

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

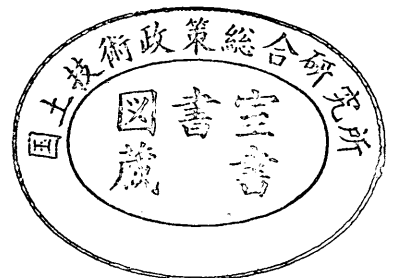
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 9

NO. 1

MAR. 1970

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第9巻 第1号 (Vol. 9, No. 1), 1970年3月 (March 1970)

目 次 (CONTENTS)

1. 組グイの水平抵抗に関する実験的研究
..... 沢口正俊 3
(Experimental Investigation on the Horizontal Resistance of Coupled Piles
..... Masatoshi SAWAGUCHI)
2. 港湾埋没に関する移動床模型の再現性—鹿島港模型実験の場合—
..... 佐藤昭二・田中則男・入江功・平原淳次 71
(Similitude of the model Test on Harbour-Shoaling in Movable Bed
—The Case of the model Test of Kashima Port—
..... Shoji SATO, Norio TANAKA, Isao IRIE, Junji HIRAHARA)
3. 水平全方向流速計の試作について (第1報)
..... 柴山煒彦・須藤茂 125
(A New Current-Meters of All-Direction-Type (1st Report)
..... Akihiko SHIBAYAMA, Shigeru SUDO)
4. 定置式波向計 (抵抗歪線型) の開発
..... 高橋智晴・鈴木禧実・佐々木弘 151
(On the Development of A New wave Direction meter
..... Tomoharu TAKAHASHI, Yoshimi SUZUKI, Hiroshi SASAKI)
5. 鋼直杭栈橋の耐震性に関する研究
..... 山本隆一・林聰・土田肇・山下生比古・小蔵紘一郎 179
(Evaluation of Seismic Stability of Trestle Type Pier with Vertical Steel Piles
..... Ryuichi YAMAMOTO, Satoshi HAYASHI,
Hajime TSUCHIDA, Ikuhiko YAMASHITA, Koichiro OGURA)

6. ふ頭エプロンの荷役活動と面積に関する研究
.....工藤和男・高力健次郎・久保重美..... 229
(Studies on Area of Wharf Apron and Related Cargo Handling Activities
.....Kazuo KUDO, Kenjiro KOHRIKI, Shigemi KUBO)
7. 軟底質における超音波の反射透過特性—フライアッシュ底質における室内実験—
.....木原純孝..... 275
(Reflection and Transmission Characteristics of Ultrasonic Wave in Soft Mud Layer
—An Experiment on Fly-Ash mud Sediment—
.....Sumitaka KIHARA)
8. 捨石均し機の開発
.....小岩苔生・大平勝・平山勇・白鳥保夫..... 307
(Development of a Leveling Equipment for Rubble Mounds
.....Taisei KOIWA, Katsu OHIRA, Isamu HIRAYAMA, Yashuo SHIRATORI)

2. 港湾埋没に関する移動床模型の再現性

—鹿島港模型実験の場合—

佐藤昭二*・田中則男**

入江 功***・平原淳次****

要 旨

鹿島港の外泊地航路開さく時の港内漂砂の状況を推定することを主な目的として、昭和40年6月から43年8月までの現地の工事進捗の幾つかの段階を対象とした移動床実験を昭和42年1月から7月にかけて行った。さらに昭和43年6月から現地で予定通り外泊地航路開さくが開始されたので、実験結果の再現性を現地深淺図その他の資料にもとづいて検討した。まず、移動床模型における時間縮尺、模型縮尺、模型底質などについて一般的な考察を行い、鹿島港の漂砂特性の概要を述べた後、実験結果の再現性の検討を行った。港内埋没土量についての再現性は悪かったが、地形変化の傾向の再現性は大筋においてよかった。再現性をさらに高めるためには、模型縮尺、底質、実験波の選定に更に工夫を要するが、港内地形変化の傾向は、波高分布、底層流の分布とよい対応をなしていることも明らかになった。

* 水工部 漂砂研究室長

** 元 水工部 主任研究官(現、一建調設)

*** 水工部 漂砂研究室

**** 元 水工部 漂砂研究室(現 四建調設)

2. Similitude of the Model Test on Harbour-Shoaling with a Movable Bed

—The Case of the Model Test of Kashima Port—

Shoji SATO*

Norio TANAKA**

Isao IRIE**

Junji HIRAHARA**

Synopsis

The similitude of a movable bed model was discussed based on the comparison of the data of the model tests with the field data for the case of Kashima Port. The model tests were conducted from January to July in 1967, and were made for several existing or scheduled conditions of the construction of breakwaters and dredging of the navigational channel in Kashima Port ranging from June 1965 to August 1968.

The model was made with the sand of 0.2mm in diameter in an outdoor basin of 50m long, 30m wide, and 80cm deep with the scale of 1:200 in horizontal and 1:40 in vertical. Waves of 14cm in height and 1.4 sec in period were chosen as the model waves, which moved the sand at the depth of the scheduled harbour entrance in the model in the same extent as the corresponding depth in the prototype caused by the waves of about 3.5m in height and 9 sec in period.

It was concluded that the similarity of the variation of the depth contour lines was reasonably acceptable except for some portion along the breakwaters. However, the variation of the volume of sand in the harbour was not successfully simulated.

* Chief of Sand Drift Laboratory, Hydraulics Division

** Members of Sand Drift Laboratory, Hydraulics Division

目 次

要 旨	71
1. はしがき	75
2. 漂砂に関する模型実験の相似性	76
2.1 漂砂移動に関する時間縮尺	76
2.2 模型縮尺と模型底質	76
3. 鹿島港海岸の漂砂特性の概要	79
3.1 海底地形と底質	79
3.2 波	81
3.3 流 れ	81
3.4 底質の移動	81
4. 縮尺の選定と実験の方法	84
4.1 実験施設	84
4.2 実験波の決定と縮尺	85
4.3 実験方法と種類	87
5. 再現性の検討	95
5.1 昭和41年夏の防波堤配置に対する実験（実験1）	95
5.2 昭和42年冬の防波堤配置に対する実験（実験2）	98
5.3 昭和43年夏の防波堤配置に対する実験（実験3）	105
5.4 外泊地航路開さく時に対する実験（実験4）	110
5.5 その他の実験（実験5, 6）	117
5.6 港内堆積土量の変化	121
6. 結 論	122

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

1. はしがき

砂浜海岸における港湾建設において、港口および泊地の漂砂堆積による水深減少は常に重要な課題であり、現地観測を中心として調査研究がなされている。一方、模型実験による研究については、固定床模型における波と流れの平面分布から漂砂による埋没現象を推定する試みは行われているが、本格的な移動床模型による研究は比較的少ない。これは、移動床実験が固定床実験と比較して多くの労力を必要とすることにもよるが、漂砂移動に関する普遍的な力学的相似性が見出されていないためであろうと思われる。しかし、港湾埋没などに関する現象は、固定床模型では、定性的なことに限ってもみずから限界があり、どうしても移動床模型が必要となる。

漂砂移動に関する普遍的な相似性が見出されていない

現在では、対象とする現地の漂砂現象をいかにして出来るだけ相似に模型内に再現するかということが重要な課題であり、それが実験結果の成否を決定する。

数少ない港湾埋没に関する移動床模型実験の中で、尾崎の節婦漁港の実験¹⁾と野田のぐみ崎漁港の実験²⁾は興味深い。前者は、港口埋没対策として既設防波堤の外側に島堤を設けた場合の効果を模型縮尺1/100および1/50で細砂を用いて研究した。この結果にもとづいて現地に建設した島堤は、予期された効果を示しているという。後者は、港内泊地の埋没機構とその対策を模型縮尺1/50で塩化ビニール粒子を用いて研究し、泊地埋没状態について現地と模型との間でよい相似が得られている。

著者らは、鹿島港の建設に関連して昭和39~42年にかけて断続的に模型実験を行った。実験は、図-1に示す本港の第一期計画（港口水深-16m，南防波堤延長2,800

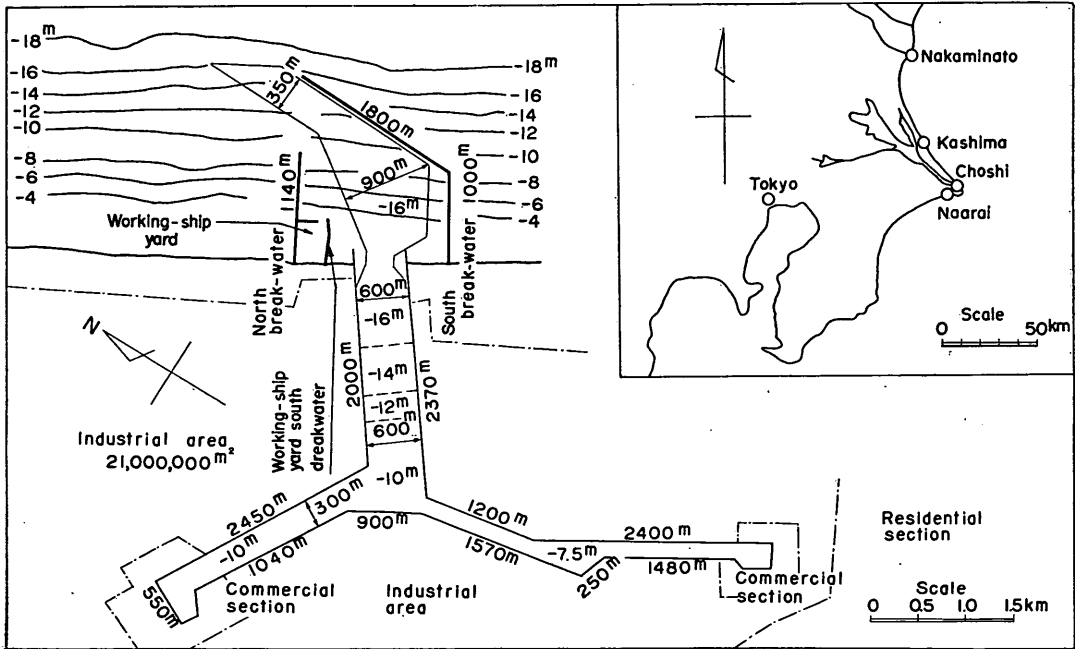


図-1 鹿島港第1期計画平面図

m，北防波堤延長1,200m)までの工事施工の幾つかの段階を対象とした。一方、現地では、昭和43年度で北防波堤1,150m，南防波堤2,500mを完成し、43年夏には中央航路と外泊地間の砂丘を切り開き外泊地の浚渫を開始した。そこで、実験結果と浅深測量を中心とした現

地観測資料を対比して、本移動床実験の再現性を検討する。実験結果の一部は、昭和41年の第4回港研発表会³⁾で述べたので、ここでは、42年1月から7月にかけて行った未発表の実験結果を中心として、再現性に検討を加えると共に港湾埋没に関する特性についても考察する。

2. 漂砂に関する模型実験の相似性

2.1 漂砂移動に関する時間縮尺

漂砂に関する時間縮尺を、歪のない模型の場合について、野田は連続条件から論じている⁴⁾。この考えを歪のある模型に対して拡張する。いま、 x 軸を海岸に沿ってとり、これと直角に y 軸、点 (x, y) における水深を h とする。さらに、単位時間、単位巾当りの漂砂量の x および y 方向の成分をそれぞれ q_x および q_y とすると、漂砂に関する連続の式は次によって与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t'} = \frac{1}{(1-\varepsilon)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここで、 ε は底質の空隙率である。この式に関して模型と実物の間に力学的相似が成立つためには、 $\varepsilon_m = \varepsilon_p$ として (m は模型、 p は現地を表わす)

$$\frac{h_m/h_p}{t'_m/t'_p} = \frac{q_{xm}/q_{xp}}{x_m/x_p} = \frac{q_{ym}/q_{yp}}{y_m/y_p} \quad (2)$$

いま、模型は歪を有し、その水平縮尺を l_m/l_p 、鉛直縮尺を kl_m/l_p (k は模型の歪)とすれば、式(2)の第1、2項より

$$t'_m/t'_p = \frac{k(l_m/l_p)^2}{q_{xm}/q_{xp}} \quad (3)$$

$$\text{または、} 1 = \frac{k(l_m/l_p)^2 q_{xp} t'_p}{q_{xm} t'_m} \quad (4)$$

上式において、 t'_m/t'_p は底質移動に関する時間縮尺であり、水の運動に関する時間縮尺とは一般に異なる。また式(2)の第1、3項からも同様な式が得られる。さて、式(3)を見ると、模型の水平および鉛直縮尺をある値に選定しても漂砂量に関する縮尺 q_{xm}/q_{xp} が判らなければ t'_m/t'_p は一義的に決まらない。漂砂量 q は波、流れ、底質および海底地形等の諸元に支配されるが、その函数形をこれらの諸元で一般的に定量的に表現することは現在の時点では不可能であり、従って、模型に使用すべき底質も時間縮尺も式(3)からは直ちに決らない。

しかし、もし模型に使用すべき底質を適当に選定すれば、 q の函数形は不明であり、 q_m/q_p の値は理論的にわからないが、ともかくある値に決定されたことになる。従って、もし、ある条件の下での q_p の値が現地観測等によって判っているとすれば、同一条件下に対する q_m を実験的に測定することにより、 q_p/q_m を求めることができ、式(3)から t'_m/t'_p が求まる。例えば、流入する漂砂量と流出する漂砂量とが同じ安定した海岸に、突堤

や航路などを設けた時のそれらの附近の地形変化を実験的に推定しようとする場合において、この方法が用いられる。しかし、この場合、少くとも、漂砂量の垂直および水平分布が、模型と現地とで相似でなければならない。これについては後述する。

次に、実験対象の現地海岸のある区域に明確な時間的水深変化がある場合を考える。この区域の中 L_p を横切って入る単位時間当りの漂砂量を $L_p q_{xp}$ 、それと対応する模型に対しては $L_m q_{xm}$ とし、それらの漂砂量の $(1-n)$ 倍がこの区域から出て行くものとすると式(4)から

$$1 = \frac{k(l_m/l_p)^2 q_{xp} t'_p}{q_{xm} t'_m} \times \frac{n L_p L_m}{n L_m L_p} \quad (5)$$

$L_m/L_p = l_m/l_p$ であるから

$$1 = \frac{k(l_m/l_p)^3 n L_p q_{xp} t'_p}{n L_m q_{xm} t'_m}$$

式(5)の $n L_p q_{xp} t'_p$ は、対象区域の現地での t'_p 期間の土量変化であり、 $n L_m q_{xm} t'_m$ は模型における t'_m 期間の土量変化である。 $k(l_m/l_p)^3$ は模型縮尺から決まり、 t'_p を適当に選定すれば深淺測量などの結果から $n L_p q_{xp} t'_p$ も決まる。さらに、模型底質を適当に選定し模型内での対象区域の土量の時間変化を実験的に測定すれば、式(5)を満足するような t'_m を求めることが出来る。すなわち、模型の時間縮尺が決定される。この場合も、一般には、前と同様に漂砂量の分布が現地と模型とで相似でなければならないが、実験の種類によっては海底地形変化が相似であれば十分な場合もある。

2.2 模型縮尺と模型底質

前述の方法によって漂砂移動に関する時間縮尺を決定する場合、大切なことは、いかにして漂砂量分布が現地と相似な模型を作るかということである。これは、漂砂量に関する函数形が明らかにされなければ厳密には不可能であるが、それは現状においては望むべくもない。従って、試行的に可能な限り出来るだけ漂砂現象が現地と相似になるように模型縮尺と底質を選定する他はない。

野田²⁾は、ぐみ崎漁港の泊地埋没に関する実験において、掃流砂よりはむしろ浮遊砂が泊地の埋没に重要な役割を果すと考え、浮遊砂の濃度分布に関する方程式：

$$\omega_0 \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon'_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

および、梶浦³⁾の長周期波理論にもとづいた渦動粘性係数 ε'_z ：

$$\varepsilon'_z = k \bar{u}_B^* (z + z_0) \quad (7)$$

を用いて、次の式を導いた。

$$\frac{w_{op}}{w_{om}} = \left(\frac{C_{fp}}{C_{fm}} \right)^{1/2} \left(\frac{u_{bp}}{u_{bm}} \right) \quad (8)$$

ここで、 w_o は浮遊砂の沈降速度、 C_f は海底の摩擦係数、 u_b は海底における水粒子の最大速度、 \bar{c} は浮遊砂濃度の時間的平均、 k は Kármán の定数、 z は水底から鉛直上向きにとり、 z_o は roughness length であり、 \bar{u}_B^* は波による摩擦速度の最大値に比例する量である。さらに海底摩擦係数の函数形がまだ十分明らかにされていないとして $C_{fp}/C_{fm} = 1$ と仮定し、式(8)から次の式を導いている。

$$\frac{w_{op}}{w_{om}} = \left(\frac{u_{bp}}{u_{bm}} \right) = \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^{1/2} \quad (9)$$

式(9)は、現地に対する底質と模型に対するそれとの沈降速度の縮尺が長さの縮尺の 1/2 乗に比例することを意味する。しかし、式(7)の仮定および $C_{fp}/C_{fm} = 1$ に問題がある。堀川・渡辺⁶⁾は、境界層に関する実験的研究を行い、短周期波の運動において式(7)を用いることに問題があることおよび、 $\epsilon^2 z$ 従って C_f は底面境界層や砂れんの条件によって大きく変化することを示している。

式(9)には、上記のような問題はあがるが、ともかく野田は、この式にもとづき比重 2.65、粒径 0.2 mm の現地底質に対して、模型縮尺 1/50、比重 0.15、中央粒径 0.13 mm の塩化ビニール粒子を用いて実験を行い、地形変化の定性的な再現性を検討し、よい結果を得ている。しかし、地形変化に対する時間縮尺の検討はしていない。一方、尾崎の節婦港の実験では、前述したように歪のない模型で底質は細砂を用いたが、砂移動に関する再現性は特に検討していない。しかし、この実験でも、離岸堤の定性的効果を十分立証することが出来た。

上述した野田や尾崎の実験は、実験対象範囲が広くないために、水平、鉛直ともに同縮尺で実験することが出来、従って、水の運動に関する Froude の相似則を完全に満足させることが出来た。しかし、現地を対象とした漂砂に関する模型実験は、次の理由のために、歪をもたせることが必要となる場合が多い。

(1) 模型水槽の大きさに限界がある。

連続した海岸のある一部の海岸欠壊あるいは埋没などの現象は、それと隣接する地域の漂砂現象と密接な関係がある。従って、隣接地域も同時に模型の中に入れて実験を行わねばならない。さらに、沿岸流や沿岸漂砂は模型の上手側の限界から或程度離れなければいられない。図-2は、Galvin⁷⁾による直線模型海浜に沿う沿岸流分布であり、碎波線と汀線とのなす角 θ_b が小さければ小

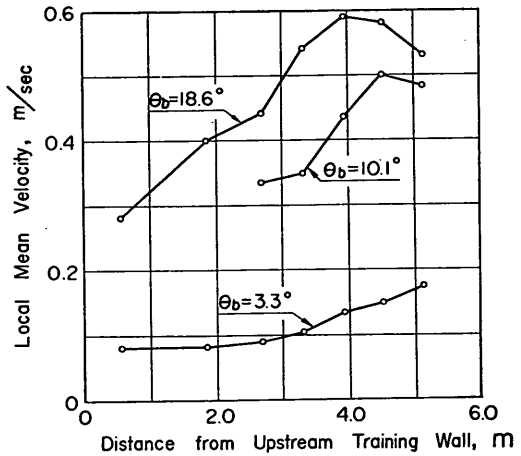


図-2 模型浜における沿岸流の分布例 (Cyril J. Galvinによる)

さいほど沿岸流が最大になるには、長い距離が必要になることがわかる。このような理由のために、平面縮尺は、1/100 よりずっと小さくしなければならない場合が多い。このとき、鉛直縮尺を平面縮尺と同じにすれば、実験対象波は通常数 m のオーダーであるから、模型波は底質を十分動かすことが出来なくなる。そのため、鉛直縮尺を平面縮尺より大きくとって、十分な波高の模型波を用いる必要が起る。

(2) 模型波は、現地より一般に勾配が急になる。

歪を与えない移動床の模型波を作り、波を作用させると、一般に、碎波帯内、特に前波の部分は、現地より急な勾配となる。従って、海浜断面形状を現地と相似にするためには、模型に歪を与えるか、または、現地より波形勾配の大きい波を作用させねばならない（一般には、波高をより大きくする）。波形勾配を大きくしたと云うことは、模型に歪を与えたことに他ならない。模型に歪を与えれば、模型水深も大きくなるが、底面に作用する波の剪断力は、ほぼ波高の 2 乗に比例するから底質はより動かされ易くなり好都合となる。

一方、模型底質については、先にも述べたように、特殊な場合を除いてそれを決定するための相似法則は見出されていない。現在一般に使用し得る底質としては、細砂、石炭粒子、パーライト粒子、メサライト粒子、ベークライト粒子、塩化ビニール粒子などがある。底質粒径に対する波の相対的大きさは、一般に模型は現地よりずっと小さいから模型底質は比重の軽いものの方が漂砂現象

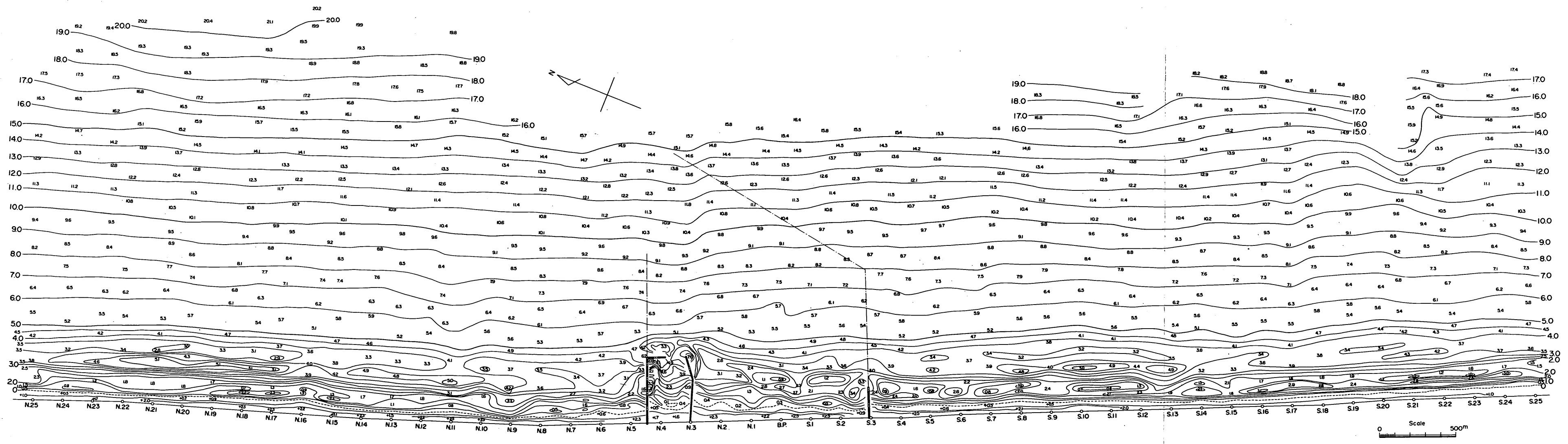


図-3 鹿島港海岸の深浅測量図(昭和39年6月22日~7月22日)

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

を一層現地に相似させ易いと思われる。東京大学港湾研究室⁸⁾では、新潟海岸の養浜に関する模型実験（水平方向縮尺1/50）において、細砂（中央粒径0.16mm）のときは、1.5の歪をもたせる必要があったが、パーライト（中央粒径0.17mm, 比重2.45）を用いたときは波のみに多少の歪を与えたのみで模型には歪の必要がなかったことを示し、メサライト（比重2.0）ならば波にさえも歪を与える必要がないであろうと述べている。しかし、水中での底質の沈降速度、海底に生ずるリップルの形状、海底勾配に対する比重の効果などが複雑に関係するので必ずしも比重が軽いほどよいとは限らない。

また、沖浜帯と碎波帯とでは砂移動の形式が異なるので、現地漂砂の再現性をその両者において同程度に相似を保つことは一般に困難であるし、複雑な地形では地域のすべてにおいて同程度の再現性を保つこともまた困難である。さらに、漂砂現象の再現性を増すために、水に関する運動の相似性ある程度までぎせいにすることも止むを得ない。

漂砂量の水平および鉛直方向の分布については、完全とは云えないが、これまでの現地観測を中心とした研究からある程度わかっているし⁹⁾、また捕砂所等による現地観測からも十分推定し得る。一方、模型では、前述した東京大学の実験⁸⁾におけるように、Fairchild¹⁰⁾の真空ポンプとノズルパイプを連結した浮遊砂採取器などを用いれば、浮遊砂の分布を知ることが出来る。また、サンドトラップなどの利用も考えられる。ともかく、このような方法で出来るだけ漂砂量の分布を測定して出来るだけ現地と相似になるように模型縮尺や底質を選定する。

以上、要するに、模型縮尺と模型底質は、実験目的上最も重要な部分に重点をおき、漂砂現象を可能な範囲内で出来るだけ相似に再現し得るように、実験水槽内で試行的に選定することになる。このためには、現地現象の観測データが必要であり、そのデータの良否がまた、模型実験結果の再現性の良否を決定するであろう。

3. 鹿島港海岸の漂砂特性の概要

実験条件の決定や実験結果の検討に当たって必要な本海岸の自然条件の概要を漂砂特性に重点をおいて述べる。この章において述べることは、第二港湾建設局、港湾技術研究所および茨城県の3者の協同研究によって得られた資料¹¹⁾による。なお、本港の調査および工事の基準面は、東京湾中等潮位下0.84mで、平均満潮位は1.40mである。

3.1 海底地形と底質

図-3は昭和39年6月22日から7月22日までに測量した鹿島港海岸の深淺測量図である。破線は第1期計画の防波堤法線で、実線部分がこの測量時には完成していた。この完成部分の防波堤の影響をほとんど受けていない測点S10から南側およびN12から北側の等深線に着目すると次のことがわかる。

(1) 沿岸砂洲は、干潮汀線（±0m線）から300~350mおよび100~150mの位置にはほぼ汀線と平行に存在する。沖側の第一の沿岸砂洲は1~2kmごとに切れ間をもつが、第二の沿岸砂洲は数100mごとに切れており不規則である。この測量期間の前6月11日に波高3m、周期10秒の波、6月15、18、20日に波高2.5m、周期7~8秒の波があった。従って、第一の沿岸砂のはこの2.5~

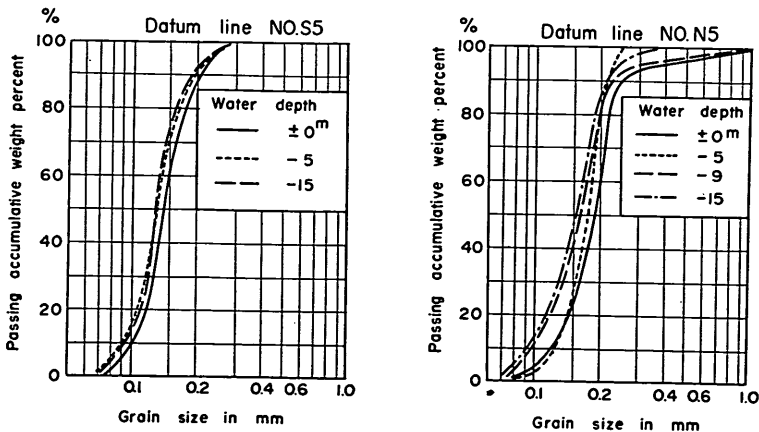


図-4 底質の粒度曲線(36年7月採取)

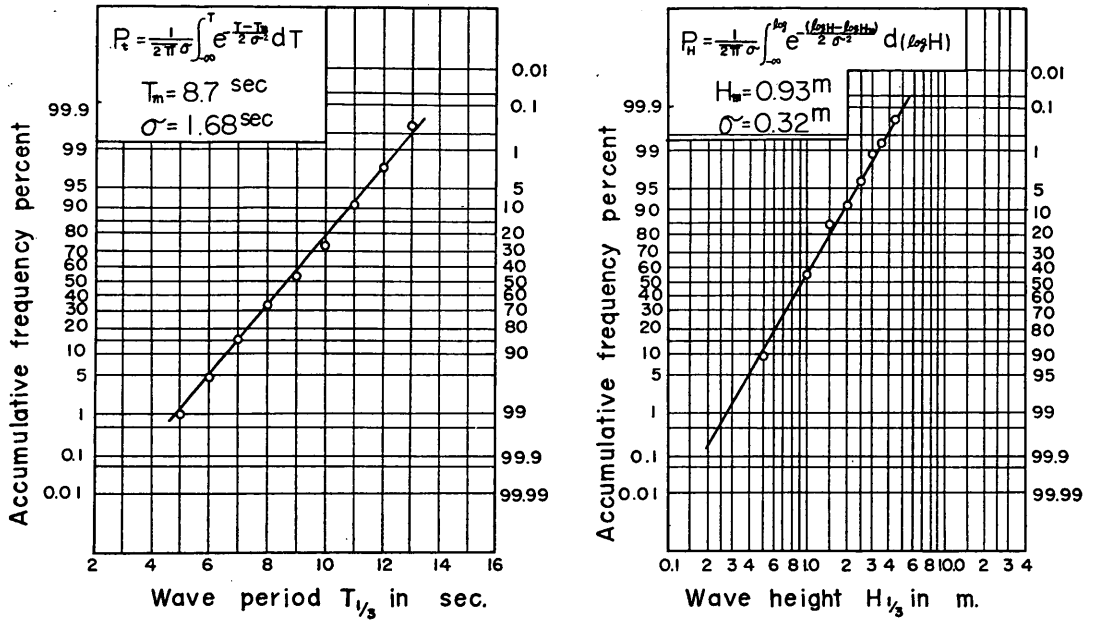


図-5 有義波の周期と波高の発生頻度（水深-9.8 mでの測定値，昭和37年4月から38年3月までの1ヶ年集計）

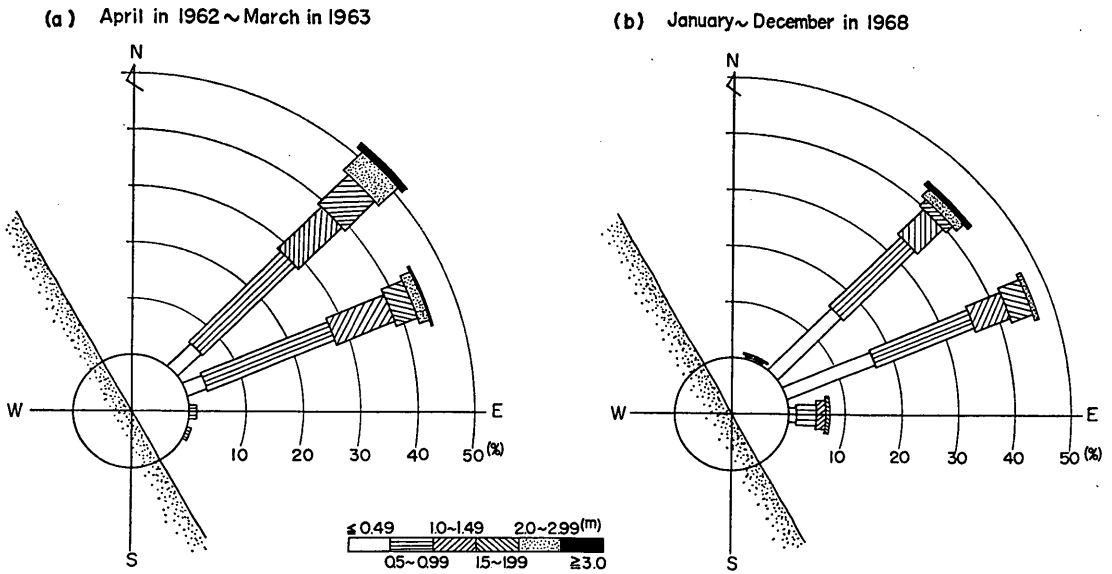


図-6 波 向 分 布

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

3 mの波によって形成されたものと考えられる。波高1 m程度の波が長期間続いた38年8月の測量では、沿岸砂洲は100~150mの所に存在するのみであった。

(2) 前浜勾配は、1/20前後、後浜の高さは+3~4 mで、その背後に高さ+6~8 mの砂丘が連っている。

(3) 沖浜勾配は、沿岸砂洲の沖側斜面で1/70~1/100、-6~-10 mで1/150~1/200、-11~-14 m附近で1/100~1/150と急になっている。

底質平均粒径は、防波堤工事の開始前、すなわち、36年の調査結果では、沖浜一帯が0.13~0.17 mmでほとんど一様であった。その代表的な粒度曲線は図-4に示す。前浜の底質の平均粒径は0.7~0.15 mmで変化が激しいが、大部分0.2~0.3 mmである。

3.2 波

図-5は、水深-9.8 mにおける水圧式波高計による37年4月から38年3月までの1ヶ年間の記録による波高と周期の発生頻度を示す。波高の中央値は1.0 mで、90%未超過値は2 mであり、周期のそれらはそれぞれ8.5 secと11 secである。43年までに観測された最大の有義波の波高は5.0 mであった。

図-6の(a)は、基準面上+27 mの観測塔から午前9時と午後4時の1日2回のトランシットによる水深-10 m附近の波向観測結果の集計である。(b)は、43年1月から12月(但し4月は欠測、1, 2, 3月は、それぞれ測得率が59, 82, 52%, その他の月は90%以上測得率)の一年間のミリ波レーダーによる水深-18 m附近の波向測定結果である。これらの図を見ると、波向はほとんど海岸線に直角である。しかし、台風や、低気圧の北上に伴って南からの波が来るとき、本港附近では北よりの風が吹くのが常であり、この風による風波が南からのうねりに乗り砕波するので、トランシットによる波向観測は、特にこのような時波向を北寄りに観測し勝ちである。これが図-6の(a)では北寄りの波が多くなっている理由と思われる。従って、本海岸では、波向はわずかに海岸法線に対して南寄りが多いと考えてよく、特に波高の大きい波についてはそうである。

3.3 流れ

海況が静穏のときの流れ、すなわち海流と潮流による流れの主方向は、ほぼ海岸線と平行であるが北上する流れがわずかに卓越している。流速は海底上0.5 mで数 cm/secであり、表層近くでも0.5ノット程度で弱い。

海岸にそう砕波帯の沿岸流は、海水で満たされた13.4 cmのビニールボールと海水を入れれない径6 cmの小球を長さ

3 mのテングスで連結したものを投入して測定した。その波高2.5 m以下の時の観測結果から次のような観測式を得た。^{11), 12)}

$$V_o = 1.6 \left[\frac{mH_o^{5/3}}{T^{1/3}} \sin 2\alpha_o \right]^{1/3} \quad (10)$$

ここで、 m , H_o , T , α_o は、それぞれ砕波帯内の平均海底勾配、沖波の波高、周期、沖波の波向と海岸線とのなす角であり、単位は、m, sec である。 V_o は m/sec 単位であるが、係数1.6は鹿島の海岸についてのみあてはまるものである。図-7は式(10)を図化したものである。

3.4 底質の移動

沖浜帯に放射性ガラス砂を投入してその移動を追跡する観測が、36年から38年にかけて行われ、他の港での観測結果も参照し次のような底質移動に関する限界式を得た。¹³⁾

完全移動限界

$$H_o/L_o = 2.4(d/L_o)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L} \cdot \frac{H_o}{H} \quad (11)$$

表層移動限界

$$H_o/L_o = 1.35(d/L_o)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L} \cdot \frac{H_o}{H} \quad (12)$$

式(11)は、水深変化が明瞭に現われるほどに顕著な移動を示す限界であり、式(12)は海底の表層の砂が波向に一致して集団的に掃流される限界で、海岸工学上底質移動が問題となる限界と考えてよい。これを計算に便利のように図示したのが図-8である。

海底砂は、一般に海底に沿って掃流される移動と、波でかく乱され浮遊移動形式で動く浮遊砂とに分けられるが、本海岸の沖浜帯における浮遊砂の分布も、他の海岸と特に異なることなく、海底面近くで浮遊砂濃度の大きいL型分布をなしている。一般に、この海底面近くの濃度の大きい部分は、波高が小さいときは、波高の増大と共にその濃度が増加するが、波高が1 m程度以上では、波高の変化にかかわらずほとんど一定でただその層厚が増加するようである。図-9はその濃度分布の一例である。この図で、捕砂竹設置期間の波高が(a)は、その37, 32, 22, 9%がそれぞれ0.5~1.0 m, 1.0~1.5 m, 1.5~2.0 m, 2~3 mであり、(b)は0.7~0.9 mであった。

本海岸での底質移動は、一般の外海に面した海岸ときほど変る所がなく、沖浜帯での底質移動の主方向は、波向と一致する成分と海岸に平行に潮流方向に向う成分とがある。波高が大きいほどまた、浅いほど前者が卓越する。砕波帯内では、海岸線方向の波のエネルギー成分によ

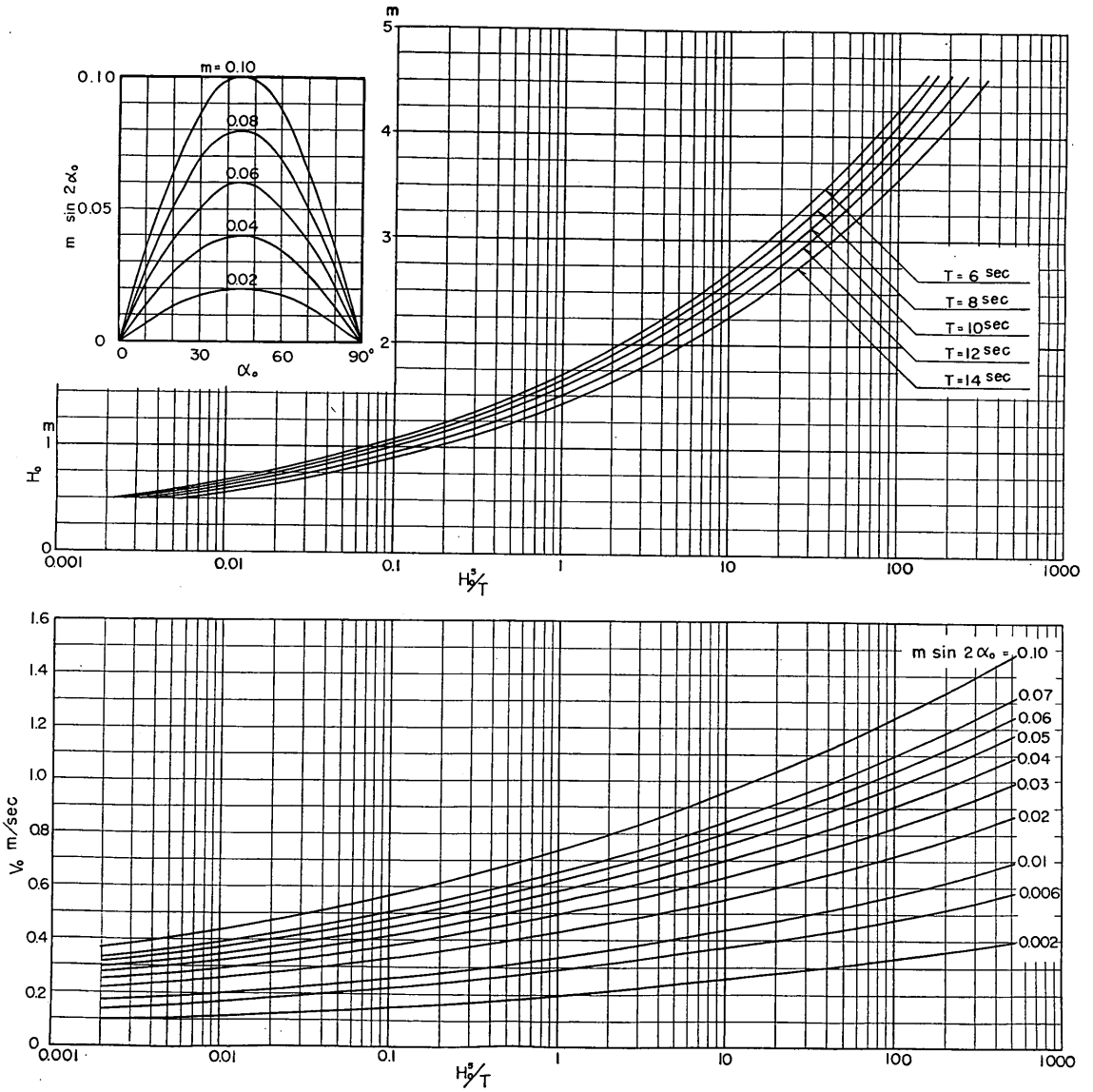
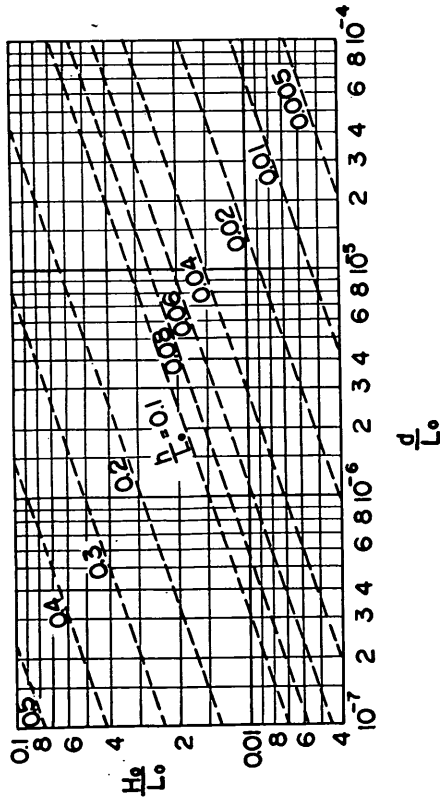


図-7 沿岸流の計算図表

表層移動



完全移動

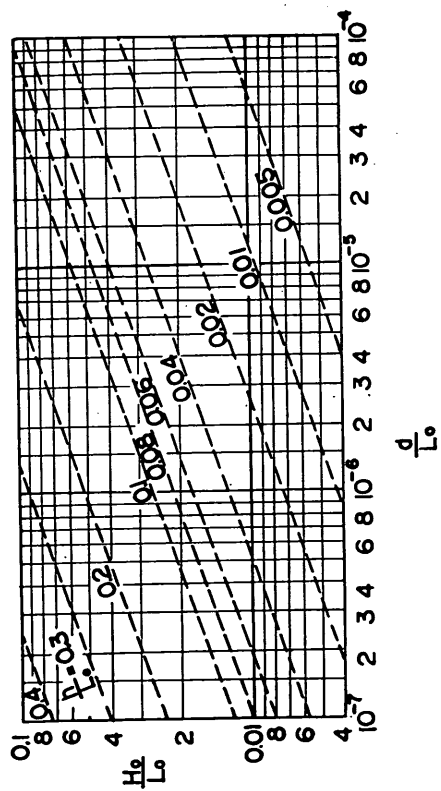


図-8 移動限界水深の計算図表

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

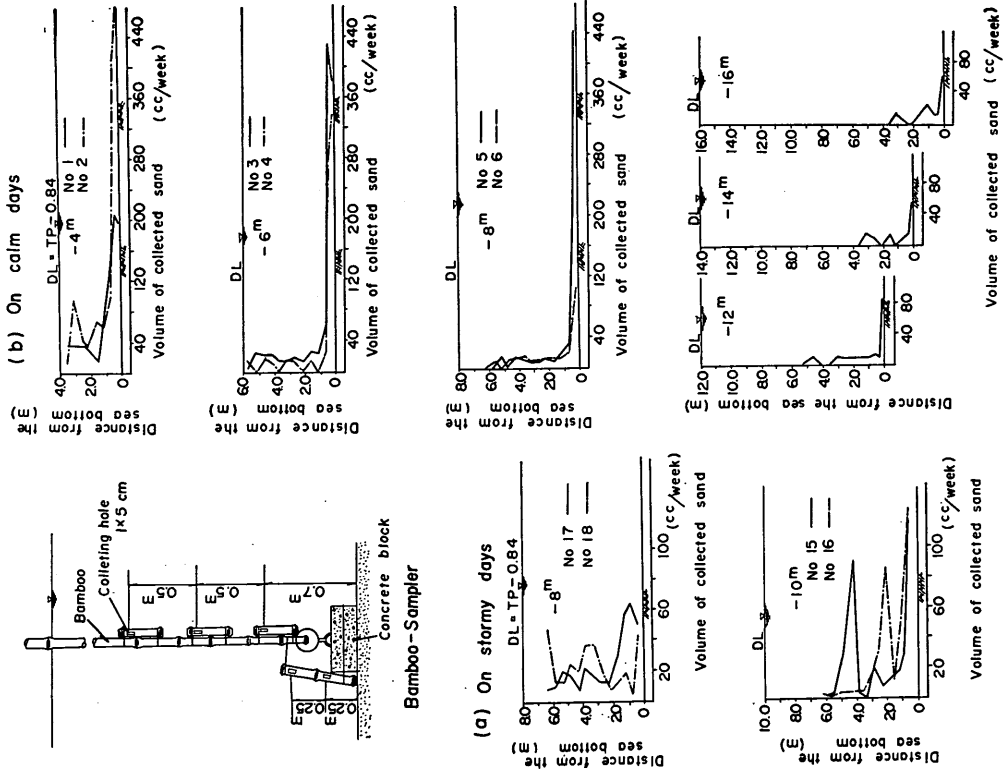


図-9 捕砂竹による浮遊砂捕砂量の鉛直分布

て決まる沿岸流の方向に向う浮遊移動と、離岸流特に rip current によって沖向きに向う浮遊砂とが卓越する。

また、防波堤附近の深浅測量による土量計算の結果（39年7月から40年7月まで）から、年間漂砂量は、海岸にそって北上する漂砂量も南下する漂砂量もそれぞれ60万立米のオーダーであり、両者の差は数万立米であることが推定された。これを沿岸漂砂量 Q (m^3 の単位) と沿岸方向の波の輸送エネルギー成分 E_i ($ton \cdot m/m$ の単位) の関係で示すと次のようになる。

$$Q = 0.3E_i \quad (13)$$

4. 縮尺の選定と実験の方法

4.1 実験施設

鹿島港の漂砂に関する模型実験は、図-10に示す長さ50m、中30m、側壁高80cmのコンクリート屋外水槽で行った。水槽の周囲には、側壁の先端上2.65mまで防風木壁が取付けてある。水槽の中に、縦方向にコンクリートブロックの隔壁を設け、その前面に1:10の勾配でモルタル固定床斜面を作り、この斜面上に平均粒径0.22mmの自然砂を敷いて模型浜とした。底質として細砂を用いた

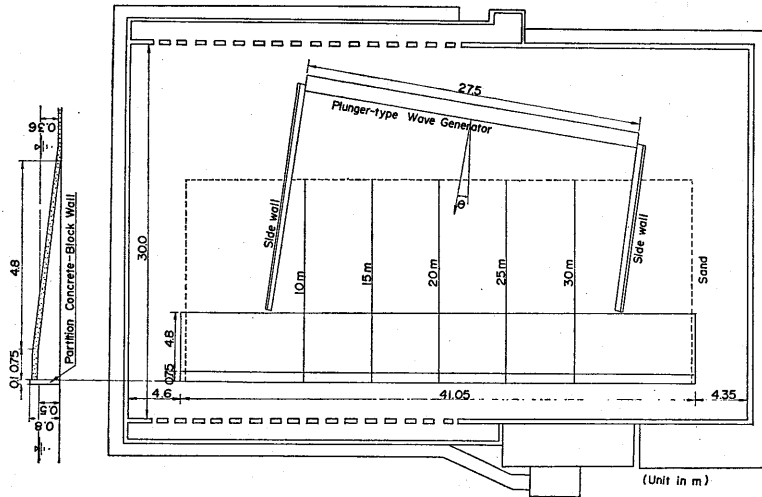


図-10 漂砂平面水槽

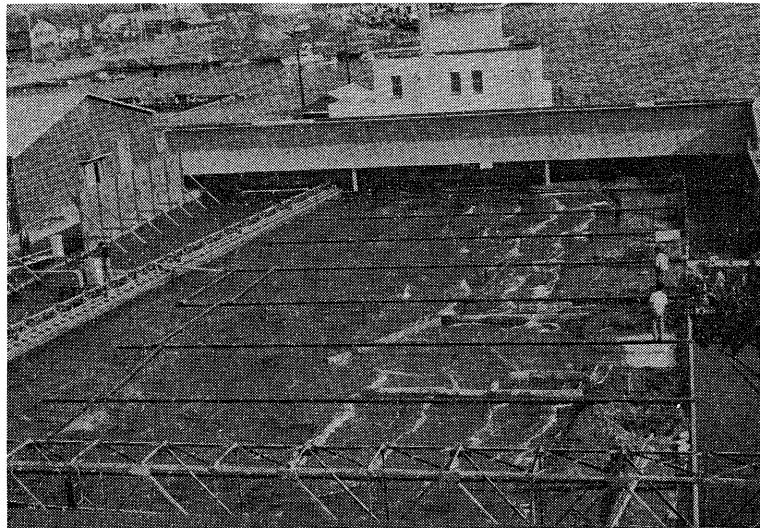


写真-1 実験水槽全景

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

のは、必要とする量が80m³にもなり、価格上他の底質を使用することが困難であったからである。隔壁の両端は、水槽内に生じた流れがその背後を廻って自由に循環出来るように開けてある。

造波装置は、プランジャー式で15馬力のモーター一基で駆動する。造波板の部分は長さ5.5mのもの7基からなっており、分解移動出来る。波高は15cmまで、周期は0.6~2.4secまで起すことができる。また、水槽内の水を廻すための1馬力のモーター6台がとりつけてある。写真-1は、実験施設の全景を示す。

4.2 実験波の決定と縮尺

漂砂は、沖浜帯と破波帯とでその移動機構が異なるので、両者に対して、模型と現地とが同程度の相似をもたせることは一般に困難であることは、すでに述べた。この実験では港内埋没を主たる目的としたので、碎波帯よりも沖浜帯、特に計画港口附近の砂移動に関して模型と現地とを出来るだけ相似にする目的で縮尺を次のように決定した。

まず、図-10に示した模型浜の-36cmの水平部分にAu-198のアイソトープを附着せしめた自然砂を投入し、種々の波を作用させてそのカウント分布を調べた。この結果、周期1.4sec、波高12cmの波のとき図-11に示

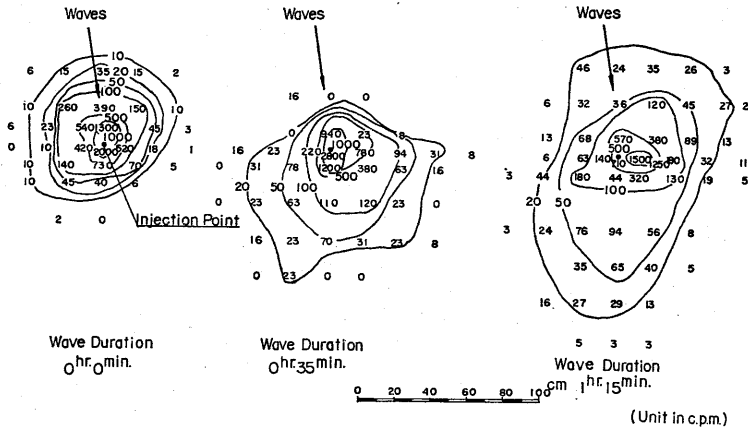


図-11 波高12cm、周期1.4secの波によるアイソトープ砂の移動

すような分布を得た。一方、前章に示した式(2)の表層移動限界は、現地に投入された放射性ガラス砂の分布がある波をうけたとき、投入点附近の最高カウントの位置は変わらないがすべての等カウント線が波向の方向に移動する限界に相当し、式(1)の完全移動限界は、最高カウントの位置も完全に移動する限界に相当する。従って、図-11のカウント分布は、完全移動限界には達していないが表層移動限界は越えているものと判断される。本実験は、港湾埋没を対象とした実験であるのでこの程度の移動が計画港口附近であることが望ましい。

そこで、この波高1.2m、周期1.4secの波をENE(海岸法線に対して8°)から作用させ、その平衡勾配を作った。この勾配断面を図-12の上方に示す。この断面の測線番号は図-10に示す測線に相当し、測線10mは漂砂の下手側に相当する。また、この図の下方には、図-3その他の測量時の現地における代表的な海底断面を示す。模型浜では、第一の沿岸砂洲は汀線から1.5~2.5m

の所にあり、現地浜では、+1.7m(平均満潮位)の汀線から100~400mの所にある。両者の比は一概に決め難いが、模型浜に対しては、平均の2m、現地に対しては大きい値の400mをとると、沿岸砂洲の汀線からの位置に対する模型縮尺は1/200となる。先にも述べたように、沿岸砂洲の内側と外側とは底質移動形式が異なるので、漂砂の観点からはこの汀線の位置は重要な要素である。従って、模型全体の水平縮尺もこれと同じく1/200と定めた。この平面縮尺によって防波堤の模型をもうけると、第一期計画の港口は、図-1から知れるように-14~16mとなる。従って、港口水深に対する縮尺は36/1,500=1/40となる。

以上のような実験の考察から、本移動床模型の縮尺は水平1/200、垂直1/40と定めた。

実験波については、上述の考察からは波高12cmを用いるべきであり、はしがきに述べた41年までの実験については、そのようにした。しかし、42年に行ったこの実験

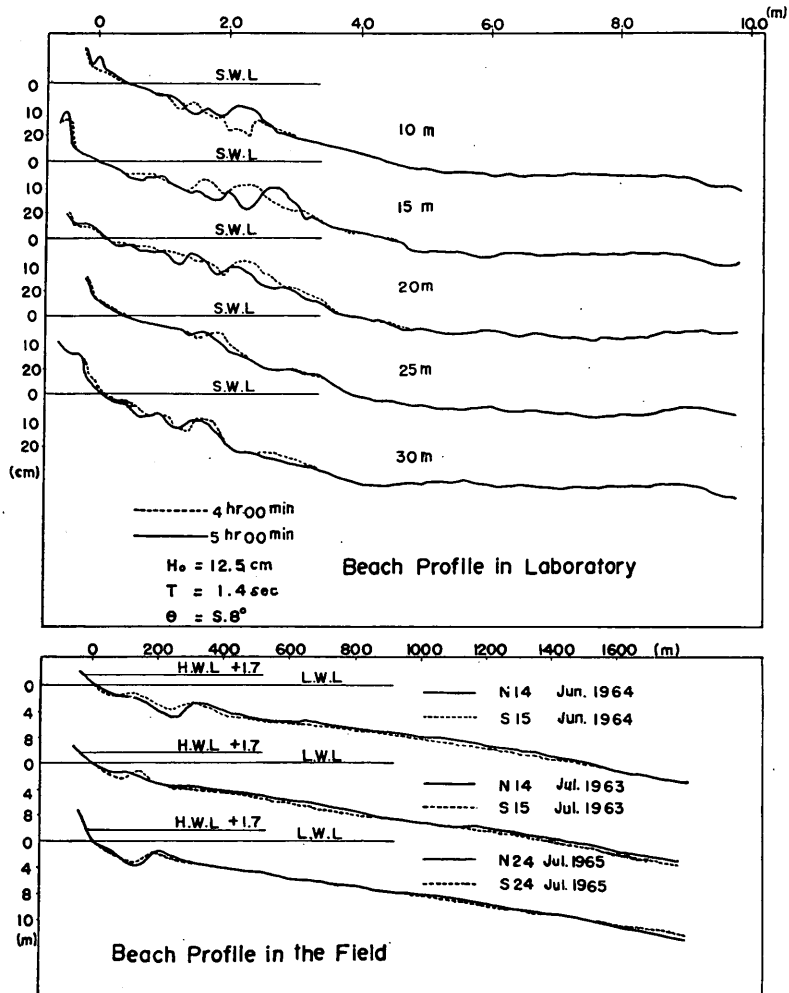


図-12 模型と現地における海底勾配

においては、もう少し底質移動を高める目的で波高14 cm, 周期14sec (水深36cmで)を用いた。この実験波を用いて試みに、図-8から移動限界を計算すると次のようになる。」

模型波の換算沖波波長は

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56 \times 1.4^2 = 3.06 \text{ m}$$

相当沖波の波形勾配を求めるために

$$h/L_o = 36/306 = 0.118$$

この値を用いて微小振幅理論より $H/H_o = 0.9214$ であるから、

$$H_o = 14/0.92 = 15 \text{ cm}, \quad H_o/L_o = \frac{15}{306} = 0.0497$$

$$\text{また, } d/L_o = \frac{0.0022}{306} = 7.2 \times 10^{-6}$$

従って、図-8から完全移動限界に対して、この d/L_o と H_o/L_o を用いて

$$h/L_o = 0.1 \quad \therefore h = 30 \text{ cm} \quad (14)$$

同図の表層移動限界に対して

$$h/L_o = 0.18 \quad \therefore h = 0.18 \times 3.06 = 55 \text{ cm} \quad (15)$$

もちろん、模型と現地では、底面境界層に関して相違があるので、現地観測から得られた図-8をそのまま、模型に適用することは、厳密には問題はあるが、図-11も

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

考慮すれば、上記の計算はほぼ妥当であり、水深-36cmの港口部分の底質は、表層移動と完全移動の間にあると考えるとよいであろう。

4.3 実験方法と種類

図-13は、鹿島港海岸の防波堤より十分離れた地点の現地海浜の平均断面に対する模型勾配(水平縮尺1/200、

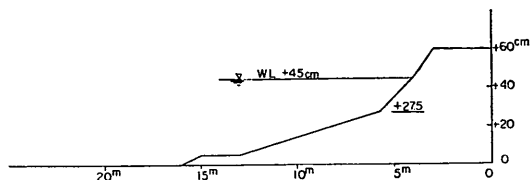


図-13 初期海浜模型断面

鉛直縮尺1/40)である。この断面に従って一様な模型浜を作り、波高14cm、周期1.4sec、波向ENEの波を10時間作用させて得た平衡海浜を図-14に示す。この図の下方に示す平面縮尺は現地に対するものであり、模型に対しては200mが1mに相当する。また、図-15と16は、それぞれこの平衡海浜に対するフロートによる底層流と波高分布を示す。

これらの図が現地と比較してどの程度のずれがあり、それが何によるものかを考えて見る。まず、本実験において、波の屈折現象が現地と相似であるべきとして、周期の縮尺は垂直縮尺の平方根にとるべきであるから、模型波を現地波に換算すると、

$$H = 0.14 \times 40 = 5.6 \text{ m} \quad T = 1.4 \times \sqrt{40} = 8.9 \text{ sec}$$

となる。一方、現地における計画港口水深において底質移動の限界波高を図-8を用いて求めると ($d = 0.15 \text{ m}$, $h = 15 \text{ m}$, $T = 9 \text{ sec}$)

$$\begin{aligned} \text{表層移動に対して} & \quad H = 2.2 \text{ m} \\ \text{完全移動に対して} & \quad H = 4.0 \text{ m} \end{aligned} \quad (16)$$

となる。

すなわち、模型波を単に Froude の相似によって現地に換算した値は、模型波が模型内の計画港口水深で示す底質移動の激しさと同程度の移動を示す現地の波高より大きい値となる。この現地の波は(16)式から3m以上4m未満の波高(強いて云えば3.5m程度)と推定される。したがって、港口附近の底質移動に関して合理的に決定された $H = 14 \text{ cm}$, $T = 8.9 \text{ sec}$ は、砕波帯に対しては、過度な沿岸流速を生ぜしめることとなり、砕波帯での底質移動は、現地より激しいものとなった筈である。このため、図-14の模型地形は図-3と比較すると、砕波帯内の地形はより複雑であり沿岸砂洲の出入りが激しい。図-16に示される波高分布の不規則性もこの地形変化の不規則性にあざかったことも確かであろう。先に述べたように、模型縮尺の決定に使用した波高より多小大きい波高を実験波と決定したことは沿岸砂洲を図-3よりも沖側に移動せしめたことも確かであろう。さらに、図-15に示した沿岸流のほぼ平均の値 20 cm/sec を現地に換算すると約 1.3 m/sec となるが、これは、現地で波高3.5m、周期9sec、海岸法線に対する波向 8° 、砕波帯の平均海底勾配0.03として図-7から得られる 50 cm/sec より大きい。

(歪のある模型内での沿岸流速は現地と比較して一般に大きくなりがちであるけれども)。

以上、要するに、本模型実験は、港口附近の砂移動に関しては、現地の波高3.5m程度(周期9secとして)の下での砂移動に相当するが、砕波帯内の移動はそれよりずっと大きい波と周期に相当する移動を示すものと考えられる。ともかく、このようにして作られた模型平衡海浜に防波堤その他を附加して表-1の現地時期に対する実験を行った。本報告では、この中実験1から4までについて現地観測資料と対比しながら模型実験の再現性を検

表-1 実験の種類

番号	対象時期	波の作用時間	実験開始時の海底地形
1	41年夏	4時間	実験波に対する平衡地形
2	42年冬	4時間	実験1の最終地形
3	43年夏	4時間	実験2 "
4	外泊地航路開さく時(防砂堤なし)	4時間	実験3 "
5	外泊地航路開さく時(防砂堤あり)	4時間	実験3 "
6	第1期計画より更に南防波堤200m延長	8時間	実験5 "

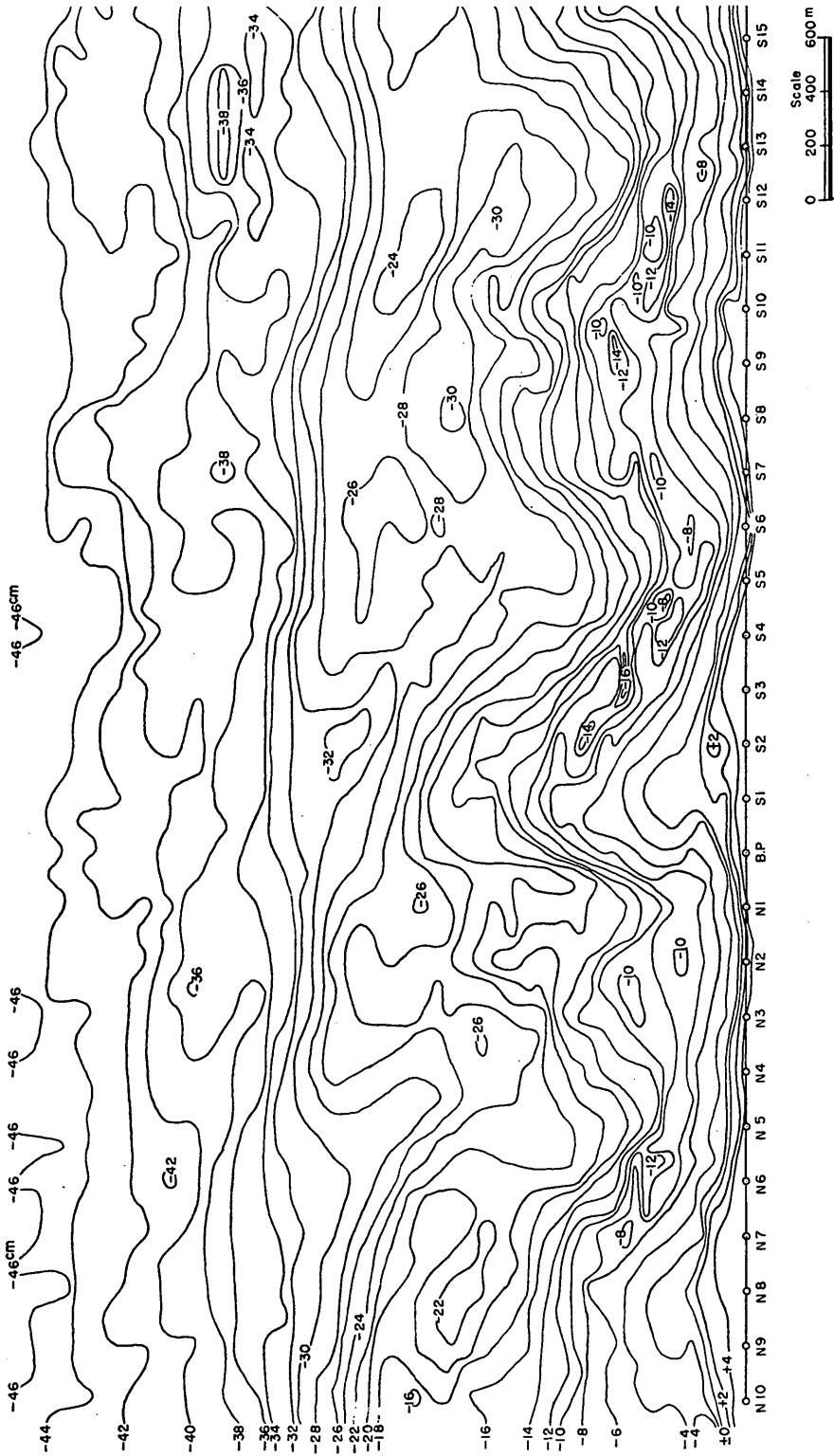


図-14 実験波（波高14cm，周期1.4sec）による平衡海浜地形

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

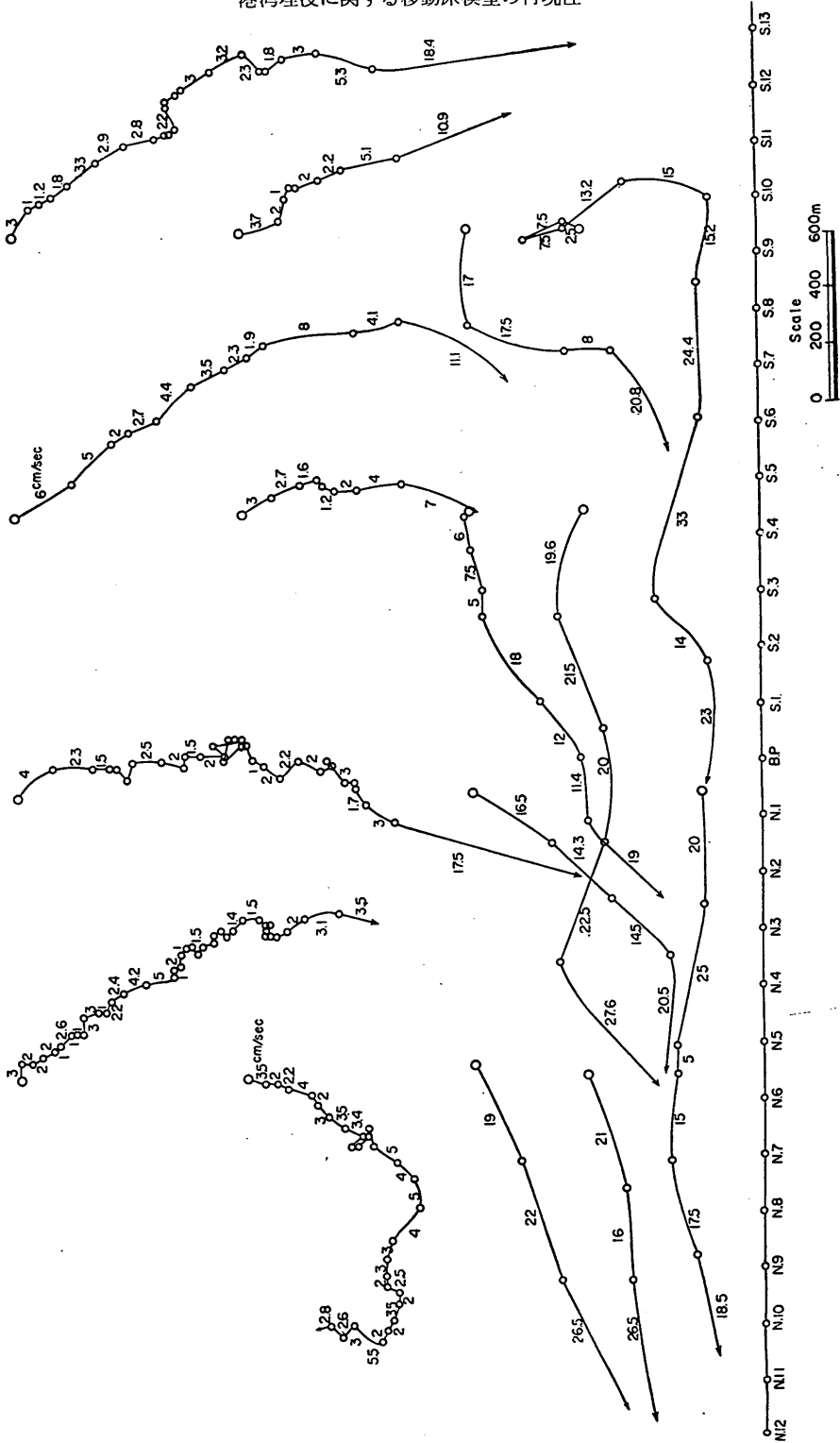


図-15 平衡海浜地形に対する底層流

佐藤昭二・田中則男・入江功・平原淳次

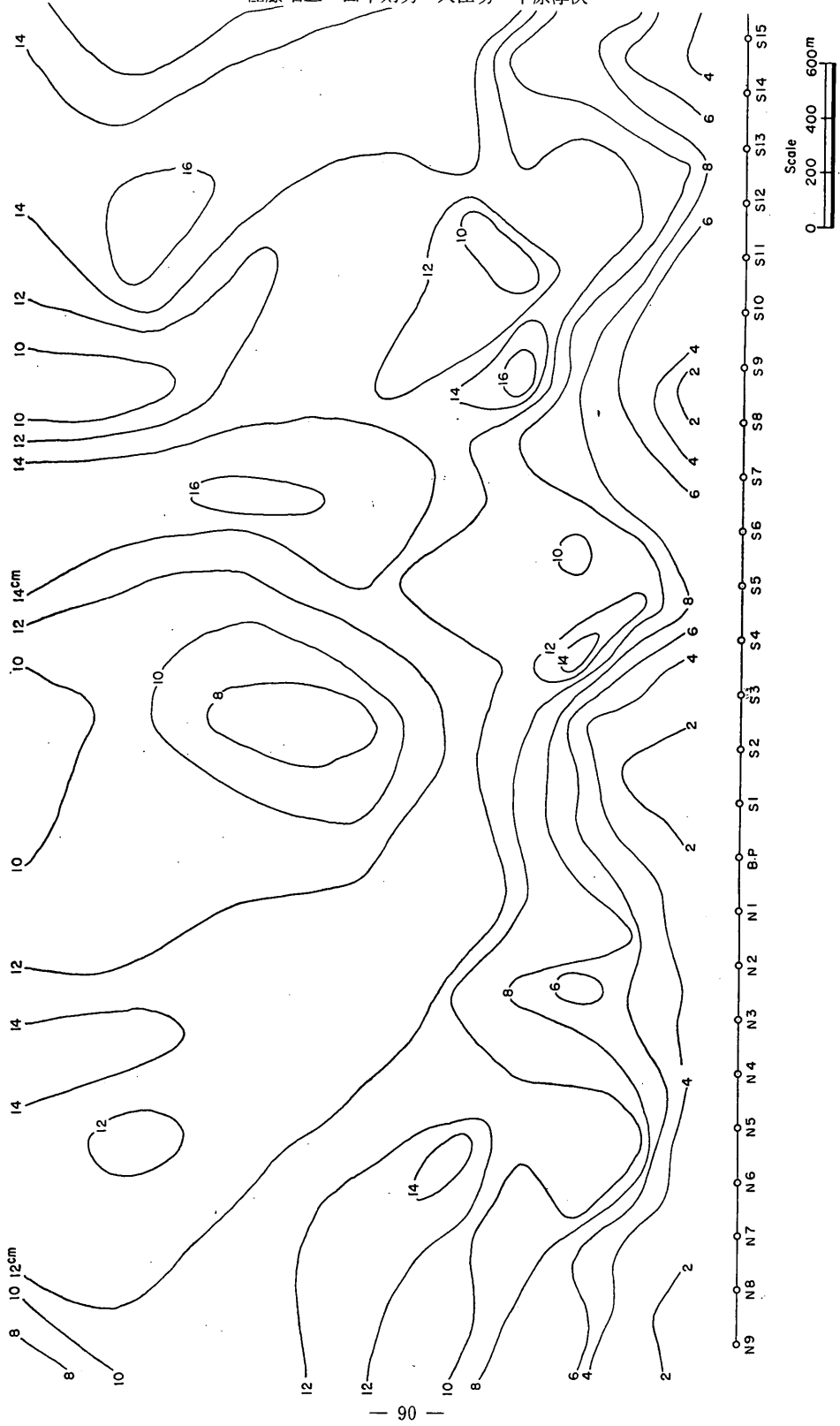


図-16 平衡海浜地形に対する等波高線

港湾埋没に関する移動床模型の再現性



写真-2 船溜南防波堤附近（実験4）

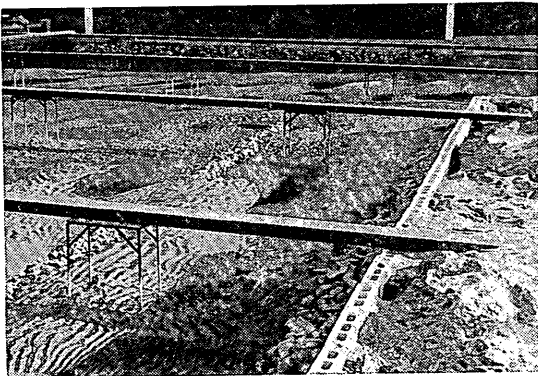


写真-3 南防波堤南側の潜堤と護岸（実験6）

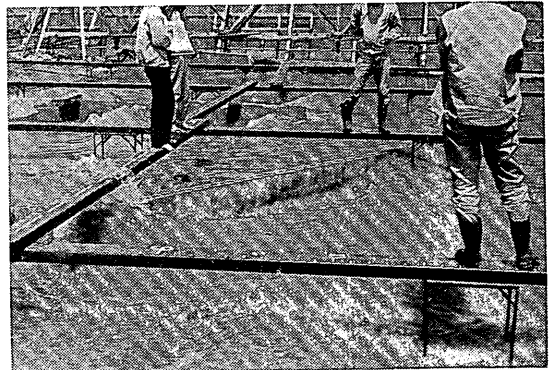


写真-5 港口附近（実験3）



写真-4 中央航路部分（実験4）



写真-6 南防波堤屈曲部附近（実験3）

佐藤昭二・田中則男・入江功・平原淳次

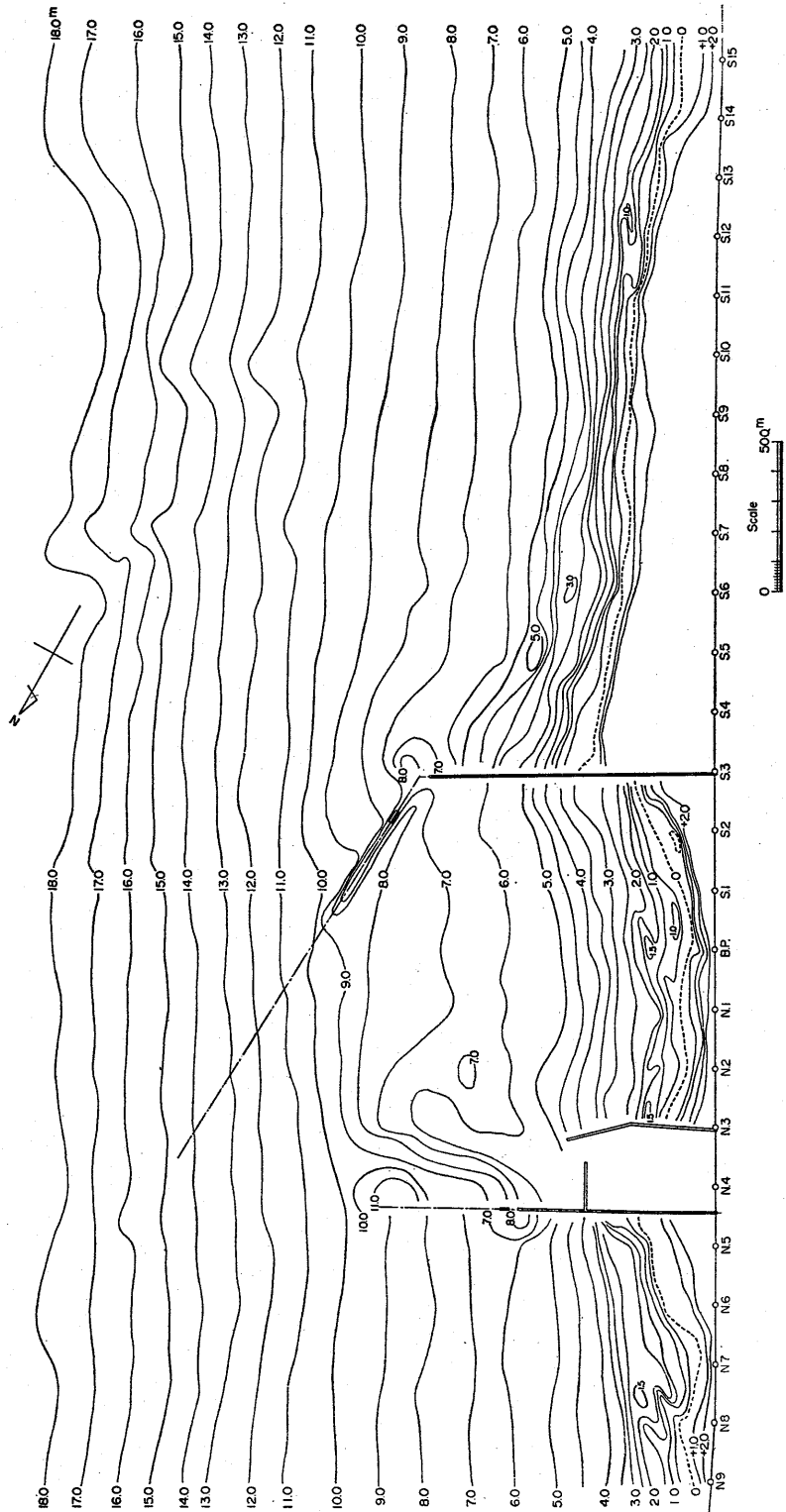


図-17 41年夏の深浅図(8月29~9月1日測量)

佐藤昭二・田中則男・入江功・平原淳次

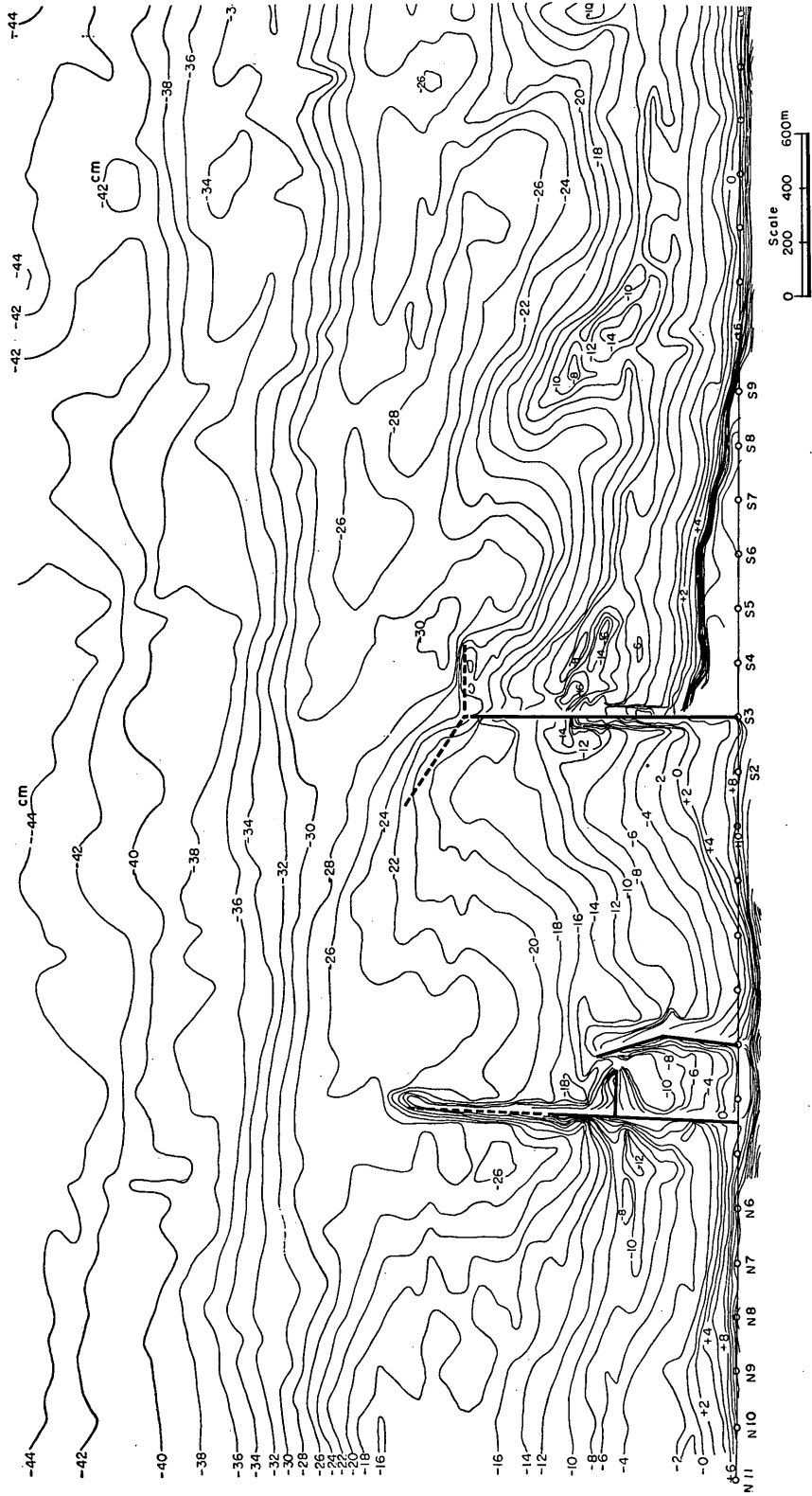


图-19 41年夏期に対応する模型地形(実験1)

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

討し、実験5、6については参考程度にのべるものとする。

なお、本実験での波高分布は、物指を水面附近に鉛直に手で下げて目測した波高によった。底層流は、水を満したプラスチックの径15cmの球と水を入れぬ径7cmの球をテングスで連結したものを投入してその移動を測定した。この場合、水を満した球が底層近くを移動するが、それが水面上からよく見えるときには、径7cmの球を取りつけないこともあった。表層流は、水を満さない球のみを投入して観測した。海浜地形は、目もり杵を軽く海底に立てレベル測量した。底質移動の状態を知るためにAu-198を附着したアイソトープ砂も用いた。

防波堤の模型はコンクリートブロックを積み重ね、その両側に径数cmの碎石を基礎捨石マウンドの形に積んだ。従って、模型防波堤は、完全に不透過である。基礎捨石マウンドのみ施工済の部分には、この碎石のみを積み重ねた。写真-2から5は模型の状況を示す。

5. 再現性の検討

5.1 昭和41年夏の防波堤配置に対する実験(実験1)

図-17は、41年8月29日から9月1日の間に行なわれた深淺測量の結果を示す。南防波堤の南側には、40年7月から中央航路からの浚渫土砂が排出され始めた。ただし、浚渫船は、船溜から浚渫しつつ陸側に入ったので、N3からS3の間の浜の部分は外泊地航路浚渫が始まる43年夏まで残っていた。一方、模型実験については、図-18は前述した平衡海浜の図-14に図-17に見られる防波堤および防波堤南側の埋立部分を附加した状況を示す。この図-18の模型に波を4時間作用した後の地形変化が図-19である。これらの図で等深線はcm単位である。

まず、この時点における防波堤の主要な効果を前述した図-3と図-17の深淺図の比較から推定すると次のようである。

- (1) 港内の汀線は、南防波堤寄りのS1～S2の間で著しく前進し、北側寄りでは幾分後退した。
- (2) 港内の水深-5～-8mの間の等深線の間隔が著しく広がった。すなわち、港内中央部分の土砂堆積が著しい。
- (3) 北防波堤港内側に沿って著しい深掘れが起り、船溜南堤の先端方向に-6mの等深線の著しい突出が見られる。このような傾向は、図-17の北防波堤の破線で示した部分に基礎マウンドを行ったときから顕著に見られ始め、41年5月の測量にも明瞭に見られる。

(4) 南防波堤外側については、汀線附近は、浚渫した埋立土の影響であるが、この防波堤の屈曲部附近で等深線が沖側に張り出している。

以上のような現地特性を模型実験の図-18と19の比較から再現性を調べると次のようである。

- (1) 港内汀線は、現地と同様、南防波堤寄りの方が前進し、北側寄りでは幾分後退した。
- (2) 港内中央部は、現地同様著しく堆積した。
- (3) 北防波堤に沿う深みは、現地ほど著しくはないがやはり発生し、現地の船溜南堤沖の-6mの等深線の突出は、同じ附近における-22cmの等深線のわずかな突出として見られるが、これも現地ほど明瞭ではない。
- (4) 南防波堤外側では、現地より埋立部分の汀線は後退したが、屈曲部附近での等深線の沖向きへの張り出しは、同様に存在する。

なお、模型に対する地形図にある太い点線は基礎捨石のみを施工した部分である。屈曲部から南向きに画いてある太い点線の部分は、天端高-5mの捨石による潜堤である。

さて、上述した等深線の変化傾向は、現地と模型とでは、ほぼ一致しているが、等深線の配列そのものについては、図-17と19の比較から知れるように大分異っている。すなわち、港内沖浜帯の等深線が、模型では現地より著しく前進している。これは、図-18から知れるように平衡海浜そのものがすでにこのようであったためであり、模型における等深線変化のずれによるものではない。港口附近では、北防波堤寄りでは現地より巾広い深みが見られるが、南防波堤寄りでは現地と同様に等深線が沖向きに張り出した。

以上の地形変化の特性をより明らかにするために、模型内における波高分布と底層流の測定結果を図-20、21に示す。まず、図-18からは、北防波堤の先端部基礎捨石マウンドの内側にそった等波高線の陸側への侵入が見られる。これが、この部分にそう深掘れの一原因であろう。しかし、模型ではともかくとして現地におけるような顕著な深掘れはこれのみによっては説明し切れないであろう。現地では、この部分にそって強い沖向きの離岸流がしばしば見られたという。底層流については、まず港内中央部にループが存在する。これが港内中央部が堆積した一つの原因と見られる(この部分の波高は、その周辺より比較的小さい)。南防波堤の先端南側に投入したフロートは、斜めに沖向きに流れ出た後、港内に入

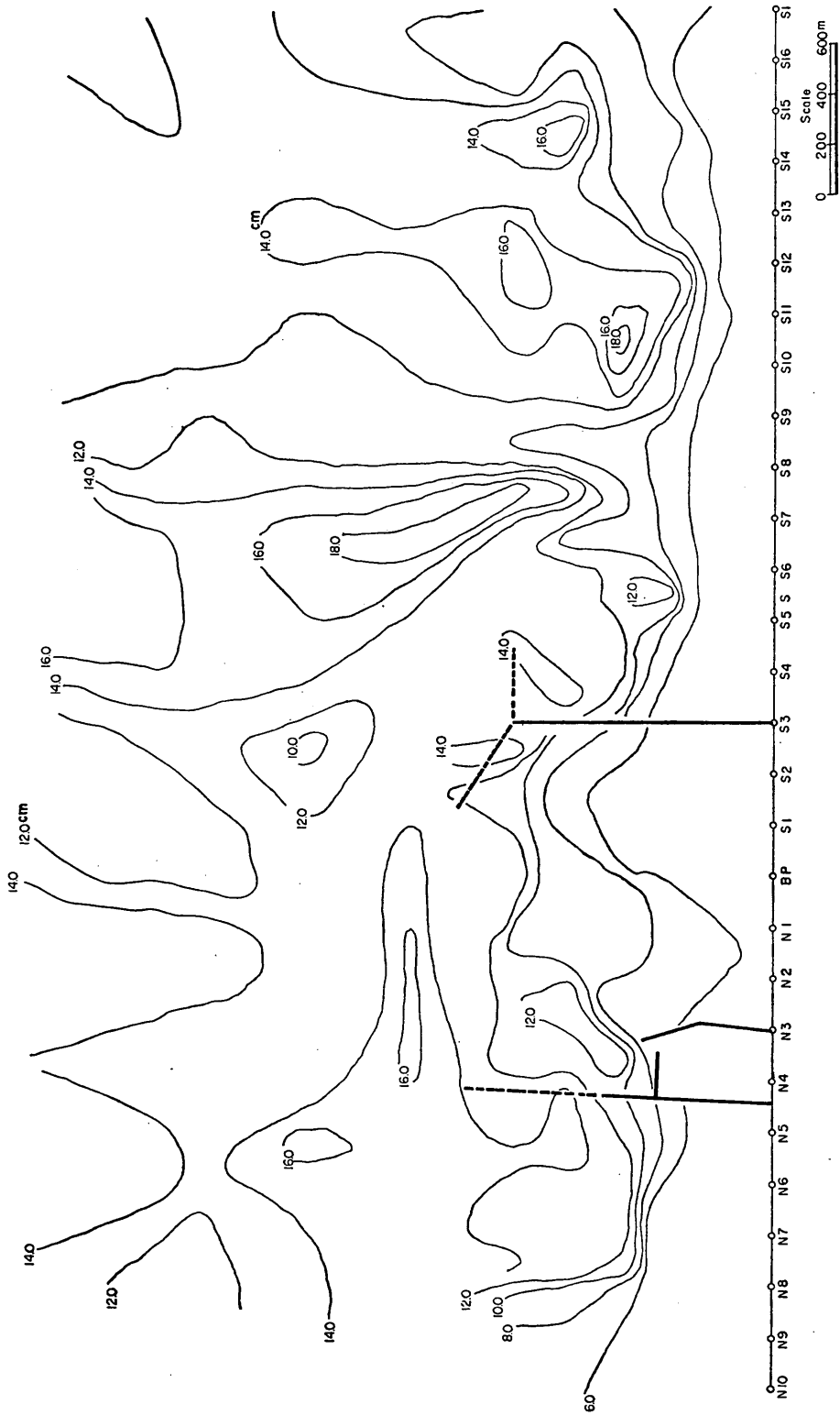


図-20 波 高 分 布 (実験1)

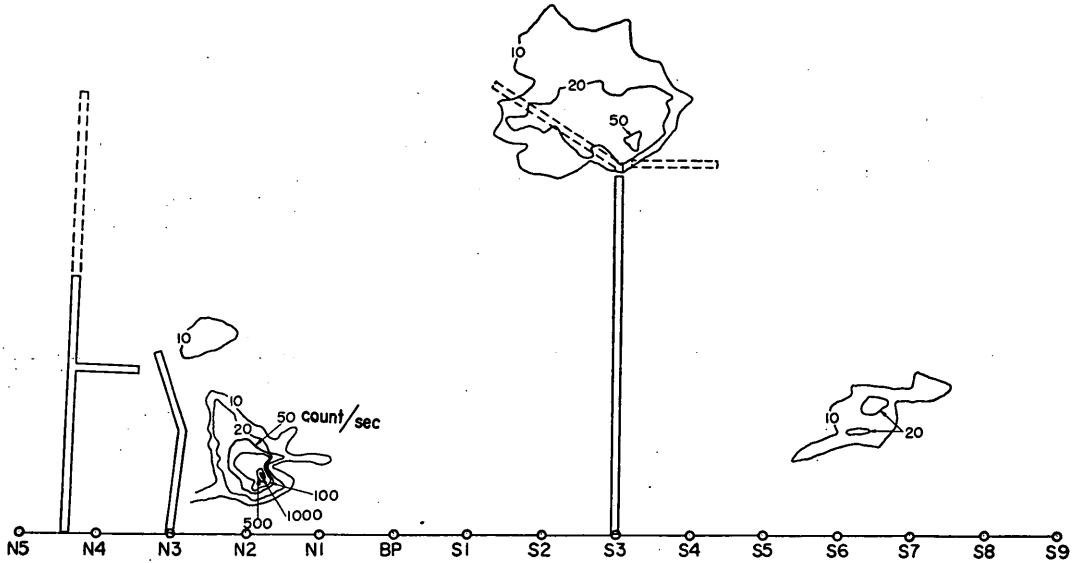


図-23 波作用2時間30分後の放射性砂の分布（放射性砂投入後時間）

っている。この斜めの沖向きの流れが南防波堤屈曲部附近の等深線の沖向きへの張り出しと対応する。図-22はこの実験の波作用1時間30分後に放射性砂を投入し、その直後に測定したカウント分布であり、図-23は、波作用2時間30分のときの分布である。すなわち、図-22から図-23の間に波が1時間作用したことになる。アイソープ砂の移動方向は、図-21に示したその地点の底層流の方向と一致している。測点N2の近くに入れたアイソトープ砂は、南防波堤方向よりも船溜南堤にそって沖向きに移動している。これが、その沖の土砂堆積の一部となったであろうことは云うまでもない。

5.2 昭和42年冬の防波堤配置に対する実験(実験2)

図-24は、42年1月12日から27日の間に行われた深浅図である。南防波堤の南側水深-8m付近には、更に潜堤が増設され、汀線附近の排出土量も更に増加した。図-25は、実験1における波作用4時間後の海底地形すなわち、図-19の中に、図-24にある防波堤、潜堤および排出土砂を追加したこの実験の初期地形を示す。これに、波を4時間作用した後の海底地形が図-26である。

図-24を前述した41年夏の深浅図すなわち、図-17と比較すると42年冬期の地形変化について次のことがわか

表-2 41年夏(図-17)と42年冬(図-24)の等深線の基線からの距離比較

測線	等深線	42年冬	41年夏	差
N 1	-12m	1,480m	1,550m	- 70m
	11	1,370	1,440	- 70
	10	1,280	1,350	- 70
	9	1,200	1,260	- 60
	8	1,070	1,170	- 100
	7	730	910	- 160
	6	570	700	- 130
	5	450	500	- 50
	4	350	400	- 50
	3	300	330	- 30
	2	270	200	+ 70
1	210	160	+ 50	
± 0	150	120	+ 30	
S 2	- 8	1,010	1,040	- 30
	7	900	970	- 70
	6	700	780	- 80
	5	590	600	- 10
	4	480	500	- 20
	3	450	370	+ 80
	2	390	300	+ 90
	1	350	220	+ 30
	± 0	260	200	+ 60

る。

(1) 港内の汀線附近の等深線は全体的に前進し、南防

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

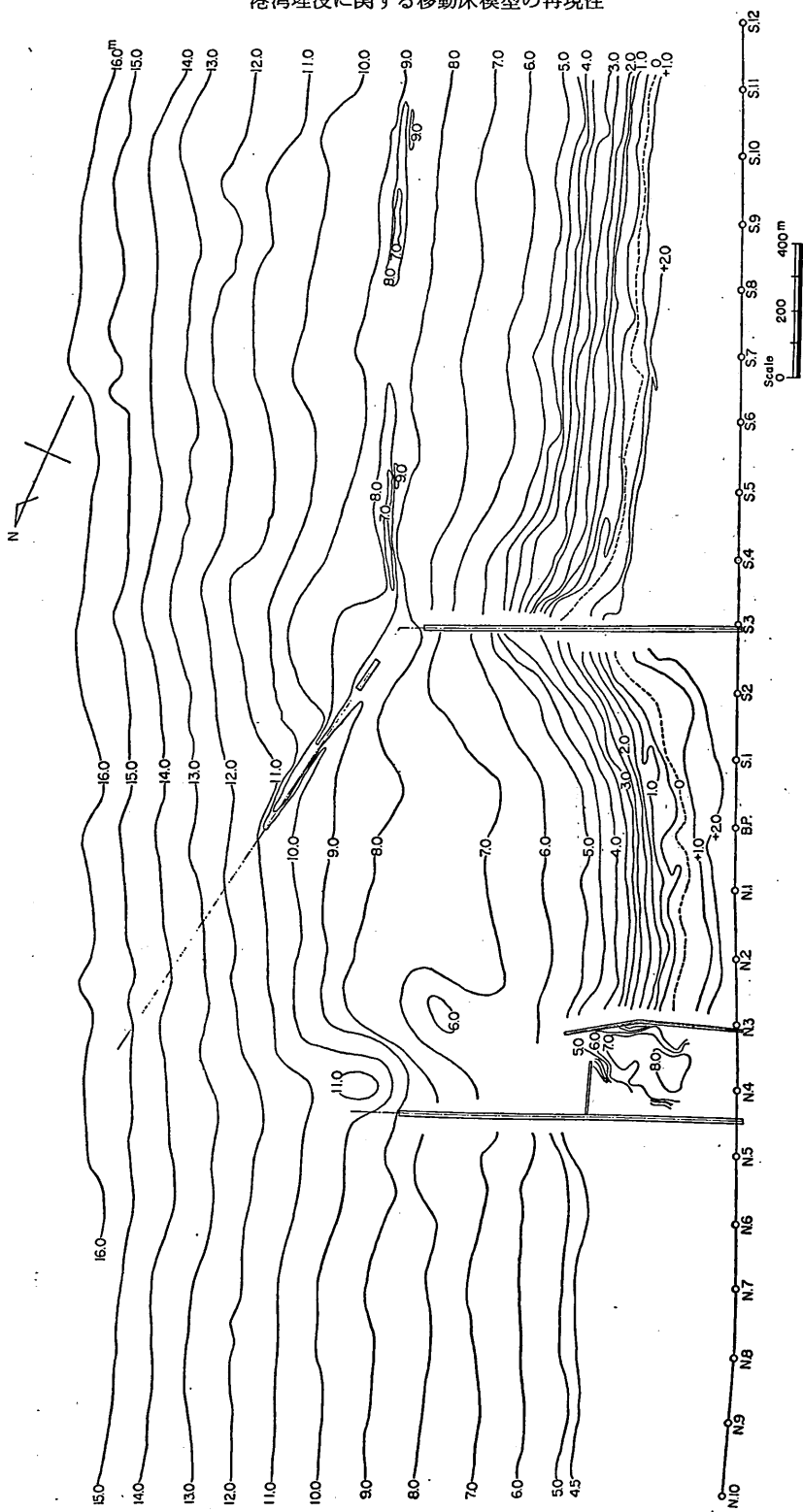


図-24 42年冬の深淺図(42年1月12日~27日測量)

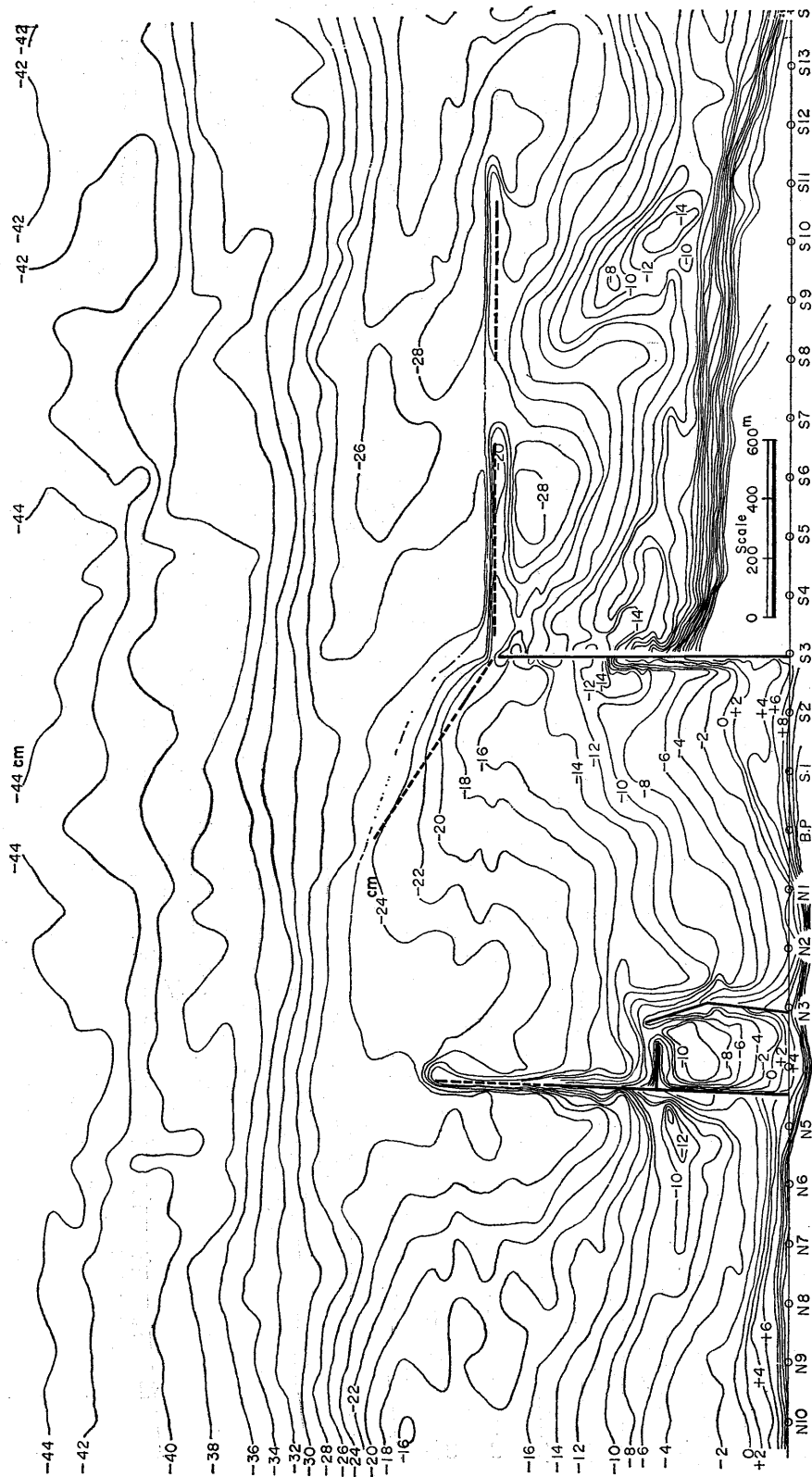


図-25 42年冬に対応する実験の初期の地形(実験2)

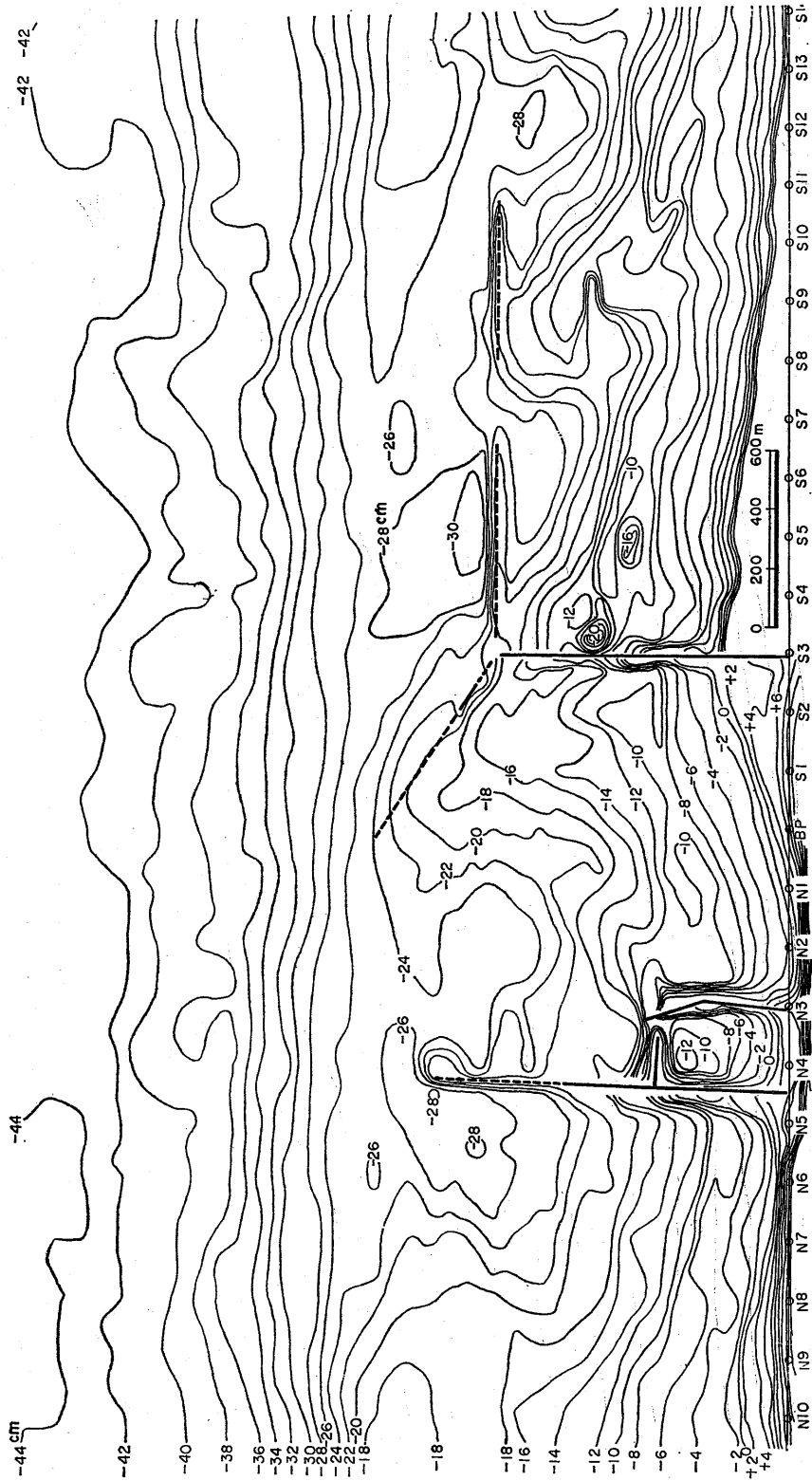


図-26 42年冬に対応する模型地形(実験2)

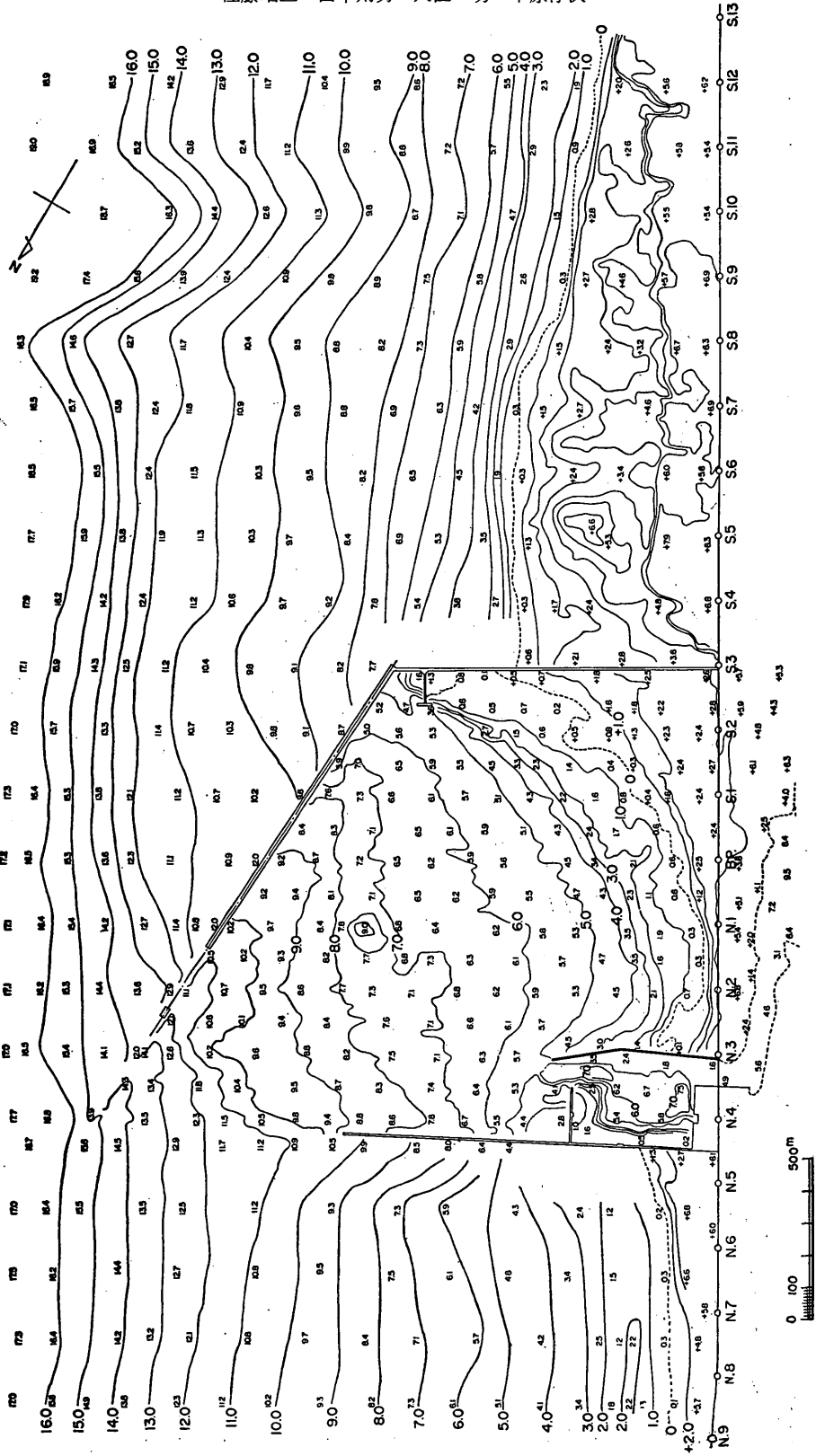


図-27 43 年 夏 の 深 浅 図 (5 月 25 日 ~ 6 月 18 日 測 量)

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

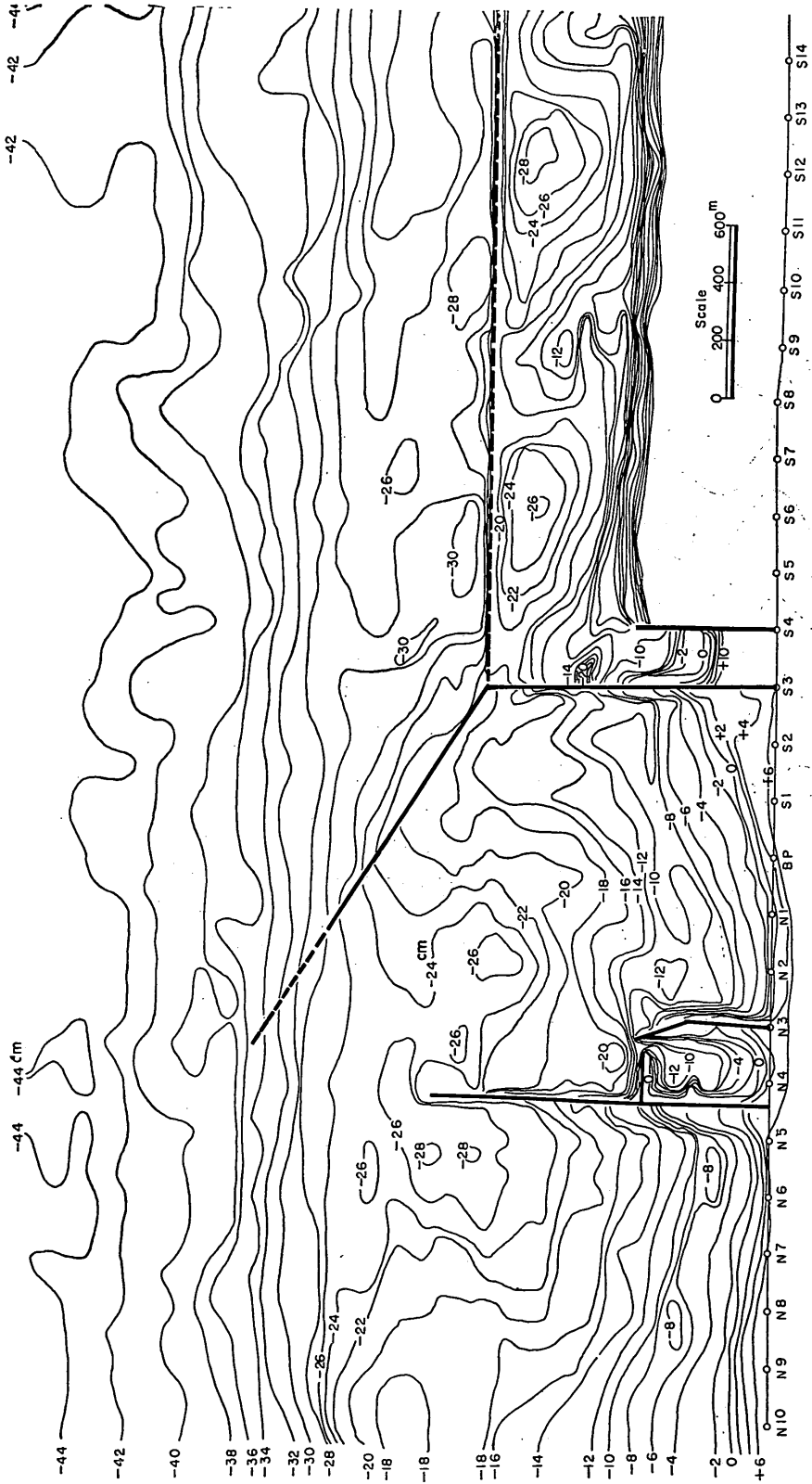


図-28 43年夏に対応する実験の初期地形(実験3)

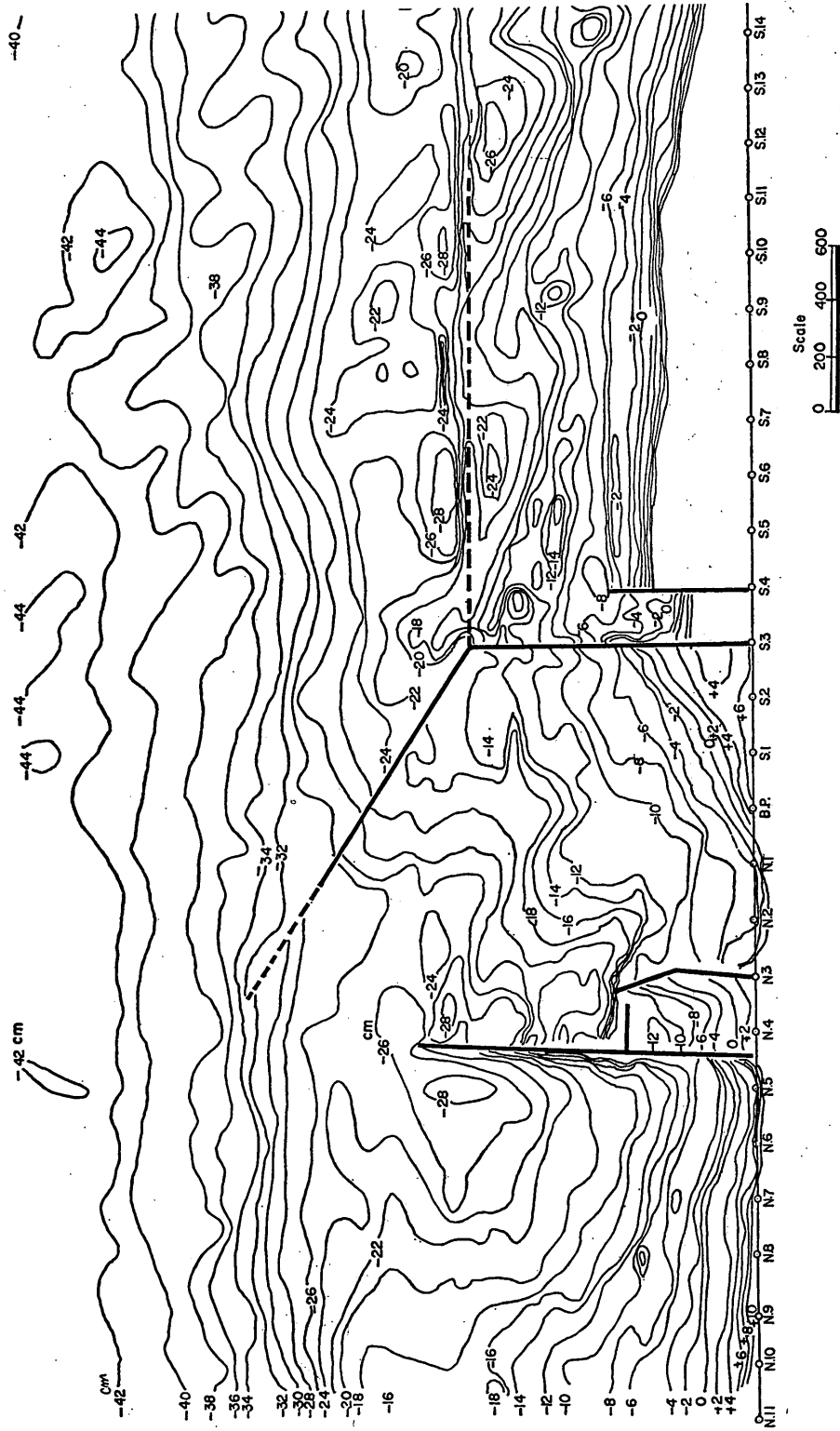


图-29 43年夏に対応する模型地形(実験3)

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

波堤近くでその傾向はもっと著しい。

(2) 港内の沖浜帯の等深線は夏より後退している。これを明らかにするため海岸線にほぼ平行に走る基線からの各等深線までの距離をN1とS2測線について示したものが表-2である。N1, S2測線共に沖浜帯の等深線は41年夏より42年冬が陸側に後退し、汀線近くの等深線は前進している。そうして、その沖浜帯等深線の後退量は、N1測線上がS2より大きく、特に-8~-5mの線が著しい。汀線附近の等深線の前進は、N1よりS2測線上で大きい。すなわち、沖浜帯は、全体的に浸蝕し、特に中央部で著しく、汀線附近は全体的に堆積し南防波堤寄りほど大きい。

(3) 41年夏に存在した北防波堤にそう深掘れ、船溜南堤沖の-6m線の沖への突出は、42年冬期にも見られるが、その規模は多少小さくなったようである。

(4) 南防波堤の屈曲部附近での等深線の沖側への張り

出しは、41年夏より大きくなった。

一方、模型に対しては、図-25と26の比較から次のことがわかる。

(1) 港内の汀線はわずかながら全体的に前進したが、その傾向は現地と反対に船溜南堤寄りが大きい。

(2) 現地の場合と同様に、N1とS2測線について波作用前と作用後の等深線の位置を比較したものが表-3である。-8~-10cm(現地換算-3.2~4m)以深の沖浜等深線はS2の-12cmと-10cmの等深線を除いて現地同様陸側に後退している。特にN1測線上の-22, -20cmの線が著しい。-60cm(現地換算-2.4m)以浅の汀線近くの等深線は、N1測線上では現地同様沖向きに前進しているが、S2測線上では-2cm線まで後退している。すなわち、沖浜帯は、南防波堤に近い一部を除いて現地同様全体的に浸蝕され、特に中央部(現地よりは多少沖側)で著しい。

(3) 北防波堤にそう深掘れは、図-25との比較において図-26は一層はげしくなり、その南側に存在する浅瀬も発達したが、現地と比較すれば、その形状は巾広く、明りょうではない。

(4) 南防波堤の屈曲部附近の等深線の沖への張り出しは、現地同様更に発達した。

以上、等深線の変化の傾向は、現地と模型とで、南防波堤に近い一部をのぞいてほぼ一致している。現地では南防波堤の屈曲部から陸側の部分は、捨石又はブロック積堤であったためその南側に排出された浚渫土砂の一部が、これを透過して港内へ浸入していた。一方、模型ではこの部分も完全に不透過であったので、このことが南防波堤に近い部分の汀線近くの等深線変化傾向の不一致をまねいたものと思われる。しかし、北防波堤近くの変化傾向は、模型と現地とではずれがあった。

5.3 昭和43年夏の防波堤配置に対する実験(実験3)

図-27は、43年5月25日から6月18日の間に行われた深浅測量の結果を示す。図-24では南防波の屈曲点は開いているが、図-27では閉じている。この屈曲点の閉そくは、42年6月14日~24日の間に行われた。なお、この屈曲点から沖側は基礎捨石マウンドをもつケーソン堤であり、陸側は、先にものべたように捨石又はコンクリートブロック堤である。図-27では、南および北防波堤は更に延長され、南防波堤南側海岸への中央航路からの浚渫土砂排出も更に増加した。図-28は、実験2の終了後すなわち、図-26の模型の中に、図-27に従って防波堤その他の延長部を追加した模型地形を示す。これに波を4

表-3 模型における波作用前(図-25)と波作用後(図-26)の港内等深線の基線からの距離比較

測線	等深線	波作用前	波作用後	差
N 1	-24cm	496cm	695cm	+ 1cm
	22	416	630	- 214
	20	406	556	- 150
	18	320	330	- 10
	16	260	294	- 34
	14	256	265	- 10
	12	219	230	- 16
	10	160	202	- 42
	8	120	102	+ 18
	6	80	80	0
	4	54	50	+ 4
	2	26	22	+ 4
± 0	14	- 5	+ 19	
S 2	-18	544	550	- 6
	16	470	490	- 20
	14	395	418	- 23
	12	370	354	+ 16
	10	330	326	+ 4
	8	210	230	- 20
	6	192	205	- 13
	4	164	180	- 16
	2	132	138	- 6
	0	115	110	+ 5
	+ 2	97	92	+ 5

時間作用させた後の海底地形が図-29である。

図-27を図-24と比較すると、この間の現地の海底地形変化について次のことがわかる。

- (1) 港内汀線は、船溜南堤よりが後退、南防波堤寄りが更に前進した。
- (2) 港内各等深線の配列は著しく変化した。これを明らかにするために、前と同様に基線から各等深線までの距離をN1, S2およびN3測線上について比較したものが表-4である。N1測線上では-6m以深の等深線が前進、-5m以深は後退した。特に-7m以深および汀線附近の等深線においてその変化が著しい。S

表-4 42年冬(図-24)と43年夏(図-27)の等深線の基線からの距離比較

測 線	等深線	43年夏	42年冬	差
N 1	-11m	なし	1,370m	
	10	1,420m	1,280	+ 140m
	9	1,290	1,200	+ 90
	8	1,180	1,070	+ 110
	7	990	730	+ 260
	6	580	570	+ 10
	5	390	450	+ 60
	4	310	350	- 40
	3	260	300	- 40
	2	220	270	- 50
	1	110	210	- 100
	± 0	50	150	- 100
+ 1	40	100	- 60	
2	30	70	- 40	
S 2	- 8	なし	1,010	
	7	なし	900	
	6	1,060	700	+ 360
	5	810	590	+ 220
	4	750	480	+ 270
	3	700	450	+ 250
	2	640	390	+ 250
	1	580	350	+ 230
	± 0	470	260	+ 210
	+ 1	290	160	+ 130
2	190	110	+ 80	
N 3	11	1,600	1,350	+ 250
	12	1,640	1,450	+ 190
	13	1,700	1,550	+ 150
	14	1,800	1,680	+ 120

2線以上では、すべての等深線が著しく前進したが汀線より陸側の等深線の前進は他と比較して少ない。N3測線上は港口附近の等深線のみについて比較したが、この部分の等深線も著しく前進した。すなわち、船溜南堤寄りの-5m以浅で洗掘した以外は、港内のすべての部分で堆積を示した。特に、港内中央部から港口に広がる部分および南防波堤にその部分において著しい。

(3) 北防波堤先端港内側の-11mという著しい深掘れは消失したが、北防波堤にそって-6~9mの等深線に見られるようにやはり或程度の深掘れは残っている。しかし、-6m線の沖側への突出によって見ら

表-5 模型における波作用前(図-28)と波作用後(図-29)の港内等深線の基線からの距離比較

測 線	等深線	波作用前	波作用後	差
N 1	-24cm	600cm	496cm	+ 104cm
	22	450	416	+ 34
	20	424	406	+ 18
	18	404	320	+ 84
	16	390	260	+ 130
	14	364	256	+ 108
	12	320	219	+ 101
	10	112	160	- 48
	8	96	120	- 24
	6	50	104	- 54
	4	10	80	- 70
	2	- 6	26	- 32
± 0	- 14	14	- 28	
S 2	-18	なし	540	
	16	506	470	+ 36
	14	420	395	+ 25
	12	380	370	+ 10
	10	336	330	+ 6
	8	284	210	+ 74
	6	214	190	+ 28
	4	170	164	+ 6
	2	160	132	+ 28
	± 0	128	115	+ 13
+ 2	110	97	+ 13	
N 3	-26	738	740	- 2
	28	817	812	+ 5
	30	842	830	+ 12
	32	890	860	+ 30

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

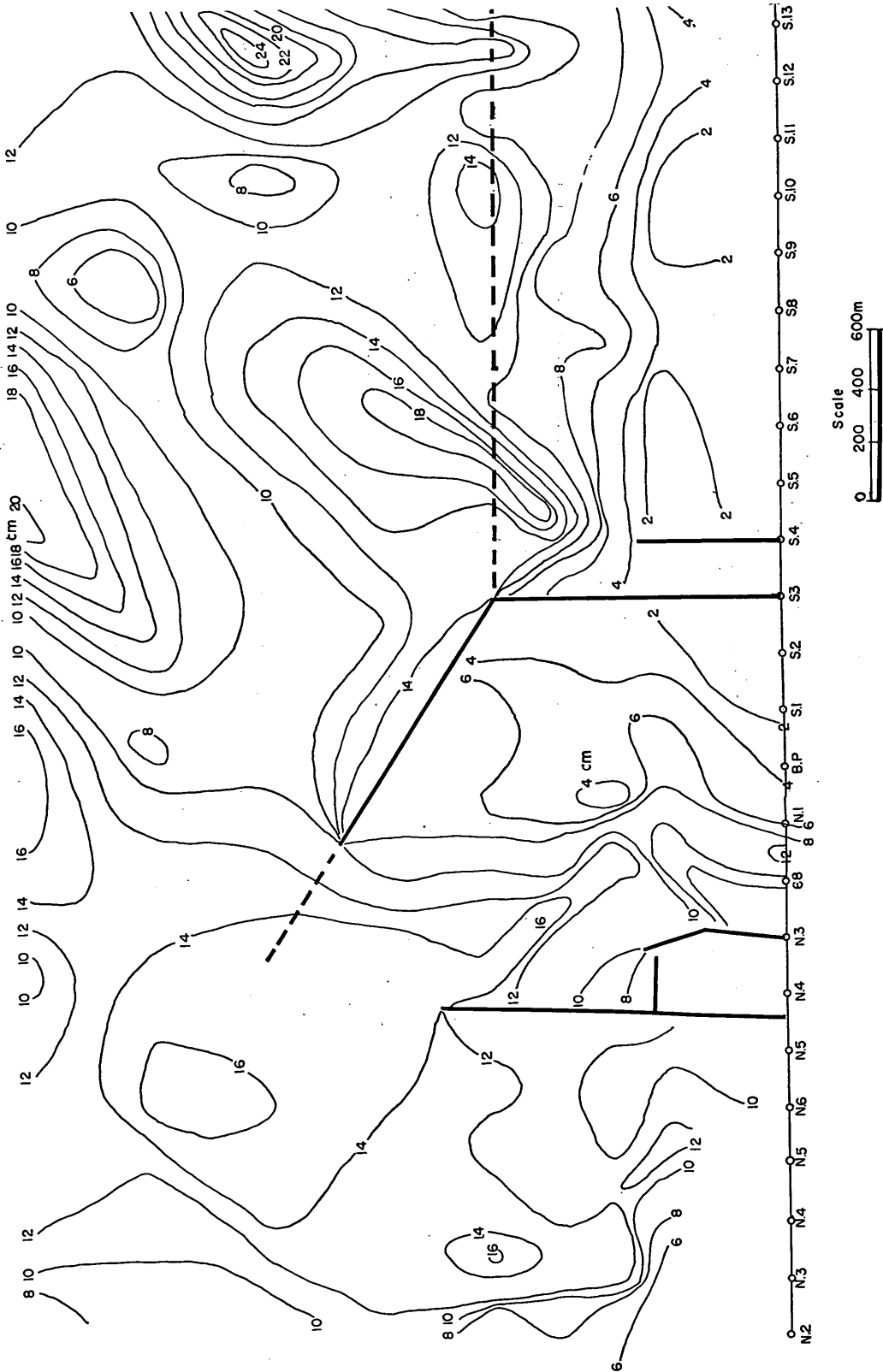


図-30 等波高線分布 (実験3)

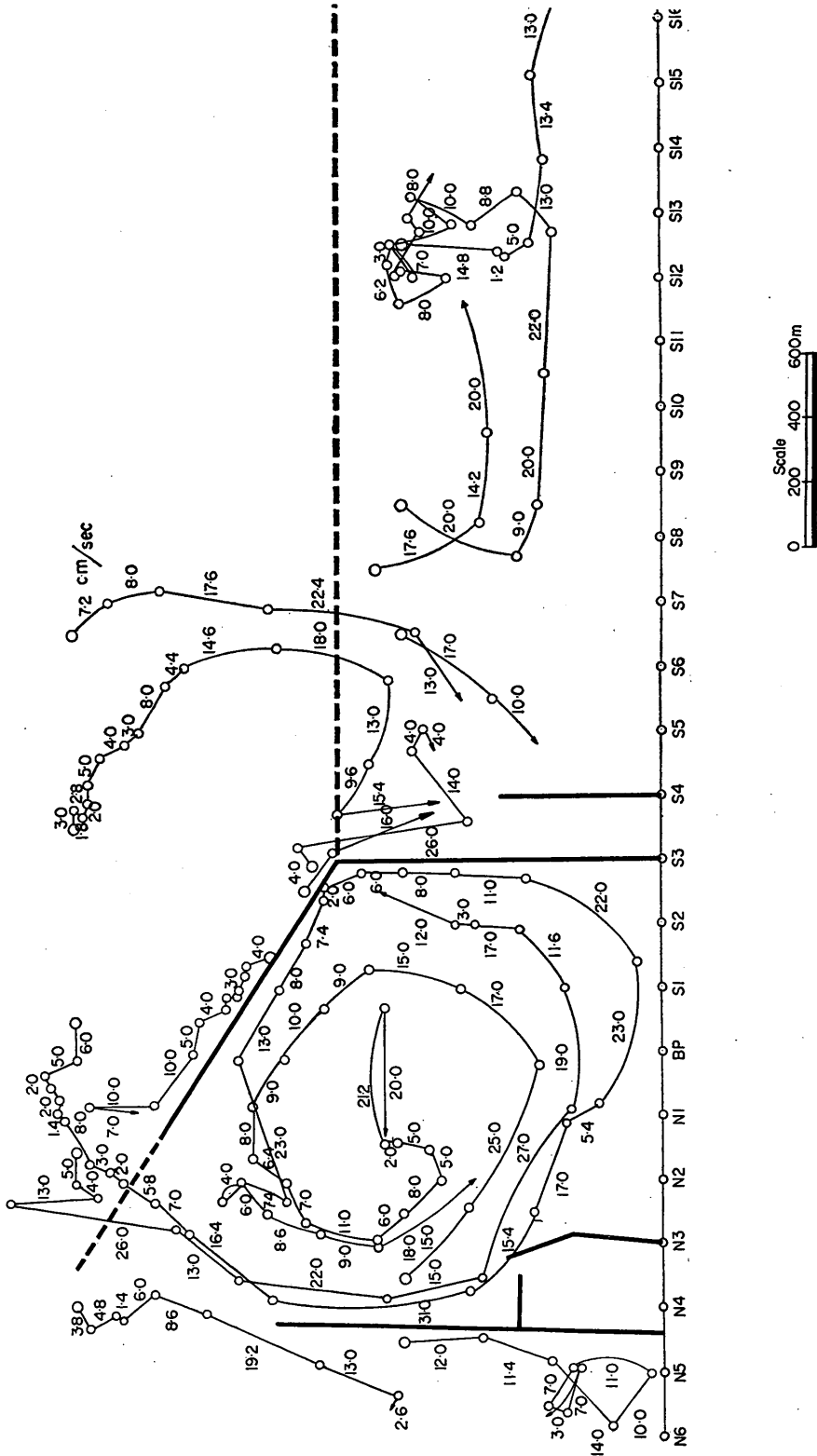


図-31 底層流 (実験3)

港湾埋込に関する移動床模型の再現性

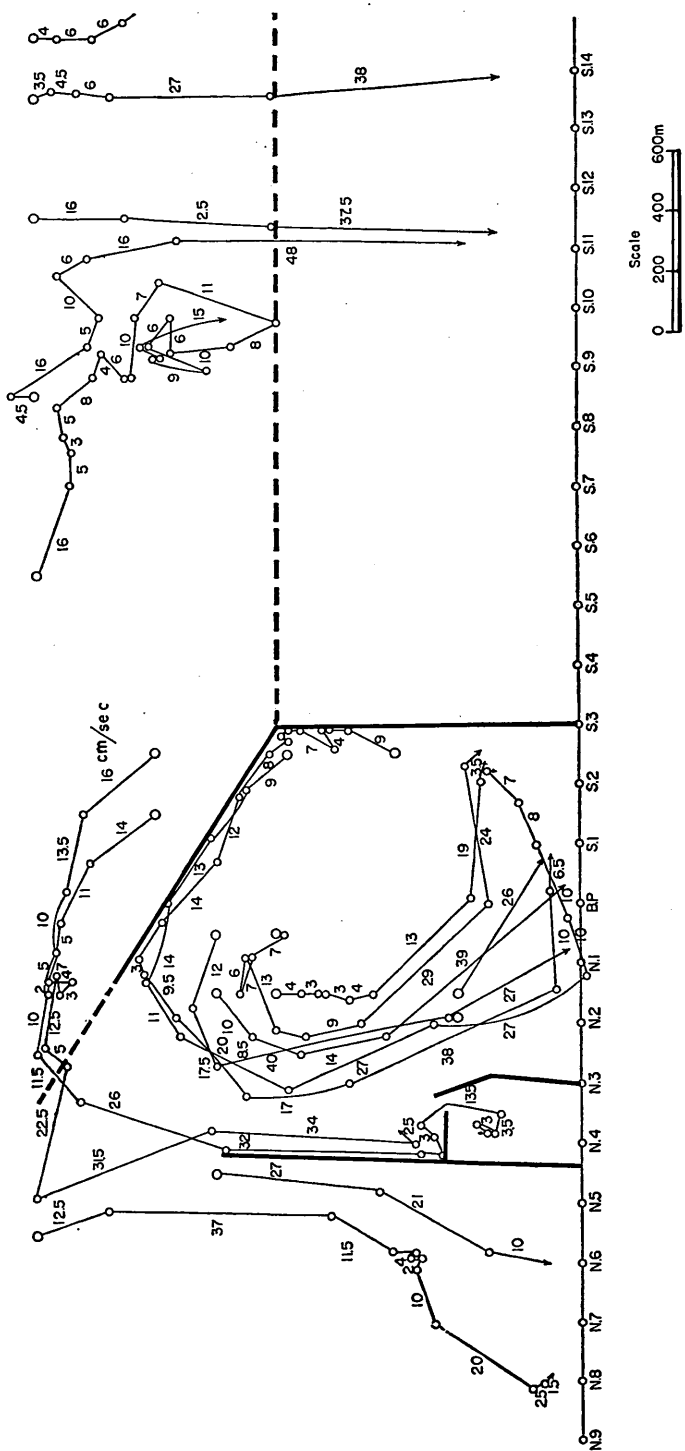


図-32 表層流(実験3)

れた著しい浅瀬は消失した。

(4) 南防波堤屈曲点附近外側の沖側への各等深線の張り出しは、更に発達した。

一方、図-28と29の比較から上記現地の港内における等深線変化に関する模型の再現性を見ると次のようである。

(1) 港内汀線は、現地同様船溜南堤寄りが後退、南防波堤寄りが前進した。

(2) 港内等深線の基線からの距離を現地同様比較したものが表-5である。N1測線上では、-12cm(現地換算-4.8m)以深が前進、-10cm(現地換算-4m)以浅が後退、特に-12~-18cm、-24cm、-4~-6cmでその変化が著しい。変化が著しい部分は現地と比較して多少づれているが、全体としての傾向は一致している。S2測線上では、変化量が現地と比較して少ないが、すべての等深線が前進していることおよび、汀線近くから陸側(前浜部分)が沖側より等深線の前進が少ないことなどは、現地とよく一致している。N3線上の港口附近についても、-26cm線を除いて、その量は小さいが現地同様等深線は前進している。すなわち、港内の全般的な堆積と洗掘の傾向は現地と一致している。南防波堤にそう堆積が現地と比較して少ないのは、前述したように現地南防波堤がその屈曲点から陸側において漂砂に対して透過堤であったことが一つの大きな原因であることは言うまでもない。

(3) 北防波堤にそう深掘れは、現地と反対に一層目立って来た。

(4) 南防波堤屈曲点附近の港外側での等深線の沖側への張り出しも、現地同様更に発達した。

以上、港附近の等深線の変化の傾向は、北防波堤にそう深ばれ部分を除いて、全体的に模型と現地とは一致している。一方、全体としての港内等深線の配列は、現地では、港内中央から陸側では、その中央部が陸側に後退した凹型、沖側では、凸型の配列をしている。そうして、この凸型の配列の部分の両端では防波堤にそって深掘れが見られる。このような全体として等深線の配列形状は模型にも見られるが、港口附近についてのみは、現地と異った凹型の配置となっている。これは、5、6月は現地でも最も海況の静穏な時期であるに反し、模型波は4.3で述べたように現地の波高3.5m程度の波が港口附近でひき起すと同程度の底質移動をもつような波であることによるものと思われる。

さて、以上のような港附近の等深線の変化傾向の原因

を模型内における波高と流れから推定する。図-30と31は、それぞれ波高分布と底層流の測定結果である。汀線近くでは、波が南防波堤寄りか船溜南堤寄りより小さく、N1からN2の部分が最も大きい。これが前述した汀線変化の傾向と対応する。また、北防波堤に沿う部分は、南防波堤に沿う部分より波高も底層流速も大きい。これが、南防波堤にそって堆積がより大きい一つの原因である。また、南防波堤にそっては、屈曲部に近いほど底層流速が小さいことが、その部分での堆積が大きい原因である。また、港内全体としての反時計廻りに港中央に向う廻流があり、その中心は流速が小さく土砂堆積の大きかった部分と一致している。すなわち、波高は、港口から港内中央部にかけて大きいけれども、この部分では底層流がその周辺より小さいため土砂堆積が大きかったものと思われる。これは、砕波帯から前浜にかけては、波高の大きい所は底層流も速く洗掘もより大きいことと対比的である。防波堤などに沿っては、同じ波でも乱れがより大きくなりまた、流れもそれに沿って集まるようになるので、堆積は少ない。図-32には、表層流を参考のために示すが、これからは港内堆積の様相を説明することは出来ない。

5.4 外泊地航路開さく時に対する実験(実験4)

先に述べたように、図-1に示した第1期計画平面図において、40年7月に浚渫船が船溜の奥から汀線と平行に進入航路を掘さくしつつ中央航路部分に達し、この部分を浚渫していた。従って、前述した図-27までの時点では、中央航路と外泊地の間には、帯状に砂丘が残っていた。この帯状の部分が43年6月末から開さくされ外泊地航路の浚渫が始った。

この開さくにもなう開さく部附近の等深線の変化状況を図-33に示す。開さくは中央航路側から巾250m、水深-8~-9mで始まり、その後、水深-14~-16mに増深している。この開さく航路と船溜南堤の間に残存していた砂丘は、次第にやせおとろえると共に、前浜部分の等深線は、その先端から次第に進入航路側に曲り、10月末には、中央航路と進入航路の交差点附近を完全にふさいでしまった。しかし、この残存砂丘前面の-2~-4mの等深線は、その中央部で幾分後退したが、その開さく航路寄りでは、ほとんど変化なくわずかに前進すら示している。一方、南防波堤と開さく航路の間に残存した砂丘の航路寄りも次第に欠壊後退すると共に、その欠壊面の斜面勾配は次第にゆるくなった。しかし、砂丘前面の等深線はほとんど変化していない。

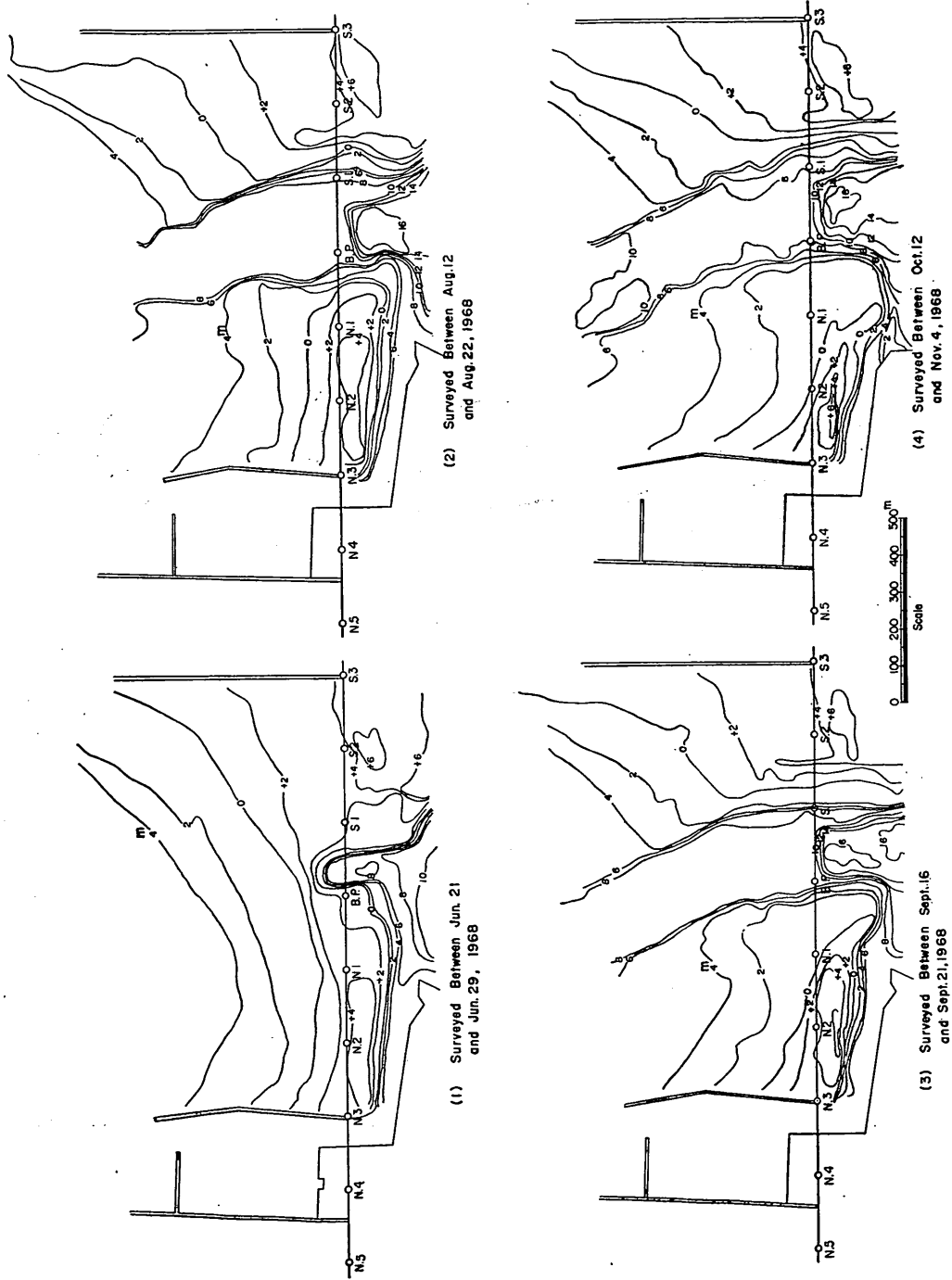


図-33 外泊地開さく航路附近の地形変化

上述のような開さくに伴う等深線の変化を知るための模型実験は、42年5月に行った。その当時の計画では、まず水深-5m、巾250mに開さくを始める予定であった。従って、この計画に合わせて実験を行ったので、現地とは、その開さく水深において異なるが、開さくの附近等深線に及ぼす効果に重点をおいて実験結果の再現性を検討する。

図-34は、実験3の波作用後の地形すなわち、図-29の模型に中央航路(水深-12m)、外泊地航路(水深-5m)および、進入航路(水深-5m)を附加した状態を示す。中央航路は、この時点で陸側に長さ1kmほど陸側に掘込まれていることが予想されたので、その模型の陸

側端は、写真-4に示したように、径3~5cm程度の碎石を約1:1.5程度に積み側壁ブロックからの波の反射を防止した。この図-34の模型に波を1時間、および4時間作用させた状態が図-35および36である。

これらの実験結果を上述した開さく時の現地等深線変化と比較すると次のことが云える。

- (1) 開さく航路の北側では、初めの1時間で、-12cm以浅の等深線は、その先端部で急激な後退を示し、特に-6cmより浅い等深線は、現地の0~1mの等深線と同様に、進入航路と中央航路の交叉点を環状に折れ曲り、4時間後には完全にそれを塞いでしまった。

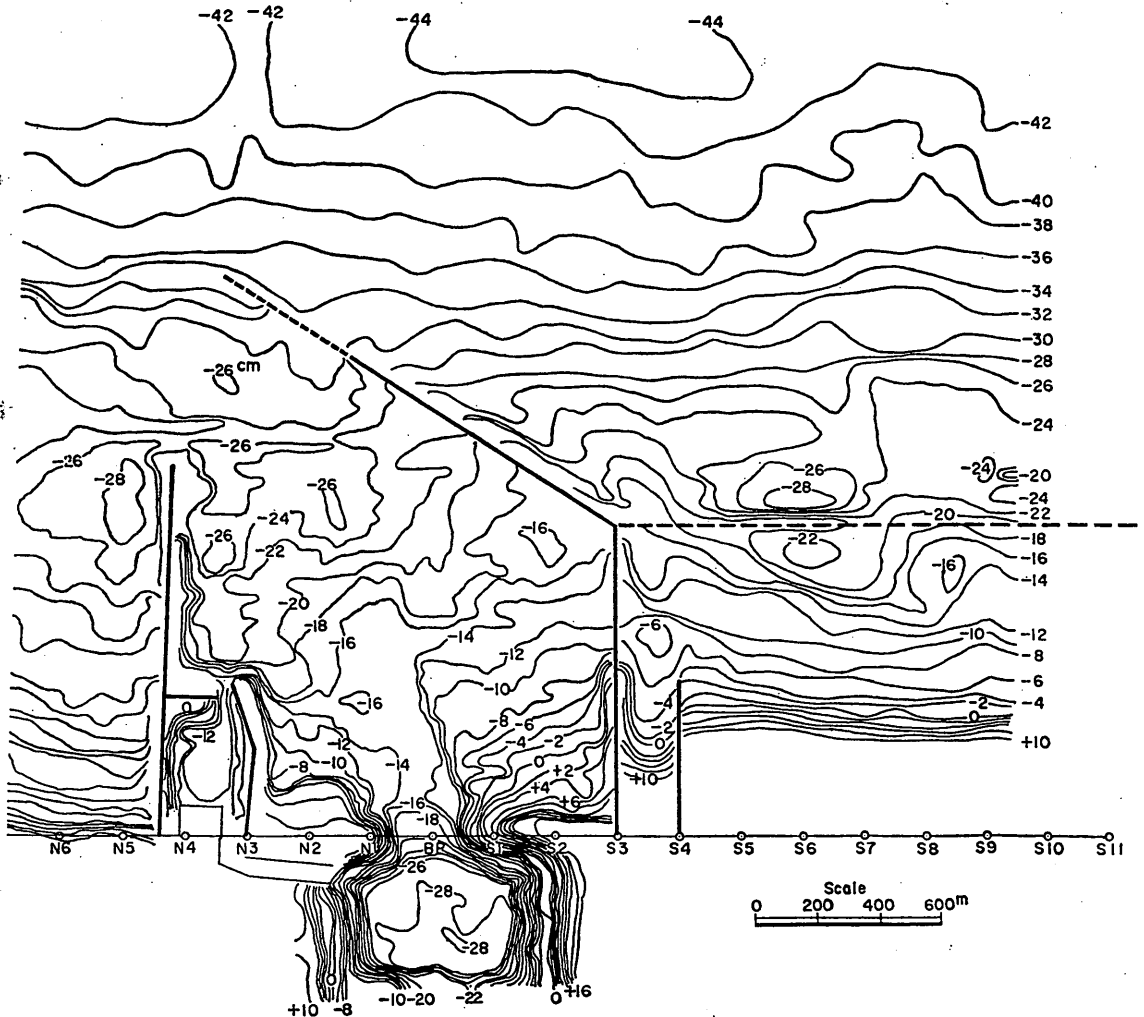


図-34 外泊地航路開さくに対する実験の初期地形(実験4)

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

- (2) 開さく航路の北側では、 $-8 \sim -12\text{cm}$ の等深線は、1時間後には全体として後退したが、4時間後では、現地 $-2 \sim -4\text{m}$ の等深線と同様に、その中央部が後退し、航路側寄りほとんど変わらないが幾分前進した。
- (3) 航路の南側では、現地と同様砂丘の航路側先端が急激に直線的に欠壊して斜面勾配はゆるくなった。砂丘前面の等深線は、北側ほどの後退を示さず、 $-4 \sim 8\text{cm}$ の等深線はS2測線上で見れば、4時間でもほとんど変化がない。
- (4) 中央航路の側面では、現地同様、南側斜面の欠壊が著しく、その斜面勾配は非常にゆるくなった。

以上のように、変化した等深線の水深は、模型が現地より深い等深線までに対応するが、変化の一般的な傾向は現地と極めてよく一致している。また、現地では、常に浚渫が進んでおり開さく航路の埋没状態は不明であるが、模型で港内中央部に位置するその先端部附近において大きい。模型では現地より深い水深に相当する等深線が移動したことは、前述したような現地波と実験波の大きさの相違の外に、南防波堤が図-27に示した長さより更に400mほど8月中旬までに延長されたことにもよるものと思われる。

上述した外泊地航路開さくに伴う附近等深線の変化を

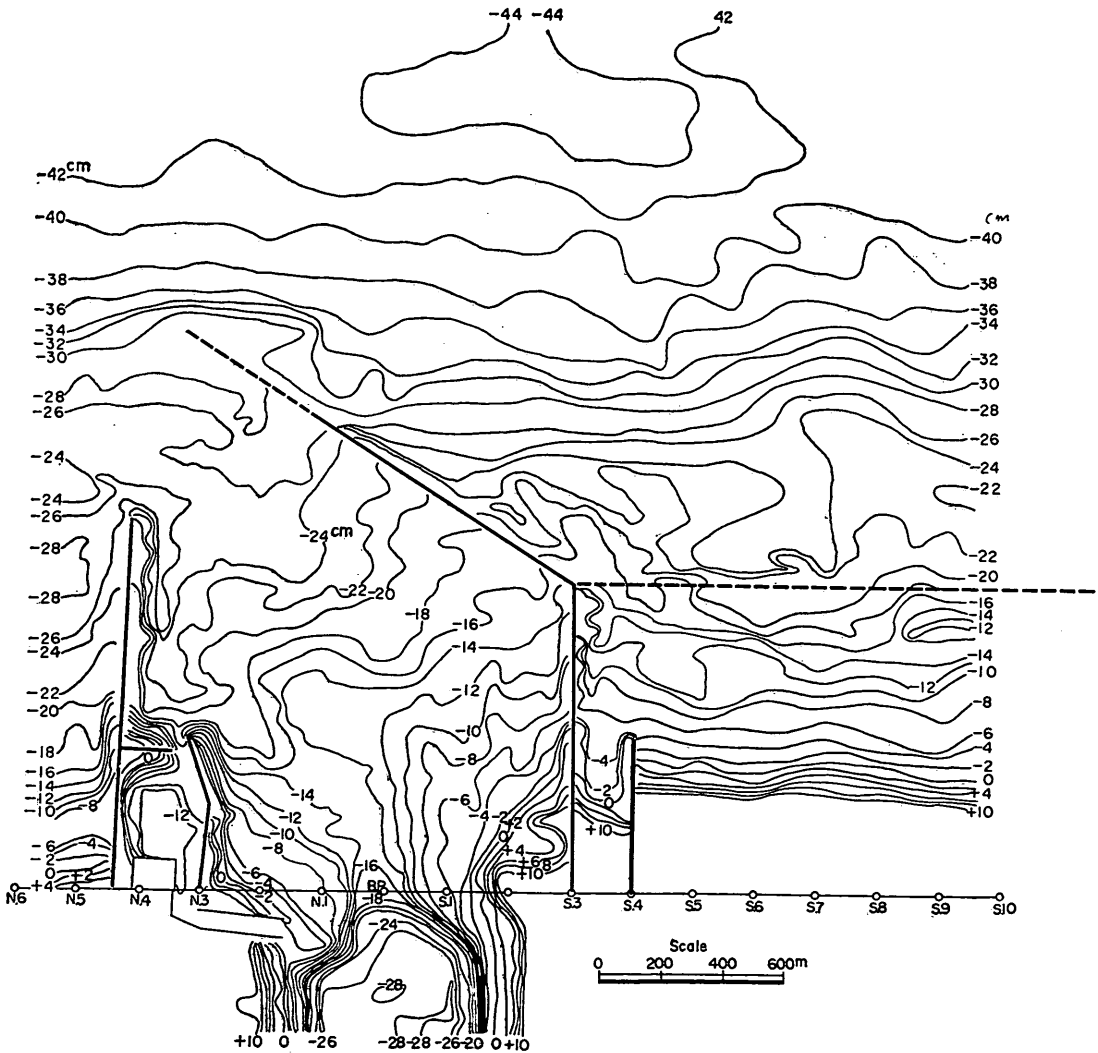


図-35 外泊地航路開さくに対する実験の波作用1時間後の地形(実験4)

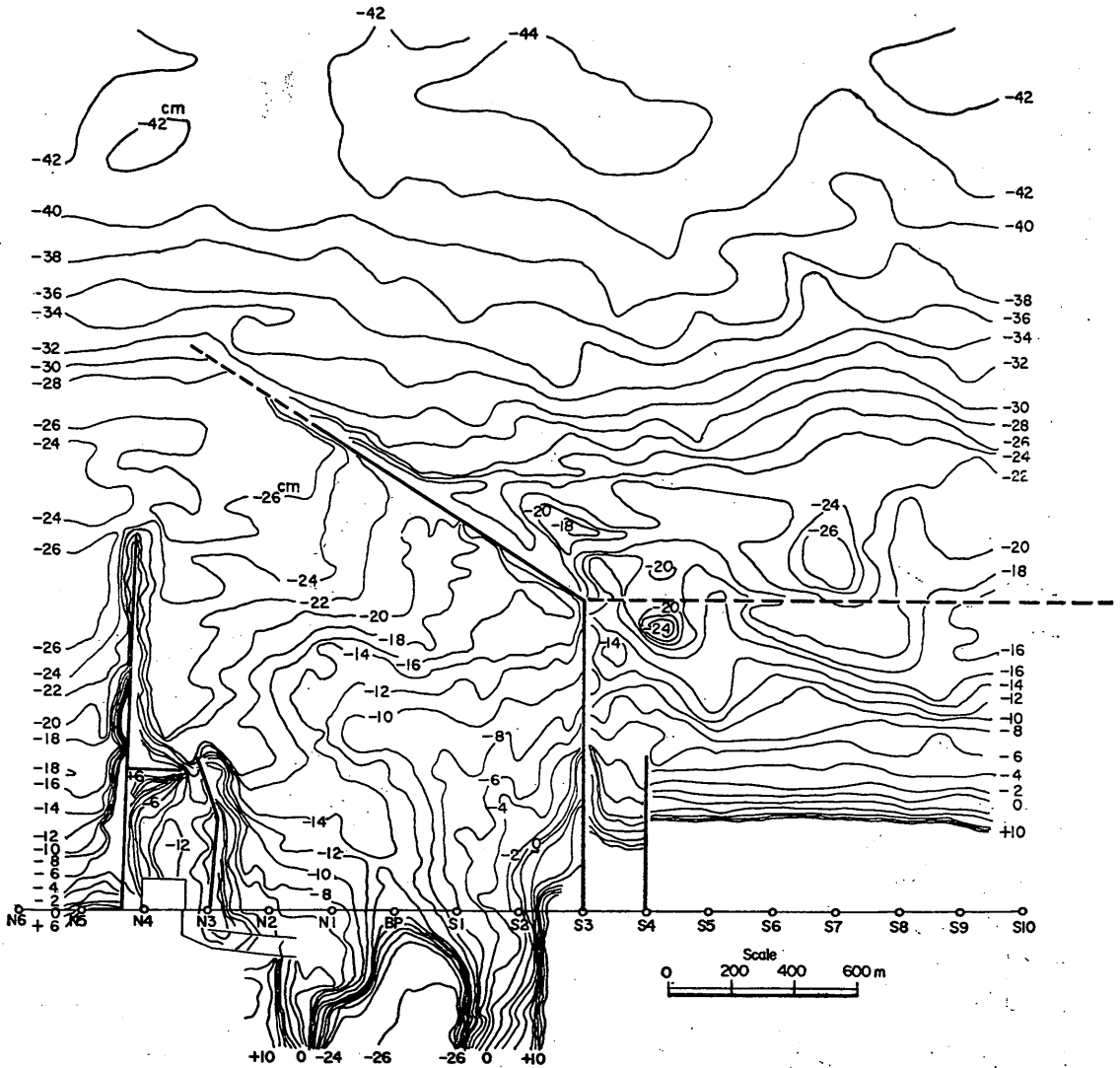


図-36 外泊地航路開さくに対する実験の波作用4時間後の地形(実験4)

更に明らかにするために、模型内の波高、底層流および底質移動の測定結果を図-37, 38および39, 40に示す。図-37から波は、港口から北防波堤寄りに侵入し、外泊地航路の北側が南側より波高が大きい。これが、その北側に残存した砂丘が大きく欠壊した原因である。一方、中央航路にかけては、北側より南側斜面において波高が大きく、南側斜面の欠壊した原因である。港内中央部には、反時計方向の回転流がこの場合にも存在する。中央航路と進入航路の接合付近では、船溜南堤寄りに中央航路へと底層流が進入しており、これが波高分布と共に、船溜南堤と開さく航路の間の砂丘の欠壊砂が中央航路の

方へ押出された一つの原因である。図-39は放射性砂投入時、図-40はそれに波を30分作用させた後の分布である。開さく航路の両側に投入された放射性砂の移動からこれまで述べたことが一層あきらかとなる。すなわち、開さく航路の両側の砂丘の欠壊砂は中央航路の中へ押込まれるように掃流された。南防波堤屈曲部外側に投入された放射性砂は、その附近における等深線の沖向きへの張り出しを示す方向に移動した。港口でのアイソトープ砂は、港内側よりむしろ港外側に移動した。すなわち、実験波のような高い波では、港口附近には底にそって港外に向う流れが存在することを示す。

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

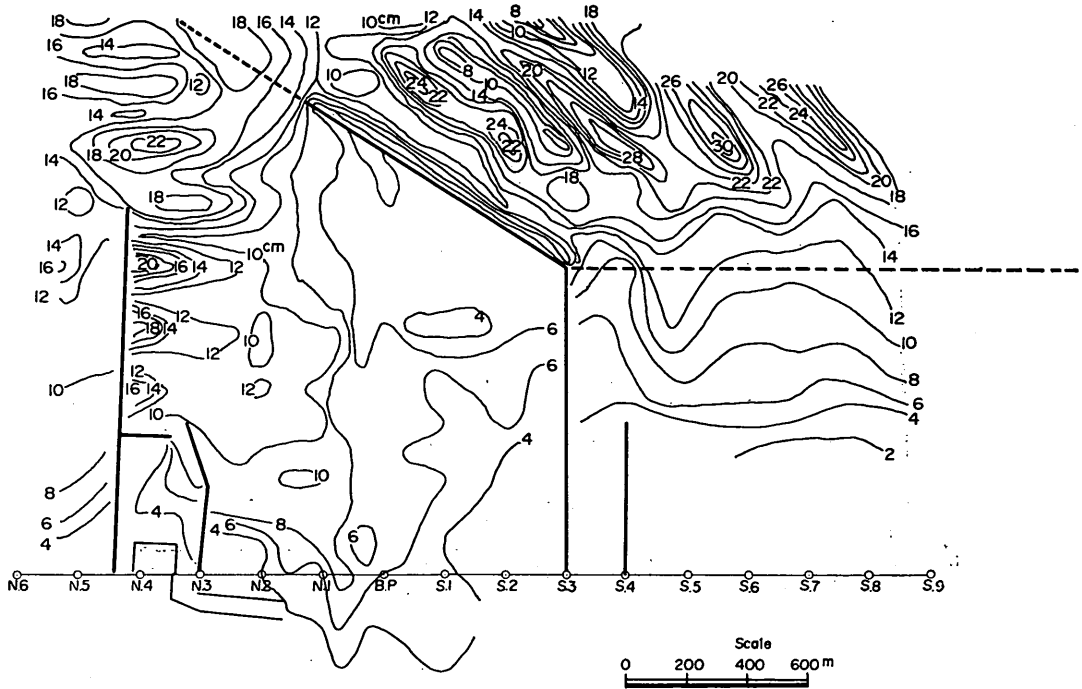


図-37 等波高線分布(実験4)

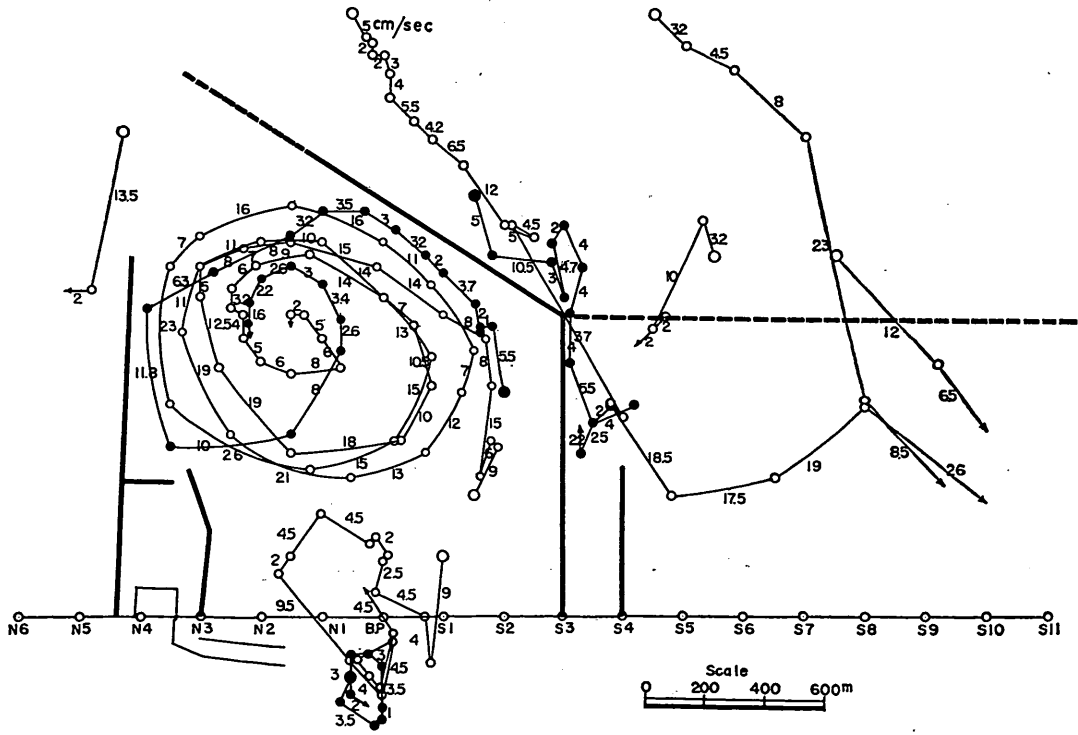


図-38 底層流(実験4)

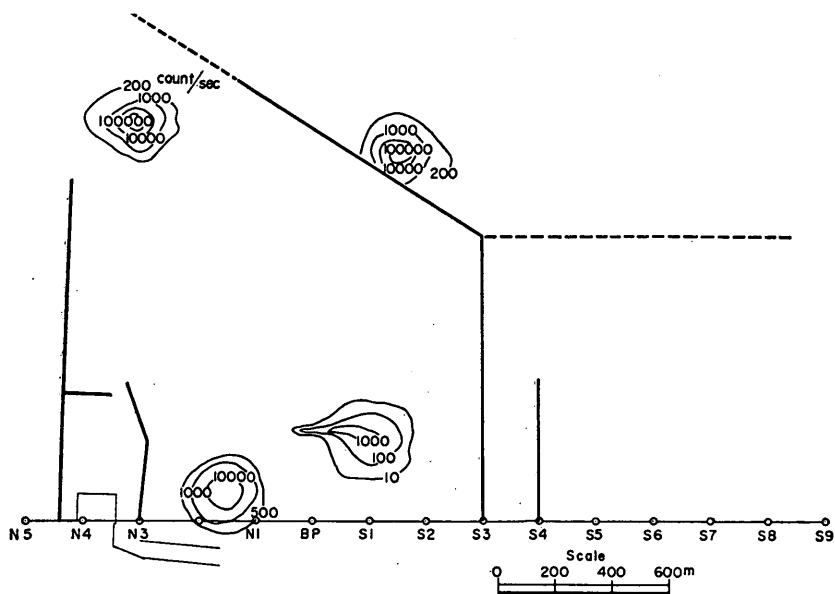


図-39 波作用30分後の放射性砂分布（放射性砂投入）

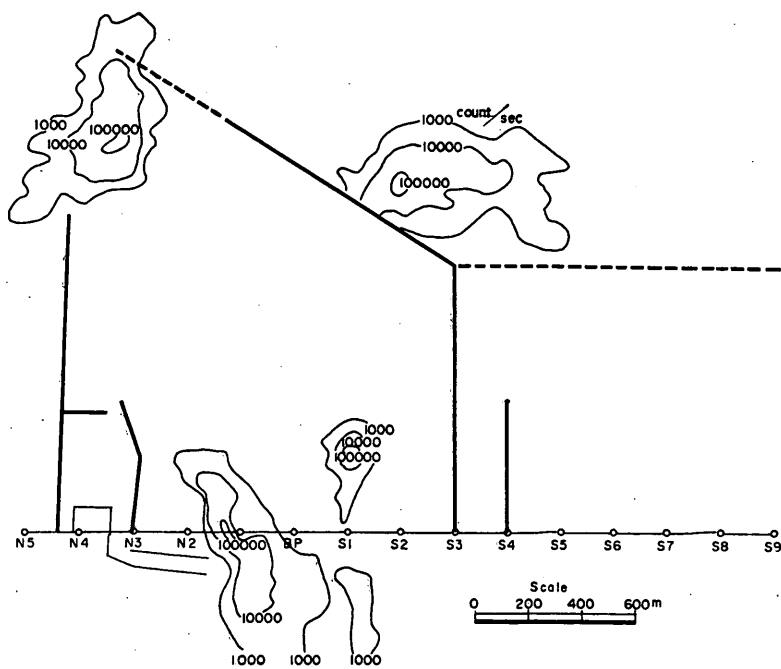


図-40 波作用1時間後の放射性砂分布（放射性砂投入後30分）

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

5.5 その他の実験（実験 5, 6）

実験 4 において、外泊地航路を開さくすれば、その両側の砂洲が急激に欠壊することがわかった。これに対する対策として、護岸および防砂堤をこれらの砂洲の部分に設けることが提案された。その実験の結果を 図-41,

図-42に示す。図-41は波作用前を示すもので、砂洲の開さく航路寄りに防砂堤を、そして、砂丘上に護岸を設けた。防砂堤の位置が開さく航路から大部離れているのは、将来の航路巾がここまで広げられる予定であったからである。図-42は、波作用 4 時間後の地形である。防砂堤の

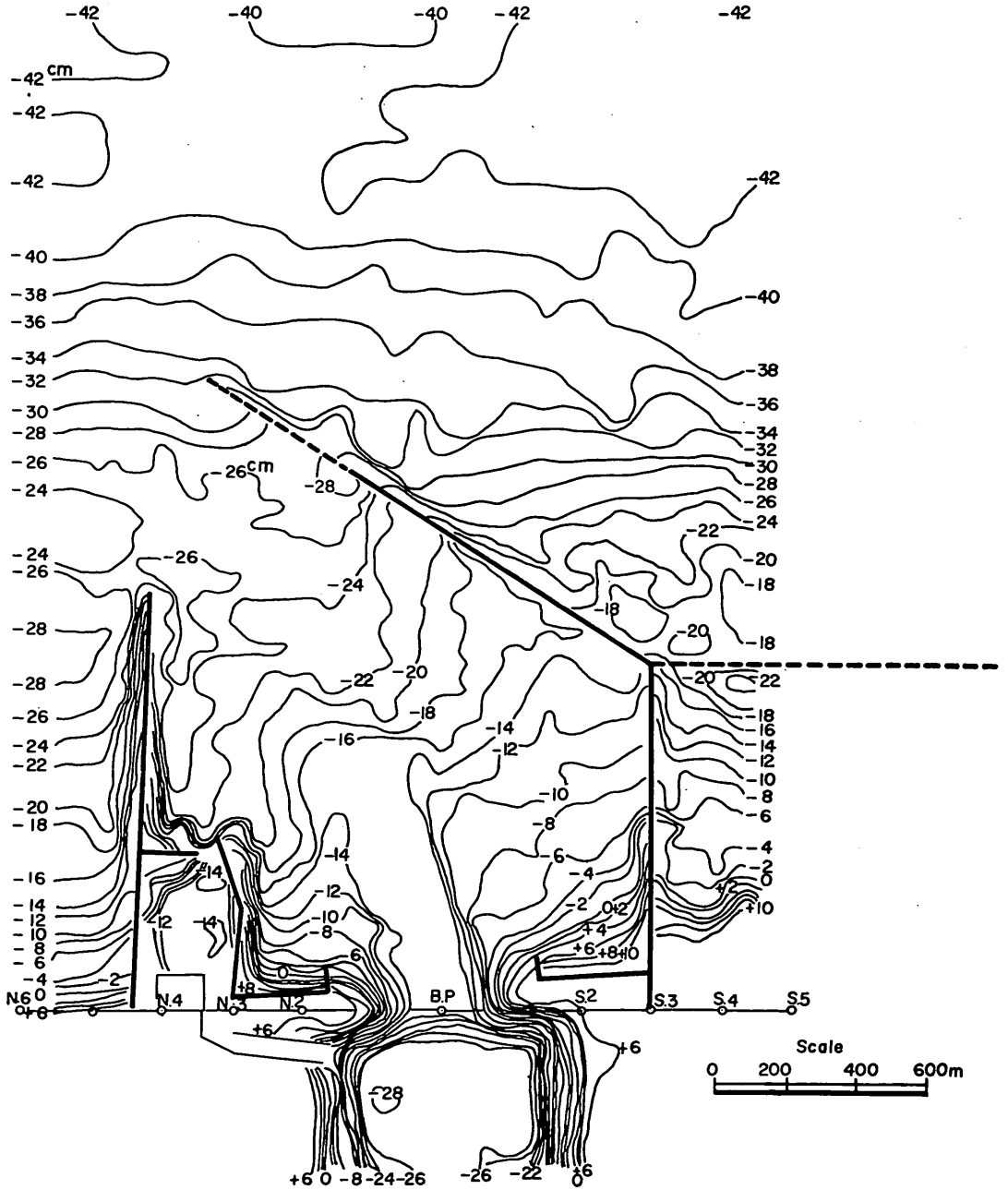


図-41 外泊地航路開さく時に防波堤および護岸で砂丘を防護した場合の実験の初期地形（実験 5）

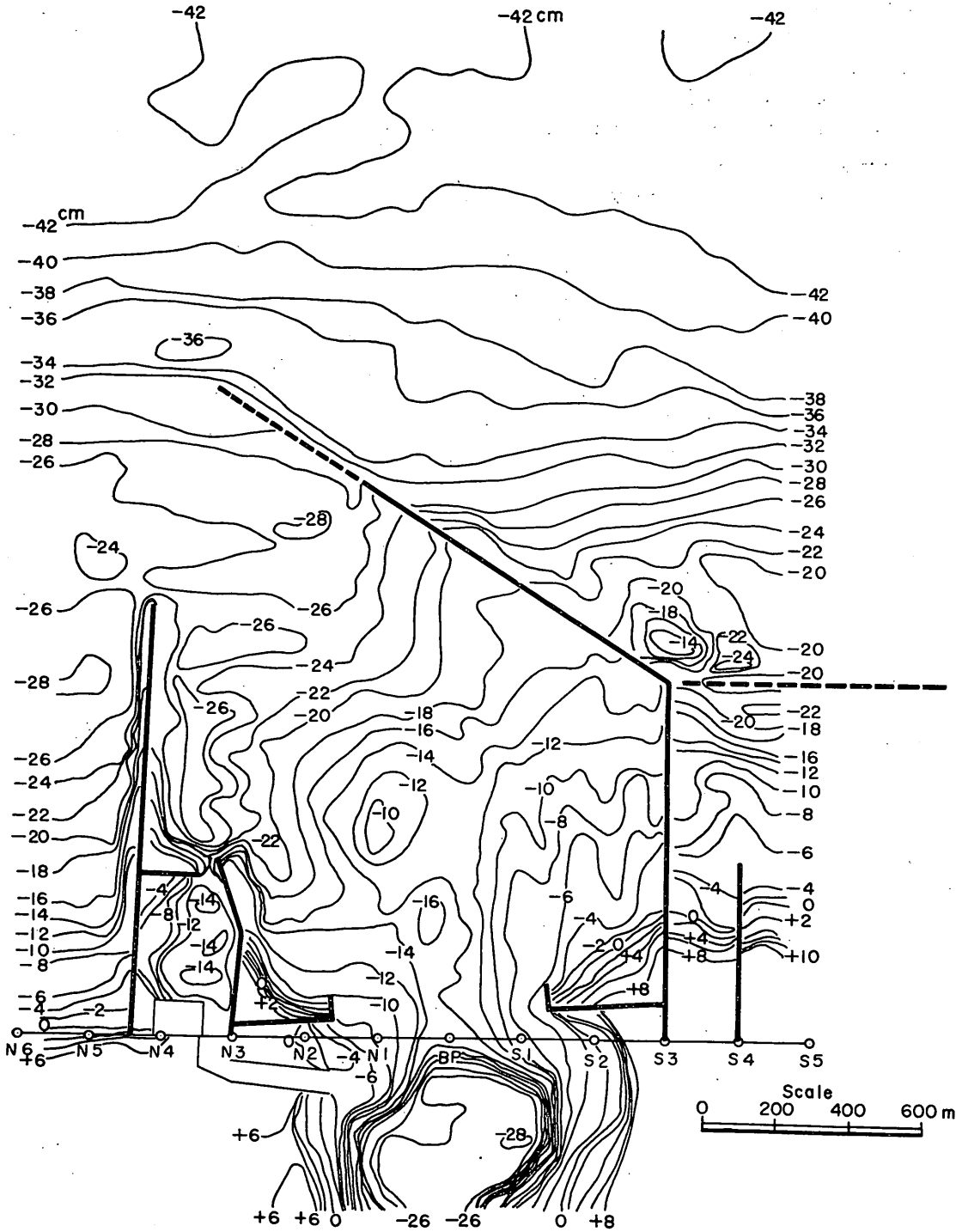


図-42 外泊地航路開さく時に防波堤および護岸で砂丘を防護した場合の実験の波作用4時間後の地形(実験5)

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

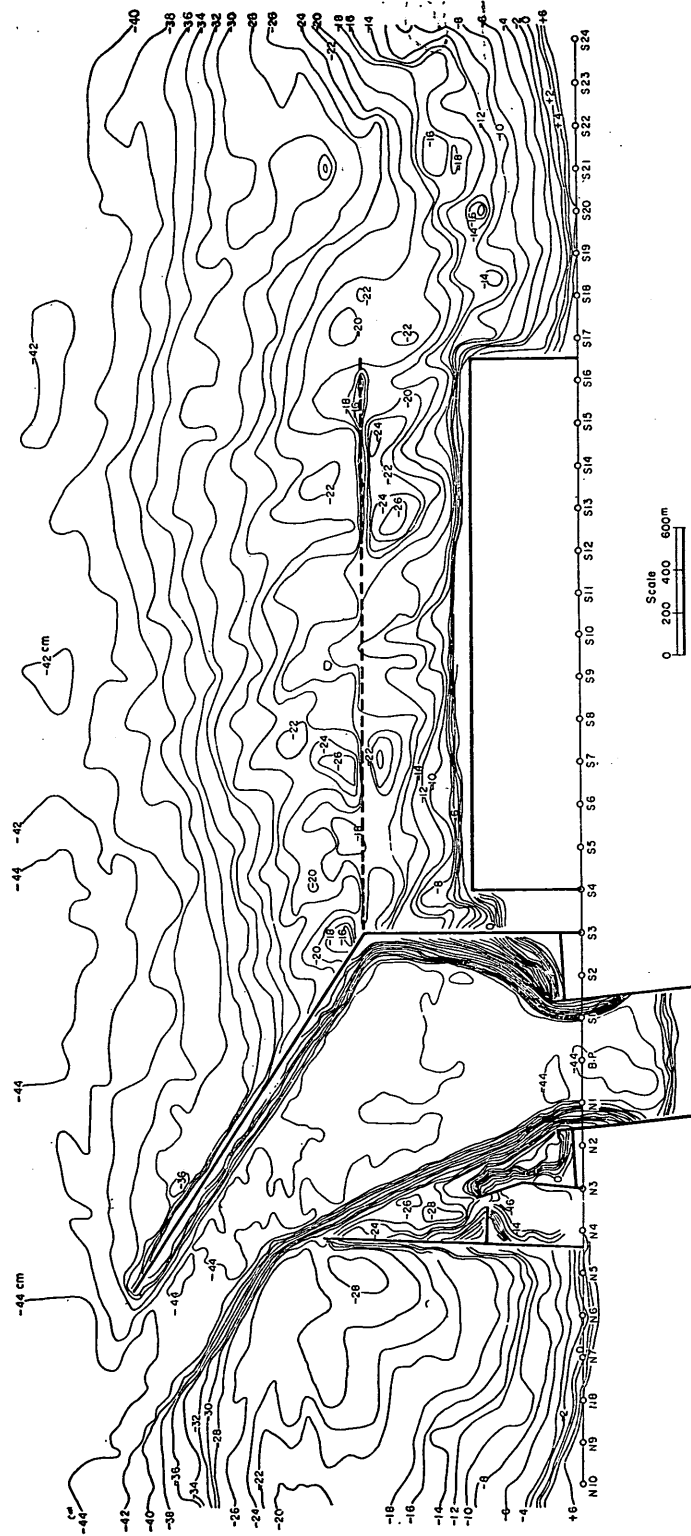


図-43 第1期計画完成後の初期地形(実験6)

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

ない前述の図-36と比較すると次のことがわかる。

- (1) 護岸および防砂堤で囲まれた砂丘部分の前浜は、ほとんど欠壊することなく存在している。
- (2) 防砂堤の外にあった砂丘の先端部分は、図-36の場合と同様に欠壊し、中央航路側におとこまれた。
- (3) 中央航路の法面の欠壊は、図-36の場合と同様に、南側法面が北側法面より激しい。
- (4) 中央航路の埋没は、図-36の場合よりも少なく、また開さく航路部分の埋没も同様により少ない。

以上の実験から、護岸および防砂堤の有効性が証明されたが、中央航路の兩岸、特に南側にも、開さくと同時に護岸又は岸壁の必要がわかる。

次に、第一期計画の完成後の状態を調べるために、図-43に示すように、港内を水深-44cm（現地換算-16m + 潮位1m）に浚渫し、南防波堤の延長を3,000mとし、中央航路の両側に岸壁を設けた場合について実験を行った。この地形に波を8時間作用した場合を図-44に示す。港内はわずかに浅くなったのみでほとんど埋没はないが、港口附近の埋没は目立つ。特に、航路の北側法面がくずれてゆるくなると共に、北防波堤先端の外側は土砂堆積が目立っている（航路の掘さく法面は1:3の勾配とした）。また、南防波堤の屈曲部より先端方向の部分

の沖側における等深線の沖方向への張り出しも顕著に見られる。しかし、防波堤の先端近くは、堤にそって洗掘が見られる。すなわち、南防波堤にそって直接港口に達する漂砂はほとんどなく、屈曲部附近から沖に出た砂が、浮遊状態で潮流などによって港口に達する程度であろうと思われる。この外の、港口埋没の主原因は、航路法面の法くずれと、北側から北防波堤に沿って港口に達する漂砂が考えられる。しかし、これらの港口埋没を起す漂砂量は法くずれ以外は、さほど大きいとは考えられず、ある程度の維持浚渫で十分港口水深維持は達せられるであろう。

5.6 港内堆積土量の変化

前述した実験1から3までについて港内土量の変化を現地の土量変化と対比して示したのが図-45である。この図で土量は、現地に対しては40年6月29日から7月10日に行われた深浅図すなわち、図-3を基準にとり、模型に対しては実験1の初期地形すなわち、図-18を基準にとり、区間は、陸寄りの部分から図示のように1から4まで分割し、斜線で示した船だまりの部分は計算から除外した。この部分は、作業船やケーソンなどが仮り置きしてあるため現地測量値がしばしばないためである。しかし、船だまりの入口は狭く、面積も大きくない

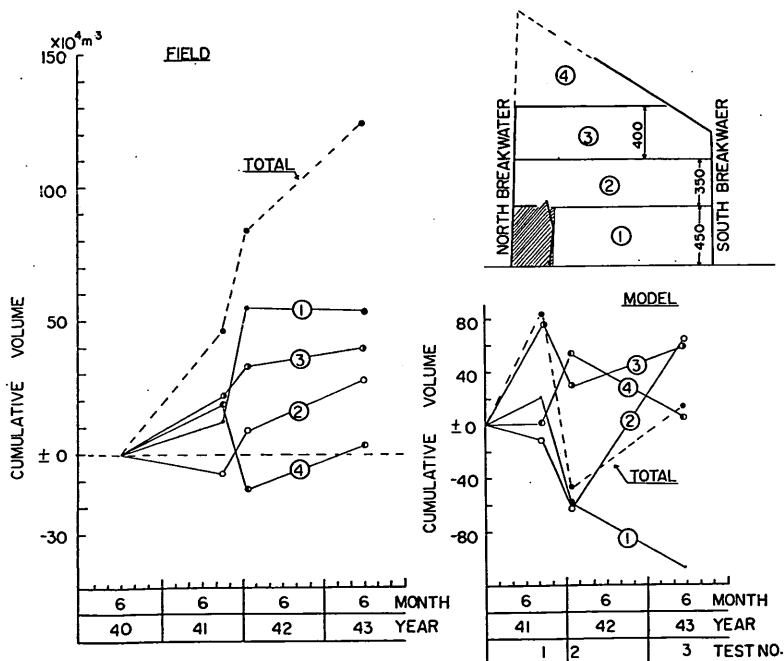


図-45 港内土量変化の現地と模型の比較

ので、この部分を除外したことによる誤差は数万立米のオーダーであろう。

各実験ごとの港内全域の土量変化量は60~130ℓである。この130ℓを模型縮尺を考慮して現地の値に換算すると、

$130 \times 10^{-3} \times 200^2 \times 40 = 208,000 \text{ m}^3 = 20 \text{ 万立米}$ となる。一方、現地における各測量間のそれは40~50立米である。したがって、土量変化量そのものとしては、模型は現地の1/2~1/4のオーダーであり決して比較し得ない値ではない。しかし、港全域の累加堆積量は、現地では、約125万立米に対し、模型では15ℓにすぎない。これは、実験2が全区間について現地と全く反対の傾向を示したことが大きく原因している。この反対の傾向が何によるかは不可解である。このような不可解な点があることおよび波の作用時間を各実験とも一様に4時間としたので、本実験の砂移動に関する時間縮尺を求めることは出来ない。

以上のような不可解な実験2を除いて実験1と実験2について、土量変化の傾向を現地と対比する。実験1に対しては、模型は、現地と同様に区間2は洗掘、他は堆積であるが、区間4の堆積土量は比較的小さい。実験3に対しては、区間4を除いて現地と同様区間1は洗掘、区間2と3は堆積を示しているが区間1の洗掘量は比較的大きい。先にも述べたように、現地では中央航路から南海岸への排出土砂が南防波堤を透過して港内に浸入していたことを考慮に入れば、区間1の不一致は或程度軽減される。しかし、区間4の上記の不一致は、やはり、実験条件と現地条件とのずれによるものと考えねばならない。

4.3で述べたように、実験波は、港口での砂移動が現地の波高3.5mの波と同程度の強さを起すように選定された。このような波の出現率は図-5から知れるように統計的に考えればきわめて少ない。港口附近の水深(-15m)で表層移動を引き起す波は式(4)に示したように2m程度の波高である。したがって、海底にそう掃流移動のみを考えても波高2m以上の波が港口から浸入する漂砂に影響を与える。これより小さい波によっても、防波堤の先端水深の-15mより浅い部分や、防波堤による波の反射攪乱等の影響をうける部分では、やはり相当な砂移動が起る。すなわち、現地では、種々の波によって港内埋没が起るのであるから、港内埋没土量そのものを問題とする場合には、一般にこの実験におけるような単一波ではなく、幾つかの波の組合せを用いる必要があると思

われる。

6. 結 論

昭和40年から昭和43年までの鹿島港の防波堤延長にともなう港附近の地形変化に関する移動床模型実験の結果と、現地の深淺図その他とを比較してその実験の再現性について検討を加えた。

まず、漂砂に関する移動床実験の相似性については、歪のある移動床模型における時間縮尺の決定法について述べ、模型縮尺と模型底質は、普遍的な砂移動に関する相似則が不在の現時点においては、可能な範囲内で出来るだけ現地漂砂現象が模型内に再現し得るよう実験水槽内で試行的に選定せざるを得ないことを述べた。また、対象とする実験範囲のすべてにおいて現地と相似であるように縮尺と底質を選定することは一般に困難である。模型水槽の大きさと実験対象範囲の関係および海浜断面勾配との関係から一般には模型に歪を与えざるを得ないし、そのためと、底質と実験波との相対的大きさから砂移動を相似にするために水の運動に関する相似則がある程度までぎせいにしなければならない場合もある。

鹿島港海岸の漂砂特性として海底地形、波、流れ、底質の移動について概説し、実験条件の選定と結果の検討の資料とした。鹿島港海岸は、太平洋に面する海岸で主として細砂からなり、これまでに測得された有義波高の最大は5m(水深-10mにおいて)であり、潮流は弱く、沿岸流および底質移動に関する観測式が得られている。

実験は、港研内の漂砂平面水槽(巾30m、長さ50m、壁高80cm)で水平縮尺1/200、鉛直縮尺1/40の平均径0.2mmの砂による移動床模型で行われた。この模型縮尺は海浜の平均的な碎波線の位置と第一期計画港口(水深-15m)における砂移動が表層移動と完全移動の間であるような実験波の選定した上で決定された。すなわち、実験波は、波高14cm、周期1.4sec、波向ENE(海岸法線に対して8°)であるが、これは第一期計画港口附近の水深-15mにおいて波高3.5mの波がひきおこす底質移動とはほぼ同じ程度の激しさの移動を模型の計画港口位置(水深-3.6cm)において引き起すものと考えられる。

以上のような模型縮尺と底質によって鹿島港海岸の自然海浜の平均的な断面をもつ模型浜を作り、上記実験波を10時間作用させて平衡勾配を作った。この平衡勾配は現地と比較すると沿岸砂洲の位置は多少沖側にあり、より不規則であった。この平衡海浜に昭和41年夏、42年冬、43年夏および外泊地航路開きく時に相当する防波の

港湾埋没に関する移動床模型の再現性

および航路の模型を次々に追加して実験を行った。波の作用時間は、各実験ケースにつき4時間であり、各実験の初期海底地形は、その前の実験の波作用後と同じであった。これらの実験結果についての再現性を現地深淺図と比較すると次のようであった。

- (1) 港内等深線の配列平面形状は、現地と模型とで異なる点が多かった。これは、初めの平衡勾配が現地と模型とで大分異っていたからである。しかし、実験が進むにつれてこの配列は次第に現地に似て来た。
- (2) 港内等深線の移動傾向(又は変化傾向)は、南防波堤や北防波堤に接した部分において、部分的なずれがあったが、大筋においては再現性がよかった。防波堤に近い部分にずれがあったのは、防波堤それ自体の模型が現地と粗度や透過性などについて異っていたことが大きい原因と思われる。
- (3) 南防波堤屈曲部外側の等深線の沖側への張り出し、港内中央部の土砂堆積、汀線附近の南船溜堤近くの欠壊と南防波堤寄りの堆積などの再現性はきわめてよかった。
- (4) 外泊地航路開さくに伴う残存砂洲および中央航路附近の地形変化の再現性もよかった。
- (5) 港内堆積土量についての再現性は悪かった。

以上のように、この実験においては、再現性についてまだ多くの問題を残しているが、これを解決するためには、次の点に留意する必要がある。

- (1) 防波堤などの形状(特に透過性および表面粗度)を現地に似せしめる。
- (2) 浮遊砂の鉛直分布についても考慮を払って模型縮尺や底質などを選定する。
- (3) 埋没土量を問題とする場合には、波高、周期波向などの異なる幾つかの波の組合せを実験波とすべきであろう。

また、本実験において、港内地形変化の傾向は波高分布と底層流の分布とよい対応をなし、汀線附近では波高の高い所では底層流も大きく洗掘を示し、沖浜帯では波高分布よりも底層流の大きい所で洗掘、それが停滞する所で堆積を示した。港内には、廻流が存在しこれが港中央部の堆積の一原因であることが明らかとなり、また、アイソトープ砂の分散移動も等深線の変化傾向とよく一致した。

この種の実験を今後も続行し、実験方法や条件の選定に改良を加えて行く予定である。なお、本実験作業およびデータの整理には、同室の浅川昭および天坂三明両

技官の協力を得たことを附記する。

参 考 文 献

- 1) Akira Ozaki: On the Effect of an Offshore Breakwater on the Maintenance of a Harbor Constructed on Sandy Beach, Proc. of 9th Conf. on Coastal Eng., June 1964. p.323~345
- 2) 野田英明: ぐみ崎漁港の漂砂に関する実験(その1), 京大防災研年報, 第9号, 41年3月, p.359~371
- 3) 佐藤昭二, 田中則男他: 港内埋没に関する2, 3の実験, 第4回港研発表会講演概要
- 4) 野田英明: 海岸の模型実験, 水理学水文学における最近の進歩, 土木学会水学会関西および中部支部, 昭和42年3月, P. 197~209
- 5) Kajiura, K.: On the Bottom Friction in an Oscillatory Current, Bulletin of the Earthquake Res. Inst., Vol.42, 1964, p.147~174
- 6) 堀川清司, 渡辺晃: 表面波による振動流境界層に関する実験的研究, 第15回海岸工学講演集, 昭和43年12月 p.16~23
- 7) Cyril J. Galvin: Longshore Current Velocity; A Review of theory and Data, Reviews of Geophysics Vol.5, No.3, August 1967. p.287~304
- 8) 東京大学土木工学科港湾研究室: 新潟海岸養浜模型実験報告
- 9) 土木学会編: 水理公式集 p. 538~542
- 10) Fairchild J.C.: Suspended Sediment Sampling in Laboratory Wave Action, B.E.B. Technical Memorandum No.115, 1959
- 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, 漂砂特性編(昭和39年3月)および総取まとめ編(昭和41年5月)
- 12) 佐藤昭二: 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集, B海岸港湾コース, 土木学会水理委員会。
- 13) 佐藤昭二, 庄司忠夫, 田中則男: 仙台湾沿岸の漂砂について, 第13回海岸工学講演集, 昭和41年, 土木学会, p.176~182.

(1969.12.18受付)