

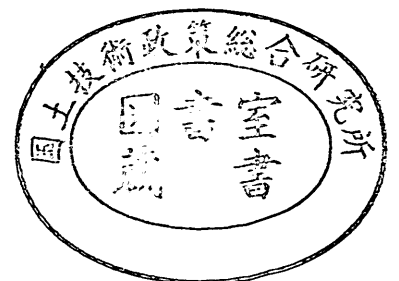
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 15 NO. 2 JUNE 1976

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第15巻 第2号 (Vol. 15, No. 2), 1976年6月 (June 1976)

目 次 (CONTENTS)

1. Theory of transient fluid waves in a vibrated storage tank
..... Tomotsuka TAKAYAMA..... 3
(振動外力を受けるタンク内発生波の非定常解について.....高山 知司)
2. 防波堤隅角部付近の波高分布に関する研究 小舟浩治・大里睦男.....55
(A study of wave height distribution along a breakwater with a corner
..... Koji KOBUNE, Mutsuo OSATO)
3. 阿賀野川河口近傍海岸の海底地形変化について (1962年~1973年)
..... 田中則男・加藤一正・柳島慎.....89
(Changes of sea-bed topography at the coast near Agano River (1963~1973)
..... Norio TANAKA, Kazumasa KATO, Shin-ichi YANAGISHIMA)
4. 波浪中の直立円柱浮体に働く流体力とその運動
..... 合田良実・鈴木康正・笹田 正..... 167
(Movements of a floating vertical circular cylinder in waves and associated
forces..... Yoshimi GODA, Yasumasa SUZUKI, Tadashi SASADA)
5. 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験 (第2報)
——主要汚染源の湾内汚染に与える影響——
..... 金子安雄・堀江 毅・村上和男・亀山 豊・入尾野幸雄..... 211
(Model experiment on tidal current and substance diffusion in Osaka Bay (2nd
Report)—Influence of main sources on the water contamination of the Osaka
Bay Yasuo KANEKO,
Takeshi HORIE, Kazuo MURAKAMI, Yutaka KAMEYAMA, Sachio IRIONO)
6. 潮流計算における境界等の取扱い——特にADI法による検討——
..... 堀江 毅・金子安雄・村上和男・細川恭文・亀山 豊..... 251
(Boundary treatments of tidal simulation—Investigation by alternating direction
implicit method—.....Takeshi HORIE, Yasuo KANEKO, Kazuo MURAKAMI,
Yasushi HOSOKAWA, Yutaka KAMEYAMA)
7. 強震記録の上下動成分の解析と重力式岸壁の安定に関する事例研究
..... 上部達生・野田節男・倉田栄..... 289
(Characteristics of vertical components of strong-motion accelerograms and
effects of vertical ground motion on stability of gravity type quay walls.....
.....Tatsuo UWABE, Setsuo NODA, Eiichi KURATA)

6. 潮流計算における境界等の取扱い

—特に ADI 法による検討—

堀江 毅*・金子安雄**・村上和男***

細川恭史****・亀山 豊***

要 旨

潮流計算における防波堤等の幅をもたない線境界、防波堤開口部や透過堤等の取扱い、境界における流速制御の取扱い等について述べるとともに、座標軸や格子間隔その他計算に際して問題となる項目について検討したものである。

計算対象領域、座標軸の方向、格子間隔などは計算結果や演算時間に直接影響するので、それらの決定には注意を要すること、小メッシュモデルの計算過程において発生する蛇行流は水平混合項による平滑化によって除去できること、さらに、海流、恒流の影響の強い海域や、計算領域が小さ過ぎて複雑な地形に基づく流動が境界付近で取入れられない場合などでは、境界における流速制御と水位制御との併用により流動の再現性を高めることができるなどについて述べた。

* 海洋水理部 海水浄化研究室長

** 前海洋水理部 海水汚染水理研究室長

*** 海洋水理部 海水汚染水理研究室

**** 海洋水理部 海水浄化研究室

6. Boundary treatments of tidal simulation

—Investigation by alternating direction implicit method—

Takeshi HORIE*

Yasuo KANEKO**

Kazuo MURAKAMI***

Yasushi HOSOKAWA****

Yutaka KAMEYAMA***

Synopsis

This paper presents the items of great importance such as the selection of coordinates, grid interval, in addition to the treatment techniques of line-boundaries like breakwaters, the mouth of breakwaters, permeable marine structures, and flow-controlling at open boundaries on tidal simulation.

The area concerned, the direction of coordinates, and grid interval have a great influence on the results and cpu (central-processing-unit) time, it is, therefore, necessary to take care of their determinations. The zigzag flow generated in the process of small mesh simulation can be removed by lateral-mixing terms of momentum equations. The reproducibility of flow field can improve by flow-controlling or flow-and-elevation-controlling, in case of the area of prominent permanent current, or of the area too narrow to estimate the geographical permanent current at open boundaries.

* Chief of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

** Ex-chief of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

*** Member of the Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

**** Member of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要 旨	251
1. ま え が き	255
2. 潮流数値モデルの概要	255
2.1 潮流（流動）計算基本式	255
2.2 差 分 式	257
3. 境界その他の条件の取扱い	259
3.1 開境界と閉境界	259
3.2 線 境 界	259
3.3 縮小断面（防波堤開口部等）	261
3.4 水平混合項	263
3.5 水位制御と流速（流量）制御	264
4. 潮流計算に際しての留意点	264
4.1 計算領域と座標軸	264
4.2 格 子 間 隔	265
4.3 時間ステップ	266
4.4 縮 小 断 面	268
4.5 水平混合項	271
4.6 水位制御と流速制御	273
5. ま と め	286
6. あ と が き	286
参考文献	287

1. まえがき

港湾を含む各種の開発行為に対して十分な事前の環境影響調査が義務づけられるようになって以来、海域の流動や水質の予測手段として、潮流や汚染拡散の数値計算が随所で頻繁に利用されるようになった。前報告¹⁾発表後1年間の港湾局関係のみでも20数件を数え、防波堤建設や浚渫埋立による流動、水質の影響調査、海域特性の把握などの重要な手がかりとなっている。

ところが、これらの現象予測のための数値シミュレーションは、実際の現象ができるだけ忠実に再現できるように組立てられた数値モデルに基づいた適切な境界値等の諸条件によるものでなければならない。

各種数値モデルの特徴については比較対照できる程の実施を経験していないので、数値モデルは前報告¹⁾と同一のADI法による潮流計算モデルに限定し、比較的いづれのモデルにも共通する問題と思われる境界値の取扱いを主題として、新たに開発した項目と、計算の実施に際して遭遇した問題点や対処策を報告する。

本報告の主な内容は、

- (1) 数値モデルの概要
 - (2) 線境界、縮小断面、水平混合項、水位制御と流速制御などの境界その他の取扱い、および
 - (3) 座標軸、格子間隔その他(2)に述べた項目等についての留意点
- である。

2. 潮流数値モデルの概要*

2.1 潮流（流動）計算基本式

連続流体の運動は、流体の連続性に基づく連続方程式と、流れの方向における運動量の変化を示す運動方程式とによって表わされる。

いま、ある海域の平均海面上の一点を原点とする直交直線座標系を図-1のように定義する。ここに x, y 軸は平均海面上に、 z 軸は鉛直上方にそれぞれとり、海底および海面はそれぞれ $z = -h$ 、および $z = \zeta$ にて、さらに x, y, z 軸方向の流速をそれぞれ u, v, w にて表わす。このような座標系で、連続方程式と運動方程式とは周知のとおりつぎのような偏微分方程式で表わされる。

連続方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

* 2.1 ならびに 2.2 は前報告¹⁾の内容と一部重複するが、以下の議論の便宜上、表現の変更や新たな項目を付加して改めてここに述べる。

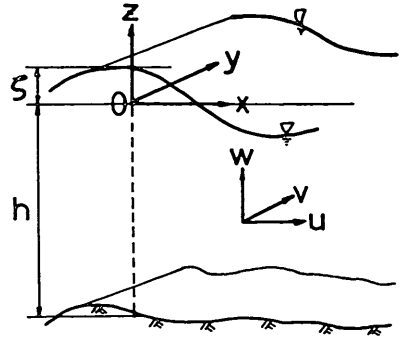


図-1 座標系

運動方程式

x 軸方向：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$$

加速度項 非線型項

$$= f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

コリオリ項 水平混合項* 摩擦項
オリ 粘性項

y 軸方向：

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$= -f u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

z 軸方向：

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

ここに、

t ：時間

f ：コリオリ係数（ $= 2\omega \sin \varphi$, ω = 地球自転の角速度 $= 2\pi / (24 \times 60 \times 60)$, φ = 緯度）

p ：圧力

ρ ：海水密度

ν ：渦動粘性係数

なお式(4)に現われない $\frac{\partial w}{\partial t}$, $\frac{\partial w}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ ……等の項は重力項、圧力項に較べて小さいため省略している。

式(4)より

$$p = \rho g (\zeta - z) + p_0 \quad (5)$$

ここに、 $p_0 = p_0(x, y, \zeta, t)$ は、海面 ($z = \zeta$) における大気圧である。

* 前報告¹⁾においては、式(2), (3)の右辺に現われる水平混合項は無視している。

式(5)を式(2), (3)に代入して再整理するときのようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f u - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

式(1)の連続方程式, および式(6), (7)の運動方程式が潮流計算を行う場合の基本方程式である。

式(6), (7)中の海面における大気圧 $p_0 = p_0(x, y, \zeta, t)$ は, 高潮計算を行う場合, 台風の中心深度, 規模などにより別途計算して与えるが, 潮流計算では, 特に海面での気圧変化を考慮しない限り, p_0 の場所的变化を無視して (即ち, $\partial p_0 / \partial x = \partial p_0 / \partial y = 0$ とおいて) 取扱う。

以上, 3個の基本方程式 (式(1), (6)および(7)) に対し, 未知数は u, v, w, ζ の4個である。未知数の数を方程式の数に等しくするため, 式(1), (6), (7)の3式から未知数を1個消去する必要がある。このため水深方向に平均化 (即ち, 二次元化) し, 鉛直方向の流速 w を消去するという方法が一般的にとられている。この平均化を海底から海面までの全水深にわたって行ったものを単層モデル, 海底から海面までを2つ以上に分けて行ったものを多層モデルと呼んでいる。

まず単層モデルに注目して, 式(1), (6)および(7)に対し, 海底 ($z = -h$) と海面 ($z = \zeta$) の条件式,

$$z = -h(x, y) \quad (8a)$$

$$z = \zeta(x, y, t) \quad (8b)$$

部分積分に関するライプニッツ公式,

$$\int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial [f(x, y, z, t)]}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} f(x, y, z, t) dz - f(x, y, \zeta, t) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f(x, y, (-h), t) \frac{\partial (-h)}{\partial x} \quad (9)$$

などを適用して海底から海面まで ($-h \leq z \leq \zeta$) 積分すればつぎの関係式が得られる^{1), 2)}。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)v] = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g\nu\sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g\nu\sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta + h)C^2} = 0 \quad (12)$$

ここに, u, v は $-h \leq z \leq \zeta$ 間の平均流速, C はシェーの粗度係数を表わす。

なお, 式(10), (11)および(12)の誘導過程において, 式(6), (7)の水平混合項 (式(2)の項の説明参照) および大気圧勾配 ($\partial p_0 / \partial x$ および $\partial p_0 / \partial y$) は除去して考えた。水平混合項については3.4において取扱う。さらに, 海面における風の応力も上式(10), (11), (12)では省略している。

一方, 多層モデルにおいても, 鉛直流 w を計算できるものは少く, 各層で2次元水平平均流を計算して, 各層間の水平流速の鉛直分布を求めるといったモデルが多い。たとえば, 最も簡単な2層モデルは次式で表わされる^{3), 4)} (図-2)。

連続方程式

$$\text{上層: } \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [u_u D_u + u_l D_l]}{\partial x} + \frac{\partial [v_u D_u + v_l D_l]}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

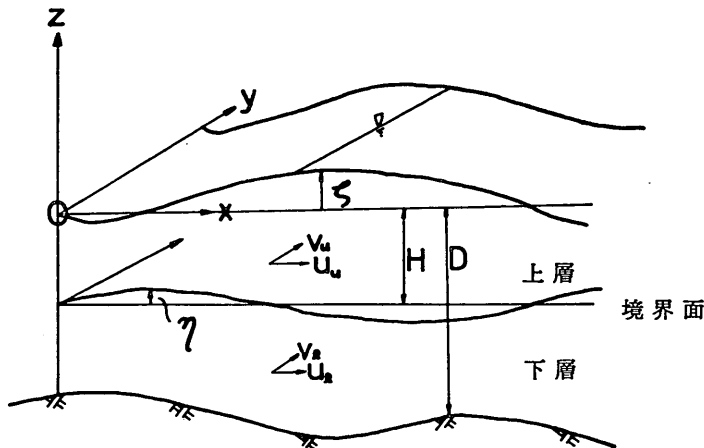


図-2 二層モデルの座標系

$$\text{下層;} \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [u_i D_i]}{\partial x} + \frac{\partial [v_i D_i]}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

運動方程式

上層;

$$\frac{\partial u_u}{\partial t} + u_u \frac{\partial u_u}{\partial x} + v_u \frac{\partial u_u}{\partial y} - f v_u + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + r_i^2 (u_u - u_i) \sqrt{(u_u - u_i)^2 + (v_u - v_i)^2} / D_u = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial v_u}{\partial t} + u_u \frac{\partial v_u}{\partial x} + v_u \frac{\partial v_u}{\partial y} + f u_u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + r_i^2 (v_u - v_i) \sqrt{(u_u - u_i)^2 + (v_u - v_i)^2} / D_u = 0 \quad (16)$$

下層;

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} - f v_i + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{\partial \eta}{\partial x} - r_i^2 (u_u - u_i) \sqrt{(u_u - u_i)^2 + (v_u - v_i)^2} / D_i + r_b^2 u_i \sqrt{u_i^2 + v_i^2} / D_i = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} + f u_i + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{\partial \eta}{\partial y} - r_i^2 (v_u - v_i) \sqrt{(u_u - u_i)^2 + (v_u - v_i)^2} / D_i + r_b^2 v_i \sqrt{u_i^2 + v_i^2} / D_i = 0 \quad (18)$$

ここに、

$\Delta \rho$: 上層と下層の密度差

f : コリオリ係数

r_i^2 : 上下層境界面の摩擦係数

r_b^2 : 海底摩擦係数

u_u, v_u : 上層の水平流速 (水深方向の平均値)

u_i, v_i : 下層の水平流速 (水深方向の平均値)

D_u : 上層の厚さ ($= H + \zeta - \eta$)

D_i : 下層の厚さ ($= D - H + \eta$)

D : 平均水深

H : 上層の平均厚さ

を表す。式(14)~(18)においても水平混合項は省略して表記している。上記2層モデルでは、境界面での相対流速による抵抗を考慮して、各層での水平流速を計算する。この際、上層および全水深の平均厚さは一定として取扱う。このような訳で、二層モデルの適用に際しては、上下層の平均密度差 $\Delta \rho$ 、境界面摩擦係数 r_i^2 、上層平均厚さ H などを決定しなければならないが、現在のところこれらの値は明確でない。

2.2 差分式

(1) 一般

連続方程式、運動方程式の基本式が与えられれば、これに境界条件や初期条件を与えて解を求めればよい。ところが2.1に述べた偏微分方程式を一般的な形で解析的

に解くことは不可能である。したがって、これらを解くために、基本方程式で表わされる「連続的」な量を適当な形の「離散的」な量に置換えて逐次計算し解を求めるという手法、いわゆる数値計算手法を考える。

この基本方程式の「連続量」から「離散量」への置換過程において、各種の数値モデルを組立てることができ

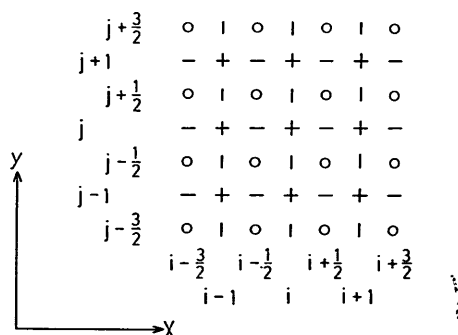
る。差分法による潮流計算の解法はこれまでイクスプリシット法 (陽解法) によるものがほとんどであり、その中でも、リーブ・フログ法 (中央差分法) が主体をなしてきた。

これに対し、最近インプリシット法 (陰解法) による潮流計算法が開発され、解の収束性、演算時間、および、流れ (特に潮流残差流) の再現性などで優れた点が見出されている。このうち最も典型的なものが ADI 法 (Alternating Direction Implicit Method) と呼ばれるもので、Leendertse, J.J.²⁾ によりはじめて潮流および拡散計算に応用されている。筆者らもここ数年、この ADI 法による計算法を適用し、いくつかの計算を行っている。以下においては、ADI 法による一層モデルを考える。イクスプリシット法の詳細については他の文献²⁾に譲る。

(2) ADI 法による差分式

水深方向に平均化して2次元単層モデルを考え、基本方程式は式(10)、(11)および(12)を用いる。

格子網および変数を図-3 (a) のように定義し、水位点 $\zeta_{i,j}$ において連続方程式 (式(10)) の差分化を、流速



- + 水位 (ζ), 組数 (c)
- 水深 (h)
- 流速 (u)
- | 流速 (v)

図-3 (a) 変数の位置

点 $u_{i+\frac{1}{2},j}$ において x 軸方向の運動方程式 (式(11)) の差分化を, さらに, 流速点 $v_{i,j+\frac{1}{2}}$ において y 軸方向の運動方程式 (式(12)) の差分化をそれぞれ考える (図-3(b)).

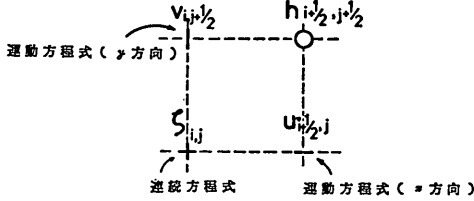


図-3 (b) 運動方程式, 連続方程式の構成位置

まず, 時間ステップ Δt を 2 分する。

前半のタイムステップ $k\Delta t \rightarrow (k+\frac{1}{2})\Delta t$ において, 式(11)より, 点 $(i+\frac{1}{2}, j)$ に対して,

$$u^{(k+\frac{1}{2})} = u^{(k)} + \frac{1}{2} \Delta t f \bar{v}^{(k)} - \frac{1}{2} \Delta t u^{(k+\frac{1}{2})} \\ \times \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle_{i+\frac{1}{2},j}^{(k)} - \frac{1}{2} \Delta t \bar{v}^{(k)} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle_{i+\frac{1}{2},j}^{(k)} \\ - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} g \zeta_x^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t g u^{(k)} \frac{\sqrt{(u^{(k)})^2 + (\bar{v}^{(k)})^2}}{(\bar{h}^x + \bar{\zeta}^x)^2} \quad (19)$$

式(10)より, 点 (i, j) において,

$$\zeta^{(k+\frac{1}{2})} = \zeta^{(k)} - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}^y + \bar{\zeta}^y)^2] u^{(k+\frac{1}{2})} \\ - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}^x + \bar{\zeta}^x)^2] v^{(k)} \quad (20)$$

式(12)より, 点 $(i, j+\frac{1}{2})$ において,

$$v^{(k+\frac{1}{2})} = v^{(k)} - \frac{1}{2} \Delta t \cdot f \bar{u}^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t \bar{u}^{(k+\frac{1}{2})} \\ \times \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle_{i,j+\frac{1}{2}}^{(k)} - \frac{1}{2} \Delta t v^{(k+\frac{1}{2})} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle_{i,j+\frac{1}{2}}^{(k)} \\ - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} g \zeta_y^{(k)} - \frac{1}{2} \Delta t g v^{(k+\frac{1}{2})} \frac{\sqrt{(\bar{u}^{(k+\frac{1}{2})})^2 + (v^{(k)})^2}}{(\bar{h}^x + \bar{\zeta}^x)^2} \quad (21)$$

が得られる。

全く同様に, 後半のタイムステップ $(k+\frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (k+1)\Delta t$ に対して,

式(12)より, 点 $(i, j+\frac{1}{2})$ において

$$v^{(k+1)} = v^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t f \bar{u}^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t \bar{u}^{(k+\frac{1}{2})} \\ \times \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle_{i,j+\frac{1}{2}}^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t v^{(k+\frac{1}{2})} \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle_{i,j+\frac{1}{2}}^{(k+\frac{1}{2})} \\ - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} g \zeta_y^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t g v^{(k+\frac{1}{2})} \\ \times \frac{\sqrt{(\bar{u}^{(k+\frac{1}{2})})^2 + (v^{(k+\frac{1}{2})})^2}}{(\bar{h}^x + \bar{\zeta}^x)^2} \quad (22)$$

式(10)より, 点 (i, j) において,

$$\zeta^{(k+1)} = \zeta^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}^y + \bar{\zeta}^y)^2] u^{(k+\frac{1}{2})} \\ - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}^x + \bar{\zeta}^x)^2] v^{(k+\frac{1}{2})} \quad (23)$$

式(11)より, 点 $(i+\frac{1}{2}, j)$ において

$$u^{(k+1)} = u^{(k+\frac{1}{2})} + \frac{1}{2} \Delta t f \bar{v}^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t u^{(k+\frac{1}{2})} \\ \times \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle_{i+\frac{1}{2},j}^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t \bar{v}^{(k+\frac{1}{2})} \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle_{i+\frac{1}{2},j}^{(k+\frac{1}{2})} \\ - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} g \zeta_x^{(k+\frac{1}{2})} - \frac{1}{2} \Delta t g u^{(k+\frac{1}{2})} \\ \times \frac{\sqrt{(u^{(k+\frac{1}{2})})^2 + (\bar{v}^{(k+\frac{1}{2})})^2}}{(\bar{h}^y + \bar{\zeta}^y)^2} \quad (24)$$

が得られる。

ここに,

$$\left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{1}{2\Delta S} (u_{i+\frac{1}{2},j} - u_{i-\frac{1}{2},j}) \\ \left\langle \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{1}{2\Delta S} (u_{i+\frac{1}{2},j+1} - u_{i+\frac{1}{2},j-1}) \\ \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} \right\rangle_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2\Delta S} (v_{i,j+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2}}) \\ \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle_{i,j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2\Delta S} (v_{i,j+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2}})$$

であり, u, v, ζ など変数の添字および記号は, 代表変数を F として, つぎのような意味を有している。

すなわち,

$$F_{i,j}^{(k)} \equiv F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta t) \\ \Delta x = \Delta y = \Delta S \\ i = 0, \pm \frac{1}{2}, \pm 1, \pm \frac{3}{2}, \dots \\ j = 0, \pm \frac{1}{2}, \pm 1, \pm \frac{3}{2}, \dots \\ k = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$$

$$\bar{F}_{i+\frac{1}{2},j}^{(k)} \equiv \frac{1}{2} (F_{i,j} + F_{i+\frac{1}{2},j})$$

$$\bar{F}_{i,j+\frac{1}{2}}^{(k)} \equiv \frac{1}{2} (F_{i,j} + F_{i,j+\frac{1}{2}})$$

$$F_x \equiv F_{i,j} - F_{i-1,j} \quad \text{at}(i-\frac{1}{2}, j)$$

$$F_y \equiv F_{i,j} - F_{i,j-1} \quad \text{at}(i, j-\frac{1}{2})$$

$$\bar{F}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{(k)} \equiv \frac{1}{4} (F_{i,j} + F_{i,j+\frac{1}{2}} + F_{i+\frac{1}{2},j} + F_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}})$$

などである。

上式(19)~(24)を変形するとつぎの一般式が得られる。

前半のタイムステップに対して, 式(19), (20)より,

$$\zeta_{i,j}^{(k+\frac{1}{2})} = -P_{i,j} u_{i+\frac{1}{2},j}^{(k+\frac{1}{2})} + Q_{i,j} \quad (25)$$

$$u_{i-(1/2),j}^{(k+1/2)} = -R_{i-1,j} r_{i,j}^{(k+1/2)} + S_{i-1,j} \quad (26)$$

ここに、

$$P_{i,j} = \frac{r_{i+(1/2),j}}{1+r_{i-(1/2),j} R_{i-1,j}} \quad (27)$$

$$Q_{i,j} = \frac{A_{i,j}^{(k)} + r_{i-(1/2),j} S_{i-1,j}}{1+r_{i-(1/2),j} R_{i-1,j}} \quad (28)$$

$$R_{i,j} = \frac{r_{i+1,j}}{r'_{i+(1/2),j} + r_{i,j} P_{i,j}} \quad (29)$$

$$S_{i,j} = \frac{B_{i+(1/2),j}^{(k)} + r_{i,j} Q_{i,j}}{r'_{i+(1/2),j} + r_{i,j} P_{i,j}} \quad (30)$$

$$A_{i,j}^{(k)} = \zeta_{i,j}^{(k)} - \frac{1}{2} \frac{Dt}{\Delta S} [(\bar{h}^x + \bar{\zeta}^x) v]_v^{(k)} \quad (31)$$

$$B_{i+(1/2),j}^{(k)} = u_{i+(1/2),j}^{(k)} + \frac{1}{2} Dt \left[f \bar{v}^{(k)} - \bar{v}^{(k)} \right] \times \frac{1}{2\Delta S} (u_{i+(1/2),j+1}^{(k)} - u_{i+(1/2),j-1}^{(k)}) - g u_{i+(1/2),j}^{(k)} \frac{\sqrt{(u_{i+(1/2),j}^{(k)})^2 + (\bar{v}^{(k)})^2}}{(\bar{h}^y + \bar{\zeta}^y)(\bar{C}^2)^2} \quad (32)$$

$$r_{i,j} = \frac{1}{2} \frac{Dt}{\Delta S} g \quad (33)$$

$$r_{i-(1/2),j} = \frac{1}{2} \frac{Dt}{\Delta S} [\bar{h}^y + \bar{\zeta}^y]_{i-(1/2),j} \quad (34)$$

$$r_{i+(1/2),j} = \frac{1}{2} \frac{Dt}{\Delta S} [\bar{h}^y + \bar{\zeta}^y]_{i+(1/2),j} \quad (35)$$

$$r'_{i+(1/2),j} = 1 + \frac{Dt}{4\Delta S} (u_{i+(1/2),j}^{(k)} - u_{i-(1/2),j}^{(k)}) \quad (36)$$

が得られる。すなわち、まず第 j 列上 (x 軸に平行) で、式27~30を用いて $P_{i,j}, Q_{i,j}, R_{i,j}, S_{i,j}$ を i が増加する方向に求めておき、つぎに、式29, 30を交互に使用することにより u, ζ を i の減少する方向に求める。このようにして全列の計算を行った後、新しく得られた u, ζ を式26に代入することにより v を求める。

後半の時間ステップに対しても以上の場合と全く同様の手順を経て一般式を導くことができる。

3. 境界その他の条件の取扱い

境界の影響を受けない中央海域の格子点での計算は2.の一般式26~30等によって計算するが、この種の数値計算は有限領域を取扱わざるを得ないため、外境界は必ず陸地又は外海と接している。さらに領域内においても、防波堤などの線境界、河川流入その他の境界での複雑な条件が加わる。数値計算が難しいのは、このような境界の取扱いの煩雑さが一因している。そこで以下においては、開境界 (外海) と閉境界 (陸地)、線境界 (防波堤等)、縮小断面、水平混合項、および流速制御などの取扱いについて頂を追って述べる。

3.1 開境界と閉境界

(1) 左端又は右端の境界

前半の時間ステップで一般式26~30により x 軸方向に u, ζ を計算する場合、左端又は右端が開境界 (外側が外海と接している) か、閉境界 (外側が陸地と接している) かによって表-1に示す4組のパターンができる。これらの個々の場合の取扱いは前報告¹⁾の付録において詳述しているのでその結果のみを同表右欄に示す。

(2) 上または下が陸地の場合 (x 軸方向について)

x 軸方向に u をインプリシットで計算する前半の時間ステップ、および v をインプリシットで計算する後半の時間ステップにおいて、たとえば図-4のように第 j 列の上側が陸地になっている場合を考える。

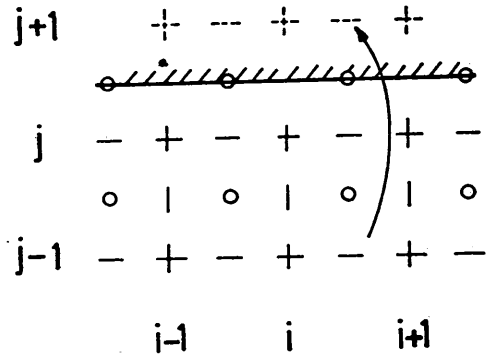


図-4 上側閉境界 (x 軸方向計算において)

まず点 $(i+(1/2), j)$ の運動方程式29において、右辺第4項の $\langle \partial u^{(k)} / \partial y \rangle_{i+(1/2),j}$ で $u_{i+(1/2),j+1}^{(k)}$ が必要である。ところが、 $u_{i+(1/2),j+1}^{(k)}$ は常に0になっているためこのままの値を用いることができない。したがってこの場合は、 $u_{i+(1/2),j+1}^{(k)}$ に代って、点 $(i+(1/2), j+1)$ の点 $(i+(1/2), j)$ に関する点対称の $u_{i+(1/2),j-1}^{(k)}$ を一時的に用いる。すなわち、このような境界での y 方向の移流項を0とする。図-4とは逆、すなわち、 $j-1$ 列が陸地になっている場合も同様で、この場合の流速 $u_{i+(1/2),j-1}^{(k)}$ に代って一時的に $u_{i+(1/2),j+1}^{(k)}$ を用いる。なお水位については、たとえば、点 (i, j) における連続方程式28において、右辺第3項で $\zeta_{i,j+1}^{(k)}$ が必要になるが、同項において $v_{i,j+(1/2)}^{(k)} (=0)$ が掛っているため、強いて特別配慮する必要はない。

以上、(1), (2)において x 軸方向のみを述べたが、 y 軸方向についても全く同様の取扱いができる。

3.2 線境界

以上述べた境界の取扱いのみでは、地形や島は1格子を最小単位とする格子群で表わされるので、防波堤のよ

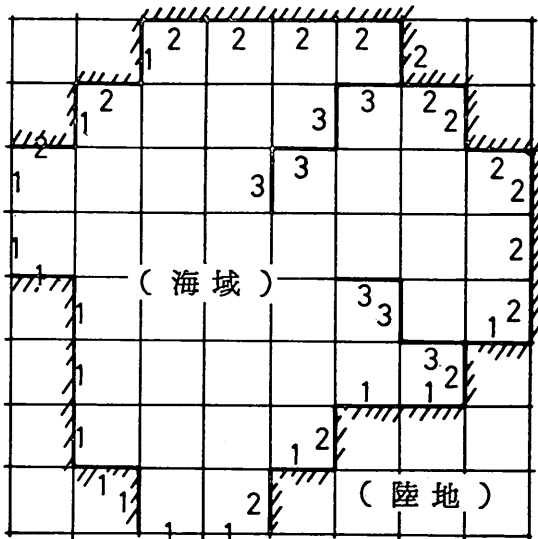
表-1 開境界と閉境界の処置

境	界	の	条	件	境	界	の	処	置	
左端閉境界	$U_{IS-\frac{1}{2},j} (\neq 0)$		$\zeta_{IS,j}$	$\zeta_{IS+1,j}$	$R_{IS-1,j}=0$	$S_{IS-1,j}=0$	(A-1) (A-2)			
左端開境界	$U_{IS-\frac{1}{2},j} (\neq 0)$		$\zeta_{IS,j}$	$\zeta_{IS+1,j}$	$R_{IS-1,j} = \frac{1}{2} \frac{dt}{ds} Q$	$S_{IS-1,j} = B_{IS-1,j}^{(k)} + \frac{1}{2} \frac{dt}{ds} Q_{IS-1,j}^{(k)}$	(A-3) (A-4)			
右端閉境界	$U_{IE+\frac{1}{2},j} (\neq 0)$		$\zeta_{IE-1,j}$	$\zeta_{IE,j}$	特別の処置不要					
右端開境界	$U_{IE+\frac{1}{2},j} (\neq 0)$		$\zeta_{IE-1,j}$	$\zeta_{IE,j}$	$w_{IE+(0),j}^{(k)} = \left\{ u_{IE+(0),j}^{(k)} + \frac{1}{2} dt f \frac{1}{4} (v_{IE,j}^{(k)} + v_{IE+(0),j}^{(k)}) \right.$	$-\frac{1}{2} dt \frac{1}{4} (v_{IE,j}^{(k)} + v_{IE+(0),j}^{(k)}) \frac{1}{2 ds} (u_{IE+(0),j+1}^{(k)} - u_{IE+(0),j-1}^{(k)})$	$-\frac{1}{2} dt g v_{IE+(0),j}^{(k)}$	$\times \frac{\sqrt{(u_{IE+(0),j}^{(k)})^2 + \frac{1}{16} (v_{IE,j}^{(k)} + v_{IE+(0),j}^{(k)})^2}}{16}$	$-\frac{1}{2} \frac{dt}{ds} g \zeta_{IE+1,j}^{(k)} + \frac{1}{2} \frac{dt}{ds} Q_{IE,j}^{(k)} \left/ \left(1 + \frac{1}{2} \frac{dt}{ds} Q_{IE,j}^{(k)} \right) \right.$	(A-5)

うな幅をもたない地形の表現はできない。このため、線分による境界（線境界）の取扱いを取入れる必要がある。

(1) 線境界の表現

線境界は陸地の場合と同様、隣接する左右又は上下の水深点を結ぶ位置で定義する。線境界の存在は、それを横切る流束の有無（すなわち流速が値をもつか0か）によって判定する。なお、陸地との境界においても流束が無いが、線境界の場合の取扱いとは異なるので両者は区別できるようにしておく（図-5）。



- 1 — 始点（陸（開境界）—海）
- 2 — 終点（海—陸（開境界））
- 3 — 線境界

図-5 境界の表現

(2) 線境界の取扱い

線境界を有する格子上で連続方程式、運動方程式の差分を考える場合、線境界背後の流速、水位はそのまま用いることができない。このため、線境界背後の関係する流速、水位値を一時的に零と置いて陸地化し、3.1(2)で述べた要領で計算領域内の値に置換し、その格子点での計算が終れば直ちに元の値に戻すという手法をとる。線境界を有する格子でこの置換に関係する流速、水位点は⊕で印した水位点を中心として周囲の8点である（図-6）。これら8点のうち置換すべきものは、1格子をとり囲む12本の線境界の配置状況により異なる。これらの12本の線境界の配置パターンの全ケース（ $2^{12}=4,096$

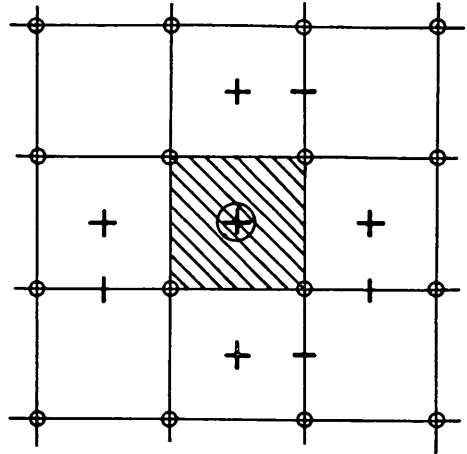


図-6 線境界の場合に置換を要する水位、流速点（⊕を含む格子に関して）

ケース)の中から、線境界背後の値を置換する必要がある場合の線境界の配置のパターンのみを抽出して示したものが図-7である。したがって、まず(1)で表わされた線境界（入力データとして与える）を計算機で認識させ、図-7に示す各パターンに分類させて記憶しておく。線境界を有する格子点に計算がくれば、各パターンに従って所定の値を一時的に零とおき、防波堤背後を陸地扱いにして計算し、その点の計算が終れば置換された点の値を元に戻すという計算過程を通過させるようにする。このようにすることにより、任意の線境界をもつ領域の計算が可能になる。

3.3 縮小断面（防波堤開口部等）

計算領域を格子分割した数値モデルでは、一格子又は格子の一边による線境界が地形表現の最小単位となることは既に述べたところである。したがって、数値誤差や計算機の能力の制約から最適格子間隔があるとすれば、それ以下の地形は1格子（又は格子の一边）に拡大するか又は無視せざるを得ない。広域の大メッシュ計算ではこのような取扱いでも十分であるが、内湾や沿岸部の小域小メッシュ計算では、地形表現の精度が計算結果にもたらす影響が大となる。特に港湾を対象としたものでは、防波堤の延長や開口幅、水路狭さく部等で数百メートル（又は数十メートル、数メートル）単位の伸縮による流動影響の検討を要求されることも稀ではない。このような場合、ただ一つの開口幅のために全域を極端に細かい格子分割にすることは合理的でない。また、防波堤延長工事に伴う流動計算において、その度毎に格子間隔を変えて計算するというのも、格子間隔の相異による

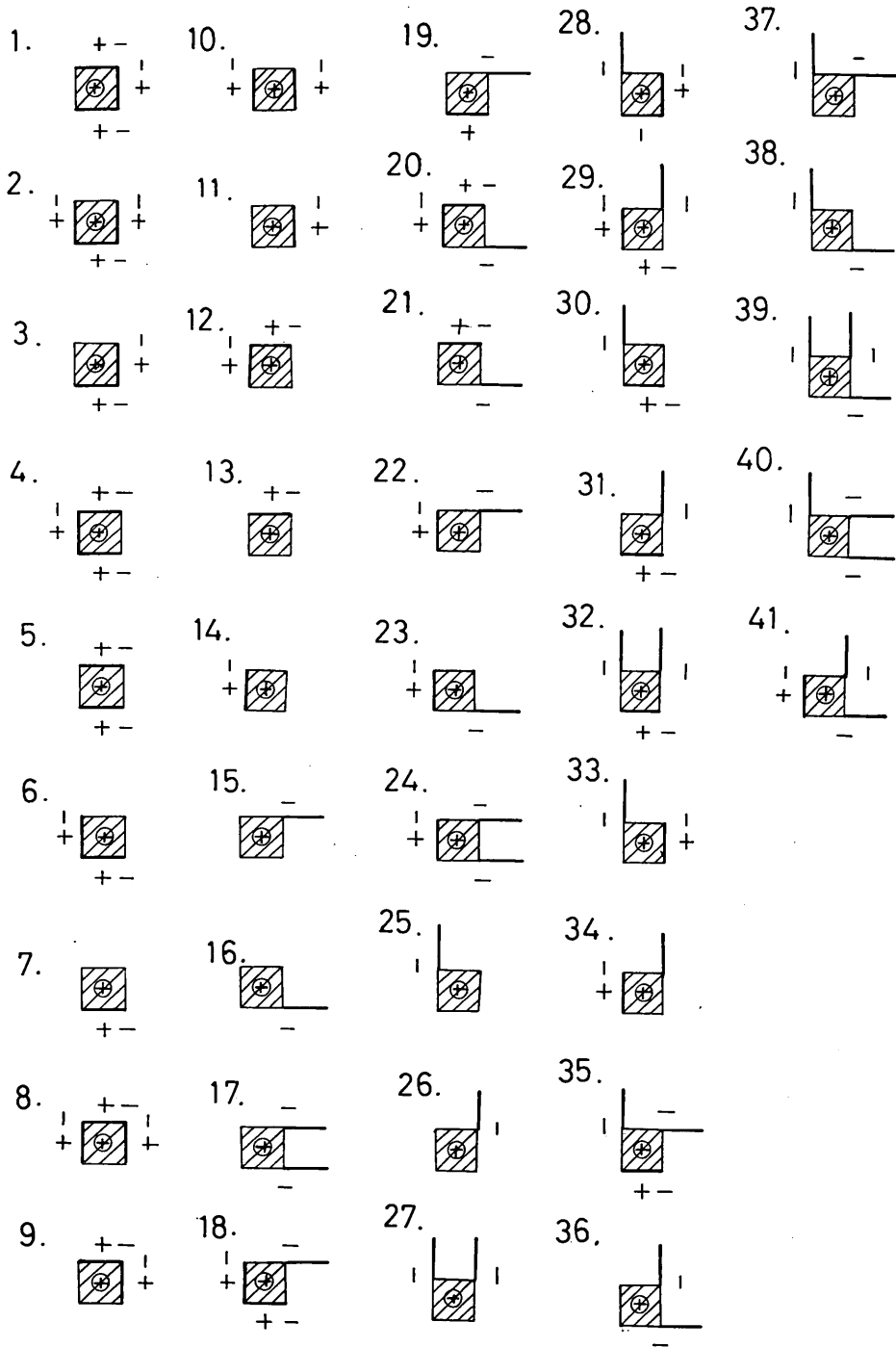


図-7 線境界のパターン (図中、太線は境界線、+、-、|はハッチ部格子点上の計算に際して置換されるべき水位 (ζ), 流速 (u), 同 (v) をそれぞれ表わす。)

流動変化が派生するため適当でない。

このため防波堤開口部に対しては特別の取扱いを考慮する必要がある。

ここでは一つの簡易法として、流体の連続方程式 (式 20) のみを操作し次式のような変形を行う。

$$\begin{aligned} \zeta^{(k+(1/m))} &= \zeta^{(k)} - \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}v + \bar{\zeta}x^{(k)})\lambda_{i+\frac{1}{2}} u_{i+\frac{1}{2}}^{(k+(1/m))}] \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}v + \bar{\zeta}x^{(k)})\lambda_{i-\frac{1}{2}} u_{i-\frac{1}{2}}^{(k+(1/m))}] \\ &- \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}x + \bar{\zeta}v^{(k)})\lambda_{j+\frac{1}{2}} v_{j+\frac{1}{2}}^{(k)}] \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta S} [(\bar{h}x + \bar{\zeta}v^{(k)})\lambda_{j-\frac{1}{2}} v_{j-\frac{1}{2}}^{(k)}] \end{aligned} \quad (37)$$

ただし、 $\lambda_{i-(1/m)}$, $\lambda_{i+(1/m)}$, $\lambda_{j-(1/m)}$, $\lambda_{j+(1/m)}$ はそれぞれ格子 (i, j) の左, 右, 下および上側境界の断面縮小率を表す (図-8)。すなわち 1 格子間隔 (ΔS) に満たない開口部 (幅 b_{open}) に対しては、

$$\lambda = \frac{b_{open}}{\Delta S} \quad (38)$$

を定義し、この部分を通過する断面を縮小する。

連続方程式 (式 23) に対して式 37 と全く同様の操作を行うことはいうまでもない。式 38 は、開口部のほか、透過率と考えることにより透過堤周辺の流動計算にも適用できる。

なお同様の操作は運動方程式 (式 19, 21, 22, 24) についても行うべきであるが、連続方程式の場合容易でないため今後の研究課題としたい。

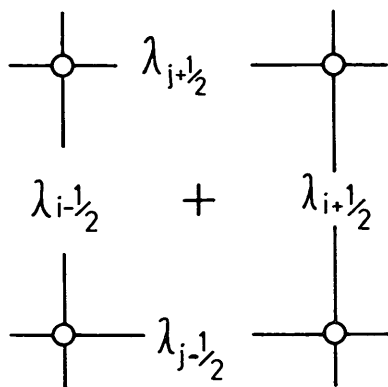


図-8 断面縮小係数

3.4 水平混合項

以上までの取扱いにおいては、式(2), (3)の右辺の水平混合項を省略してきた。この項は流体の運動の状態や規模によって変化する。この運動の規模とは格子間隔のことで数 100~数 1,000 メートルのオーダーである。これ

に対し摩擦項は水深 10~100 メートルの規模の大きさである。このため、水平混合項の粘性係数を摩擦項の粘性係数 ν と区別し A_1 として取扱う⁷⁾。

A_1 の値は現在のところ確定していないが、海流の場合黒潮で $10^6 \sim 10^7 \text{cm}^2/\text{sec}$ といわれている。また考えている現象の 4/3 乗に比例し、その比例係数は 10^{-2} (CGS 単位) 程度であるといわれている⁸⁾。

水平混合項は摩擦項に較べて数オーダー小さい⁷⁾ ため、水平混合項を運動方程式からはずし、これのみを別に計算して差支えない。このことは、水平混合項を含まない式 (式 9), (10) である程度 u, v の計算を進めた後、水平混合項による u, v の減衰をまとめて計算してよいことを意味する。すなわち、一定時間ステップ ΔT (普通 5~20 ステップにとることが多い) 毎につきの計算をする。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = A_1 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (39)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = A_1 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (40)$$

式(39), (40)を差分化して整理すれば、

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{(k+(1/m))} &= (1-4D)u_{i,j}^{(k+(1/m))} + D(u_{i+1,j}^{(k+(1/m))} \\ &+ u_{i-1,j}^{(k+(1/m))} + u_{i,j+1}^{(k+(1/m))} + u_{i,j-1}^{(k+(1/m))}) \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} v_{i,j}^{(k+(1/m))} &= (1-4D)v_{i,j}^{(k+(1/m))} + D(v_{i,j+1}^{(k+(1/m))} \\ &+ v_{i,j-1}^{(k+(1/m))} + v_{i+1,j}^{(k+(1/m))} + v_{i-1,j}^{(k+(1/m))}) \end{aligned} \quad (42)$$

ここに、 $'$ は水平混合項により平滑化された流速を意味する。また、 D は平滑化係数と呼ばれ、

$$D = \frac{A_1 \Delta T}{(\Delta S)^2} \quad (43 a)$$

$$A_1 = \epsilon (\Delta S)^{(1/m)} \quad (43 b)$$

A_1 : 水平渦動粘性係数

ΔT : 水平混合項を計算する時間ステップ

ΔS : 格子間隔

ϵ : 定数

で表わされる。

以上の方式の他、次式で表されるように水平混合項を初めから運動方程式の中に含めておき、摩擦項と同様に取扱うことももちろん可能である。

$$\begin{aligned} \text{(式19右辺に付加)} \\ \text{(する水平混合項)} &= \frac{\Delta t}{2} A_1 \frac{1}{(\Delta S)^2} (u_{i,j}^{(k)} \\ &+ u_{i-(1/m),j}^{(k)} + u_{i+(1/m),j+1}^{(k)} + u_{i+(1/m),j-1}^{(k)} - 4u_{i,j}^{(k)}) \end{aligned} \quad (44 a)$$

$$\begin{aligned} \text{(式21右辺に付加)} \\ \text{(する水平混合項)} &= \frac{\Delta t}{2} A_1 \frac{1}{(\Delta S)^2} (v_{i,j}^{(k+(1/m))} \\ &+ v_{i,j-(1/m)}^{(k+(1/m))} + v_{i+1,j+(1/m)}^{(k+(1/m))} + v_{i-1,j+(1/m)}^{(k+(1/m))} - 4v_{i,j}^{(k+(1/m))}) \end{aligned} \quad (44 b)$$

3.5 水位制御と流速（流量）制御

開境界では境界条件として水位，又は流速（流量）による流動の制御をつぎのような方法で行うことができる。

(1) 水位制御

これまでの潮流計算の大部分は水位制御方式である。この方法は，開境界の水位点において，実測潮位，又はそれを調和分解して得た潮汐調和定数値による規則波を与えるものである。

実測潮位を直接入力する場合は，潮位の一定時間毎のタイムテーブルを作成しておきこれを入力する。

調和定数値による規則波を入力する場合は，平均大潮 (M_2+S_2)，平均潮 (M_2)，小潮 (M_2-S_2) の半日周潮を用いることが多い。

具体的には表-1中の式 (A-4) の $\zeta_{IS-1,j}^{(k+1/2)}$ や，式 (A-5) の $\zeta_{IS-1,j}^{(k+1/2)}$ のところに実測潮位，又は正弦波を与える。

たとえば正弦波の場合式 (A-4) でつぎのように与える。

$$\zeta_{IS-1,j}^{(k+1/2)} = \zeta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n \cdot \frac{\Delta t}{2} - \kappa_0 \frac{\pi}{180}\right) \quad (45)$$

ここに，

$$n=0, 1, 2, \dots$$

T : 潮汐の周期， ζ_0 : 強制点での振幅

κ_0 : 強制点での遅角 (度)， Δt : 時間ステップ

を示す。

(2) 流速（流量）制御

開境界で(1)に示したような水位制御を行っても場合によっては所定の潮流が発生しない。原型で，外海の海流や恒流の影響を受けている場合この傾向が強いようである。このような場合には，水位制御の代りに流速制御を行って海流や恒流の再現をはかるといった方法をとることができる。与える流速（流量）が定常値（時間変化しない）であれば，発生する潮流は定常流となる。また，流速（流量）を正弦波などで与えれば周期流が得られる。開境界が2面以上ある場合，それら間で振幅や位相差を与えれば，流速制御による潮位，潮流の再現が可能である。

具体的には，左端の流速 $u_{IS-1,j}^{(k+1/2)}$ が流速強制点の場合は，表-1，式 (A-1)，(A-2) の代りに，

$$\left. \begin{aligned} S_{IS-1,j} &= u_{IS-1,j} \\ R_{IS-1,j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

として取扱えばよい。

右端の流速 $u_{IE+1,j}^{(k+1/2)}$ が流速強制点の場合には，式(46)

において $u_{IE+1,j}^{(k+1/2)}$ を計算する代りに強制流速を用いられよう。

y 軸方向で下端もしくは上端が流速強制点になる場合も以上と全く同様の手法に依ればよい。

4. 潮流計算に際しての留意点

潮流計算を含むこの種の数値計算では，数値モデルの特徴，差分化に際する連続量から離散量への置換操作，計算機の有効桁数の制限などによる計算の安定性，近似精度，収束性，数値的減衰，発散など，数値計算に付随する基本的な問題点の未解決分野を残している。本節では，このような困難な問題から離れ，潮流計算を実施する場合に留意すべきいくつかの問題点を示し，それらに対する考察または対応策を述べる。

4.1 計算領域と座標軸

(1) 計算領域

計算領域はできるだけ広くとった方が望ましいという要求と，できるだけ狭くとった方が望ましいという相反する要求がある。有限領域で境界値を与えて内部の計算をするのであるから，領域が狭くなればなる程内部の値は直接境界値に支配されることになる。このため与える境界値はそれだけ厳密でなければならない。また，この種の計算では，地形その他の条件変化に伴う流動計算を行うことが多いが，このような場合，領域が小さければ当然境界値も変化するはずである。このような意味では計算領域は大きくとった方がよい。一方，これらの計算を行う電子計算機の性能には限界があるため，領域を小さくし，格子数を減じて演算時間を縮小する必要がある。したがって，領域の決定に当たっては，もちろん地形変化の規模や後述する格子間隔の大小により異なるが，小メッシュ（格子間隔数百メートル）なら5~10km四方，大メッシュ（格子間隔数km）なら50~100km四方位にとって領域の格子総数を数千以内に留めるようにした方が作業を進める上では実用的である。

(2) 座標軸

座標軸の方向を決定するには通常つぎのような点に留意して行う。すなわち，

- (a) x - y 両軸により計算領域を最も有効に（海域外面積を最小にして）包囲できるようにする。
- (b) 現地における検潮所の位置，流況観測点位置などが，計算上の境界に収まり易い方向を選ぶ。
- (c) 海岸線，計画埋立法線，防波堤等の線境界，などの地形，位置がもっとも忠実に表現できる方向を選ぶ。

潮流計算における境界等の取扱い

(d) 開境界が2面以上の場合には、潮流の主流に対する流入出断面の流量が等しくなる方向を選ぶ。

(e) 現地流況より判断し、最も好ましい方向を想定する。

などである。

通常の潮流モデルでは、座標軸にしたがって格子分割すれば、横軸の格子数と縦軸の格子数との積が一つの変数に要する記憶容量となる。一般に一つの格子に流速(u, v)、水位(ζ)、水深(h)等を含み5~15倍の変数を有しているため、計算に必要な記憶容量は、

$$(\text{横格子数}) \times (\text{縦格子数}) \times (5 \sim 15)$$

となる。このため、(a)を考慮して海域外の格子数を最小限に留めるようにする。

(b)に述べたように、既知の境界値位置が計算領域に落とし易いように軸を選ぶことも大切である。

また、(c)に述べたように地形ができるだけ忠実に表現できるように工夫する。このため、あらかじめトレス用紙に所定の格子網を作成しておき、これを地形図上に重ね合わせるにより、最適方向を選ぶとよい。

さらに(d)は、特に海流(恒流)成分の卓越する海域に対して有効なようである。

(a), (b), (c)および(d)は座標軸決定の基本方針であるが、これらの点に注意して計算を行っても所期の流況を得られないことがある。図-9(a)は、大阪湾に対し、 y

軸をほぼ南北に一致させ2km格子で潮流を行った場合の下げ潮最強時の流速を示している。同じ領域に対し、図-9(b)は、 y 軸を東に45°回転して同じ境界条件を与えて計算したときの同潮時(下げ潮最強時付近)の流速を示している。図-9に関する限り、(a), (b)間ではそれ程顕著な差異は認められず、軸方向の決定はそれ程問題でないように見える。ところが、この両座標軸による計算結果を、潮汐残差流(1潮時の平均値)で表わし比較すると図-10(a), (b)のようにその差は歴然となる。同図(a)で湾中央上部の大きな右回りの環流は同図(b)では完全に逆転し、現地観測結果の特性とは大いに状況を異にしている。この差異は潮流データを用いた拡散計算を行えばさらに顕著となる。このような両者の差異はもっぱら軸方向の相異によるものであり、明らかに後者の座標軸の選定が適切でないことを意味している。差分法による計算では両軸方向に平行な流れが若干強調して現われる傾向がある。極端に云えば、最初の座標軸の選定が計算結果の良否の大半を決定するといえる。したがって座標軸の決定に際しては、上述(a), (b), (c), (d)を原則とするが、これらに固執することなく、あくまで所期の流況再現を念頭において行うべきである。

4.2 格子間隔

通常、格子間隔 ΔS は、

(a) 防波堤等の延長、開口幅、海峡幅、水路幅、島、

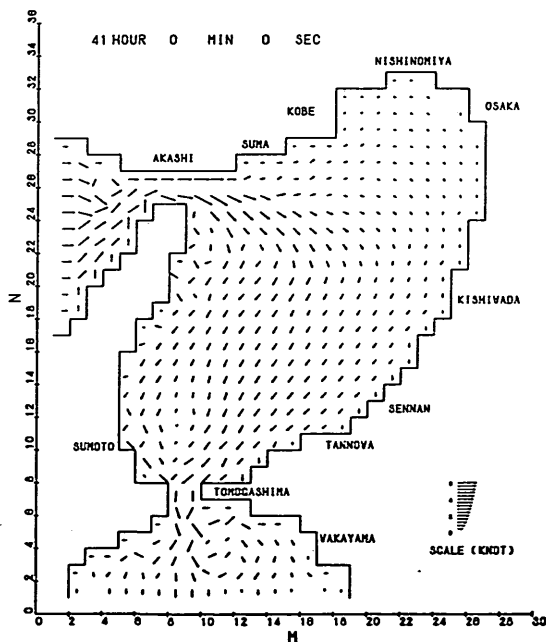


図-9(a) 潮流下げ潮最強時 (y 軸はNS方向)

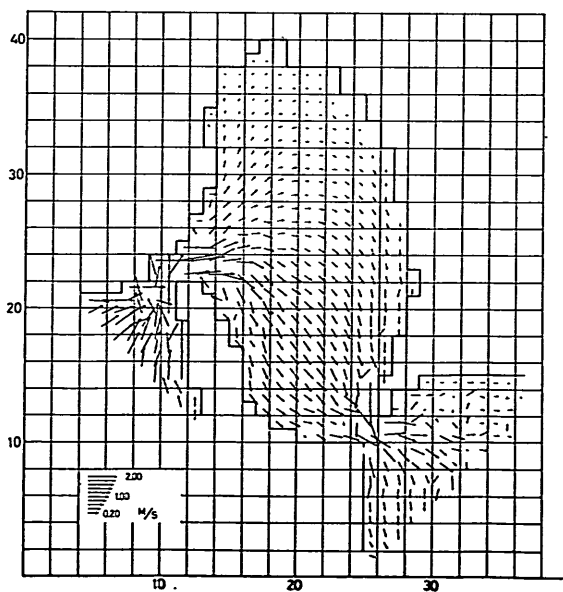


図-9(b) 潮流下げ潮最強時 (y 軸45°E方向に回転)

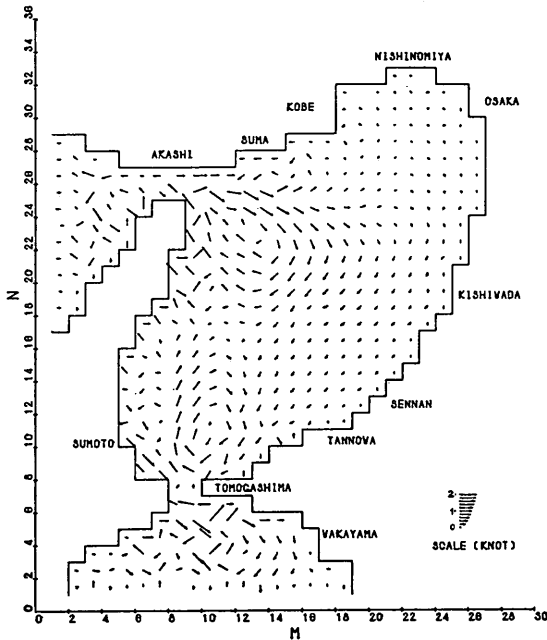


図-10 (a) 潮汐残差流 (y 軸ほぼ NS 方向)

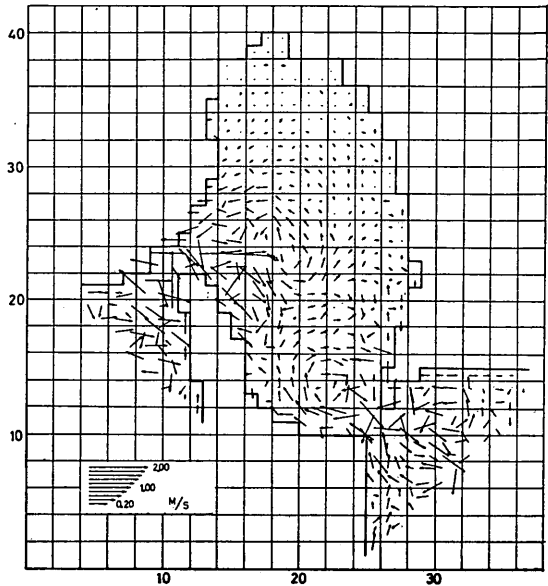


図-10 (b) 潮汐残差流 (y 軸 45°E 方向に回転)

- 地形などの大きさ, および,
 (b) 再現したい渦流の規模,
 などによって, 上限 (最大値) が決り,
 (c) 格子分割による格子総数の制約
 によって, 下限 (最小値) がおさえられる。

潮流の基本方程式を差分化する過程を考えれば, 一見, 格子間隔は小さければ小さい程よいように考えられがちであるが, 格子数が増えて記憶容量が増大するのみならず, 後述のように時間ステップ ($\Delta t/2$) が小さくなって演算回数が増え, さらに繰返し回数の増大による累積誤差が加わって, 現象に無関係な振動を生じたり, 解が不安定になって遂に発散するという現象さえひき起す。このため, 格子間隔 ΔS はできるだけ大きくとった方が計算は容易となる。

一般に, 格子間隔が大きくなれば, 1 格子内での平滑化が進み, 流速の大きいところは小さくなり, さらに, 渦の規模も格子間隔より小さいものは再現されなくなる。図-11 (a) は, 大阪湾の湾中央部に防潮堤を建設した場合の潮汐残差流を格子間隔 1 km の潮流計算によって求めたものを示し, 図-11 (b) は, 同一領域の潮汐残差流を格子間隔 2 km にて求めたものを示している。これらの図から小さい渦の平滑化が認められる。また, 図-12 は上記計算において代表 3 点 (明石海峡, 防潮堤開口部 および 防潮堤内中央部) における潮流ホドグラフ

(実線は 1 km 格子, 破線は 2 km 格子を示す) を示したものである。この図によれば, 2 km 格子になると, 流速は湾奥では 1/2, 防潮堤で 2/3 程度に低下することが認められる。

もっとも, 上述の結果は, 格子間隔の相異のみでなく, 後述するように時間ステップ ($\Delta t/2$) も 2 km 格子では 90 秒, 1 km 格子では 45 秒と異にしているため, 時間ステップの相異による変化が含まれている点にも留意しておく必要がある。

解の収束性や次に述べる演算所要時間などからすれば, 小メッシュモデルでは $\Delta S \geq 100$ メートル, 大メッシュモデルでは数キロメートル程度とするのが適当なようである。

4.3 時間ステップ

時間ステップ ($\Delta t/2$) は, 計算の安定性, 収束性を支配するものである。ADI 法では, リープ・フログ法の場合のような厳しい安定条件はなく, かなり緩い条件 (すなわち時間ステップを大きくとる) でも収束解が得られる。

いま, ADI 法における安定条件を, リープ・フログ法に準じて,

$$\frac{\Delta t}{2} < \frac{\alpha \Delta S}{\sqrt{gh_{\max}}} \quad (47)$$

ここに,

潮流計算における境界等の取扱い

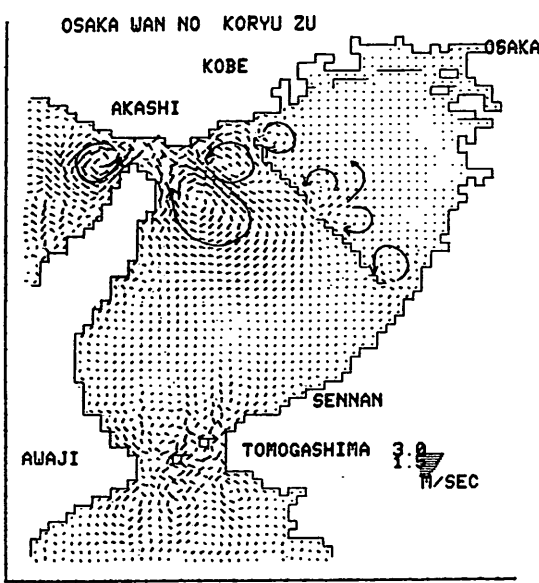


図-11 (a) 潮汐残差流 (格子間隔 $\Delta S=1\text{km}$)

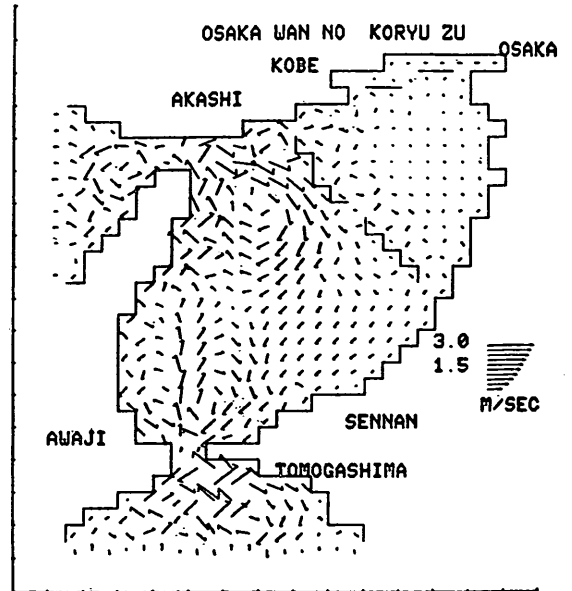


図-11 (b) 潮汐残差流 (格子間隔 $\Delta S=2\text{km}$)

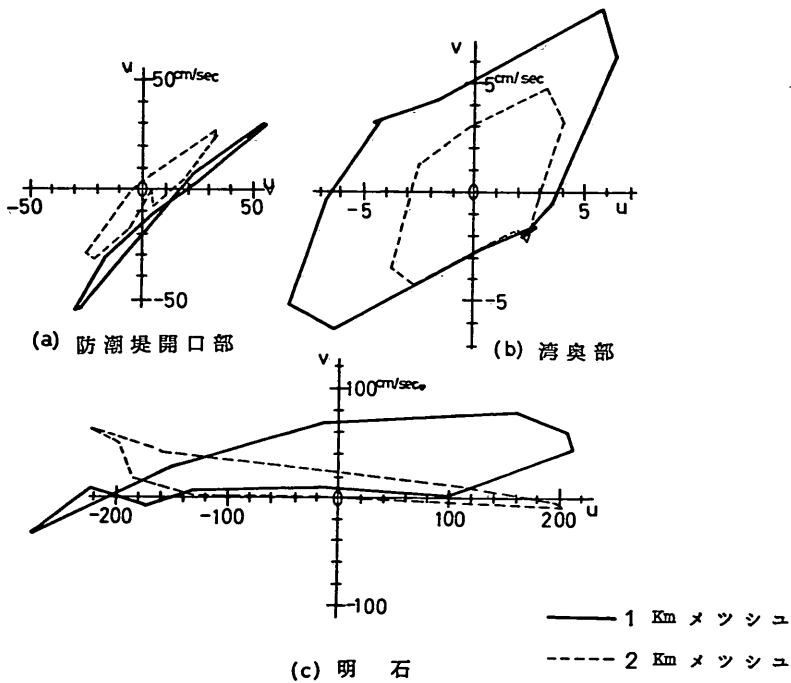


図-12 代表点における潮流ホドグラフ

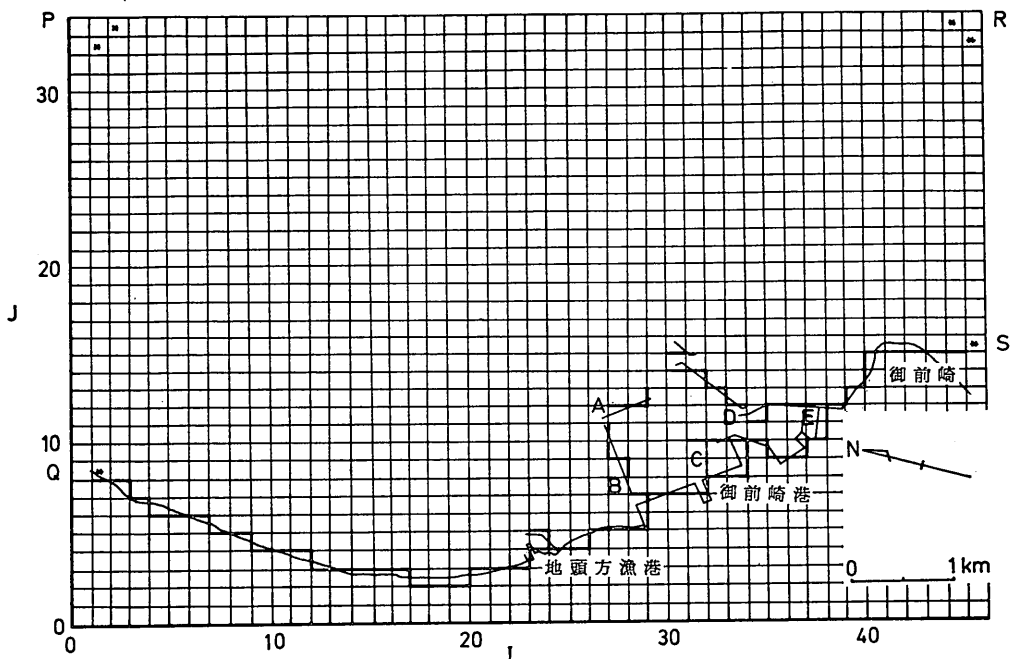


図-13 御前崎港計算領域

表-2 断面縮小率

縮小断面	縮小断面位置	縮小率(λ)
A	(27, 12) と (27, 11) を結ぶ断面	60m (開口幅)/200m = 0.30
B	(28, 8) と (28, 7) を結ぶ断面	55m (開口幅)/200m \times 0.30 = 0.08
C	(32, 10) と (32, 3) を結ぶ断面	$\frac{\text{透過率}}{0.30} = 0.30$
D	(34, 12) と (34, 11) を結ぶ断面	60m (開口幅)/200m = 0.30
E	(38, 11) と (37, 11) を結ぶ断面	80m (開口幅)/200m = 0.40

α : 定数, h_{\max} : 計算領域での最大水深
と表わせば, 定数 α は, 前報告¹⁾でも検討したとおり,
1~3程度とするのが適当なようである。

4.4 縮小断面

3.3 で述べた防波堤開口部又は透過堤の取扱い法として御前崎港を例に 2, 3 検討してみる。

図-13 は 御前崎港を中心とし東西約 7km, 南北約 9 km の海域を 200m メッシュに分割して, 海岸線や防波堤位置を線分にて表示したものである。図中の A, B, C, D および E で示す部分は, 表-2 に表わされるような断面縮小率 λ (式(38)) を有する防波堤開口部又は透過堤である。たとえば断面 B における断面縮小率 λ は, 開口幅 $b_{\text{open}}=55\text{m}$, 格子間隔 $\Delta S=200\text{m}$, および開口部の透

過堤の透過率 30% より,

$$\lambda = \frac{55}{200} \times 0.30 \approx 0.08$$

といった具合である。このようにして求めた断面 A~E の断面縮小を考慮し, 連続方程式に既述の式(37)などを適用して, 縮小断面付近の連続変化を調べてみた。

図-14(a)~(f) は, 縮小断面を考慮し, 後述する水位制御と流速制御とによる流動計算結果を重ね合わせた合成流から, 各縮小断面における第 4 潮汐時の流速時間変化を表わしたものである。同図中実線は断面縮小(透過率)を考慮した場合の流速変化を示し, 破線は断面縮小や透過率は考慮しない ($\lambda=1.0$) で, 1 格子が完全に開となっている場合の流速変化を示している。断面 A~E

潮流計算における境界等の取扱い

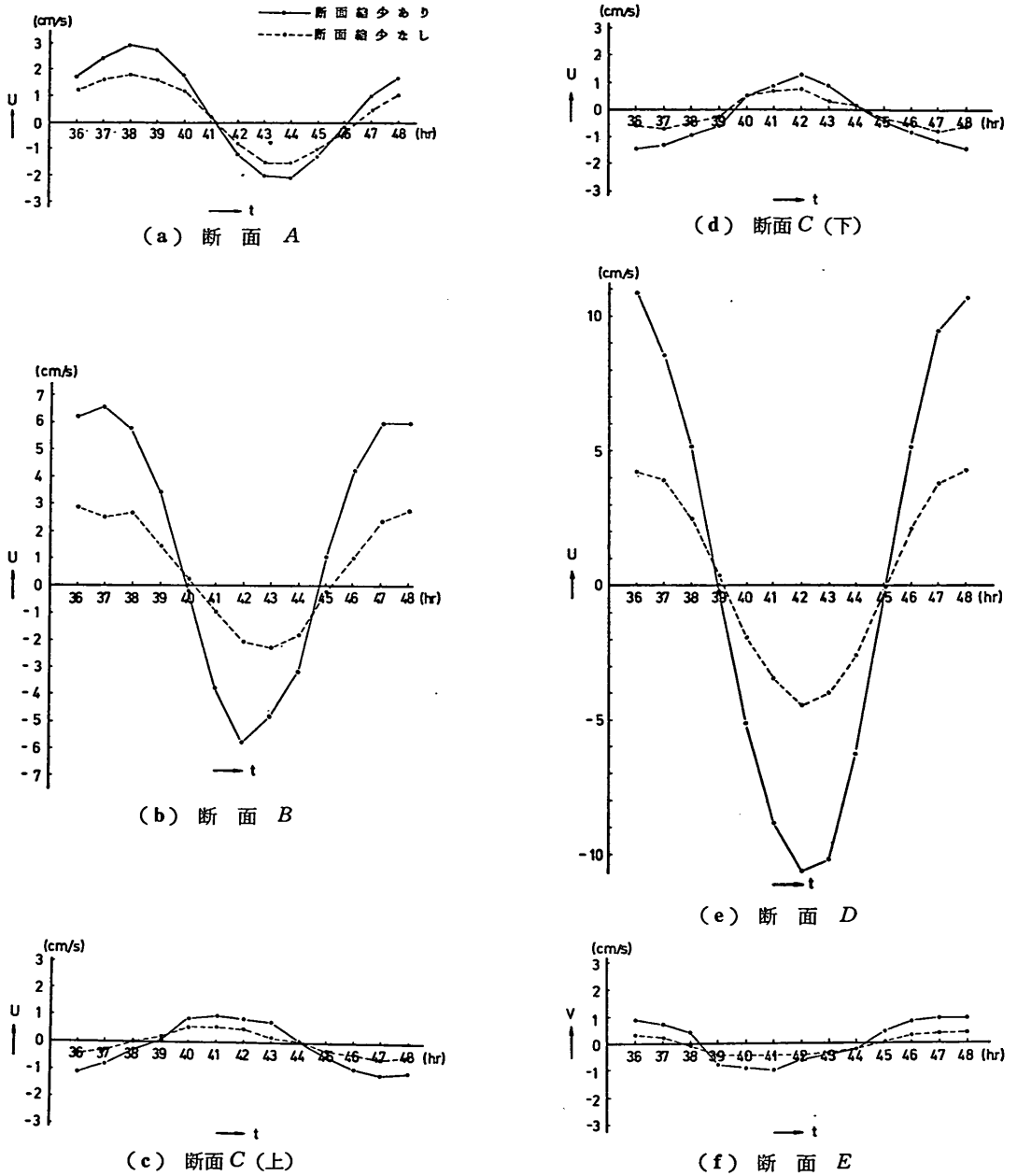


図-14 縮小断面における流速変化

における断面縮小による流速増加はいずれの場合も顕著であり、その増加率は断面によっては2倍を越えるところもある。ところがこれらの流速増加率は必ずしも断面縮小率に逆比例するとは限らず、これらの断面を通過する流量が変化することを意味している。しかし縮小断面により流れに影響を与える範囲は、本計算例のように比

散的弱い流動場(最大流速で0.20m/sec程度)では見きわめ難く2~3メッシュ(すなわち400~600m)位の局部的変化に限られる。

このように御前崎港を対象として、1格子間隔に満たない断面の取扱い法の一例を示したが、本法は数式的取扱い上で多くの問題点を残しており、今後さらに改良し

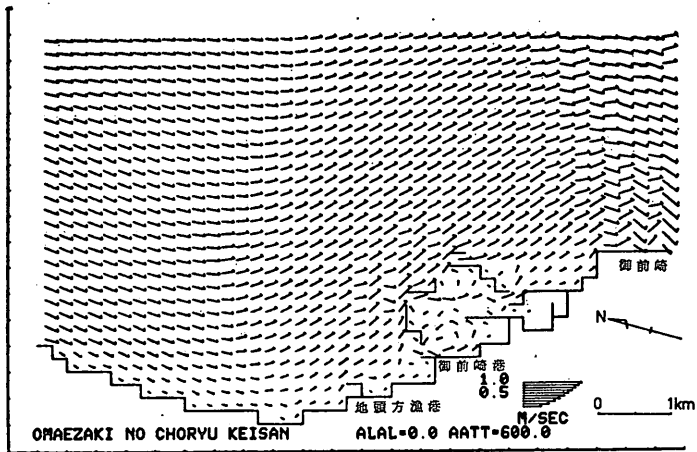


図-15 御前崎港潮流 (水平混合項なし, ケース1)

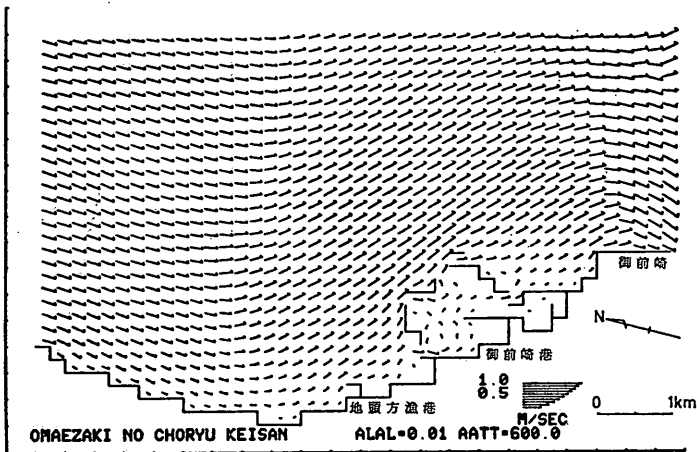


図-16 御前崎港潮流 ($\epsilon=0.01, \Delta T=600$ 秒, ケース2)

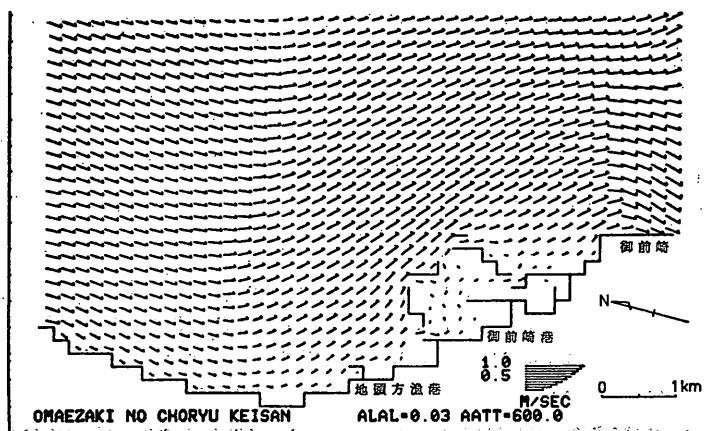


図-17 御前崎港潮流 ($\epsilon=0.03, \Delta T=600$ 秒, ケース3)

潮流計算における境界等の取扱い

表-3 水平混合項の平滑化効果検討のための計算ケース

ケース No.	ϵ	A_t	ΔT	D	$\frac{(1-4D)}{D}$	備 考	図番号
1	—	—	—	—	—	水平混合項考慮せず	図-15
2	0.01	0.5429×10^4	600	0.0081	0.97	水平混合項を考慮する (式(73), (74))	図-16
3	0.03	1.6287×10^4	600	0.0244	0.90	ケース2の ϵ を3倍にする (//)	図-17
4	0.05	2.7144×10^4	600	0.0407	0.84	ケース2の ϵ を5倍にする (//)	図-18
5	0.01	0.5429×10^4	3,000	0.0407	0.84	D の値をケース4と同一に保ったまま, ϵ を1/5, ΔT を5倍にする (//)	図-19
6	0.05	2.7144×10^4	30	—	—	毎ステップ運動方程式中に入れる (式(76))	図-20

(注) $A_t = \epsilon(\Delta S)^{0.11}$, $D = A_t \Delta T / (\Delta S)^2$, $\Delta S = 200(\text{m})$

てゆく必要がある。

4.5 水平混合項

既に述べたように、水平混合項は海底摩擦項に較べて数オーダー小さいため、これを省略して計算しても大メッシュ（格子間隔がkmのオーダー）モデルの場合にはほとんど差支えない。これは水平混合項のもつ平滑化作用が、大メッシュによるメッシュ内の平均化作用で代用されるためと考えられる。ところがメッシュが小さくなるとこのようなメッシュ内の平均化の度合いが小さくなり、水平混合項を考慮する必要が生じてくる。計算過程において境界付近（特に流れの下手側の境界付近）に蛇行流が発生して発散する原因となったり、流動現象とは無関係な振動を生じたりする場合は、この水平混合項の導入によって補正することができる。

図-15は、先の御前崎港の例において、4.6で後述する流速制御による流動計算を水平混合項を考慮せずに行ったものであり、この傾向が明確に認められる。

水平混合項の導入の仕方は、式(41), (42)に表わされるように一定時間(ΔT)毎に平滑化する方法と、式(44)に示されるように、はじめから粘性項を運動方程式に組込んでおき毎ステップ計算してゆく方法とがある。そこで表-3に示すように、水平混合項を考慮しないケース(図-15)を合わせ計6ケースの計算を行って、式(43)の ϵ と ΔT の選定による平滑化効果、および毎ステップ計算の場合の平滑化効果を検討した。

ケース2(図-16)は、 $\epsilon = 0.01$ として式(41), (42)に従い、600秒(10分)毎に平滑化を行ったものである。ケース1(図-15)の水平混合項を考慮しない場合と較べれば明らかなように、同図の南西側境界および御前崎港防波堤北側付近の蛇行流はほとんど消失し整流化されているが、南東部境界付近には依然としてわずかわから蛇行流が残存している。

これに対しケース3(図-17)は、 $\epsilon = 0.03$ とし、600秒毎に平滑化を行ったものである。本ケースでは、ケース2(図-16)の場合にみられた南東部境界付近の蛇行流も消失し、領域全体が滑らかな流動を呈している。この場合、平滑化係数 D は表-3に記されているとおり0.024であり、1つの格子の流速を基準として上下左右4つの格子の流速の約1割が平滑化に関与していることを意味する。

ケース4(図-18)は、 ϵ をさらに大きく $\epsilon = 0.05$ としケース3, 4と同じく600秒毎に平滑化を行ったものである。この場合、平滑化係数 D は0.04となり、囲り4点の流速の約1.5割が平滑化に関与している。平滑化効果は、前ケース3の場合とほとんど変わらないが、南東境界付近の東西成分(図の上下方向成分)がわずかに小さくなり、境界での南北方向成分のみの強制流速と滑らかに接続している。

平滑化係数 D を大きくすればそれだけ流れの平滑化効果が大きくなることは以上のケース2~4によって明らかとなったが、この係数 D を無造作に大きくすることは、力学的意味からいって合理的でない。本ケースに示したように D はせいぜい0.04程度以下とし、平滑化に寄与する囲り4点の流速の比率を1割前後以下にすべきであろう。

ケース5(図-19)は、ケース4と同じ平滑化係数に対し、 ϵ を1/5, ΔT を5倍(すなわち、3,000秒(50分)間隔毎の平滑化)にして計算したものである。この場合、ケース4に比して平滑化の計算が1/5になるため演算時間は若干節約されるとはいえ、南東部において蛇行流が発生しており、平滑化効果は劣る。

ケース2~5は、式(41), (42)により一定時間ステップ(ΔT)毎に平滑化計算を行った場合の効果を調べたのに対し、ケース6(図-20)は、式(44)に示されるように運動

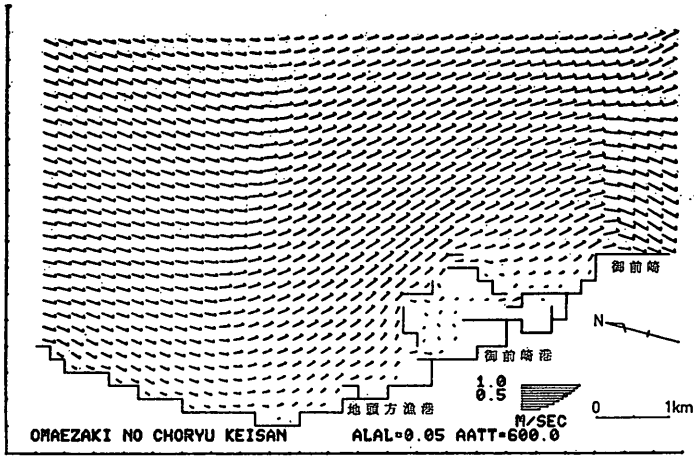


図-18 御前崎港潮流 ($\epsilon=0.05, \Delta T=600$ 秒, ケース 4)

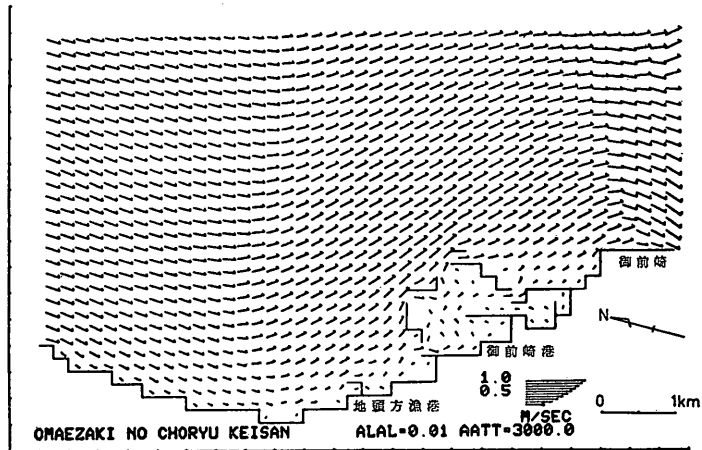


図-19 御前崎港潮流 ($\epsilon=0.01, \Delta T=3,000$ 秒, ケース 5)

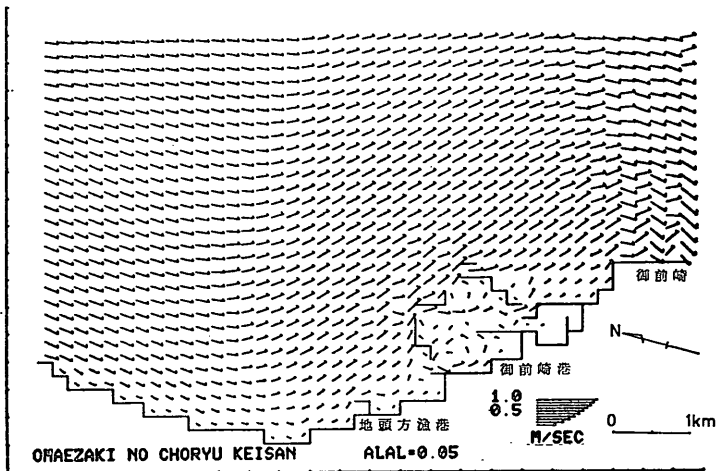


図-20 御前崎港潮流 (水平混合項毎ステップ, ケース 6)

潮流計算における境界等の取扱い

方程式中に水平混合項を付加し毎ステップ計算した結果を示すものである。本計算法は、前2～5ケースに比し、毎ステップ水平混合項を計算するので演算時間がその分だけ多く要する他、平滑化効果も劣り、防波堤前面や下流側境界付近の蛇行流がみられる。

以上の水平混合項に関する計算から、水平混合項による流れの平滑化は式(41)、(42)に依る方が効果が大きて演算時間の上からも有利であることがわかる。さらに、式(43)に示される平滑化係数 D はせいぜい0.04以下とし、 ε は0.03～0.05、 Δt は600秒(10分)程度にして、囲り4点の流速の平滑化に寄与する比率を1割前後以下にすべきであろう。また、平滑化時間ステップ(ΔT)はあまり大きくなると同じ D に対してでも平滑化効果は劣ることがわかる。

計算の過程で発生する蛇行流は、水平混合項の導入によって除去できることを述べたが、平滑化係数を不当に大きくすることは合理的でない。蛇行流の発生原因は、粘性効果のほかに、現実の流動現象からみて不自然な境界での人為的制御に起因することが多いからである。し

たがって、流動の平滑化操作に際しては水平混合項の取扱いと同時に、境界での強制条件の再検討を合わせて行うべきである。

4.6 水位制御と流速制御

潮流計算では、3.5(1)で述べた方法で境界での水位制御により内部の流動計算を行うことが多い。

図-21および図-22は、それぞれ東京湾および伊勢湾の大潮時の潮流計算を湾口よりの水位制御によって計算した結果の下げ潮最強時付近を示すものである。東京湾(図-21)に対しては、2kmメッシュ($\Delta S=2\text{km}$)、タイムステップ($\Delta t/2$)90秒で布良の平均大潮(M_2+S_2)0.519mを与えて計算したものであり、伊勢湾(図-22)に対しては、同じく2kmメッシュ、90秒で赤羽根の平均大潮(M_2+S_2)0.633mを沖側約30kmの下側境界に移動して与え計算したものである。なお、後者においては左右の境界は閉境界とし水位制御は行っていない。これら2つの例では、計算される潮流の流向流速は現地観測結果の傾向をよく再現しており、ほぼ満足できる結果を示している。

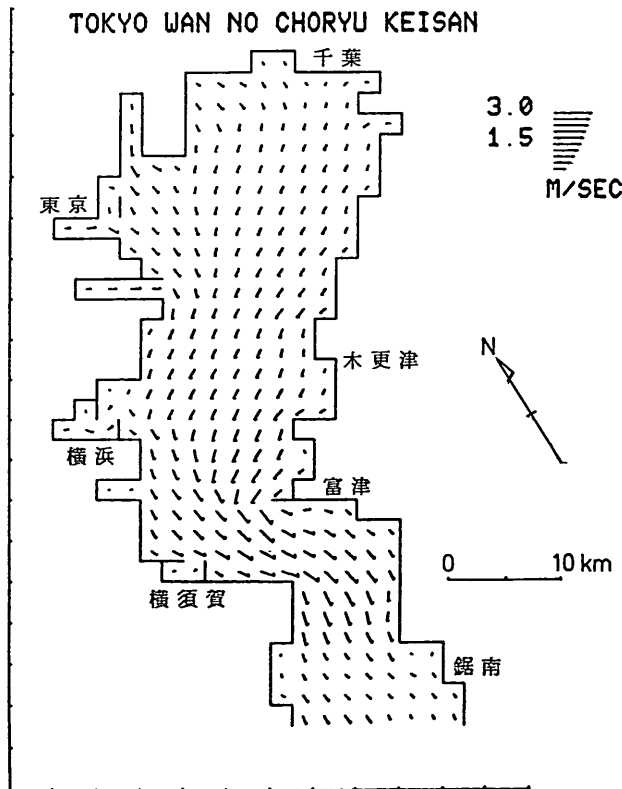


図-21 東京湾潮流(下げ潮最強時、水位制御のみ)

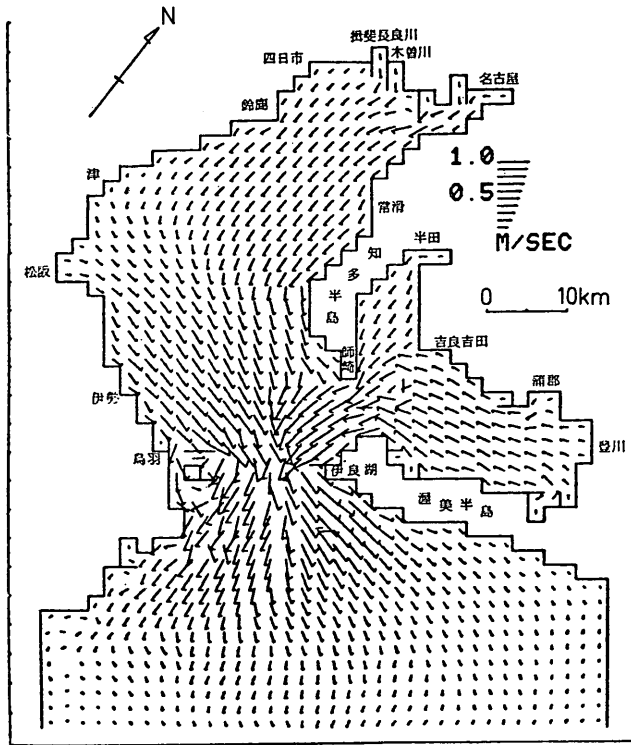


図-22 伊勢湾潮流（下げ潮最強時，水位制御のみ）

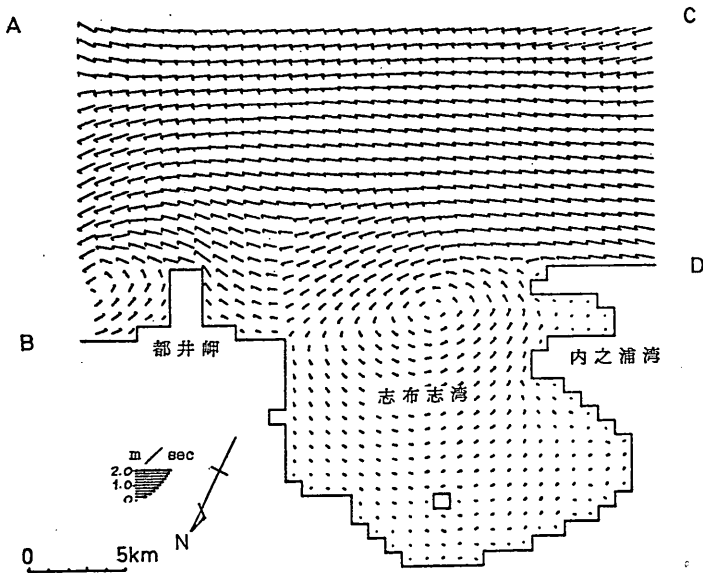


図-23 志布志湾潮流（外海北東流海流約1ノット時，一方向の流速制御のみ）

潮流計算における境界等の取扱い

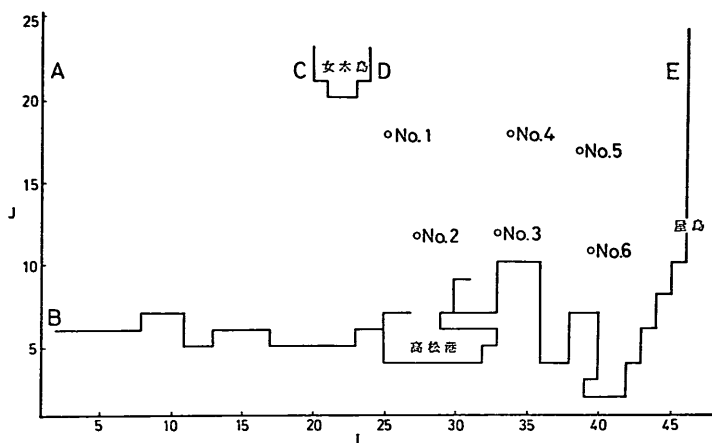


図-24 代表点における流速比較位置

このような水位制御による方法は東京湾、大阪湾、伊勢湾などのような閉塞性内湾で海流の影響をほとんど受けない場合に適合する。

一方、海流や恒流の影響を強く受ける領域の場合、または計算機の性能の制約から十分な計算領域がとれず、したがって地形性に基づく恒流が境界付近で再現できない場合などは、水位制御のみでは所期の流速や流向が再現できない。このような場合には、3.5 (2) で述べたように、開境界で流速（又は流量）を操作して海流や恒流による影響を考慮し領域内の流れを制御した方がよい。

流速による境界値制御には、一定流速を一方方向にのみ与えて計算するいわゆる定常流計算と、潮汐と同様に一定の振幅周期をもつ往復流の計算とが考えられる。前者は海流や恒流が一方方向に卓越する領域の計算に適している。後者は強制流速の振幅、位相を適当に調整することにより、あたかも水位制御の場合と同様な往復流の計算が可能である。

例えば加熱期の志布志湾においては湾内水が大きな左回りの環流となることがある⁹⁾。これは外海を北上する0.4~1.1ノットの黒潮の影響を受けるためと考えられる。このような場合には図-23に示されるように、計算領域として外海のABCDで囲まれた海域まで拡張し、海流を流すことによって湾内潮流を再現するとよい。図-23は、上下の境界に対し、それぞれ

$$AB: u=0.45(\text{m/sec})$$

$$CD: u=0.64(\text{m/sec})$$

の一定流速を与え、 $\Delta t/2=30\text{sec}$ 、 $\Delta S=1\text{km}$ にて計算した20時間後の沈況を示したものである。なお、B点付近

では、都井岬背部における反流域の発生を考慮して、流速を一部で逆向きにしている。

これに対し、図-24に示すような高松港の例では、計算目的の関係上格子間隔を200mと小さくする必要があった。このため計算機能力の制約から計算領域を十分広くとることができない。ところが、同海域は複雑な地形を形成している瀬戸内海の一部海域であるため、地形性の恒流成分が卓越しているものと考えられる。このような場合、計算領域を十分広くとって周辺の地形をできるだけ再現して計算すればともかく、得られる流速は小さく、かつ流向も不規則で流動の再現性は良好でない。そこで、流速制御方式をとり境界AB、ACおよびDEにおいて、

$$AB: u=1.1 \sin\left(\frac{2\pi}{T}n\frac{\Delta t}{2}\right) \quad (\text{m/sec})$$

$$AC: v=0$$

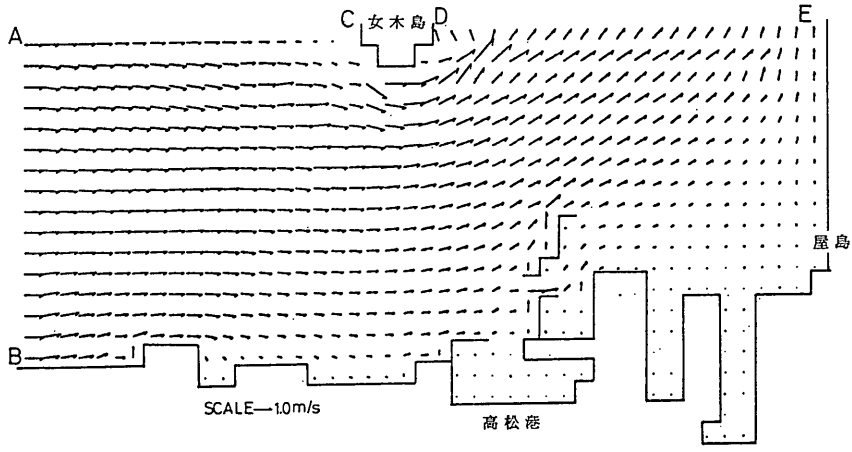
$$DE: v=0.5 \sin\left(\frac{2\pi}{T}n\frac{\Delta t}{2}-4\times\frac{\pi}{180}\right) \quad (\text{m/sec})$$

48

ここに、 T : 潮流の周期 (=12時間)、 $n=0, 1, 2, \dots$ の振動流を与え、 $\Delta t/2=15\text{秒}$ 、 $\Delta S=200\text{m}$ にて計算したものが図-25 (a) (東流最強時)、(b) (憩流時) および (c) (西流最強時付近) である。この例では、水位制御では得られない速い流れ (1.1m/sec程度) が再現されて内部の流向流速はうまく制御され、図-24に示される代表6点での実測値との対応はよい(図-26(a)~(f))。また、潮位振幅0.6611m (高松港検潮所 M_2 潮) の再現性も良好である。

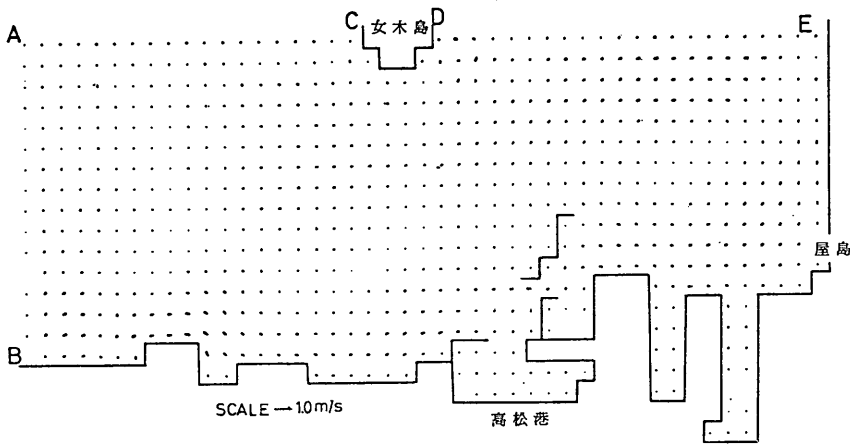
以上の水位制御又は流速制御による計算によっても現地の流動の再現が困難なことがある。例えば前述の御前崎港を中心とする9km×7km程度の海域に対象とした潮流計算を考える。同海域は駿河湾の南西部に位置し、黒潮分岐流の反流のため、湾奥から外海に向う南西流が卓越するといわれている¹⁹⁾。図-27は昭和50年7～9月に観測された現地恒流¹¹⁾を示すもので0.05～0.15m/sec

の南流成分が卓越している。さらに図-28、図-29、図-30の南西流最強時、憩流時、および北東流最強時の図からわかるように、南西流成分の継続時間が長いながらも北西流に転向する半日周潮流成分がみられる。すなわち、本海域においては黒潮分岐流による海流成分と潮汐作用による半日周潮流成分とが同規模の大ききで合成されて一つの海域の流動を形成しているものと考えられる。



0 1km

(a) 東 流 最 強 時

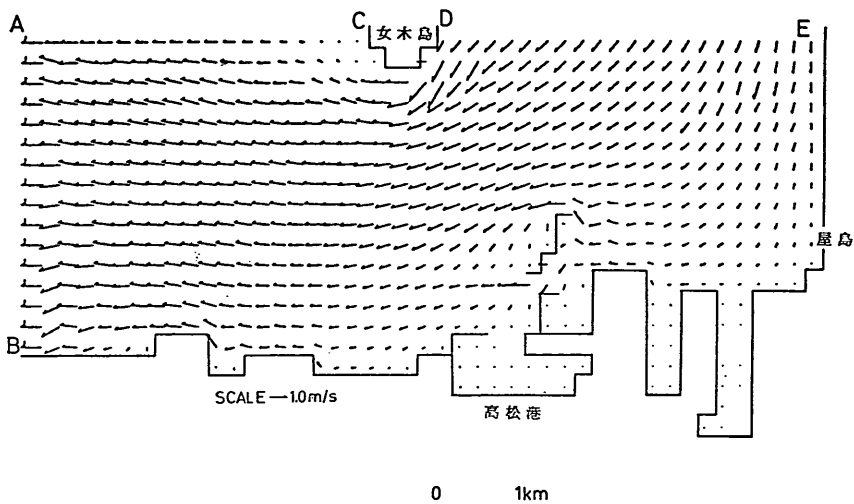


0 1km

(b) 憩 流 時

図-25 高松港潮流 (往復流の流速制御のみ)

潮流計算における境界等の取扱い



(c) 西流最強時
 図-25 高松港潮流 (往復流の流速制御のみ)

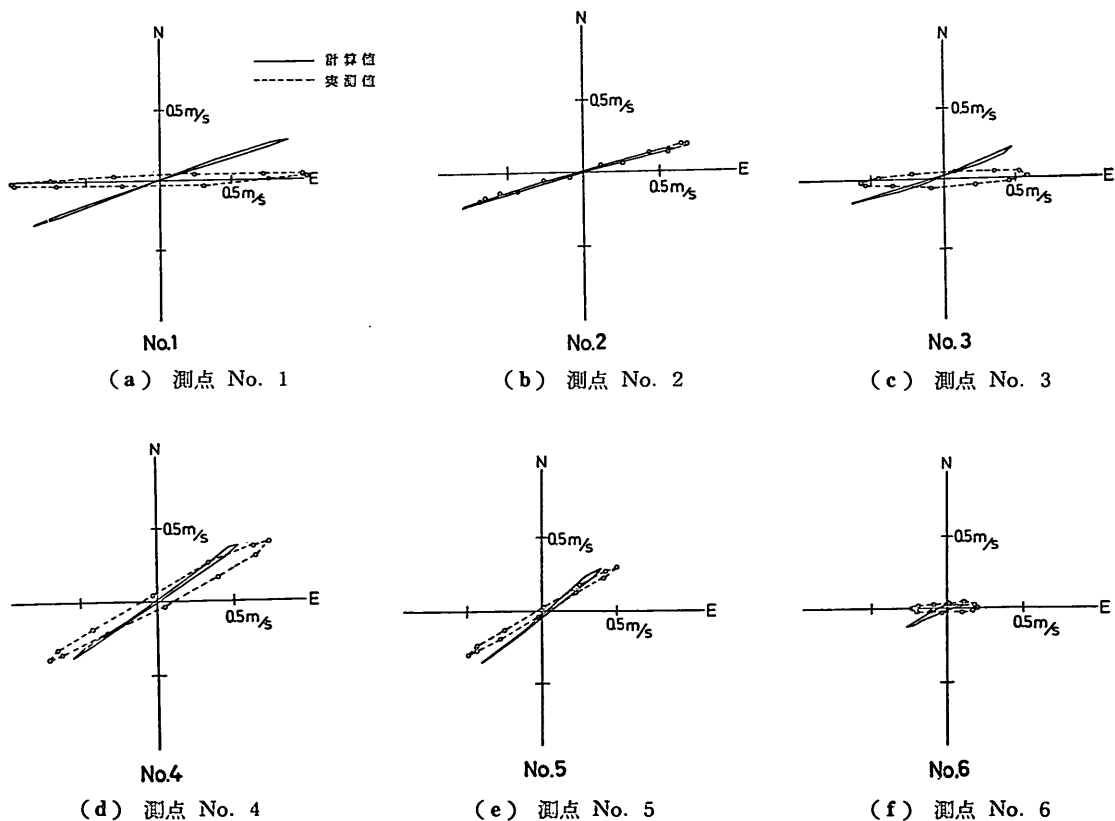


図-26 代表点流速の実測値との比較

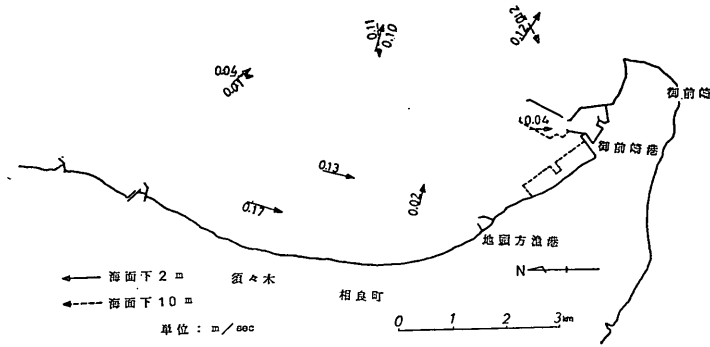


図-27 御前崎恒流¹⁾

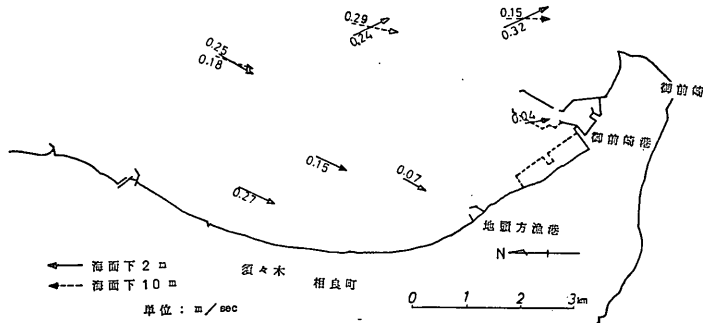


図-28 御前崎港潮流 (観測値, 南西流最強時)

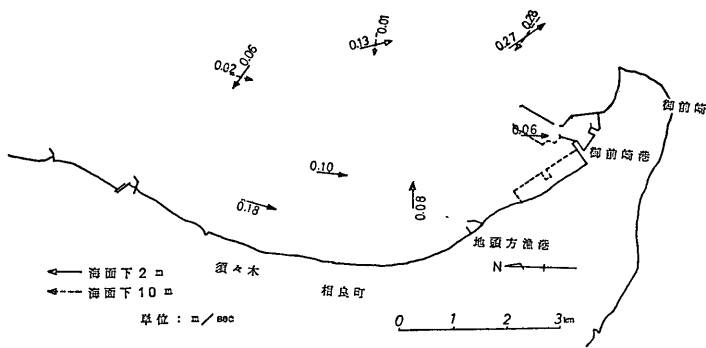


図-29 御前崎港潮流 (観測値, 憩流時)

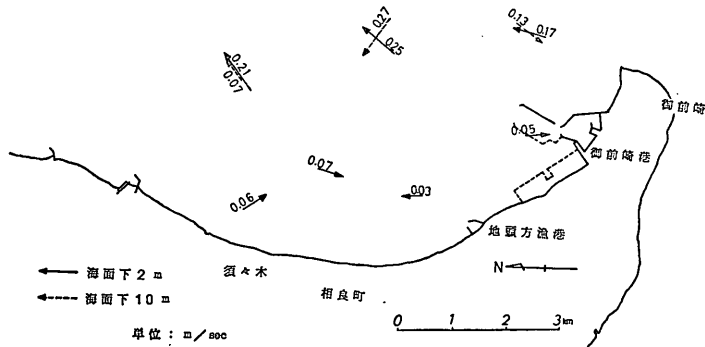


図-30 御前崎港潮流 (観測値, 北東流最強時)

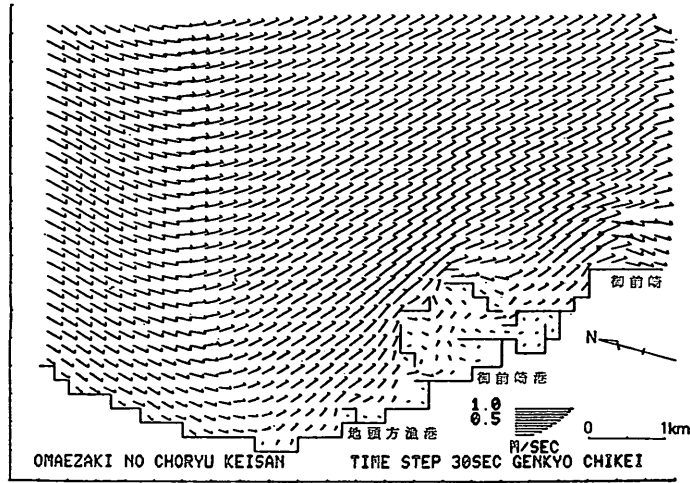


図-31 御前崎港潮流（南西流最強時、水位制御のみ）

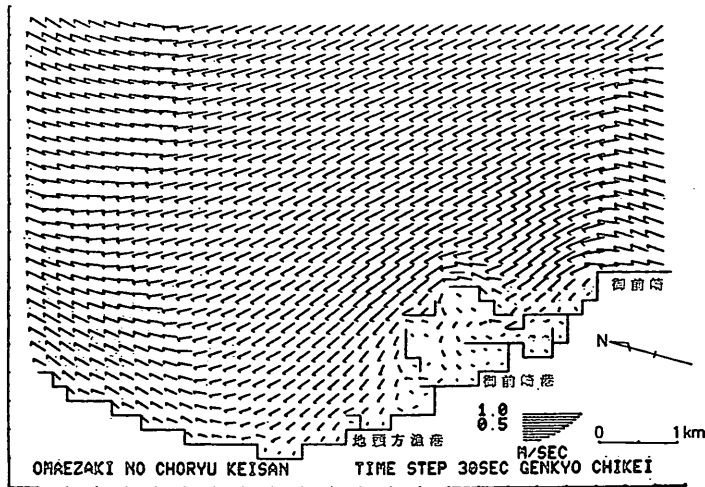


図-32 御前崎港潮流（北東流最強時、水位制御のみ）

いま、御前崎港の現地潮位観測に基づく平均大潮 (M_2+S_2) の振幅 0.607m と遅角 166.8 度をもとにし、図-13に示される開境界の P 、 Q 、 R および S 面において、

$$\left. \begin{aligned} \zeta_P &= 0.607 \sin\left(\frac{2\pi}{T}n\frac{\Delta t}{2} - 166.8 \times \frac{\pi}{180}\right) \text{ (m)} \\ \zeta_Q &= 0.607 \sin\left(\frac{2\pi}{T}n\frac{\Delta t}{2} - 166.8 \times \frac{\pi}{180}\right) \text{ (m)} \\ \zeta_R &= 0.607 \sin\left(\frac{2\pi}{T}n\frac{\Delta t}{2} - 166.8 \times \frac{\pi}{180}\right) \text{ (m)} \\ \zeta_S &= 0.607 \sin\left(\frac{2\pi}{T}n\frac{\Delta t}{2} - 166.8 \times \frac{\pi}{180}\right) \text{ (m)} \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

$$T: 12 \text{ 時間}, n=0, 1, 2, \dots$$

なる水位制御（境界の中間点は比例配分値）による流動計算を $\Delta t/2=30$ 秒、 $\Delta S=200$ m にて行った場合の南西流および北東流最強時付近の流況を示したものが図-31および図-32である。これらの結果によれば、最大流速は 0.1m/sec 程度でやや弱く、南西流、北東流の最強時付近では海岸線に沿う流れが支配的である。ところが1潮汐間の平均流（図-33）でみると、現地観測（図-27）にみられたような南西流の卓越傾向は現われず、計算領域で微弱な反時計回りの渦流が発生しており、この再現性は良好でない。式(49)で表わされる以外の値で強制水位の振幅、遅角を操作してみても水位制御のみによる流動

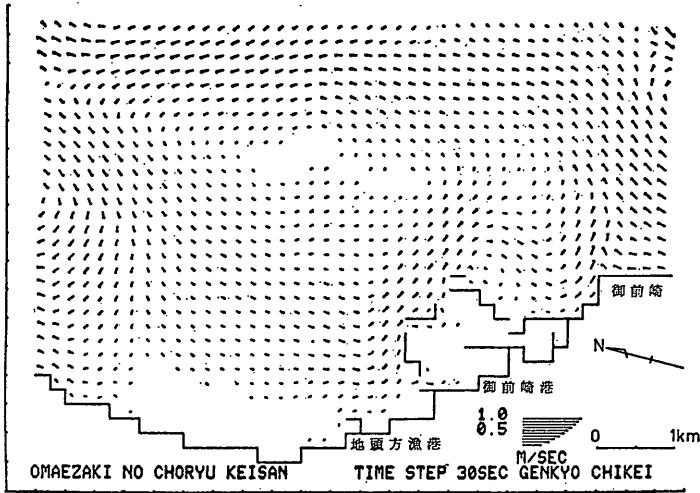


図-33 御前崎港潮汐残差流 (水位制御のみ)

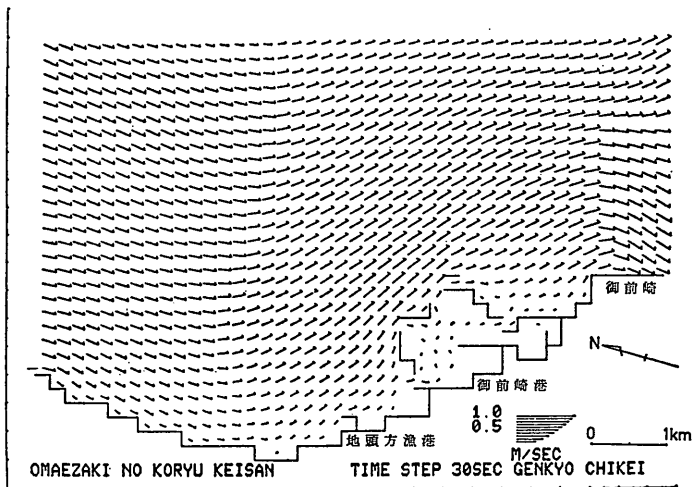


図-34 御前崎港潮流 (流速制御のみ)

計算では恒流の再現性を高めることは容易でない。

一方、志布志湾での例 (図-23) と同様に図-13に示される開境界 PQ , PR および RS において、

$$\left. \begin{aligned} PQ: u=0.05(\text{m/sec}) \\ PR: v=0 \\ RS: u=0.052631(\text{m/sec}) \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

なる流速制御による流動計算を同一の $\Delta t/2$ および ΔS について行い、領域内の流動が十分安定したと思われる19時間後の流況を示したものが図-34である。同図より明らかのように、南西流の支配的な流動パターンが形成され、現況の恒流 (図-27) に近い流向流速を示し、最大流速は 0.08m/sec 程度である。

そこで潮汐による潮流と海流による恒流との再現性を同時に高めるため、水位制御により形成される流動と流速制御により形成される流動とを合成して本海域の流動場を形成することを考える。

一般に、連続流体の運動を表わす運動方程式は、既述の式(2)および(3)のように、非線型であるため、単純に2つの流れに合成することはできないが、領域内の流動が小さく、かつ流動の場所的变化が小さい場合には、運動方程式中の非線型項は小さくなり、運動方程式はほぼ擬似線型とみなし得る。対象海域の流動が擬似線型とみなし得るかどうかについては、さらに詳しく検討する必要があるので、一先ずこのような取扱いについて検討して

潮流計算における境界等の取扱い

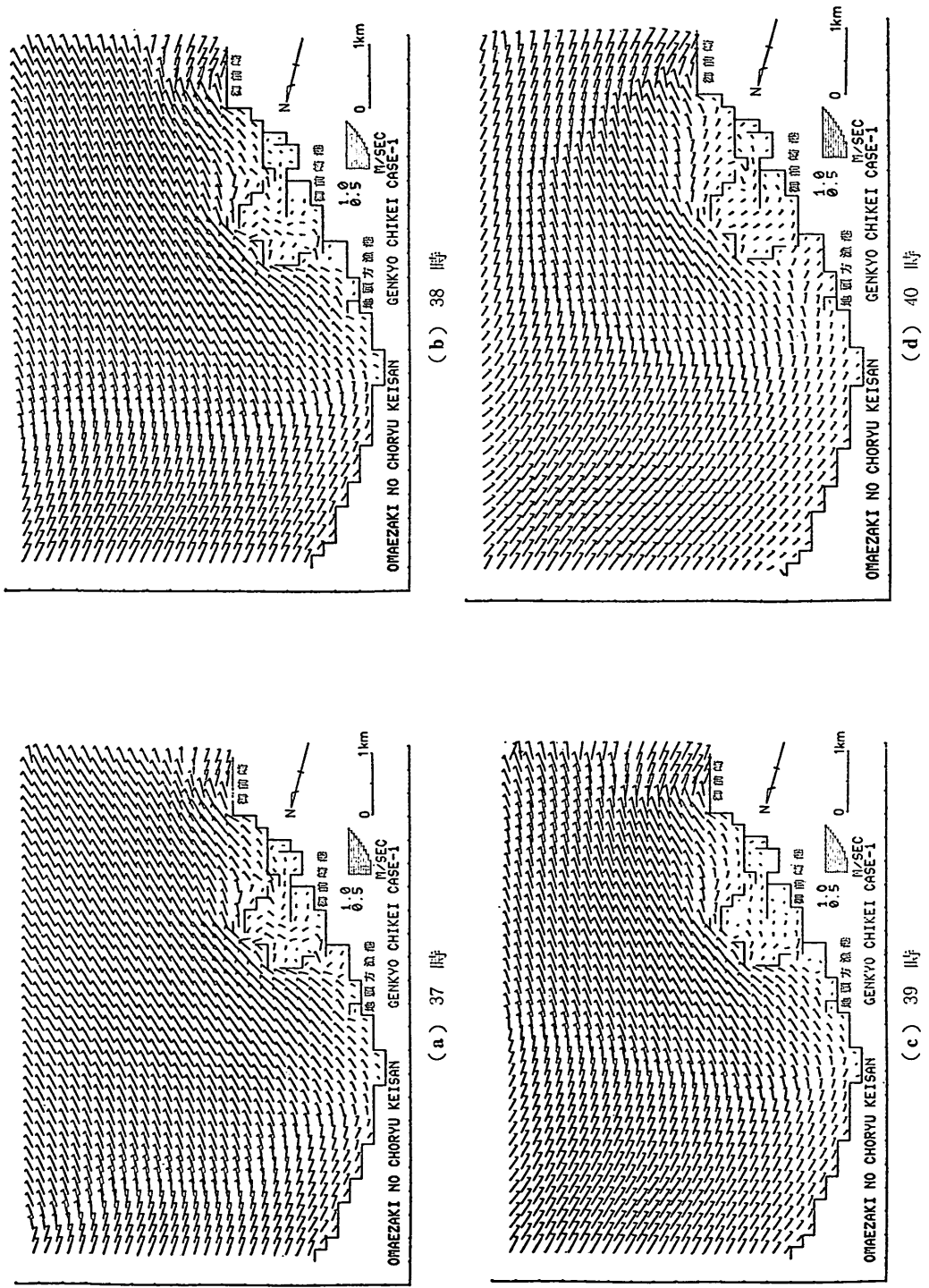
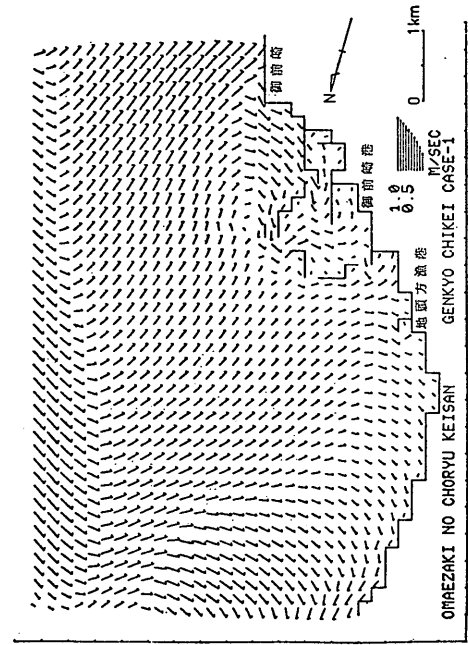
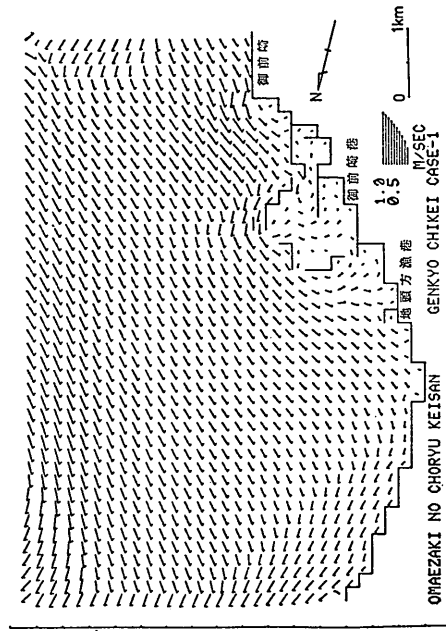


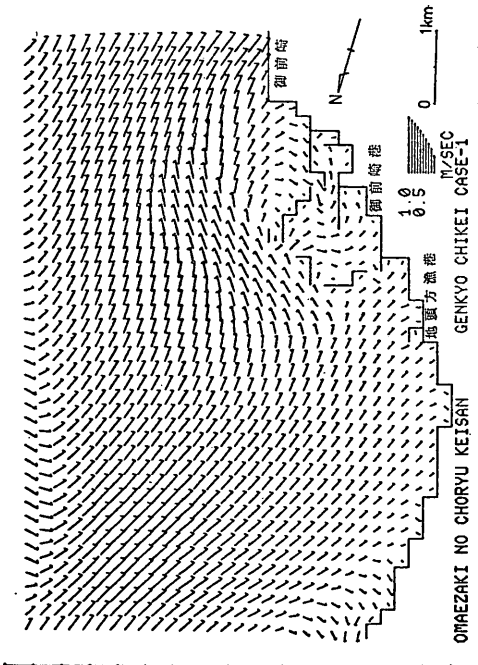
図-35 御前崎港潮流（水位、流速制御の重ね合わせ）



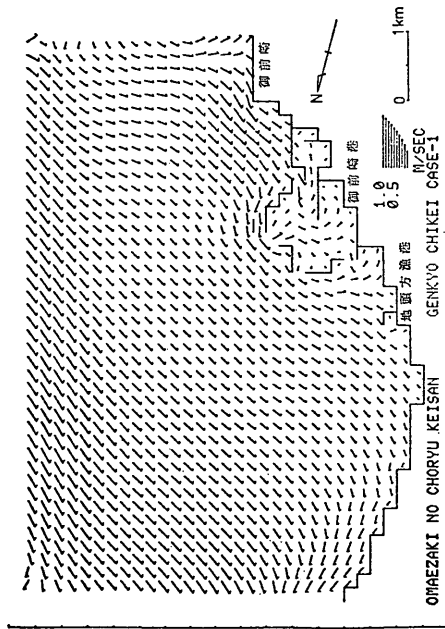
(f) 42 時



(h) 44 時



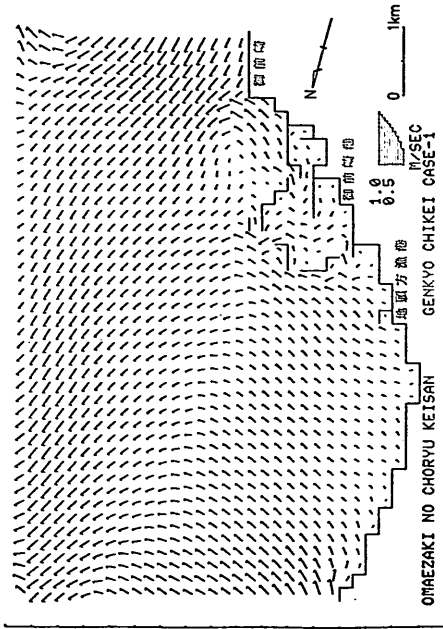
(e) 41 時



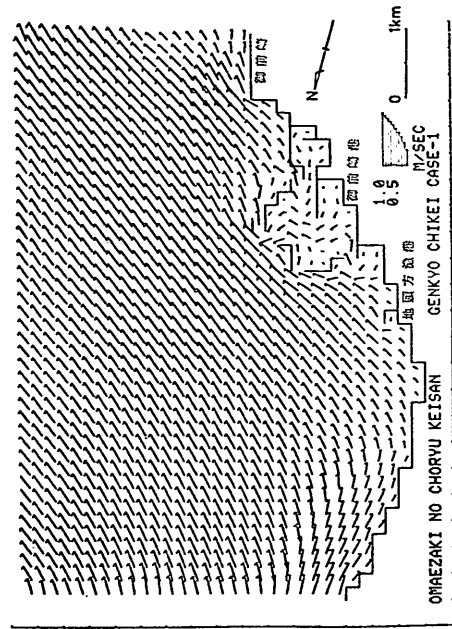
(g) 43 時

図-35 御前崎港潮流（水位，流速制御の重ね合わせ）

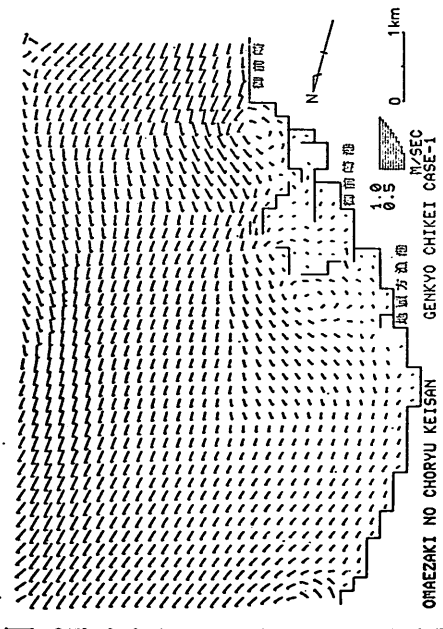
潮流計算における境界等の取扱い



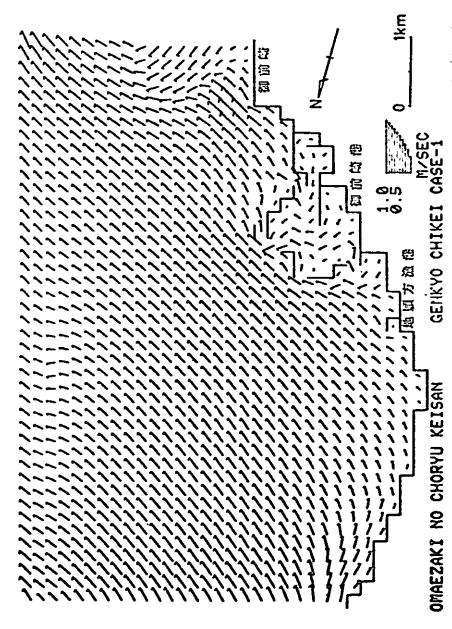
(j) 46 時



(l) 48 時



(i) 45 時



(k) 47 時

図-35 御前崎港潮流（水位、流速制御の重ね合わせ）

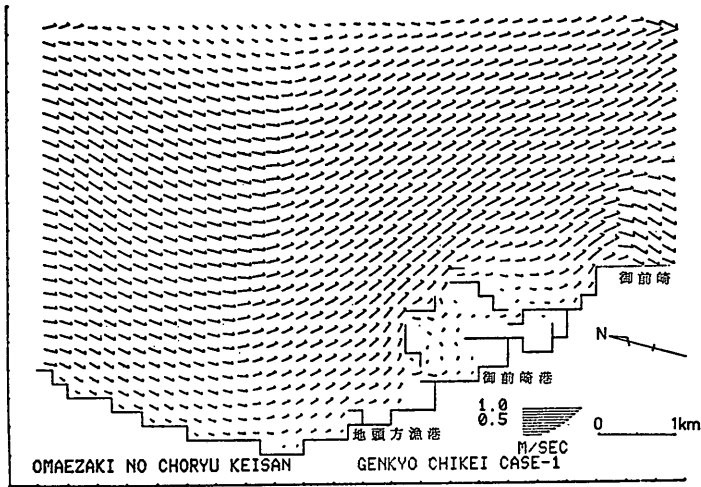


図-36 御前崎平均流（水位、流速制御の重ね合わせ）

みた。

図-35 (a)~(l) はこのようにして得られた合成流の 1 潮汐間の流況を示すものである。これらの図によれば、同図 (k), (l) および (a)~(f) は南西流が卓越し、1 潮汐間の約 2/3 継続していることがわかる。防波堤に囲まれた御前崎港内の流れは外海の流れと、流向の位相とも必ずしも対応せず、流速も 1 桁ないしそれ以上小さくなっている。さらに、図-36 は図-35 のように得られた合成流の 1 潮汐間の平均流（即ち現況恒流図（図-27）に対応する）を表わしたもので、0.15m/sec 程度の南西流が再現されている。御前崎港内でも、流速は極めて微弱ではあるが、北側開口部より侵入した海水が東側又は南側の開口部を通じて流出しているのが認められる。

以上、御前崎港付近の海水の流動のように、潮流作用にもとづく半日周潮流成分と、海流による恒流成分とが同規模で作用し合って形成されている場合には、上述のような水位制御と流速制御とによる流動の合成によって実態に近づけることは可能である。しかし、この流れの合成に際しては運動方程式の擬似線型性の仮定に基づいたものであり、この点についてはさらに検討の余地がある。

このように境界において水位と流速の双方の制御を必要とする流動計算に対しては、同時併用するのが最もよさそうであるが、既述のモデルの性格からして容易でない。そこで、1 ステップ毎に水位制御と流速制御と交互に行う方法を考えてみる。この手順を簡単に表わしたものが図-37 である。すなわち、同図(4)で初期値として流速制御による流動場（図-34 と同一データ）を与え、

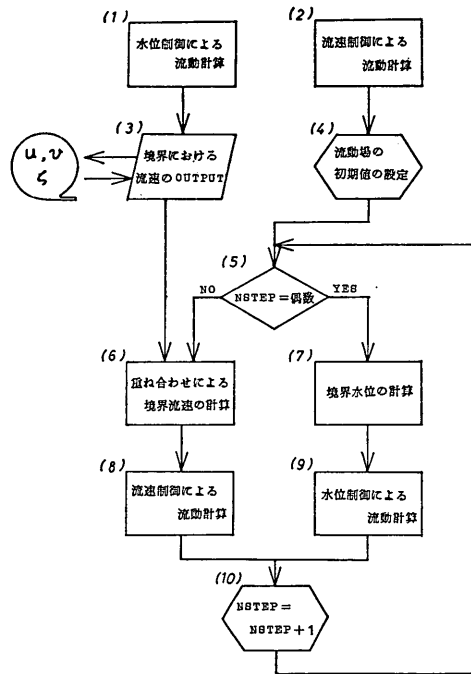


図-37 水位制御と流速制御の併用

偶数ステップには、同図(7)で境界水位を設定して同図(9)の水位制御による流動計算を行う。次に奇数ステップにおいては、同図(6)で境界流速を設定し、流速制御による流動計算を行う。ただしこの際の境界流速は、図-34 を求める場合に用いた流速の他に、水位制御のみによる流動計算（図-31, 32）によって発生する境界での流速を

潮流計算における境界等の取扱い

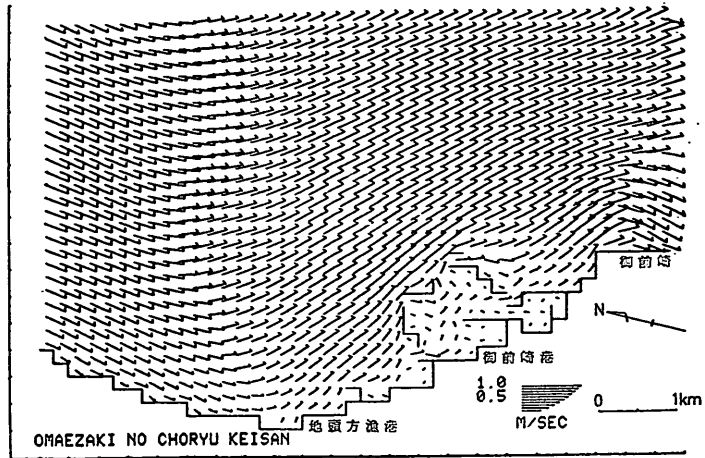


図-38 (a) 御前崎港潮流 (水位, 流速制御の併用)

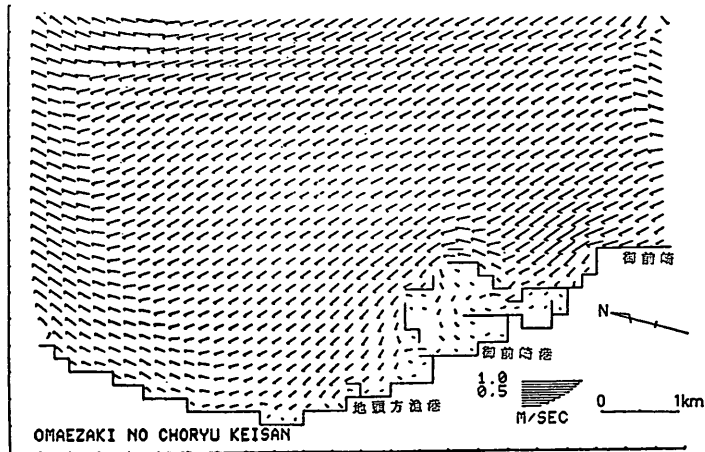


図-38 (b) 御前崎港潮流 (水位, 流速制御の併用)

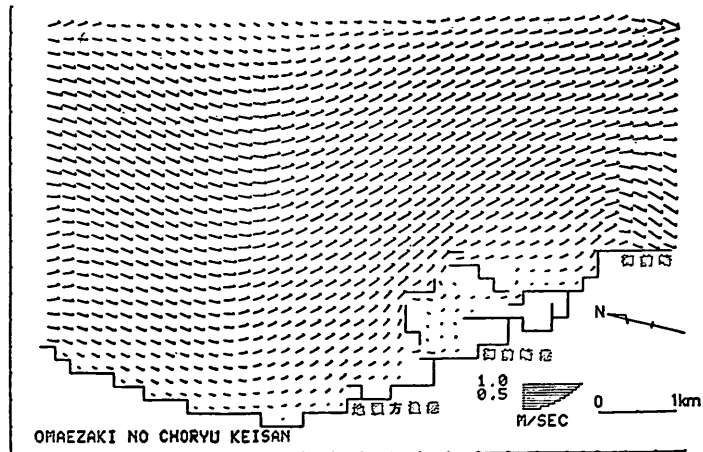


図-38 (c) 御前崎港平均流 (水位, 流速制御の併用)

考慮しこれら両者を重ね合わせたものとして与える。以上の手順によって計算される流動を示したものが図-38 (a) (南西流最強時), 図-38 (b) (北東流最強時), および図-38 (c) (1潮時平均流) である。図-35 (a) ~ (f) および図-36 と比較すれば明らかなように, 水位制御と流速制御とを個別に行って計算しこれを重ね合わせて生ずる流動と, 水位制御, 流速制御を1ステップ毎に交互に行って生ずる流動との間にはほとんど差がなく, これらの誤差は代表数点で比較してみると5パーセント程度である。したがって本計算例に限って言えば, 図-38 に示したように水位制御と流速制御を1ステップ毎に計算するという余分な流動計算を行わなくても, 個々の制御により計算される流動の重ね合わせで十分代用できることが判る。ただし, 図-38 の計算に際し, 境界流速に対してはなお重ね合わせを仮定して計算した結果であることに留意する必要がある。

5. まとめ

以上, 本報告に述べた主な内容をまとめるとつぎのとおりである。

- (1) 開境界 (外海域との境界) や閉境界 (陸地との境界) の取扱いは一般式の局部変更により容易になる。
- (2) 防波堤, 島など幅をもたない線境界の取扱いも一般式の中で可能である。
- (3) 格子間隔よりも小さな防波堤開口部や, ある一定の透過率をもった透過堤の計算も可能であるが, ここでの取扱いは簡便法をとっているため改良点を残している。
- (4) 計算領域は, 目的によって異なるが, 格子間隔数100メートルなら5~10km四方, 格子間隔数キロメートルなら50~100km四方として領域内の格子総数を数1,000程度におさめるようにした方が実用的である。
- (5) 座標軸の方向は, 流動計算結果に大きな影響を及ぼすので, その選定に当たっては対象とする流況が最も再現され易いように注意する必要がある。
- (6) 格子間隔は, 地形表現, タイムステップ, 計算時間, 計算の安定性などに関係するので, 計算目的に応じ適宜決定すべきであるが, 小メッシュモデルでも100メートル以上, 大メッシュモデルでは数キロメートルが適当であろう。
- (7) 格子間隔が数100メートル以下のオーダーになると水平混合項の導入によって流れを安定化させる必要が生ずる。水平混合項の導入法には, 一定時間間隔毎に

平滑化係数を用いて行う平滑化法と, 毎ステップ計算してゆく方法がある。平滑化効果は前者の方が大で, 10分間隔程度に行うとよい。

- (8) 潮流 (流動) 計算における開境界での制御は, 水位制御と流速制御とがある。閉塞性内湾では水位制御でよいが, 海流や恒流の影響を強く受ける海域, または計算機の容量, 計算時間の関係から十分な計算領域がとれず, 境界付近で地形性恒流の再現ができない場合などでは, 流速制御, 又は流速制御と水位制御の併用により流動の再現性を高めることができる。

6. あとがき

本報告では, 前報告¹⁾の続報として, ADI法による潮流計算の線境界, 縮小断面, 水平混合項, 水位制御と流速制御方式などの取扱いを述べた。さらに, 計算範囲, 座標軸, 格子間隔その他の計算に際する問題点, 留意点について述べた。

本報告において取扱ったこれらの項目が今後この種の計算の計画策定または実施の一助となれば幸いである。

潮流計算に対する今後の研究課題として, 最近各地で要請のあがっている干潟計算法 (すなわち時間的に境界が移動するもの), ズーミング法 (計算領域を局部的に細メッシュにして計算する方法) あるいは多層モデルなどがある。

拡散計算に対する今後の研究課題としては, 定常解モデルの開発, 非保存系物質の取扱い, 土砂沈降拡散や油拡散の取扱いがある。

これらいずれの問題も容易に解決するものではないが開発に対する期待は大きいので鋭意努力してゆく予定である。さらに, ADI法に限らずその他の差分法および有限要素法による解法の開発も機をみて着手する方針である。

最後に, 本報告の素材となっている各計算例の実施に当たった運輸省第三港湾建設局調査設計事務所, 同第五港湾建設局設計室, 同企画課, 静岡県土木部港湾課の関係各位には結果の一部資料を提供していただくとともにプログラム開発に対する有益な示唆を得た。本報告書の資料整理及び図面の作成には, 当港湾技術研究所海洋水理部海水浄化研究室三好英一, 同海水汚染水理研究室入尾野幸雄両技官が援助した。これらの各位に厚く感謝する次第である。さらに, 本稿を査読し, 有益な御意見を頂いた当港湾技術研究所海洋水理部長佐藤昭二博士, および計算機の使用に際して御指導又は御協力頂いた当研究

潮流計算における境界等の取扱い

所設計基準部計算室の皆様にも合せて深く感謝致します。

なお、本計算には、当港湾技術研究所所有の電子計算機（TOSBAC-3400, 5600/160）に、さらに、一部の図面作成には、同所所有のドラフター（東洋電機）、グラフィックディスプレイ（東京芝浦電気）に依ったことを付記する。
(1976年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 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——, 港湾技術研究所報告, 第14巻第1号, 運輸省港湾技術研究所, 昭和50年3月, pp. 3~61
- 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——, 昭和50年度港湾技術研究所講演会講演集, 運輸省港湾技術研究所, 昭和50年12月, pp. 53~90
- 3) 運輸省第四港湾建設局: 志布志湾の海象モデルと数値計算手法, 昭和50年3月
- 4) 一都三県公害防止協議会: 昭和47年度水質汚濁調査報告書（東京湾総合調査）, 昭和48年10月
- 5) Leendertse, J.J.: Aspects of a computational model for long-period water wave propagation, RM-5295-PR, The Rand Corporation, May 1967
- 6) たとえば, 運輸省第三港湾建設局: 瀬戸内海潮流調査報告書, 昭和42年3月
- 7) たとえば 6) の pp. 10
- 8) 日高孝次: 海流, 岩波書店, 1955, pp. 291
- 9) 志布志湾 海況調査委員会: 志布志湾 海況 調査報告書, 鹿児島県, 昭和45年3月
- 10) 渡辺信雄: 駿河湾の海水の流れ, 駿河湾の自然（特集）, 教師の広場 No. 13, 季刊第13号
- 11) 静岡県御前崎 土木事務所: 御前崎港 潮流 調査報告書, 昭和50年9月