

運輸省港湾技術研究所

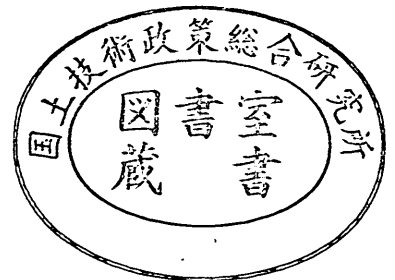
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 24 NO. 2 JUNE 1985

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第24巻 第2号 (Vol. 24, No. 2) 1985年6月 (June 1985)

目 次 (CONTENTS)

1. An Effective Stress Analysis of Liquefaction at Ishinomaki Port during 1978 Miyagi-ken-oki Earthquake
..... Susumu IAI, Hajime TSUCHIDA and W. D. Liam Finn..... 3
(1978年宮城県沖地震の石巻港における液状化現象の有効応力解析
..... 井合 進・土田 肇・W. D. Liam Finn)
2. 不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察
..... 谷本勝利・原中祐人・山崎一雄.....85
(Experimental Study on the Stability of Wave Dissipating Concrete
Blocks against Irregular Waves.....Katsutoshi TANIMOTO,
Suketo HARANAKA and Kazuo YAMAZAKI)
3. 砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究
..... 入江 功・寺崎賢次・加藤一正... 123
(Laboratory Study on the Observation Methods of Sediment Transport
as Focussed on Suspension of Sediment above Sand Ripples
..... Isao IRIE, Kenji TERASAKI and Kazumasa KATOH)
4. 底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測
..... 入江 功・栗山善昭... 157
(Prediction of the Rate of Sedimentation in Channels and Basins by
Considering the Deposition Process Due to Convective Move of Bed
Materials..... Isao IRIE, Yoshiaki KURIYAMA)
5. 波力発電ケーソンに設置されたウェルズタービンの出力計算法
——波エネルギーに関する研究 第4報——
..... 高橋重雄・鈴木諭史・明瀬一行... 205
(Turbine Power of Pneumatic-type Wave Power Extractors Utilizing
Caisson Breakwaters
——A Study on Development of Wave Power, 4th Report——
..... Shigeo TAKAHASHI, Satoshi SUZUMURA and Kazuyuki MYOSE)
6. 淡塩二層密度界面の抵抗と混合特性.....中野 晋・鶴谷広一・一戸秀久... 239
(Friction and Entrainment at the Interface of Two-Layered Stratified
Flow Susumu NAKANO, Hiroichi TSURUYA and Hidehisa ICHINOHE)

7. コンクリートかさ上げの付着特性……………林 洋介・佐藤勝久… 275
(Bond Characteristics of Concrete Overlays
…………… Yousuke HAYASHI and Katsuhisa SATO)
8. 飽和砂地盤上の盛土の破壊振動実験と円形すべり安定解析
……………上部達生・北澤壮介・檜垣典弘… 305
(Shaking Table Tests and Circular Arc Analysis for Large Models
of Embankment of Saturated Sand Layers……………Tatsuo UWABE,
Sosuke KITAZAWA and Norihiro HIGAKI)
9. 土砂輸送パイプの摩耗に関する研究 (第2報)
——大口径ポリウレタンライニング管の耐摩耗性に関する現地実験
(苫小牧, 岸和田)——……………岡山義邦・浜田賢二・釜場和宏・中村裕二… 361
(Study on the Wear of Slurry Pipelines (2nd Report)——Field Tests
on Wear Resistance of Large Polyurethane Lined Pipe——
……………Yoshikuni OKAYAMA, Kenji HAMADA, Kazuhiro UKEBA
and Yuji NAKAMURA)

4. 底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測

入江 功*, 栗山 善昭**

要 旨

最近行われつつある海底地形変化に関する三次元数理モデルでは、海浜流が鉛直方向に一様に分布していると仮定していることや、漂砂量が局所的に定義されていることなどの理由で、航路・港内埋没の予測精度を上げるのに限界があるものと思われる。

本研究では、数理モデルでは計算困難な海浜流の底層流を水理模型実験（ここでは物理モデルと呼んだ）により求め、現地スケールに適用可能と考えられる Bijker の浮遊モデルと組み合わせて底質の移流沈降過程を電算機により計算するという、いわば物理モデルと数理モデルの長所を生かしたシミュレーション法を開発し、滝港に適用した。その結果、海底地形変化の再現性はきわめて優れていることがわかり、海浜流の鉛直分布、底質の移流沈降過程を考慮することの重要性が判明した。

次に、この方法と、従来から広く行われている数理モデルのみによる海底地形変化の計算結果と比較検討してみた。それによれば、以下のことがわかった。

- (1) 底質の移流沈降過程を考慮に入れても、radiation stress により鉛直分布一様として海浜流を計算する限り、再現性は確保出来ない。
- (2) 海浜流の鉛直分布と取り入れる目的で、物理モデルによる底層流を数理モデルのインプットとして用いたとしても、局所漂砂量方式で漂砂を計算する限り、再現性は確保出来ない。

* 水工部 漂砂研究室長

** 水工部 漂砂研究室

4. Prediction of the Rate of Sedimentation in Channels and Basins by Considering the Deposition Process Due to Convective Move of Bed Materials

Isao IRIE*

Yoshiaki KURIYAMA**

Synopsis

Three dimensional mathematical models which are increasingly utilized recently for the prediction of sea bottom change have some basic limitations in reproducing the sea bottom change because they assume that coastal currents are vertically uniform and they consider only the locally defined sediment movements.

A new method to utilize the strong points of physical model and mathematical model has been developed for the prediction of sea bottom change by combining the bottom layer currents obtained by the physical model together with the mathematical model of bed material suspension applicable to the prototype scale and calculating the sediment movement by computer, and this method has been applied for Taki Port which is located in Ishikawa prefecture.

It has been concluded that the reproduction of the prototype sea bottom change by the present method is quite excellent and this indicated the importance of vertical distribution of coastal current and also of considering the convection of materials in deposition process.

The present method was compared with three dimensional mathematical models which are commonly used for the prediction of the sea bottom change and their reproducibility were evaluated.

* Chief of the Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

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

目 次

要 旨	157
1. は し が き	161
2. 従来の漂砂シミュレーションモデルに対する改良点	162
2.1 モデルの適用条件	162
2.2 底質の移流沈降過程の導入	162
2.3 海浜流の鉛直分布の導入	164
2.4 物理モデルと数理モデル	165
3. 物理モデルと数理モデルの組合わせによる滝港の海底地形変化の予測	167
3.1 滝 港 の 概 要	167
3.2 波と流れに関する水理模型実験	170
3.3 海底地形変化の数値計算	184
3.4 数理モデルを主体にした従来モデルとの比較	193
4. 結 論	203
5. あ と が き	204
参 考 文 献	204

1. はしがき

港湾の位置の選定,あるいは防波堤,航路などの施設の計画を誤ると,航路・港内埋没による維持浚渫に多大な投資を強いられる結果となる。港湾の施設計画は,初期投資と完成後の維持管理費とを勘案して立てられるべきものである。埋没問題に対して最適な施設計画を行うには,施設計画の代替案に対し,将来の埋没土量を推定する必要がある。これには,従来移動床による水理模型実験が有効な方法として実施され,諸問題解決に重要な役割を果たしてきた^{1),2)}。しかし,移動床水理模型実験には,底質移動の相似律に基本的な問題があるため,定性的な結果以上には期待できないことや,実験の実施に多大の時間と労力を要することなどの問題があった。

最近では,数値シミュレーションによる海浜変形予測が,相当実施されるようになった。なかでも海岸線の長期的変化の予測を対象にした一次元海浜変形モデルは^{3),4),5)},波の砕波に伴う沿岸方向のエネルギーフラックスがバランスするように安定汀線形状を求めるというように,複雑な現象にも拘らずその変化過程をある程度的確にとらえているため優れた現地汀線変化の再現性を有している。さらに最近では,海浜あるいは構造物周辺の空間的な地形変化をより詳細に予測するための三次元

的海浜変形シミュレーションも実施されるようになった。例えば,離岸堤周辺の波の変形を数値計算により求め, radiation stress による海浜流を計算し,局所漂砂量公式を用いて底質保存の原理により海底地形変化を計算するものである^{6),7)}。これらは,移動床の水理模型実験と対比され,比較的良い再現性があることが報告されている。しかし,これらの計算例の多くは,海浜流に対する radiation stress 効果が卓越した場合に限られている。実際の底質移動の外力は, radiation stress による流れのみでなく,波による質量輸送流,潮流,砕波による流れなどが複雑に影響しており,それらの外力条件に応じたモデルを用いる必要がある。

本研究は,日本海に面し,防波堤の境界条件が複雑な滝港の場合について,数値シミュレーションの限界を水理模型実験により補うことにより,航路・港内埋没の予測精度を高める方法について検討したものである。

まず,数値シミュレーションでは求めることの困難な波による底層流を固定床による水理模型実験(物理モデルと呼んだ)により求めた。これを現地スケールの問題に適用可能な浮遊モデルと組み合わせることにより,底質の移流沈降過程を入れた海底地形変化に関する数値シミュレーション(数理モデル)を行い,現地の実績と対比した。さらに,この結果と従来行われている radiation

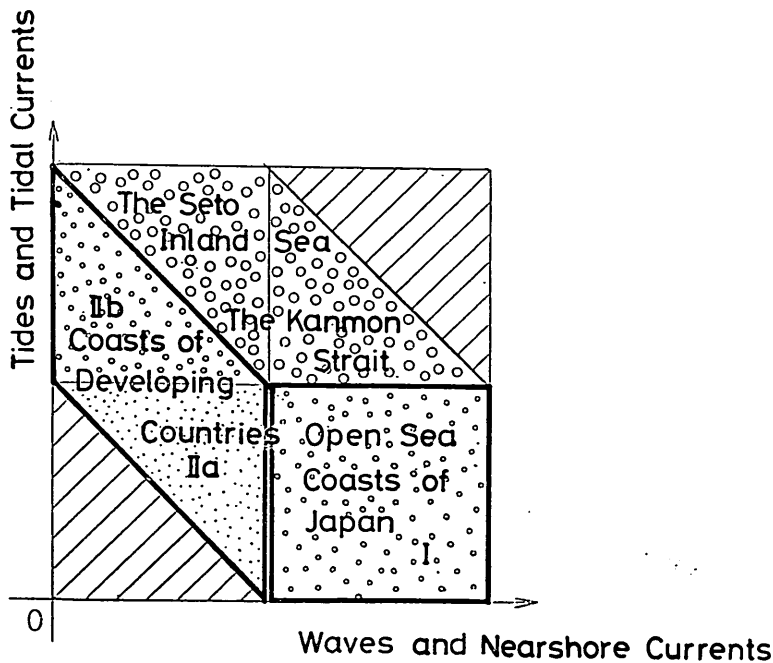


図-1 漂砂の外力条件の地域的相違

stress のみによる海底地形変化の数値シミュレーション法による結果とを比較し、海底地形変化の再現性を検討した。底質の移動モデルとしては、今回の移流沈降過程による結果と、従来方式の局所的漂砂量による結果とを比較した。このような比較検討により、波が支配的外力である場合の航路・港内埋没の予測精度を最も良くする海底地形変化の予測法について検討した。

2. 従来の漂砂シミュレーションモデルに対する改良点

2.1 モデルの適用条件

漂砂に対する外力条件は、地域により異なっており、また内湾域、外海域などの周辺の地形条件によっても異なっている。その外力としては、一般的には波と潮流を考慮することができる。図-1は、漂砂の外力条件の地域的特性を、概念的に示したもので、横軸が波浪の大きさ、縦軸が、潮流の大きさを示す。わが国沿岸の外海に面する港湾は、潮流に比して波による海浜流が、漂砂のおもな外力である。底質はおおむね砂質であり、海浜流のうちおもに底層流により底質は移動する。図の領域 I がこれらの条件に該当するであろう。これに対し、大部分の途上国港湾は、例外を除いては波は一般に小さく、底質も、シルト質のものが多い。季節風による波は、微細な底質を攪乱し巻き上げる役目をするが、実質の底質移動は、潮流や河川流により支配される。図-1の II a, b の領域が、これに相当するであろう。瀬戸内海や関門海峡などでは、一般に潮流が大きく、底質も、粗砂より成る場合が多い。所によっては、外海の波が侵入して来る場

合もある。底質移動に対しては、波も重要であるが、周期的に変化する潮流も大きな役目を果たし、底質は掃流状態で運ばれる。

このように、対象域の地域性に依じて漂砂を支配する底質及び外力特性が異なるので、漂砂のシミュレーションにおいても各ケースごとに異なったモデルが必要であろう。本研究では、図-1のうち、I を対象とする。

I の場合は漂砂のおもな外力は波である。ただし、実際の波による海浜流は、鉛直方向に一様ではなく、底層流が漂砂を支配するであろう。一方、今日ある radiation stress の計算法では、海浜流の鉛直分布まで与えることができない。そこで、本研究ではこれを水理模型実験、すなわち物理モデルにより求め、あとは、数値計算により、地形変化を求めるという新しい方法を用いて、淹港の海底地形予測を行った。

2.2 底質の移流沈降過程の導入

本研究では、従来の漂砂モデルに比べ、2つの点で改良を加えている。1つは、底質の移流沈降過程の導入であり、いま1つは、波が漂砂を支配する場合に対して、海浜流の鉛直分布を考慮に入れたことである。本節では前者について、図-2にもとづき説明する。従来の漂砂による海底地形変化量の計算は、図-2の左側の図に示すように、底質の連続の式より、

$$\Delta z / \Delta t = (Q_{x,i} - Q_{x,i+1}) / \Delta x + (Q_{y,i} - Q_{y,j+1}) / \Delta y \quad (1)$$

ここに、 $\Delta z / \Delta t$ が、単位時間当たりの海底変化量を示

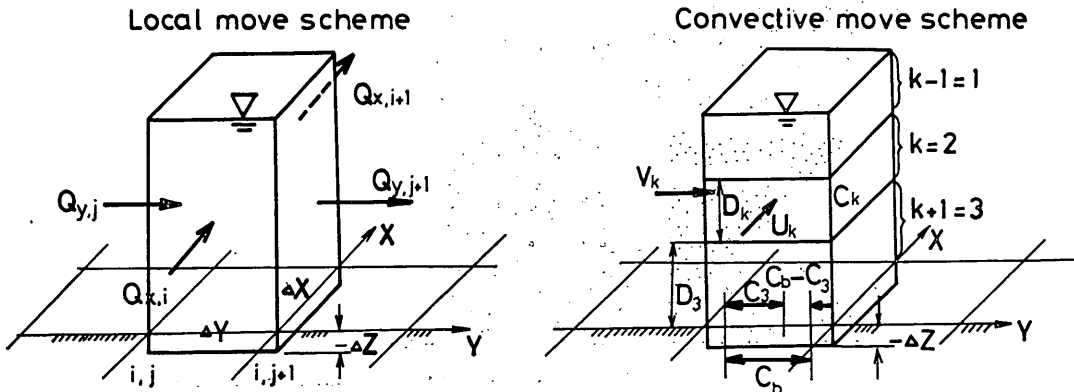


図-2 局所漂砂量方式と移流沈降方式との相違

し、 $Q_{x,i}$, $Q_{y,j}$ は、 i , j 点における水深、波、流れにより定まる局所漂砂量である。しかし、この方式では、航路港内埋没を求めに際しては非常に不都合なことが生じてくる。これを図-3の航路埋没過程の模式図により述べる。図の上段は、実際の航路で考えられる埋没過程を示したもので、漂砂の上手の水深の小さい所で波や流れにより巻き上げられた底質は、航路内に入ると水深が大きくなって、波や流れによる底面攪乱も小さくなるので、それまでの浮遊砂を保持できなくなり、急速な沈降が始まる。しかしやがて、浮遊砂量も航路内の条件に応じた濃度に落ち着き、それ以上の底質の沈降はなくなる。したがって、航路は図の点線に示すような断面形状にて埋没する。

一方、(1)式に示した局所漂砂量方式では、漂砂量 $Q_{x,i}$, $Q_{y,j}$ が、局所的な水深、波、流れの条件に応じて計算されるので、これらの条件が一定な航路内の水平床部では埋没は発生し得ず、結局、図の中段に示すように、水深が変化する航路法面にのみ沈降が発生することになり、実際とは合わない結果となる。

そこで、本研究では、図-2の右側に示すように、底質の移流を考慮し、沈降過程を計算した。すなわち、図-2

に示す水柱を厚さ D_k の k 層に分け、移流拡散の式により浮遊砂濃度を計算した。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(c_k D_k) + \frac{\partial}{\partial x}(u_k c_k D_k) + \frac{\partial}{\partial y}(v_k c_k D_k) \\ & + w_k c_k - w_{k+1} c_{k+1} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x D_k \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y D_k \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) \\ & + \gamma_{k-1} (c_{k-1} - c_k) - \gamma_k (c_k - c_{k+1}) \\ & + \omega_0 c_{k-1} - \omega_0 c_k \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、

c_k : k 層での浮遊砂濃度

D_k : k 層の厚さ

u_k : k 層における x 方向の流速成分

v_k : k 層における y 方向の流速成分

w_k : k 層の底面上向きの流速成分

k_x, k_y : x, y 方向の水平拡散係数

γ_k : k 層と $k+1$ 層との内部境界面交換係数

ω_0 : 砂の沈降速度

今回は、3層モデルに対する計算を行い、厚さ D_3 の最下層の平均濃度 c_3 を求めた。海底面の変化量の計算

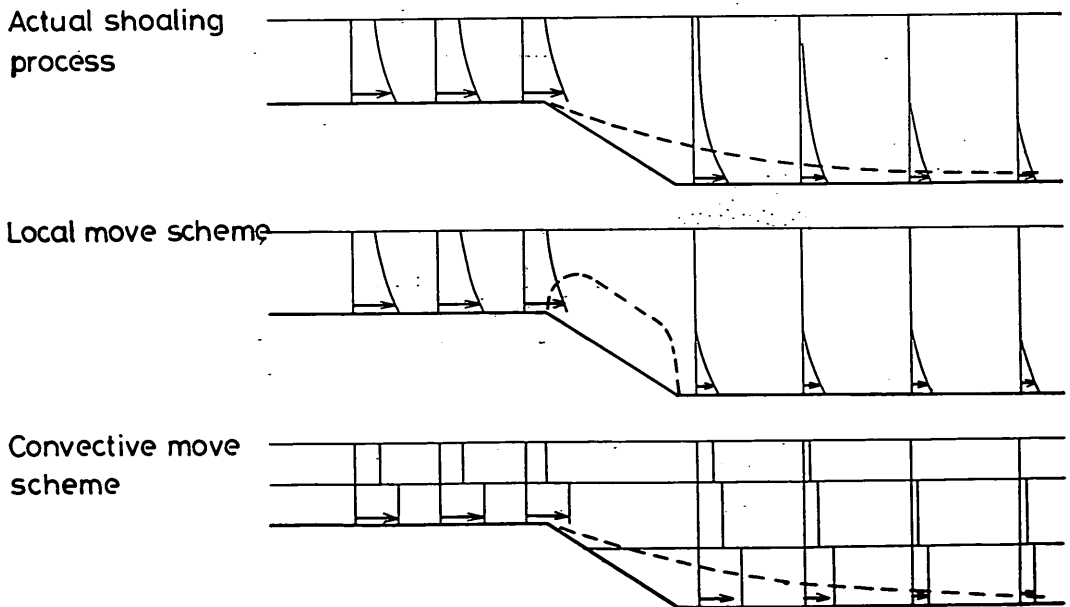


図-3 局所漂砂量方式と移流沈降方式との航路埋没過程の相違

は次式によった。

$$\Delta z / \Delta t = \omega_0 c_3 - \varepsilon_z \frac{2}{D_3} (c_b - c_3) \quad (3)$$

ここに, ε_z : 鉛直境界面交換係数

c_b : 海底面において定義される浮遊砂濃度

(3)式によれば, 底質が浮遊沈降無しの定常状態 ($\Delta z / \Delta t = 0$) で流れている場合, もし, 水深の大きいところへきて, その条件で定まる底面濃度 c_b が減少したとすれば, 右辺は正の値を持つようになり底質の沈降が始まる。この沈降により c_3 の値も減少し, やがて $\Delta z / \Delta t \approx 0$ の状態に近づくことになる。図-3の下段にこの過程を模式的に示してある。以上の沈降過程の結果, 航路は図の点線の形で埋没するものと考えられ, 同図最上段の実際の埋没とよく似たものになることが期待される。

2.3 海浜流の鉛直分布の導入

本研究における第2の改良点は, 海浜流の鉛直分布の導入である。漂砂の外力として波が支配的である場合, 海浜流が底質を輸送することにもなるが, 数値シミュレーションにおいては, 海浜流の鉛直分布は一様として取

扱われる。しかし, 現実には海浜流は鉛直分布を有するものであり⁹⁾, 底質が砂質の場合は特に底層流を知る必要がある。しかし, 底層流は, 波による水粒子運動のため底面近くで生ずる乱流境界層に支配されるものであり, 現在では, 数値計算により求めることは不可能に近い。そこで, 今回は, 水理模型実験による物理モデルで, 海浜流の鉛直分布特性を求め, これを数理モデルの入力として海底地形予測の数値計算をおこなうことにした。ここで問題は, 海浜流の相似則がまだ確立されていないことである。例えば, 海浜流を相似に保つために, 底面粗度の調節などが考えられるが, 現在の所, その方法は解明されていない。しかし, 現地で発生すると考えられる定性的な海浜流の底層流を水理模型実験により求めることは可能であろう。筆者らは, 模型水槽内での波による底層流が, 定性的には現地スケールと同じ海底地形変化を生じさせることを, 模型と現地と対比することにより確認している⁹⁾。浮遊砂の濃度は, 底面近くの方が上方の水中部に比べ, 桁違いに多い。したがって漂砂は底層流に支配されると言っても過言ではないであろう。実際の計算は, 図-4に示すようなことになる。図

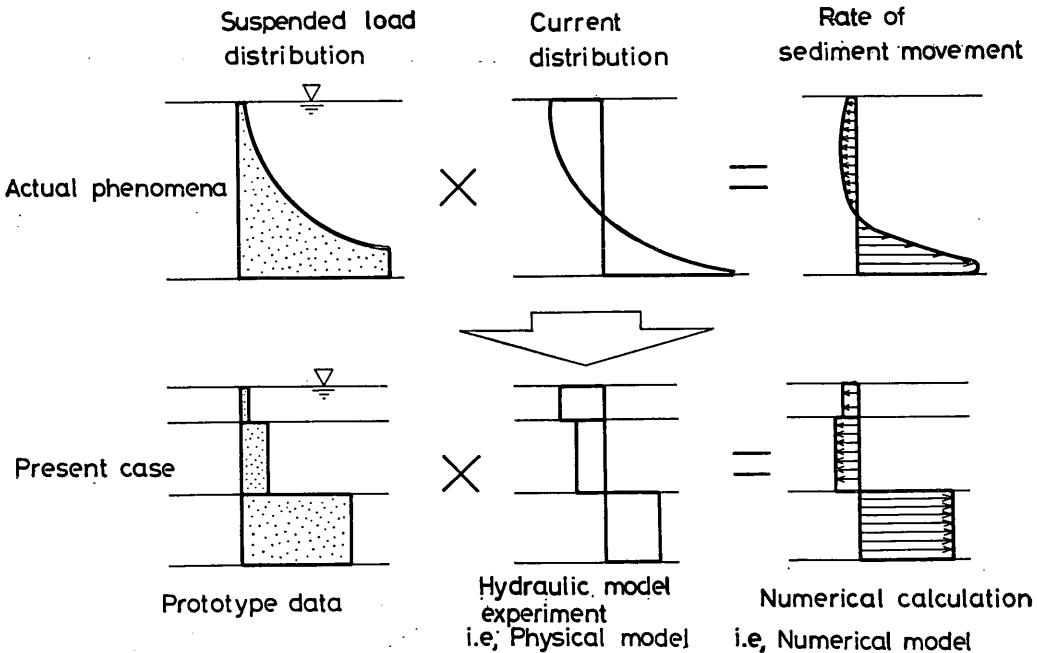


図-4 海浜流が鉛直分布を有する場合の漂砂量の計算

中上段は、実際に現地で生じていると考えられる過程を模式的に示したものである。浮遊砂濃度と流れの積により、図の右端に示すような漂砂が生じるであろう。今回の計算では、水深方向に3層に分割し、各層ごとに平均した浮遊砂量（左端）と、物理モデルで求めた底層流および流体の連続の式を満足させることで求まる中層、上層流（中央）と掛け合わせることで、右端に示すような漂砂量を求める。この場合、中層、上層流は、底層流にもとづいて連続の式から求めたものであるため、必ずしも現地の分布と合っていない可能性が大きいですが、これらの層での浮遊砂の濃度から見て、支配的な漂砂過程を見るには支障ないものと思われる。

2.4 物理モデルと数値モデル

今回の海底地形変化予測の実施フローを図-5に示す。図中左半分は、物理モデルと数値モデルの組み合わせの場合のフローであり、右半分は数値モデルのみによる場合のフローである。

物理モデルと数値モデルの組み合わせ方式において

は、水理模型実験により漂砂の外力に関係する表層流、底層流、波高、波向を求める。実験における測定メッシュは、電算機による数値計算のメッシュとするにはあまりにも荒いので、計算の上でメッシュを補間し、より密なデータとすると共に、水路内の水の振動、測定誤差などにもとづくデータのばらつきを一定の処理により平滑なものとする。さらに、3層に底層流測定値を初期値として与え、下の層を固定しつつ順次連続の式が成立するように、中層、上層を修正する。このような過程を経て得られた上層、中層、下層の流況を入力として、以下のフローにおける海底地形変化の数値計算を実施する。一方、図-5の右側に示す数値モデルのみによる場合は、波高分布、波向分布、流れ（鉛直方向に一様分布）を数値計算で求めるものである。

以上のような種々の方法により海底地形変化の計算を行い、実際の海底地形変化が最も精度よく再現されるのはどの方法であるかを調べた。

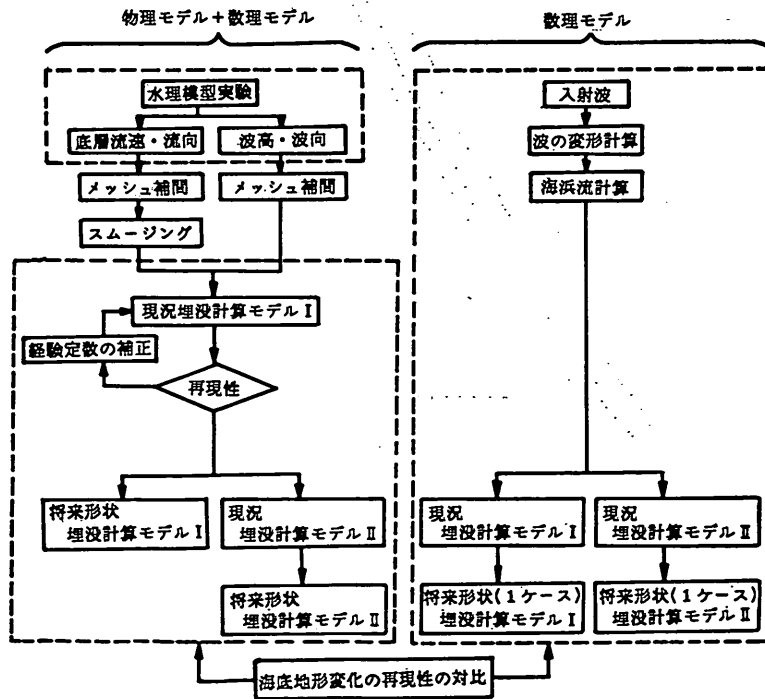


図-5 海底地形変化シミュレーションの実施フロー

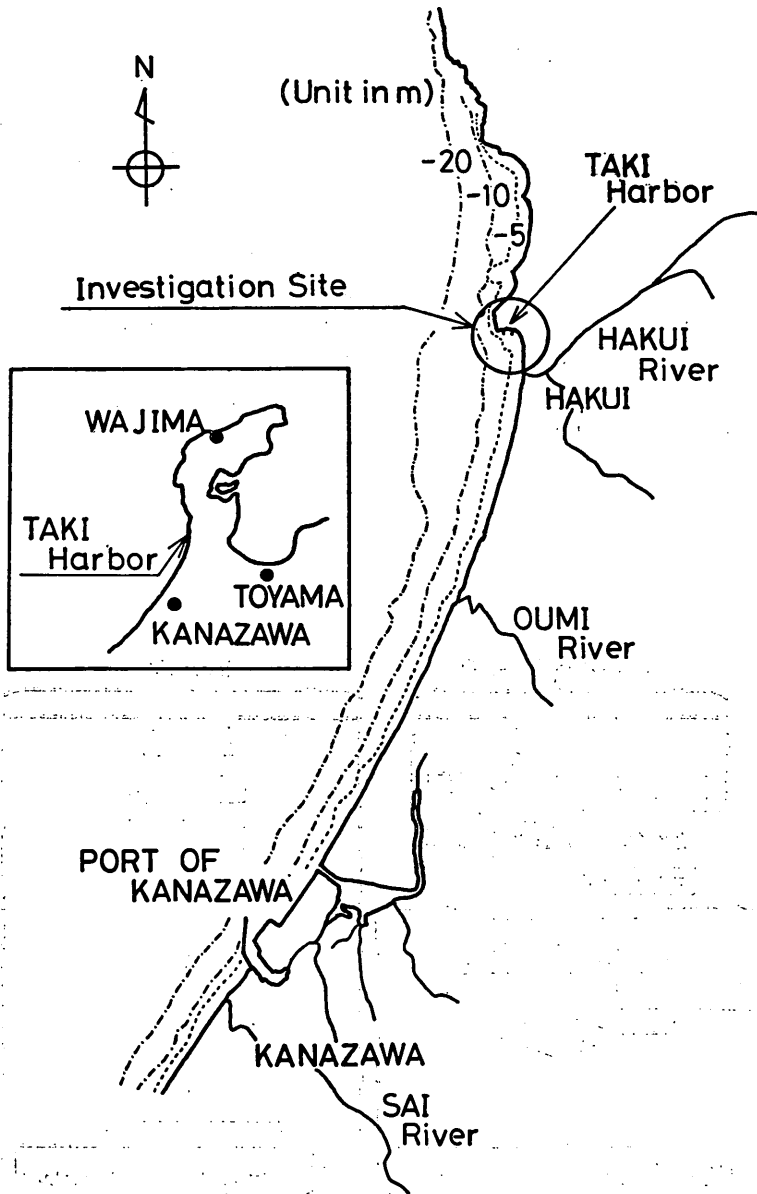


図-6 滝港の位置

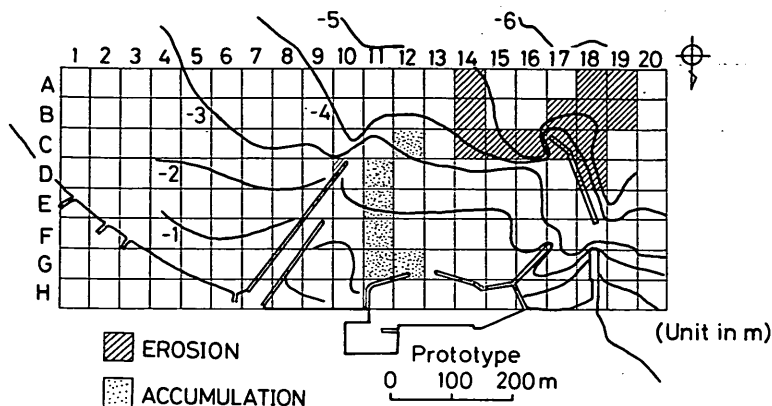


図-7 滝港の長期的な海底地形の変化傾向

3. 物理モデルと数値モデルの組合せによる滝港の海底地形変化の予測

3.1 滝港の概要

(1) 位置及び経緯

滝港は、能登半島の西岸に位置し、これより南西へ向けては全長約80 kmの大砂丘があり、また北側は急峻な岩礁地帯となっている。滝港周辺は東日本有数の良漁場であったことから、大正8年より港湾事業を進め、昭和5年に施設を完成した。しかし、漂砂による港内埋没が激しいため、その後も調査と港湾整備が進められてきたが、今日でもなお、維持浚渫が毎年実施されている。このため、港内埋没を防止し、港湾を安全に管理運営する目的で、最も合理的な防波堤整備計画が検討されるに至ったものである。図-6に滝港の位置を示す。また図-7は、滝港の長期的な海底地形の変化傾向を示したものである。

本港の東半分の港内が長期的に堆積傾向をましており、これが航路の埋没にも寄与しているものと考えられる。一方、西防波堤の先端沖側付近の海底が、侵食傾向を示している。これは、西防波堤の付根近くの開口部からの流れが強いことが観測されている¹⁰⁾ことから、これによる影響ではないかと思われるが、もしそうであれば、防波堤方線計画を工夫することにより、この力を港口埋没防止に利用することも考えられる。

(2) 風及び波

本港における風向風速は、昭和52年～54年に観測されているが、強風は当然のことながら冬期に集中し、その卓越風向は、W～SWとなっている¹⁰⁾。日本海に面する

本港では、風向と来襲波の波向とは一般に一致せず、漂砂の外力の向きを知るにはやはり波向を詳細に知る必要がある。しかし本港では継続的な波浪観測は行われていないので、比較的近い位置にある福井港、金沢港および輪島港の観測データを利用するほかに方法がない。

表-1は、昭和52年から55年にかけて金沢港にて観測された波高周期の年間あたりの発生頻度を示したものである。最大波高としては、7.5～8 mのものが観測されているが、漂砂を支配する波は、これより頻度の多いより小さな波が対象となる。波向については、この期間の金沢港の観測値がなかったので、福井港における昭和53～55年の観測結果を表-2に示す。波向はNNW～Wに広く分布しているが、滝港の波浪条件を求めるには、金沢港の波高周期と共に、福井、金沢港の観測値から沖波特性を求め、滝港の海底地形にあわせて屈折回折計算を行う必要がある。

(3) 潮汐

本港沖合の潮流に関する研究¹¹⁾によれば、恒流は北流であるが、卓越風によって流れのパターンが相当影響を受けることが知られている。図-8は、同沿岸の恒流タイプの分類を示しているが、卓越風により4つのタイプに分類されている。また、同研究によれば、沿岸漂砂の卓越方向は南向きであり、これが、沖合の潮流の影響で北上する漂砂と均衡する関係にあるとされている。

表-3は、滝港の調和常数を示すが、各分潮の値は非常に小さいものとなっている。

(4) 漂砂の特性

本港は昭和5年に指定港湾となったが、その後昭和8年には著しい埋没のため使用不能に陥った。昭和27年

入江 功, 栗山善昭

表-1 金沢港における波高別・周期別出現頻度表(通年)

昭和52年～昭和55年

周期(sec) 波高(m)	H_{max}	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1	13.1	14.1	計
	0.5m 以下	～3.0	～4.0	～5.0	～6.0	～7.0	～8.0	～9.0	～10.0	～11.0	～12.0	～13.0	～14.0	～15.0	
0.00～0.25	1,667	36	223	94	15	2	1								2,038
0.26～0.50	1,165	37	516	772	588	203	36	7	3	1	1				3,331
0.51～0.75		2	274	623	735	476	113	11	4	4	1				2,243
0.76～1.00			68	352	560	521	222	28	6	1					1,758
1.01～1.25			7	118	330	436	260	50	1						1,202
1.26～1.50				42	164	313	280	81	7						887
1.51～1.75				11	73	221	245	111	9	1					671
1.76～2.00				2	38	127	215	138	25						545
2.01～2.25					25	79	161	131	42	2					440
2.26～2.50					5	67	130	116	47	9					376
2.51～2.75					3	47	100	119	47	6					322
2.76～3.00						14	84	105	52	13	2				270
3.01～3.50						11	73	130	84	30	1				329
3.51～4.00						1	23	91	76	29	5				225
4.01～4.50							2	32	69	28	3				134
4.51～5.00								10	52	27	5				94
5.01～5.50								1	39	26	8				74
5.51～6.00									14	22	12	2			50
6.01～6.50										8	5	1			14
6.51～7.00										1	2	1			4
7.01～7.51											2			1	3
7.51～8.00												1			1
8.01～8.50															
8.51～9.00															
計	2,832	77	1,088	2,014	2,536	2,518	1,945	1,161	579	208	47	5	1		15,011

表-2 福井港における波向

昭和53年～昭和55年

波向	静穏	NNE	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW
冬 季	1,424 (56.2)			81 (3.2)	407 (16.1)	384 (15.2)	234 (9.2)	3 (0.1)	1 (0.0)	
春 季	2,128 (75.0)		16 (0.6)	309 (10.9)	208 (7.3)	46 (1.6)	131 (4.6)			
夏 季	2,646 (93.1)		2 (0.1)	2 (0.1)	10 (0.4)	22 (0.8)	155 (5.5)	6 (0.2)		
秋 季	2,179 (81.9)		6 (0.2)	116 (4.4)	141 (5.3)	128 (4.8)	89 (3.3)	9 (0.3)		
通 年	8,377 (77.0)		24 (0.2)	508 (4.7)	766 (7.0)	580 (5.3)	609 (5.6)	18 (0.2)	1 (0.0)	

注：()は発生率(%)

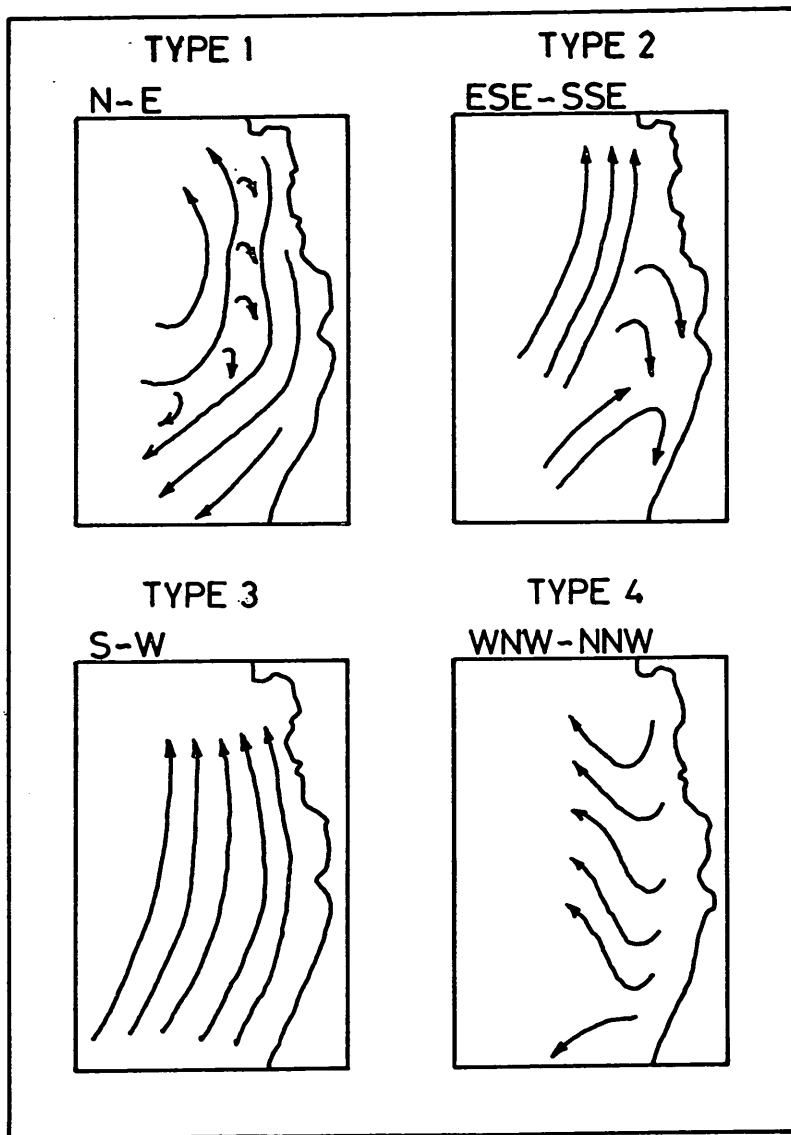


図-8 恒流タイプの分類

表-3 滝港潮位調和常数

	M ₂	S ₂	K ₂	K ₁	O ₁	P ₁
振幅 (cm)	6.0	2.2	0.6	5.0	5.3	1.7
遅角(度)	14.9	102.3	102.3	345.9	310.8	345.9

には地方港湾に指定され、埋没に対する対策のため防波堤の整備が進められてきたが、漂砂との戦いは今日もなお続いている。このように埋没に関する厳しい経験を積

んできたため、本港の漂砂に関する調査成果の蓄積は、港の規模の割には他港に比類を見ないものがある。しかしそれでも、例えば港内を埋没させる底質は一体どこから補給されて来るのか、といった漂砂機構については、いまだに不明な問題が残されている。図-9に本港底質の粒度曲線を示すが、中央粒径は $d_{50}=0.14\text{mm}$ と非常に細かい砂より成っている。これは波により容易に浮遊し、静穏な港内に侵入し埋没する。底質が細かいため、本港海岸は非常に遠浅な地形を形成している。したがっ

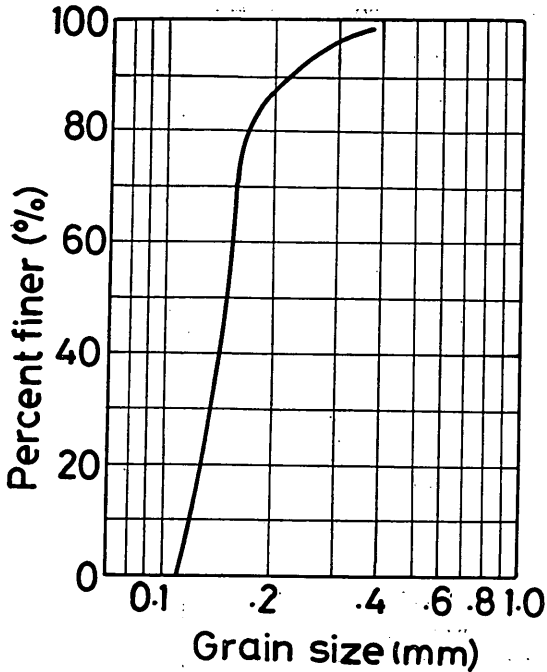


図-9 滝港底質の粒度曲線

て、埋没のため補給される底質は、いわば滝港を取り囲んでいるわけで、これが本港が埋没から逃れ得なかった原因でもある。海象が荒く、しかも細砂で囲まれた本港が、埋没から解放されるためには、通常の港湾にはない特別のくふうを要求されるかもしれない。したがって漂砂対策のシミュレーションにおいては、浮遊砂が移流に

より港内の奥深く侵入する過程を十分再現されねばならない。

3.2 波と流れに関する水理模型実験

(1) 実験条件の選定

現地海岸における波は、波高、周期、波向ともに時々刻々変化しており、これに応じて構造物周辺の漂砂も変化している。しかし長期的に見れば、港に寄せて来る波は一定の特性を有し、海底地形もこれに応じて長期的に一定の傾向をもって変化しているであろう。したがって漂砂に関する水理模型実験においては、対象とする海岸の漂砂を支配していると考えられる波浪諸元を選定することがまず第一に必要である。漂砂量は、一般に波のエネルギー集積値と関係があると考えられるので、この観点から実験波を決定した。

表-4は、金沢港における波の観測値から、季節ごとのエネルギー平均波の諸元を示したものである。高波浪が卓越する冬期に対し、波高2.4~2.6m、周期7.5~8.7 sec が得られている。また、図-10は、同じ金沢港の波浪記録から波高 H ごとのエネルギー集積指標 $\sum H_i^2 T_i$ を示したものである。これによれば、特に冬期についてみると、波高3.5~4.0mが、代表波高として読み取ることができる。この金沢港の波を沖波に換算し、沖波から滝港海岸の海底地形を用いて、滝港に作用する波を求めた。このような波の変形過程で、周期は不変と考えられるので、まず金沢港の波による上記の検討結果から、波の周期 $T=8.0\text{sec}$ を決定した。次に、沖波へ換算するための代表波の波向を求めため、表-5に示すような波向別沖波エネルギーを求めた。この結果をもとにして、

表-4 エネルギー平均波浪 (金沢港)

	春季	夏季	秋季	冬季	通年
$\sum H_i^2 T_i (\text{m}^2 \cdot \text{sec})$	34457	5572	44010	139952	223990
$\sum H_i^2 (\text{m})$	4423	987	5158	16061	26629
$\sum T_i (\text{sec})$	15561	8775	14634	20700	59670
N	2683	1755	2399	2760	9597
$\bar{T}_1 (\text{sec})$	7.8	5.6	8.5	8.7	8.4
$\bar{H}_1 (\text{m})$	1.28	0.75	1.47	2.41	1.67
$\bar{T}_2 (\text{sec})$	5.8	5.0	6.1	7.5	6.2
$\bar{H}_2 (\text{m})$	1.49	0.8	1.73	2.60	1.94

S 52.12~S 55.11

$$\bar{T}_1 = \frac{\sum H_i^2 T_i}{\sum H_i^2} \quad \bar{H}_1 = \sqrt{\frac{\sum H_i^2}{N}}$$

$$\bar{T}_2 = \frac{\sum T_i}{N} \quad \bar{H}_2 = \sqrt{\frac{\sum H_i^2 T_i}{N \cdot \bar{T}_2}}$$

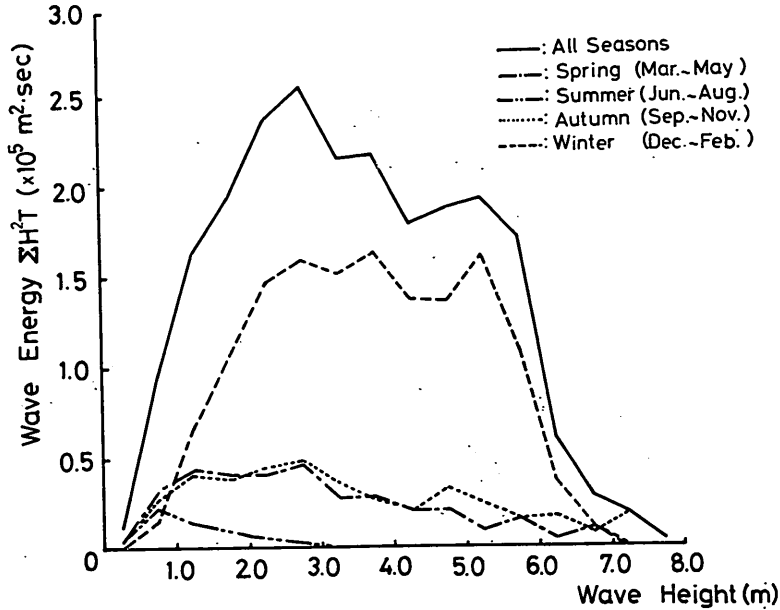


図-10 波高毎のエネルギー集積指標 $\sum H_i^2 T_i$

表-5 波向別沖波エネルギー

沖波波向	沖波エネルギー ($\times 10^7 \text{m}^2 \cdot \text{sec}$)				
	春季	夏季	秋季	冬季	通年
W	0.55	0.28	0.98	2.48	4.29
WNW	0.27	0.13	1.31	3.34	5.05
NW	1.10	0.04	1.12	3.60	5.86
NNW	0.96	0.01	0.54	0.65	2.16
合計	2.88	0.46	3.95	10.07	17.36

S 53.1 ~ S 55.12

表-6 平均波向

	春季	夏季	秋季	冬季	通年
平均沖波波向	N 48° W	N 78° W	N 61° W	N 62° W	N 60° W
平均浅海波波向	N 76° W	N 93° W	N 84° W	N 85° W	N 83° W

$$\text{平均沖波波向} = \frac{\sum \text{各波向} \times \text{各波向のエネルギー}}{\sum \text{波のエネルギー}}$$

として求め、屈折計算により浅海の波向を求めたのが表-6である。この表より、冬期の値を取って、実験対象波向を

沖波 N 62° W
浅海波 N 85° W

とした。

これを用いて、金沢港の波高を滝港における波に換算し、対象波高を $H=3.0\text{m}$ とした。

結局実験波としては、

波高 3.0m
周期 8.0sec
波向 N 62° W (沖波)

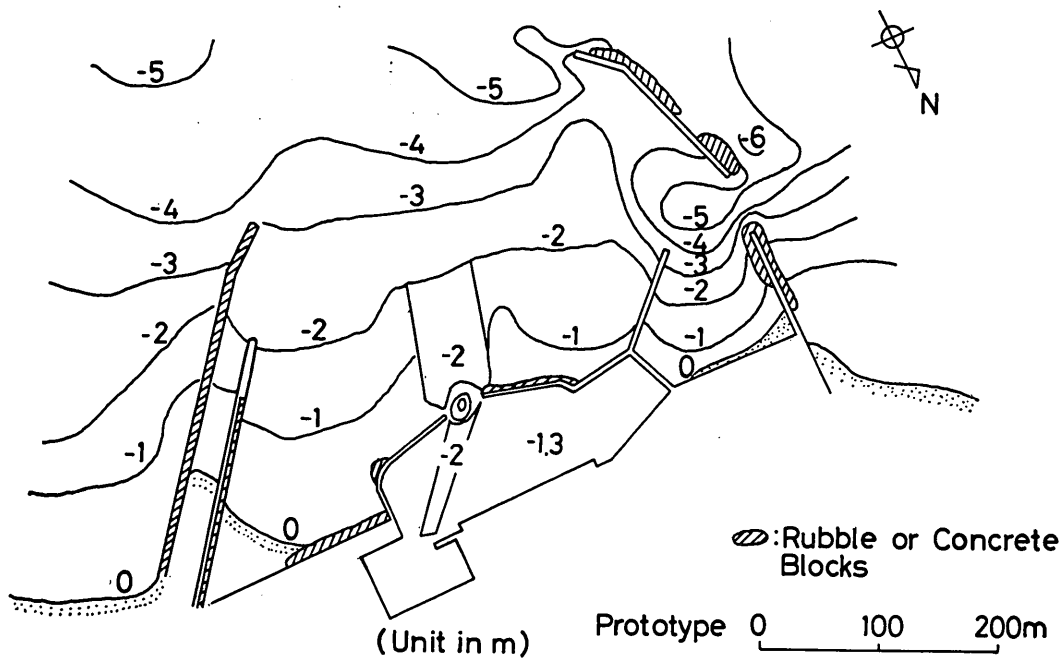


図-11 実験に用いた滝港の現況地形

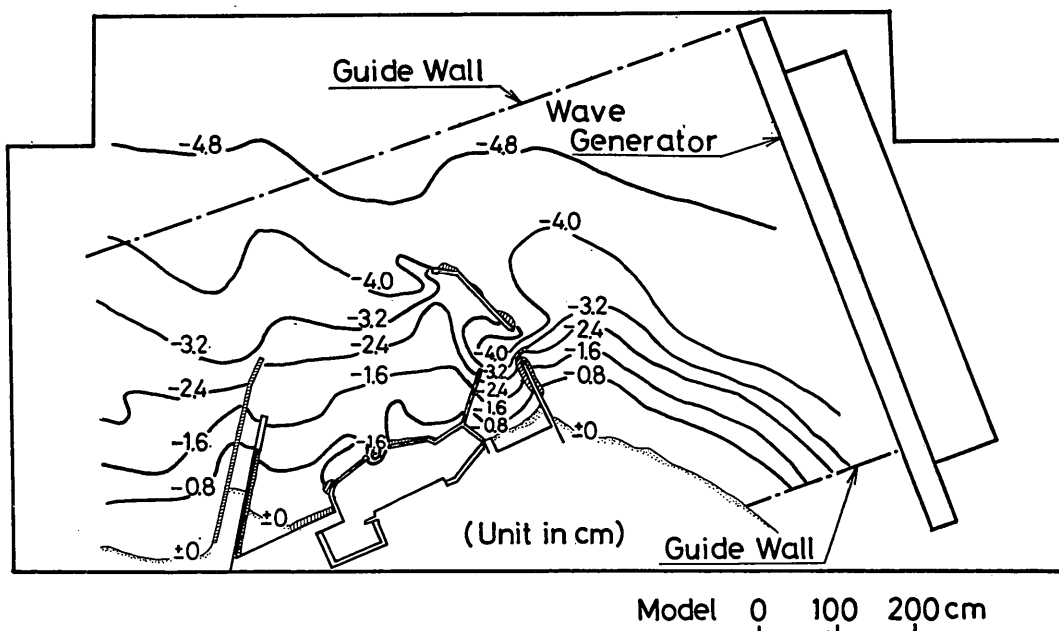


図-12 模型実験用水槽

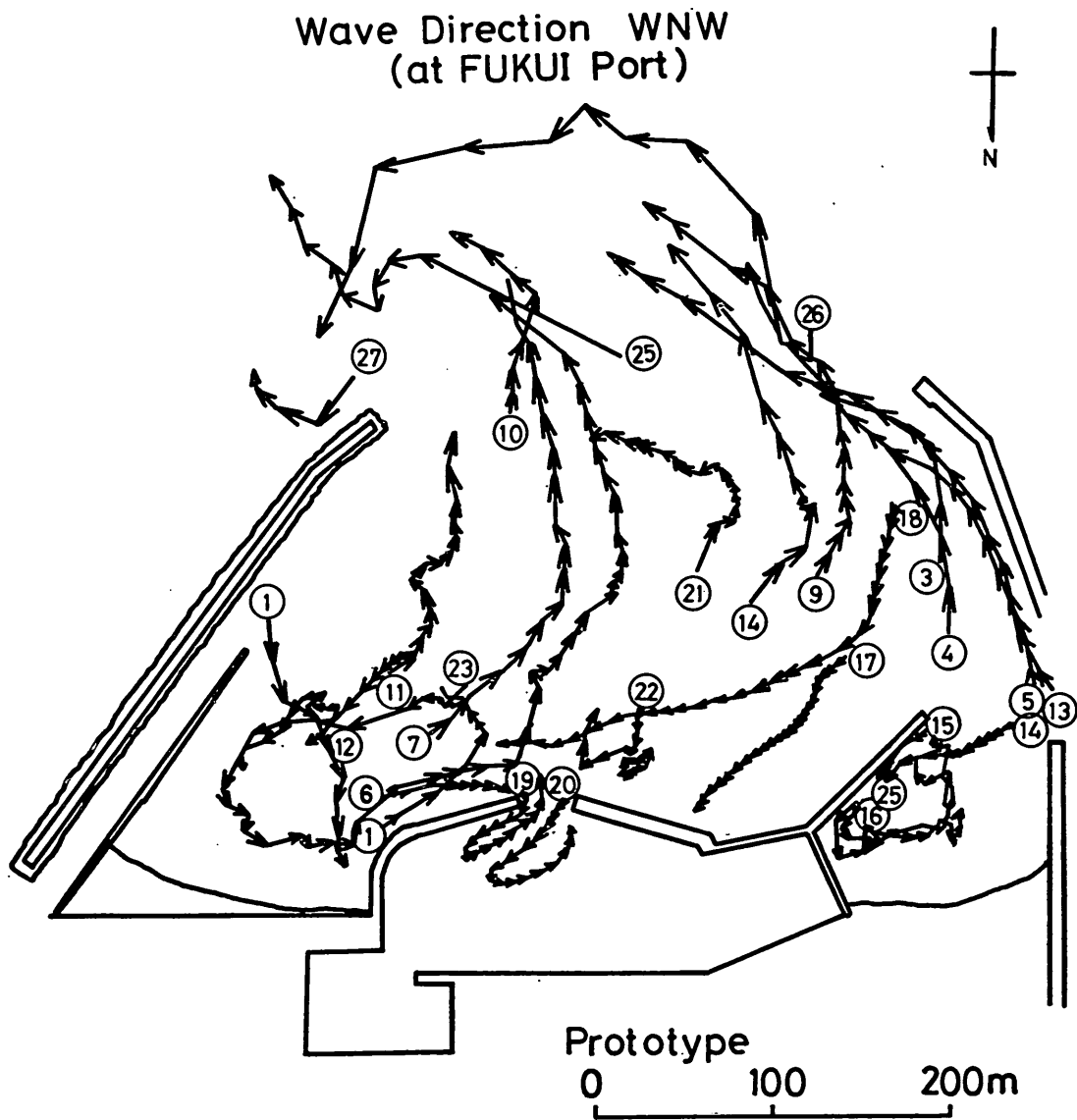


図-13 現地における表層流

表-7 表層流観測時の波浪条件

番 号	年・月・日	波 高	周 期	風 向	風 速
① ③	56. 2. 3	2.13m	6.9sec	SSW	4.2~8.4m/s
④ ⑦	56. 3. 7	2.02	7.0	SSW	4.4~7.5
⑧ ⑮	55. 2. 4	3.47	8.2	WSW~W	3.8~14.4
⑮ ⑳	55. 2. 5	3.20	7.2	WSW~W	12.3~15.2
㉑ ㉒	54. 1.23	2.46	8.1	SW	8.2~9.1
㉓ ㉔	52.11.30	2.55	8.2	NNW	2.7~7.3
㉔ ㉖	44.11.16	5.15	9.0	WSW~WNW	2.0~15.0

N 85° W (浅海波)

と求めたが、波高については、流況実験の現地再現性を高めるため、微調整をおこなった。

実験対象範囲としては、滝港周辺および港内の漂砂現象が再現されるように、沿岸方向1.0 km, 岸沖方向0.5 kmを対象とし、これを、5.5 m × 10 mの潮流流平面水槽内に $1_r = 1/125$ で再現した。

(2) 実験方法

図-12は、図-11に示した滝港の模型を潮流流平面水槽内に設置した状況を示す。造波装置はフラッタータイプで、模型床は現地地形にあわせ、コンクリートで造った。

(1) 測定項目

数値モデルへの入力を求めるため、つぎの項目を測定した。

- ・波 高
- ・波 向
- ・表層流
- ・底層流

さらに、底質移動状況を把握するため、各測点に軽量物質を置き、一定時間内の固定床上の広がりを見写撮影

した。上記の項目の測定は、対象範囲全域に対し、40 cm 間隔 (現地50 mに相当) で行い、防波堤などの境界条件の複雑な箇所や、地形の複雑な箇所では、測定メッシュをさらに密にした。

(a) 測定方法

波高測定は、容量式波高計を用い、ペン書きオシログラフに記録した。波向は、波作用時に水槽上面から写真撮影を行い、波峰線とメッシュ線とのなす角を読み取ることで測定した。

流況については、表層流は、直径10 mm程度の浮くフロートを投入し、目視によりその移動方向を追跡した。底層流については、流れの比較的速い所には、比重1.0強に調節した直径3 mmのフロートを5秒間追跡することで測定した。また、港内部のように、流れの遅い箇所では、冷した過マンガン酸カリの溶液を各測点に投入し、30秒ごとに写真撮影を行い、溶液の重心の移動を読み取ることで測定した。

底質移動の激しさと移動方向を記録しておく目的で、イオン交換樹脂 (比重約1.20中央粒径0.8 mm) を各格子点に置き、投入後1分ごとに写真撮影を行った。

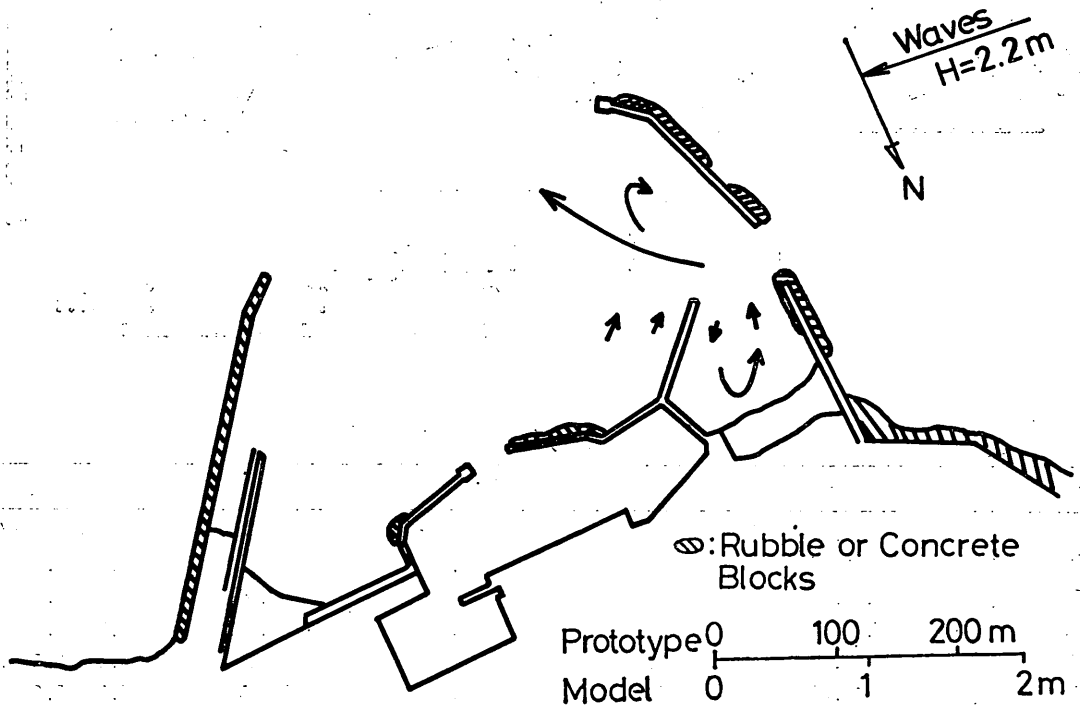


図-14-(1) 予備実験における流況 $H=2.2m$

底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測

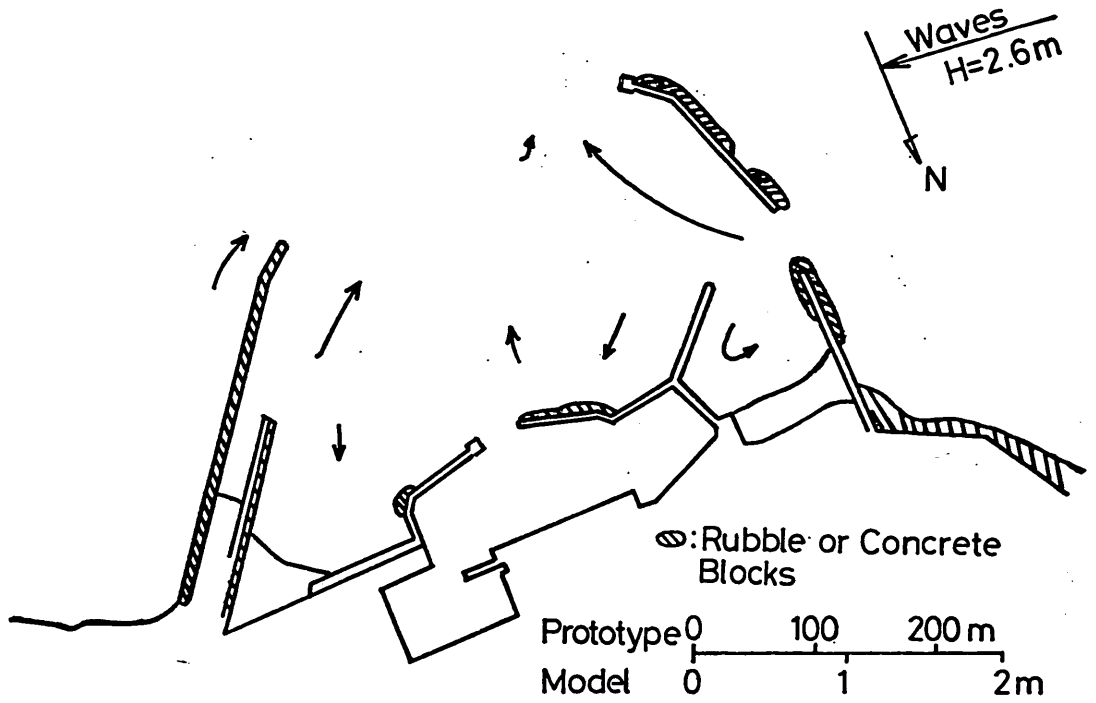


図-14-(2) 予備実験における流況 $H=2.6\text{m}$

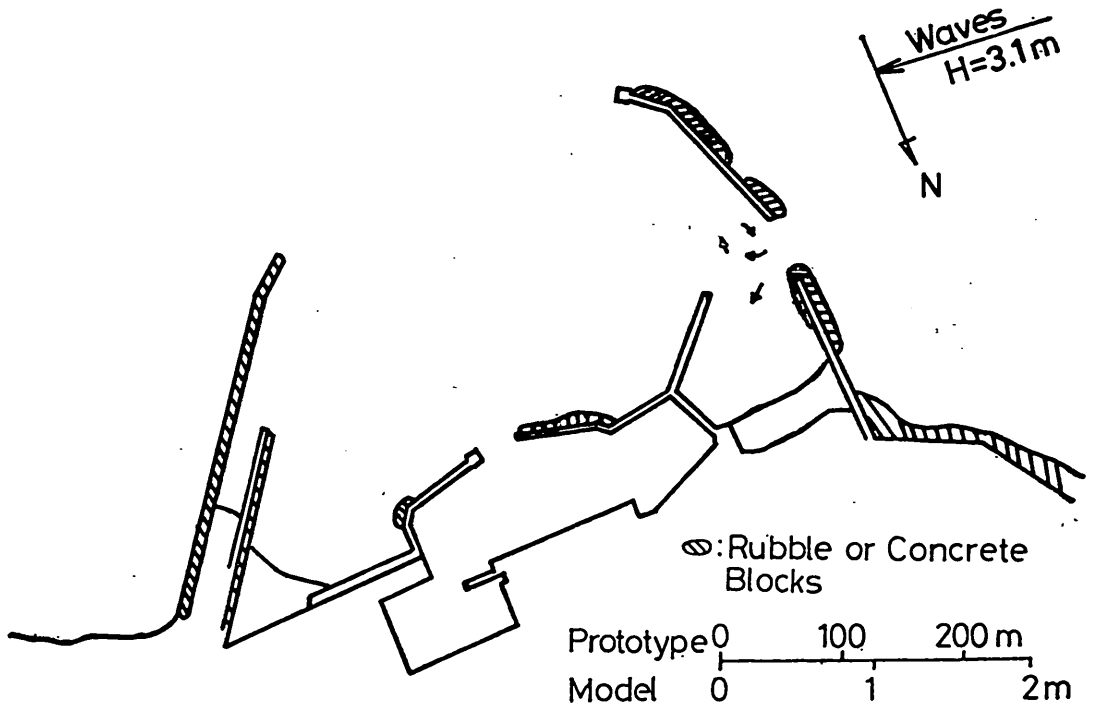


図-14-(3) 予備実験における流況 $H=3.1\text{m}$

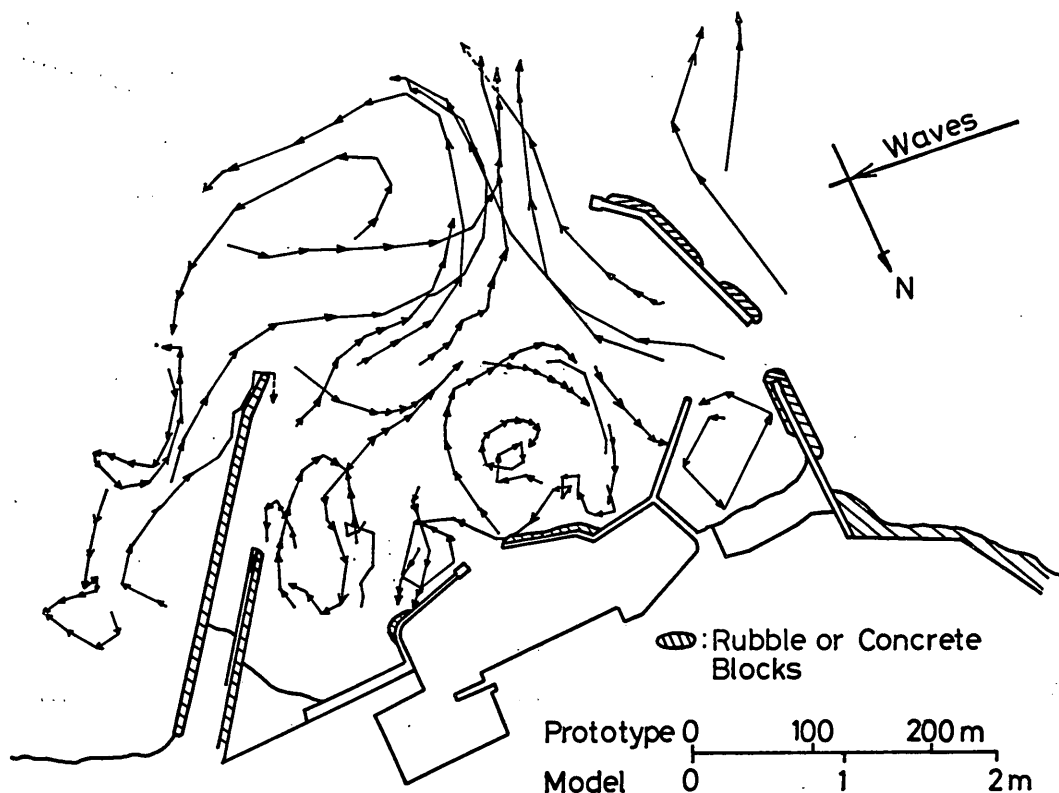


図-15 水理模型実験による表層流

(3) 実験結果と再現性の検討

前述したように、実験波の諸元は、現地の波浪エネルギー頻度を考慮に入れて求めた結果、 $H=3.0\text{m}$ 、 $T=8.0\text{sec}$ と中時化程度のもとなった。しかし、こうして得られた波浪諸元が、実際の中時化時を代表するものであるかどうかについては、予め調べておく必要がある。そこで本実験に入るに先立ち、流況の再現性を調べる予備実験をおこなった。

滝港においては、冬季風浪時における港内外の表層流の測定が、漂流桿により頻繁に行われていた。この結果から、今回の実験波の波向である $N 62^\circ W$ に近い波向時に測定された流況だけを選び出し、図-13に示すような流況図を作成した。図中のフロート流況に付してある番号に相当する波、風の条件を表-7に示すが、ほとんどの場合が波高 $2\sim 3\text{m}$ の中時化のもとなっている。図-13によれば、西防波堤開口部から港内を通して沖へ向かう流れ、港内沖側半分での沖向きの流れなどが特徴的である。予備実験においては、波高を 2.2m 、 2.6m 、 3.1m と三段階に変化させて表層流のパターンを概略的に調

べたが、その結果を図-14-(1)~(3)に示す。これより $H=2.6\text{m}$ の場合の方が、図-13に示すパターンに近くなっていることがわかる。波高の変化による流況分布のこのような微妙な相違は、港外における碎波状況の相違、模型実験では単一波を用いているためと思われる。一方現地においては、三次元的方向スペクトルを有する不規則波が作用するため、波高による流況の相違がそれほど顕著ではないのではないと思われる。結局、実験波としては、 $H=2.6\text{m}$ を選定した。

図-15は、模型実験による表層流の測定結果である。これを図-13の現地の流況と対比してみると、西防波堤開口部から港内へ侵入して沖合へ向う流れ、港内沖側における沖へ向う流れなどが非常に似ていることがわかる。表層流の分布の定性的相似が確認されても、漂砂の分布の定性的相似までが確認されたわけではない。相似が確認された表層流の下で、底層流を詳細に測定し、この結果から漂砂を把握する必要がある。

(b) 底層流

水より若干重いフロート、あるいは冷却して水槽内の

底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測

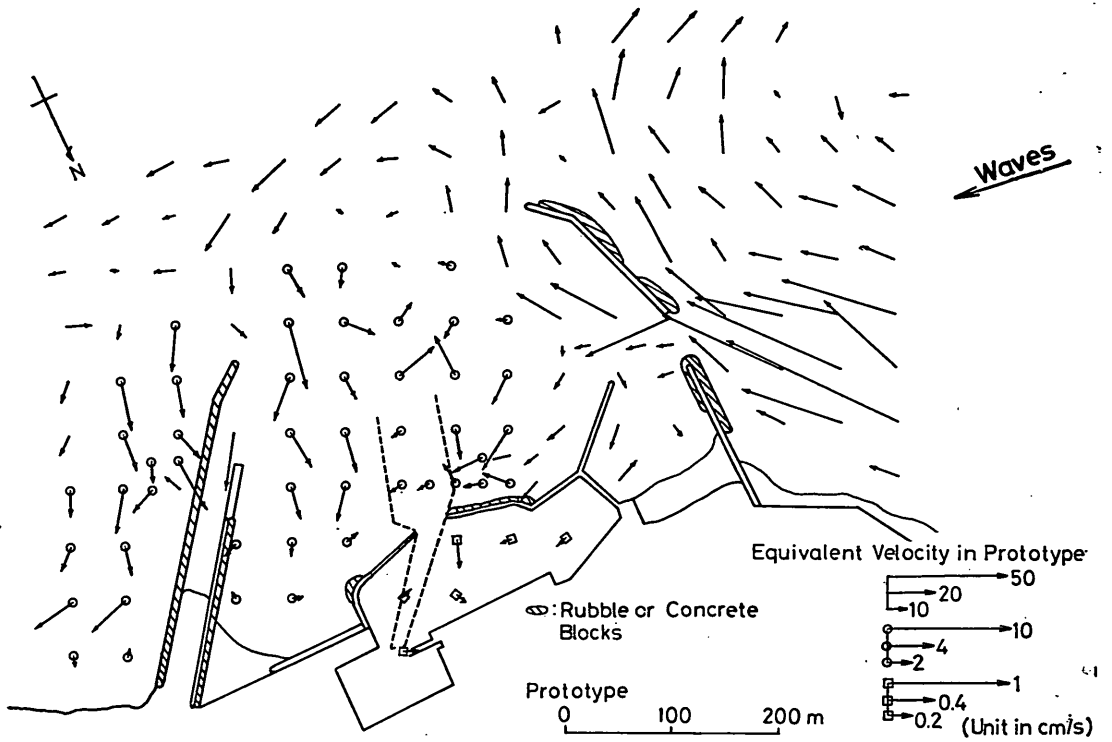


図-16 水理模型実験による底層流

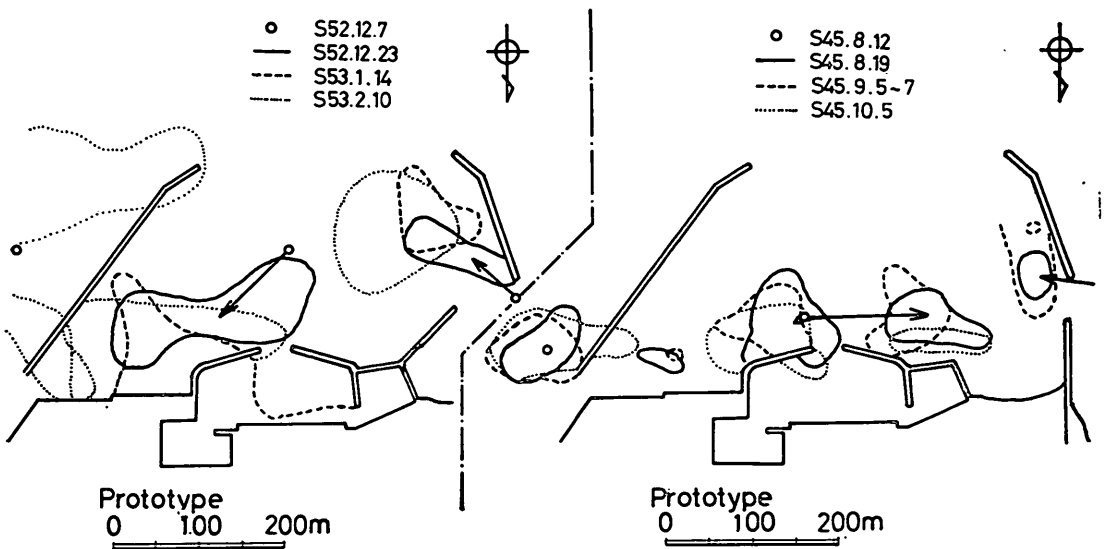


図-17 現地における蛍光砂の移動

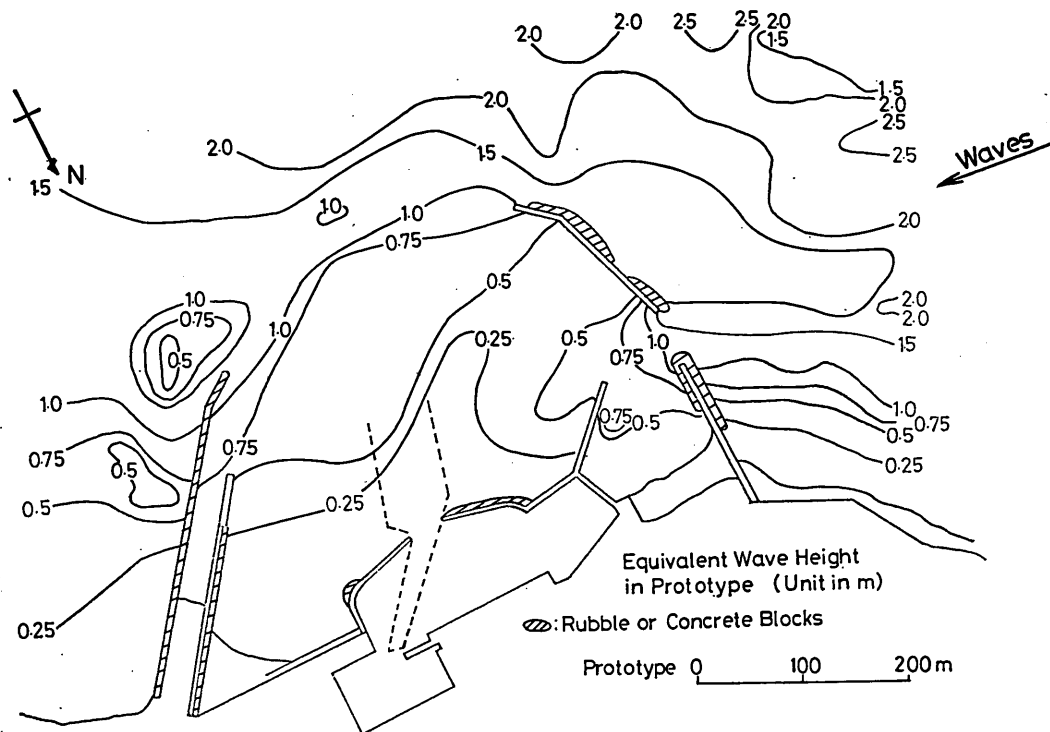


図-18 水理模型実験による波高分布

水よりやや重くした過マンガン酸カリウムを用いて底層流を測定した結果を図-16に示す。底層流の速度ベクトルは、流速の絶対値が大きく変化するので、図においては三段階に分けて示した。この結果を図-15の表層流と比較すると、西防波堤開口部から港内へ侵入し沖側へ抜ける流れは両者において同様であるが、港内の東側半分のにおいて、表層流では沖向きであるのに対し、底層流では岸向きとなっているのが大きな違いとなっている。

こうして得られた底層流の分布が、既往の現地調査成果と矛盾するものでないかを、図-17の蛍光砂を用いた底質移動に関する調査結果により検討してみる。西防波堤の開口部からは、港内に侵入する漂砂が認められ、さらに港内の東寄りに投入された蛍光砂が岸向きに移動しているのが認められる。また、滝港の長期的海底地形の変化を示す図-7によれば、港内の東側は長期的に堆積し、西防波堤沖側は長期的には侵食している。このように見て来ると、図-16の模型実験による底層流の分布は、既往の現地調査の結果とは矛盾するものではないようである。すなわち、西防波堤の開口部から港内へ侵入した流れは、それまで多量に含んでいた浮遊砂を静穏な港内

に沈殿させ、浮遊砂の含有量が少なくなりつつ西防波堤先端に達する。そこで再び防波堤のしゃへい領域から外に出るので、再び砂は巻き上げられ、流れにより持ち去られる結果、西防波堤沖の海底侵食が発生する。さらに港内東側においては、底層流が岸向きのため、底質は港外から岸向きに運ばれ、港内埋没の原因となっている。以上のような滝港の漂砂に関する推論が、図-7, 16, 17について矛盾なくできるため、以降の定量的解析へ入ることとした。

(c) 波高分布, 波向分布

図-18は、波高分布の測定結果である。西防波堤によるしゃへい域内は相当に波が減衰しており、港外で大きな波により巻き上げられた底質が流れに乗って港内に入るや著しい堆積が生ずることがわかる。波向きは写真撮影によったがここでは詳細な説明は省略する。

(d) 測得データのメッシュ補間およびスムージング

水理模型実験により得られている流況、波高分布の測得データは、現地スケールにて50m間隔となっている。これより、漂砂の移流拡散を電算機により行うには、メッシュが少し荒過ぎ、漂砂現象を滑らかに再現すること

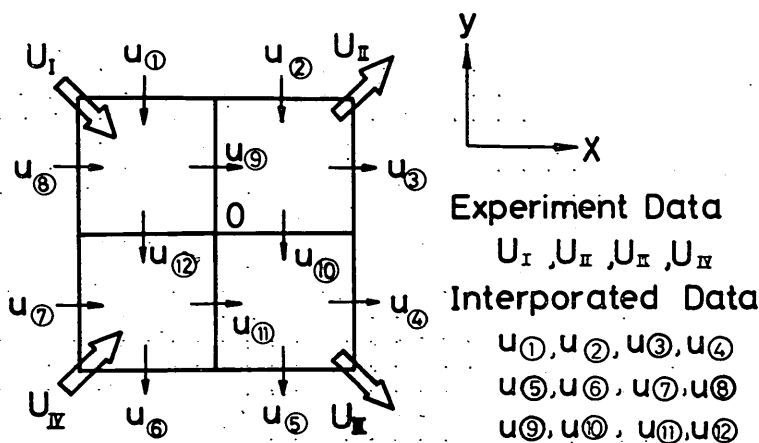


図 19 メッシュ上での流れの定義

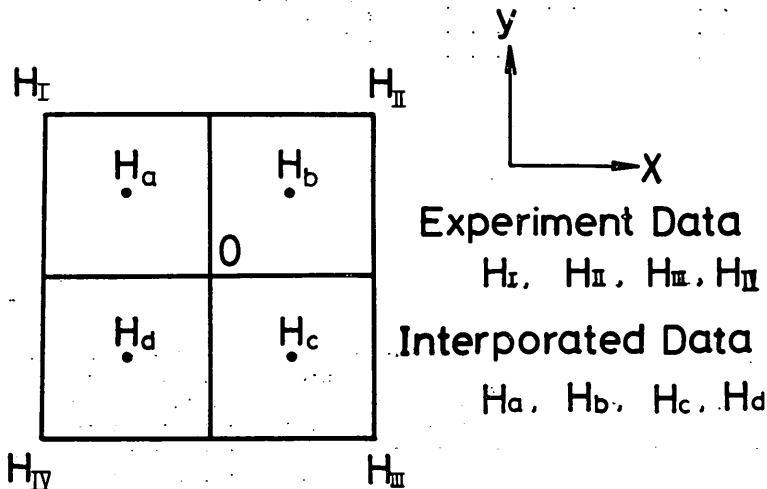


図 20 メッシュ上での波高の定義

が困難のように思われる。そこで、水理実験の測得メッシュをさらに半分にし、25mおきのデータとなるように、メッシュ補間することにした。

まず、流れについては、図-19に示すようにメッシュの壁上で定義する必要がある。未定義のメッシュについては、その点に最も近い実測値を用いて補間した。次に、流れの各成分ごとに次の平均操作を必要回数繰返すことにより、流況分布の平滑化をおこなった。

$$u_{i,j} = 0.5 \times u_{i,j} + 0.125 \times (u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1}) \quad (4)$$

ただし、この平滑操作において、陸岸、防波堤等の地形条件を考慮した。図-16に示すような水理模型実験により測定された流速の値は、フロートあるいは追跡染料の設置、読取り誤差、水槽内の水のゆらぎによる誤差などが含まれている。上記のような平滑操作は、このような統計的、物理的理由による誤差を可能な限り排除し、漂砂に関する数値計算が円滑に行われることを目的としたものである。

波高については、図-20に示すようにメッシュの中央にて定義した。その補間方法は、流れの補間と同一の方法によった。

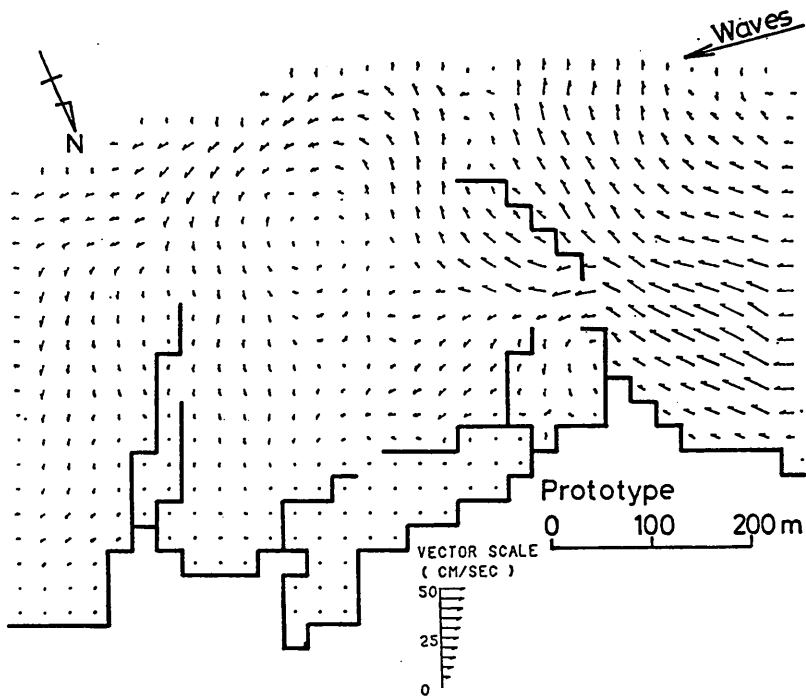


図-21 底層流の補間結果

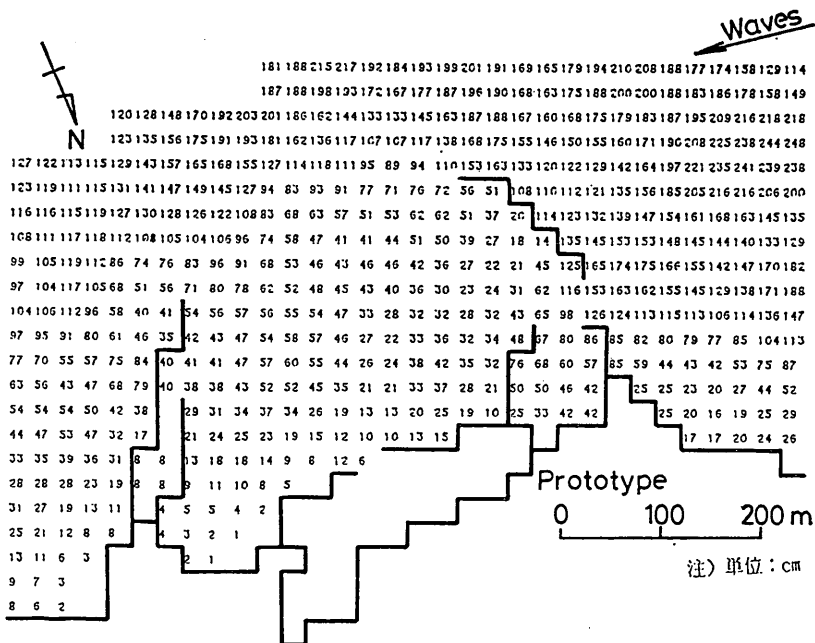


図-22 波高の補間結果

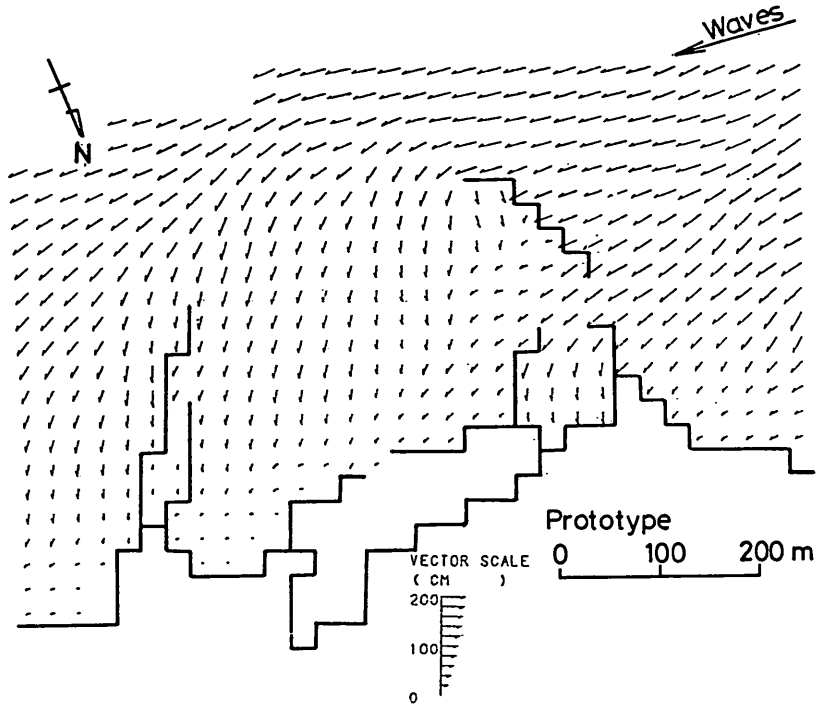


図-23 波向の補間結果

図-21, 22, 23は、それぞれ底層流、波高、波向の補間結果を示したものである。全体的に相当平滑化したものとなっている。

(e) 流れの連続性確保のための微調整

図-21に得られた底層流は、波の作用の下で、底面に沿って測定されたものである。したがって、底質の移流拡散を計算する場合に必要な流体の連続性はまだ確保されていない。実際には、例えば底層流が場所的に変化すれば、それに応じて、水塊の受け渡しが、底層と中層との間で行われることで流体の連続性が保たれるのであろう。

今回は、流体中を水平な面で水深方向3層に分け、これらの全層に対し図-21に示す底層流をまず与えた。次に、この第3層の流況を与えられた条件とし、適切な状態で、流体の連続条件が満足されているように、流況の微調整を行った。まず、第3層に与えられた底層流か

ら、第2層(中層)との間の鉛直流成分を求める。この場合、鉛直流成分が、これまでの海域における移流拡散の実績を参考に、最大 $5 \times 10^{-4} \times \text{水深}(\text{cm})$ という条件を与え、鉛直成分を高々、0.1cm/s程度が保たれるようにした。その理由は、鉛直流を、図-21の補間値のままで定義すると、その水平的に大きな収束、発散性のために非常に大きな値となり、第2、第1の層の浮遊砂量の増大により、これらの層の流れに強く支配された漂砂が再現され、実際の状況からかけ離れる恐れがあったからである。この鉛直流の上限値のため、第3層の流れそのものが、多少修正される結果となっている。こうして、第2層、第3層間の鉛直流が求まった後、これを第3層内の流速と共に固定する。次に、第1、第2層間内の鉛直流について同様のことを行い、第2層の水平流速を固定する。最後に、第1、第2層間の鉛直流を固定し、第1層の水平流を求める。

さらにこれを具体的に示すと、つぎのようになる。初期状態では、底層流の補間値を3層すべてに与える。第 k 層のセルにおける流量収支を、

$$BAL_k = Q_{ukW} + Q_{vks} - Q_{uke} - Q_{vkn} + Q_{wkD} - Q_{wkU} \quad (5)$$

で計算する。ここで、

Q_{vkW}, Q_{vke} : それぞれ、 u 成分の流れのうち、西から入って来る量と東から出て行く量

Q_{vks}, Q_{vkn} : それぞれ、 v 成分の流れのうち、南から入って来る量と、北へ出て行く量

Q_{wkD}, Q_{wkU} : w 成分の流れのうち、それぞれ下から入って来る量と、上へ出て行く量

く量

である。 BAL_k は、セル k での流量収支であり、流れが連続の式を満たしていれば、ゼロとなる。初期においては、 $BAL_k \neq 0$ である。そこで、流量が連続の式を満足するように、以下の操作を行う。すなわち、セル k について、 i ステップでの流量が求められていて、 $(i+1)$ ステップでの流量を、

$$\begin{aligned} Q_{vkn}^{i+1} &= Q_{vkn}^i + BAL_k^i \cdot |Q_{vkn}^i| / QSUM_k^i \\ Q_{vks}^{i+1} &= Q_{vks}^i - BAL_k^i \cdot |Q_{vks}^i| / QSUM_k^i \\ Q_{ukW}^{i+1} &= Q_{ukW}^i - BAL_k^i \cdot |Q_{ukW}^i| / QSUM_k^i \\ Q_{uke}^{i+1} &= Q_{uke}^i + BAL_k^i \cdot |Q_{uke}^i| / QSUM_k^i \end{aligned} \quad (6)$$

で求める。ここで、 i は反復回数、 $QSUM_k^i$ は、

$$QSUM_k^i = |Q_{ukW}^i| + |Q_{uke}^i| + |Q_{vks}^i| + |Q_{vkn}^i|$$

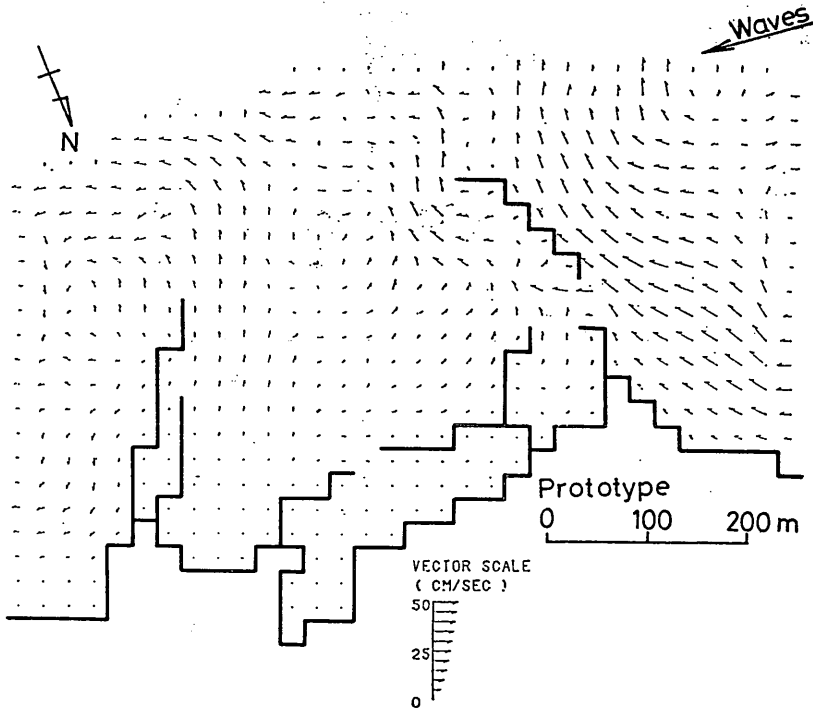


図-24 流れの連続性調整後の表層流

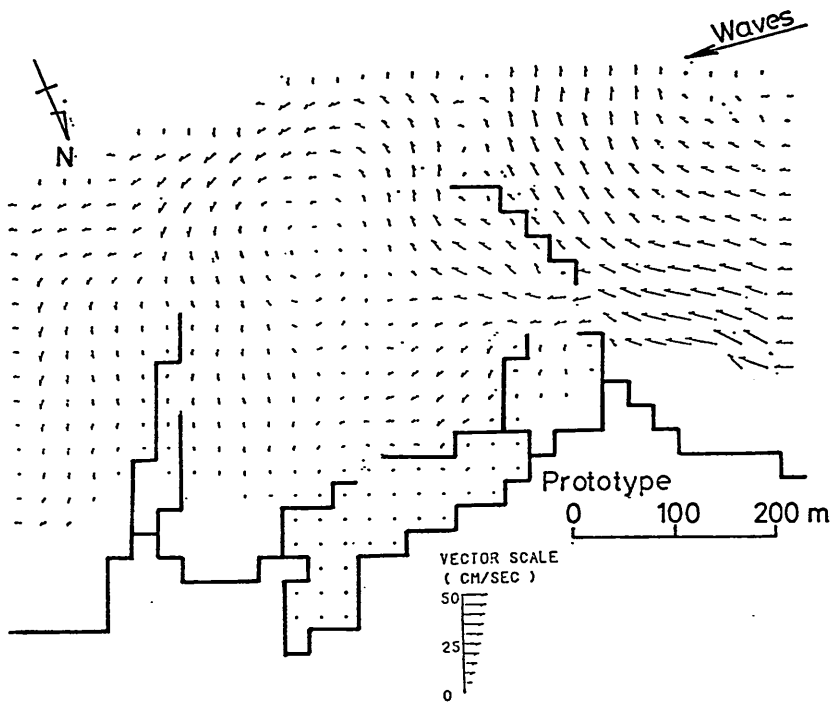


図-25 流れの連続性調整後の中層流

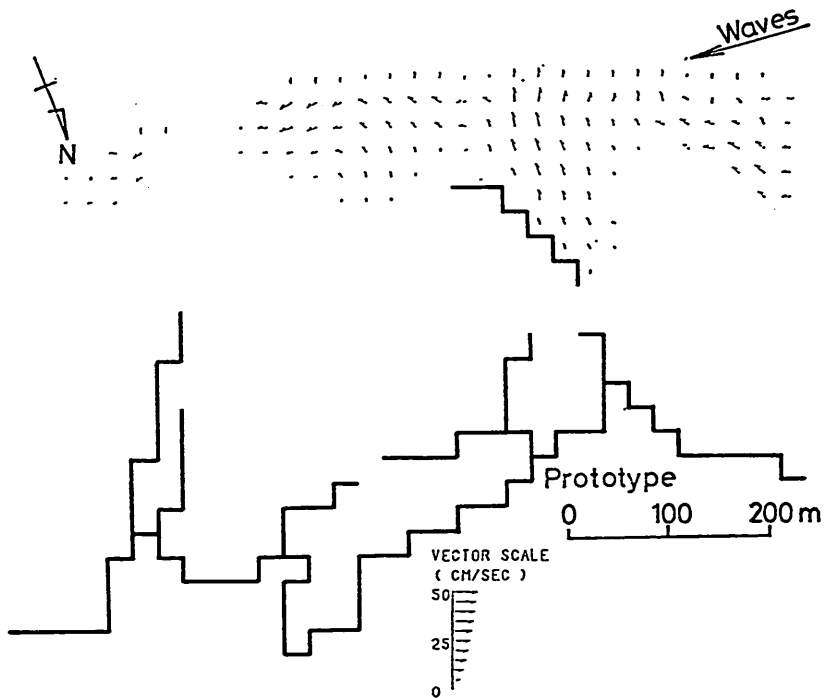


図-26 流れの連続性調整後の底層流

である。

この操作を, 2, 3層に対しては10回反復し, 表層については次の条件が満足されるまで反復する。

$$\frac{BAL_k^t \cdot T}{VOL_k} < 0.1$$

ここに, T はシミュレーション対象時間であり, BAL_k^t の単位は, m^3/s , VOL_k は, セル k の体積 (m^3) である。

3.3 海底地形変化の数値計算

(1) 三次元拡散モデル

2. で述べたように, 航路・港内埋没を実際に近い状態で再現するため, 今回は底質の移流拡散過程を計算することにした。このための基本式は, 汚染拡散問題などで一般に用いられている移流・拡散方程式と同じものである。すなわち,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) + \frac{\partial}{\partial z}(wc) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) \\ & - \omega_0 \frac{\partial c}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

ここに,

c : 浮遊砂の濃度

u, v, w : x, y, z 方向の流速
(z は上向きを正)

K_x, K_y, K_z : x, y, z 方向の乱流拡散係数

ω_0 : 浮遊砂の沈降速度

海面から海底までを固定された内部境界面によって分割し, 各層ごとに水深方向の平均化操作を行うと, 第 k 層における基本方程式は, 既に示した(2)式となる。(2)式において, 線流量 M_k, N_k を

$$M_k = u_k D_k, \quad N_k = v_k D_k$$

と定義すれば,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(c_k D_k) + \frac{\partial}{\partial x}(c_k M_k) + \frac{\partial}{\partial y}(c_k N_k) \\ & + w_{k-1} c_{k-1} - w_k c_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x D_k \frac{\partial c_k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y D_k \frac{\partial c_k}{\partial y}\right) \\ & + \gamma_{k-1}(c_{k-1} - c_k) - \gamma_k(c_k - c_{k+1}) \\ & + \omega_0 c_{k-1} - \omega_0 c_k \end{aligned} \quad (8)$$

最上層 ($k=1$) では鉛直移流項, 内部境界面交換項, 沈降項は第2項だけが残って,

$$-w_k c_k, \quad -\gamma_k(c_k - c_{k+1}), \quad -\omega_0 c_k$$

となる。

最下層 ($k=K$) では鉛直移流項, 内部境界面交換項, 沈降項は第1項だけが残って,

$$w_{k-1} c_{k-1}, \quad \gamma_{k-1}(c_{k-1} - c_k), \quad \omega_0 c_{k-1}$$

となる。

今回の計算では, 層数を3層とし ($K=3$), 拡散モデルの差分解法は ADI 法によった。本方法は, Peaceman, Rachford 等によって考案された後, 1970年代より汚染拡散問題で広く用いられているもの¹²⁾であり, ここでは記述を省略する。

(2) Bijker の埋没モデル

波による底質の移動機構については, まだ未解明の点が多い。底質の岸沖方向の移動が, 底面に沿う水粒子の流速波形に大きく支配されることは, 最近多くの研究者により報告されている。一般に流速波形のスキューネスが大きいほど, 岸向きの底質移動が卓越するといわれている。このことは, 漂砂が浮遊砂量と水粒子速度との積では十分に表すことができないことを示すものである。Bowen は, このことをパワーモデルにより理論的に考察している。彼は漂砂量を, 浮遊砂量と掃流砂量との和であるとし, それぞれ水粒子速度の関数として表示した。浮遊砂量は一般に沖向きを示し, 掃流砂量は強い岸向きであることを示している。ここで問題となるのは掃流砂と浮遊砂との区別である。もし, saltation の状態にある底質を含め, 瞬間的にでも平均流に乗って運ばれる底質をすべて浮遊砂と定義することにすれば, 全漂砂量に対する浮遊砂の割合は非常に高くなるものと考えられる。そうであれば, 漂砂量が, 浮遊砂量と平均流との積により表すことができることになり, 数値シミュレーションが非常にやりやすくなる。

与えられた波, 流れの条件で, 底質の移流拡散の計算を行うには, 底質の浮遊モデルが必要となる。この浮遊

モデルについては、これまでもいくつかの経験式が提案されてきた^{13),14),15)}。しかし、今日の滝港の場合のように、流れと波とが共存する場合の浮遊モデルを扱った例常に少ない。ここでは、河川の流砂の式と波による浮遊砂量の式を組み合わせた Bijker の式^{16),17),18)}を用いることにした。基本的には、Bijker の経験式を用いて港内の海底地形の変化を求め、現地の実績と比較することにより、Bijker の式の経験定数を修正することにした。

Bijker の式では、底質の浮遊の分布を、通常対数分布をなすとしている。すなわち、

$$c = c_b \exp(-\omega_0 z / \varepsilon_z) \quad (9)$$

$$c_b = S_b C_h \frac{1}{6.34 \sqrt{V} r \sqrt{g}} \quad (10)$$

$$S_b = B d_{50} \sqrt{\frac{g}{C_h}} \cdot \exp \left[\frac{-0.274 d_{50} C_h^2}{\mu V^2 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u_b}{V} \right)^2 \right\}} \right] \quad (11)$$

ここに、

u_b : 底面での軌道粒子の最大速度

$$\left(= \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh \left(\frac{2\pi h}{L} \right)} \right)$$

H, T, L, h : 波高, 周期, 浅海波長, 水深

V : 定常流成分の平均流速

ε_z : 鉛直方向の拡散係数

$$\left(= 0.16 V^* h, V^* \text{ は底面摩擦速度} \right)$$

B : 経験定数 (≈ 5.0)

d_{50} : 浮遊砂の中央粒径

A : 浮遊砂の水中での比重 ($= 1.65$)

μ : 底面の全せん断力のうち、底質移動に係わる

せん断力の割合、すなわちリップル係数

C_h : Chezy の係数

$$C_h = 18 \log(12h/r), r \text{ は粗度長さ}(=0.2m)$$

ξ : 理論的及び実験的に定まる係数

$$\left(= C_h \sqrt{f_w / 2g} \right),$$

f_w は Jonsson の粗度係数で、

$$f_w = \exp \left\{ -5.977 + 5.213 \left(\frac{a_0}{T} \right)^{-0.194} \right\}$$

$$a_0 = \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{\sinh \left(\frac{2\pi h}{L} \right)}$$

である。すなわち、底面近くの濃度 c_b は、その位置における水深、波、流れによって定まるものであり、任意の高さにおける濃度 c は、 c_b より指数的に減少するも

のと考えている。

実際の計算においては、

(1) 図-24, 25, 26 に示す流況データを3層に対してインプットする。

(2) 図-22に示す波高のデータをインプットする。

(3) 各グリッド上の c_b の値を、各位置の水深に対して計算しておく。

(4) (8)式に示す移流拡散の式により、インプットされた流況に対し各層の浮遊砂濃度が定常化するまで計算する。この場合、海底地形変化の計算は行わない。

(5) 各層の浮遊砂濃度が定常化した後、海底地形変化の計算を行う。計算は24時間分だけ行い、1年分に外挿し、年間の変化量を求める。

なお、計算条件をまとめておくと、以下のようになる。

(1) 格子間隔 25m

(2) 時間間隔 180秒

(3) 鉛直格子区分

上層を1m、中層を4m、下層を海底面まで取った。ただし、水深が1m以下の格子は1層となり、5m以下の格子は2層となる。

(4) 水平方向の拡散係数 $K_x, K_y = 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$

(5) 鉛直方向の拡散係数

Bijker 公式で与えられるメッシュごと、時間ごとの鉛直拡散係数を用いる予定であったが、時間によっては鉛直拡散係数の値が過大になる場合もあったので、試算の結果、Bijker 公式の与える値の1/100した。この値は大体、1~100 cm^2/s の範囲にある。

さらに当港西側開口部の外側には岩礁地帯があり、この部分での底質量の再現のため、鉛直拡散係数の値で調整するものとし、試算の結果0.4倍の値を用いることとした。

(6) 沈降速度 ω_0 。

滝港の底質粒径を $d_{50} = 0.15 \text{ mm}$ とし Rubey の沈降速度公式を用いて得られる0.016m/sec を用いた。

(7) 境界条件

計算上必要となる境界上の濃度は、1格子内側の計算濃度に等しいものとした。これは、 $\partial c / \partial x = 0$ 、すなわち境界上で濃度勾配がゼロであるという境界条件を課した。

(8) Bijker 公式の経験定数 B

同公式によれば、 $B = 5.0$ となっている。しかし、

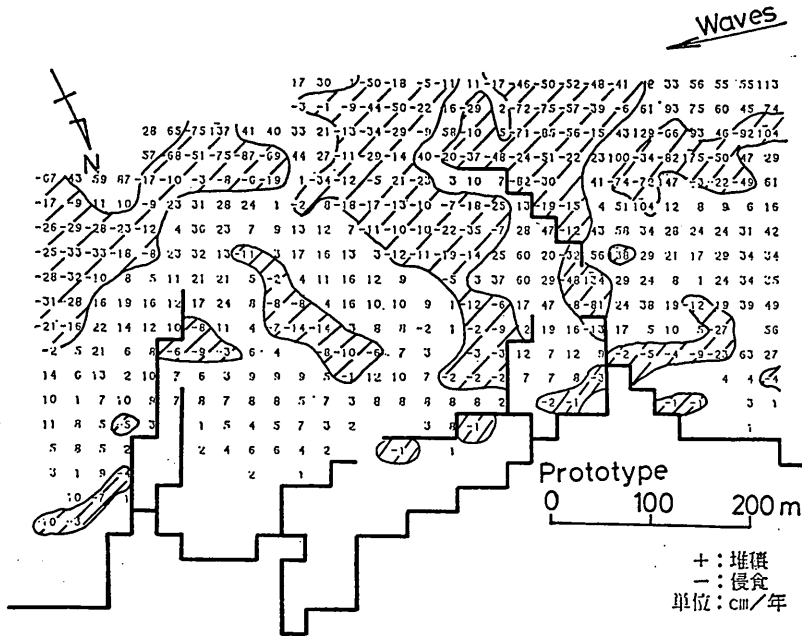


図-27 滝港の現況に対する海底地形変化の計算結果 ((+)が堆積, (-)が侵食を示し, その変化率を示す数字は cm/年である)

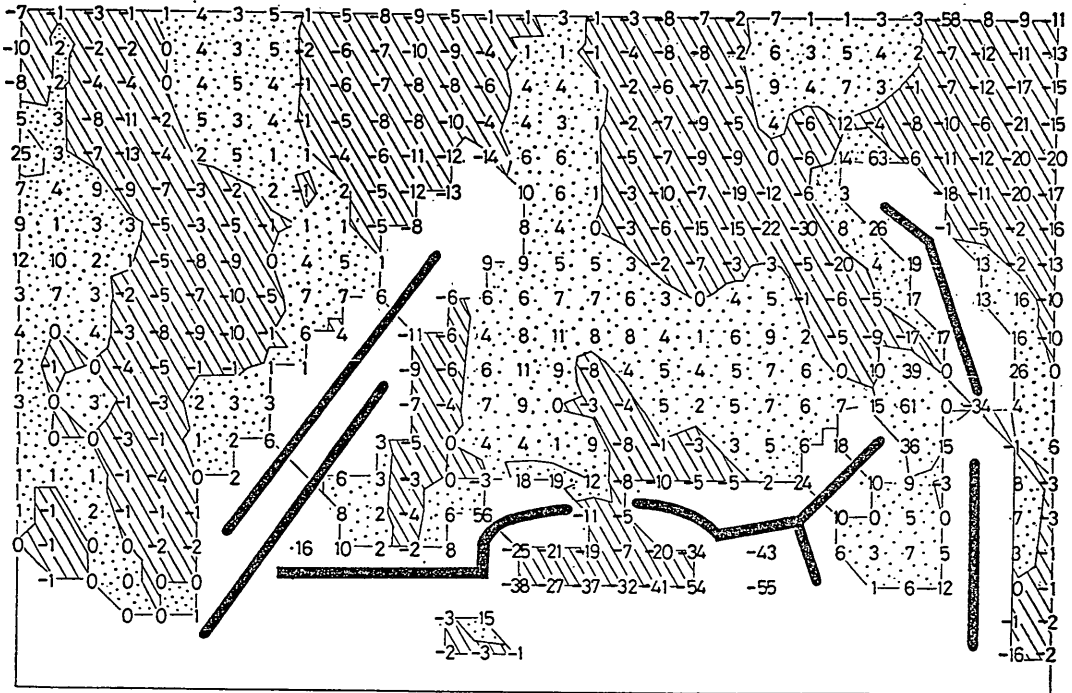


図-28 滝港における海底地形変化の実績

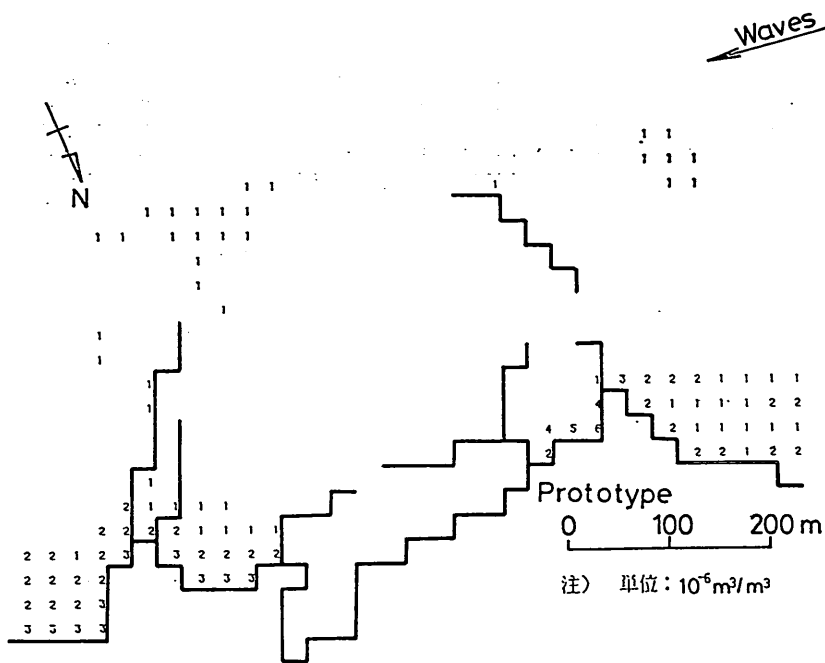


図-29-(1) 計算における表層の浮遊砂濃度

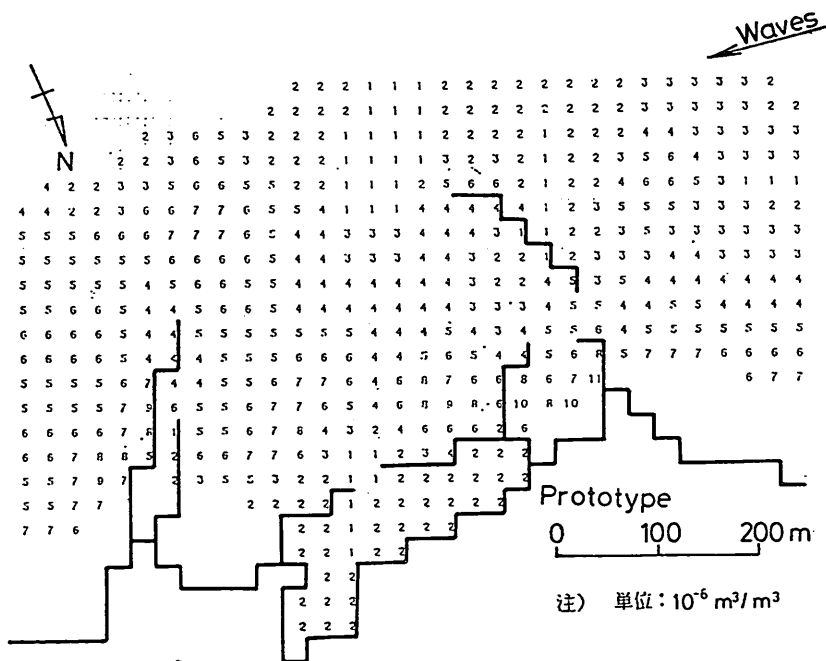


図-29-(2) 計算における中層の浮遊砂濃度

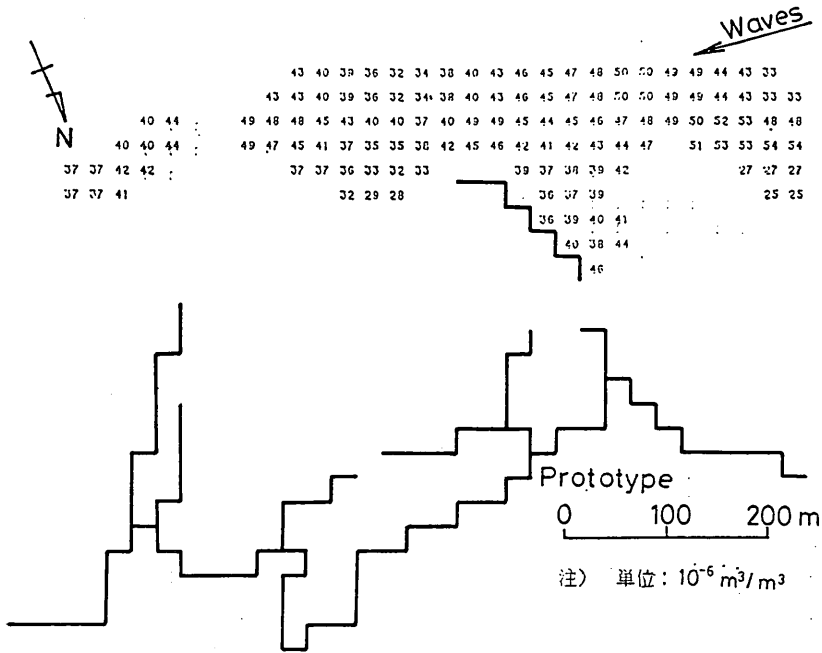


図-29-(3) 計算における底層の浮遊砂濃度

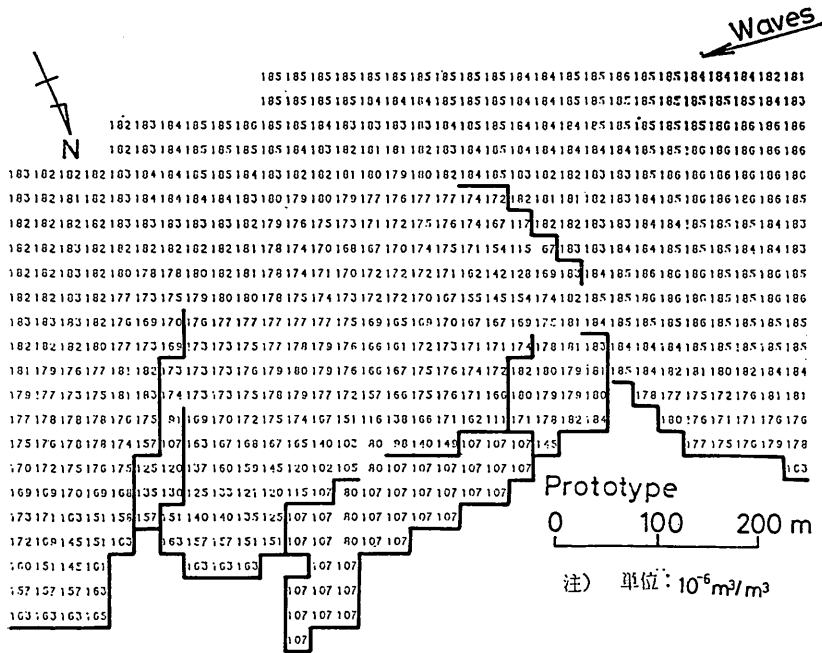


図-29-(4) 計算における底面の浮遊砂濃度

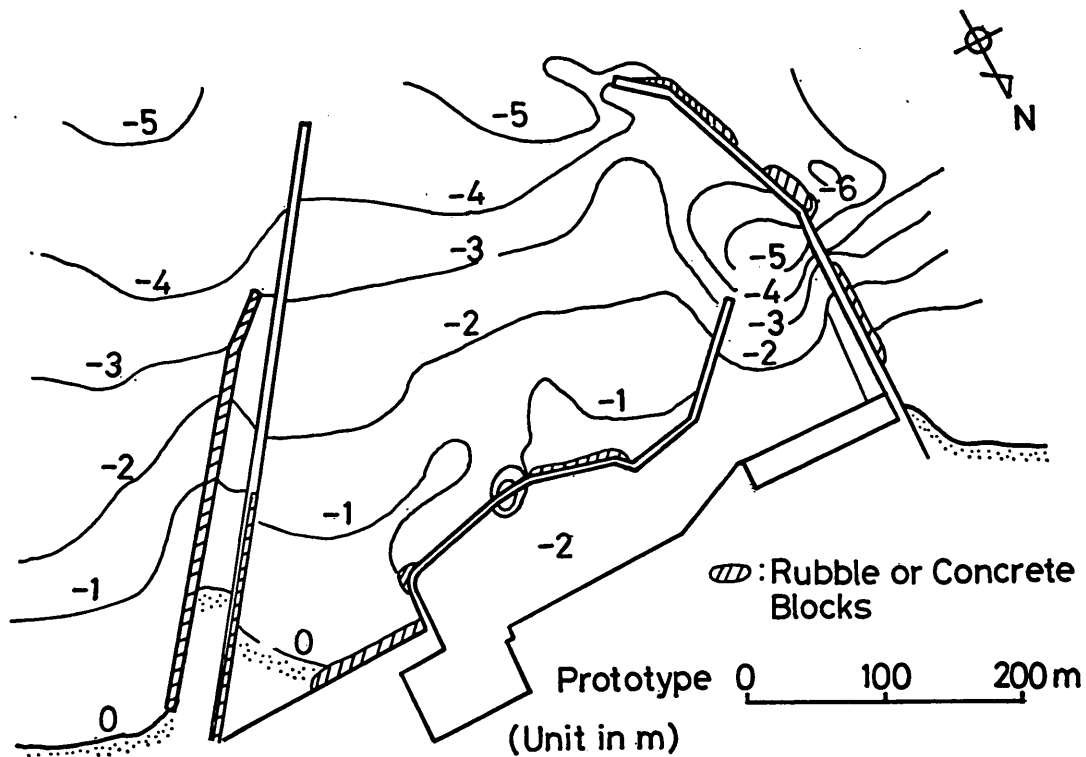


図-30 対策案-(A)の防波堤延長

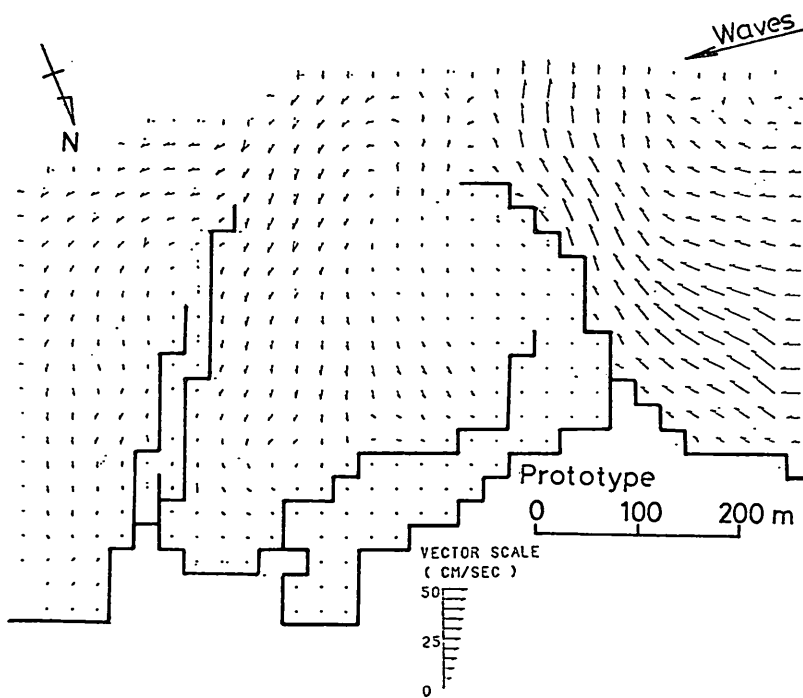


図-31 対策案-(A)に対する流況の補間値

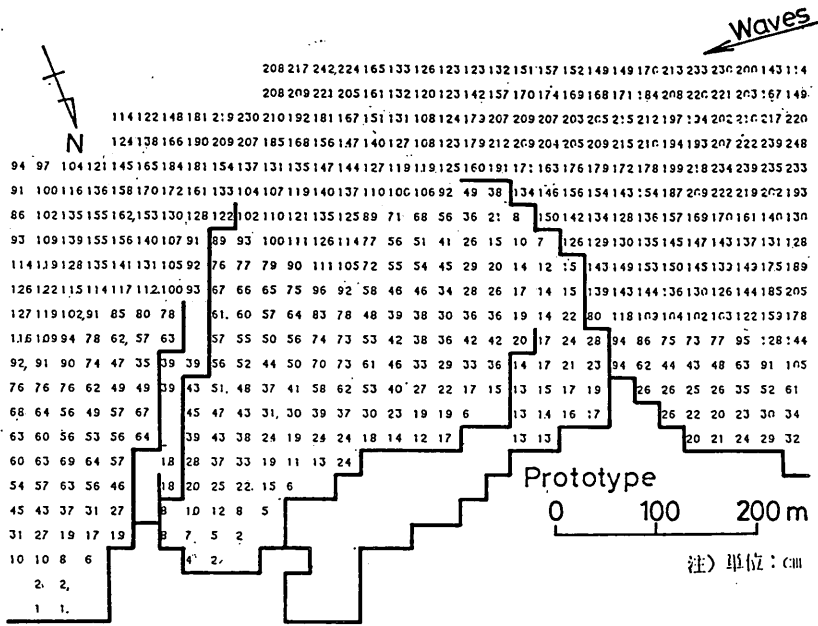


図-32 対策案-(A)に対する波高分布の補間値

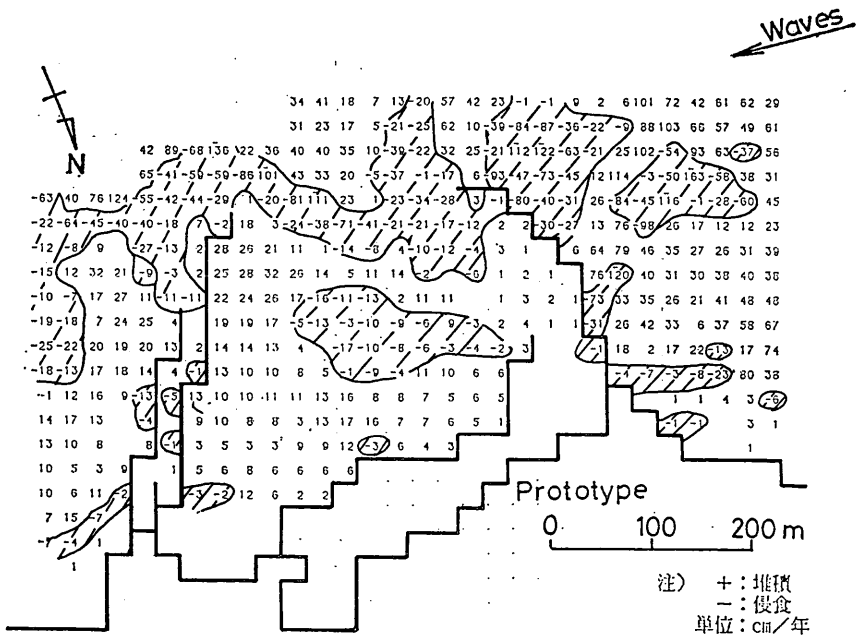


図-33 対策案-(A)に対する海底地形変化の計算結果

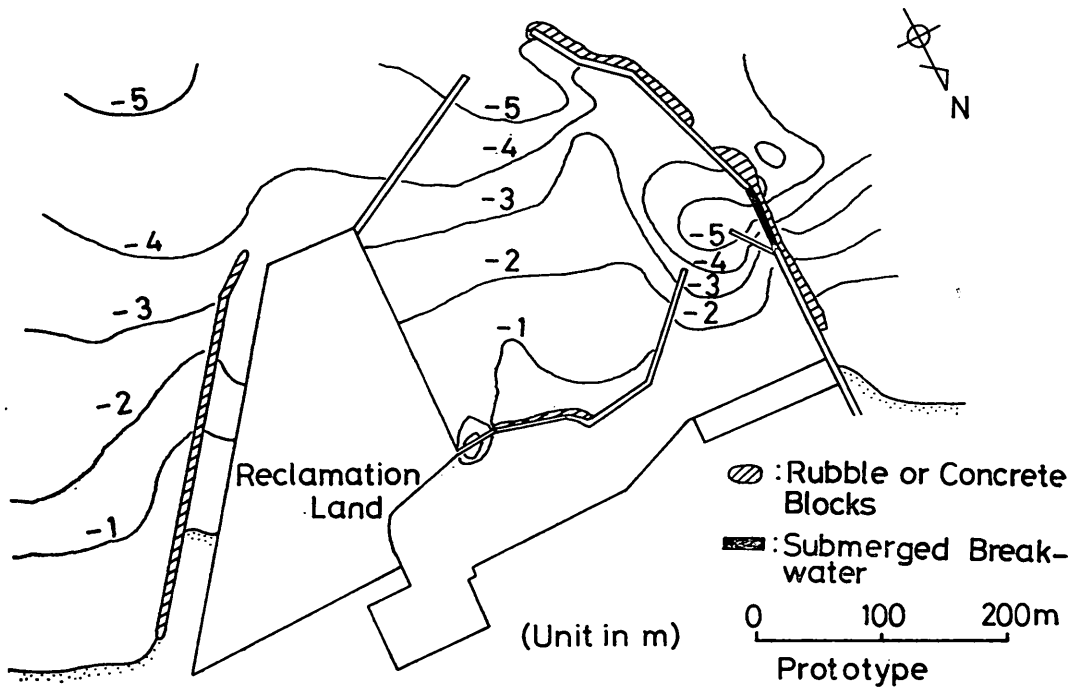


図-34 対策案-(B)の防波堤延長

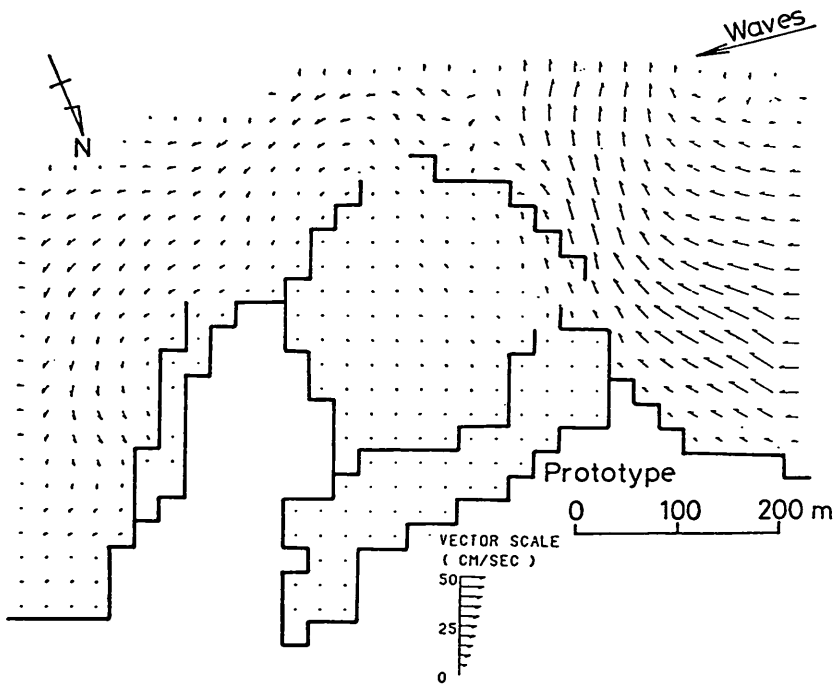


図-35 対策案-(B)に対する流況の補間値

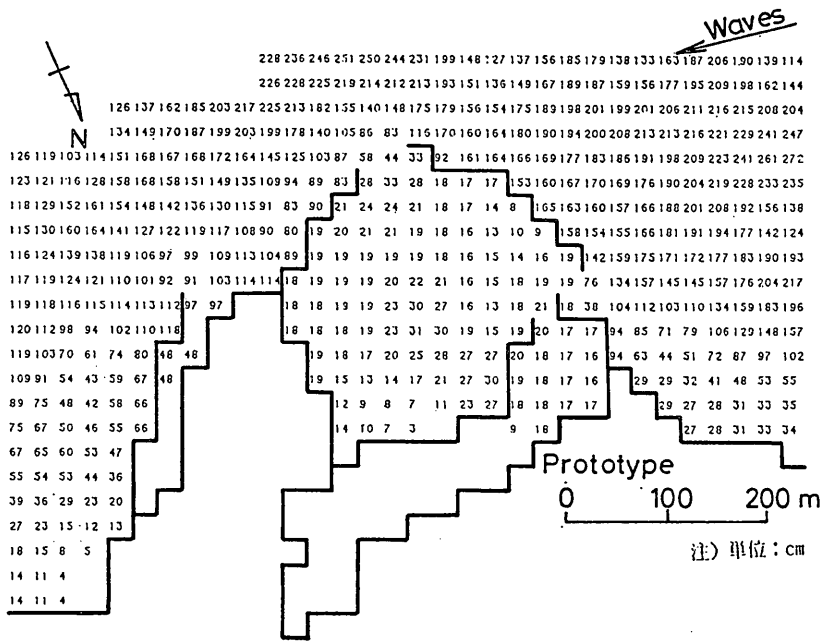


図-36 対策案-(B)に対する波高分布の補間値

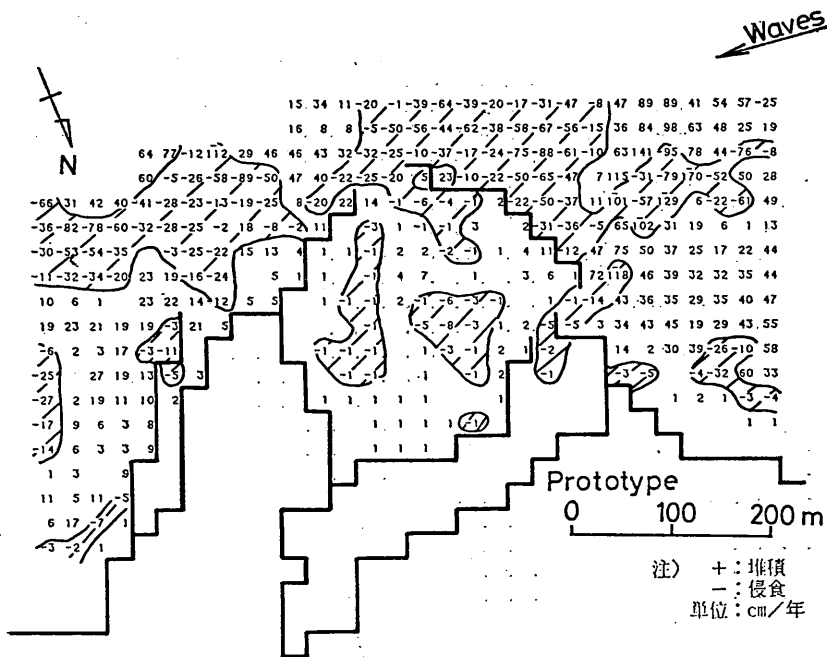


図-37 対策案-(B)に対する海底地形変化の計算結果

この値は、底質粒径や、埋没した時の締め固め状況等により異なるものと思われる。そこで、まず $B = 5.0$ として滝港の海底地形変化量を計算し、計算による変化量と実績による変化量とを比較し、両者が一致するように B の値を修正した。その結果 $B = 1.6$ となった。

(3) 海底地形変化の計算結果と再現性

図-11に示す滝港の現況に対し、これまで述べてきた数理モデルの組み合わせによる海底地形変化速度を計算した結果を図-27に示す。図中の縦横のメッシュは、1メッシュあたり25mである。各格子点の数字は、年間当たりの変化量を、センチメートル単位で示したもので堆積を正にとってある。これにより、

- (a) 西防波堤先端東寄りの海底侵食
- (b) 港内東半分の堆積
- (c) 西側船泊りの堆積

などが特徴的に出ていることがわかる。最近10年間における滝港の深淺測量結果から、海底地形変化の平面的分布を示したのが図-28である。これと、今回モデル計算をおこなった図-27とを比較すると、海底地形変化のパターンが非常によく似ていることがわかる。これより物理モデルと数理モデルの組み合わせによる海底地形変化のモデルが、地形変化の再現性に極めて優れていることがわかるであろう。

図-27の海底地形変化を計算した際の水中及び水底の浮遊砂濃度を、図-29(1)~(4)に示す。港外域に比し港内域の方が濃度が相当小さくなっており、これが埋没の原因となっていることがわかる。

(4) 海底地形の将来予測

現地再現性が確認された以上、新たな港湾施設計画に伴う海底地形変化についても相当の確度をもって予測出来るものと考えられる。

滝港では、港内の埋没を防止するため、図-30に示すような対策案が検討された。すなわち、西防波堤の開口部からの底質の侵入を防止するため、これを閉じてしまう。更に、東防波堤を延長し、東側からの漂砂の侵入を防止するというものである。そこで、現況再現実験の場合と同様、物理モデルとして固定床実験により、底層流、波高分布を求め、データの補間、平滑操作をおこなった上、今度は数理モデルにより移流拡散計算を行った。

図-31は、この対策案Aに対する底層流の補間値の分布を示したものである。また図-32は、波高分布の補間値を示したもので、これらの結果からは対策案Aの施設計画により埋没問題が大幅に改善されることは期待でき

そうにないようである。図-33は、これに対する海底地形変化量の分布を示すが、港内埋没に関しては、図-27に示す現状を改善したものにはなっていないことがわかる。図-31の流況図によれば、沖合から侵入する漂砂を阻止しなければ、当港の埋没は防止不可能であるものと考えられる。

そこで、図-34に示すような対策案Bが検討された。すなわち、西防波堤の開口部は、天端高を、L.W.Lとし、越波水の侵入を許す構造とする。本港の東半分は埋立地とし、更に防波堤を延長して沖合からの底質の侵入を防止する。西防波堤は少し延長して、港内への波、漂砂の侵入を防止する。図-35、および図-36は、対策案Bに対する流況と波高の補間値の分布を示す。西防波堤開口部からの越流水は、港口部における沖向きの流れをつくっている。したがって、図-37に示すように、港内への底質の侵入は全く見られず、埋没はほぼ完全に防止された形となっている。

3.4 数理モデルを主体にした従来モデルとの比較

(1) 底質の移流沈降過程は入れるが、波、流れは数理モデルによる場合

最近では、波、流れを数値計算により求め、局所漂砂量の計算より海底地形変化を計算することが行われつつある。しかし、これらの計算結果と、実際の海底地形とを対比して、現地再現性を検討した例は非常に少ないように思われる。今回は、物理モデルと数理モデルの組合せにより、非常に高い現地再現性が確認されたが、同じ現況再現を、流れ、波、ともに数値計算で、すなわち数理モデルのみで求めた場合の現地再現性について調べてみる。

まず流れの計算は、通常 radiation stress による海浜流計算が主体をなしている。

連続の方程式として、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{u(h+\eta)\} + \frac{\partial}{\partial y} \{v(h+\eta)\} = 0 \quad (12)$$

ここに、

η : 平均水位

h : 水深

である。

また、運動方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + A_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + M_x + F_x = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + A_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + M_y + F_y = 0 \quad (14)$$

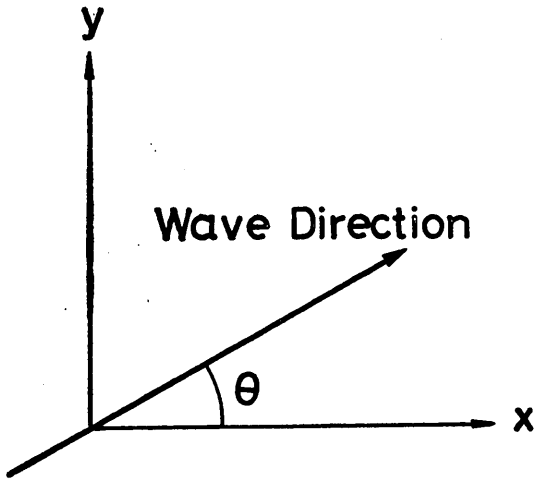


図-38 波向と座標軸との関係

$$F_{xw} = F\{u(1 + \cos^2 \alpha) + v \sin \alpha \cos \alpha\} \quad (20)$$

$$F_{yw} = F\{v(1 + \sin^2 \alpha) + u \sin \alpha \cos \alpha\} \quad (21)$$

ここで, F は,

$$F = \frac{f_w \cdot H}{T(h + \eta) \sinh(kh)} \quad (22)$$

であり, f_w は Jonsson の friction factor である。

また海底摩擦のうち, 流れによるものは,

$$F_{xc} = R\sqrt{u^2 + v^2} \cdot u \quad (23)$$

$$F_{yc} = R\sqrt{u^2 + v^2} \cdot v \quad (24)$$

で,

$$R = \frac{gn^2}{h^{4/3}} \quad (25)$$

であり, n は, Manning の粗度係数である。

また, 波の変形は, 基本的には次式によっている。

$$H = H_0 \cdot K_d \cdot K_r \cdot K_s \quad (26)$$

ここに,

H_0 : 深海波高

K_d : 港湾構造物・岬などによる回折係数

K_r : 屈折係数

K_s : 浅水係数

である。

波のモデルとしては, プレットシュナイダー・光易型の標準型周波数スペクトルを用い, スペクトルの囲む面積を等分割し, 各区間の代表周波数を与えた。実際には, 3周期, 7波向のみ成分波について, 波の変計計算をおこなっている。波の変形については, 合田による詳述¹⁹⁾があるので, ここでは説明を省略することにする。ただし波向については, 変形計算後の合成方向スペクトルのうち, 最大エネルギーを与える波向成分の方向を波向として出力している。

図-39, 40 は, それぞれ, 波高および波向の計算結果である。これを用いて, radiation stress による海浜流を計算した結果が, 図-41 である。これらの結果によれば, 港口部では常に港外への流れがあることになり, 鉛直分布が一様として計算されたこの海浜流にいかなる漂砂モデルをもってしても, 港内埋没の再現は困難であることがわかる。図-42 は, 以上の条件から求めた海底地形変化のパターンを示すが, 全域で侵食が生じており, 図-7で示した滝港での長期変化とは全く異なったものとなっている。これは, 海浜流の鉛直分布を一様と仮定したことに起因するものであろう。図-39の現況における波高分布を, 図-22の水利模型実験による波高分布と比

ここに A_i : 海水の動粘性係数

M_x, M_y : radiation stress による外力項

F_x, F_y : 海底摩擦項

である。

radiation stress は次式により求められる。

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} n(1 + \cos^2 \alpha) - \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \sin 2\alpha \\ \frac{1}{2} \sin 2\alpha & n(1 + \sin^2 \alpha) - \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

ただし, x - y 軸と α との関係は図-38に示す通りで, E は単位面積当たり, 水面から水底までの水柱の持つエネルギーで,

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho g H^2 \quad (16)$$

である。

ここに, ρ : 海水の密度

g : 重力の加速度

である。また,

$$n = \frac{c_g}{c} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (17)$$

で, c_g は群速度である。

(13), (14)式の M_x, M_y は,

$$M_x = \frac{1}{\rho(\eta + h)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (18)$$

$$M_y = \frac{1}{\rho(\eta + h)} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (19)$$

で求められる。

次に海底摩擦力は, 波によるものについて,

底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測

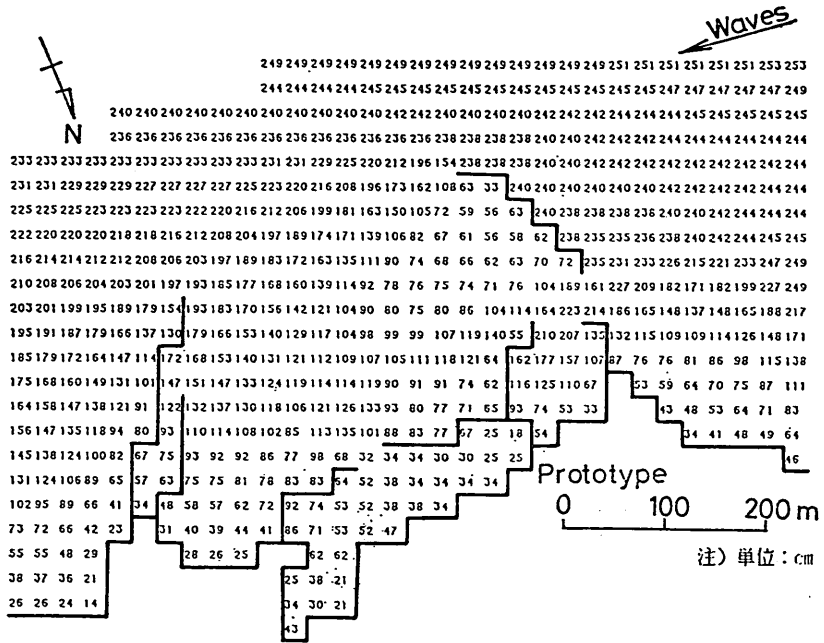


図-39 計算による波高分布

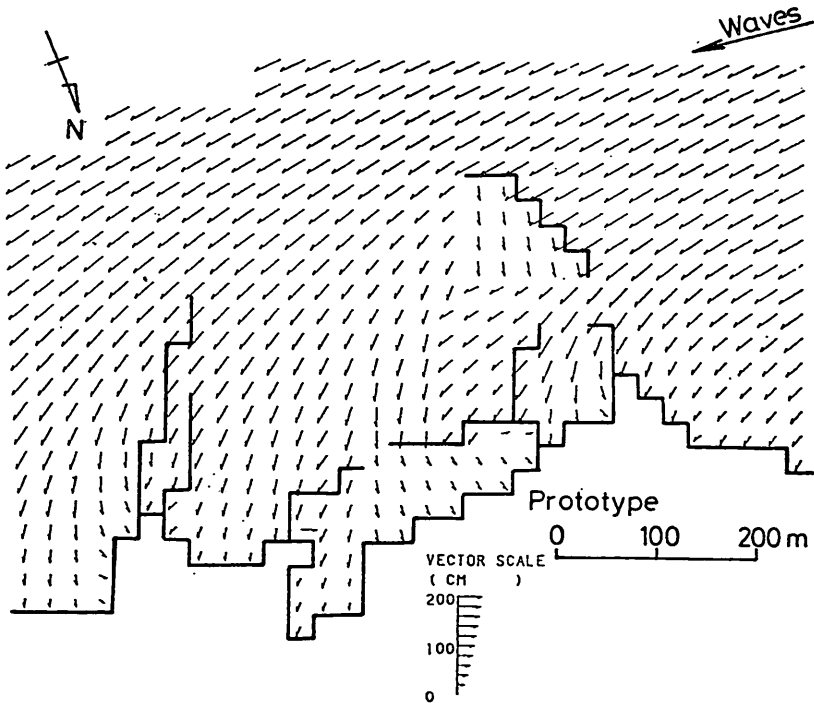


図-40 計算による波向分布

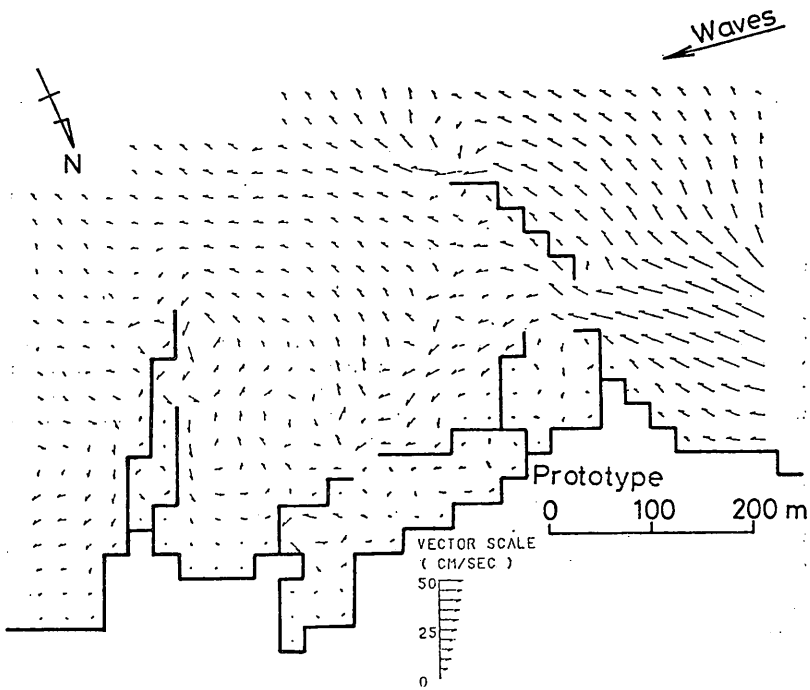


図-41 radiation stress による海浜流計算結果

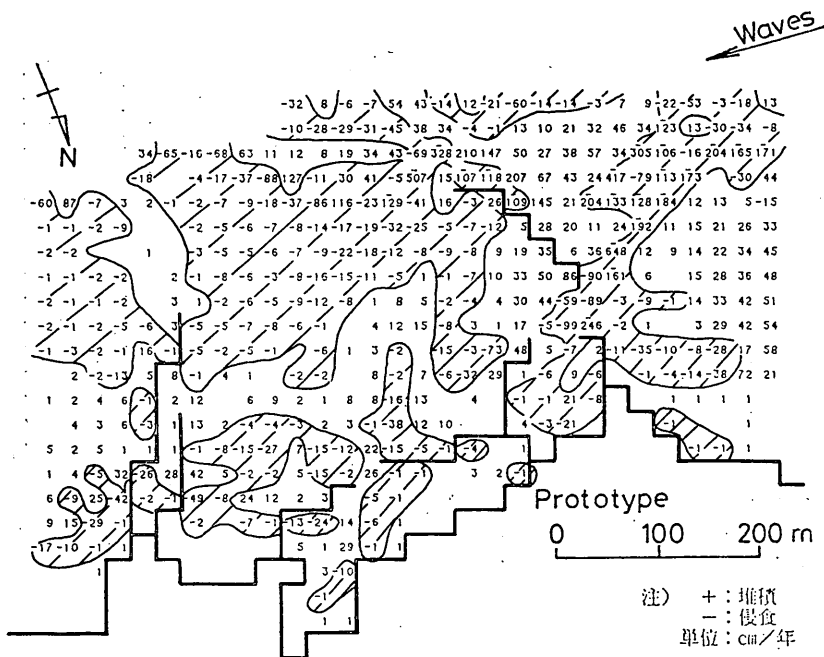


図-42 波, 流れを計算で求めた場合の海底地形変化

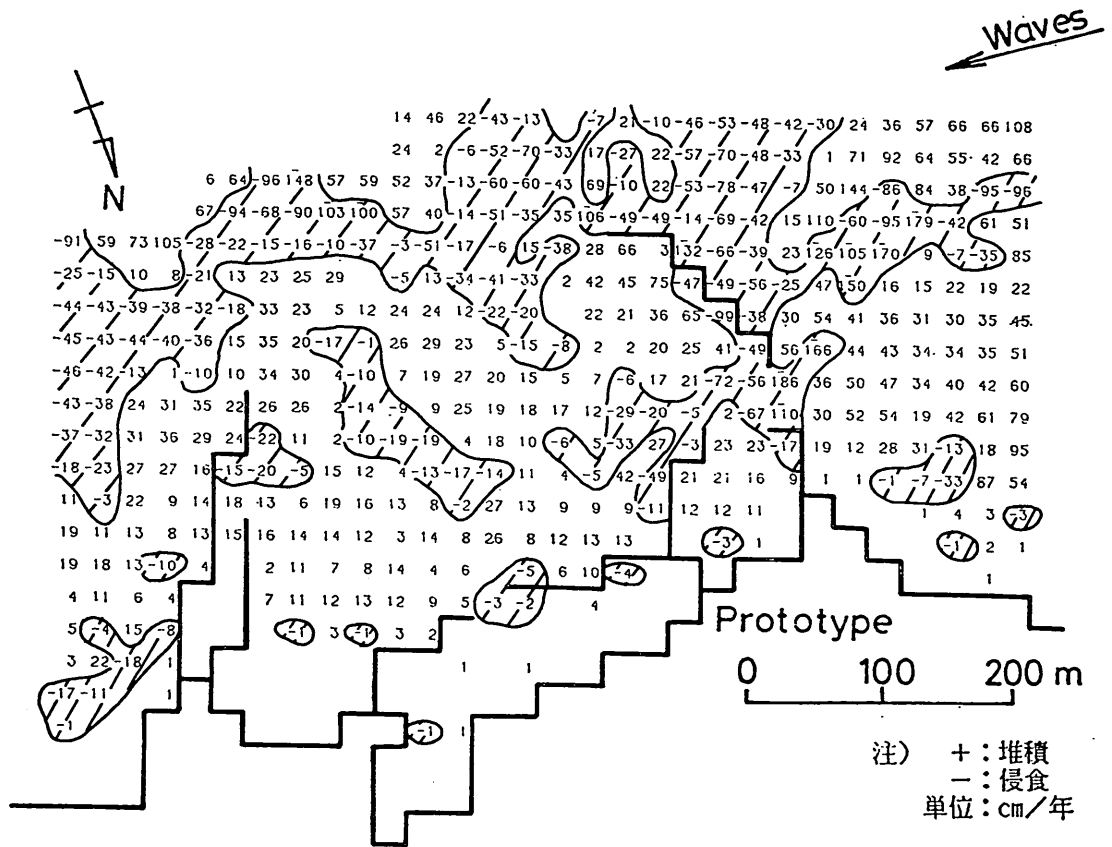


図-43 波は計算，流れは実験による場合の海底地形変化

較すると，計算による方が非常に高い波高分布を示している。これは，水理標型実験では，規模の小さい水槽を使ったので，波も小さいものとなり，波の減衰が大きかったことによるものと思われるが，物理モデルと数理モデルの組合わせによる海底地形変化を示す図-27と，すべて計算に依った図-42の差異が，この波高の差異に原因することも考えられる。そこで，波高分布としては，図-39に示す計算値を用い，流況としては，水理模型実験による図-24～26の結果を組合わせて海底地形変化を計算したのが，図-43である。この結果は，図-27の結果に類似していることがわかる。後に，各ケースの相対比較の所で示すが，計算で求めた波が相対的に高い場合でも，流況として，水理標型実験による底層流を用い，底質の移動に，移流沈降過程を入れる限り，現地再現性は高いものとなっている。したがって，図-42に示す，波・流れ共に計算に依って求めた海底地形変化の再現性が失われている理由は，鉛直分布が一様として海浜流を求

めた結果であるということができる。

(2) 局所漂砂量方式の場合

前節においては，数値計算により波高，波向の分布，及び鉛直分布一様とした海浜流を求め，底質の移流沈降過程を考慮した場合の海底地形変化の再現性について述べた。それによれば，底質の移流沈降過程を考慮しても，海浜流の鉛直分布を一様と仮定する限り，航路・港内埋没に関する海底地形変化の再現性が悪いことが明らかとなった。

一方，現在広く行われている三次元的海底地形変化に関する数値計算においては，図-2に示す中で，移流沈降過程を考慮しない局所漂砂量方式がとられている。

本節では，局所漂砂量方式がどの程度の海底地形変化の再現性を有するかについて検討することにする。局所漂砂量方式の場合には，波，流れ，水深などの局地的条件により局地的な漂砂量を与えるもので，漂砂量公式には種々のものが用いられている。ここでは，手法による再

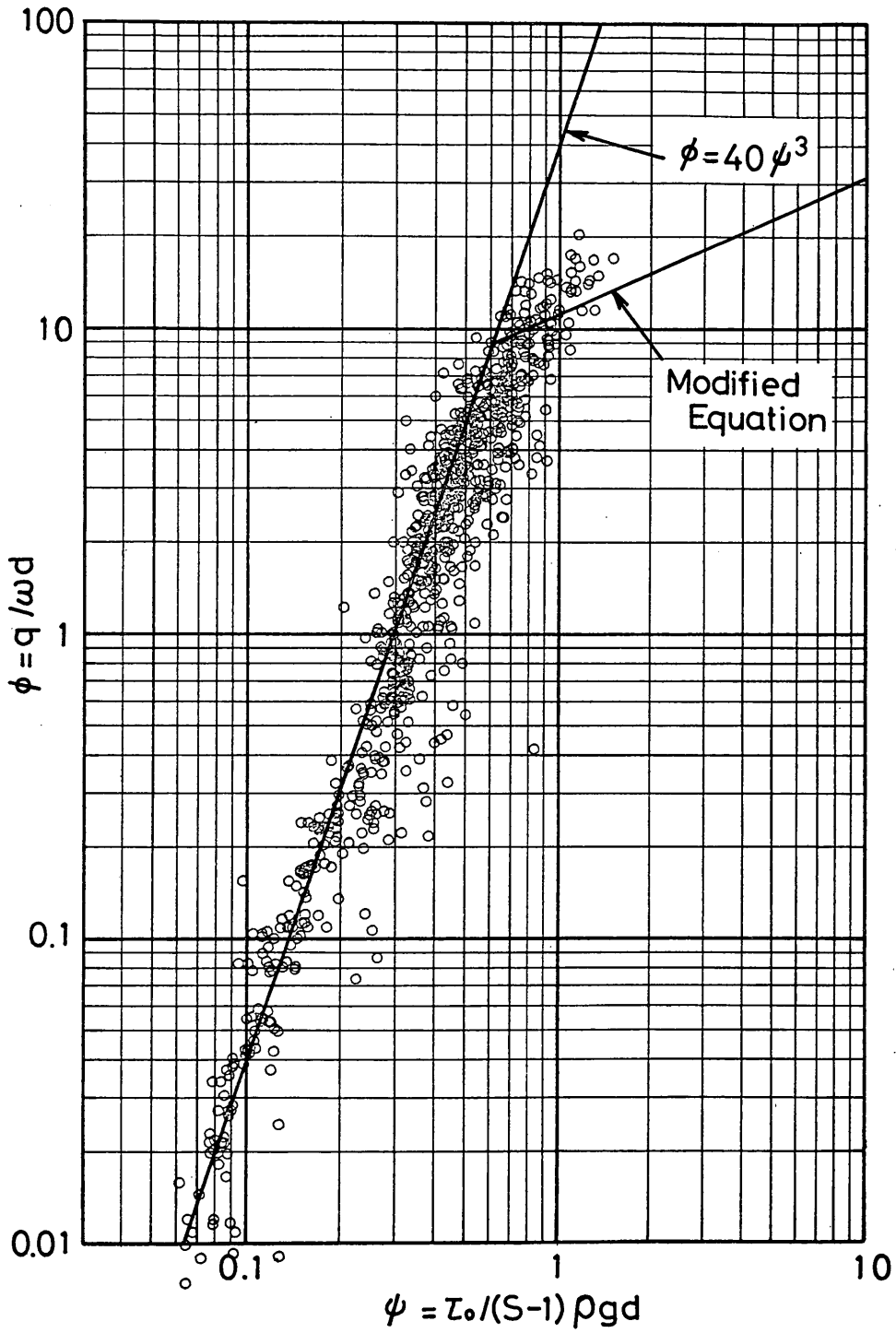


図-44 Brown の流砂量公式と Gilbert の実験値

現性の比較を行うのであるから、本来であれば、移流沈降過程方式と同様に、Bijker の式を用いるべきである。しかし、既往の例をみると、Bijker の式を用いて計算した例がないようであり、Madsen & Grant の提案式を使ったものが多いので、既往の手法を評価する意味で、ここでも Madsen & Grant の提案式を用いることとした。

波と流れが共存する場での底面付近の流速ベクトル $\vec{u}(x, y, t)$ は、波による軌道速度ベクトル $\vec{u}_w(u_w(x, y, t), v_w(x, y, t))$ と平均流ベクトル $\vec{U}(U(x, y), V(x, y))$ の和で構成され、

$$\vec{u}(x, y, t) = f(u_w(x, y, t) + U(x, y), v_w(x, y, t) + V(x, y)) \quad (27)$$

流れによる摩擦係数を f_c' 、波によるものを f_w' とすると、波と流れが共存する場合の摩擦係数 f_{cw}' は、

$$f_{cw}' = \frac{Uf_c' + u_{bm}f_w'}{U + u_{bm}} \quad (28)$$

ただし、 u_{bm} は、底面での軌道速度の最大値である。底面摩擦力 $\vec{\tau}_o(t)$ は、流れのベクトル $\vec{u}(x, y, t)$ の時間的変化と共に変化し、 f_{cw}' を用いて、

$$\vec{\tau}_o(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_{cw}' |\vec{u}(t)| \frac{\vec{u}(t)}{|\vec{u}(t)|} \quad (29)$$

ただし、 $\vec{u}(t) = \vec{u}(x, y, t)$ である。

これより、Shields 数 $\vec{\Psi}$ が

$$\vec{\Psi}(x, y, t) = \vec{\Psi}(t) = \frac{\vec{\tau}_o(t)}{(s-1)\rho g d} \quad (30)$$

これを、Brown の式に代入すれば、局所漂砂量の時間的変化が計算される。

$$\vec{q}(x, y, t) = \begin{cases} 0 & |\vec{\Psi}| \leq \Psi_c \\ 40\omega d \vec{\Psi}^3 & 0.6 > |\vec{\Psi}| > \Psi_c \\ 10.86\omega d \vec{\Psi}^{0.45} & |\vec{\Psi}| \geq 0.6 \end{cases} \quad (31)$$

ただし、 $|\vec{\Psi}| \geq 0.6$ の場合は、Gilbert による修正曲線を用いている。 Ψ_c は、岩垣の限界掃流力の条件を与える Shields 数の値である。また、 d, ω, s, ρ, g はそ

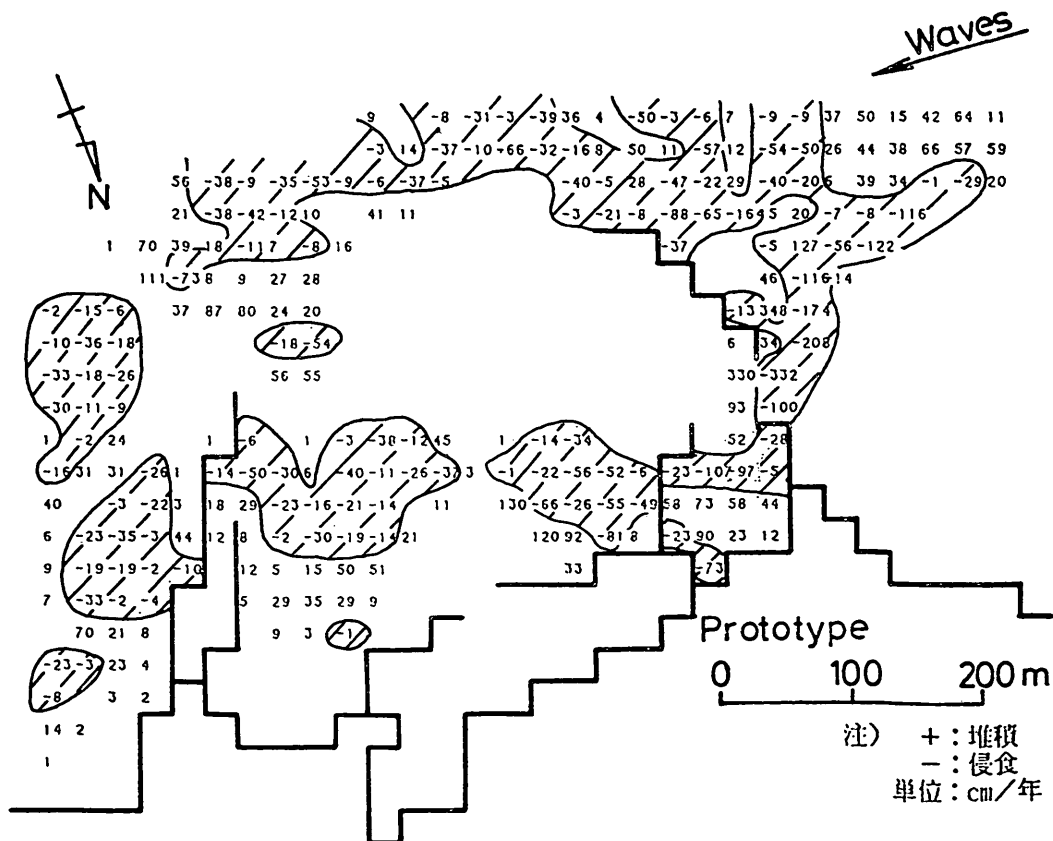


図-45 波、流れが実験による場合の局所漂砂量方式による海底地形変化

れぞれ、底質の粒度、沈降速度、比重、流体の密度、重力の加速度である。図-44に、Brown の流砂量公式と、Gilbert の実験値とを示す。

正味の局所漂砂量は、波の1周期を等分割し、 Δt 時間毎に $\vec{u}(t)$, $\vec{\tau}_o(t)$, $\vec{\Psi}(t)$, $\vec{q}(t)$ を求め、 $\vec{u}(t)$ の方向成分に応じ、 $q_x(t)$, $q_y(t)$ を求めた。

$$q_{\text{net}, x} = \frac{1}{T} \int_0^T q_x(t) dt \quad (32)$$

$$q_{\text{net}, y} = \frac{1}{T} \int_0^T q_y(t) dt \quad (33)$$

現地の波の条件として $H_{1/3} = 2.6\text{m}$, $T = 8.0\text{sec}$ の波が、金沢港の波が、 $H_{1/3} > 2\text{m}$ が63日/年であることを参考に、63日間だけ年間に継続するものとした。底質粒径の代表値は、 $d = 0.15\text{mm}$ としている。

波高、波向分布の計算は、3.4-(1)で述べたものと全く同様の方法に依っている。Brown の式は、底質の掃流量を表わす方式であるが、限界掃流量を与える式とし

て、岩垣の公式を用いた。

まず、移流沈降過程方式と、局所漂砂量方式との手法の相違による海底地形変化の再現性の相違を見るため、波高分布、流況については、物理モデルにより求めたものを用い、漂砂の計算のみ上記二つの異なる方法で海底地形変化を計算し比較することにした。図-45は、こうして局所漂砂量方式で得られた結果である。これと対比されるのは、図-27の移流沈降過程方式による結果であり、現地の実績は図-28である。図-45においては、西防波堤の港内しゃへい域が、極端に変化しない形となり、港内東側半分が侵食傾向を示すなど、再現性が非常に悪いようである。図-45においては、港内の西防波堤のしゃへい域が、底質が全く移動していないことから、物理モデルによる波高が小さいことによるものとも考えられる。図-18、図-39は、それぞれ物理モデル、及び数理モデルによる波高分布を示すが、計算に依る方法は、波の減衰を考慮していないため、全体的に波高が大きい。そこで、今度は、波高分布としては、この計算による値、

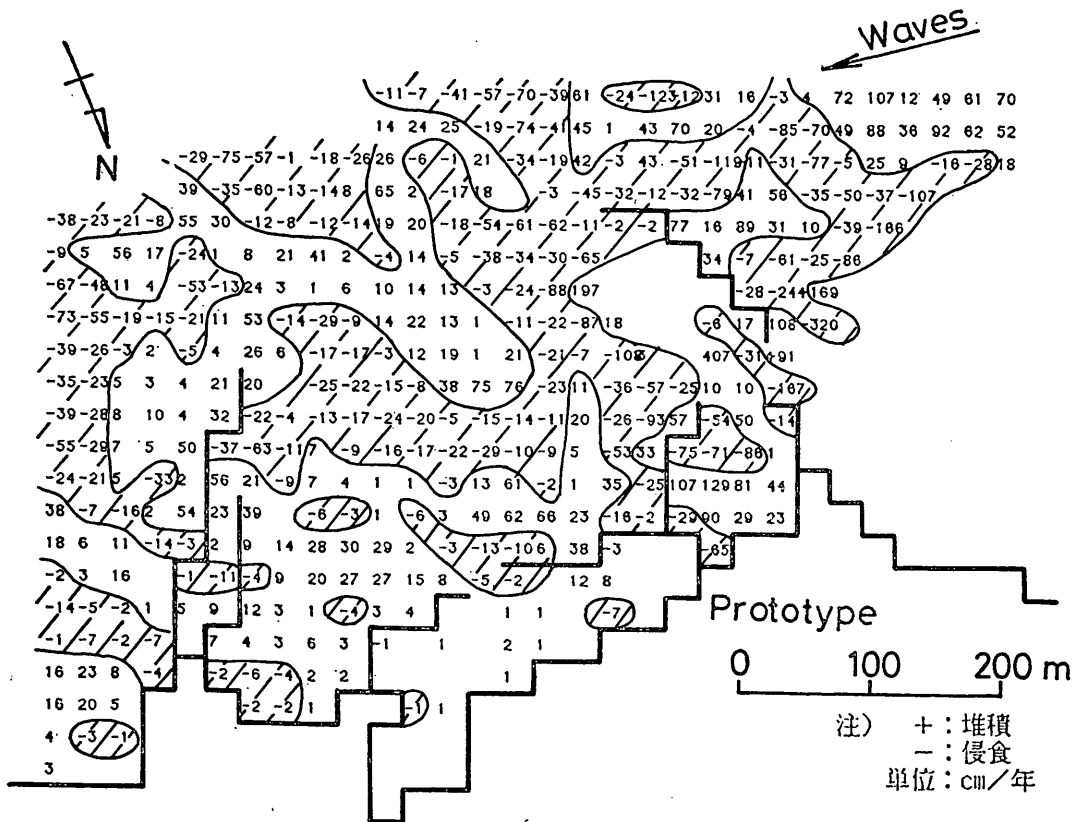


図-46 波は計算、流れは実験による場合の局所漂砂量方式による海底地形変化

底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測

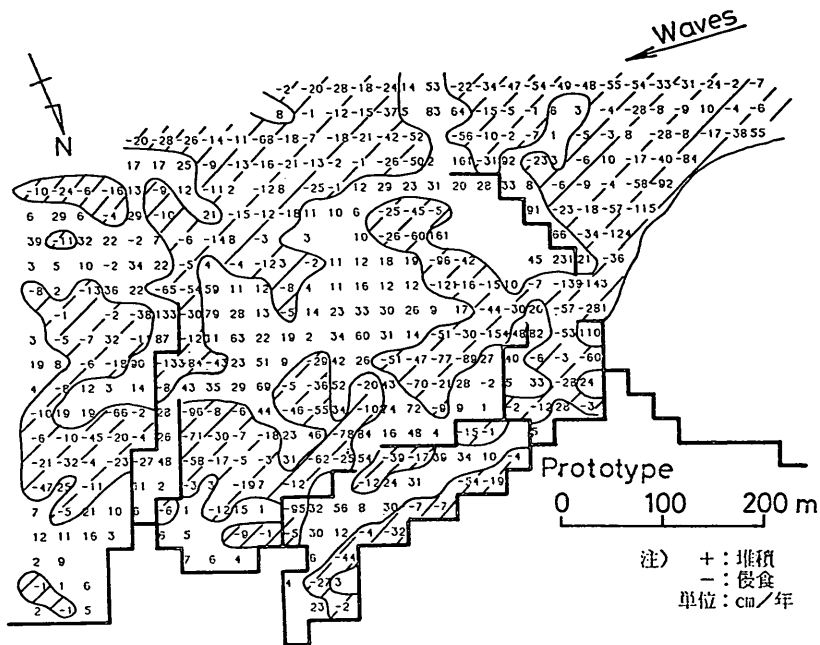


図-47 波，流れとともに計算により求め，局所漂砂量方式の場合の海底地形変化

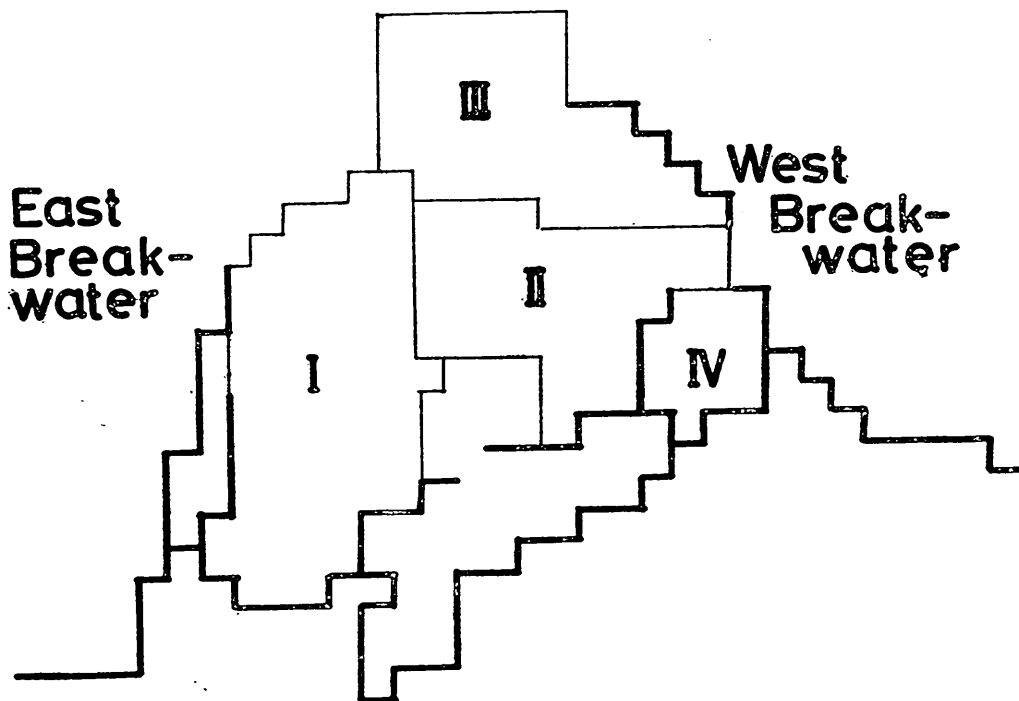


図-48(1) 滝港港内のブロック分割図

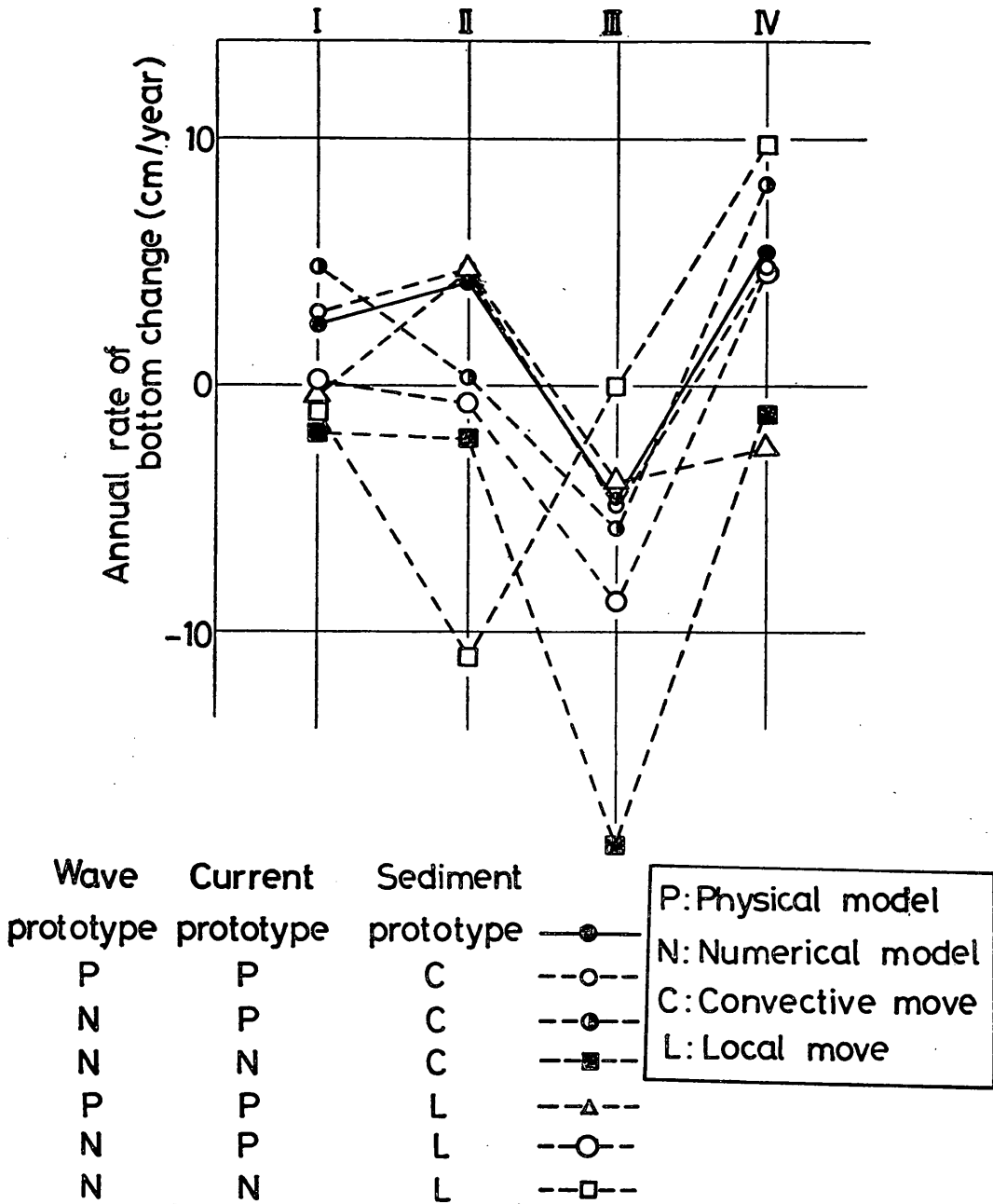


図-48-(2) 各モデルの海底地形変化の再現性の比較図

すなわち、図-39に示す値を用い、流況のみ、物理モデルから得られたものを用いて、海底地形変化計算を行ったのが、図-46である。西防波堤内側しゃへい域の底質移動については、図-45に比較すれば相当に改善されているようである。西防先端東側付近の侵食傾向も相当改善されている。しかし、東側半分の堆積は十分に再現されていない。むしろ、侵食の傾向をもつように見える。

図-47は、波高分布、流況がすべて、数値計算により求められた場合である。一般に行われている三次元数理モデルは、この方法によって行われる。すなわち、波は波の変形に関する数値計算、流れは、radiation stressを計算することにより求められるものである。図によれば、図-27、28に示す傾向とは相当異なったものとなっており、やはり海浜流を鉛直分布一様と考えた所の無理が現れているようである。

(3) 各モデルの海底地形の変形に関する再現性の比較
海底地形変化シミュレーションモデルの再現性の評価法としては、侵食堆積の平面的パターンに関する定性的再現性、さらに海底地形変化の量を見る定量的再現性の二段階があるであろう。ここでは、図-48(1)に示すように、滝港の港内の海底地形変化の傾向から四つのブロックに分割し、各ブロックの年間の堆積、侵食速度を各モデルについて比較することにより、各モデルの海底地形変化の再現性を評価した。図-48のうち、各ブロックの意味する所は以下の通りである。

- I：沖合いから漂砂が侵入し、長期的に堆積傾向を示していると考えられる区域
- II：西防波堤開口部、あるいは、沖合から侵入した漂砂が来ると考えられる区域で、長期的に堆積傾向にあると思われる区域
- III：西防波堤開口部からの流れが、港外域に出ることにより底質を再び巻き上げ、長期的には侵食傾向を示している区域
- IV：小さな船泊りで、西防波堤の開口部からの侵入漂砂の影響で、長期的に堆積していると考えられる区域

図-48(2)は、これまで見てきた種々のシミュレーションモデルに対する各ブロックの平均水深変化量を比較したものである。図中、黒丸(●)は、滝港における昭和53年～57年までの間の各ブロック内の平均水深の平均的な変化速度を示したものである。I、II、IVで堆積、IIIで侵食傾向にあるのが本港の特徴である。図中、Wave、Currentの欄で、Pと示したのは、それらが、水理模型実験から求められたものをシミュレーションの入力とし

て用いられたことを示し、Nと示したのは、これらが数値計算により求められたものを用いたことを示すものである。また、Sedimentの欄において、Cと示してあるのは、移流沈降過程方式によるものであり、Lと示してあるのは、局所漂砂量方式によることを示す。

まず、図-27に示した、物理モデル、数理モデルの組み合わせで、しかも移流沈降方式によるものを、図中小さい白丸(O)で示した。I～IVブロックでの平均水深の変化量が現地実績ときわめて良く一致していることがわかる。このことは、侵食堆積のパターンも非常に良く再現されていることを示し、本方法における種々の改良が効果的であったことを示している。この場合、波だけを数値計算から求めたケースを図中に半白黒丸(◐)で示したが、IIブロックで多少侵食が強くなっているとはいえ、再現性は全体的に良好であるようである。一方、波、流れを計算で求め、やはり移流沈降過程方式により計算した結果を、図中黒四角(■)で示すが、radiation stressによる流れでは、港内に沖から侵入する流れが再現出来ないため、すべて、侵食傾向を示し、現地の実績からは大きくかけ離れたものとなっている。

上述の移流沈降過程方式のシミュレーションに対し、局所漂砂量方式に対するものが、図-48(2)の下3ケースである。すなわち、波、流れを、物理モデルにより求め、局所漂砂量方式で計算した結果を図中(△)印で示してある。Iの堆積が再現されていないことを除いては、II、III、IVの変化傾向が一致しているように見えるが、図-45に示したように、西防波堤のしゃへい域内の底質移動が再現されておらず、この結果をそのまま認めるわけにはいかないであろう。これに対し、波高を計算により求め、大きな波となった場合が、図中大きな白丸(O)である。I、IIのブロックにおいて、堆積性が再現されていない。最後に、波、流れ、ともに計算により求め、局所漂砂量方式で漂砂の計算を行ったケースが、図中の白ぬき四角(□)であるが、現地実績との対応はきわめて悪く、このままでは、港内埋没などの数値シミュレーションが困難なことを示している。

4. 結 論

本研究で明らかになったことは、以下の通りである。

- (1) 物理モデルと数理モデルの長所を生かし、海底地形変化を予測する方法を開発し、石川県の滝港に適用した。この方法は、海浜流の鉛直分布、底質の移流沈降過程を考慮に入れるため、海底地形変化の再現性がきわめて優れている。
- (2) 三次元数理モデルのみによる海底地形変化の予測に

おいては、海浜流の鉛直分布が考慮されていないため、再現性を高める目的で底質の移流沈降過程を入れても地形変化の再現性は劣ったものとなる。

- (3) 数値モデルで一般に用いられている局所漂砂量方式は、航路・港内埋没のように漂砂を支配する条件が場所的に著しく変化する場合は、地形変化の再現性を悪くする。

5. あとがき

本研究の対象となった滝港の施設計画に関する実験は、石川県より沿岸開発技術研究センターが委託されたもので、港湾技術研究所水工部漂砂研究室がその指導にあたったものである。実験の計画実施および資料整理は、沿岸開発技術研究センターの田川昌宏氏が担当し、海底地形変化予測のための各モデルの検討については、港湾技術研究所が指導したものである。最後に、本研究のための滝港に関する貴重な資料を提供いただいた石川県土木部港湾課に対し、感謝の意を表する次第である。

(1985年3月30日受付)

参考文献

- 1) 佐藤昭二・田中則男・入江 功・平原淳次：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—, 港湾技術研究所報告, 第9巻, 第1号, 1970, pp. 71~124.
- 2) Noda, H.: Model study on the filling-up of a fishery harbor by drifting sand, Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., 1966, pp. 564~593.
- 3) 田中則男・灘岡和夫：汀線変化予測モデルの開発と現地への適用, 港湾技研資料, No. 436, 1982, 40p.
- 4) 橋本 宏：海浜変形モデルの富士海岸への適用, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976, pp. 218~222.
- 5) Kraus, N. C.・針貝聰一・久保田進：大洗海岸における汀線変化シミュレーション—防波堤背後の碎波と汀線変化—, 第28回海岸工学講演会論文集, 1981, pp. 295~299.
- 6) 清水琢三・三村信男・渡辺 晃：波浪・海浜流共存

場における海浜変形と漂砂量モデル, 第30回海岸工学講演会論文集, 1983, pp. 229~233.

- 7) 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, 1984, pp. 406~410.
- 8) 磯部雅彦・水口 優・堀川清司：碎波帯付近の波にともなう流速場に関する現地観測, 第27回海岸工学講演会論文集, 1980, pp. 148~152.
- 9) 入江 功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, 1984, pp. 3~52.
- 10) 石川県羽咋土木事務所：滝港改修事に伴う設計委託(漂砂調査)報告書, 1983, 271p.
- 11) 石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦 良一：渚ドライブウェーを有する千里浜海岸の現況と侵食対策, 第31回海岸工学講演会論文集, 1984, pp. 355~359.
- 12) 堀江 毅・細川恭史：海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について, 港湾技術研究所報告, 第22巻, 第3号, 1983, pp. 159~205.
- 13) Hom-ma, M. and K. Horikawa: Suspended sediment due to Wave Action, Proc. of 8th Conf. on Coastal Eng., 1963, pp. 168~193.
- 14) Skafel, M. G. and B. G. Krishnappan: Supended sediment distribution in wave field, Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering, Vol. 110, No. 2, May, 1984, pp. 215~230.
- 15) 入江 功：現地海岸での浮遊砂量について, 第22回海岸工学講演会論文集, 1975, pp. 313~317.
- 16) Bijker, E. W.: The increase of bed shear in a current due to wave motion, Publication No. 46, Delft Hydraulic Lab., 1967, 17p.
- 17) Bijker, E. W.: Longshore transport computations, Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, WW4, 1971, pp. 687~701.
- 18) Bijker, E. W.: Sedimentation in channels and trenches, Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng., 1980, pp. 1708~1718.
- 19) 合田良実：港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説, 鹿島出版会, 1977, pp. 31~81.