

鹿島港防波堤延長工事に伴う海底地形の変化について

佐藤 昭二*・田中 則男**・入江 功***

1. はしがき

鹿島港建設工事は、昭和 37 年度試験堤工事が行なわれ、昭和 38 年度より本工事に着手し、今年昭和 43 年度は外航路掘削を開始している。この間、図-1 に示す第 1 次計画の工事進行の過程は図-2 に示すとおりであった。

著者らは工事着工以前から第二港湾建設局および茨城県と共同で、海象、地象に関する広範な調査を継続的に実施し、その成果の一部を第 11 回海岸工学講演会^{1),2)}

等で報告している。

鹿島港沿岸は太平洋に面した波浪、漂砂の激しい細砂の海岸で、工事進行にともない興味ある海底地形と漂砂の変化を示している。以下建設工事過程にしたがってその状況を述べる。

2. 試験堤建設にともなう地形変化

試験堤は拾石堤で、本計画の船溜南堤の一部として昭和 37 年 5 月～7 月に、全長 280 m が建設された。

試験堤付近の等深線は、試験堤の延長速度とほぼ同速度で前進し、試験堤の影響が見られる地域は、沖方向には水深 -4 m 以浅まで、海岸に平行方向には南北へ、おのおの 500～600 m 程度であった。試験堤完成後、汀線は冬期には北が前進、南が後退、夏期にはその逆の傾向を示しながら 10～50 m の出入りを示した。

図-1 鹿島港計画平面図

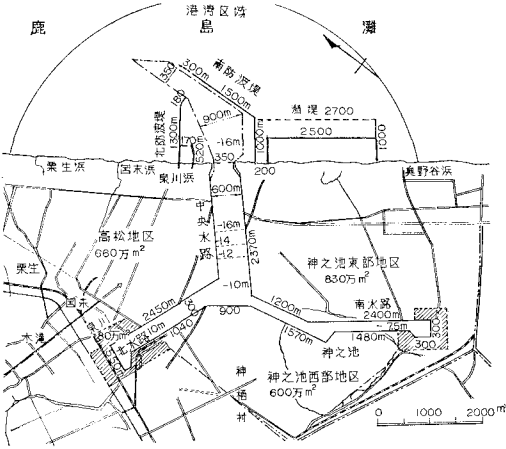


図-2 防波堤延長工事進行図

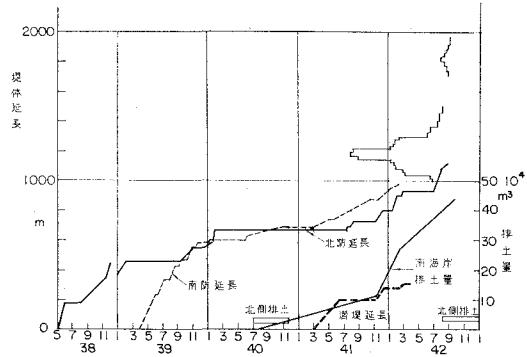


図-3 (a) 試験堤周辺の地形 (昭和 39 年 1 月)

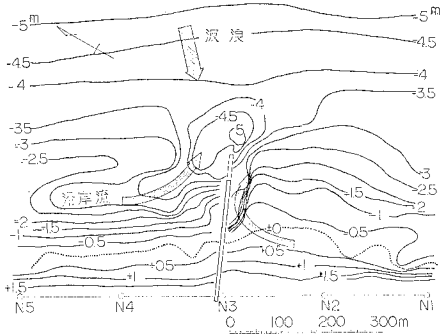
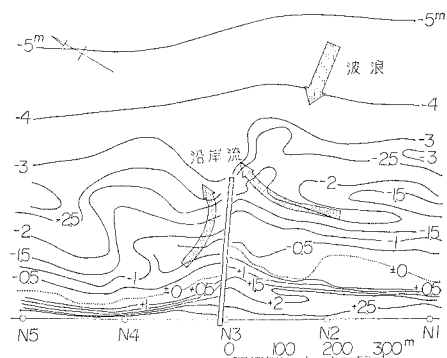


図-3 (b) 試験堤周辺の地形 (昭和 38 年 6 月)



* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所
** 正会員 運輸省港湾技術研究所
*** 運輸省港湾技術研究所

図-3 は試験堤付近の代表的な深浅図で、(a) は冬期(昭和 39 年 3 月)、(b) は夏期(38 年 6 月)である。(a) 図によると、冬期は堤の近くの北側で沿岸砂洲が発達して bar 型の形状を示すが、南側では砂洲がほとんど見られず、 $-2 \sim -3$ m の等深線が沖へ張り出し、step 型の形状を示す。一方、夏期は、(b) 図から知られるように、冬期と逆の傾向が見られ、また冬期、夏期を通じて堤頭部に著しい深掘れがある。

このような地形変化特性は、冬期は北よりの波、夏期は南よりの波が卓越する本海岸の波浪特性によって説明される。図に示す卓越波向の下手側の堤に沿う流れは、堤近くがそれより外側部分より静穏なことによる反流や、堤体付近の水位上昇によるものと推定される。

3. 船溜建設に伴う地形変化

船溜の防波堤建設工事は、昭和 38 年 6 月より開始され、39 年 8 月完了した。その建設過程は後述する 図-5 中に示されている。

図-4 は、建設過程における代表的な深浅図の三例を示すものである。38 年 12 月の(a) 図では、等深線は海に向かって凹形となり、沖に砂洲が形成されているが、39 年 3 月の(b) 図では砂洲が消滅し、中央部が急激に前進し、堤近くが深掘れて等深線は凸形に変わっている。この凹形と凸形の地形の相違は、砂洲発生地域と防波堤先端の相対的距離によるものであろう。39 年 6 月頃よ

図-4 船溜周辺の地形

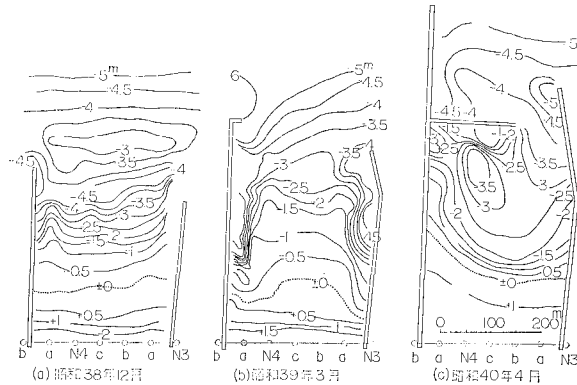


図-5 船溜内の土量変化

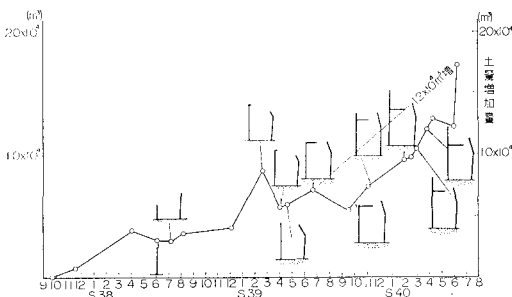
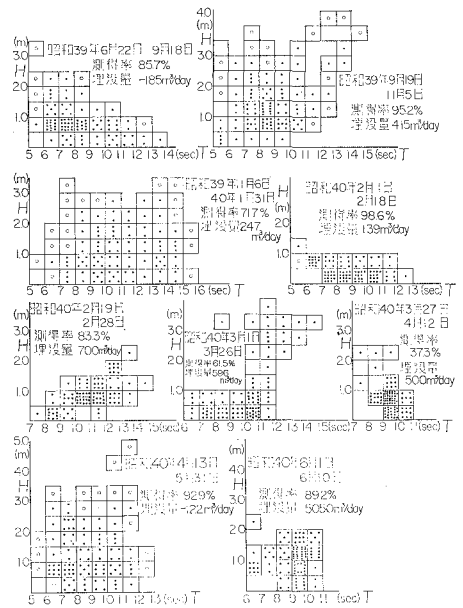


図-6 船溜土量計算期間の周期別波高出現率



り波除堤としての船溜東防波堤が延長され始めると、等深線は船溜口からの回折波の波峯線の形状に近づく。

図-5 は、昭和 37 年 9 月を基準とした船溜内の土量変化を示すものである。船溜は船溜南防波堤のみのときから着実な土量増加を示しており、とくに船溜東防堤延長工事開始後は埋没土量が増加し、船溜完成時の 39 年 6 月以後は年間 12 万 m^3 の埋没を示している。

図-6 は、39 年 7 月以降、各測量時の間の水深 -12 m における水圧式波高計による波の周期別波高出現率を示したものである。同図には、測定期間とともに、その間の土量増減量および波高測得率も付記されている。船溜内土量が減少した 39 年 6 月～9 月および 40 年 4 月～5 月の間は、周期 $6 \sim 7$ sec の風浪性の波が大きいことが特徴である。一方、港内埋没がとくに著しい 40 年 6 月および 40 年 2 月の場合、周期 $9 \sim 11$ sec で波高 $1.0 \sim 1.5$ m の波が支配的である。また長周期で高い波のあった 39 年 9 月～11 月、39 年 11 月～40 年 1 月および 40 年 3 月の場合には埋没は起こるがその量は前述のものにおよばない。さらに波高がすべての周期にわたって低い昭和 40 年 2 月の期間はその埋没量は少ないことがわかる。

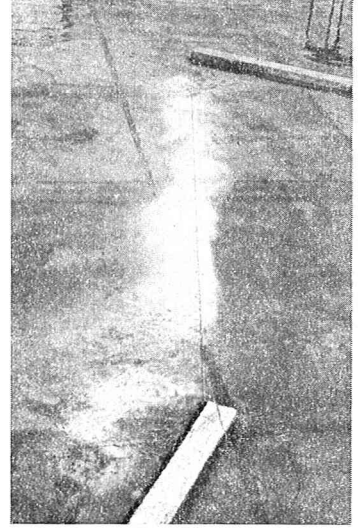
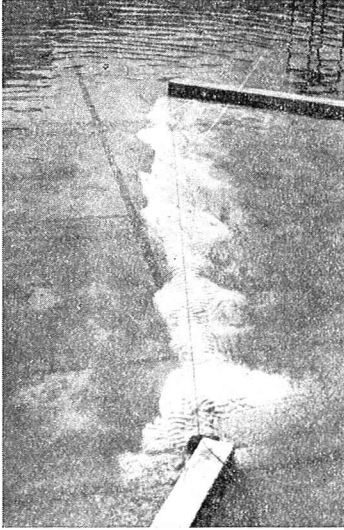
これらの結果を見ると、波高が非常に高い時よりも、波高 $1.0 \sim 2.0$ 程度の中程度の波の時にもっとも埋没するように思われる。このことは、 $1/150$ の固定床模型実験によっても推定される³⁾。すなわち、写真-1 は、鹿島港の港口を横断して、ポリエチレン粉末(比重 1.15 中央粒径 0.2 mm)を敷き、それに数種の波を作用させた後の状況であるが、これによっても波高が低いと港内にポリエチレン粒子が入って来るけれども、波高が

写真-1

(a) $H_0=3.0$ cm, $T=1.14$ sec
15 分後

(b) $H_0=4.1$ cm, $T=1.14$ sec
15 分後

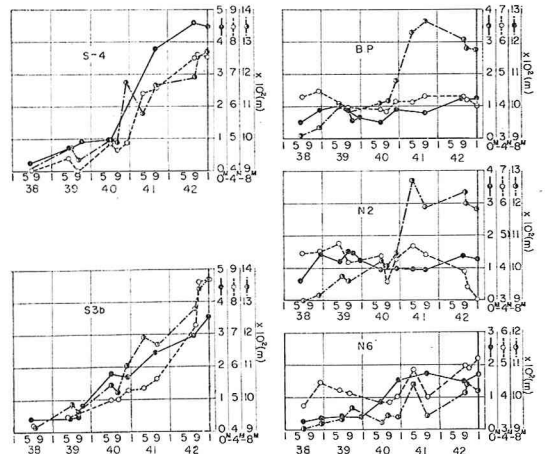
(c) $H_0=6.0$ cm, $T=1.14$ sec
15 分後



より大きくなると港外に分散する傾向が見られる。このようなポリエチレン粒子の分散形状の相違は、その移動形式が波高の小さい場合には掃流であり、波高が大きくなると浮遊性が強くなって来ることとともに、港口で沖向きの $flrsh$ が強まって来る結果であろうと思われる。

- 6) 南海岸で汀線が著しく前進し、激しい堆積がある。
- 7) 北海岸も堆積傾向にある。

図-8 港周辺の等深線の出入り



等の傾向を知ることができるであろう。

このような地形変化の過程と工事過程とを対比させる。ために、南海岸の S4, 港内南側の S3b, 中央の B.P 北側の N2, 北海岸の N6 の各測線上で ± 0 m, -4 m, および -8 m の等深線と基線との距離の変化を示すと 図-8 のとおりである。

前述した地形変化の過程は、第(1)項に関しては、

4. 南北防波堤延長に伴う地形変化

図-7 は、工事開始前の昭和 37 年 6 月～7 月と昭和 43 年 1 月の深浅図の比較を示すものである。この図から、

- 1) 港内の南側の汀線が著しく前進し、南防波堤の内側に沿って著しい堆積がある。
- 2) 港内中央部水深 -6 m 以浅で欠壊している。
- 3) 港口付近の水深 $-6 \sim -10$ m で著しく堆積している。
- 4) 北防波堤に沿って -6 m 以深で欠壊している。
- 5) 南防波堤斜部沖側に著しい堆積がある。

図-7 昭和 37 年 6 月～7 月と昭和 43 年 1 月の深浅図の比較

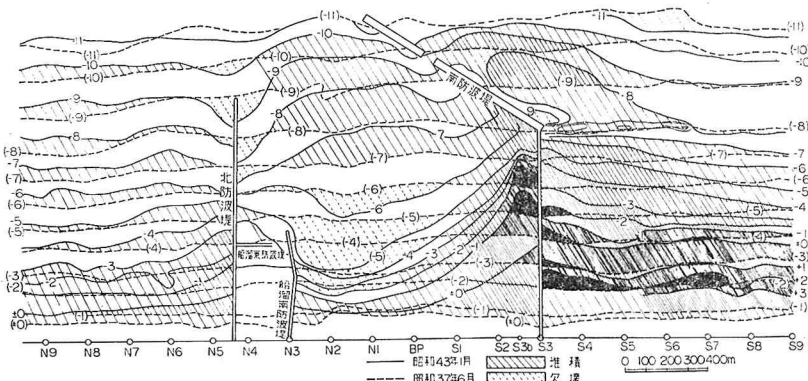


表-1 工事過程と地形変化の関係

工事過程 地形変化		38.5~39.5 北防波堤延長期	39.4~40.9 南防波堤延長期	40.9~41.9 南海岸排土期	41.9~42.6 南堤斜部延長期	42.7 南堤隅部の閉鎖
1	S3b 測線 ± 0 , -4m (港内南側江線の前進)	-4m 堆積	急激に堆積 (± 0 において著しい)	同 左 (同 左)	同 左 (-4m において著しい)	同 左 (同 左)
2	B.P 測線 ± 0 , -4m N2 測線 ± 0 , -4m (港内中央部の欠壊)	堆 積 堆 積	欠 壊 欠 壊	堆 積 平 衡	平 衡 平 衡	欠 壊 急激に欠壊
3	B.P 測線 -8m N2 測線 -8m (港口付近の堆積)	欠 壊 堆 積	平 衡 堆 積	急激に堆積 急激に堆積	欠 壊 堆 積	急激に欠壊 急激に欠壊
4	N6 測線 -8m (北堤に沿う欠壊)	わずかに堆積	平 衡	堆 積	急激に堆積	欠 壊
5	S4 測線 -8m S3b 測線 -8m (南堤沖合いの堆積)	堆 積 わずかに堆積	堆 積 堆 積	急激に堆積 急激に堆積	堆 積 急激に堆積	急激に堆積 急激に堆積
6	S4 測線 ± 0 m, -4m (南海岸の前進)	堆 積	堆 積	急激に堆積	急激に堆積	欠 壊
7	S6 測線 ± 0 , -4m (北海岸の堆積)	平 衡	平 衡	堆 積	± 0 m 欠壊 -4m 急激に堆積	堆 積

S3b の ± 0 および -4m 線, 第2項に関しては B.P および N2 測線の ± 0 , -4m 線, 第3項については B.P, N2 測線の -8m 線, 第4項については N6 測度の -8m, 第5項に関しては S4, S3b の -8m 線, 第6項に関しては S4 測線の ± 0 , -4m 線, 最後に第7項については N6 測線の ± 0 , -4m 線の変化を見ることによって知ることができる。その結果を工事過程に

したがってとりまとめてみると表-1 のようになる。

このような地形変化の特徴は港付近の流れと波高の分布によって説明される。図-9 (a), (b) は前述した固定床模型実験における流れと波高の分布を示すもので, (a) は実験波向 ENE, (b) は NE に対するものである。流れの測定は, パラフィン球 ($d=5\text{mm}$) の移動を計ることによって行なわれ, 図中には, 表層における流れをベクトルで表示してある。測定は底層流に対しても行なったが, 流れの傾向に大差はない。これらの図によると,

1. 港内では, (a) の場合, 南防波堤斜部に沿って時計まわり岸よりでは全体として反時計まわりの流れがあり, それが中央部で合流して港口に向う。(a) の場合の沖側の時計まわりの流れは, 南堤斜部からの越波によるもので, 越波のないケースでは, (b) と同様に全体として大きい半径の反時計まわりの流れになるものと思われる。

2. (a), (b) ともに波は港内の北防波堤よりに侵入し, 南堤に近いほど, 波高が低い。このような港内での波高分布と流れのパターンが前述した地形変化特徴, 1)~3) 項の原因であろうと思われる。

3. (a), (b) ともに, 港外の漂砂の上手, すなわち, (a) については S4~S5 測線, (b) については N6 測線付近の基線から 4~6m (現地相当 600m 程度) 付近に沖側に向う流れがある (地形変化特徴 5 項の原因)。

4. 南堤斜部に沿う流れは, (a) については防波堤に沿って北とする傾向があり (ただし, 底層では流向が逆の流れがあった), (b) については防波堤に沿って南下する強い流れが見られる。その流れは, 南堤の屈折部に近づくほど強くなる。

5. 北堤付近では, その先端近くで波高が局所的に高

図-9 (a) 模型実験における波高と流れの分布
(波向 ENE)

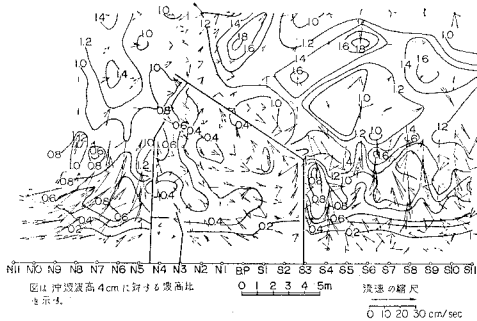
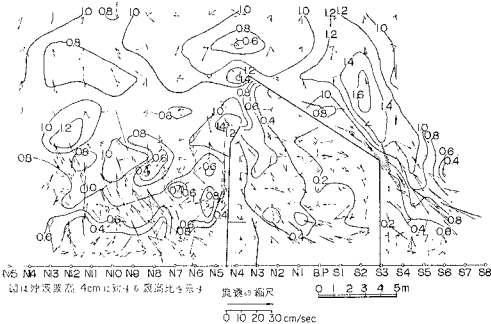
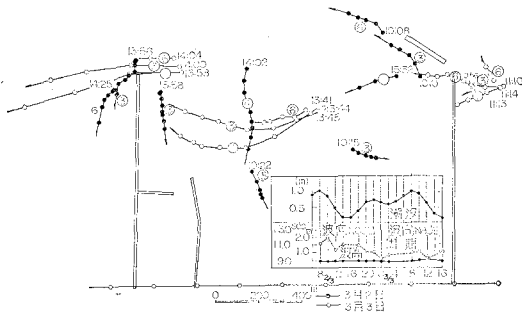


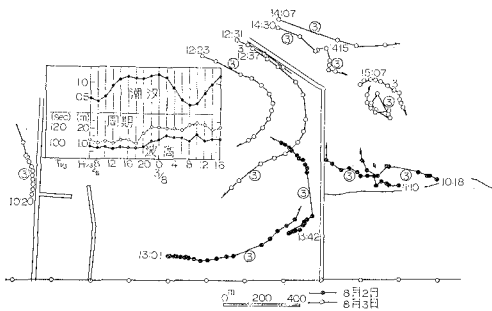
図-9 (b) 模型実験における波高と流れの分布
(波向 NE)



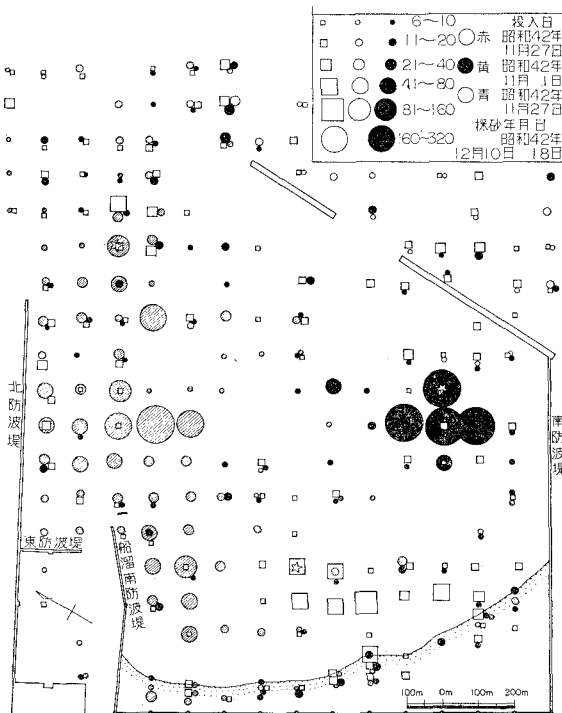
図一10 (a) 現地観測におけるフロートの流跡



図一10 (b) 現地観測におけるフロートの流跡



図一11 蛍光砂分布の一例



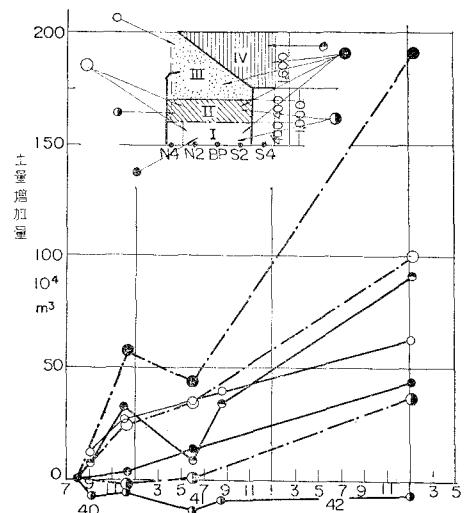
の中に示した数字は測流の水深を示す。この図から模型実験におけるような時計まわり、あるいは反時計まわりの流れや南海岸での防波堤に沿う沖向きの流れが存在することがわかる。

図一11 は昭和 41 年冬期、港内に投入された蛍光砂の分布を示すものである。蛍光砂は図中に星印で示すように港口部、南防波堤斜部内側、および港内中央部の水深 - 4 m の 3 点に各点 1.5 m³ ずつ投入された。港口に投入された蛍光砂は、北堤に沿って港内に向って分散し、中央部に入れた蛍光砂は南に向い、南堤沿いに沖に分散した傾向を示している。南堤内側の蛍光砂は投入が他のものより 10 日早かったにもかかわらず、あまり動かず、分散傾向は不明瞭である。このような蛍光砂の分散は前述した、港内の流れや地形変化の傾向と一致している。

図一7 および 図一8 から推察されるように、港湾工事の進行にともなって 港内は埋没している。図一12 は港付近を基線から沖方向に 400 m まで (Ⅰ区)、400~800 m (Ⅱ区)、800~1 500 m の港内側 (Ⅲ区) および南堤の沖側 (Ⅳ区) の 4 区に分け、各区の土量変化を示したものである。土量増加量は、南海岸への捨土の始まる直前の昭和 40 年 7 月を基準として示されている。

図から明らかなように、第Ⅱ区を除いた各区に埋没が起こっており、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区の合計、すなわち港内部分では、40 年 7 月から 43 年 1 月の約 2.5 年間で約 100 万 m³ 埋没されたことになる。その埋没量の 65% は第Ⅲ区すなわち港口付近が埋没したこととなり、平均埋没水深は 0.75 m にも達している。著者等が以前に行なった計算によると、(Ⅰ)-(Ⅱ) 区は、38 年末から 40 年 8 月までの間に 15 万 m³ の土量増加があり、これに加えると 43 年 1 月には 38 年にくらべて 55 万 m³ の増加になっているから、港湾工事開始前の昭和 36~37 年頃から

図一12 港内の土量変化



くなる箇所があり、(a)、(b) ともに北堤に沿う強い流れがある (地形変化特徴 6 項の原因)。

模型実験におけるこのような流れの状況は、現地観測結果の中にも見ることができる。図一10 は、フロートによる流況観測結果の一例である。流跡に沿ってカッコ

くらべるとすべての区域について埋没量は多少多くなるものと思われる。

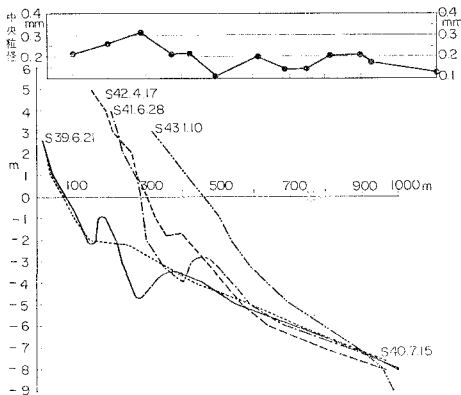
南防波堤沖合いのⅣ区の埋没は、港内のそれより、はるかに激しい。昭和 40 年 7 月より 43 年 1 月までの埋没量は約 91 万 m³ に達し、平均水深で 0.96 m 水深が減じたことになる。

5. 南海岸への捨土による地形変化

捨土は昭和 40 年 7 月、南防波堤に近い箇所から開始され、陸上堀削部分については、+6 m の天端を保ちながら陸上部から海方向に押し出され、水中部分についてはポンプしゅんせつによって前浜上に放流されている。捨土砂の粒度組成は自然海岸のそれと大差なく中央粒径で 0.2 mm 程度の細砂である。

図—13 は、南防波堤から 1000 m の距離における海

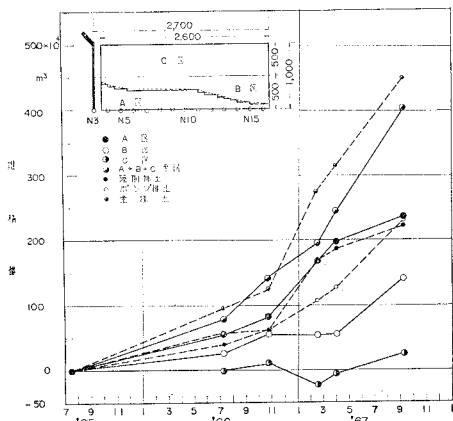
図—13 南海岸排土域の断面変化



表—2 排土地域の海底勾配の変化

年月	39年6月	40年6月	41年6月	42年4月	43年1月
水深					
-2.0 m 以浅	1/32	1/36	1/14	1/28	1/40
-2.0~ -5.0 m	1/134	1/148	1/96	1/68	1/54
-5.0~ -8.0 m	1/150	1/150	1/138	1/132	1/86

図—14 排土域の土量変化



底断面の変化と底質の中央粒径の分布を示すものである。これによると、汀線の急激な前進にもかかわらず、潜堤付近の -8 m 点近くでは水深変化は小さい。各部分の勾配変化を示す表—2 からも明らかなように、とくに水深 -2~-5 m での勾配増加が目立っている。排土地域の土砂堆積状況を見るために捨土域を陸上部 (A 区)、前浜部 (B 区)、沖浜部 (C 区) の 3 つに分けその区域ごとに土量変化を示すと 図—14 のとおりである。同図には、区域の分け方、および陸削およびしゅんせつ土砂量も示されている。これによると、A 区では排土によって着実な土量増加がみられる。B 区でも増加傾向にであるが増加量は A 区にくらべると小さい。C 区ではほとんど堆積が見られない。排土開始から、42 年 10 月までの全堆積量は計 397 万 m³ で全排土量 448 万 m³ に対して見かけ上 88% その高い養浜効率を示すが養浜効率の算定には、人工的排土の他に漂砂によって供給される砂量 (南北方向へのおおの 60~65 万 m³/year と推定される) も考慮せねばならず正確な算定はむずかしい。また、同図の各測定時点間のグラフの勾配から、排土量と堆積砂量の相関を見ると、掘削排土量と A 区堆積量は比較的良好な相関関係を有するが、排土量と堆積土量の相関は他の地域では不良である。

たとえば、41 年 11 月から 42 年 2 月の間、約 150 万 m³ の排土が行なわれたが、その間の堆積土量は 50 万 m³ にすぎず、堆積土量が排土以外の条件、すなわち、主として波浪条件に強く影響されることがわかる。

6. あとがき

本報告は前述したごとく、第二港湾建設局、茨城県および港湾技術研究所の共同で行なっている調査結果にもとづくものである。終始ご協力を載いた各機関の諸氏、とくに第二港湾建設局鹿島港工事事務所の松本所長、浅田調査課長、茨城県鹿島港建設事務所吉田所長および荒木田課長に感謝の意を表したい。

なお、今後とも、本港の建設にともなう海底地形および漂砂の変化についての調査を重ね、機会を得て報告していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 井島武上・佐藤昭二・田中則男：鹿島港海岸の漂砂について、第 11 回海岸工学講演会講演集、昭和 39 年 11 月。
- 2) S. Sato and N. Tanaka: Field investigation on sand drift at Kashima facing the Pacific Ocean, 10th Conf. on Coastal Eng., Sept. 1966.
- 3) 港湾技術研究所・第二港湾建設局・茨城県：鹿島港の自然条件について、第 1 報~第 4 報、昭和 36 年~39 年 3 月。
- 4) 同上 総とりまとめ編、昭和 42 年 3 月。
- 5) 同上 漂砂特性、昭和 41 年 3 月。
- 6) 鹿島港の建設に伴う調査について、昭和 43 年 3 月。
- 7) 港湾技術研究所・第二港湾建設局：鹿島港防波堤の配置と漂砂に関する模型実験、昭和 41 年 11 月。