。これらの各施設の規模は図に示すように次の通りである。

- 北防波堤 1050 m
- 南防波堤 4500 m
- 船溜南防波堤 520 m
- 船溜東防波堤 170 m
- 南海浜護岸 7350 m
- 北海浜護岸 2150 m
- 潜堤 7250 m
- 北海浜の埋立面積 110 万 m²
- 南海浜の埋立面積 405 万 m²

築造された外港防波堤および護岸の平面図および断面図は、附録として末尾に示した。

3.2 防波堤等外郭施設の築造状況

図-13 および表-1 に、防波堤、護岸および潜堤の年度別の施工状況を示し、次節 図-15 には南北海岸への捨土量と共に、各施設の伸長状況がグラフ化されている。

外郭施設の工事は、昭和37年度、試験堤としてその一部が施工された船溜南防波堤から着手され、先ず、作業船基地および中央水路開削のための侵入口としての船溜の完成が目ざされ、昭和39年度にはこれを完成している。次いで、南、北両防波堤の直部の伸長が昭和39年度から41年度を中心に行なわれ、南防波堤直部（南防波堤のう

ち汀線から汀線に直角に沖に伸びている部分、以下これを直部と呼ぶ）は、昭和41年度、北防波堤は43年度に完成している。南防波堤曲部（直部先端で折れ曲り、港内を覆うように斜めに沖に伸びる部分、以後これを曲部と呼ぶ）のケーソン据付けは、昭和40年度に着手され、年間 500~700 m の伸長という速さで進められ、昭和47年度末の時点で約 3050 m を施工済みである。

一方、南、北両海岸への土砂投棄に伴って、昭和41年度より南海岸の潜堤が、さらに43年度から護岸工事が着手され、土砂投棄地域の拡大にあわせて工事が進められている。北海岸護岸の着手は、昭和45年以降である。

3.3 陸削および浚渫の捨土量と捨土地域

図-14 に、昭和40年度から昭和47年度までの南海浜および北海浜への土捨場別捨土量を示す。また 図-15 は、護岸、潜堤の築造状況と捨土量の関係を示したものである。昭和40年度から始まった浚渫工事は、船溜基地から導入部を経て中央水路に至った。この年、南海浜への捨土量は 180 万 m³ である。この後、南海浜への捨土量は年々増加し、昭和43年度は 620 万 m³ で、累計捨土量 1550 万 m³ となった。この期間の捨土区域は、ほぼ南海浜の汀線から 500 m 以内である。この後、昭和44年度から捨土区域が旧汀線から 500 m より沖に（つまり護岸法線から沖合）なり、昭和47年度までに約 1890 万 m³ の土砂が捨てられ、南海浜への捨土の累計土量が 3903 万 m³ になった。一方北海浜には、昭和42年に 55 万 m³ 捨土されている。この捨土の区域は明瞭ではないが、北防波堤に近い汀線附近と推定される。その後捨土はなく、昭和45年から昭和47年の3年間で、約 1080 万 m³ の土砂

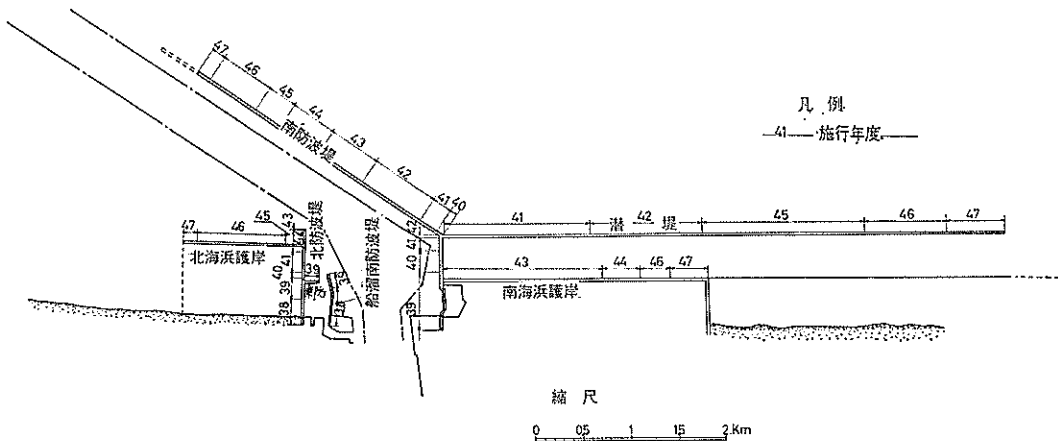


図-13 外郭施設の年度別施工状況

表-1 鹿島港外郭施設の年度別施工量

	37年度	38年度	39年度	40年度	41年度	42年度	43年度	44年度	45年度	46年度	47年度
北防波堤	年度別施工量	A ₁ , A ₂ : 450 B ₁ , B ₂ :	B ₁ : 250 B ₂ : 35	B ₁ : 600 B ₂ : 233	B ₁ : 603 B ₂ : 167	C ₁ : 250 C ₂ : 235 C ₃ : 235	43年度 1300(%) 44年度 50				
	累計	450	670	603	945	1180	1300(%)				
南防波堤(旧部)	年度別施工量		A ₁ , A ₂ : 600 B ₁ , B ₂ , B ₃ :	B ₁ : 233 B ₂ : 833	B ₁ : 167 B ₂ : 1000(%)	B ₁ : 砂止工					
	累計		600	833	1000(%)						
(旧部)	年度別施工量			B ₁ : 砂止工 C ₁ : 75	C ₁ : 200 C ₂ : 75	C ₁ , C ₂ : 700 C ₃ : 500	C ₁ , C ₂ : 500 C ₃ : 1475	C ₁ : 500 C ₂ : 305 C ₃ : 1995	C ₁ : 305 C ₂ : 2400 C ₃ : 2901	C ₁ : 500 C ₂ : 2901 C ₃ : 3031	C ₁ : 150 C ₂ : 3031 C ₃ : 3031
	累計			75	275	975	1475	1995	2400	2901	3031
船渠南防波堤 (旧部(狭い部))	年度別施工量	A ₁ , A ₂ : 200	A ₁ , A ₂ : 150 A ₃ : 150								
	累計	200	350	500(%)							
船渠東防波堤	年度別施工量				A ₁ ~A ₃ : 砂止工						
	累計										
南海浜護岸	年度別施工量		170								
	累計		170(%)								
北海浜護岸	年度別施工量				砂止工						
	累計										
前海浜護岸	年度別施工量										
	累計										
船渠への土砂採取	年度別施工量			170×10 ³	170×10 ³	475×10 ³	623×10 ³	461×10 ³	231×10 ³	818×10 ³	834×10 ³
	累計			170×10 ³	340×10 ³	815×10 ³	1438×10 ³	1899×10 ³	2130×10 ³	3048×10 ³	3882×10 ³
北船渠への土砂採取	年度別施工量										
	累計										

(注) 単位は m および m³

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

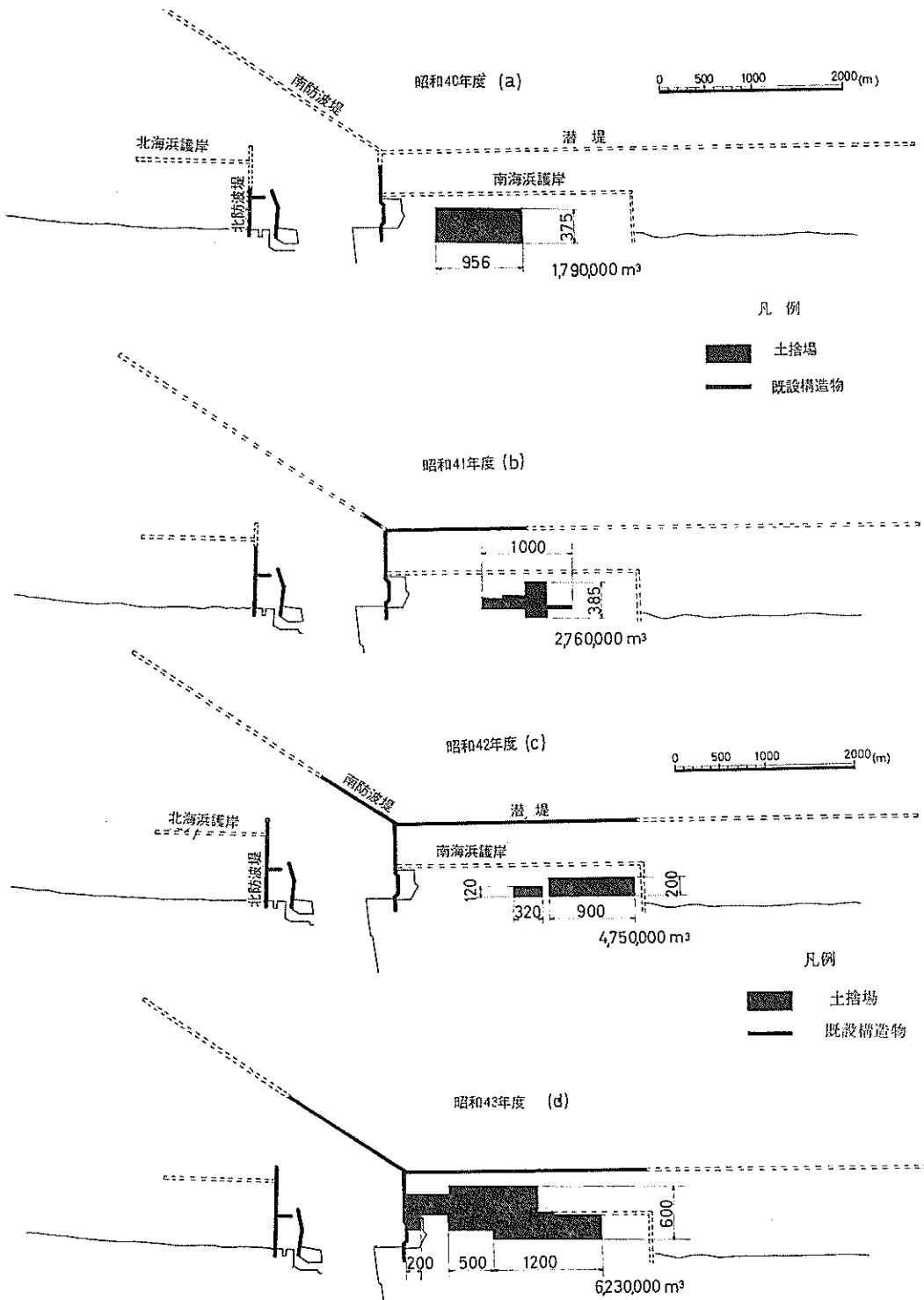


図-14 外郭施設および土砂投棄の年度別施工状況 (その1)

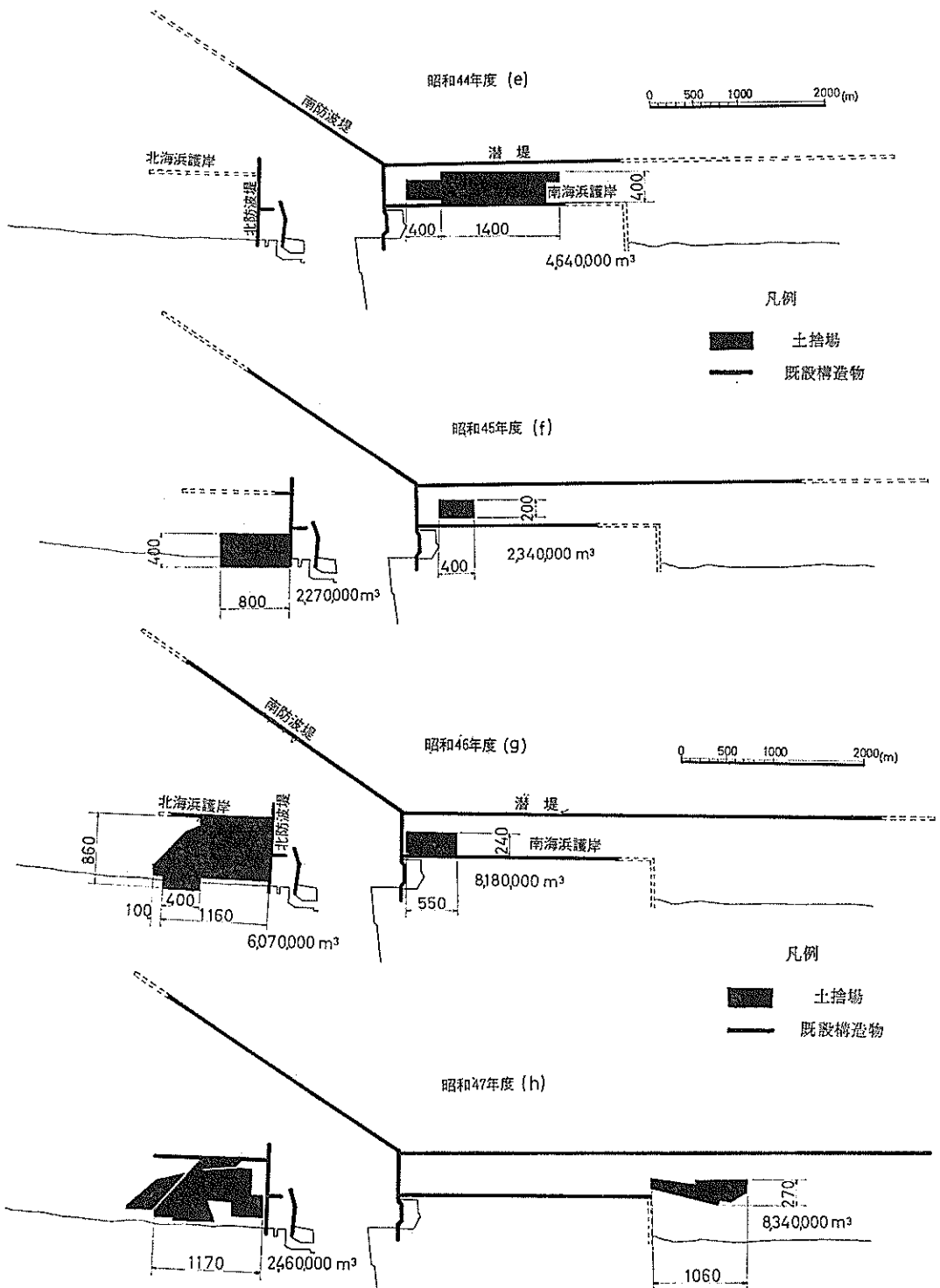


図-14 外郭施設および土砂投棄の年度別施工状況 (その2)

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

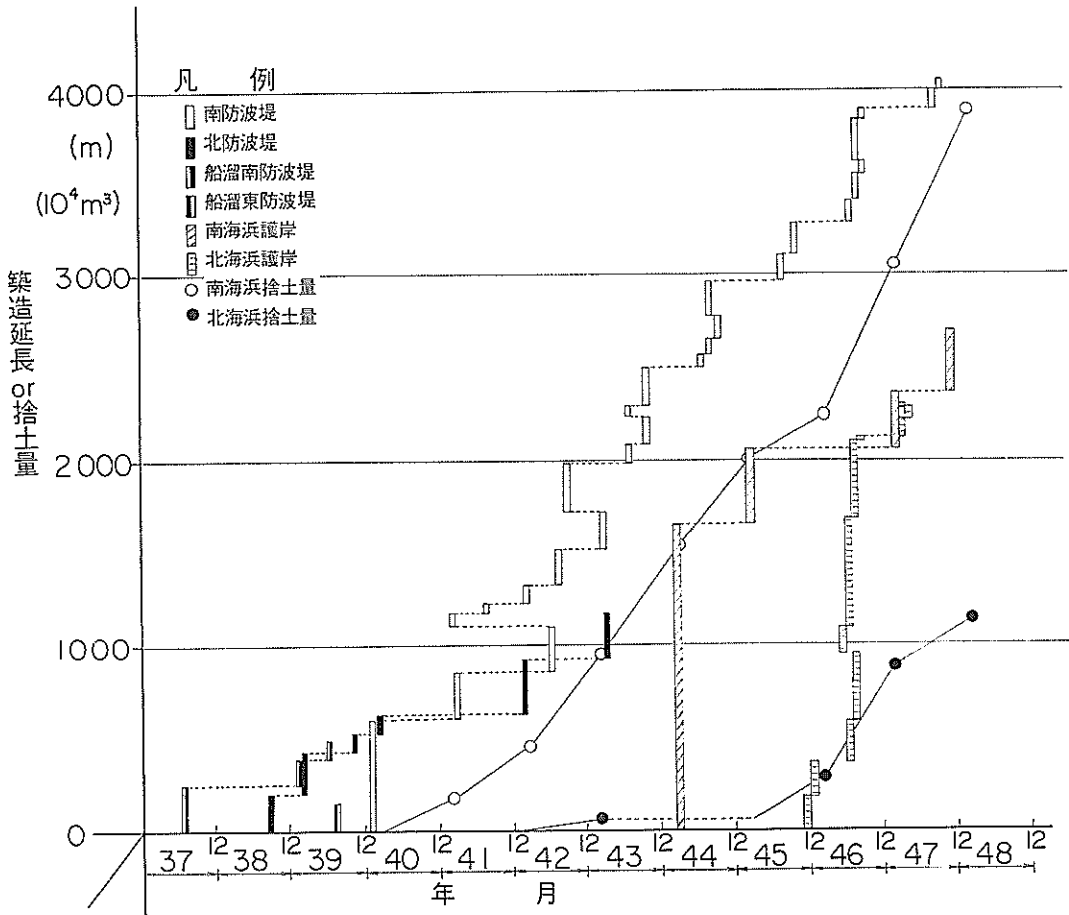


図-15 港湾建設工事の伸長状況

が捨てられた。捨土区域は、汀線から 850m 以内の海岸護岸の背後である。北海浜への累計捨土量は、1135 万 m^3 である。

4. 鹿島港建設に伴う地形変化の概要

昭和37年度の試験堤の築造が始まって、既に12年経過した。海底地形は、この間構造物の築造および南北海浜への土捨投棄等の影響によって、著しく変化している。

そこで、先ず、この変化の状態を、測量期間の異なる2枚の深淺図を比較することによって、概略把握しておこう。比較の対象としたのは、港湾工事および地形変化の特徴が大きい区切りをなすと思われた次の4ケースである。すなわち、

イ) 昭和36年8月と昭和40年6月——(全工事着手以前と南、北両防波堤が伸長され、海岸への土砂投棄

が開始される直前の状況の比較)

ロ) 昭和36年8月と昭和43年6月——(外港航路の浚渫開始直前の状況)

ハ) 昭和43年6月と昭和45年12月——(南海浜への土砂投棄が進み、南海浜の汀線前進の最も進んだ状況)

ニ) 昭和45年12月と昭和48年3月——(南海浜が急激に洗掘を受けた後の状況)

4.1 昭和36年8月と昭和40年6月の地形の比較

図-16 は、昭和36年8月と昭和40年6月の等深線の比較図を示す。昭和36年8月は、海岸に構造物が全くない状態であり、試験堤が築造される前年に当る。これに対し、昭和40年6月は、船溜基地が完成し、南北防波堤基部が延長されつつある時点に当る。この6月までは、海浜への捨土はほとんどなかったと考えられる。すなわ

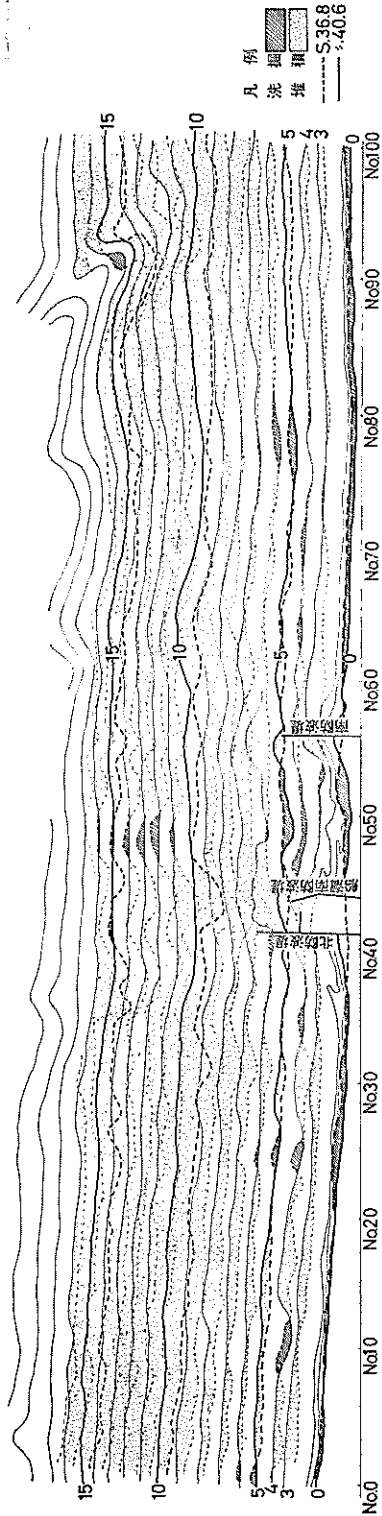


図-16 昭和36年8月と40年6月の深淺比較図

ち、地形変化は、主として海岸に突出した防波堤の影響によるものと推定される。

4.1.1 北海浜

防波堤近傍の400m程度を除き、汀線は後退気味である。-5m附近から沖に向けて、次第に水深が浅くなり、-10m附近ではほぼ1m浅くなった。この傾向は-16mまでつづいている。

海底勾配についてみると、-5m以浅は1/100でほぼ同じ程度、-5m~-10m間では1/120から1/140とわずかに勾配がゆるくなった。更に、-10m~-15m間では、水深が一樣にほぼ1m浅くなっているが、勾配は1/120からほとんど変化していない。

また、北防波堤の周辺港外側地域についてみると、-3m附近までの等深線は防波堤沿いに沖側に張り出すが、それより深くなると、防波堤のそばは洗掘される傾向がある。これは防波堤のわきの水深-3m程度以深の地域では、防波堤に沿い沖に向う流れの影響が強いためであろう。

4.1.2 港内

等深線は沖に向かって凹型になり、中央が欠壊している。防波堤周辺の地形は港外側とほぼ同様で、-3m附近までは防波堤沿いに沖に張出すが、それより深くなると、防波堤のそばは洗掘されている。

4.1.3 南海浜

北海浜同様に、南防波堤から南へ400mを除き、それより南側の汀線が20~30m一様に欠壊している。この汀線附近の欠壊、およびNo.72~No.84までの-8m以浅の多少の欠壊部分を除くと、他はほとんど堆積している。特に水深-9m以深は、1m近く一様に浅くなっている。

また、南防波堤近傍の地形変化は、北防波堤側とほぼ同様であるが、水深-3m以浅の等深線の前進が、より広い地域に広がっている。

4.2 昭和36年8月と昭和43年6月の地形の比較

図-17は、昭和36年8月と昭和43年6月の等深線の比較図を示す。前述したように、昭和36年8月は自然海岸の状態である。これに対し、昭和43年6月は、船溜基地および北防波堤が完成、南防波堤は直部が完了し、曲部が1050m延長されている。一方、浚渫、捨土についてみると、船溜泊地および中央水路の浚渫が開始されて3年経過しているが、港内外港部航路の浚渫は行なわれておらず、港内地形は自然状態のままにある。この間に、南海浜へは915万 m^3 、北海浜へは100万 m^3 の捨土が行

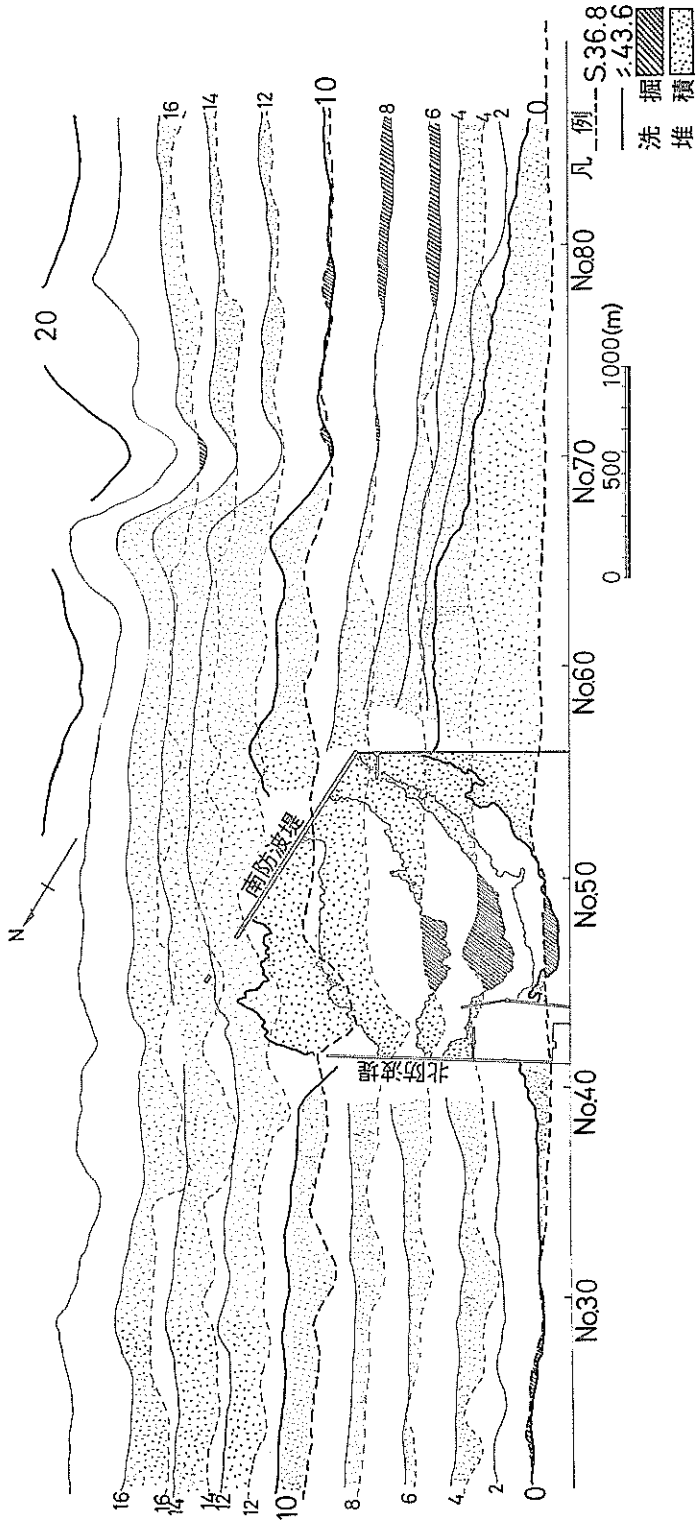


図-17 昭和36年8月と昭和43年6月の深浅比較図

われている。また、南海浜の沖合 1000 m には、南防波堤に接続し、海岸と平行に潜堤が 1540 m 築造されている。この時点では、南および北海浜のいずれにも海岸護岸は建設されていない。

4.2.1 北海浜

海岸の汀線は、北防波堤の北 1 km 以南を除き、一様に欠壊している。堆積は、北防波堤に近い -10 m 以浅の地域、および -10 m ~ -14 m 附近で著しい。-8 m 以浅では、等深線の前進は防波堤に近づくほど大きく、防波堤から離れると少なくなるが、-10 m 以深ではそういう傾向は見られない。同様に、-8 m 以浅での等深線について見ると、汀線の前進の傾向は、北防波堤から 900 m 離れた No. 32 以南で現われるが、水深が深くなると、この境界点が次第に北に移っているように見受けられる。

防波堤附近の地形についてみると、-8 m 等深線は、防波堤に沿って沖側に等深線が張り出すが、-10 m 附近では洗掘されている。ただし、-2 ~ -8 m までの等深線は、防波堤の近隣 200 m の範囲には描かれていないので、この水深帯での洗掘については明らかでない。

4.2.2 港内

港内の地形変化の特徴は、次の 2 つに分けることが出来る。まず、-6 m 以浅の等深線は港口に向かって凹形であり、-8 m 以深では港口に向かって凸形である。このような地形が形成される原因は、後述するように南防波堤曲部の波の遮蔽効果と、港内に生ずる反時計回りの流れにある。

4.2.3 南海浜

捨土による影響で、-6 m 以浅の地形の変化が著しい。汀線は、昭和 36 年 8 月に比べ南防波堤の南 900 m までの間は約 500 m 前進した。これより南に向うと、徐々に前進距離が小さくなり、南防波堤から 3.5 km 離れた No. 90 附近で、初期汀線と交わっている。各等深線が著しい前進を示す境界点は、北海岸と同様、水深が深くなるにつれて北に移り、南防波堤に近づく。南防波堤から 1400 m 以内 (No. 70 から南防波堤までの区域) の地域では、水深の如何にかかわらず著しい堆積がみられる。

欠壊は、No. 76 から南の水深 -6 ~ -8 m 附近に見られるのみで、他は全域堆積している。

4.3 昭和 43 年 6 月と昭和 45 年 12 月の地形の比較

図-18 は、昭和 43 年 6 月と昭和 45 年 12 月の等深線の比較図を示す。この間南防波堤は 1400 m 築造され、南防波堤の曲部延長が累計 2500 m になった。また、埋立の

進行に伴い、北海浜護岸が 180 m、南海浜護岸で 2060 m 築造された。一方、この期間の捨土量は、南海浜へ約 1200 万 m^3 、北海浜には推定 200 万 m^3 であった。

4.3.1 北海浜

-8 m 以浅では、No. 29 より北側は洗掘が見られ、南側では堆積性である。堆積の傾向は水深 -10 m 以浅で強く、これ以深で弱い。

4.3.2 南海浜

主たる捨土区域は、南防波堤から南へ 2 km 以内で、設置されている護岸より北側であるが、護岸終端から南に向って堆積が著しい。埋立土砂が南へ運ばれたものと考えられる。堆積は -8 m 以浅では大きく、以深では小さい。0 ~ -8 m の海底勾配は、昭和 43 年では、防波堤に近いところでは 1/50 ~ 1/60 で、南に向って徐々にゆるやかになり、南防波堤から 3 km 離れた附近に至ると 1/70 ~ 1/80 になる。しかし、昭和 45 年になると、勾配はほぼ一様になり、1/50 ~ 1/60 ときつくなった。0 ~ -2 m の勾配が特にきつくなっている。

南防波堤から 1 km 以内の水深 -12 m ~ -14 m 附近で欠壊が見られる。-6 m ~ -16 m の防波堤曲部の近傍は、洗掘され等深線が舌状に張り出している。-20 m 附近では一部を除き、地形の変化はきわめて小さくなる。

4.4 昭和 45 年 12 月と昭和 48 年 3 月の地形の比較

図-19 は、昭和 45 年 12 月と昭和 48 年 3 月の等深線の比較図を示す。この間南防波堤は 550 m 築造され、屈曲部からの曲部の累計延長が 3050 m となった。次に北海浜護岸は 1130 m 築造され、累計 1320 m、南海浜護岸は 660 m 築造され、累計 2700 m となった。一方、この期間の捨土量は北海浜 950 万 m^3 、南海浜 1700 万 m^3 である。

4.4.1 北海浜

護岸背後はほぼ全域、±0 m 以上となった。

測点 No. 15 以北の、汀線が欠壊している。この欠壊傾向は水深 -12 m まで見られるが、欠壊区域の南側境界点は沖に行く程北に移る傾向がある。

等深線は北防波堤に近づくと同向きに張り出す。張り出しの程度は汀線が最も大きく、水深が深くなるとともに小さくなり、-15 m ではわずかに堆積傾向をもつが、等深線張り出しの傾向はない。護岸前面の等深線が護岸とほぼ平行になっている。等深線が沖向きに張り出すところでは、海底勾配もきつくなる傾向がある。

-12 m 以深は、全域わずかに堆積性である。

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

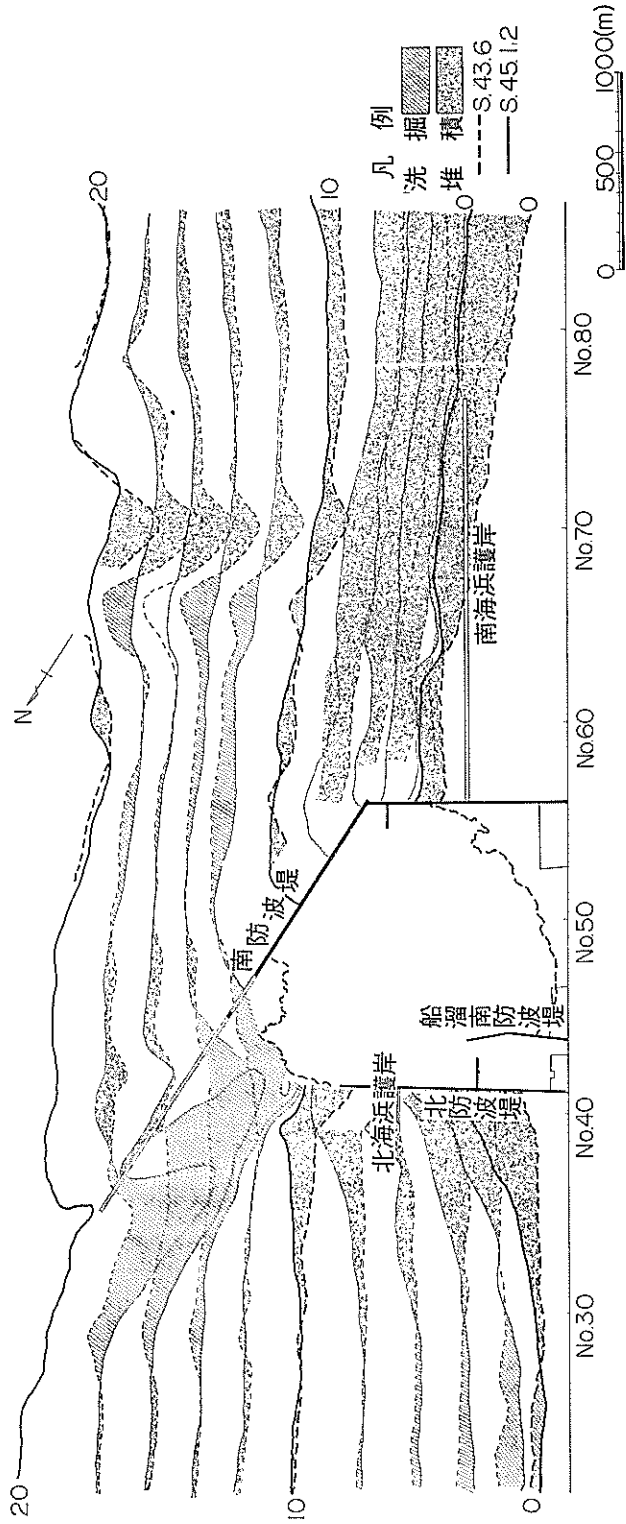


図-18 昭和45年6月と昭和45年12月の深淺比較図

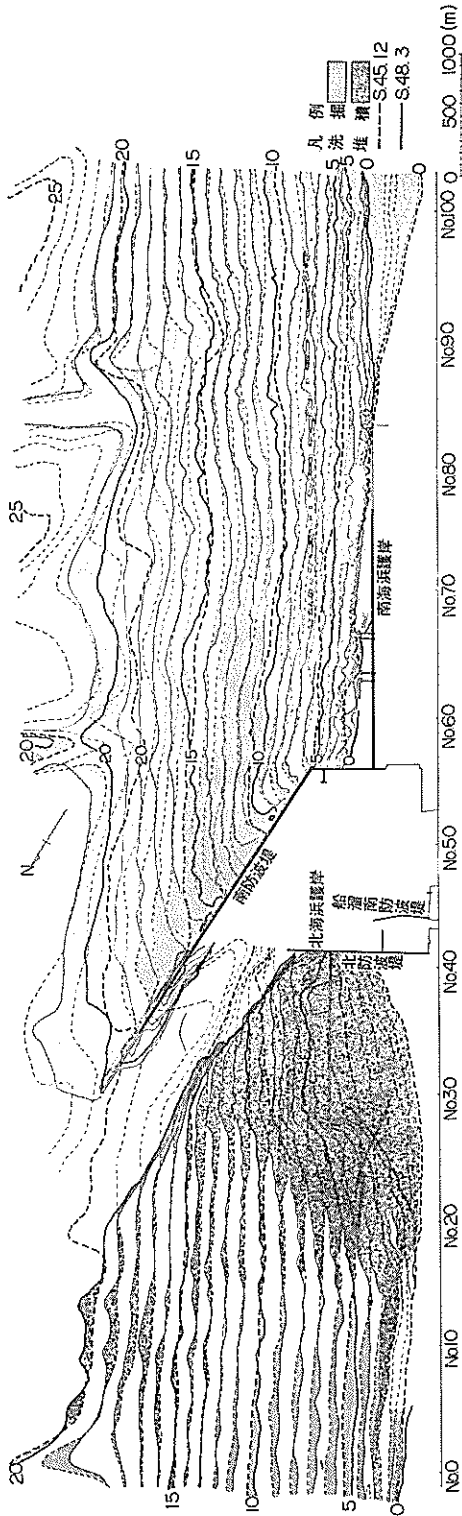


図-19 昭和45年12月と昭和48年3月の深浅比較図

4.4.2 南海浜

南防波堤曲部の港外側の洗掘が著しい。特に水深-15m 附近に1m 程度洗掘が見られるのを最大に、水深-6m~-18m にわたって洗掘されている。また、護岸前面の洗掘も著しく、汀線が120m 以上後退した場所もある。特に、南防波堤から1.2km 地点の、測点 No. 68 より南の護岸前面の浜はまったく消失した。しかし護岸終端から南側の汀線は維然著しく前進している。

防波堤の港外側の洗掘部分を除き、水深-15m~-20m の測点 No. 90 の以北の部分は一面に堆積しており、1m 以上の堆積厚におよぶ箇所もある。

5. 鹿島港建設に伴う地形変化の詳細

5.1 船溜完成までの地形変化の詳細

船溜建設工事は、昭和37年度初頭船溜南防波堤工事から開始され、昭和40年7月からの内部の浚渫工事によって完了した。外部施設の施工過程から見ると、昭和37年度は船溜南防波堤の一部280m のみが完成していた試験単突堤の時代であり、昭和38年度は船溜南防波堤400m、北防波堤直部450m の完成していた二本突堤の時期に当たる。船溜南防波堤、船溜東防波堤が完成し、北防波堤が延長されて、船溜としての外部施設が完成したのは39年度である。

この時期、防波堤工事は陸上から捨石を巻き出すことによって行なわれて来たが、主要部分の防波堤構造は、附録に示すとおりであった。

5.1.1 単突堤期の地形変化(昭和37年5月~昭和38年5月)

この期間の深浅図を図-20に示す。図中の太実線は沿岸砂州の谷を、点線は山を示す。

この突堤の建設予定地点は、汀線における約2000m スパンの凹凸地形の凸部から多少北側にずれた位置に相当し、そのために、当初から南側部分の汀線が北側汀線より突出する傾向にあった。突堤延長工事は4月に開始され、8月初めには37年度工事分280m が完了している。その間、突堤の南北両側の地形は、突堤の伸長とほぼ同じ速さで変化し、突堤280m の完了した8月初めの時点では、汀線は突堤の影響を受けた新しい安定形に達し、以後波浪条件に対応して20~50m の時期的変化を繰り返しているように見受けられた⁹⁾。

図-20によれば、突堤周辺の地形変化に関して、次の諸点が明らかである。すなわち、

イ. 汀線は南北共に前進しているが、南側の汀線が北側

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

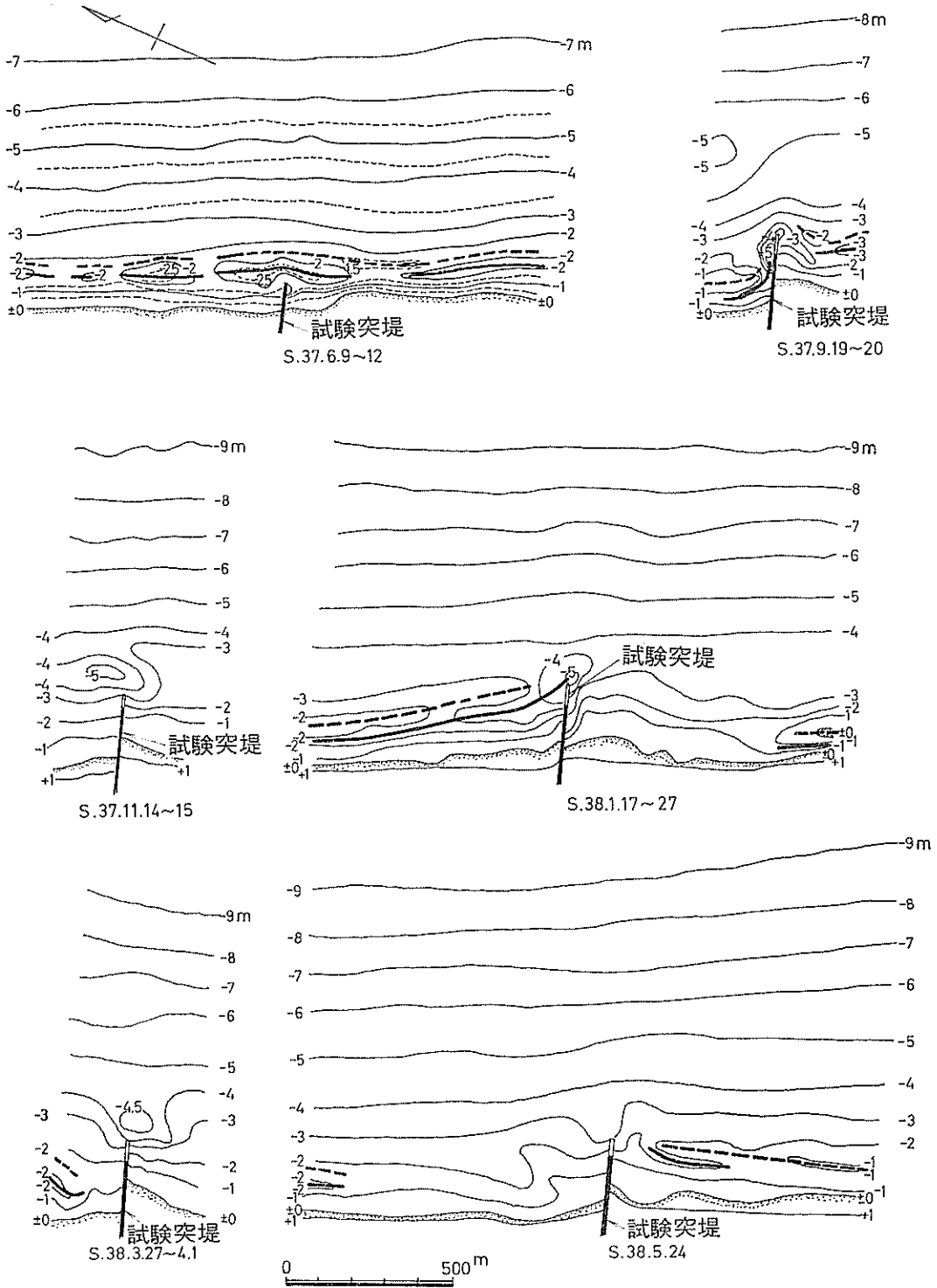


図-20 単突堤期の海底地形の変化

に比べて前進が大きい。しかし、前述した突堤建設地点の初期形状の問題と、後述の二項で述べる砂移動のメカニズムから考えて、これのみをもって北向き漂砂量が卓越するとは言い難い。

ロ。突堤延長に伴って、突堤近傍では沿岸砂州はある程度まで沖に移動し、沖に凸型の形状に変化する。この状況では、突堤先端の洗掘はあまり顕著ではない。

ハ。突堤が更に延長されると、沿岸砂州が切れ突堤々頭部に明瞭な洗掘が起こる。突堤先端の洗掘穴の形状には、見かけ上洗掘穴の最深部が突堤側面に位置する場合、突堤先端に位置する場合、および突堤先端沖に位置する場所が見られるが、現象的にどのような相異があるのかは推測しがたい。洗掘深については、別項で取り扱っている。

ニ。突堤完成後の地形を見ると、1月、3月の地形では北側の砂州が明瞭であり、突堤先端に向かって伸び、砂州の谷の水深は突堤近くほど深くなっているが、突堤近傍南側では砂州が不明瞭であるか、あるいは汀線近くに寄せられている。しかし、水深 $-1\text{m} \sim -3\text{m}$ 線は突堤南側で沖に張り出している。一方5月、9月には、南北逆にして前述とまったく同様な傾向が見られる。

前述ニ)項に指摘した地形変化は、1月、3月の冬期には北からの波が卓越し、夏期は逆に南側からの波が卓越することによっている。すなわち、図-21に示すように、突堤に斜めから波が作用すると、突堤に対して波の上手の沿岸砂州の谷部には突堤に向う沿岸流が生じ、この流れは突堤に沿って沖に流れる。一方、突堤下手では、突堤の遮蔽効果のために突堤に向う反流が生じ、これも突堤に沿って沖へ向い、上手からの流れと合流す

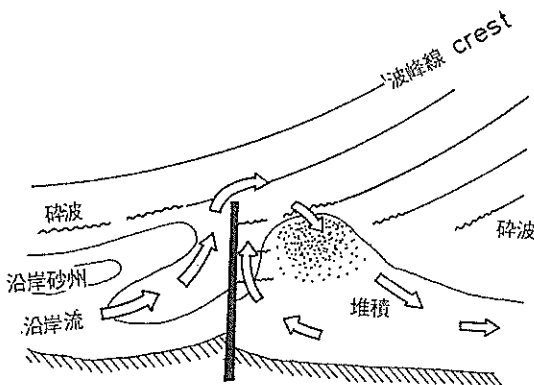


図-21 突堤周辺の地形変化の機構

る。したがって、このような流れの中心部では、水深が深くなる。また、上手の沿岸流によって運ばれた砂は、突堤先端での流れの拡散のために突堤下手側に沈殿堆積する。このような状況は、模型実験によっても確認される。図-22は、初期勾配 1/15 の模型浜 (底質粒径 $d_m=0.2\text{mm}$) に、波高 8cm、周期 1.2sec の波を2時間作用させた後突堤を設け、更に、同様な波を作用させた場合の結果である。図中 (a) は突堤設置直前の地形、(b) は突堤設置2時間後の地形とその間の底層流の結果を示す。

また前ロ)項に示す沿岸砂州の移動も、短い突堤によって生ずる沖向の流れによるものと推定される。

5.1.2 二本突堤期の地形変化

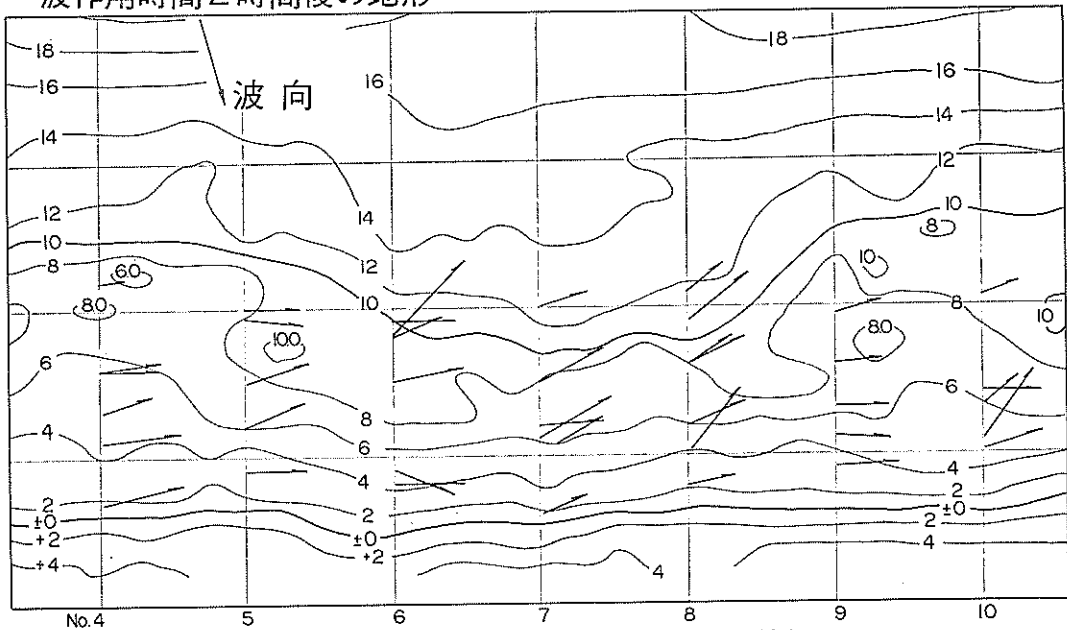
北防波堤工事は、昭和38年5月に着工され、38年度末には延長450mが完成した。これと同時に船溜南防波堤も延長され、38年度末には全長400mが完成している。船溜東防波堤の施工が開始される39年5月までの間は、二本突堤の時期であり、その間の深淺図を図-23に示した。この図によって地形変化の特徴を見れば、次のとおりである。

イ。工事の進長と共に、突堤々頭部のみではなく、突堤両側面の洗掘が著しくなる。この傾向は、二本突堤の効果と考えるべきではなく、単純に突堤の延長が長くなったため、あるいは来襲波の相異によるものと考えるのが自然であろう。

突堤側面洗掘の傾向は、38年12月深淺図における北防波堤港外側にすでに見られる。欠測期間が多くて断定は出来ないが、38年12月の測量以前の一ヶ月間は、天気図から判断して有義波高が2mを越える波に襲われた可能性は少なく、単突堤の時代と海象条件として大差はない。したがって12月測量時における突堤側面の洗掘は、突堤延長の効果であろうと考えられる。昭和39年2月から3月にかけて、有義波高4~5mの波が来襲しており、これらの波の作用のためもあり3月の深淺図には著しい側面洗掘が見られる。

突堤延長が短い間は、堤頭部の洗掘が顕著であるが、突堤の延長と共に或る時点で側面洗掘が現われる。この傾向もまた模型実験において確認される。図-24は前述した実験と同様な実験条件において、長さの異なる4種の突堤の周辺の地形を実験的に示したものである。図によると、突堤延長が1.5mから2.0mに変化したところで側面洗掘が急激に増大することが明瞭に見られる。延長を2.5mとしても、側面に碎石を置くと側面洗掘は弱められ、洗掘が汀線にまで及ぶことはなくなるが、

波作用時間2時間後の地形



長い突堤を設置後更に2時間波を作用させた後の状況

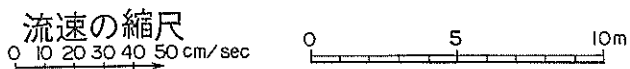
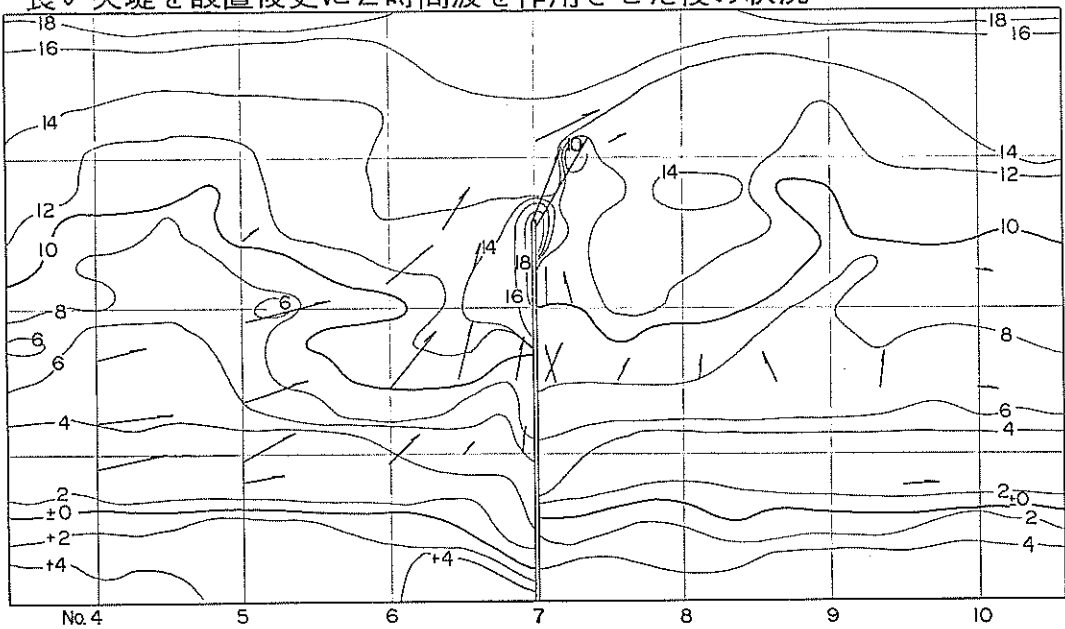


図-22 突堤周辺の地形変化に関する模型実験の結果

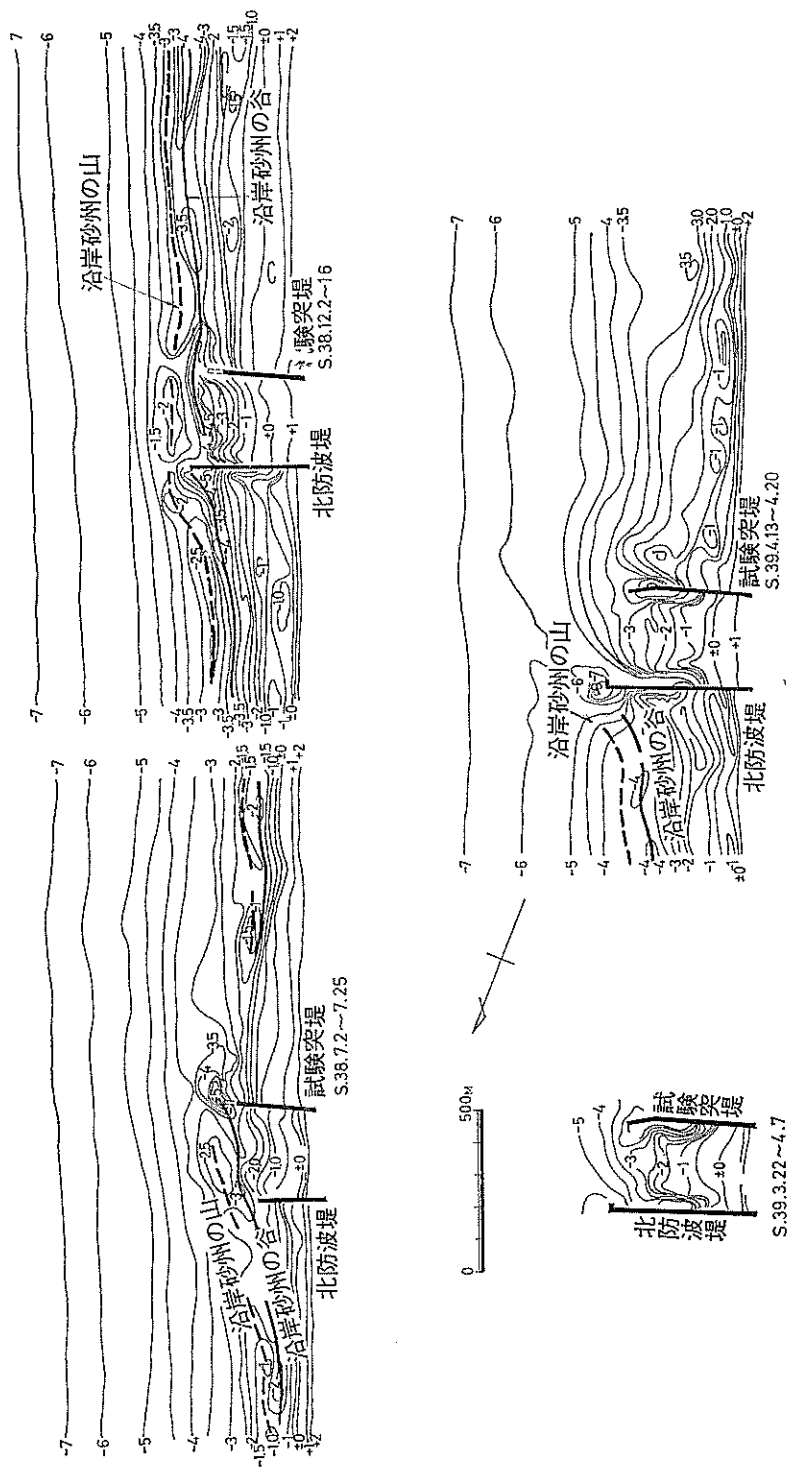


図-23 二本突堤期の海底地形の変化

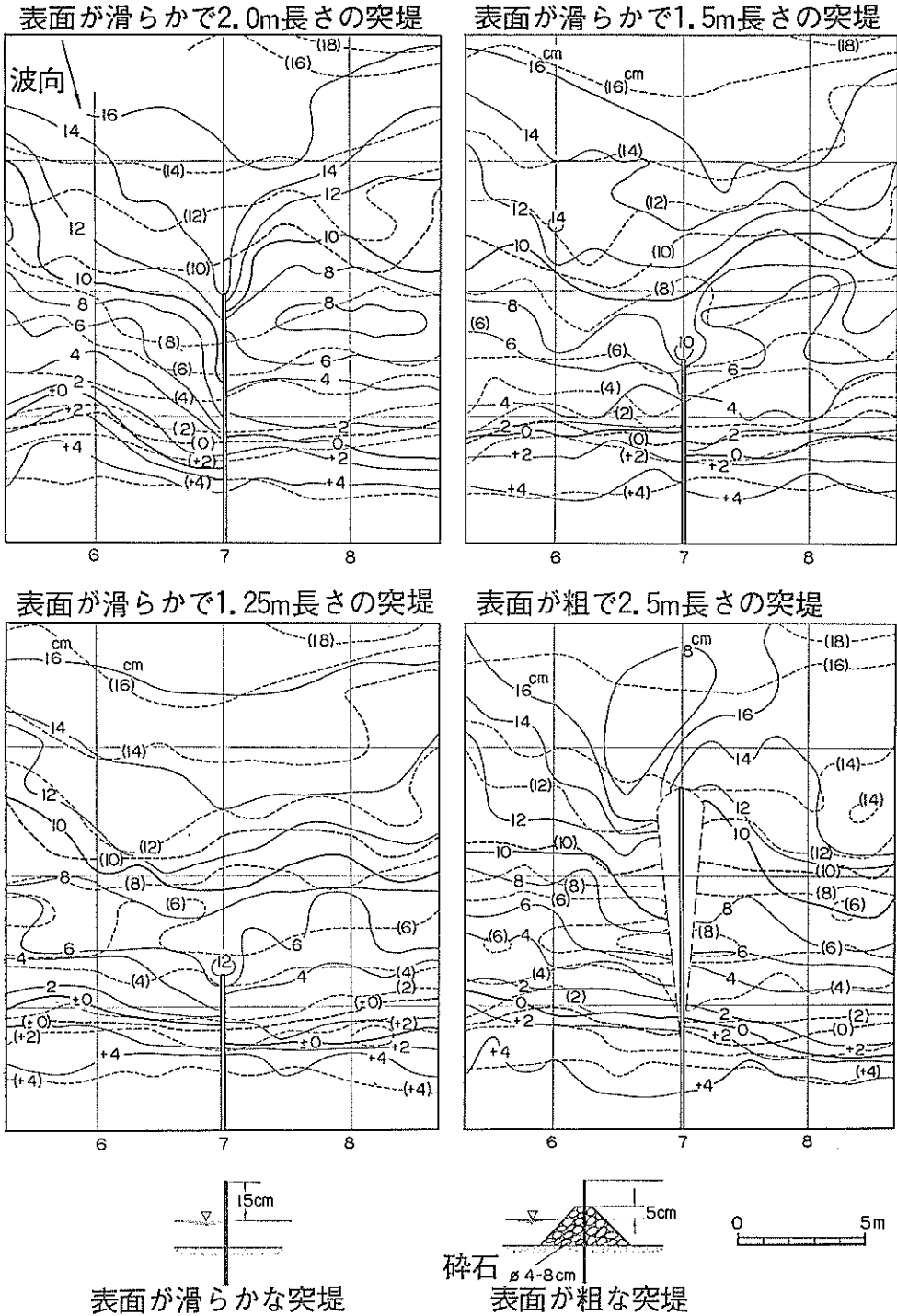


図-24 突堤の長さや周囲洗掘の関係に関する実験結果

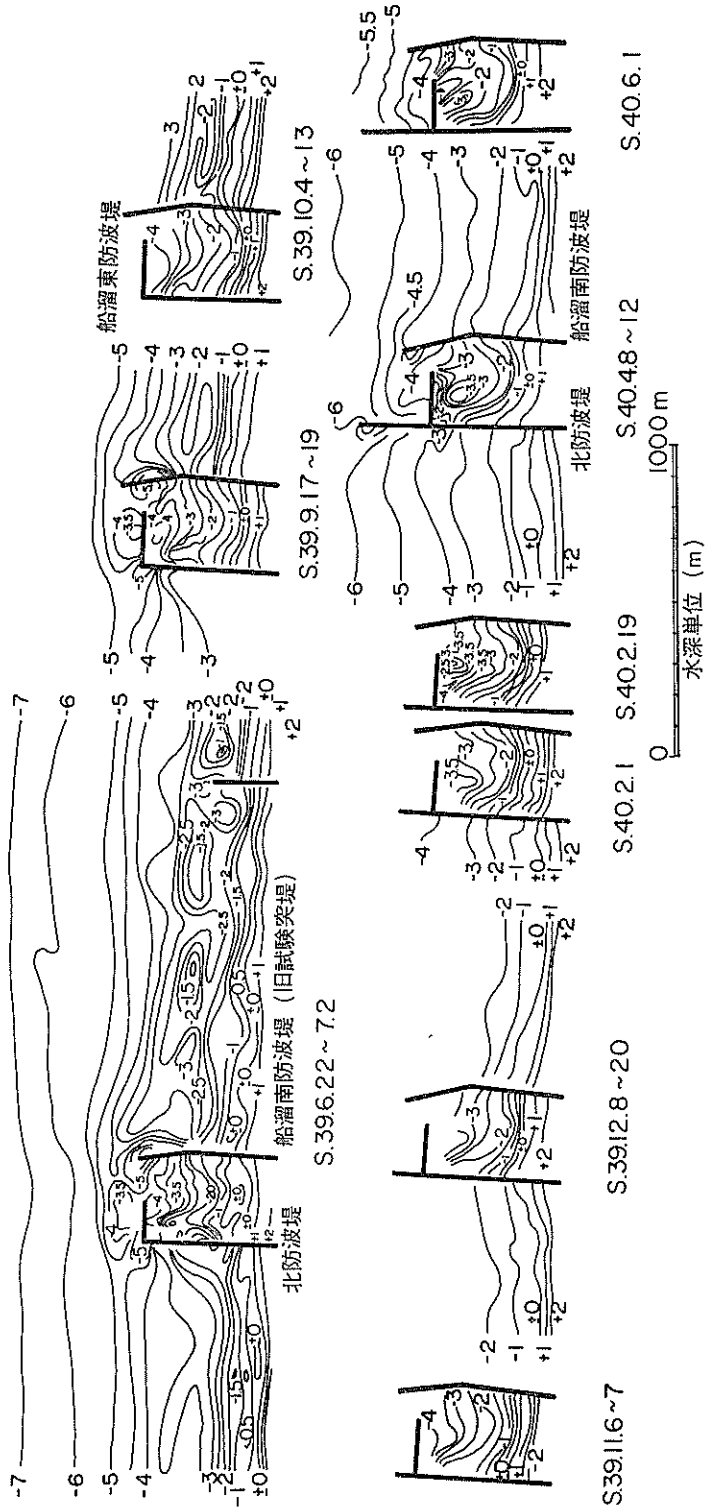


図-25 船溜の深浅図

逆に、洗掘の影響が突堤の側面の離れた所にも及ぶようになる。

ロ. 昭和38年12月（北防波堤延長350m, 南防波堤延長280m）までは、沖合に沿岸砂州が残在する。しかし39年3月（北防波堤延長450m, 南防波堤延長400m）では沖合沿岸砂州は消滅し、船溜内が著しく埋没している。

前述のように、昭和39年2月および3月は来襲波が高い。したがって、このような変化が来襲波のみの効果なのか、突堤延長の効果も考えられるのかは不明である。

5.1.3 完成船溜期の地形変化

昭和39年6月船溜東防波堤の延長工事が開始され、8月には予定全延長170mが完成した。以降40年7~10月船溜内の浚渫が行われるまでの約1ケ年の深淺図を、図-25に示した。この間、南防波堤が昭和39年4月に着工され、40年6月の時点で延長600mに達しており、北防波堤は同時点で670m（東波除堤から沖200m）の延長に達している。

図-25によってこの期間の地形とその変化の傾向を見ると、次のとおりである。すなわち、

- イ. 船溜東防波堤の伸長に伴って、二本突堤間に船溜南防波堤北側および北防波堤南側に生じていた洗掘穴が埋められ、特に、水深が-2.5m以浅の等深線は、港口に向かって凹地の曲線を形成して行く。
- ロ. 北防波堤と船溜東防波堤のなす隅部の水深が常に深く、ここから船溜中央部に向かって深部が形成されている。
- ハ. 船溜東防波堤先端附近に、船溜中央に向う浅部が形成され、40年2月19日の深淺図以降は、あたかも港

口砂州のような形状をなす。

ニ. 船溜内は次第に埋没し、平均的に水深が減少しつつある。

前述のイ)項は、防波堤などによって波から遮蔽された水域において一般的に見られる特徴である³⁾。

ロ)項に示す特徴は、防波堤が不透過であり、船溜口からのみ波の影響を受けるという通常の状況下では説明出来ない現象である。防波堤を通過した波の作用によるものと考えらるべきであろう。附録に示したように、北防波堤の基部は重量14t(1.8×1.8×1.88)の方塊ブロックによる捨ブロック堤である。当然、透過性がかなり高く、沈下しやすい構造であると言えるだろう。特に、北防波堤と船溜東防波堤のなす港外側隅角部には、波の集中が起こりやすいし、また40年4月の深淺図に見るように、当該地点は北防波堤北側の側面洗掘を受けやすい箇所相当する。このような状況のために、北防波堤と船溜東防波堤の接点附近では、ブロックの沈下が起こりやすく、したがって、波の透過が高かったものと考えられ、これが船溜内北東隅の深み形成の原因であると推定出来る。

船溜防波堤の構造がポーラスに過ぎるということは、船溜内の静穏度および砂の侵入の二点から問題であった。砂の侵入については、図-26に示すように、防波堤中に蛍光砂を注入して透過の状況が調査され、相当量の砂の侵入のあることが確認されている。これらの結果を勘案して、昭和40年度、防波堤が附録図I-fに示すように改良され、透過性の小さい構造に改められている。

ハ)項について、その原因を突き止めることは困難である。しかし、前述した防波堤の改造が行われ、港内

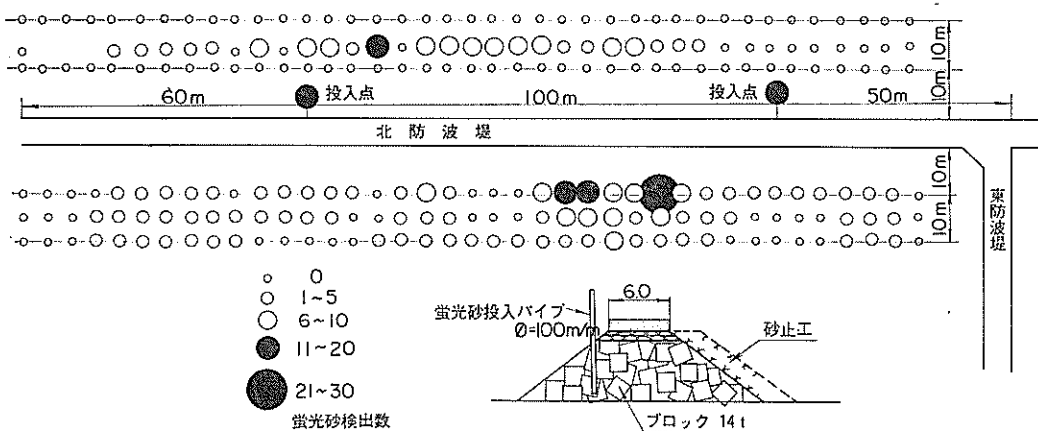


図-26 防波堤中に注入された蛍光砂の分布

が浚渫された後の深浅図には、船溜口、船溜東防波堤背後に砂州が形成される兆候は認められていない。

5.1.4 船溜の埋没

図-27 は、船溜建設過程における船溜内の土量変化を、昭和37年9月末を基準として示している。各時点における防波堤の伸長状況も図中に示されている。船溜内の土量は、船溜南防波堤着工時から着実に増加し、浚渫の行われる直前まで約175000m³の埋没を見たことになる。昭和38年12月から39年3月の間の急激な埋没は、5.1.2で述べた。沖合の沿岸砂州が消滅する過程における埋没である。埋没速度について見ると単突堤期 390~625m³/月

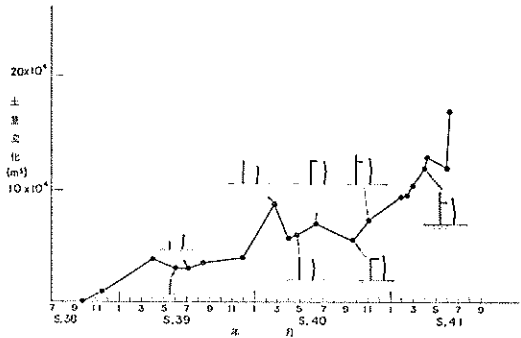


図-27 船溜内の土量変化

二本突堤期 285m³/月、完成期 1200m³/月~1300m³/月程度となり、船溜東防波堤の伸長後の埋没速度が格別高いことがわかる。

防波堤で囲われた水域の埋没量と海象条件との関連は、興味深い問題であるが、埋没の実態が期間的に細かく把握されることが少なく、このために実際上はその現象解明はきわめて困難な作業である。図-28 は、船溜防波堤がほぼ完成し、港内浚渫が行われる間の波浪の状況を示すものである。図には、日平均有義波、日最大有義波および日最小有義波の波高と周期が示されている。表-2 は、船溜完成後の各測量期間における埋没量と波浪条件を取りまとめたものである。これらによって、船溜を埋没させる条件について多少の考察を加えると、次のとおりである。

- イ. 埋没率の最も高い昭和40年6月1日から6月10日の間埋没は、 $H_{1/3}=1.0\sim 2.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=9\sim 10\text{sec}$ 、 $H/L=0.0158\sim 0.0064$ の波によるものである。
- ロ. 埋没率の第2位の昭和40年2月19日から2月28日の間は、 $H_{1/3}=2.0\sim 1.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}>9\text{sec}$ 、 $H/L<0.01$ の波によるものである。
- ハ. 昭和40年2月1日から18日の間は、波が穏やかでほとんど $H_{1/3}$ が 1m 以下であり、埋没するケース

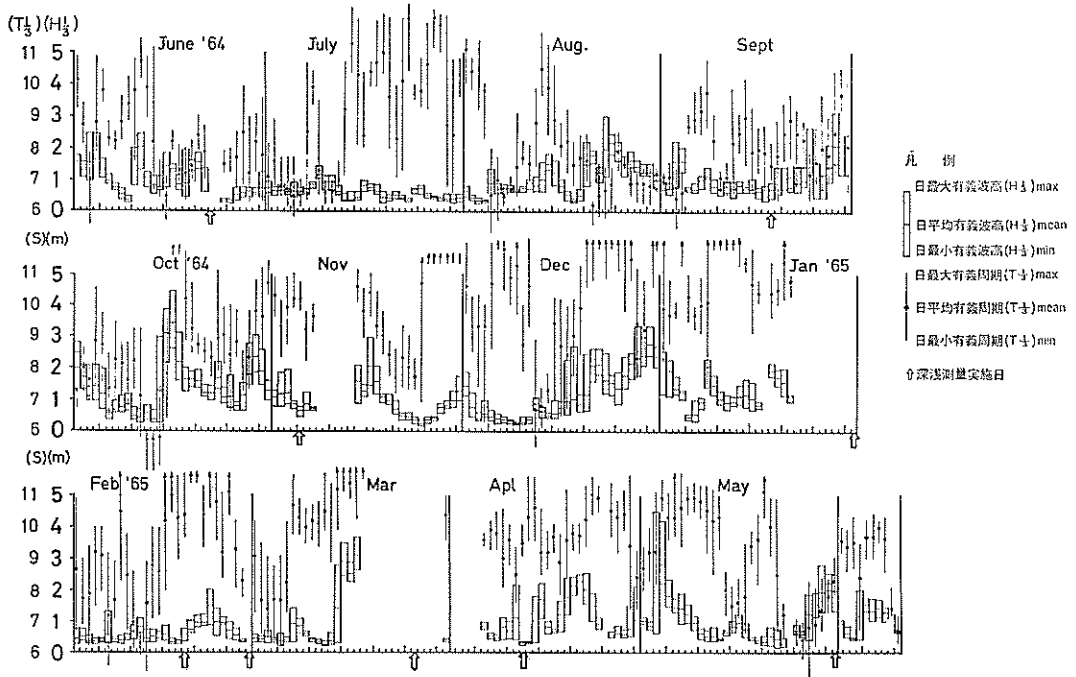


図-28 船溜内の土量計算中の波浪

表-2 船溜の埋没量と波浪条件

測 量 期 間	日 数	総埋没土量 m ³	日当り埋没量 m ³ /day	波 浪 条 件						測 得 率 %	
				第 1 荒 天		第 2 荒 天		第 3 荒 天			測量前1 週間の波 (H _{1/3}) _{max} (T _{1/3}) _{max}
				(H _{1/3}) _{peak} (T _{1/3}) _{peak}	継続時間 起 時	(H _{1/3}) _{peak} (T _{1/3}) _{peak}	継続時間 起 時	(H _{1/3}) _{peak} (T _{1/3}) _{peak}	継続時間 起 時		
自39年4月17日 至 同 6月21日	65	10,985	169	2.45m 7.4sec	6日以上 18日	2.45m 10.7sec	4日 10日	1.95m 8.0sec	7日 3日	54.17	
自39年6月22日 至 同 9月16日	86	-15,900	185	3.01m 5.8sec	12日 24日	2.37m 5.5sec	2日 13日	1.05m 6.7sec	6日 33日	92.48	
自39年9月17日 至 同 11月5日	49	20,335	415	4.41m 13.2sec	12日 20日	3.16m 10.4sec	9日 38日	3.01m 10.3sec	6日 7日	90.06	
自39年11月6日 至40年1月31日	86	21,242	247	3.34m 7.7sec	11日 34日	2.95m 10.8sec	6日以上 76日	欠 欠	3日 44日	83.17	
自40年2月1日 至 同 2月18日	17	2,363	139	1.32m 5.6sec	1日 12日	1.10m 5.9sec	1日 7日	1.10m 5.9sec	/	96.57	
自40年2月19日 至 同 2月28日	9	6,300	700	2.02m 13.4sec	6日 6日	/	/	2.05m 13.4sec	/	83.33	
自40年3月1日 至 同 3月26日	25	14,900	596	3.69m 11.0sec	4日以上 9日	1.46m 11.2sec	2日 19日	欠 欠	/	60.26	
自40年3月27日 至 同 4月12日	16	8,000	500	2.19m 7.6sec	3日 1日	1.00m 9.8sec	1日以上 6日	2.19m 7.6sec	/	17.59	
自40年4月13日 至 同 5月31日	48	5,856	122	4.50m 11.1sec	7日 29日	2.81m 6.7sec	6日 3日	2.81m 6.7sec	7日 40日	90.17	
自40年6月1日 至 同 6月10日	9	45,450	5050	2.0m 6.9sec	6日 6日	/	/	2.0m	/	100.00	

注 1 波浪は1 荒天のピーク波高が示される。

注 2 継続時間とは、波高が継続して 1.0m 以上である荒天日数である。

注 3 起時は荒天ピークが測量日何日前に起こったかを意味する。

の中では埋没率が最も少ない。

ニ、昭和39年6月22日から9月16日の間は、比較的波の穏やかな日が多いが、波の大きい8月と9月の初頭にかけては、風浪が強く $H_{1/3}$ が 1m を越える波の周期は大体 8sec 以下である。そして、この期間は埋没は起こらず船溜は欠壊している。

ホ、他の測量期間については、欠測が含まれていたり、あるいは測量期間が長く、明確にその特徴が把握しにくい。しいて言えば、欠壊を生じている昭和40年4月13日から5月31日の間の測量前1週間には、 $H_{1/3}=1\sim 3\text{m}$ $T_{1/3}<8\text{sec}$ の風浪性の波が存在し、一方埋没率 $415\text{m}^3/\text{day}$ を示す昭和39年9月17日から11月15日の間の測量前1週間には、 $H_{1/3}=1.0\sim 2.0$, $T_{1/3}>9.0\text{sec}$ 以上の波が続いている。更に、埋没率が $596\text{m}^3/\text{day}$ で3位の昭和40年3月1日から3月26日の間には、波高は 3m 程度にも達するが、周期が 11sec 以上のうねり性の波が支配的であるように思われる。

これらを通じて、船溜の埋没は、有義波高 $1\sim 2\text{m}$ で周期の長い波（9秒以度以上）で著しく、逆に、波高の大きい周期の短い（8秒以下）波では、むしろ欠壊傾向があり、かつ波高 0.5m 程度の小さい波は、埋没にも欠壊にもあまり寄与しない。ことが一応言えそうである。

閉ざされた地域の埋没の問題は、開口部における流れと浮遊砂の量と分布に左右されるところが大きい。開口部における流れは、港内へ持ち込まれる水量、持ち込まれる場合の分布形、越波量の相異および防波堤の透過性、開口部および港内の幾可学的形状（港内の埋没状態そのものが、次の時点の埋没現象を支配することになるが）など複雑な要因に関係するわけであるが、こうした問題に関する基礎的研究はほとんどないのが現状である。従って、ここでは、埋没特性と波浪条件のみを関係づけるべく、諸々試みたのであるが、明確な解答は得られなかった。

5.2 港内地形変化の詳細

船溜防波堤の完成後しばらく停止されていた北防波堤の伸長は、昭和39年秋から再開され、昭和40年3月末までに堤頭部の一部を残すまでに工事が進んだ。全工事が完了したのは43年11月である。一方、南部波堤工事は39年4月に着工され、42年9月には直部がほぼ完成している。南防波堤の曲部は、40年秋からマウンド捨石の投入が開始された。曲部のケーソンの第一函目の据え付

けは41年8月である。南防波堤の延長工事は、その後着々と進められ現在も未だ伸長中である。中央航路と泊地の間の砂丘が開削されたのは、昭和43年6月末から7月初めの間であり、以後、外港航路の開削、拡幅、増深工事が毎年繰り返されている。一方南防波堤の南側には、昭和40年7月以降航路掘削土砂の投棄が行なわれている。

5.2.1 港内地形変化の一般的特徴

船溜完成後、中央航路口の開削直前までの間の港内深淺図は、図-29に示したとおりである。これらの図によって、防波堤の伸長に伴って起こる顕著な地形変化を取りまとめると次のとおりである。すなわち、

イ、南防波堤直部の伸長に伴って、港内においては沿岸砂州が不明瞭になり、昭和40年度、南北両防波堤の延長が各々 600m 程度に達すると、沿岸砂州がほとんど消滅する。

ロ、北防波堤のケーソン部のマウンドが先行して施工された昭和41年5月、先行マウンドの港内側に著しい洗掘が起こる。この洗掘穴の南側には、相当規模の堆積が見られる。

ハ、南防波堤着工以前には、船溜に近づくにしたがって、 -5m 以浅の等深線が沖に向う傾向を示しているが、南防波堤の延長に伴って、等深線が南防波堤北側でも沖に張り出して、沖に向って凹型の曲線をなすようになる。

ニ、昭和40年12月頃から特に水深 $-8\sim -9\text{m}$ 程度の等深線の南北防波堤の中央の部分が、沖に張り出す傾向を示し始める。この傾向は、北防波堤の先行マウンド周辺に洗掘の起こった41年5月に明瞭になり、以後南防波堤曲部工事の進行と共に益々顕著になり、水深 -12m 程度の箇所にまで及ぶようになる。しかし、防波堤に沿っては等深線が深く港内に入り込んでいる。

ホ、一方、水深 -6m 以浅の部分では、南防波堤曲部の伸長に伴って南防波堤寄りの部分で等深線が沖に張り出し始め、等深線が港口に向って凹な型状に変化している。このような変化は水深が比較的深い $-6\sim -3\text{m}$ 等深線で早期に起こり、 -1m あるいは $\pm 0\text{m}$ 線では除々に起こる。

ヘ、この間、港内は相当量の埋没を受けている。

前述 ハ～ヘ 項に示した地形変化は、図-30(a)(b)に示す等深線比較図によって、より明瞭に理解することが出来る。図-30(a)は、昭和39年6月と40年6月の深淺図を比較したもので、この期間は南北防波堤が伸長されており、ハ、項に示した地形変化が明瞭である。これ

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

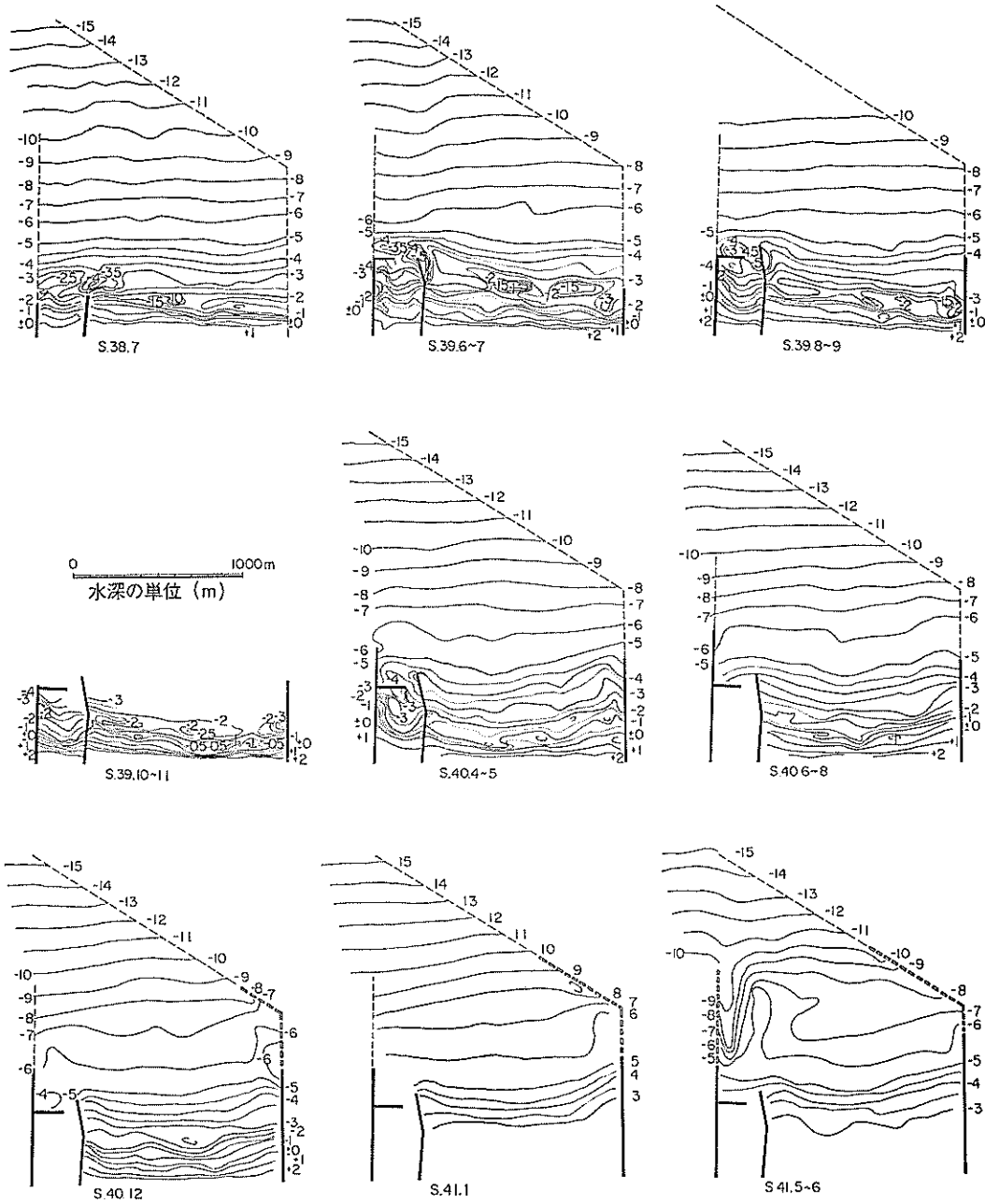


図-29(a) 港内深淺図

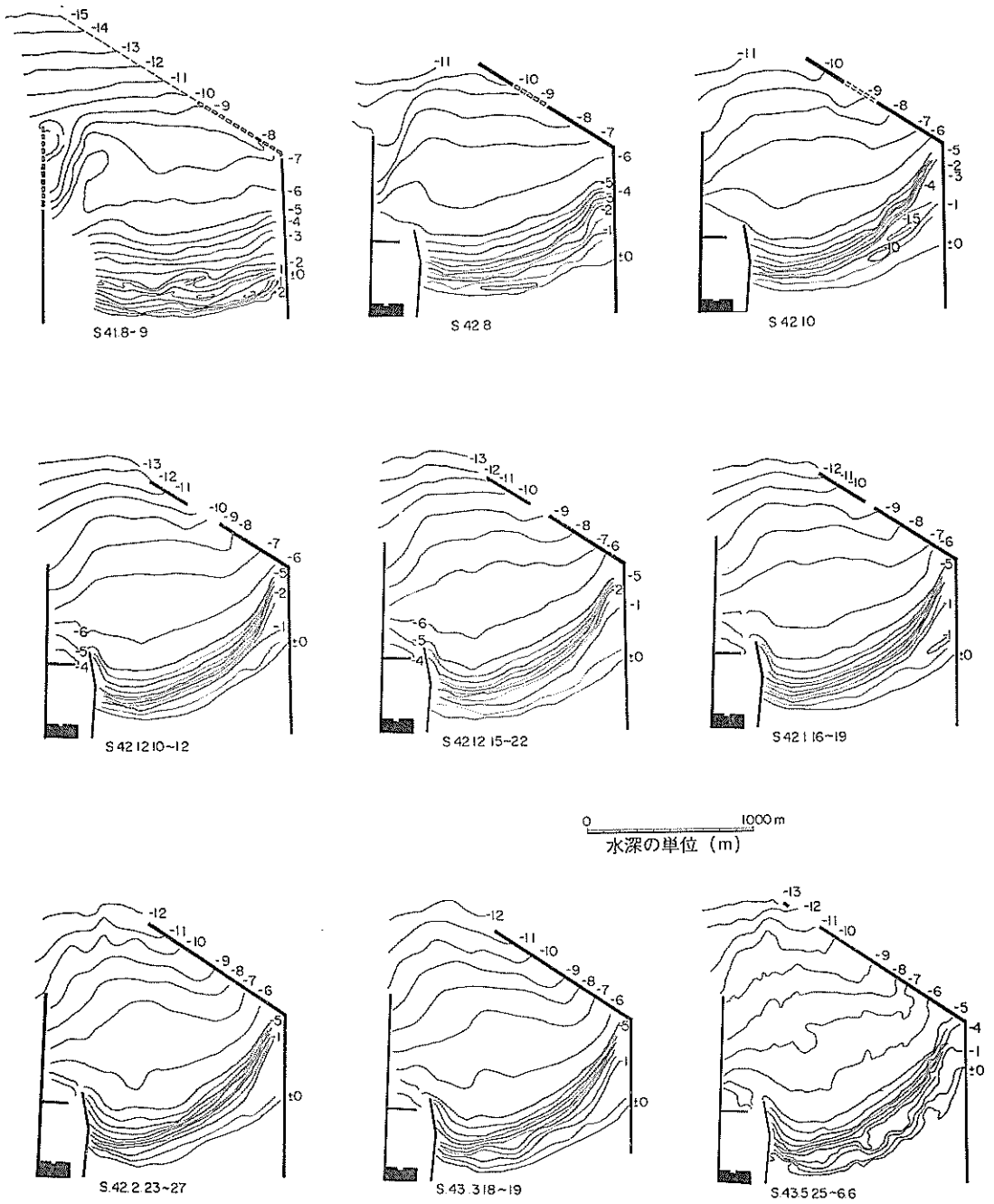


図-29(b) 港内深浅図

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

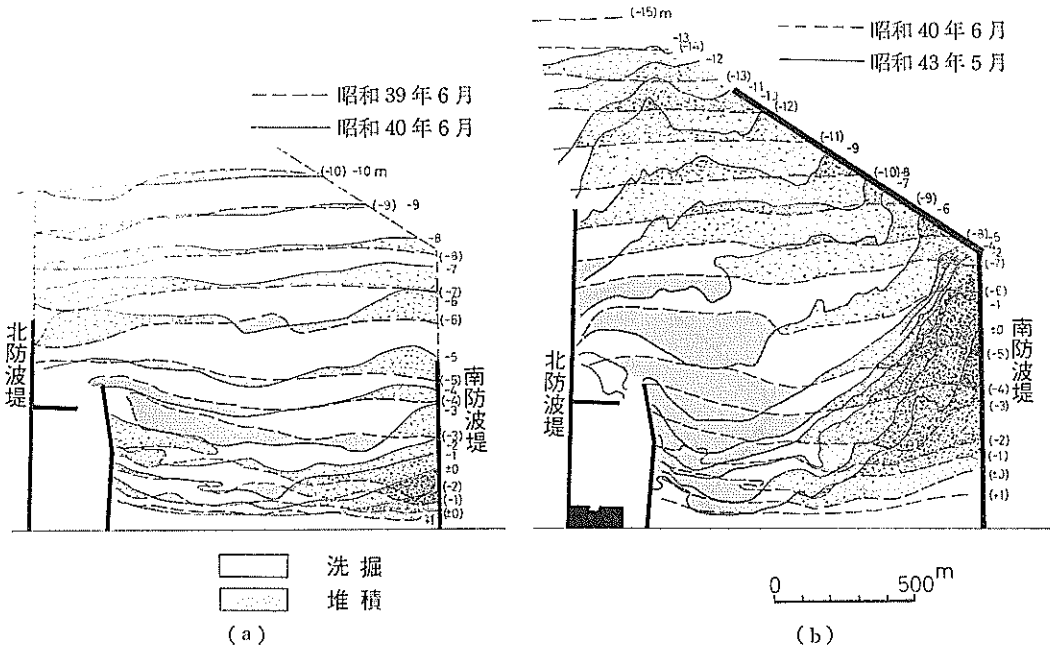


図-30 港内の深浅比較図

と同時に -5~-8m 水深部で相当量の埋没が起こっていることに留意しなくてはならない。図-30 (b) は、昭和40年6月と43年5月の等深線を比較したものである。この期間は南防波堤曲部の伸長と、中央航路浚渫土砂の南海岸への排土が工事の中心であった。前述ニ〜ハの地形変化がきわめて明瞭である。南防波堤港内側では実に5m近い水深の減少が見られる。

5.2.2 港内汀線の変化

昭和38年から43年にかけての港内地形変化を、港湾工事の進行状況と関連させて理解するために、図-31を示した。図の上部のグラフにおける●丸印は、船溜南防波堤わきでの汀線の位置（基線からの距離として示す）、○印は同じく南防波堤曲部での汀線位置、⊙印は船溜南防波堤の南200m位置の測線上の-8m水深の位置を示している。また⊙印は、図の凡例に倣すように汀線の凹みの度合を示す距離であり、・印は南防波堤の港外での汀線位置を示す。この間の工事の進行状況は下図に示すとおりであった。

南防波堤直部が延長されるに伴って、南防波堤寄りの汀線が1ヶ月当り25m程度の速い速度で前進する。南北防波堤が各々700m前後の延長で伸長が停滞している40年4月〜40年末にかけての間に、汀線はほぼ沖に

正対した凹型の円弧に近い曲線をなすが、この時点での曲率半径はほぼ1500m程度であった。

その後、南防波堤曲部工事および南海岸への排土工事が始まると、南防波堤寄り汀線は前進を始めるが、その前進速度は42年夏までが1ヶ月当り8m程度であり、42年夏以降急増して1ヶ月当り42m近い驚くべき速度になる。これは、41年度における南防波堤延長工事が、主として先行マウンドの施工であって、ケーソン掘付けが42年度に集中して行なわれ、このため、42年の夏以降、南防波堤寄りの港内静穏度が急激に増加したことに一つの原因がある。今汀線の凹み距離を見ると、40年夏から42年夏までの間は120m〜130mでほぼ安定していたが、42年夏以後急激に凹みが増大(曲率半径が減少)している。この事実は、前述した南防波堤曲部ケーソンの掘付けによる港内遮蔽の増大の効果を物語るものである。

一方、港内南防波堤寄りの汀線の変化傾向と、南海岸への排土量変化とが、傾向的にきわめて良い相関を示していることは重要である。すなわち、後述する土量の変化においても明らかであるが、この時期南海岸への排土が港内に侵入し、港内の地形変化に大きな影響を与えているものと考えられるのである。

図-32は、港内の汀線の方向と曲率半径の変化を、防

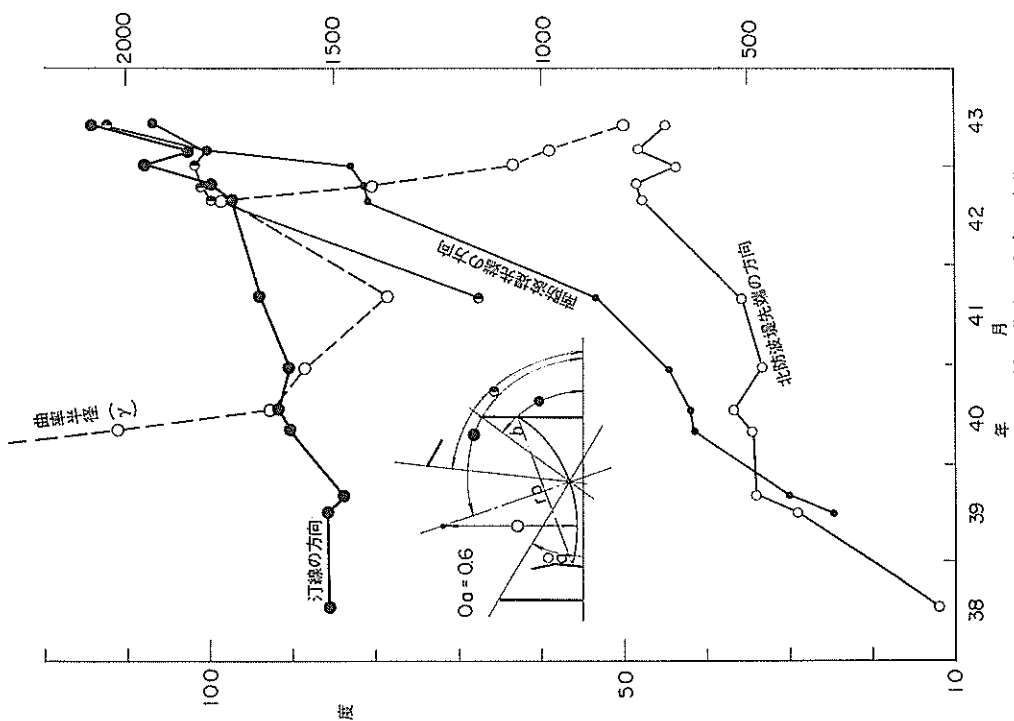


図-32 港内の汀線の曲率と方向の変化

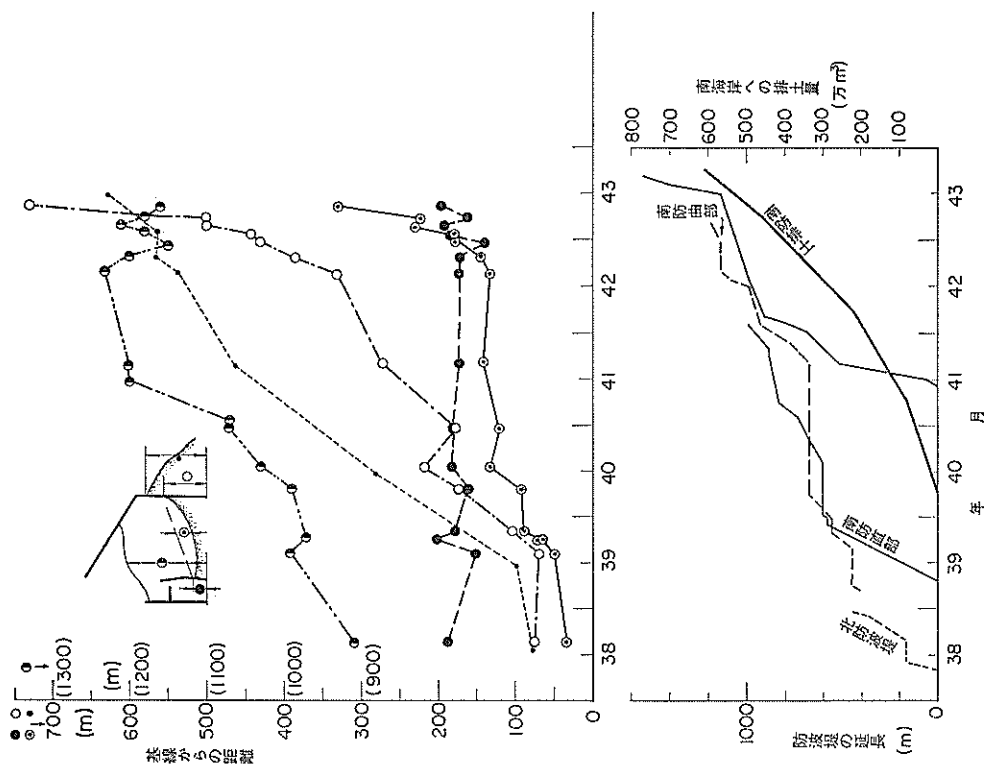


図-31 港内の汀線形状に関する諸量の変化

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

波堤の伸長と共に示したものである。防波堤の伸長は、
 図中凡例に示すごとく、浜の中央における防波堤先端の
 見通し線と基線のなす角度として示されている。南防波
 堤の建設が始まるまでは、浜は平面的にわずかに南に向
 いているが、南防波堤が延長されると、次第に海に正対
 する（基線と90度の角度をなす）方向に向き、南防波堤
 の見通し角が北防波堤の見通し角を越えて延長され、南
 防波堤曲部が施工されるまでは、徐々にわずかつつ北に
 向くようになる。南防波堤曲部の延長が進むと、浜の平
 均的な方向は、急激に北に向い、基線と20度余の角度
 をなすようになる。南部防波堤曲部が延長されると、浜
 の平均的方向は、曲部の施工部分のうち最も沖に当たる
 堤頭部の見通し線にほぼ一致するようになる。この際、
 この堤頭が短い延長しかない島堤状のものであっても、
 このことが言える。一方、浜の汀線は、南防波堤が延長

されると、ほぼ円弧で近似されるようになり、その曲率
 半径は南防波堤延長と共に急激に減少し、曲率の大きい
 曲線となる。

このように、南防波堤の曲部の延長に伴って、汀線が北
 に面した円弧をなす直接的な理由は、南防波堤曲部の陰
 の部分では波が遮蔽されているために、港内の南側は北
 側より波が小さくなり、これによって北から南へ向い、
 南防波堤の陰にそって沖に向う反時計まわりの流れが形
 成されるためである。図-33 は、模型実験中での波と流
 れの状況を示すものであるが、前述の循環流の状況を明
 瞭に見ることが出来る。また、図-34 は、42年3月およ
 び10月に実施したフロート観測の結果であるが、これに
 も反時計まわりの流れの存在が明瞭である。

図-35 は、42年12月に実施した蛍光砂調査の結果を
 示すものである。蛍光砂は、港口附近に赤色、浜の前面

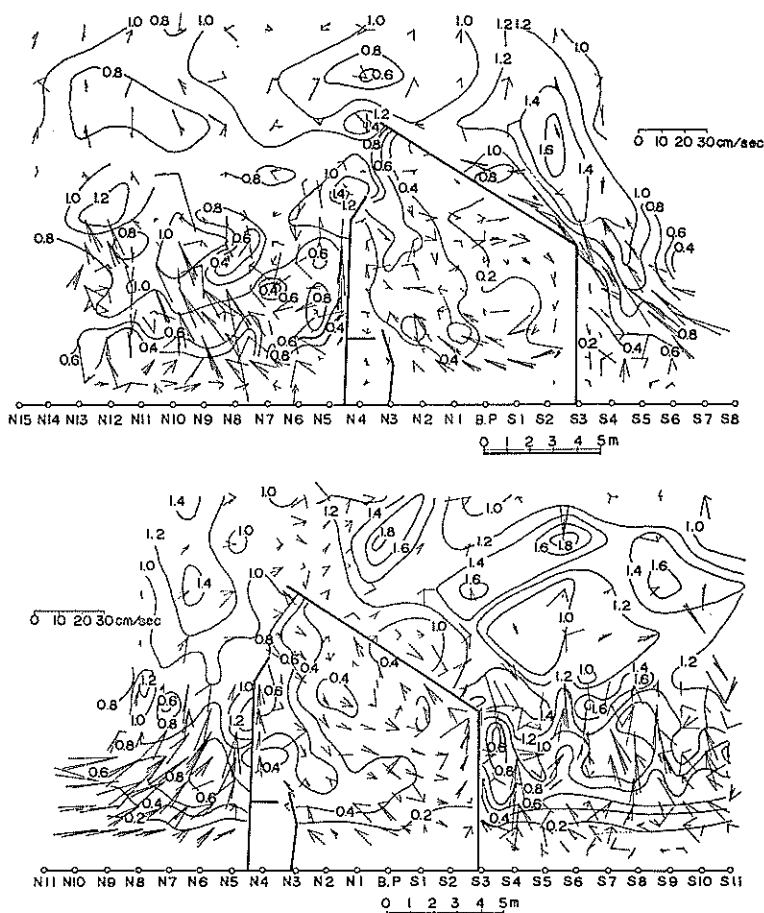


図-33 港内の波高と流れの分布に関する模型実験の結果

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

に青色、南防波堤の陰に黄色の三色が投入されている。赤色蛍光砂は主として北防波堤沿いに浜に向い、青色蛍光砂は浜に沿って南に向い、更に黄色蛍光砂は動きは少ないながらもわずかに港口へ向う傾向を示している。これによって、港内の砂および港内に侵入した砂が、前述の反時計まわりの流れに沿って、南防波堤の陰に堆積して行く様子が良くわかる。

5.2.3 航路浚渫以前における港内埋没

図-36 は、南防波堤の建設の始まる以前の昭和38年夏から、航路浚渫の開始された昭和43年末までの間の、港内の土量変化を示すものである。図中には、各測量時点における防波堤の建設状況および南海岸への投棄土砂量が示されている。

この図で明らかなように、港内浚渫開始の時点までに、総計約 250 万 m^3 の港内埋没が認められる。埋没の速度を見ると次のとおりである。すなわち、

昭和 38 年夏から 39 年夏の間	約 60 万 $m^3/year$
昭和 39 年夏から 40 年末の間	約 20 万 $m^3/year$
昭和 40 年末から 43 年夏まで	約 60~70 万 $m^3/year$

(昭和 40 年末から 41 年夏まで 約 90 万 $m^3/year$)
(昭和 41 年夏から 43 年夏まで 約 60 万 $m^3/year$)

昭和 38 年夏から 39 年夏の間の急激な埋没は、かなり異様な状況である。この間、港外各ブロックの土量変化を見ると、碎波帯内では堆積、欠壊のブロックが交互に現われるが、沖合ではほとんどのブロックが堆積を示している。一方昭和 38 年は、前年の 37 年に比べて著しく欠壊している。従って、この期間の異様な堆積の理由について、次の二つの場合が認められようが、いずれにしても、防波堤による堆積効果とのみは考えられない。すなわち、

イ、この期間、きわめてマクロなスケールで、この地域全体を堆積させた何らかの機構が存在した場合。

ロ、38年度の測深基準に何らかの過誤のある場合。

昭和 39 年夏から 40 年末までの堆積は、B 区の堆積と 40 年夏、南海岸への土砂投棄と期を一にして起る E 区の堆積のためである。

昭和 40 年以降の埋没は、B、D および E 区での堆積の結果であり、A 区はむしろ欠壊気味であり、また C 区の

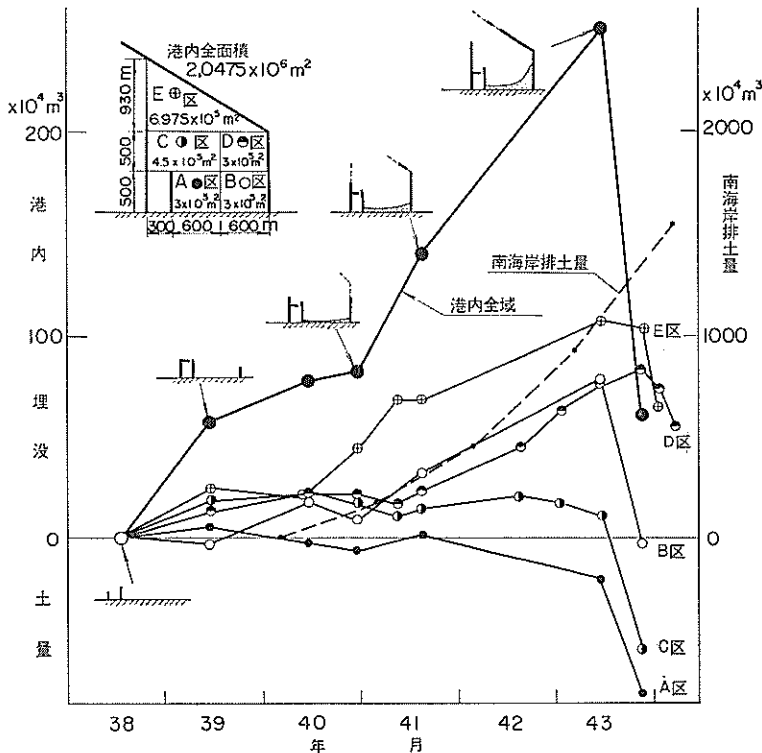


図-36 港内土量の変化

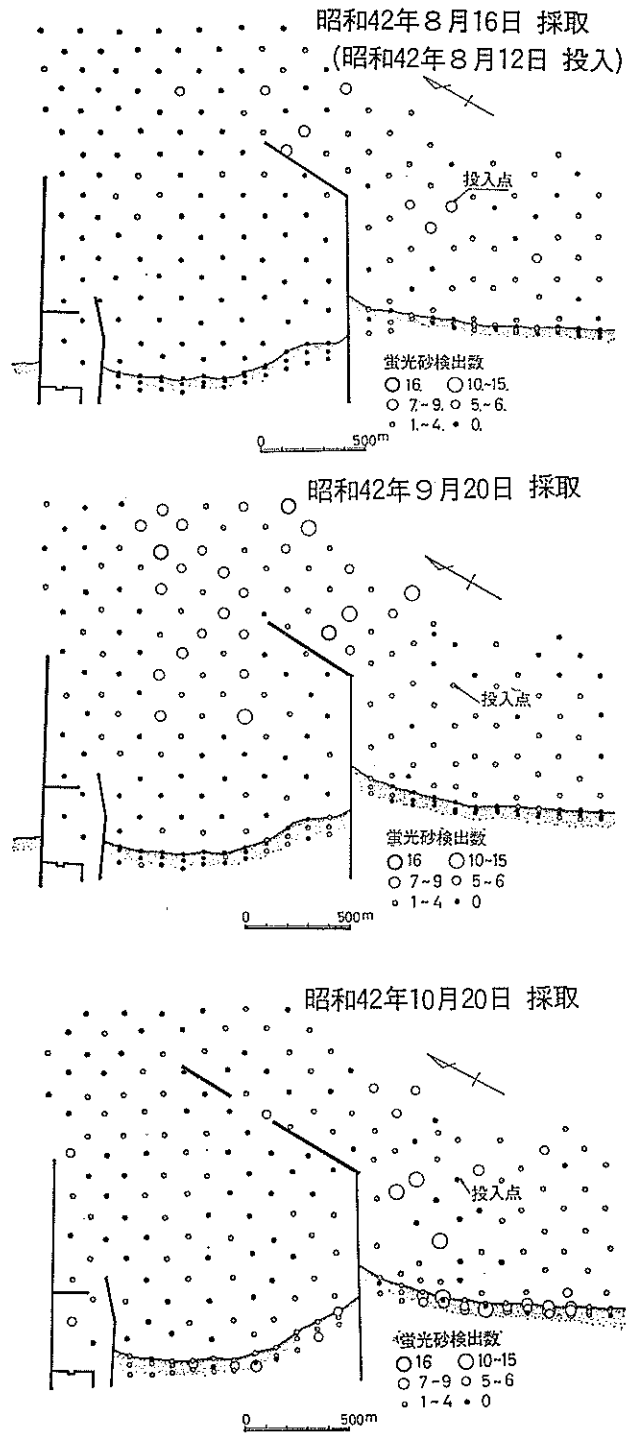


図-37 港外に投入された蛍光砂の港内への侵入状況

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

土量はあまり変化していない。D区の土量は、南海岸への土砂投棄の直後から急激に増加するが、以後増加率は漸減する。一方D区では、41年末まではほとんど土量変化が認められないが、42年以降急激に土量が増加している。B区においては、ほぼ一定速度で土量が増加する。この結果、40年以降全域の埋没率は、南防波堤曲部ケーソン掘付け延長が980mに達したにもかかわらず、意外に減少していない。もっとも、42年7月までは南防波堤屈曲点附近60mのケーソン掘付けは未施工であり、また43年3月までは屈曲点から500mの点から約300m間のケーソンは掘え付けられない。

前述したように、南防波堤直部は捨ブロッグ構造であり、船溜りの場合と同様相当量の土砂の透過が生ずるように考えられる。しかし、南防波堤直部には、41年度に砂止め土が施されており、また、防波堤の内外の汀線が急激に進むために、透過し得る部分の延長は減少している。図-37は、昭和42年8月に実施された蛍光砂調査の結果を示すものである。これに見るように、南海岸に投入された蛍光砂は南防波堤によって沖へ運ばれた後、初めて港内の南防波堤基部に現われる。この蛍光砂調査からも、防波堤を誘過して港内に砂が侵入することは少なく、港内を埋没させる砂が、沖の防波堤開口部から侵入しているものと考えて良い。図-38は、昭和40年6月と40年12月の深浅図から水深差を図示したものである

が、これによると、南防波堤先端から堆積部分が北へ拡がって行く状況が良くわかる。

B区およびE区における埋没率の変化は、前述した、港内に生ずる反時計廻りの流れの効果であり、南防波堤曲部の延長に伴って、この流れが生じ、それ以前主としてE区に堆積していた土砂が、この流れのためB区に輸送されて堆積するようになったものであろう。

5.8 南海浜における地形変化の詳細

前述したように、南海浜には、昭和40年度以降大量の土砂投棄が行なわれ、これによって広範な地域にわたって著しい地形の変化が生じた。その状況の概要は前章に述べた通りである。本節では、この間の状況の変化の過程をより詳細にながめ直して見たいと思う。

鹿島港南海浜における土砂の投棄は、外海における埋立法法としてきわめて大胆な、新しい試みであった。すなわち、自然海岸に大量の土砂を巻き出し、汀線を前進させ、比較的簡便な護岸と潜堤とによって、これを維持しつつ背後の造成地を利用して行こうとするものである。こうした工法が、荒波にさらされた鹿島のような海岸で、未来永劫にわたって維持し続けるという意味で本当に可能なのだろうか？ という問題を先ず考えたいと思う。

さらに、この大量な土砂投棄は、通常では考えられない早さで沖合いの地形を変えて行きつつあるように思わ

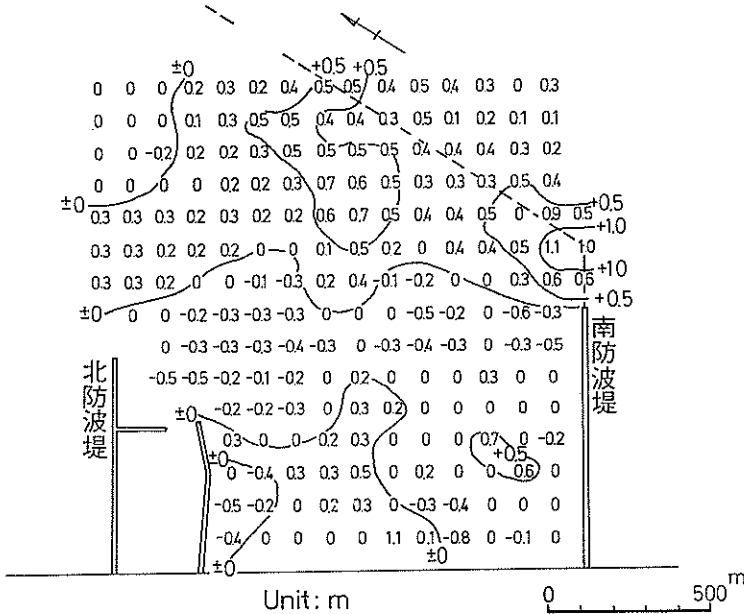


図-38 港内における水深差の分布

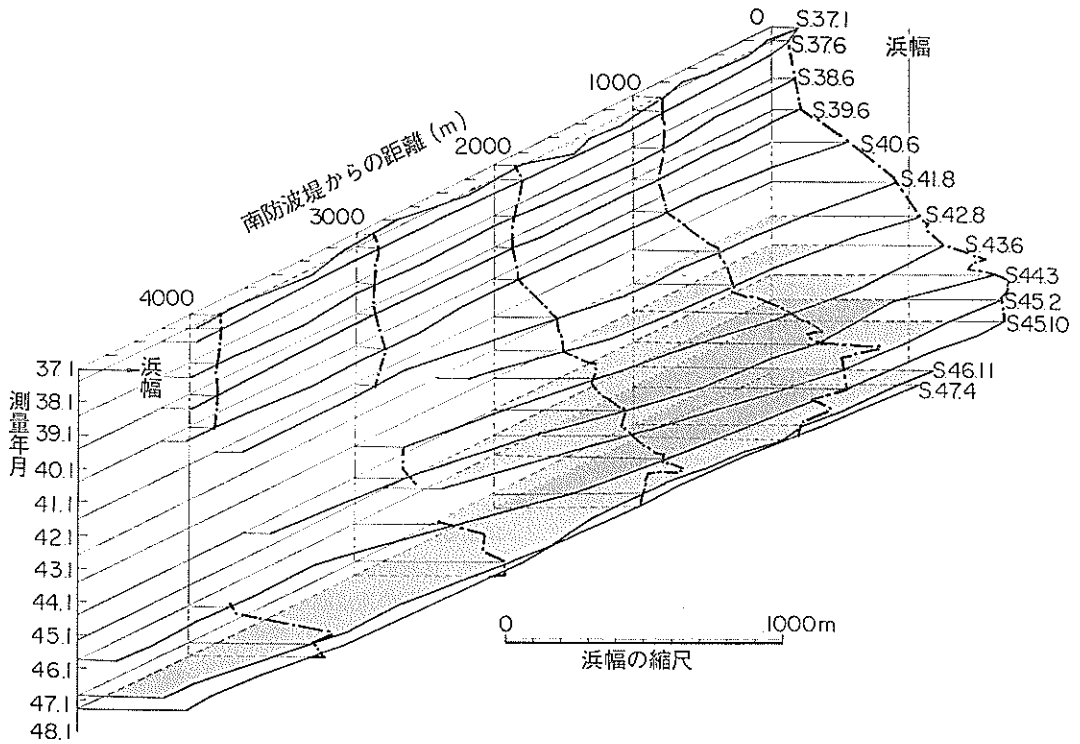


図-39 南海岸における汀線形状の変化

れる。特に、南防波堤前面では、後述するように、2m～2.5mの水深の減少が起きている。このような沖合地形の変化の問題を第二に考えなくてはならない。

5.3.1 土砂投棄による海浜の造成

図-39は、汀線の変化の状況を示すものである。図は直交する三次元座標で示されているが、水平軸は海岸に平行および海岸に直角に沖方向への距離であり、鉛直軸は年月日を示している。図中太い実線で示した線が、或る時点での汀線の形状であり、太い鎖線が、ある測線の汀線の位置の時間変化である。

土砂投棄が開始されて以降（投棄位置は図-14に示すように、南防波堤から500～2500mの間である）南防波堤寄り部分から汀線が前進を始め、年を追うと共に沖へ、また南へと汀線が広がっている。汀線前進量のピークは、南防波堤に近い位置で昭和45年度、南防波堤から約3km南の測線では46年度と、南へ行くに従って遅れて来る。

この間の汀線の拡大の状況を数値的に把握しようとしたのが図-40である。図には、時系列的に見て汀線の前進が明らかに見える地点の南防波堤からの距離、基線と

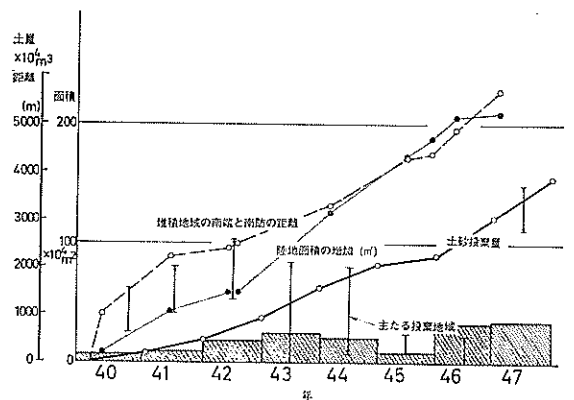


図-40 南海岸における汀線の拡張の状況

汀線で囲まれる地域の面積および排土量が示されている。また、図中に矢印で示された範囲は、排土区域である。これによって、10,000m³の土砂投棄によって生ずる陸地面積の増加量を概算すると、

昭和40年4月から41年8月の間	1,333.3m ³
昭和41年8月から42年10月の間	357.1m ³

昭和42年10月から45年3月の間	734.8 m ²
昭和45年3月から46年3月の間	1,833.3 m ²
昭和46年3月から46年7月の間	720.0 m ²
昭和46年7月から47年4月の間	50.0 m ²
昭和47年4月から48年3月の間	169.0 m ²
平均	571.0 m ²

となり、近年陸地造成効率が低下傾向にあるように思われる。また、41年度から45年度までは、堆積地域の南への拡大よりも、陸地面積の増加率の方が高い（汀線の沖方向への拡大が著しい）が、46年度以降、逆に面積の増加率より、南への拡大率の方が高くなりつつあることがわかる。

図-41は、各測線における汀線変化の状況を示すもので、相続く2回の測量時における汀線の移動量 Δy が、凡例に示したランクにしたがって示されている。昭和40年以降45年末までは、測量の毎に汀線の前進が見られ、堆積地域が次第に南の測線に移っている。しかし、45年末の測量以後は、南防波堤に近い部分から決壊が現われ始める。昭和46年度頭初の南防波堤に近い位置での（図-14参照）投棄によって、一次汀線は回復するが、それ以降はやはり南防波堤に近い地域では決壊気味で、決壊地域が次第に南へ広がる気配がある。それでも、南防波堤の南1km余までの間には、護岸前面に砂浜が残されているが、それ以南1kmの間は、護岸前面の砂浜は消滅し、この砂浜消滅地域もまた、南方向へ拡大しそうな

傾向を示している。砂浜の決壊は、投棄土砂量の少なかった45年度を契機に生ずるため、排土量の減少が決壊の主因のように見えるが、その後、46、47年と大量の土砂投棄が行われた後にも決壊性は続き、かつ前述のように、土砂投棄による陸地造成効率も減じつつある。

造成砂浜の変化を、土砂投棄量や主外力である波浪条件と対比することは、きわめて興味のあるところである。しかし、序章で述べたように、現地深淺図に基づいた議論をしている場合には、序章で述べたような理由で、こうした現象の詳細を追求することは不可能に近い。図-41からも明らかであるし、後述もするが、例えば投棄土砂量と汀線変化の相関を考えて見ると、累計土砂投棄量と累計の汀線変化量の間には、かなり強い正の相関が存在するが、年度毎の汀線の動きと年度毎の投棄量の間には、あまり明瞭な相関はつかみ得ない。波浪条件については、これ以上に問題は困難である。

昭和45年以後、造成砂浜が決壊性となる理由としては、次のようなものが考えられよう。

- 1) 土砂投棄位置および方法の変化
- 2) 南防波堤の曲部が延長されたため、沿い波効果が現われてきたこと。

1)の理由については、投棄位置そのものが南へ移ったと言う事実は、昭和47年度までではない。しかし、海岸護岸が造成されたために、その背後に投棄された土砂は、護岸前面の砂浜を襲いにくいこと、前面砂浜に寄与する

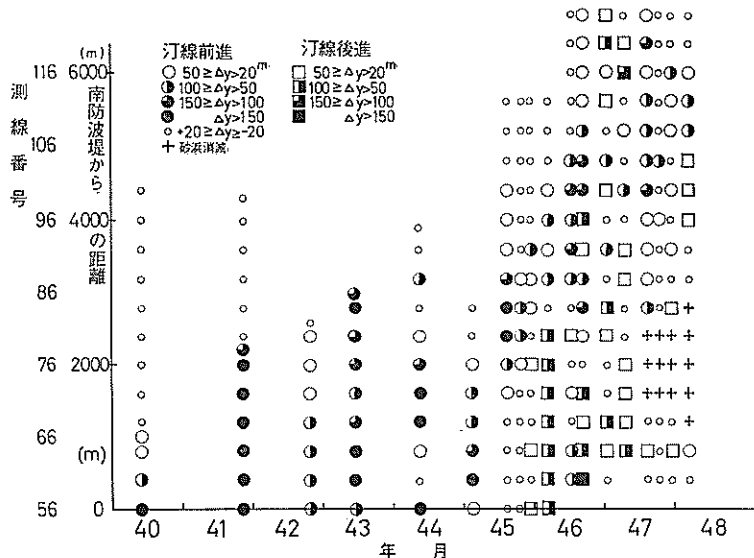


図-41 南海岸の各測線における汀線変化の時的分布

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

表-3 南海浜の各測線における等深線変化の相関々係

測線	No. 58							No. 65							No. 73							No. 81						
	水深	±0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	±0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	±0	-2	-4	-6	-8	-10	-12	±0	-2	-4	-6	-8	-10
No. 58	±0	4	4	4	3	2	2	4	4	4	2	2	1	2	4	4	4	3	1	-1	-1	2	3	3	2	-1	-1	-2
	-2	4	4	4	3	2	2	4	4	4	2	2	1	2	4	4	4	3	1	-1	-1	3	3	3	2	-1	-1	-1
	-4	4	4	4	3	2	2	4	4	4	2	2	1	2	4	4	4	3	1	-1	-1	3	3	3	2	-1	-1	-1
	-6	4	4	4	4	2	2	4	4	4	2	3	1	2	4	4	3	3	2	1	-1	3	3	4	2	-1	-1	-1
	-8	3	3	3	4	3	1	2	3	3	2	3	1	1	3	3	2	2	2	1	-1	2	4	4	2	1	-1	-1
	-10	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	3	2	1	1	1
	-12	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
No. 65	±0	4	4	4	4	2	2	2	4	4	2	2	1	2	4	4	4	2	1	-1	-1	2	2	3	1	-1	-1	-2
	-2	4	4	4	4	3	2	2	4	4	2	2	1	2	4	4	4	3	1	-1	-1	2	3	3	1	-1	-1	-2
	-4	4	4	4	4	3	2	2	4	4	2	2	1	2	4	4	4	2	1	-1	-1	2	3	3	2	-2	-1	-1
	-6	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1	-1	2	2	2	2	1	-1	-1
	-8	2	2	2	3	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	-1	2	3	3	2	1	-1	-1
	-10	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	-12	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1
No. 73	±0	4	4	4	4	3	2	2	4	4	4	2	2	1	2	4	4	3	2	-1	-1	3	4	4	2	-1	-1	-1
	-2	4	4	4	4	3	2	2	4	4	4	2	2	1	2	4	4	3	2	-1	-1	3	4	3	2	-1	-1	-1
	-4	4	4	4	3	2	2	1	4	4	4	2	2	1	1	4	4	4	1	-1	-1	3	3	3	2	-1	-1	-2
	-6	3	3	3	3	2	2	1	2	3	2	2	2	1	1	3	3	4	2	-1	-1	3	3	3	2	-1	-1	-1
	-8	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	-1	2	2	1	2	2	1	2	2	2	4	2	1	-1
	-10	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	2	1	-1	-1	-1	-1	2	2	1	1	1	2	3	2	2
	-12	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	2	-1	-1	-1	1	1	2	2
No. 81	±0	2	3	3	3	2	2	1	2	2	2	2	1	1	3	3	3	3	2	1	-1	4	4	3	1	-1	-1	
	-2	3	3	3	3	4	2	1	2	3	3	2	3	1	1	4	4	3	3	2	1	-1	4	4	3	1	-1	-1
	-4	3	3	3	4	4	3	2	3	3	3	2	3	1	1	4	3	3	3	2	1	-1	4	4	3	1	-1	-1
	-6	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	4	2	1	3	3	3	2	1	1
	-8	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-2	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	2	3	1	1	1	1	2	2	2
	-10	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	2	2	-1	-1	-1	1	2	4
	-12	-2	-1	-1	-1	-1	1	1	-2	-2	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	2	2	-1	-1	-1	1	2	4	4

注) 相関係数は

- (1) 0~0.499
- (2) 0.5~0.799
- (3) 0.8~0.899
- (4) 0.9~0.999

のように区分されている。

にしても、護岸南端を迂回した後始めて海浜に達するために、実質的には投棄位置が南へ移ったと同様な効果が生じたことも考え得るであろう。また、投棄の方法として、ポンプ浚渫による海岸への直接排出量が減少し、陸からの巻き出し方式が主体となったこと等、投棄方法の変化の効果も大きいものと思われる。

2)については、防波堤曲部延長が長くなるにつれて、これに沿う波の効果が強まり、防波堤が或る延長に達すると、沿い波の効果が海底地形に明瞭に現われるようになる例が他港でも見られる。そうした効果は、鹿島港でも当然考えられるであろう。後述する資料の中に、この防波堤の沿い波効果に関連するであろう事実が認められる。

図-42は、測線 No. 58 (南防波堤の南 200m), No. 65 (900m), No. 73 (1,700m) および No. 81 (2,500m) の3測線について、水深 ± 0 , -2 , -4 , -8 , -10 および -12 m の各等深線と基線との距離の変化を示し、また表-3は、各々の等深間の変化の相関を示すものである。図中 No. 58 測線の上部には、この間の日最大波が示されている。表では、相関係数が5段階に分けて、階級で示されている。また、南防波堤曲部の累計延長と投棄土砂量の累計値との相関々係も同時に示した。この図から、南海岸の海底地形変化に関して、次のような事実が指摘出来る。

イ. 各測線共、 ± 0 m から -6 m の間の地形変化の正の相関々係はきわめて強く、この範囲の海底地形が、一つのメカニズムの中で変動していることがわかる。

ロ. -6 m より深くなると、防波堤に近い測線では、かなり深い所まで汀線変化との相関が強いが、南防波堤から 1.7 km 以上離れた測線 No. 73 と 81 では、 ± 0 線と -8 m 線の変化の間に相関々係はほとんどない。

ハ. 防波堤から 1.7 km 以上離れた測線では、浅部の変化と水深 -10 および -12 m 点の変化との間には、弱いものではあるが負の相関々係があり、造成浜が決壊されるとその土砂が沖合広く分散することを示している。負の相関が成立する地域が、防波堤から南に離れた測線上にのみ見られるのは、南防波堤の曲部に沿う波と、それに伴う流れのために、土砂が南沖にはねられていることを意味するのであろう。

ニ. 汀線に平行な方向について見ると、 $\pm 0 \sim -4$ m 程度の水深では、測線 81 までは強い正の相関々係が成り立っている。しかし、水深が深くなると相関々係の成立する範囲は狭くなり、水深 -12 m では防波堤に近い2測線の間を除いてはほとんど関係がない。

ホ. 投棄土砂量との相関は、 -8 m 以浅ではかなり強く見られるが、 -10 m では、南防波堤に近い測線 No. 58 を除いてはほとんど見られない。これは、防波堤による漂砂の阻止効果の強くない地域では、沿岸への土砂投棄の影響が、 -10 m の水深にまでは直接及んでいないことを意味している。南海岸には、ほぼ -8 m の水深に砂止め潜堤 (天端高 -5 m) が設けられている。しかし投棄土砂の影響が、水深 -8 m までで止まっているのが、この潜堤の砂止め効果であると単純に考えるのは早計のようである。

ヘ. 土砂投棄量と、 -8 m 以浅の等深線変化量との相関が、南防波堤に近い箇所より離れた箇所の方が高いのは、南防波堤から離れた地点での水深変化が、投棄土砂量にのみ強く依存しているのに反し、防波堤に近い地点では、防波堤による漂砂の阻止効果の影響も加わるためであろう。

ト. 南防波堤の累計延長と土砂投棄量の累計値の間には、投入事業費を仲介とした相関々係が存在している。したがって、両者の効果を切り離して別箇に評価することは出来ない。

図-43は、南海浜における代表測線上の海底断面の変化状況を示すものである。これによると、土砂投棄によって海底断面は、水深 -8 m \sim -10 m 以浅の勾配を急激に増しながら堆積するが、逆に決壊する場合にも、この部分の勾配が緩やかになって後退し、堆積前の断面に復そうとする傾向があることがわかる。したがって、汀線の後退は、海中部分の広範な欠壊を伴っており、海中部分の決壊の防止をせずに汀線の後退のみを防止することは、きわめて難かしいように思われる。

図-44は、汀線の前進および後退に伴って、海底の勾配が如何に変化するかを示そうとしたものであり、汀線と基線との距離に対して、各等深線間の距離が図示されている。これによると水深 ± 0 から -2 m の間と -10 m から -12 m の間の勾配は、汀線の変動に伴って変化する傾向を示さず、 ± 0 と -2 m の間で $1/10 \sim 1/75$ 、 -10 m と -12 m の間で $1/100 \sim 1/175$ 程度の勾配の間で変動している。一方、水深 -2 m から -10 m の間では、汀線が前進すれば勾配が急になり、後退すれば緩やかになる傾向が明確である。汀線の前進、後退に伴う勾配の変化は、水深 -2 から -4 m の間および -6 m から -8 m の間で比較的大きく、水深 -4 m から -6 m および -8 m から -10 m の間で比較的小さい。

汀線と水深 -2 m の間の勾配が、汀線変化の影響を受

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

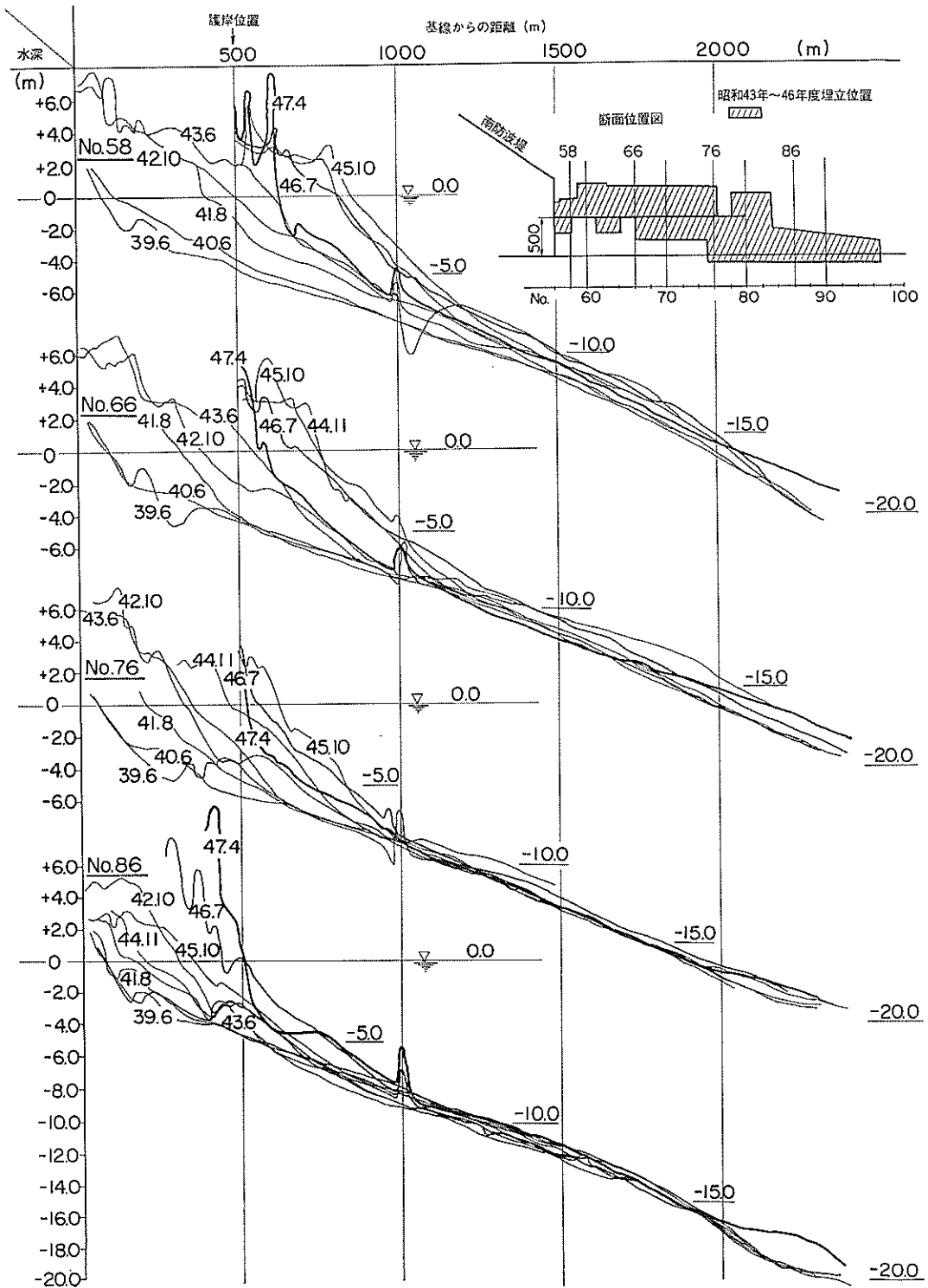


図-43 南海岸の代表測線における海底断面の変化

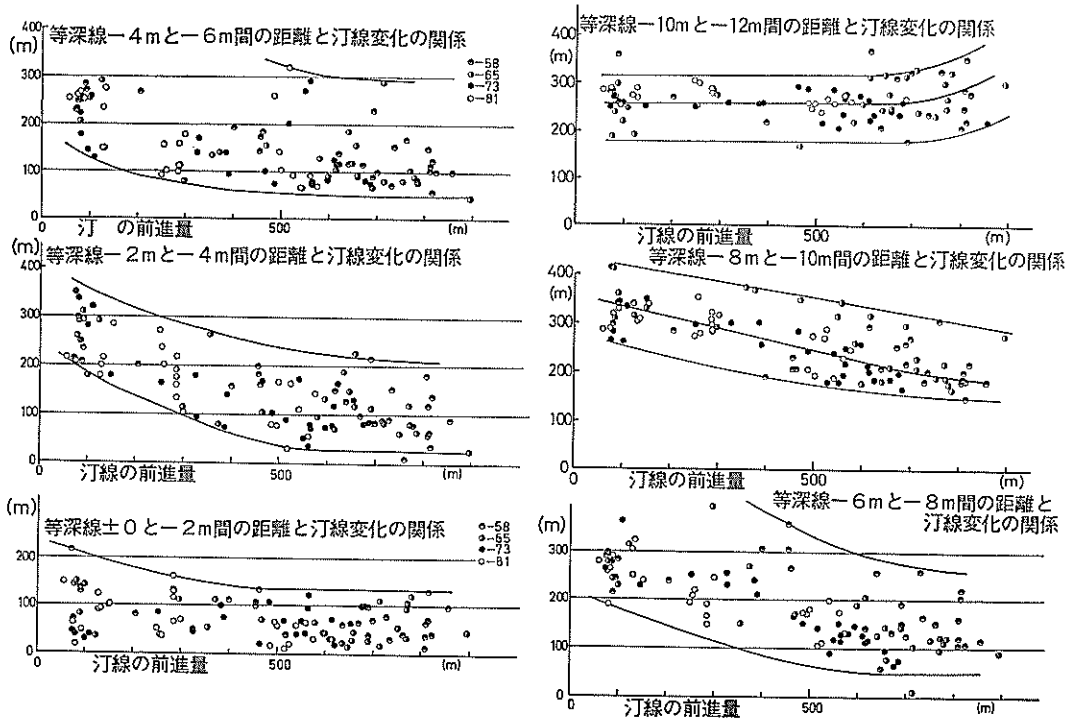


図-44 南海岸における汀線変化と海底勾配の変化の関係

けない理由は、この水深では、海底勾配が波浪条件に適合した値に速く変化し、このため土砂投入という人工的操作が、海底勾配変化として現われないからであろう。水深 -10 m 以深での海底勾配が汀線変化に左右されないのは、前述した相関分析からも明らかなように、この程度の水深になると、土砂投棄の影響が直接及んでいないためと考えてよい。水深 -4 m から -6 m の部分の勾配変化が、-6 m から -8 m のそれより小さく現われるのは、前者の土砂投棄前の海底勾配が後者の勾配より急だったためで、充分汀線が前進した状況での勾配そのものとしては、ほぼ同程度の値に納まっている。

汀線の前進に伴って勾配が変化する地域において、海底勾配は最終的に或る定まった値、すなわち

- 水深 -2 m ~ -4 m の間で 1/12.5 ~ 1/100 (平均 1/50)
- 4 m ~ -6 m の間で 1/25 ~ 1/125 (平均 1/60)
- 6 m ~ -8 m の間で 1/25 ~ 1/125 (平均 1/65)
- 8 m ~ -10 m の間で 1/75 ~ 1/150 (平均 1/100)

程度に漸近する傾向がある。各水深の勾配がこの最終値に達するのは、汀線が基線から 500 ~ 600 m の位置に達した附近からである。これらのグラフに現われた平均勾配によって、土砂投棄による海底断面の平均的な変化の

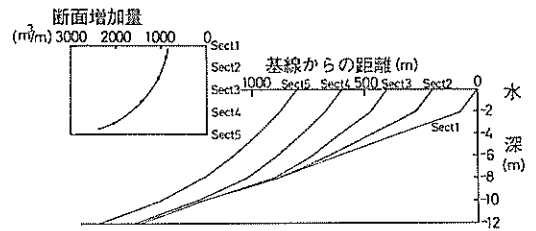


図-45 南海岸における断面変化の模式図

状況を示すと、図-45 に示した断面のとおりとなる。この各断面間の土量の差を示すと、同図中のグラフのとおり汀線の前進量に対して指数函数的に増加して行くことがわかる。従って、汀線が前進すればするほど、同一土砂投棄量に対する陸地形成の効率急激に減少して行くことがわかる。この事実、前述した陸地造成率が年とともに減少しつつある事実、あるいは土砂投入の初期、砂浜幅の増大が著しかったものが、次第に砂浜の南側への拡大の傾向が強まって行く事実と符合する。更に、砂浜を造成する場合、砂浜幅を広く取れば取るほど、造成の効率も低下し、その維持も困難になるわけで、幅狭く、沿岸方向に長い平面形を考えた方が徳策だと言える。

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

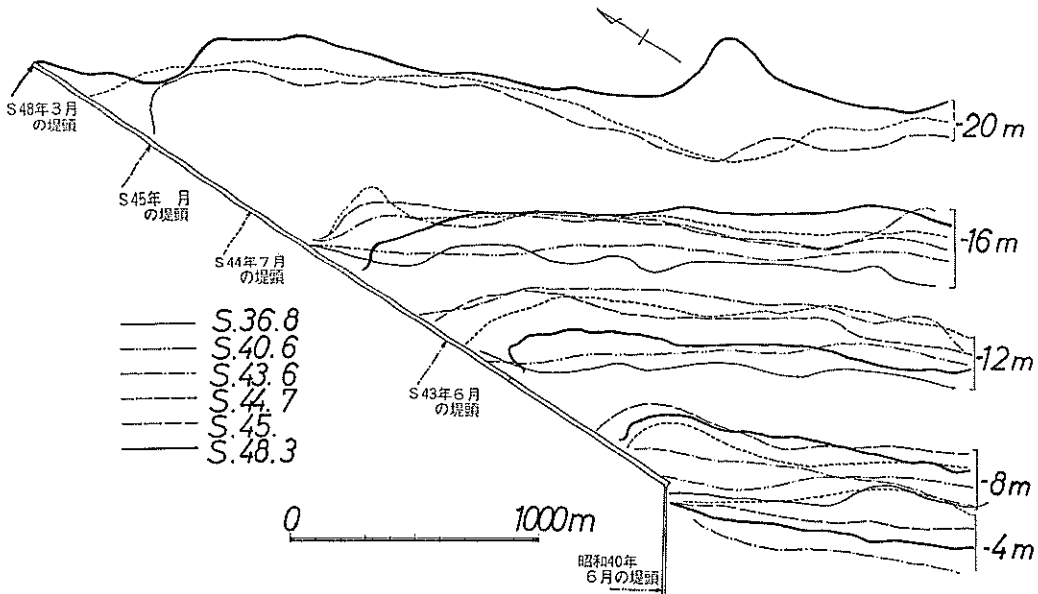


図-46 南防波堤曲部沖合の等深線の比較図

5.3.2 南防波堤沖合における海底地形の変化

図-46 は、南防波堤沖合における水深 -20、-16、-12、-8 および -4m 等深線の変化を示したものである。水深 -20m については昭和 44 年以前の状況が不明であるが、水深 16m 以浅については、南海岸に土砂投棄が開始された昭和 40 年以降、各等深線共防波堤沿いに急激に沖に張り出している。しかし、48年の等深線は、張り出しの最盛期の昭和 44~45 年に比べると、著しく後退している。

この間の水深変化の状況を、より克明に知る目的で図-47 を示す。この図は、図中凡例に示したように、南防波堤曲部に設定した A, B, C および D の固定された 4 つのゾーンの境界線の水深を示したもので、各測量時点における水深と共に、棒グラフの長さによってその地点附近の沖方向への海底勾配をも知ることが出来る。(棒が長い程急勾配)。各ゾーン共、測量時毎にかなりの水深の変動があるが、この図から次の諸点が指摘し得る。

- イ. A, B ゾーンについては、土砂投棄の開始された昭和 40 年以降、水深の減少がはっきり認められる。C, D ゾーンについては、途中の測量が欠けているために、はっきりしないが、水深の減少が起こるのは多少遅れ、42~43年頃からかと考えられる。
- ロ. A, B 区では、45 年末以来、南海岸の欠壊と期を一つにして逆に水深が増加し始めるが、C 区では水深の

増大が始まるのが 46 年末からであり、更に D 区では前述の図-46 でも明らかであるが、47 年に入っても堆積が続いている。

- ハ. 土砂投棄開始後の水深減少量は、各区で各々下記のとおりである。

A 区	約 3.5 m
B 区	約 2.0 m
C 区	約 1.5~2.0 m
D 区	約 0.5 m

- ニ. 各区共に、水深の減少速度が急激になるのは、昭和 44 年度以降である。

ホ. 水深が減少するにつれて、A 区では沖方向への勾配が、特にその沖側の半分において急になる。B 区では、全体に勾配はゆるやかになるが、特にその防波堤に近い部分において、その傾向は著しい。C 区および D 区では、あまり著しい勾配の変化は見られないが、防波堤寄りでは幾分勾配が急になり、沖側でゆるやかになる。

- ヘ. 水深の減少傾向がピークに達し、逆に水深増加の起こる段階では、A~D 区共に防波堤沿いの 150m の部分の勾配が著しく緩やかになる。

ト. 防波堤に沿う方向の勾配変化について見ると、A 区と B 区の間では、防波堤向きでは水深の減少と共に勾配が急になるが、区域の沖端ではほとんど勾配変化が

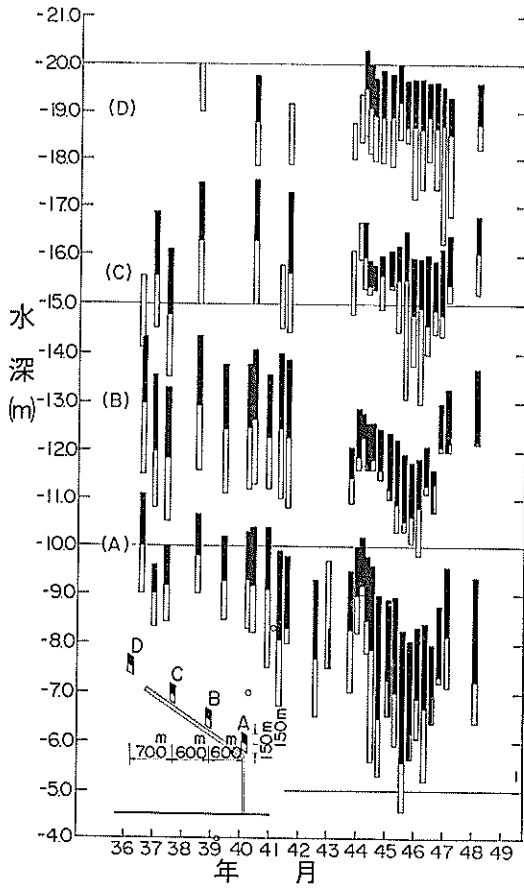


図-47 南防波堤曲部に沿った定点の水深変化

ない。B区とC区の間では、逆に、防波堤わきではほとんど勾配変北がなく、沖端の勾配が急になる。C区とD区の間ではA～B区間と同様な傾向がある。

前記イ、ロ、項に指摘した事実は、場所によって同一現象が現われるのに時間的な遅れが存在することを意味するもので、漂砂現象を考える上で興味深い。すなわち、この事実は、あたかも海底面上をリップルやサンドウェーブがその形を保ちつつ進行して行くように、ここで論じているような緩やかな、スケールの大きい地形的な特徴であっても、その地形そのものが重要な役割を持った一つのメカニズムに拘束されて、海底で移動して行くことを示唆するものである。前述した海底地形変化と外力特性との結び付けの困難さは、こうした漂砂現象のきわめて本質的な特性にも由来するものである。

ニ、項に示したように、南防波堤側の堆積が昭和44年度以降顕著になる。その原因を考えるために、この時点

での諸々の状況を見ると、先ず、南防波堤は43年度夏に曲部 1,500 m が完了した状況にあり、南海岸には43年度中に海岸護岸 1,660 m が施工されている。潜堤は43年度までに 2,700 m が施工済みであったが、43年度には工事が中断されている。南海浜は南防波堤に近い部分の汀線の前進がピークに達し、汀線は南防波堤屈曲点の岸側 300 m に達し、屈曲点附近の水深は -6 m 程度にまで減少している。44年度の土砂投棄は、新設された海岸護岸の海側に行なわれ、投棄土砂量は 464 万 m³ であった。これらの状況の中で、特に南海浜の土砂投棄による堆積のために、南防波堤屈曲点の水深が -6 m 程度にまで浅くなって来ていたことが重要であるように思われる。鹿島海岸では、-6 m という水深は重要な意味を持つ。すなわち、港湾工事施工前の状況では、-6 m は沿岸砂州の沖側斜面端に相当し、通常の荒天時には、この

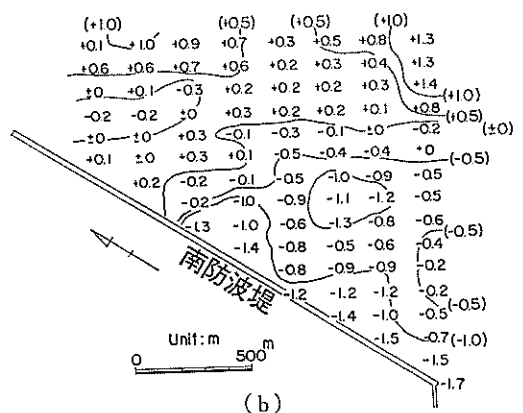
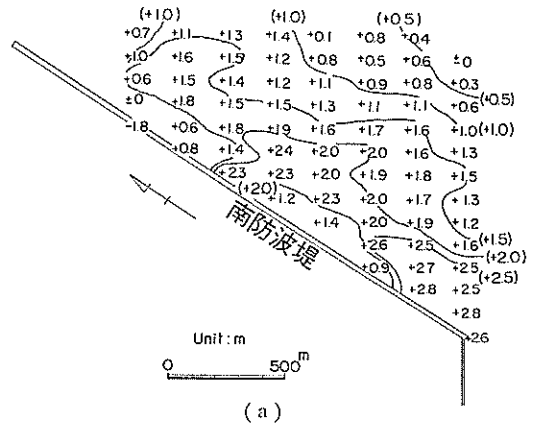


図-48 南防波堤曲部沖合での水深差の分布

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

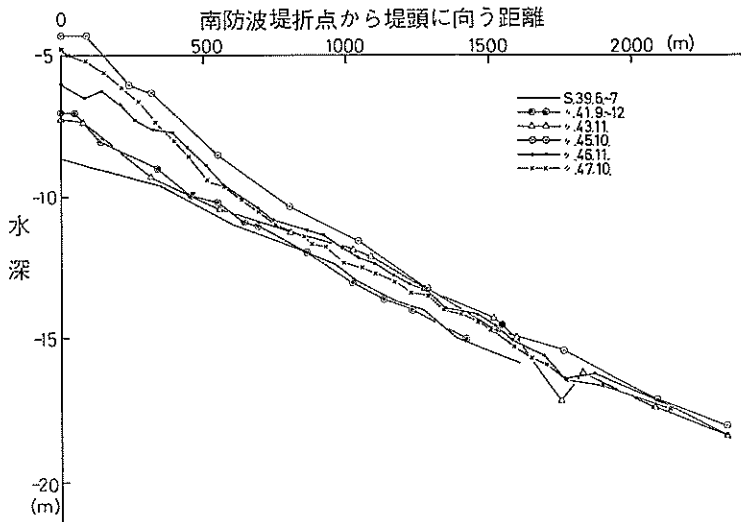


図-49 南防波堤曲部に沿う海底断面の変化

附近で波が砕ける。いわゆる砕波帯の沖端である。また海底断面の変化状況を見ると、-6m 附近以浅では水深変化が激しく、その沖側でも多少の変化があるが、-6m 点附近は中立点のように不思議と変化の少ない地点に当たっていた⁹⁾。これらの状況から著者等は、沿岸漂砂を阻止するために、防波堤の法線は、この水深を越えて、汀線に直角に延長することを主張して来たのである。ニ) 項に示した事実は、この主張が正しかったことを物語るものである。

ホ. および ト. 項に示した事実は、南防波堤屈曲点から沖に吐き出された土砂が、放射状に拡散する状態で防波堤曲部沖合に堆積している状況を物語るものである。この状況をより明確に理解するために、図-48 を示した。この図の (a) は、水深の減少の始まる以前の40年4月と水深の最も浅くなった45年8月の深浅図の水深の差を、また (b) は、水深の最も浅かった昭和45年8月と再び水深の増した後の昭和47年3月の水深水深差を各々示している。これによると、土砂が堆積して水深が減少する場合には、南防波堤の隅角部の角で最も堆積が大きく、これから防波堤の先端方向に向かって、防波堤から200m 程度離れた線上を峯として舌状に堆積部が長く伸びている。一方欠壊する場合には、欠壊地域は隅角部近くに限られ、その周辺部の水深の深い地域では依然として堆積が生じている。欠壊は防波堤のすぐわき 100~200m の地域で最も激しい。

更に、図-49 は、南防波堤曲部の法線に沿う海底地形の断面形状を示すものである。この場合にも、堆積が生

ずる過程では次第に海底勾配が増加し、欠壊の生ずる場合には減少すると言う。南海浜の断面変化と同様な傾向が見られる。

5.4 北海浜における地形変化の詳細

前章において述べたように、北海浜における地形変化のうち特徴的なものは、第一に海浜の欠壊であり、第二に南防波堤の伸長に伴う北防波堤港外側附近の堆積の問題である。更に、北海浜に対する土砂投棄は、南海浜の場合と異なり、先ず沖合に築堤し、その背後に土砂を投棄する工法が採られている。この南北両海岸における土砂投棄工法の相異による効果も興味ある事実であろう。本節では、これらの問題について詳述する。

5.4.1 北海浜における汀線変化

北海浜においては、昭和47年度より北防波堤の北 3km 附近を中心に海岸の欠壊が顕在化し、昭和47年度夏から海浜の欠壊防護工が設けられ始めている。

図-50 は、北海浜における代表測線上の汀線の変化を示すものである。汀線の変化は、基線から汀線までの距離変化で示されている。図によって明らかのように、北防波堤に近い測線では、当初汀線は徐々に前進しているが、或る時点を機に急激に後退し始める。しかし、この後退は永続せず、しばらく後から再び汀線は前進を始める。

このように、汀線が最も後退した後、更に再び前進に転ずる時期は、北防波堤に近い測線ほど早く、遠い測線では遅れて現われる。

このような状況を模式的に示したのが図-51 である。後述するように、このような汀線変化は、南防波堤の伸

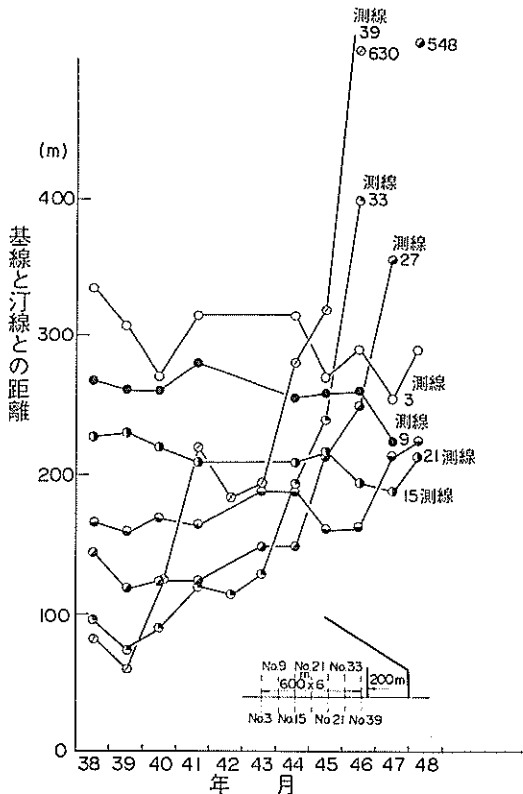


図-50 北海浜の代表測線における汀線の変化

長に起因するものである。したがって、図-51の曲線に示したように、北防波堤から或る一定距離離れた測線では、汀線は後退し、次第に一定値に近づくが、再び堆積に転じないことが予想される。

このような汀線変化の傾向と防波堤の築造状況との関係を示したものが図-52である。例えば測線 No. 21 に急激な欠壊が現われ、それが最も深刻な状況に達する昭和44年夏から45年夏までの間の防波堤の築造先端位置が、図-53の防波堤法線上に■印で示した位置であり、逆に、汀線が急激に進進し始めた46年夏から47年夏の間には、●印の位置に防波堤先端があったことを示している。これによると、図中に細い実線で示すように、任意の地点において、基線の方角と防波堤の先端を見通した方向の交角が45度に近くなければ、その地点に欠壊が現われることがわかる。また図中破線で示すように、この角度が60度に近くなれば、汀線は前進傾向になる。また測線 No. 21 に初めて欠壊が現われるのは、南防波堤が北防波堤の延長線を越えて延長された時点からである。もちろん、汀線の前進後退には北護岸の効果、北海

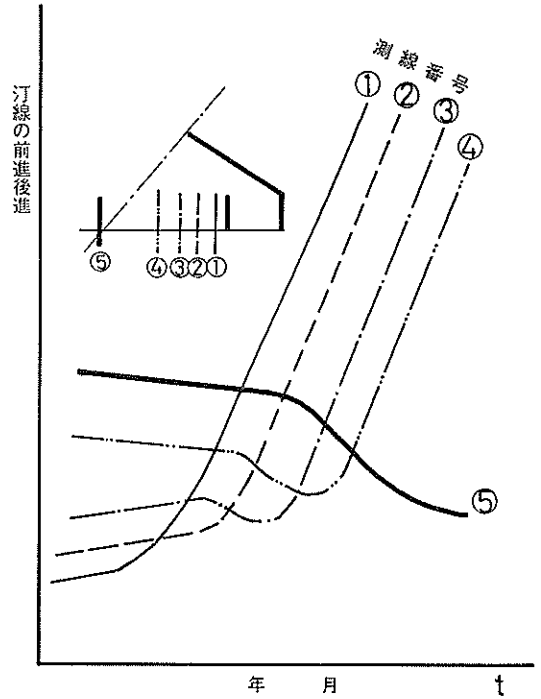


図-51 北海浜における汀線変化の模式図

岸への土砂投棄の効果および防波堤による漂砂阻止の効果なども考慮されなければならない。しかし、北護岸の施工開始は南防波堤の伸長に比べてかなり遅れているし、本格的土砂投棄の開始は昭和45年以降である。図-50に見るように、この時点までには No. 39, 33, 27 測線などにおける堆積の開始はすでに始まっており、測線 21, 15, 9, 3 における欠壊傾向はむしろ土砂投棄開始後に起

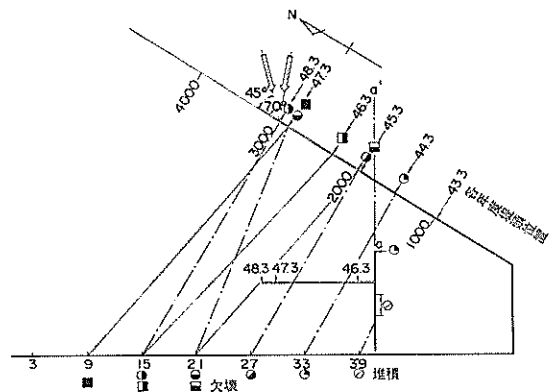


図-52 北海浜における汀線変化と防波堤築造状況との関係

こっている。従って、北護岸の建設や土砂投棄が前述した傾向を大きく左右しているとは考えられない。あくまでも、南防波堤の伸長との関係が強かったものと考えてよいであろう。防波堤による漂砂の阻止の効果は、測線15および9に見られる初期のゆるやかな欠壊として現われているものと考えられる。

主防波堤の対岸で欠壊の生ずることは、きわめて一般的で生起確度の高い現象である⁸⁾。これは、防波堤によって波の遮蔽領域と非遮蔽領域の差が生じた場合に、波の高い非遮蔽域から波の穏やかな遮蔽域に向かって、底質の移動が生ずることに起因している。従って、欠壊および堆積の傾向は、防波堤の法線と波向など波の特性の相対関係で定まるはずである。第2章自然条件において述べたように、この海岸における波は、NE～ENE方向からのものが卓越する。この波に対して、正弦波および永井¹²⁾による不規則波の回折図を示すと図-53のとおりである。これによると、欠壊の起こる地点は不規則波の回

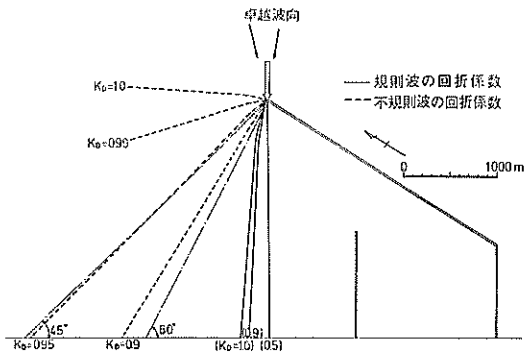


図-53 波の回折と汀線変化との関係

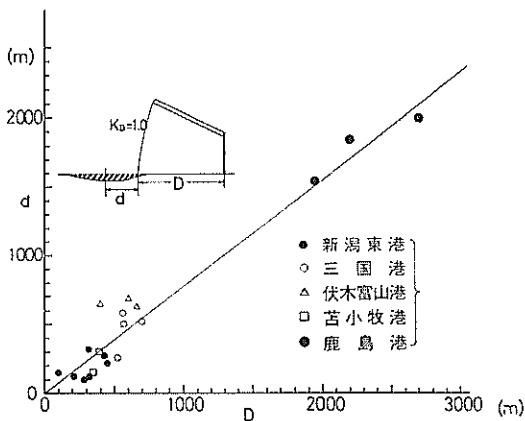


図-54 防波堤対岸における欠壊の発生箇所

折係数 K_D が 0.95 の点と一致し、堆積の生起箇所は $K_D = 0.9$ 以下になっている。永井の取り扱った不規則波は、Pierson Moskowitz の周波数スペクトルと SWOP の方向分散函数に基づくものであり、浅海領域ではこれより狭い方向分布を示すことが当然考えられるから、欠壊の生ずる地点は $K_D = 1.0$ の附近と考えていいようである。

楡井等¹³⁾は、規則波に対して $K_D = 1.0$ 以下となる部分の汀線延長 D と $K_D = 1.0$ の地点から欠壊の最も激しい点までの距離 d との関係を、図-54 のように示している。これに鹿島港の場合を加えると、图中大きい黒丸のとおりであり、ほぼ同一直線上に並ぶ、従って、楡井等の言う d の値は、規則波と不規則波の回折の推定上の差異であるにすぎないようであり、防波堤による回折効果の境界附近が欠壊しやすいと言ってよいものと考ええる。

防波堤の伸長と共に、欠壊の規模がどのように変化しているかと言う点も興味あるところであるが、欠壊が顕在化して日が浅く、かつ侵食対策が早急に施されているために現在のデータのみでは論じ難い。

5.4.2 北防波堤港外側周辺における地形変化

図-19 および 20 に見るように、北防波堤港外側には著しい堆積が生じている。本節では、この堆積の過程と特性について考えてみたい。

図-55 (a) (b) (c) は、北海岸の代表測線における各等深と基線との距離の変化を示したものである。図 (a) 中には、南北防波堤、北護岸の築造状況および南北両海岸への土砂投棄量の累計値が示されている。この図を基に、等深線の変化状況と港湾工事の関連を取りままとめると表-4 のとおりである。表-4 中で、40年度から開始されている南防波堤曲部の伸長を43年秋以降に取り上げたのは、前述した永井による不規則波の回折などを考えると、この時期に至って初めて南防波堤の効果が、北海浜に現われるものと判断したためである。また、44年末には、南防波堤は北防波堤の法線の延長線上を越え、北海岸に突出し始めている。これらの図表から、北海岸の海底地形変化について次の諸点が指摘し得る。

すなわち、第一に $-10\text{m} \sim -18\text{m}$ の水深の深い地域で、全期間を通じて堆積傾向がある。この傾向は防波堤工事の着工直後から見られ、着工直後の短い防波堤がこのような深い水深に影響するとは考えにくいから、防波堤工事との関連でのみは考え得ない。他の要素に関係しているように思われる。鹿島海岸は、本来、他の海岸

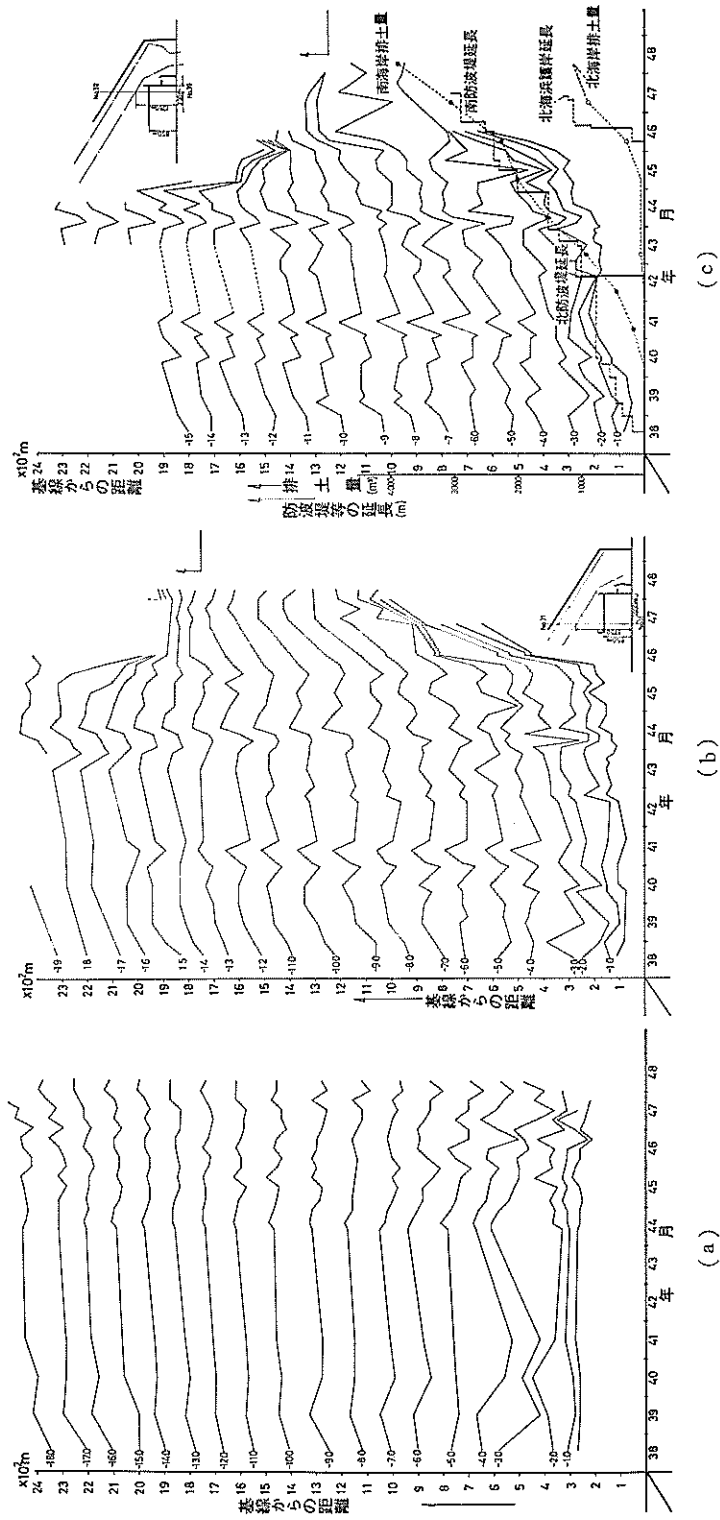


図-55 北海浜代表間線における等深線と基線との距離の変化

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

表-4 北海岸の等深浅変化と港湾工事の関係

年度	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
主要工事										
北防波堤の伸長 (第I期)	No. 39 測線で -3m 以 浅等深線が前進, No. 31 測線以北変化なし									
北防波堤の伸長 (第II期) 北海浜土砂投入 (40万 m ³)				No. 39 測線の水深 -10m 以浅および No. 31 測線 -3m 以浅で堆積						
南防波堤曲部の伸長 (1000~2000 m)						No. 39 測 線の全水深 で等深線前 進, 他測線 の変化少				
南防波堤の伸長 (曲部 先端が北防波堤法線の 延長線を越える) 北海岸への土砂投棄							No. 39, 31 測線が急激 に堆積 No. 21 測線の水深 -10m 以浅が欠壊気 味			

に比べて、水深の深い部分における水深変化が大きい傾向がある¹⁴⁾。

昭和38年から40年の北防波堤の伸長期には、北防波堤に最も近い砕波帯中に堆積が現われる。この期間の堆積傾向は No. 31 測線にまでは及ばず、北防波堤から700~800m 程度の間止まっている。

41年から43年の秋の間、39測線の水深 -10m 以浅および31測線の砕波帯中に堆積が見られ、測線39では汀線の前進より水深 -4~-10m 程度の堆積が著しい。この期間、北海岸には船溜内浚渫の土砂約40万 m³ がポンプより直接投棄されている。この期間の北防波堤わきの堆積は、北防波堤の延長とこの土砂投棄の影響のためである。

43年秋から44年末にかけて、防波堤に近い39測線のすべての水深にわたって著しい堆積が生ずる。他の測線での堆積は、さ程大きくない。この間の地形変化の特徴を明確にするために、昭和40年11月と44年11月の水深差の分布を図-56に示した。この図は、水深差を図-56 凡例のような階級に区分して表示してある。これによると堆積の最も激しいのは、北防波堤に近い測線の水深 -7m~-11m 附近である。この地域は、図中の等深線で明らかなように、43年11月時点では北防波堤によ

る洗掘の生じていた地域に当り、それが埋戻されるように著しい堆積が生じている。顕著な堆積地域は、測線 No. 33 までの水深 -5m 以浅に拡がっている。一方測線 No. 31 附近から洗掘地点が現われ始め、No. 27 測線以北ではほとんどすべての水深にわたって欠壊性を示す。上述の顕著な堆積を示す地域および欠壊の生じ始める地域の境界は、図中に各示したように、前節で述べた防波堤先端を見通す線と基線のなす角度45度と60度附近にあるものと考えられる。

No. 33~35 測線の沖および南防波堤先端附近に中位の堆積が生じているが、この地域は、図の等深線で見ると、43年11月時点で何故か周辺より深かった(等深線が陸に入り込んでいる)地域であり、これが埋め戻されたためと考えてよいだろう。

また、南防波堤沖合を見ると、前述した南防波堤の隅角部から沖に伸びる堆積が一切切れて、欠壊部が続いている。この事実から考えて、南海岸への排土の効果は、この時点では北海岸にまでは及んでいないものと考えられる。

このように、この時点での地形変化の主たる原因は、南防波堤の伸長にあり、海底地形変化の機構は前節に述べた通りであるものと考えて良い。

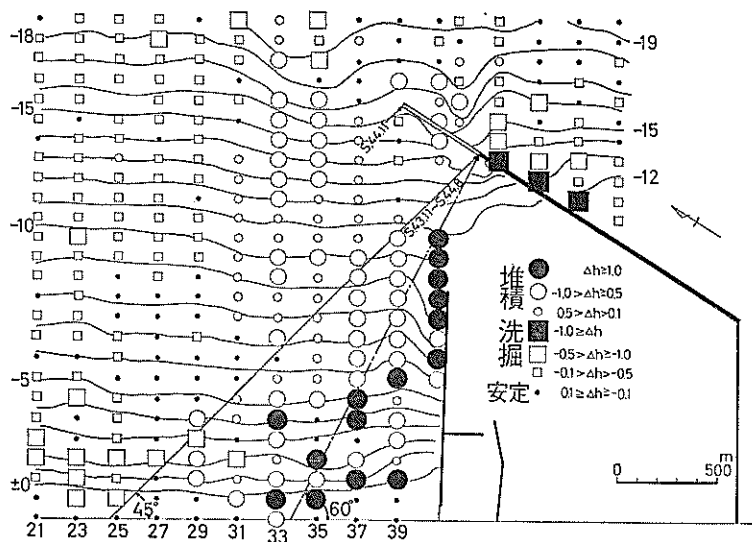


図-56 北海岸における水深差の分布 (1)

45年以降になると、地形変化に対する南防波堤の効果はますます強くなり、北海岸への土砂投棄の影響も現われて来る。このため、北防波堤に近い測線では、特に水深 -10m 以下で著しい堆積傾向を示し、一方、北防波堤から 3km 程度も離れた No. 9 測線の -10m 以浅では欠陥が生じて来る。この間の状況を明らかにするために、図-57 に昭和 44 年 11 月と昭和 48 年 3 月の水深差の分布を示す。これによると、昭和 48 年 2 月まで、北護岸の北端位置附近から沖に向い水深の浅い部分が張

り出し、この期間の海底地形変化に土砂投棄の影響が強かったことが明瞭である。しかし、堆積地域は No. 25 測線附近に止まっており、それ以北ではむしろ欠陥性である。また図に示したように、排土地域が防波堤の遮蔽域にあるかぎり、投棄土砂の沿岸方向への拡がりも、前節で述べた防波堤先端を見通す線と基線のなす角度が 60 度に近い線内にほとんどおさまっていることがわかる。

今試みに図-57 において、護岸法線の延長線より沖に堆積した土量を求めると、 176万 m^3 であった。この間

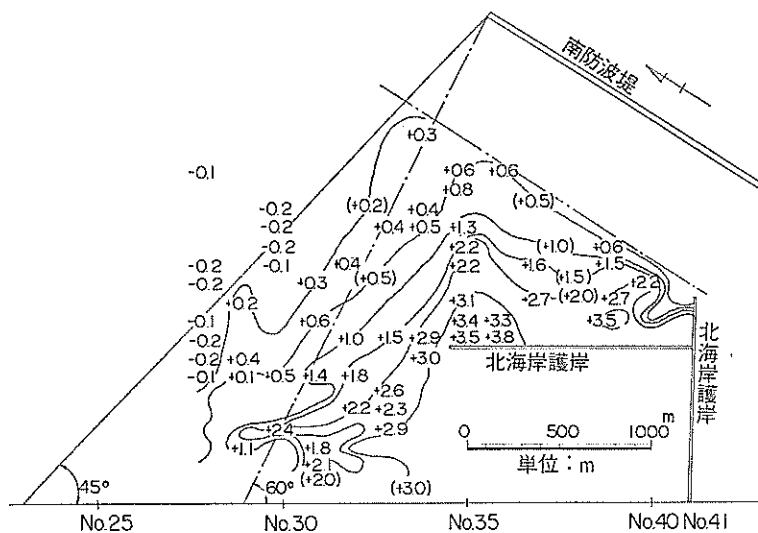


図-57 北海岸における水深差の分布 (2)

の北海岸への投棄土砂量の累計値は、図-15 に示したように約 1,130 万 m³ であるから、堆積量は約 15.6% に相当する。もちろん、北部の欠壊区域からの土砂の移動堆積など、土砂投棄に関係ない堆積量も相当量にのぼるものと予想される。

5.5 鹿島港周辺における土量変化

前節までに述べて来た地形の変化を、土砂量の変化という観点から見ると、図-58 に示す区分分けによって土砂量の変化を計算した。過去の深浅図の測量区域は、港湾工事の進捗に伴って次第に拡大されてきているために、図に示したすべての区間について、全期間の資料が揃っているわけではない。図中の枠のみ示した水深の深い部分についても、一応土量の計算は行なっているが、測量が行なわれるようになって年数が浅いこと、土量の変化が少なく、現段階では測量誤差と照して、資料の有意性が判定し難いことなどのために、本節では議論の対象からはずしている。

5.5.1 南海岸における土量の変化

図-59 に各区域の土量変化を示す。土量変化はある基準深浅図の土量を基に、それからの増減で示されている。基準深浅図としては信頼し得る測量のうち最も古い深浅図を選んだ。zone-I 図中の別枠で示されている部分は、測量範囲の陸側端の境界が異なるために、一つの基準で表わせず、測量範囲が同じもの同志、別々の基準深浅図を選んだために生じたものである。従って、昭和41年と昭和42年の間で、zone-1 の土量変化は連続したものと考えることは出来ない。また、zone-1 では、海岸護岸が完成し、土砂投棄が完了した地域では、それ以降測量が行なわれていないため、その間土量変化はないものと見なしている。この土砂投棄完了の時点の土砂増加量が、I-16~I-19 と漸増しているのは、土量計算 zone が海岸線に平行でなく、南へ行くほど土砂投入前の原地形の水深が深かったためである。

図-59 zone-II によると、5.3 節で述べたように、昭

和45年頃から、特に II-15, 16, 17 の区域で土量が著しく減少し、昭和47年に入って以降再び回復する。顕著な欠壊の現われる時期は、II-16 で最も早く、44年の夏であり、この時点では I-15, 16 への排土が完了し I-17 への排土もほぼ終了して I-18, 19, 20 地区への排土への転換期に当たっている。II-15 地区の欠壊は、II-16 地区より6ヶ月遅れた45年1月から、II-17 地区では更に6ヶ月後の45年度夏から、II-18 地区では46年1月から欠壊が起こり始め、欠壊地区が順次拡大して行く状況がうかがえる。

zone-III においては、南防波堤近傍の III-14, III-15 地区を除いて zone-II が堆積を続けている45年夏頃まで、多少欠壊気味であるが、zone-II が欠壊する45年夏から46年末にかけて堆積を示す。また、II-14, II-15 について見ると、明瞭に欠壊傾向が現われるのは、46年秋以降であり、zone-II の16, 17地区の欠壊が進行した後である。

zone-IV においては、特に IV-12, 13, 14, 15 地区で46年秋に急激に土量が増大しているが、この時点は III-14, 15 地区が急激に欠壊する時点と一致している。

また、同一番号の地区について、zone-I 増加土量と zone-II の増加土量の比を昭和48年3月時点で調べると、15地区で $32 \times 10^4 \text{ m}^3 / 56 \times 10^4 \text{ m}^3 = 0.57$ 、16地区で $98 \times 10^4 / 190 \times 10^4 = 0.515$ 、17地区で $210 \times 10^4 / 127 \times 10^4 = 1.65$ 、18地区で $312 \times 10^4 / 120 \times 10^4 = 2.6$ 、19地区で $345 \times 10^4 / 137 \times 10^4 = 2.51$ と、15, 16地区と17地区以降とで格段の相異がある。これは前述した土砂投棄方法の相異の効果である。

図-60 は、各区の土量変化を各 zone 毎に合計したものを示している。先に述べたように、測量区域が年毎に拡大されて来ているから、当然測量にかかる以前の土量変化は見逃されており、厳密な意味での統計量が求められている訳ではない。

図によると、南海岸における全土量増加量は、48年3月時点で約 2,800 万 m³ に達し、これは南海岸への投棄土砂総量 3,903 万 m³ の約 71% に当たる。各 zone 毎に見ると、zone-I は土砂投棄開始後、順調に土量が増加しているが、zone-II では45年以来土量増加が停滞気味である。zone-II の土量増加が止まると、時を同じくして zone-III の土量が増加し、これが46年秋をピークに減少を始めると、今度は zone-IV の土量が増加し始める。このように投棄土砂の沖への分散は、全期間を通じてゆるやかに累積的に行われるのではなく、段階的

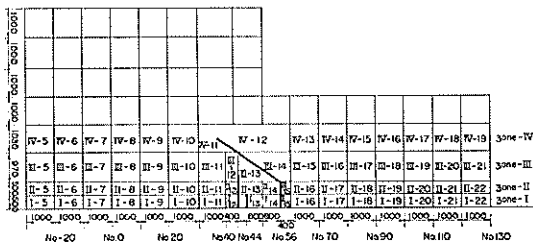


図-58 土量計算区域

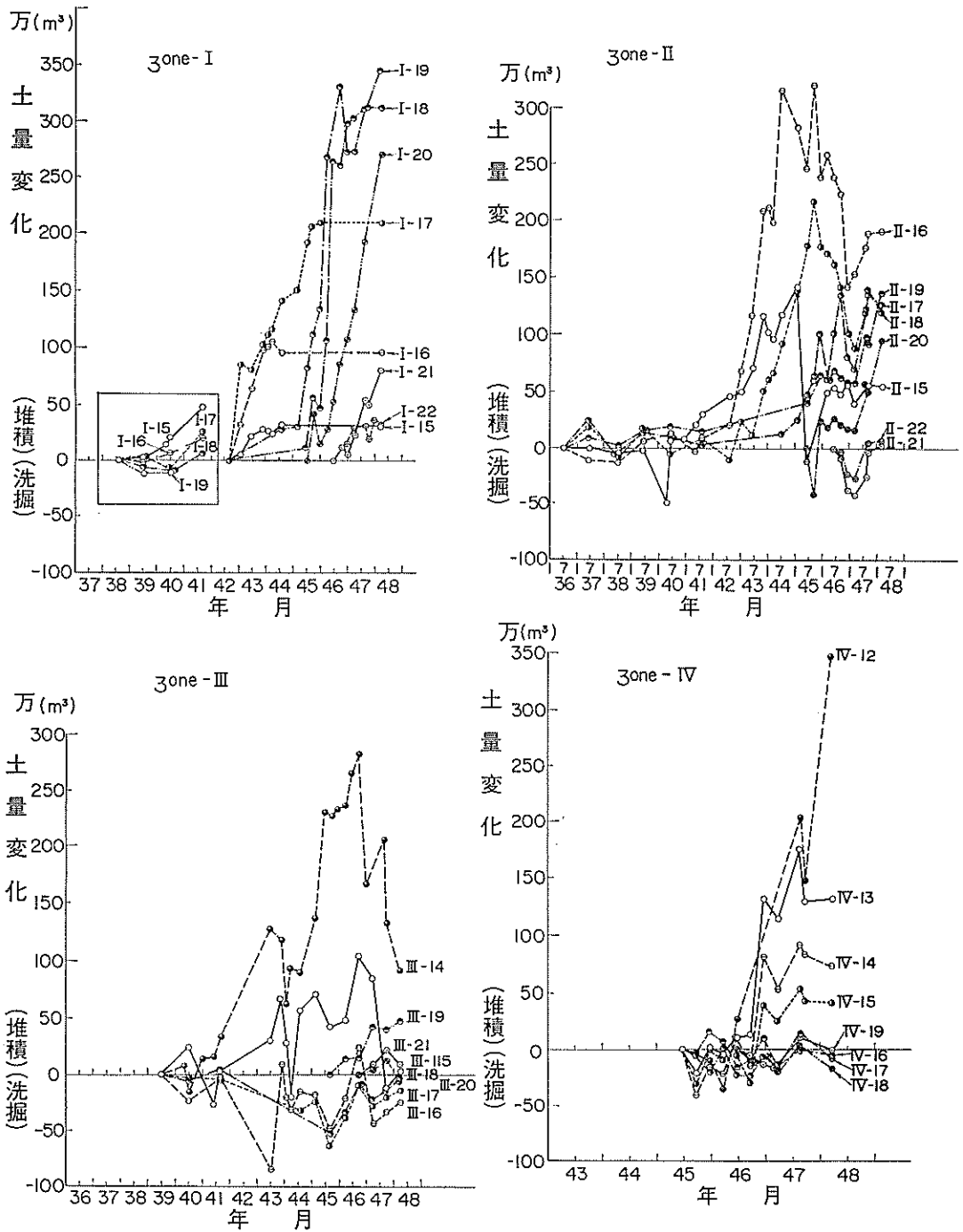


図-59 南海岸における各区域の土量変化

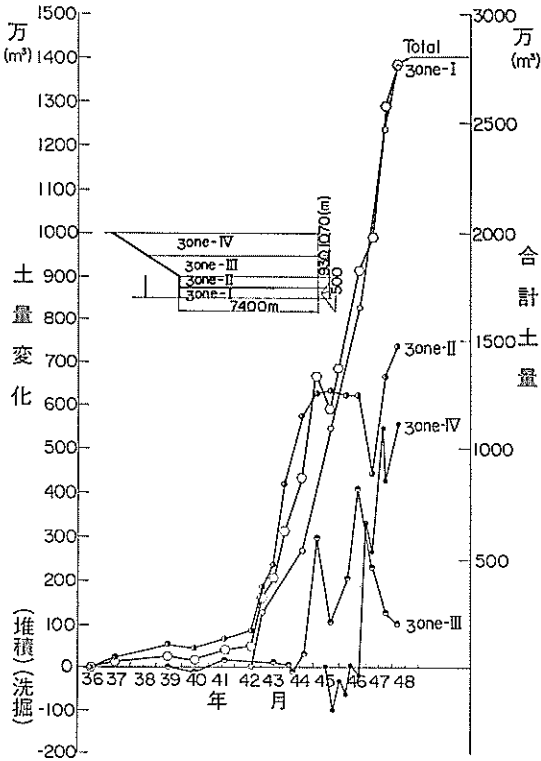


図-60 南海浜における土砂投棄量と残存土砂量の関係

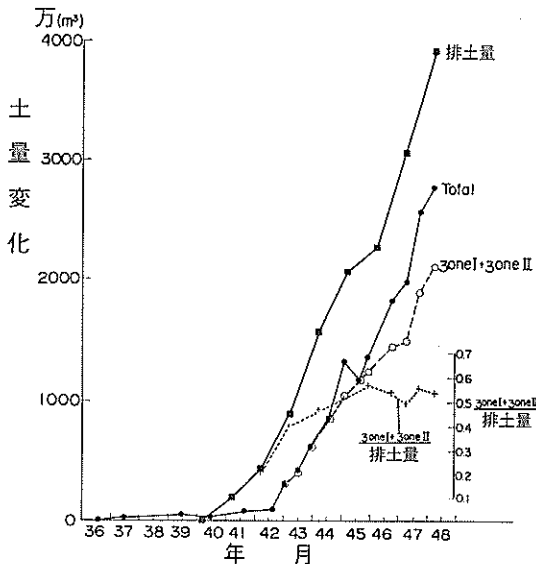


図-61 南海浜における各ゾーンの土量変化

に、一つの土砂集団として動いて行く（沖の堆積は、それ浅い部分の欠壊の結果起こるのであり、岸から沖へ次第に浅くなるのではない）という形で行なわれている。

図-61 は、zone-I と zone-II の合計土量、すなわち、南海岸の離岸潜堤以浅の残存土量と投棄土量との関係を示すものである。48年3月時点で南海岸への全投棄土量 3,903 万 m^3 の約 54% の 2,100 万 m^3 の土砂が浅存し、投棄土量と残存量の比は年は 45 年以来、ほぼ 50% 前後に保たれている。

5.5.2 北海岸における土量変化

図-62 は、北海岸の各区における土量変化を示している。

zone-I 図において、46年初め以降の I-10~12 の急激な土量増加は、土砂投棄の効果である。I-9, 8 区は、48年3月までに各々約 50 万 m^3 にのぼる土砂が流失している。

zone-II 図において特筆すべき事実は、zone-I では見られないけれど、II-10 地区で 44 年夏から 45 年夏にかけて欠壊傾向が見られ、また II-9~5 までの間ではすべて欠壊傾向にあり、北海岸の欠壊がかなり北へ広く及んでいるように思われる。測量区域を更に拡大して、早急に調査する必要がある。

zone-III 図における III-12 および III-11 の土量の減少は、航路浚渫のためである。III-12~III-10 は前述したように近年堆積傾向を持つことが予想されるが、この航路浚渫のために残念ながら明瞭な関係は見られない。III-10 地区が 46 年以来年間 20 万 m^3 程度の堆積を示し、III-12 地区が浚渫開始前の 43~45 年にかけて、年間約 30 万 m^3 の堆積を示している事実から考えて、III-12, III-11 および IV-11 地区への堆積量は、合計年間 50~70 万 m^3 程度と考えられる。これらの地区の面積と航路部分の面積比から考えて、この堆積土量の 1/4 程度が航路を埋める可能性がある。北護岸が延長されて行くと、汀線部からの土砂供給が減る訳であるから、堆積土量は減少することが考えられ、今後、前述した埋没予想量が増加する可能性は少ない。

zone-IV 図によれば、航路浚渫にかかる IV-10, 11 地区および IV-9 区を除き、他の地区では 47 年秋まで土量が増加する傾向があり、増加量は各区 30~35 万 m^3 にものぼっている。しかし、47 年秋から 48 年にかけて土砂量が急減している。この土量急減の原因、およびそれが一時的なものがあるいは継続的なものは明らかでない。

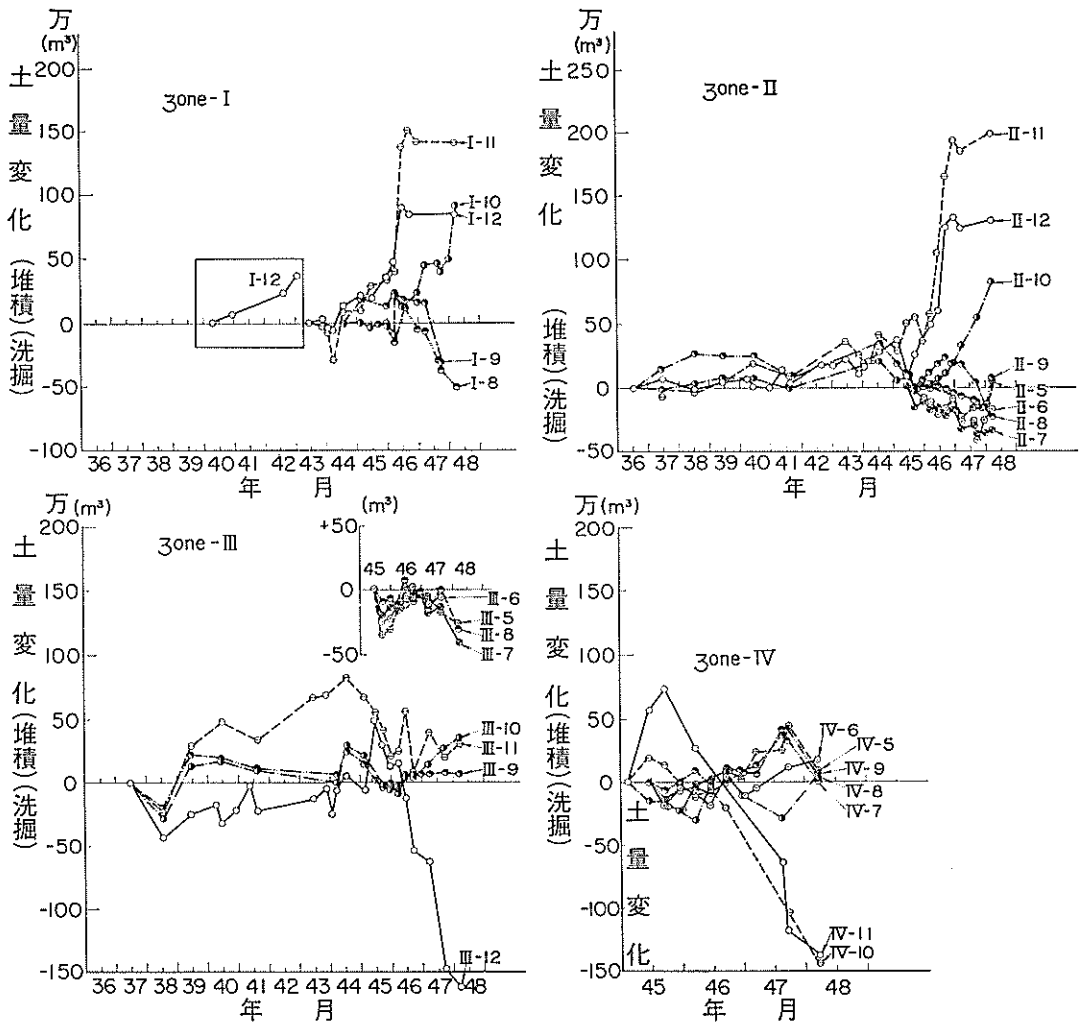


図-62 北海岸における各区域の土量変化

図-63 は、各 zone の合計土量の変化を、また 図-64 は、I-12, 11, 10 地区および II-12, 11, 10 地区の合計土量、すなわち投棄土砂のうち用地造成地区に残存している土量と投棄土砂量の関係を示す。

図-64 を見ると、45年度から本格的土砂投棄が行なわれる時点で、自然堆積および42年度の土砂投棄のために残存土量はすでに 100 万 m^3 に達しているから、これを差引き、また投棄土砂量についても42年度の 50 万 m^3 を差引いて、残存土砂量比を求めると図中+印の通りである。すなわち、45年から46年夏までの間はかなり高い残存率を示すが、それ以降は 50~60% に低下している。

これは、先行された護岸延長に対して投棄土砂量が少ない間は、土砂の流失は少ないが、護岸の陸側で陸地が拡がり、汀線が護岸の北端に近づくると土砂の残存率が急減し、図-57 に示したように、土砂が護岸先端から流失してしまうためである。

南海岸を併せて、排砂土量は、4,960 万 m^3 であり、計算区域の土量増分は 3,485 万 m^3 である。したがってその差 1,475 万 m^3 のうち、港内への舞いもどり土量、港口部の淤滞量を差引いたものは、土量計算区域外へ流失したことになる。その他、事前調査によると相当量の自然堆砂が予想されており、(南海岸へ各々 50 万 m^3 /年

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

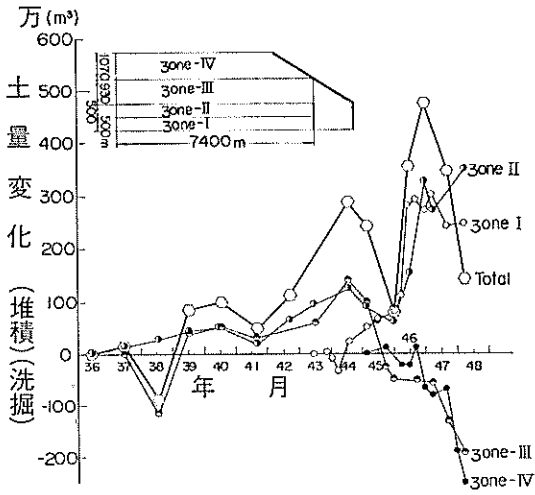


図-63 北海岸における各ゾーンの土量変化

と推定されていた⁶⁾土砂の収支を考えるに当たっては、これも考慮せねばならない。しかし、自然堆砂量の推定は全く不可能である。

5.6 防波堤周辺での局所洗掘

5.6.1 顕著な局所洗掘の発生箇所とその事例

鹿島港において、防波堤周辺での顕著な局所洗掘が発生する箇所は、次の通りである。

- イ) 防波堤々頭部 (特に堤頭部が水深 -6m 程度以浅にあるとき著しい)
- ロ) 防波堤直部 (海岸線に直角に伸びる部分) の周辺 (特に防波堤が沿岸砂州を横切る点附近で著しい)
- ハ) 先行マウンドおよび潜堤の周辺

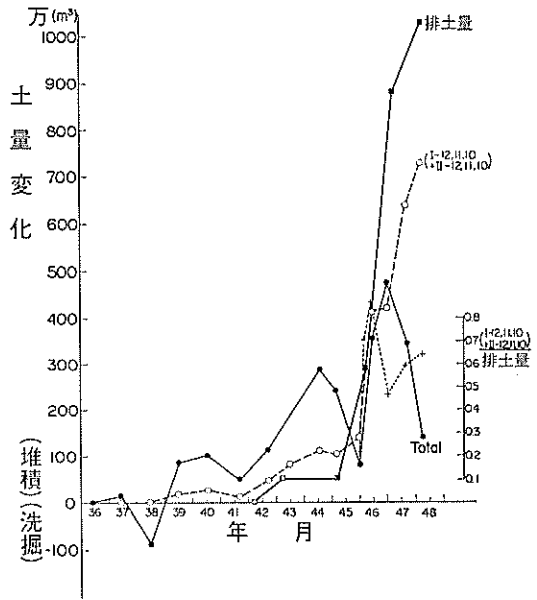


図-64 北海岸における土砂投棄量と残存土砂量の関係

二) 防波堤を伸長する過程で、一時点に生じた狭い開口部の周辺

図-65 は、これら局所洗掘の事例を示すものである。

左図は昭和40年6,7月の船溜防波堤周辺の状況を示すものである。顕著な洗掘が3箇所に見られる。第一は、船溜南防波堤の堤頭部から港外側にかけて生ずるもので、洗掘穴の最大水深は7.6mにも達する。第二は、北防波堤と船溜東防波堤の隅角部に生ずる。第三は、北防波堤

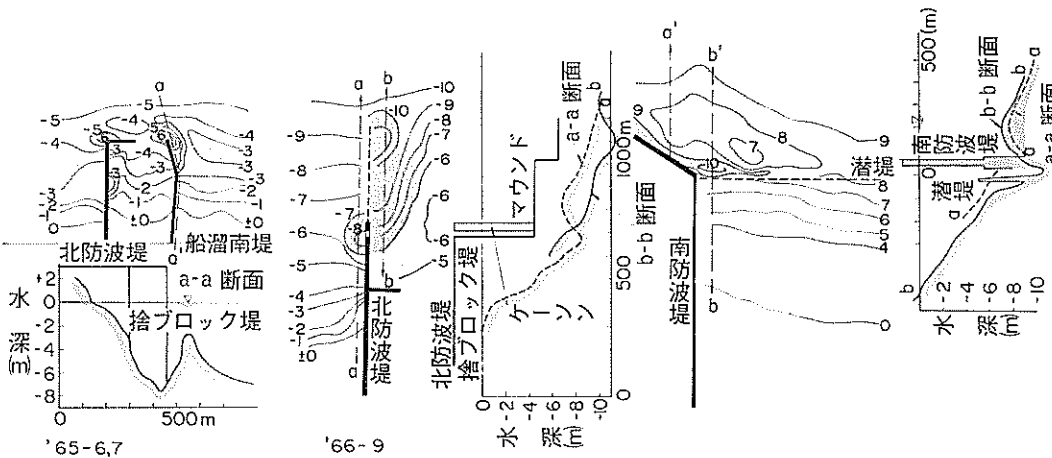


図-65 防波堤周辺におけ洗掘の事例

の港内側に見られる。この洗掘は、防波堤の空洞部を通過する波に起因するものであろう。北防波堤では捨石をアスファルトで固結するアスファルトマスチック工法が採られていた。アスファルトマスチック工法の採られている区間では、基礎部の捨石が沈下すると、上部の捨石のみが残って空洞が生じやすかった。

中央の図は昭和41年北防波堤における状況である。この時期ケーソン堤部分のマウンドのみが先行されており、この部分の港内側に著しい洗掘が生じている。先行マウンドは、時として洗掘による手戻りを受けることがあるが、この場合の洗掘発生箇所は、常に港内側である。ケーソン掘付け済みの部分の先端港外側に生じている洗掘は、堤頭部付近であると共に、捨石部をケーソン部の

間に空隙が存在したことの効果も見のがせない。

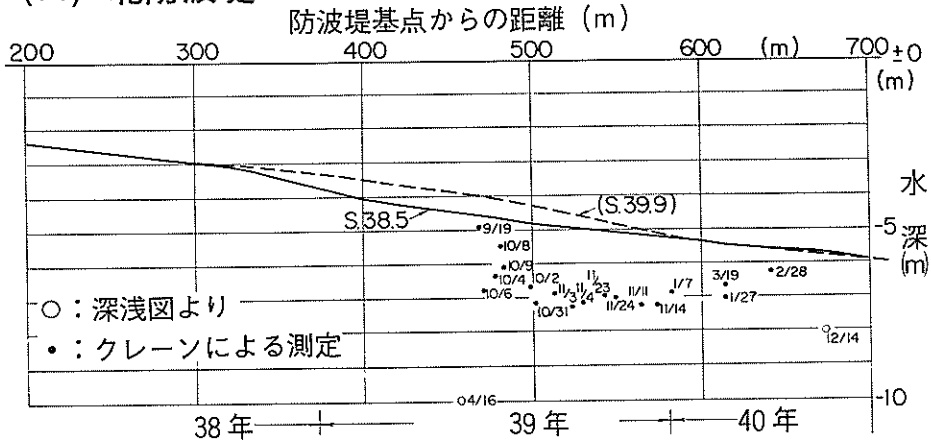
右図は、南防波堤隅角部から斜部にかけての洗掘である。隅角部から海岸に平行方向に潜堤が築造されており、洗掘穴はこの方向に伸びている。

5.6.2 防波堤々部における洗掘

図-66 は、昭和38年から41年にかけて、南北防波堤の伸長過程で測定された堤頭部洗掘穴の最深水深を示したものである。測定は防波堤上にクレーン車を置き、その「リップ」からレッドを降ろして行なわれた。図中には、洗掘測定期に近い時期の深淺図に基づいて、防波堤から100m程度離れた測線の海底断面が示されている。

図-66 から、洗掘深を読み取り、各々洗掘測定前 0~5日、6~10日および 11~15日の間に生じた最大の有義波

(A) 北防波堤



(B) 南防波堤

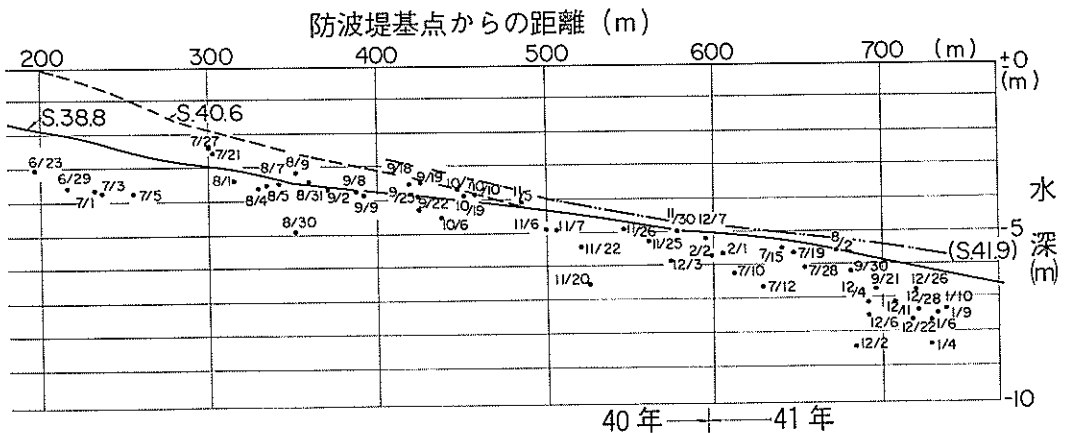


図-66 防波堤々頭部の洗掘深の測定結果

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

表-5 南, 北両防波堤々頭部の洗掘深と波浪条件

北防波堤

No.	測定年月日	洗掘穴の 最大水深 (m)	自然状態 での水深 (m)	洗掘深 (m)	波				浪		
					5日前まで		10日前まで		15日前まで		
					H (m)	T (sec)	H (m)	T (sec)	H (m)	T (sec)	
1	S38.12.15	5.0	3.1	1.9	1.31	9.9	1.34	11.1	*1.90	6.9	S38.5基準
2	"	5.6	3.4	2.2	1.31	9.9	1.34	11.1	1.90	6.9	S38.5 "
3	S39. 9.19	4.9	4.0	0.9	*1.06	6.7	1.08	9.1	2.02	6.6	S39.9 "
4	10. 2	6.6	4.2	2.4	*2.74	7.5	3.16	10.4	1.48	7.0	"
5	10. 4	7.1	4.2	2.9	*3.01	10.3	2.41	8.3	4.41	13.2	"
6	10. 6	6.4	4.1	2.3	2.03	10.4	*3.16	10.4	2.18	6.4	"
7	10. 8	6.8	4.0	2.8	2.03	10.4	2.74	7.5	3.16	10.4	"
8	10, 9	5.5	4.1	1.4	*4.41	13.2	3.81	7.6	1.17	6.7	"
9	10.31	6.0	4.1	1.9	*3.01	10.3	2.41	8.3	4.41	13.2	"
10	11. 3	6.8	4.4	2.4	*3.01	10.3	2.75	9.8	2.41	8.3	"
11	11. 4	7.1	4.6	2.5	*2.53	9.3	3.01	10.3	2.41	8.3	"
12	11.11	7.2	5.0	2.2	欠	欠	1.74	8.9	*3.01	10.3	"
13	11.14	7.2	5.1	2.1	欠	欠	1.21	8.2	*2.53	9.3	"
14	11.23	6.9	4.8	2.1	1.15	9.2	*2.95	10.8	欠	欠	"
15	11.24	7.0	4.9	2.1	1.11	8.7	*2.95	10.8	欠	欠	"
16	1. 7	6.9	5.3	1.6	*2.25	9.9	3.34	7.7	2.49	11.4	"
17	1.27	7.0	5.5	1.5	*1.96	11.0	2.12	10.2	1.66	11.5	"
18	2.28	6.2	5.6	0.6	欠	欠	*2.12	10.2	1.66	11.5	"
19	3.19	6.7	5.4	1.3	欠	欠	*2.12	10.2	1.66	11.5	"
20	12.14	8.0	5.8	2.2	*3.69	11.0	0.60	10.3	1.46	11.2	"

注 1 自然状態での水深は北防波堤について, S38.9, S39.9, 南防波堤について S38.8, S40.6 および 41.9月の測量のうち, 洗掘測定日に最も近い測量から採った。

注 2 波は洗掘測定の日, 5日, 10日, 15日前までの最大有義波である。

南防波堤

No.	測定年月日	洗掘穴の 最大水深 (m)	自然状態 での水深 (m)	洗掘深 (m)	波				浪		
					5日前まで		10日前まで		15日前まで		
					H (m)	T (sec)	H (m)	T (sec)	H (m)	T (sec)	
21	S40. 6.23	3.0	0	3.0	0.82	9.5	*3.56	12.2	1.44	9.7	
22	6.29	3.6	0.3	3.3	1.33	11.5	0.78	10.4	*3.56	12.2	
23	7. 1	3.7	0.6	3.1	1.30	11.7	1.33	11.5	1.72	9.7	
24	7. 3	3.8	0.7	3.1	0.94	9.5	1.33	11.5	0.82	9.5	
25	7. 5	3.8	1.1	2.7	0.89	8.6	1.33	11.5	0.89	10.7	
26	7.21	2.6	1.9	0.7	*1.30	7.7	1.11	10.6	0.96	7.3	
27	7.27	2.4	1.9	0.5	*1.77	8.7	1.83	7.7	1.11	10.6	
28	8. 1	3.4	2.1	1.3	0.85	10.8	*1.77	8.7	1.83	7.7	
29	8. 4	3.6	2.3	1.3	0.72	10.4	1.07	9.6	*1.83	7.7	
30	8. 5	3.5	2.4	1.1	0.72	10.4	0.85	10.8	*1.83	7.7	

表-5 南北両防波堤々頭部の洗掘と波浪条件との関係

No.	測定年月日	洗掘穴の 最大水深 (m)	自然状態 での水深 (m)	洗掘深 (m)	波				浪	
					5日前まで		10日前まで		15日前まで	
					H (m)	T (sec)	H (m)	T (sec)	H (m)	T (sec)
31	S40. 8. 7	3.5	2.5	1.0	0.84	12.7	0.57	11.9	*1.07	9.6
32	8. 9	3.2	2.6	0.6	*0.84	12.7	0.72	10.4	1.07	9.6
33	8.30	4.9	2.6	2.3	*3.19	8.6	3.24	7.3	1.38	14.1
34	8.31	3.5	2.7	0.8	欠	欠	*2.08	11.3	1.38	14.1
35	9. 2	3.6	2.8	0.8	*3.25	12.5	欠	欠	2.08	11.3
36	9. 8	3.7	3.0	0.7	*1.74	11.8	3.25	12.5	欠	欠
37	9. 9	3.9	3.0	0.9	*1.74	11.8	3.25	12.5	欠	欠
38	9.18	3.5	3.3	0.2	欠	欠	*0.78	10.9	1.74	11.8
39	9.19	3.5	3.4	0.1	欠	欠	*0.78	10.9	1.74	11.8
40	9.22	4.3	3.4	0.9	0.52	11.0	欠	欠	0.71	13.0
41	9.26	3.9	3.4	0.5	*1.67	9.5	欠	欠	0.68	7.0
41'	10. 6	4.5	3.5	0	*6.44	12.5	3.43	10.1	1.67	9.5
42	10. 7	3.6	3.6	0.1	*6.44	12.5	3.14	12.2	3.43	10.1
43	10. 9	3.9	3.8	0	*6.01	13.8	6.44	12.5	3.43	10.1
44	10.10	3.9	3.9	1.0	*4.51	13.8	6.44	12.5	3.43	10.1
45	11. 5	4.1	4.1	0						
46	11. 6	4.9	4.4	0.5	*0.84	9.2	1.39	10.9	1.56	9.1
47	11. 7	5.0	4.4	0.6	*0.64	11.3	1.39	10.9	1.56	9.1
48	11.20	6.6	4.6	2.0	*2.95	10.8	欠	欠	0.59	9.0
49	11.22	5.5	4.5	1.0	欠	欠	欠	欠	欠	欠
50	11.25	5.3	4.8	0.5	欠	欠	欠	欠	欠	欠
51	11.26	5.0	4.7	0.3	欠	欠	欠	欠	欠	欠
52	11.30	5.0	5.0	0	欠	欠	欠	欠	欠	欠
53	12. 3	5.9	5.0	0.9	*1.17	10.0	欠	欠	欠	欠
54	12. 7	5.2	5.0	0.2	*1.39	8.4	欠	欠	欠	欠
55	S41. 2. 1	5.7	4.9	0.8	欠	欠	欠	欠	欠	欠
56	2. 2	5.7	4.8	0.9	欠	欠	欠	欠	欠	欠
57	7.10	6.2	4.9	1.3	0.24	8.5	0.85	9.3	*1.37	11.6
58	7.12	6.6	5.0	1.6	0.22	8.3	0.75	7.7	1.37	11.6
59	7.15	5.5	5.1	0.4	*0.49	12.5	0.24	8.5	0.85	11.6
60	7.19	5.7	5.1	0.6	*0.73	11.6	0.49	12.7	0.50	10.0
61	7.28	6.1	5.2	0.9	欠	欠	欠	欠	欠	欠
62	8. 2	5.6	5.3	0.3	欠	欠	欠	欠	欠	欠
63	9.21	6.8	5.4	1.4	*2.34	8.4	1.04	7.3	1.42	8.1
64	9.30	6.2	5.3	0.9	0.64	10.0	*1.22	12.9	2.34	8.4
65	12. 2	8.5	5.3	3.2	欠	欠	0.37	12.5	0.51	8.2
66	12. 4	7.1	5.4	1.7	欠	欠	欠	欠	欠	欠
67	12. 6	7.5	5.4	2.1	欠	欠	欠	欠	0.42	10.7
68	12.11	7.1	5.5	1.6	欠	欠	欠	欠	欠	欠

S41.9

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

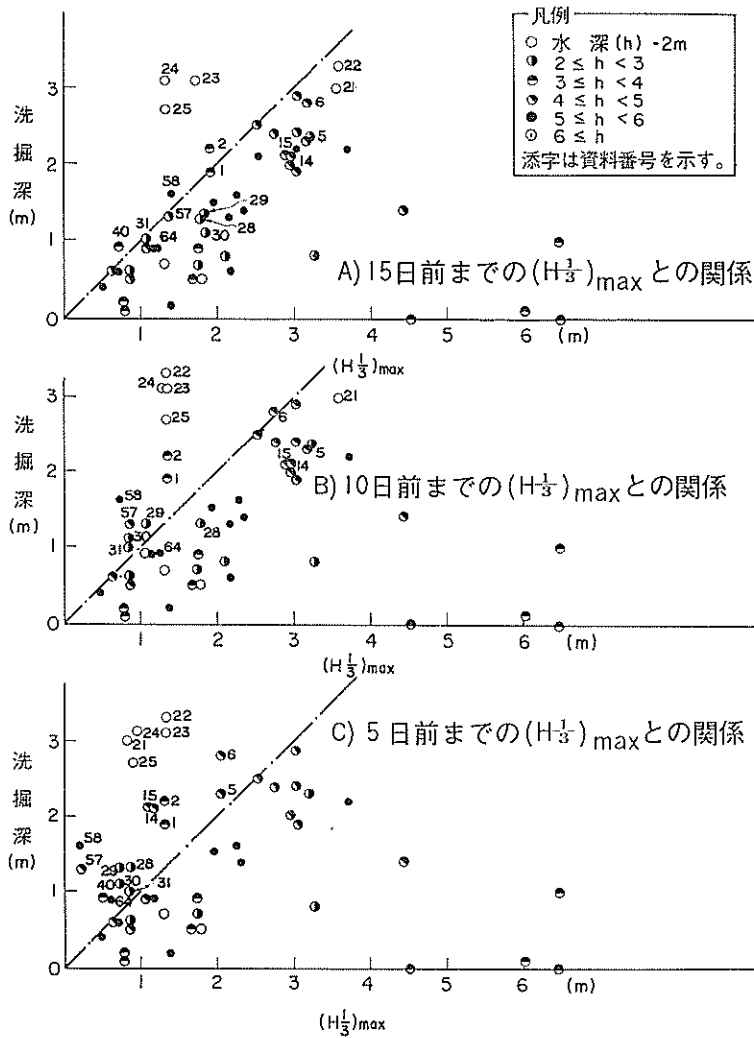


図-68 防波堤々頭部の洗掘深と波高との関係

波の波高と周期と共に示したのが表-5である。洗掘深としては、測定された洗掘穴の最大水深と、基線からの距離が洗掘測定の同一な位置における深図から読取った断面水深との差を取った。

表-5に基づいて、洗掘深と波高の関係を示すと、図-67の通りである。図 a), b), c) の横軸には、それぞれ洗掘測定前5日、10日および15日前までに生じた波高のうち、洗掘深の値以上ものの最小値を採っている。ただし、洗掘測定前5、10および15日までに洗掘深の値を越えるものがない場合には、波高の最大値を採った。例えば、データ28の場合には、a) 図では波高0.85m、b) 図では波高1.77m、c) 図では、洗掘深の値以上の波高

1.77m および 1.83m のうち小さい方の 1.77m を採っている。

図-67(c)に示すように、洗掘測定日前5日間の波と波掘深の間には、明瞭な関係は見出せない。すなわち、洗掘測定前5日間の波が小さくても、洗掘深は大きいし、逆に波高が大きくても洗掘深は小さい場合が多い。

しかしながら、b), a) 図に見るように洗掘測定日より10日、あるいは15日と振り返って波を採って行くと、図中の点は次第に図中の(洗掘深=波高)直線より下に分布するようになる。すなわち、洗掘測定日前15日までの波を考えると、洗掘深は、来襲波の波高を越えることがないことを意味している。

洗掘測定日の直前の波が小さくても、洗掘深が深くなる理由は、小さい波による洗掘穴の埋戻しが意外と遅く、洗掘測定日よりかなり前の大きい波による洗掘の跡が残存するためであろうと考えられる。波のデーターを考える範囲を、10日前、あるいは15日前とずらして、b)あるいはa)図を示したのはそのためである。しかしながら、波のデーターを考える範囲を洗掘測定日よりさかのぼればのぼるほど、大きい波の発生している確率は高くなるわけであるから、データーが図中で右につれ、洗掘深=波高の直線より下に集まるのは当然である。したがって、どこまでさかのぼって波を考えるかは、現状の海底地形変化に関する知識の下では、かなり恣意的な判断の問題であり、著者等は半月程度までと考えている。

波高が大きくても洗掘深が小さい理由は、砕波帯内の現象が一般に問題とする地点の位置（ここでは堤頭部）と、砕波点との相対位置に強く関係することによる（波力、越波などについても同様である）ものと思われる。図-67(a)において、洗掘が最大になるのは、水深-4~5m、波高3m程度 ($h/H=1.33\sim 1.66$) の場合であって、丁度堤頭部が砕波の打ち込み点と一致する場合である。また波高が4m程度、堤頭部水深が-3~-4m ($h/H=0.25\sim 1.0$) の場合には、洗掘深は急減しているが、こうした傾向は護岸に対する越波量の場合にも見られる。また図-66(a)中に水深-2m以下で大きな洗掘深が生じているのは、この附近が波の最終砕波点と一致するためであろうと思われる。

5.6.3 防波堤測面での洗掘

図-68は、深浅図より読み取った洗掘深（洗掘穴の最

大水深とその周辺水深の差）と洗掘穴の周辺水深との関係を示すものである。図中白丸は防波堤直部伸長過程の資料であり、黒丸は南防波堤の曲部沿いの資料である。南防波堤曲部の水深は、防波堤施工前の自然状態で-7~-8mであった。したがって、水深-7m以下の黒丸は、南海岸に排土が始まって防波堤屈曲部附近が埋没され始めた後のデータである。また、水深-7~-8m附近のデータには、曲部の影響が強く含まれていると考えて良い。

これによると、白丸で示した直部の防波堤側面洗掘は、水深-2m~-3m程度にピークを持つ山型の分布をなす、一方、黒丸で示した曲部では、隅角部附近で最も洗掘が大きく、防波堤の先端に向かって次第に洗掘深が減少する。また、南海岸への排土によって隅角部附近の水深が減ると、洗掘深は減じている。

洗掘深が最大となる水深は浅くても直部、曲部共に洗掘深は急激に減少するが、以深での洗掘深減少の度合は、それに比べて小さい。特に曲部では、水深の増加に伴う洗掘深の減少の度合は小さい。

5.6.4 南防波堤曲部マウンドの変化

昭和44年度、南防波堤曲部のマウンド形状変化が測定されている。この時点において施工済の南防波堤曲部の設計断面形状は、屈曲部から700mの間は附録図-Ipに示すとおり、屈曲部の洗掘を予想して、マウンドの法先に広い肩幅で捨ブロック（方塊18.4ton）し、ブロック底面には洗掘防止用ビニールマットが敷設されている。屈曲点から700m以上離れると、附録図-Iqに示すとおり、捨ブロック被覆の一般的な捨石マウンドである。

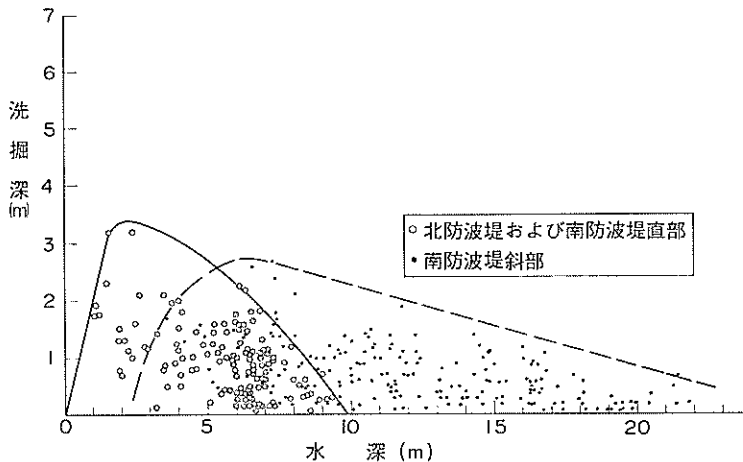


図-68 防波堤側面の洗掘深と水深との関係

鹿島港建設に伴う海底地形変化について

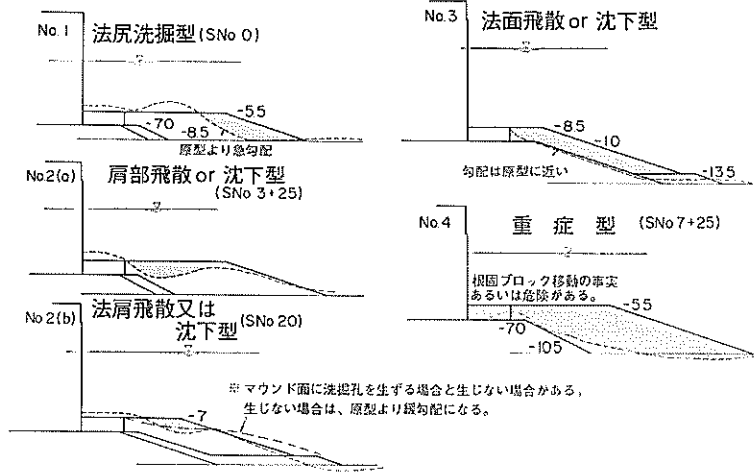


図-69 防波堤マウンド洗掘のタイプと事例

測定されたマウンド形状と設計断面を比べると、曲部全長にわたって、大部分の断面でマウンド形状は設計断面に比べて何らかの変形を受け、相当規模のマウンド洗掘を受けている。このマウンドの洗掘形状は、図-69 にその例を示すように典型的な型に分類し得る。すなわち
イ) 法尻洗掘型——No. 1 に示すようにマウンドの法尻部分のみが洗掘されるもの、洗掘の結果法尻のマウンド勾配は、設計断面に比べて急勾配になっているのが特徴である。この型の洗掘は、マウンド法尻部の海底面の洗掘に起因するものと思われる。

ロ) 法肩部飛散または沈下型——No. 2(a), No. 2(b) に示すように、マウンド肩部が洗掘された型である。法尻部の洗掘は小さい。この型の変形はブロックの重量不足、あるいはマウンド下の局部的砂の吸い出し沈下に起因するものと思われる。
ハ) 法面飛散または沈下型——マウンドの法面が一面に洗掘される場合で、洗掘によって生ずるマウンド勾配は設計断面にほぼ近い。この型の洗掘は、法面での捨石重量の不足あるいはマウンド底面砂の吸い出しによる沈下に起因するものと思われる。

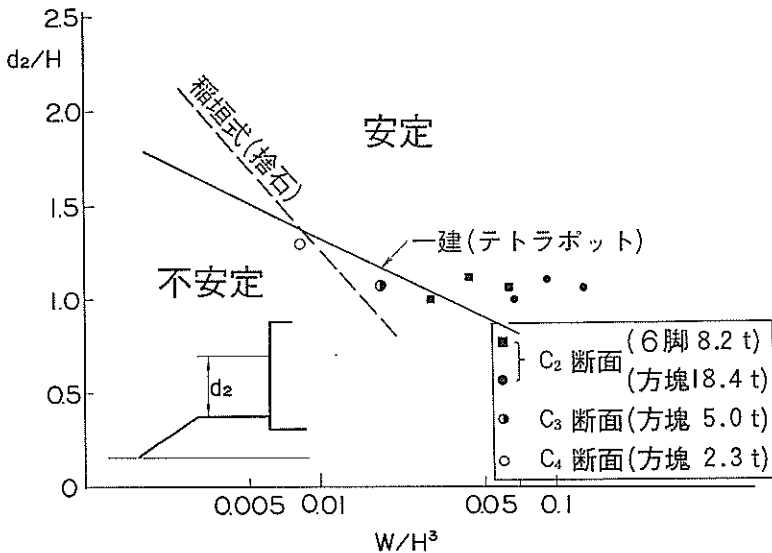


図-70 防波堤マウンド被覆ブロックの安定性

表-6 鹿島港南防波堤マウンド被覆ブロックの安定

区間	水深 h (m)	波高 $(H_{1/3})_{max}$ (m)	マウンドの天端の水深 d_2 (m)	ブロック重量 W (ton)	ブロック種別	W/H^3	d_2/H	
C ₂	-8.0	5.2	-5.5	8.24	天脚	0.0586	1.06	} C ₂ 区岸側端
	-9.0	5.82	-6.5	8.24	"	0.0418	1.12	
	-11.5	6.5	-5.5	8.24	"	0.0300	0.85	C ₂ 区沖側端
	-8.0	5.2	-5.5	18.4	方塊	0.1309	1.06	} C ₂ 区岸側端
	-9.0	5.82	-6.5	18.4	"	0.0933	1.12	
	-11.5	6.5	-5.5	18.4	"	0.0670	0.85	C ₂ 区沖側端
C ₃	-11.5	6.5	-7.0	5.0	"	0.0182	1.08	
C ₄	-14.0	6.5	-8.5	2.3	"	0.0084	1.31	

* 計算上の仮定

1. 各区の水深はほぼ '64~'66 の平均水深 (図-71 の破線) からとる
2. 波高は $H=6.5\text{m}$ とする。ただし $0.65h < 6.5\text{m}$ の場合は $0.65h$ とする。
3. $H < 0.65h$ の場合には、高潮位と低潮位について check する。

ニ) 重症洗掘型——洗掘が大きくて上記の分類が不可能な型がある。この中の何割かについては、根固めブロックの移動が認められる。

これらのマウンド洗掘型の分類において述べてきたように、マウンド洗掘の要因には現象的に次の3つが考えられる。すなわち、① マウンド被覆石の重量不足、② マウンド法先海底面の洗掘に伴うマウンドの崩壊、および③ マウンド底面の海底砂の吸出しによる沈下である。

そこで第1に、南防波堤曲部の各設計断面について、被覆石の波力に対する安定性を検討するために 図-70 を

示した。図では横軸に被覆石の重量 W と、最大有義波高 H の3乗の比 W/H^3 が、縦軸には、マウンド肩部の水深 d_2 と H との比が取られており、表-6 に示した各断面の条件がプロットされている。図中に示した破線と実線は、各々、稲垣等¹³⁾の被覆捨石の所覆重量の提案、およびテトラポットに対する第一港湾建設局の実験¹⁴⁾ (一建の実験ではマウンド被覆層の法尻水深 d_1 で示されているので、データーを用いて描き直してある) 結果による安定限界を示している。捨石よりもテトラポットの方が相互のからみ合せが良く安定であろうとする既存の考え方からすると、板垣式と一建の実験値は必ずしも整

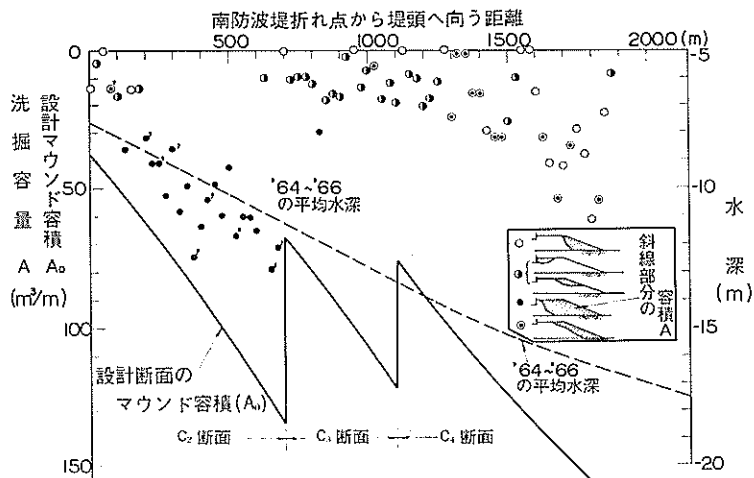


図-71 防波堤曲部に沿うマウンドの洗掘量の分布

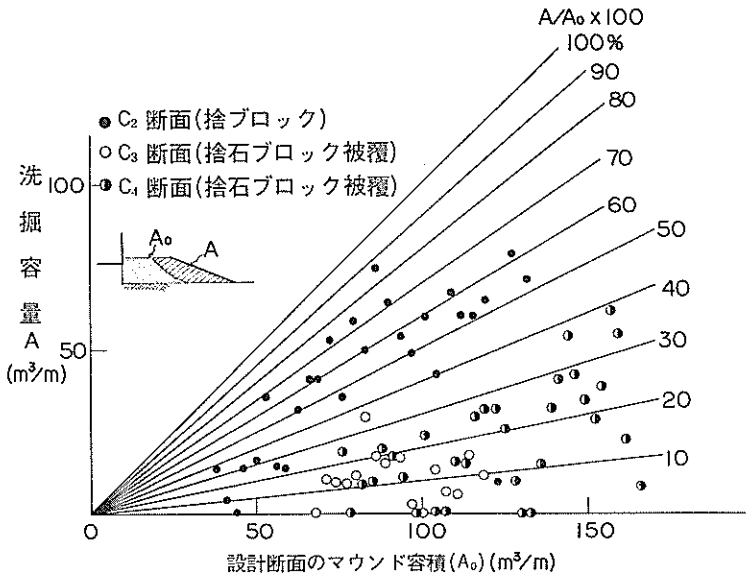


図-72 マウンド洗掘量とマウンド容量との関係

合性がなく、現段階ではブロック安定の条件が明確ではないけれども、この結果から、 C_4 断面の被覆石重量は不足気味であり、逆に C_2 断面では、ほぼ被覆重量は波力に対して十分な重量を持っていたものと考えることが出来る。

さて、図-71 は南防波堤曲部に沿うマウンドの洗掘状況を示している。図の横軸は南防波堤屈曲部から南防波堤曲部に沿って堤部に向かって測った距離であり、縦軸は任意測線におけるマウンドの設計断面積と洗掘された後の断面積の差、すなわち単位延長当りの洗掘断面積を示している。また、各データは、前述した洗掘型の分類に縦って区別されている。さらに図中には、南防波堤沿いのマウンドの法先水深および堤体表面より沖側のマウンド設計断面積が各々実線および破線で示されている。

これによると、 C_2 区では、マウンド洗掘が深刻であり、洗掘が根固ブロックにまで影響を与えるほどの状況にまで達している（図中・印を付した断面は根固ブロックの移動の認められるものを示す）。洗掘量は水深および設計マウンドの容量の増加に従って増加の傾向を示す。

C_3 断面では、法肩あるいは肩部の法掘型に属する洗掘が多いが、洗掘量は小さく、洗掘量は C_2 区あるいは後述の C_4 区と異なりマウンド容量の増加に無関係である。

C_4 区では、法面飛散型が支配的である。洗掘量は C_2 区同様にマウンド容量の増大に伴って増加する傾向をも

つ。

図-72 は、マウンドの設計断面の容量 A_0 と洗掘量 A の相関を示すものである。図中に示した放射線は、マウンドの被害率すなわち A/A_0 の値を百分率で示したものである。これによって明らかなように、 C_2 区および C_4 区ではデータのバラ付きは大きい、被害率がほぼ一定値に保たれているから設計マウンド断面積（マウンド天端高が一定であるからマウンド高と読み代えて良い）の増大と共にマウンドの被害量が大きくなることがわかる。 C_2 区での被害率は 50~80%、 C_4 区被害率は 10~30% 程度である。

前述した被覆石重量の検討結果から、 C_2 区の被覆石重量は波力に対して十分であったから、 C_2 区のマウンド被害は主として海底面の洗掘あるいは吸い出しによるものと看做して良い。また C_2 区と C_3 区のマウンド洗掘量の差は海底洗掘あるいは吸い出しに対して、ビニールマット上にブロックを直接投入した C_2 区が、1m 厚さの捨石の下層上にブロックを投入した C_4 区に比べて、相当に弱いことを物語っている。 C_4 区については、前述した防波堤マウンド法先周辺における洗掘量の分布（図-68 参照）およびマウンドの構造から考えて、 C_3 区以上に法先の海底洗掘が著しく現われるとは考えられず、したがって C_4 区の洗掘の大半は波力に対する重量不足に起因するものと考えられる。

C_2 区の海底の洗掘および吸出しによるマウンド洗掘、

C₄ 区における被覆石重量不足共に、マウンド被害率 A/A_0 が一定値に保たれ、マウンド高の増大と共に不安定になる事実は、防波堤設計上きわめて興味深い。一般論として、マウンドのような塊状部材を積み上げた構造物にあって、積み高が高い程、部分的破壊の形勢が大きくおよぶことは、直感的に理解出来る。しかし、その機構の詳細については未知な点が多い。

6. 結 論

以上、鹿島港建設に伴う地形変化について述べてきた。述べられてきた諸々の事象が、他の地域での港湾建設においても共通に生じし得るものであるか否かは、工学的に重要な問題があるけれども、現時点では未だ明らかにし得ないものが多い。このような意味で、本報告は結論を述べ得る性格のものではない。しかし、大規模砂浜港の建設において起こり得る一つの事例の提示として、今後の工事施工上十分参考になり得る多数の事項を含んでいるものと考え、これらの事項の主要なものを列挙すると次の通りである。

イ) 試験堤、北防波堤および南防波堤等の突堤が伸長し始めると、沿岸砂州はある程度沖に張り出し、海に向かって凸形の形状に変化する。

ロ) 突堤が更に延長されると、沿岸砂州が切れて堤頭に明瞭な洗掘が生ずる。この段階での漂砂の機構は、図-21 に示すように、突堤上手では沿岸砂州が突堤先端に向かって伸び下手では砂州が消えるが突堤から遠ざかる。この砂州の谷部に沿って沿岸流が突堤に向かって流れ、突堤基部では沿岸流が弱くなる。この流れは突堤先端から下手に拡散され、このような流れに伴って、突堤の上手基部と堤頭の下手側に堆積が生ずる。

ハ) 突堤の延長が長くなると、突堤側面にも洗掘が現われる。

ニ) 船溜の埋没の土量は、東防波堤が伸長されて船溜が囲われた後に多くなり $1200\text{ m}^3 \sim 1300\text{ m}^3/\text{月}$ 程度に達する。

オ) 船溜の埋没率はうねり性の波で高く、風浪性の波で低い。風浪性の高波ではむしろ欠壊される傾向がある。

ヘ) 北防波堤が伸長されている段階では、その南側の汀線は北防波堤に向かって前進しているが、南防波堤の伸長に伴って沖に正対した孤状をなすようになる。更に、南防波堤の曲部が伸長されると、汀線は南防波堤々頭部を向くようになり、曲部の伸長と共に南防波堤側の汀線は急速に前進し、汀線の円弧の曲率半径は短くなる。

ト) 前項の地形変化は、港内に生ずる循環流に起因する。この流れによって汀線が前項に示す変化をする他、北防波堤に近に水深 $-2 \sim -5\text{ m}$ 附近が侵食され、逆に循環流の中心である港口付近で堆積する。

チ) 港内の航路浚渫の開始される昭和43年末までに、港内は約 250 万 m^3 の埋没を受ける、この埋没は、南海岸への土砂投棄の開始後増加し、蛍光砂調査等からも南海岸からの土砂流入が認められる。

リ) 南海岸への土砂の投入によって、南海浜は拡大されるが、41年から45年までは堆積地域の南への拡大より沖への拡大の方が著しい。しかし、45年以降は、南防波堤寄りから汀線の侵食が拡がり、排土による浜の拡大は、沖方より南方向への拡大が著しくなる。

ヌ) 昭和45年以降起こる汀線の後退は、排土の方法の変化(ポンプ排出から巻き出しへ)、南防波堤曲部の伸長に伴う沿い波の効果に起因するものと思われる。

ル) 土砂の排出に伴って汀線が前進すると水深 $-2 \sim -10\text{ m}$ の間の勾配が次第急になるが、その勾配は最終的には或る一定勾配に漸近し、これ以上に急になることはない。一方、水深 $\pm 0 \sim -2\text{ m}$ の間および水深 -10 m 以深では、汀線変化に伴う勾配変化は起こらない。水深 $\pm 0 \sim -2\text{ m}$ までの勾配が変化しないのは、この水深の勾配が波等の外力に支配されているためであり、 -10 m 以深の勾配が変化しないのは、この地域が直接には排出土砂の影響を受けていないためである。

オ) 水深変化の相関々係を見ると、水深 $\pm 0 \sim -6\text{ m}$ の間では、各水深間の変化の相関、同一水深の沿岸方向に離れた地点間の相関共と高く、この地域が一つのメカニズムの中で変動していることがわかる。しかし、水深がそれ以深になると、二地点間の地形変化の相関が強い地域は狭くなる。さらに、水深 $\pm 0 \sim -6\text{ m}$ までの地域と水深 $-10 \sim -12\text{ m}$ 程度の変化の間には、弱い負の相関が認められる。

ワ) 防波堤の築造によって、その周辺では浅部の地形変化と、沖部の変化の相関が強くなる。

カ) 南防波堤の曲部の沖合では、南海岸への土砂投棄によって著しい土砂堆積が生じ、この堆積地域は、南防波堤の屈曲部から防波堤沿いに舌状に伸びている。しかし昭和45年以降、海浜の侵食の開始と共にこの地域でも侵食が起こる。

コ) しかし、侵食の始まる時点は、南防波堤屈曲部で早く、堤額に向かって遅れる。このように堆積、侵食等の兆候は各地点で時間的遅れを持ちながら伝播して行く。

タ) 北海岸の汀線は、海浜上に立って、海岸線の方向を見通した線と、南防波堤々頭部を見通した線との交角が45度になる地点付近で最も激しい。この角が60度以上になる地点では堆積傾向を示す。

レ) このような変化は、南防波堤による波の遮蔽効果のためであり、欠壊が最も激しいのは、防波堤による回折効果の境界附近に当たるものと考えられる。

ソ) 南海岸における土量増加は、投棄土砂量の約70%に当たる。zone I (基線から沖へ500mの間)では投棄開始後土量は増加し続けるが、zone-II (基線から500~1000mの間)では45年以降、土量増加が停滞気味である。zone-III (基線から1000~2000mの間)ではzone IIの土量増加が停滞する頃から土量が増加する。さらにzone-IIIの沖合のzone-IVではzone-IIIの土量増加がピークに達して減少を始めると、逆に土量が増えている。このように、投棄土砂の沖への分散は、全期間を通してゆるやかに行なわれるのではなく、段階的に、一つの土砂集団として動いて行くようである。

ツ) 南海岸への投棄土砂量のうち、沖合の潜堤に浅に残存する土砂は約50%である。

ネ) 北海岸への投棄土砂は、護岸延長に比して投棄土砂量の少ない間は、その大半が護岸背後に止まっているが、護岸背後で陸地が拡がり、汀線が護岸の端に近づくと、残存率が急減して、護岸先端から外へ流出する。

ナ) 鹿島海岸での土量増加量は約3500万 m^3 であり、全投棄量は約5000万 m^3 である。

ヲ) 防波堤周辺における顕著な洗掘発生地域は、堤頭部、直部のうち防波堤が沿岸砂州を切る地点の周辺、先行マウンド港内側、建設過程での一時的狭い開口部などである。

ム) 堤頭の洗掘深は、砕波の丁度打ち込む地点付近で最大となり、その深さは、堤頭部で丁度砕波する波の有義波高程度である、

ウ) 直部の洗掘は、水深-2~-3m地点で最も激しく、それより水深が浅いと急激に、深いと徐々に小さくなる。

キ) 防波堤マウンドは、その高さが増加するほど不安定になる。

ノ) マウンドの法先および底面の構造によって、マウンドの安定度には相当の差異が生ずる。ビニールマット上に捨ブロックした構造は、ブロックの下に1m厚の捨石を敷いたものの安定度には比ると相当に劣る。

7. 謝 辞

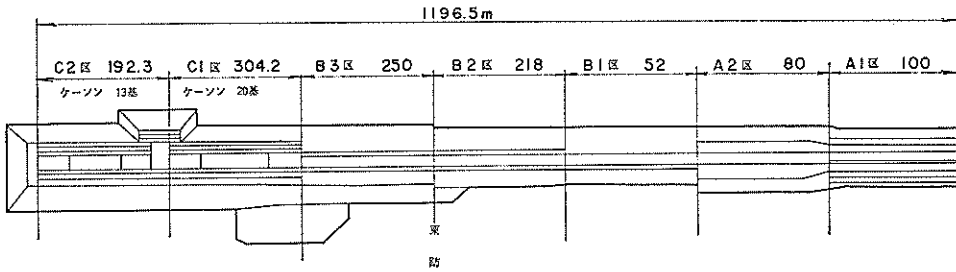
港湾建設過程で鹿島港の場合程莫大の調査が実施されている例を今だかつて知らない。こうした傾向は、技術の向上、現象の解明の上で、きわめて喜ばしいことである。この調査を計画し、実施されて来た第二港湾建設局、横浜調査設計事務所および鹿島港工事々務所、さらに茨城県の担当者の皆さんに、心から敬意を表さなくてはならない。また、今回の解析に当って多大の協力を受けた漂砂研究室の諸兄、特に柳島慎一および小笠原昭技官に深く感謝する。
(1974年9月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 田中則男, 小笹博昭, 小笠原昭; 海浜変形調査資料(第1報)—航空写真による汀線変化の解析(東日本編)—港湾技研資料, No. 163, 1973年6月
- 2) 田中則男, 小笹博昭; 海浜変形調査資料(その2)—航空写真による汀線変化の解析—港湾技研資料, No. 192, 1974年6月
- 3) 田中則男, 沢本正樹; 砂浜港湾周辺における海浜変形—空中写真による現状把握と海浜変形々態類型化の試み—港湾技研資料 No. 180, 1974年3月
- 4) 入江 功, 天坂三明; 漂砂の連続的現地観測について—海形地形変動に関する一考察—港湾技術研究所報告第10巻2号, 昭和46年5月
- 5) 井島武士, 佐藤昭二, 田中則男; 鹿島海岸の漂砂について, 第11回海岸工学講演会講演集, 1964年11月
- 6) 佐藤昭二, 田中則男, 入江 功; 鹿島港防波堤延長工事に伴う海底地形の変化について, 第15回海岸工学講演会講演集, 1968年11月
- 7) Shoji Sato and Norio Tanaka; Field Investigation on Sand Drift at Kashima Coast, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng. Sept. 1966.
- 8) Shoji Sato and Isao Irie; Variation of Topography of Sea-Bed Caused by the Construction of Breakwaters, Proc. of 12th Conf. on Coastal Eng. Sept. 1970.
- 9) 佐藤昭二, 田中則男, 佐々木克博; 鹿島港建設に伴う海底地形の変化について, 第21回海岸工学講演会論文集, 1974年11月
- 10) 佐藤昭二, 田中則男他; 港湾埋没に関する2, 3の実験—鹿島港の漂砂実験—第4回港湾研究会, 1966年11月
- 11) 第二港湾建設局, 港湾技術研究所, 茨城県; 鹿島工業港の自然条件について—漂砂特性—39年3月
- 12) 永井康平; 不規則な波の屈折の計算, 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 2, 1972年6月
- 13) 和田善吉, 西村一夫, 楢井康裕; 防波堤周辺の洗掘および海岸の欠壊について, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970年11月

- 14) 田中則男；漂砂が港湾構造物基礎に与える形響，施工技術，第5巻8号
- 15) 稲垣紘史，片山猛雄；被災例による混成堤マウンド被覆石の安定限界の検討，港研資料 No. 127（昭和46年）
- 16) 第一港湾建設局，新潟調査設計事務所；マウンド被覆ブロックの所要重量，水工学シンポジウム（港研主催）資料，昭和48年

附録—A 外郭施設の構造断面



区	100m - 40/11~3 - 261m		以後橋体に準ず		39/5~3 220m		38/7~3		38/5~8	
基	42/5~3 12	41/6~3 6	41/7~9 30							
礎	43/9~11	42/5~8 4	41/2~3 204							
上	43/9~11	42/7~3	42/7~3 46m			39/7~9		40/7~9		

築	埋	割 石 500 ~ 600 kg	積 固 三 角	積 フ ロ ッ ク	割 石 600kg
堤	内	15 x 8.5 x 9.5m	砂 止 割 石 200 kg	1.4t 2層	
体	外	15 x 8.5 x 7.0m	方 塊 14t	方 塊 7t	積 石 50 ~ 60 kg
		根 固 方 塊 13.8t x 4 列			
築	埋	割 石 500 ~ 600 kg	六 脚 5.5t	方 塊 4t 2層	割 石 600kg
堤	外	方 塊 9.4t			

(単位: m)

図-I.a 北防波堤の断面区分と施工状況

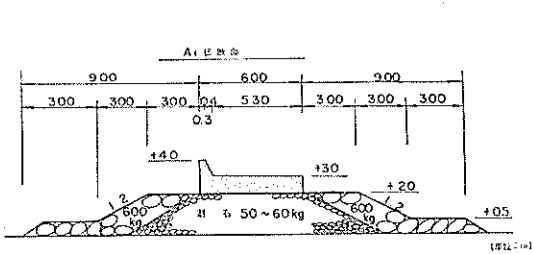


図-I.b 北防波堤 A₁ 断面

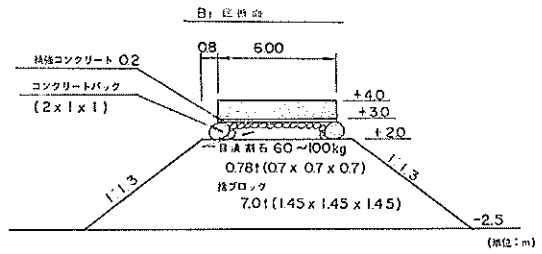


図-I.d 北防波堤 B₁ 断面

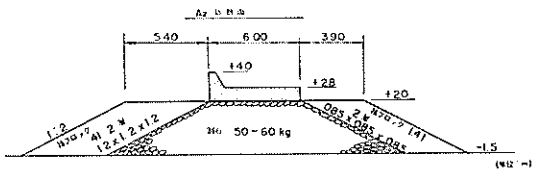


図-I.c 北防波堤 A₂ 断面

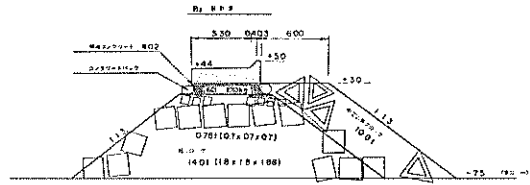


図-I.e 北防波堤 B₂ 断面

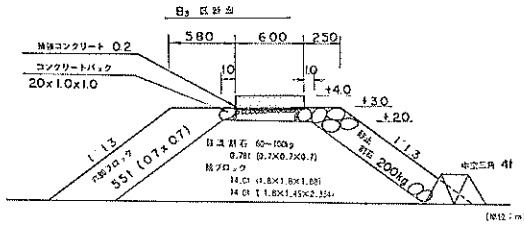


図-I-f 北防波堤 B₃ 断面

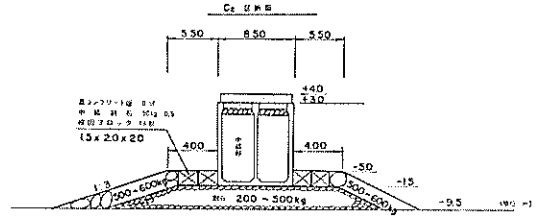


図-I-h 北防波堤 C₂ 断面

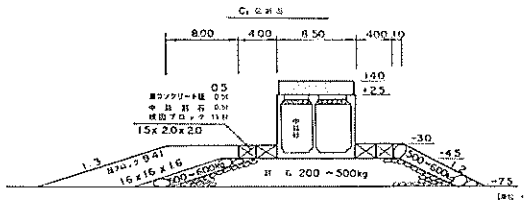
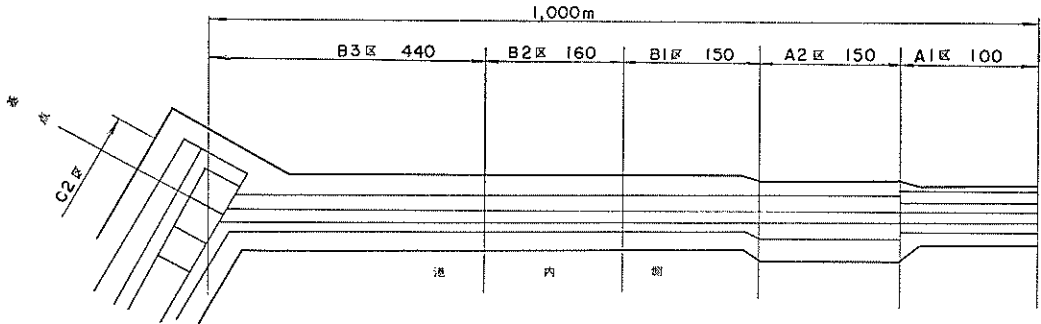


図-I-g 北防波堤 C₁ 断面



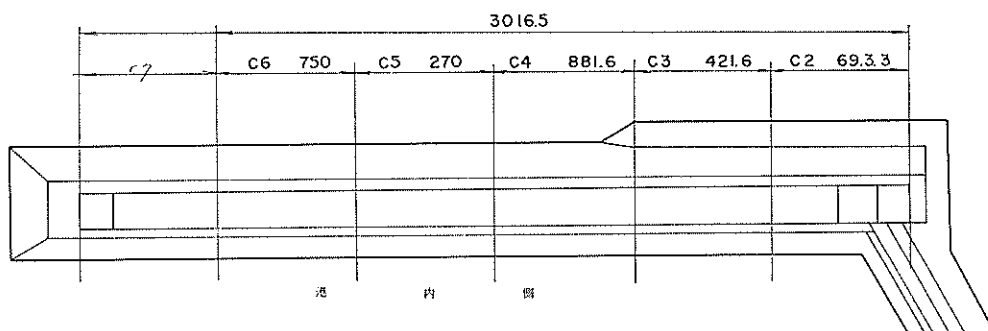
施 工 年 月	上部	42/12~43/3	42/5 ~ 9	38	41/6 ~ 11	
	堤体	42/5 ~ 9	41/6 ~ 11	40/7 ~ 41/3	23.3m	
	披覆	六脚	42/1 ~ 9	40/7 ~ 11	テトラ	
		アスファルトマット		40	39/4 ~ 40/2	
		アスファルトマット				43/2 3

築 港 外 側	六脚	11.5†	テトラ	12.5†	中空三角	10†	六脚	5.5†	方 9.4†	方塊	4†	割石	500~600kg
		260m	180m	80	80					割石	50 ~ 60 kg		
築 港 内 側	方塊	300m							方塊	4†	割石	500~600kg	
	砂袋マット	200m	アスファルトマット		145		5.5m						

(単位: m)

図-I-i 南防波堤直部の断面区分と施工状況

鹿島港建設に伴う海底地形変化について



施工年月	上 部			44/11 ~ 45/8	44/6 ~ 45/3	44/6 ~ 11,
	下 部			43/4 ~ 45/5	42/5 ~ 43/11	42/5 ~ 44/3
	竣 工	45/8 ~ 47/9	45/7 ~ 8	43/4 ~ 45/5	42/5 ~ 43/11	41/5 ~ 43/11
	竣 工	45/8 ~ 47/9	45/6 ~ 7	43/2 ~ 45/5	41/12 ~ 43/11	40/7 ~ 43/11
	竣 工			43/2 ~ 45/5	41/12 ~ 43/11	40/7 ~ 43/11
	竣 工				45/12 ~ 46/3	竣 工 44/11 ~ 46/3

注 意	根 固 割 石 500 ~ 600 kg					方 塊 5t	六 脚 8.24t	六 脚	方 塊 18.4
港 外 側	方 塊 2.3t					割 石 500 ~ 600 kg			
水 体	17x	15.7 x 4, 15 x 14	13 x 60	11.5 x 27	10 x 47, 11.5 x 1	(ケーソン高さ相違)			
注 意 内	割 石 500 ~ 600 kg								

(単位: m)

図-I.j 南防波堤曲部の断面区分と施工状況

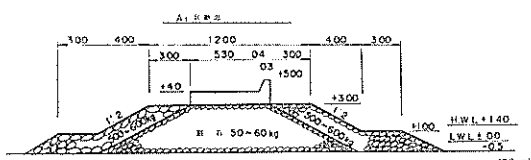


図-I.k 南防波堤 A₁ 断面

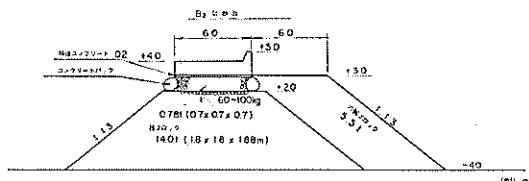


図-I.n 南防波堤 B₂ 断面

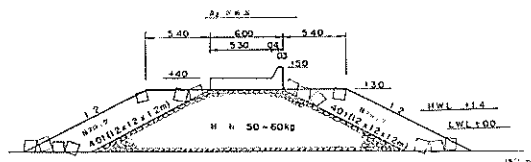


図-I.l 南防波堤 A₂ 断面

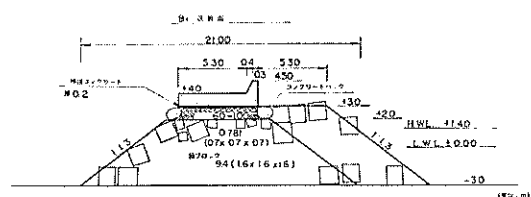


図-I.m 南防波堤 B₁ 断面

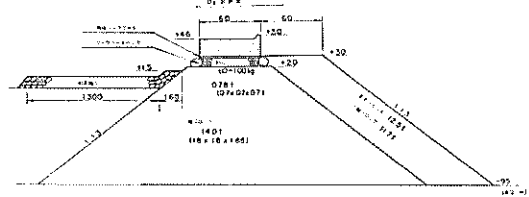


図-I.o 南防波堤 B₃ 断面

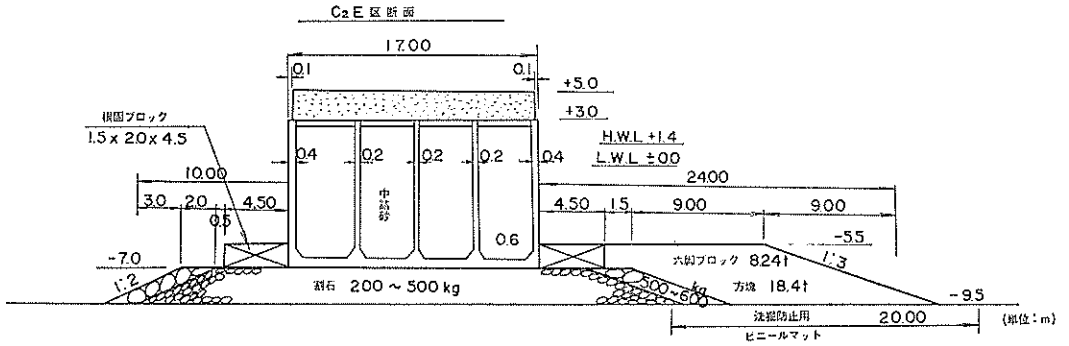


図-I・p 南防波堤 C₂E 断面

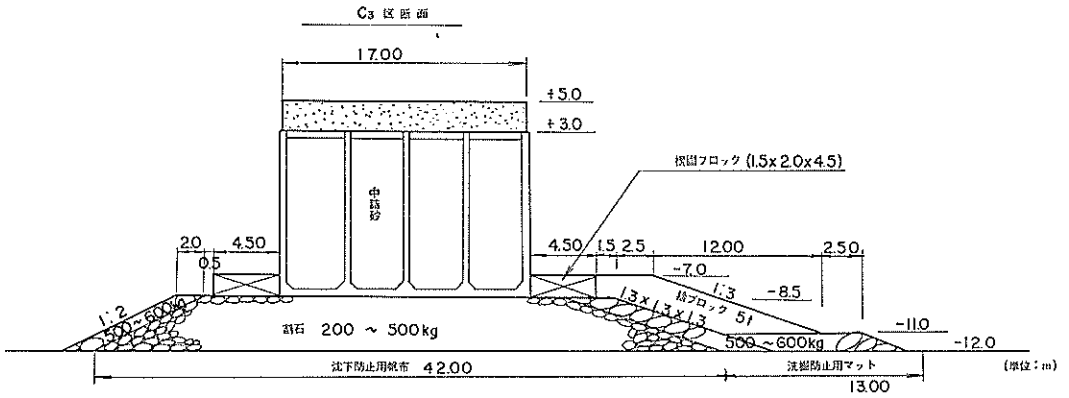


図-I・q 南防波堤 C₃ 断面

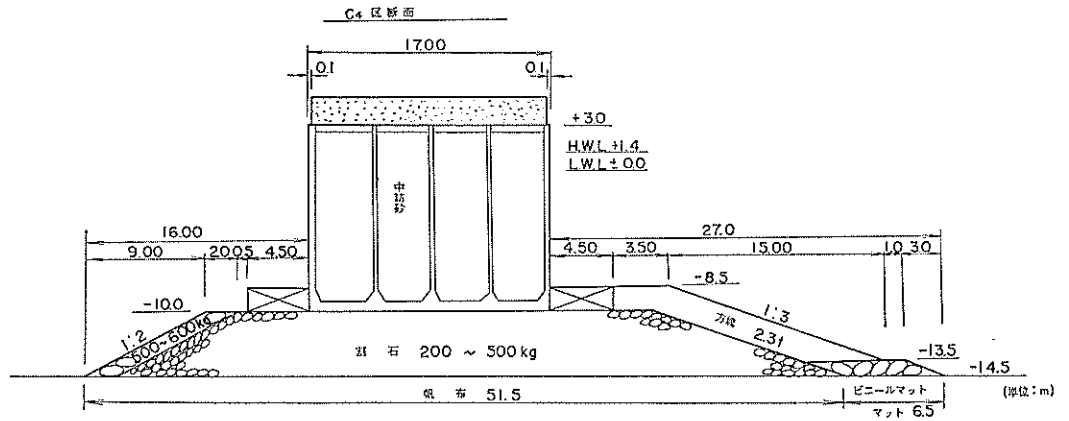


図-I・r 南防波堤 C₄ 断面

港湾技術研究所報告 第13巻 索引

論文名・著者

巻号 頁

水工部

鹿島港建設に伴う海底地形変化について——事例研究——

……………佐藤昭二・田中則男・佐々木克博……13 4(2) 3~ 78

海洋水理部

波浪の統計的性質に関する調査・解析……………合田良実・永井康平……13 1 3~ 37

東京湾の潮流による物質拡散の水理模型実験

……………金子安雄・堀江毅・村上和男・亀山豊……13 3 3~ 68

対数分布の吹送流に対する波速の計算……………加藤始……13 4 3~ 32

土質部

海洋底における土質力学の問題……………中瀬明男……13 1 39~ 63

ネガティブフリクションに関する実験と考察(第1報)

……………高橋邦夫・沢口正俊・善功企・篠原邦彦・橋本光寿……13 1 65~ 86

石灰による深層混合処理工法(第3法)……………奥村樹郎・寺師昌明

光本司・吉田富雄・渡辺光男……13 2 3~ 44

軽量ブロックによる土圧低減工法……………善功企・沢口正俊・中瀬明男

高橋邦夫・篠原邦彦・橋本光寿……13 2 45~ 64

構造部

砂層の振動性状……………荒井秀夫・岩淵守義・中沢定男・北島誠治……13 2 65~ 82

設計基準部

ポアソン到着待ち合せモデルの数表——埠頭の数および泊地規模の決定——

……………奥山育英・笹島博・早藤能伸・中井典倫子……13 1 87~151

機材部

エアリフトの揚水性能式に対する一考察……岡山義邦・八木得次・佐藤義博……13 3 69~ 87

Index of Report of P.H.R.I. Vol. 13

	Vol. No.	pp
Hydraulics Division		
The Case History on Variation of Sea Bottom Topography Caused by the Construction Works of KASHIMA HarbourShoji SATO, Norio TANAKA and Katsuhiko SASAKI.....	13 4 (2)	3~ 78
Marine Hydrodynamics Division		
Investigation of the Statistical Properties of Sea Waves with Field and Simulation Data	Yoshimi GODA and Kohei NAGAI.....13 1	3~ 37
Hydraulic Model Experiments on Substance Diffusion due to Tidal Currents in Tokyo Bay	Yasuo KANEKO, Takeshi HORIE, Kazuo MURAKAMI and Yutaka KAMEYAMA.....13 3	3~ 68
Calculation of the Wave Speed for a Logarithmic Drift Current	Hajime KATO.....13 4	3~ 32
Soils Division		
Geotechnical Problems of the Ocean Floor	Akio MAKASE.....13 1	39~ 63
Experiment and Study on Negative Skin Friction on Piles (1st Report)	Kunio TAKAHASHI, Masatoshi SAWAGUCHI, Koki ZEN, Kunihiko SHINOHARA and Koji HASHIMOTO	13 1 65~ 86
Deep-Lime-Mixing Method for Soil Stabilization (3rd Report)	Tatsuro OKUMURA, Masaaki TERASHI, Tsukasa MITSUMOTO, Tomio YOSHIDA and Mitsuo WATANABE.....13 2	3~ 44
A Method to Decrease Active Earth Pressure by Applying the Light-weight Blocks as Back-filling	Koki ZEN, Masatoshi SAWAGUCHI, Akio NAKASE, Kunio TAKAHASHI, Kunihiko SHINOHARA and Koji HASHIMOTO.....13 2	45~ 64
Structures Division		
Vibrational Properties of Sand Layers.....	Hideo ARAI, Moriyoshi IWABUCHI, Sadao NAKAZAWA and Seiji KITAJIMA.....13 2	65~ 82

Design Standard Division

Table of Poisson Arrival Queueing Model—Optimum Number of Berths
and Optimum Anchorage Requirements—

.....Yasuhide OKUYAMA, Hiroshi SASAJIMA,
Yoshinobu HAYAFUJI and Noriko NAKAI.....13 1 87~151

Machinery Division

A Consideration of Experimental Formula on Air-lift Pumping Characteristics

.....Yoshikuni OKAYAMA, Tokuji YAGI and Yoshihiro SATO.....13 3 69~ 87

港湾技術研究所報告 第13卷 第4号(2)

1974・12

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丁目1番1号

印刷所 啓文堂松本印刷
東京都新宿区戸塚町1-458-14