

干潟の地形変形予測モデルについて

加藤 一正^{**}・田中 則男^{*}・灘岡 和夫^{**}

1. はじめに

河川流下土砂の減少、海岸構造物の設置による沿岸地形変化の定量的予測は、環境問題および構造物の安全性や効果と関連してきわめて重要視されている。

このような沿岸地形の変化を予測する方法として、模型実験と数値計算がある。前者は相似則の大問題が十分に解決されていない現時点においては、その結果に基づく予測は定性的に止まらざるを得ないし、一方大型電子計算機の発達とともに数年来さかんになって来ている後者においては、現象の定式化にまだまだ検討すべき問題が残されている。

本論文は、沿岸地形変化予測の試みの1つとして行なったもので、波浪の影響の少ない内湾によく発達する干潟地形の変化予測モデルについて述べるものである。したがって底質移動の外力としては潮流のみが考慮されている。モデルは潮流計算モデルと掃流砂量計算モデルの2つで構成されている。潮流モデルは、堀江・金子・村上¹⁾が開発したADI法による差分プログラムにおいて、境界条件を潮位に応じて時間とともに汀線位置が移動する移動境界に修正したものである。掃流砂量計算モデルでは、潮流モデルで計算される水位、流速を入力として、Brownの式²⁾で計算される掃流砂量の連続条件から、各格子点の地形変化量を予測する。

ここでは、本モデルの現地への適用の試みとして有明海の干潟変形の例を示す。

2. 移動境界における潮流計算モデル

2.1 移動境界：干潟上の汀線は1潮汐間に数kmにわたって移動する。このため潮流計算モデルでは海底地形と潮位に応じて境界を各計算ステップ毎に決定するいわゆる移動境界を取り扱う必要がある。これは一種のパターン認識問題であり、あまり得意としない電子計算機で実施するため、プログラムはいきおい複雑で長たらしいものにならざるを得ない。ここでは概略を述べる。

下げ潮時は、干潟が露出するにつれ計算対象海域が狭くなるため、対象海域内の水位に応じて新たに境界を設

定すればよい。ところが上げ潮時は、これと反対に対象海域が広がるため物理量の外そうが必要である。本モデルでは、各計算ステップ内では汀線境界を非透過性として取り扱い、次の計算ステップにはいる前に境界に隣接した水位を単純に外そうし、この際水面勾配を考慮していないので、新たな海域の流速は0と見なしている。

汀線の位置は実水深15cm以上となる最も岸側のメッシュに定めている。これは実水深があまり浅くなりすぎると流れの特性が沖と異なり、また下げ潮時には計算ステップ時間内に干潟が露出してくることを避けるためである。

2.2 河川流入：干潟は一般に河口前面に形成されていることが多く、干潟上には河川による滞筋が形成されており、また全体に水深が浅いため河川流量は流れに対し大きな影響を及ぼす。したがって干潟地形にとって河川の存在は重要である。さらに潮差が大きいときは、タイダルプリズムの効果も考慮しなければならない。

ここでは河道の縦断面を三角形とし、河口の潮位変動を正弦波とみなして計算される流量を河川の年平均流下流量とともに連続方程式に付加する手法をとる。ただし水位が低下して干潟が露出しているときは河川流量だけを考慮に入れるが、このときは境界の移動に伴ない河川流入地点もまた移動させている。

潮流計算モデルのフローチャートを図-1に示す。な

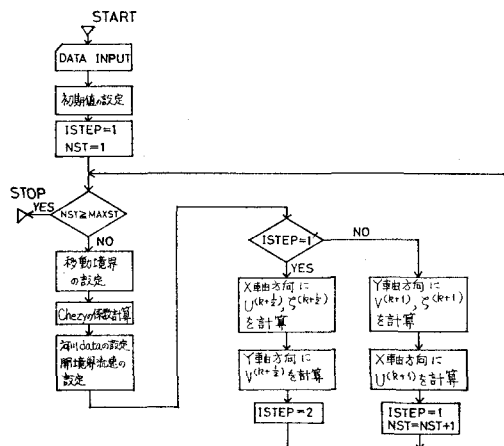


図-1 潮流計算フロー

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室長

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部漂砂研究室

お、潮流計算の基礎方程式および二次元化, ADI 法の詳細は文献 1, 2, 3), 移動境界, 河川流入の取扱いは別報⁵⁾をそれぞれ参照されたい。

2.3 計算条件: 計算対象領域および各条件をそれぞれ図-2, 表-1 に示す。格子間隔 (ΔS) はせいぜい滞筋

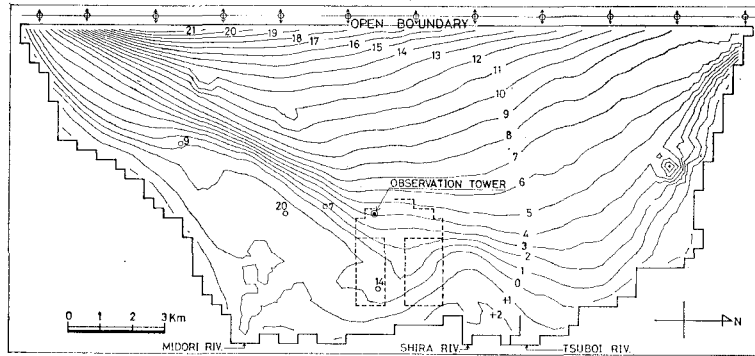


図-2 計算対象海域

表-1 潮流計算条件

(1) 計算対象海域	南北約 22 km, 東西約 11 km, 満潮時海域面積 $1.74 \times 10^2 \text{ km}^2$, 干潮時 1.34 km^2 , 図-2
(2) 座 標	図-2 参照
(3) 格子間隔 (ΔS)	300 m
(4) 水 深	深浅測量 (図-2, D.L.) 入力精度 0.1 m
(5) 粗 度 係 数	$C = (h + \zeta - \alpha)^{1/6} / n$, $n = 0.026$, $\alpha = 1.0$
(6) 強 制 流 速	開境界の 12 点 (図-2) で実測, 大潮時
(7) タイムステップ	$(\Delta t/2 =) 60$ 秒
(8) 河 川 流 量	年平均流量 (m^3/s) 緑川: 54.2, 白川: 23.5, 坪井川: 7.8 タイダルブリズム (m^3) 緑川: 3.01×10^6 , 白川: 1.37×10^6 , 坪井川: 0.41×10^6

幅約 50 m 程度とするのが望ましいであろう。しかし、ここでは計算機の制約から 300 m とした。粗度係数の評価に関して、佐藤⁶⁾らが提案している修正を行なう。すなわち、

$$C = \begin{cases} (h + \zeta - \alpha)^{1/6} / n & : h + \zeta \geq 1.1 \\ 0.683 \cdot (h + \zeta) / n & : h + \zeta \leq 1.1 \end{cases} \quad \dots\dots (1)$$

である。ここに h : 水深 (D.L.), ζ : 潮位, α : 1.0 m, n : マニングの粗度係数 ($= 0.026$) である。タイムステップは計算の安定性, 収束性を支配し、一般に

$$\Delta t/2 < \alpha \Delta S / \sqrt{gh_{\max}} \quad (\alpha = 1 \sim 3) \quad \dots\dots (2)$$

で表わされる。 $h_{\max}$ として最大水深 21 m + 5 m (満潮時潮位) を用いると $\Delta t/2 < 18.8 \sim 56.4$ 秒となる。しかしながら水深 21 m (D.L.) の海域は開境界近傍のごく限られた地域であり、ここで問題としている干潟上は非常に浅いので、上記制限を若干緩和し $\Delta t/2 = 60$ 秒とした。開境界での強制流速データは、図-2 に示す開境界の外

側の 12 点での 1976 年 10 月 8 日～9 日の 25 時間連続実測の結果に基づいている。この潮流の測定は、各地点共海面下 0.5 m (上層) と海底上 0.5 m (下層) の 2 層で行なったものである。図-3 は実測流速の東方成分の 1, 1/2, 1/4 日周潮と恒流成分をもとに計算領域に流

入してくる海水の時間累積値の変化を示している。破線は上層の流速だけを、実線は下層の流速だけをを用いて計算したものである。さらに点線は 24 時間後の流量収支が 0 になるように上層・下層の流速を合成したものである。このとき恒流成分は開境界各断面で 0 であった。すなわち各地点の上下層の恒流成分は常に逆方向であり、その流速比はほぼ一定であった。従って、潮流計算では恒流

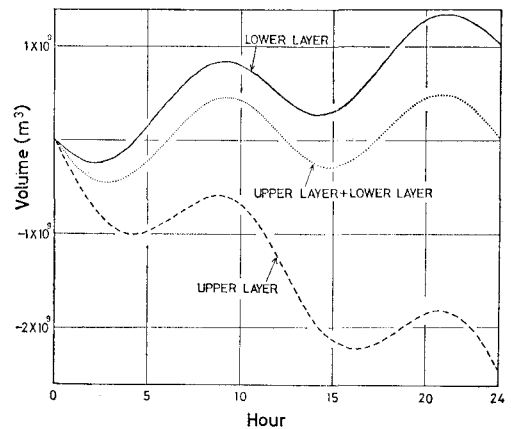


図-3 潮流実測データに基づく流量収支

成分を省略した試行の結果鉛直平均流速を $\beta \cdot (0.15 U_U + 0.85 U_L)$ とした。 U_U, U_L は上下層実測流速の東方成分の 1, 1/2, 1/4 日周潮の合成であり、 β は潮差を一致させるため 0.845 を用いた。

2.4 潮流計算の結果: 図-4 は計算された潮位変動と、流速実測日と同じ日に図-2 に示す観測塔で実測した結果である。図-5 a, b, c, d は図-2 に示す No. 7, 9, 14, 20 の地点の計算流速と実測流速をもとに作成した潮流ホドグラフである。各図は、上段が計算値, 下段が 1975 年 12 月 5 日, 1976 年 2 月 18 日の大潮時に測定したものであり、実線が海底上 0.5 m, 点線が海面下 0.5 m のものを示す。このように現況計算における再現性は潮位・流速ともに良好である。また、図-6 は上げ潮最強流速時の流況である。緑川前面干潟上の流れは海底地形の最大傾斜方向に沿って逆上しており、滞筋の流れおよび感潮河川の効果もあわせて再現されている。

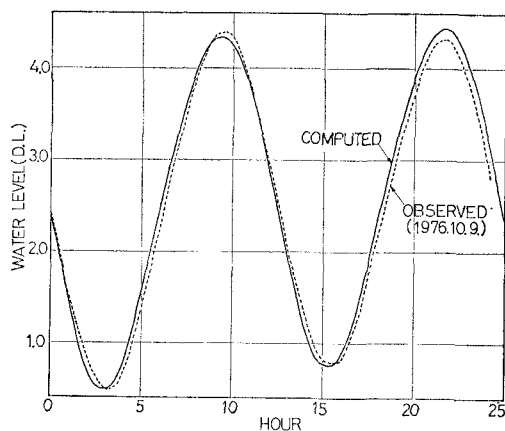


図-4 潮位図

底質の移動は掃流砂を考慮する。限界掃流力については Shields の図がよく知られているけれども、計算機モデルに組み込むときは関数関係で表示した岩垣⁷⁾のものが利用しやすい。

掃流砂公式としては、一般に浮遊砂の効果も含むと言われている Brown⁸⁾ の式を用い、Shields のパラメータ ϕ に対し、掃流砂量を

$$q = \begin{cases} 0, & \phi \leq \phi_c \\ 40\omega d\phi^3, & \phi > \phi_c \end{cases} \quad (4)$$

で評価する。ここに、 ϕ_c : 限界掃流力パラメータ、 q : 単位時間単位幅当りの掃流砂実質体積、 ω は底質の静水中における沈降速度で、Rubey の式によって算定した。

底面の剪断力 τ_0 は、潮流計算と整合させるため、

$$\tau_0 = \rho g U^2 / C^2 \quad (5)$$

を用いる。ここに、 C は式 (1) で与えられる Chezy の係数である。

各格子辺を横切る掃流砂量の計算は、ADI 法による潮流計算において各物理量の定義点がそれぞれ異なるので次のように行なう。すなわち、図-7 において A、B の

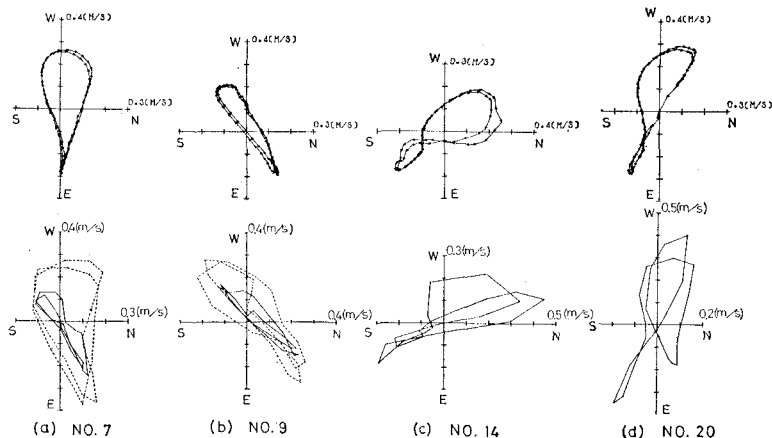


図-5 潮流ホドグラフ

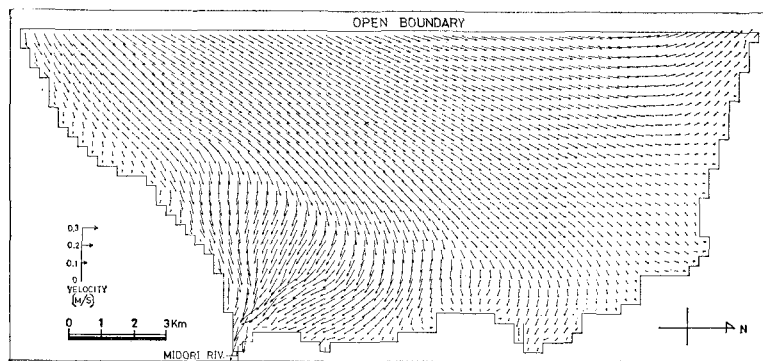


図-6 上げ潮最強時流況 (現況)

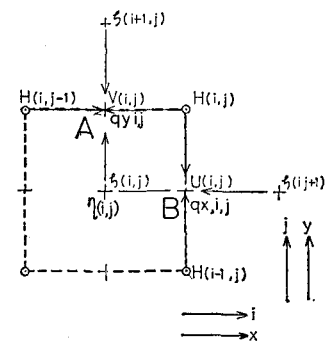


図-7 掃流砂の計算方法 (定義点)

掃流砂量は、

$$h_A = \frac{1}{2}(h_{i,j-1} + h_{i,j}) + \frac{1}{2}(\zeta_{i,j} + \zeta_{i+1,j}) \quad (6)$$

$$h_B = \frac{1}{2}(h_{i-1,j} + h_{i,j}) + \frac{1}{2}(\zeta_{i,j} + \zeta_{i,j-1}) \quad (7)$$

$$h = \frac{1}{2}(h_A + h_B) \quad (8)$$

$$V = \sqrt{V_{i,j}^2 + U_{i,j}^2} \quad (9)$$

で定義される h , V を用いて、式 (4) に従い掃流砂量 q を計算した後、次式によって $q_{x,i,j}$, $q_{y,i,j}$ を計算する。

3. 掃流砂計算

3.1 連続式および掃流砂量式

地形変化の連続式は直交座標系において、

$$(1-\epsilon) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

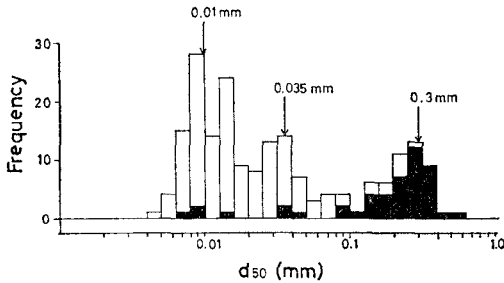
となる。ここに、 η : ある基準面からの海底地形、 ϵ : 空隙率、 q : 底質移動量である。

$$q_{x,i,j} = q \frac{U_{i,j}}{V}, \quad q_{y,i,j} = q \frac{V_{i,j}}{V} \dots\dots\dots(10)$$

3.2 混合粒径の取り扱い: 本モデル中では、底質粒度分布を階級に分割し、それぞれを均一粒径とみなして上記 Brown の式を用いる。計算される各階級毎の掃流砂量にその粒径階級の割合のウェイトを付けた後加えて混合粒径の総掃流砂量とした。ただしこのときの底質粒度分布特性は常に流れの上手側の格子のものを使用した。さらに、格子に流入してくる掃流砂ともとからそこに存在する底質は、リップルの波高程度(1cm)の深さで混じり合うと仮定した。

3.3 計算条件: 入力データは、潮流計算の結果を用いる関係上表—1と同じである。ただし計算ステップだけは20分とした。

底質粒径の入力データは、全域をほぼ1kmのメッシュ計173点でサンプリングした結果に基づいている。緑川前面の干潟はおおむね中砂、沖は狭い幅の細砂をはさんで全域シルト質になっている。白川・坪井川前面は主に細砂が分布している。図—8は各地点の中央粒径の頻



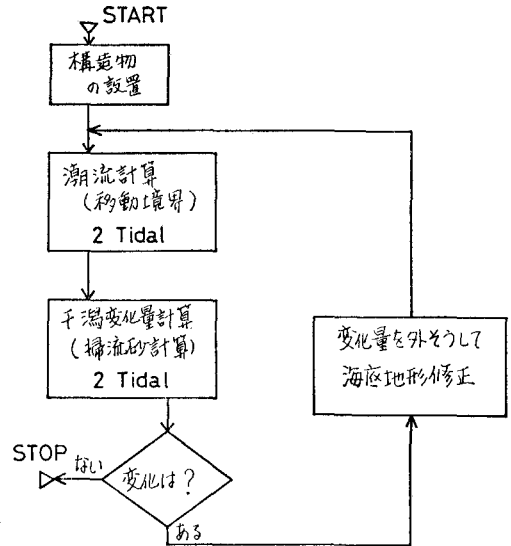
図—8 底質中央粒径頻度分布

度分布であり、黒い部分は水深 ± 0 (D.L.) 以上の干潟上の地点を示す。頻度の高い粒径は3点あるので、階級分割を3としそれぞれの代表粒径を0.01, 0.035, 0.3 mmとした。

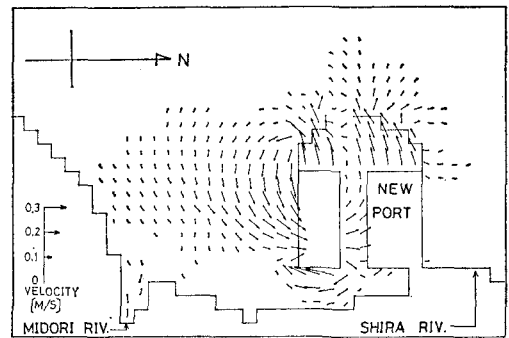
4. 干潟変形予測計算の結果

現況における流況の再現は2.で述べたように良好であるので、図—9に示したフローチャートに従い、まず図—2に点線で示した位置に島型の新しい港を設置して潮流計算を2潮汐行ない、結果を磁気テープに出力した後改めて入力データとして掃流砂計算により干潟変形を予測する。

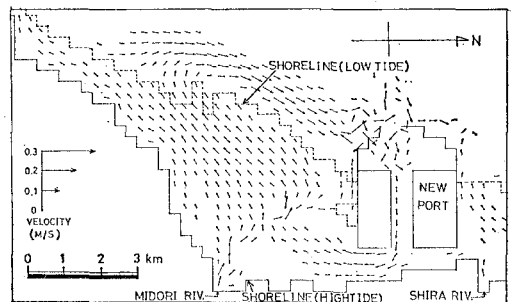
4.1 構造物設置後の流況: 図—10は、新港設置後の流速ベクトルから現況の流速ベクトルを差し引いた一例であり、上げ潮最強流速時のものを示す。新港の影響は構造物周辺に生じており、特に南側の干潟上に広がっている(下げ潮時も同様)。また、現況の流れに大きな左回りの強制循環を与える効果了新港は有することがわかる(下げ潮時は右回りの循環)。図—11は、2潮汐間の残差



図—9 干潟変形予測計算のフロー



図—10 新港の流況におよぼす影響



図—11 潮汐残差流(新港設置時)

流である。残差流は新港の南側の干潟上で顕著であり、干潟上では南西にその沖では逆に北東に向う流れとなっている。

4.2 掃流砂計算の結果: 図—12に、2潮汐間の侵食堆積パターンを示す。上図は初期変化、下図は初期変化量を全域にわたり5倍して海底地形を修正し図—9のようにフィードバックして得られた結果である。侵食・堆積

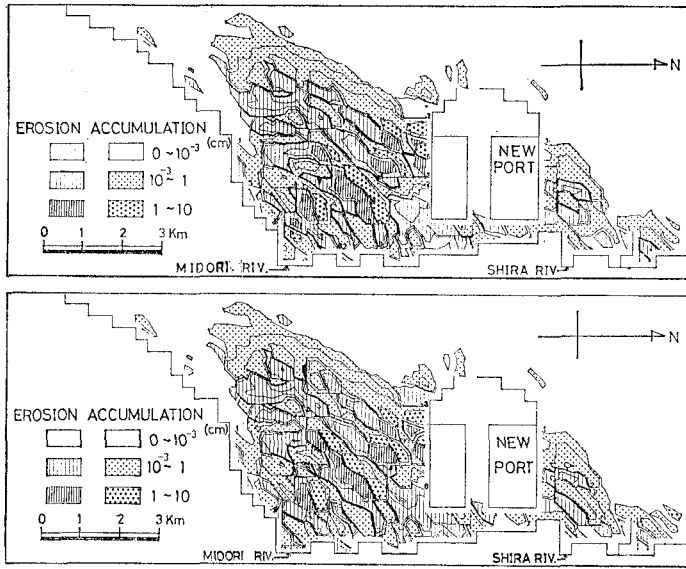


図-12 干潟変形予測結果

は主に港の南側干潟上で生じており、港建設による流況の変化および残差流の生じる地域と対応している。量的には 1 cm 以下の変化が支配的であるけれども、滞筋に沿っては 1~10 cm の侵食・堆積が交互に生じている。これらの侵食・堆積量はオーダー的に見て十分納得し得るものである。侵食・堆積の地域は南西-北東方向に細長く延びており、残差流の主方向および等深線の方角と一致する。このように上図と下図は、よく似ているけれども細部においては若干異なる。例えば、下図において中央の 1~10 cm の侵食・堆積が一番広範囲に広がっている地域の東側の境界は 300 m 程度沖に移動しているし、緑川河口付近では変化量が少なくなっている。

なお、上下図とも新港防波堤開口部前面で若干航路埋没が生じている。

5. あとがき

本モデルの問題点を列挙すると次のとおりである。

(1) 干潟上の侵食・堆積の範囲およびその量は十分納得しうるものであるけれども、現地データに基づく検

討によって計算結果を評価する必要がある。また実水深 15 cm 以下のところの底質移動を無視した妥当性の検討も合せて必要である。

(2) 混合粒径の分布が広範にわたる時の、掃流砂公式および浮遊砂量式の確立を必要とする。特に干潟上には部分的ではあるがシルトも分布しているため、化学的な作用も考慮しなければならない。

(3) 波・流れによる底質の巻き上げおよび浮泥の沈降拡散現象の取り扱い。

(4) ここでは、大潮時だけの再現をおこなったけれども、小潮時の変化およびそれらを考慮した流れと地形の干渉の問題、あるいは図-9のフィードバック方法の確立等、将来検討していかなければならない。

最後に、ADI 法について御指導いただいた港湾技術研究所海水浄化研究室堀江室長、海洋水理部村上主任研究官、ならびに現地データを提供していただいた第四港湾建設局八代港工事事務所の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 堀江 毅・金子安雄・村上和男・細川恭史・亀山 豊：潮流計算における境界等の取扱い——特に ADI 法による検討——，港研報告，第 15 巻，第 2 号，pp. 251-287, 1976.
- 2) 堀江 毅・金子安雄・村上和男：潮流の数値シミュレーションについて——特に境界条件と支配因子の取扱い——，港研講演会，pp. 53-90, 1975.
- 3) 金子安雄・堀江 毅・村上和男：ADI 法による潮流と汚染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合について——，港研報告，第 14 巻，第 1 号，pp. 1-61, 1975.
- 4) Brown, C. B.: Sediment Transportation, Engineering Hydraulics edited by H. Rouse, John Wiley and Sons, Inc., N.Y., 1039 p., pp. 769-857, 1950.
- 5) 港研報告，第 18 巻，第 3 号，1979，投稿予定.
- 6) 佐藤昭二・木村久雄・高松恭文：レクリエーション海浜における突堤・離岸堤の汚濁拡散に対する影響，港研報告，第 16 巻，第 2 号，pp. 27-62, 1977.
- 7) 土木学会編：水理公式集，616 p., 1974.
- 8) 前出 4).