

## 内湾海水の動態についての水理学的研究

### Ⅲ. 2次元数値モデルによる潮流の解析

河原田礼次郎・長 勝史

(農業水利学研究室)

平成元年8月10日 受理

### Hydraulic Studies on the Movement of Tidal Current in the Inner Bay Ⅲ. Two Dimensional Analysis of Tidal Current by Numerical Model

Reijiro KAWAHARADA, Katushi CHO

(Laboratory of Irrigation and Drainage Engineering)

#### 緒 言

外海との交流が十分でない内海においては、近年の水質汚濁問題は極めて憂慮されることである。また河川から湾内に搬入される土砂の動向や堆積も問題である。その現状を把握するには湾内水の動態をつかむことが肝要となる。湾内の流れは一般に3次元であるが、海域の流れの大局を知ることは平面的な2次元モデルによっても可能である。また複雑な領域を計算の対象とする場合には、実用上3次元モデルが適用できない場合が多い。

ここでは、前報<sup>1,2)</sup>に引き続き2次元数値モデルによって内湾の湾奥の潮流解析を行った。すなわち境界に設けた潮汐によって、湾奥の潮流がいかなる様相を呈するかをシミュレートし、海水の動向を探るものである。また湾内に流入する河川の流入量の影響についても考察する。

#### 基礎方程式と数値モデル

##### 1. 平面2次元不定流の基本式と差分化

###### (1) 基本式

潮流計算には一般に用いられている次式を用いる。なお、ここではコリオリ力および風による表面応力は考慮していない。

連続方程式

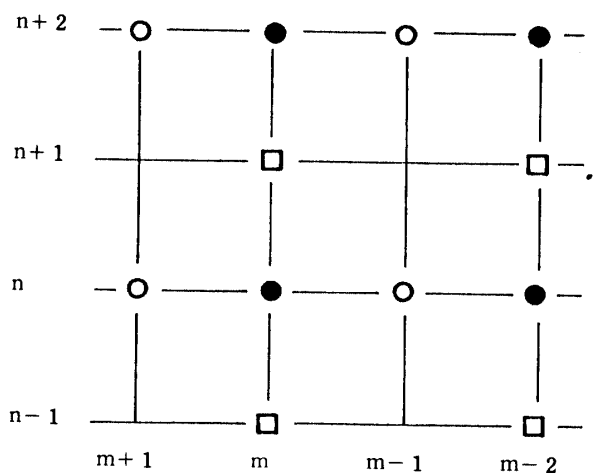
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

運動方程式

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{q_x}{h+\eta} \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{q_y}{h+\eta} \frac{\partial q_x}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - f_c \frac{q_x \cdot q}{(h+\eta)^2} \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{q_x}{h+\eta} \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{q_y}{h+\eta} \frac{\partial q_y}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} - f_c \frac{q_y \cdot q}{(h+\eta)^2} \dots\dots\dots (2.b)$$

ここで、 $\eta$ :潮位,  $q_x, q_y$ : $x$ (N-S),  $y$ (E-W)方向の単位幅流量,  $h$ :水深,  $g$ :重力の加速度,  $q = (q_x^2 + q_y^2)^{1/2}$ ,  $f_c = n^2 g / (h + \eta)^{1/3}$ ,  $n$ :粗度係数。



- : Calculation point of H
- : Calculation point of  $q_x$
- : Calculation point of  $q_y$
- m : Even number
- n : Even number

Fig. 1. Illustration of grid point.

(2) 基本式の差分化

式 (1), (2) の基本式を差分化して数値シミュレーションを行う。用いた差分法は中央差分法を用いる Leap-Frog 法である。

Fig. 1 に示すような格子点および時刻の格子点での値を用いて連続方程式 (1) 式を差分化すれば水位  $H$  は次のように表される。

$$H(m, n, j+1) = H(m, n, j) + \{q_x(m-1, n, j+1/2) - q_x(m+1, n, j+1/2)\} (dt/dx) + \{q_y(m, n-1, j+1/2) - q_y(m, n+1, j+1/2)\} (dt/dy) \dots\dots\dots (3)$$

ここで,  $m, n$ :  $x, y$  の軸の格子点,

$j$ : 時間  $t$  軸の格子点

$dx, dy$ :  $x, y$  軸方向の格子点間隔

$dt$ : 時間きざみ

なお  $t = t_j$  時刻の格子点を  $j$  とすれば  $j+1/2$  は  $t+dt/2$  時刻を意味する。同様に,  $x = x_m, y = y_n$  の格

子点を  $m, n$  とすれば  $m \pm 1, n \pm 1$  はそれぞれ  $x_m \pm dx, y_n \pm dy$  の位置を表す。

同じく運動方程式 (2) 式を差分化し,  $x$  方向の単位幅流量  $q_x$  については

$$q_x(m+1, n, j+1/2) = q_x(m+1, n, j-1/2) - \frac{q_x(m+1, n, j-1/2)}{H(m+1, n, 3)} \{q_x(m+1, n, j-1/2) - q_x(m-1, n, j-1/2)\} \frac{dt}{dx} - \frac{q_y(m+1, n, j-1/2)}{H(m+1, n, 3)} \{q_x(m+1, n+2, j-1/2) - q_x(m+1, n, j-1/2)\} \frac{dt}{dy} - g \cdot H(m+1, n, 3) \{H(m+2, n, j) - H(m, n, j)\} \frac{dt}{dx} - gn^2 \frac{q_x(m+1, n, j-1/2) \cdot q_{xy}}{H(m+1, n, 3)^{2.333}} dt \dots\dots\dots (4.a)$$

$y$  方向の単位幅流量  $q_y$  については

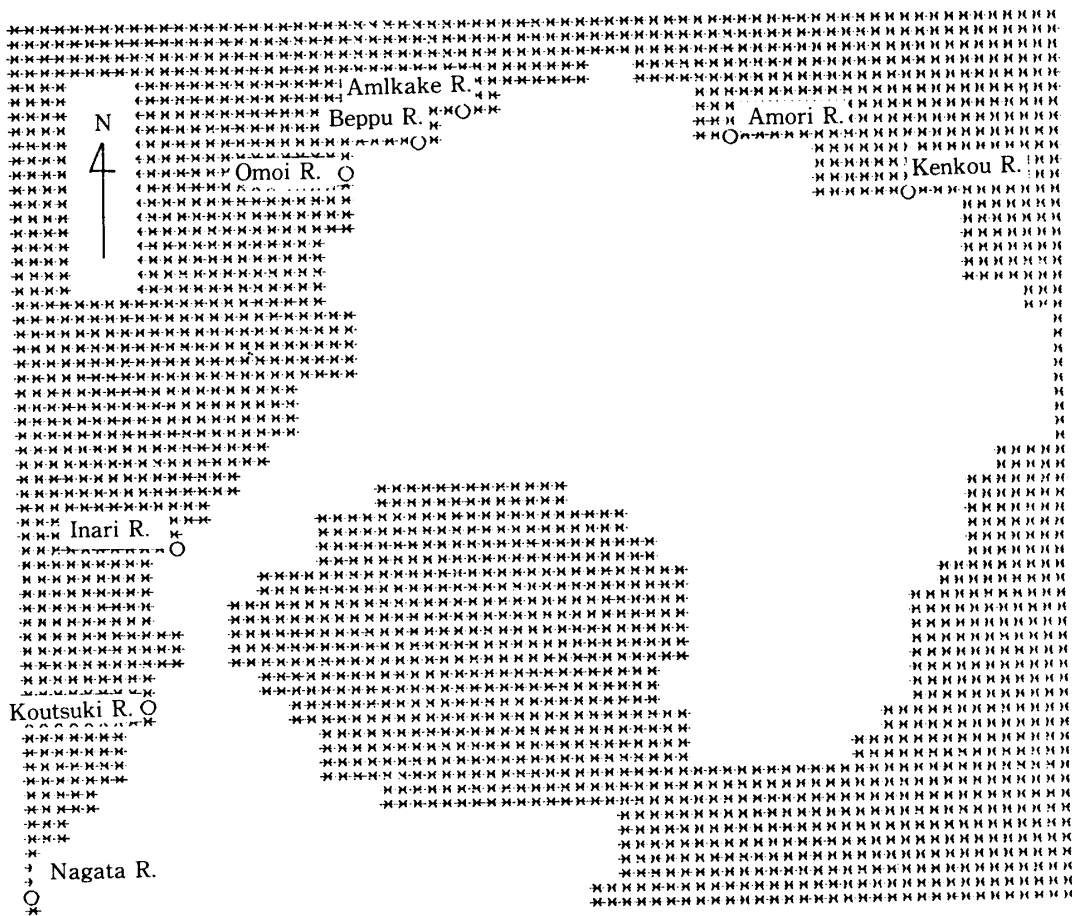
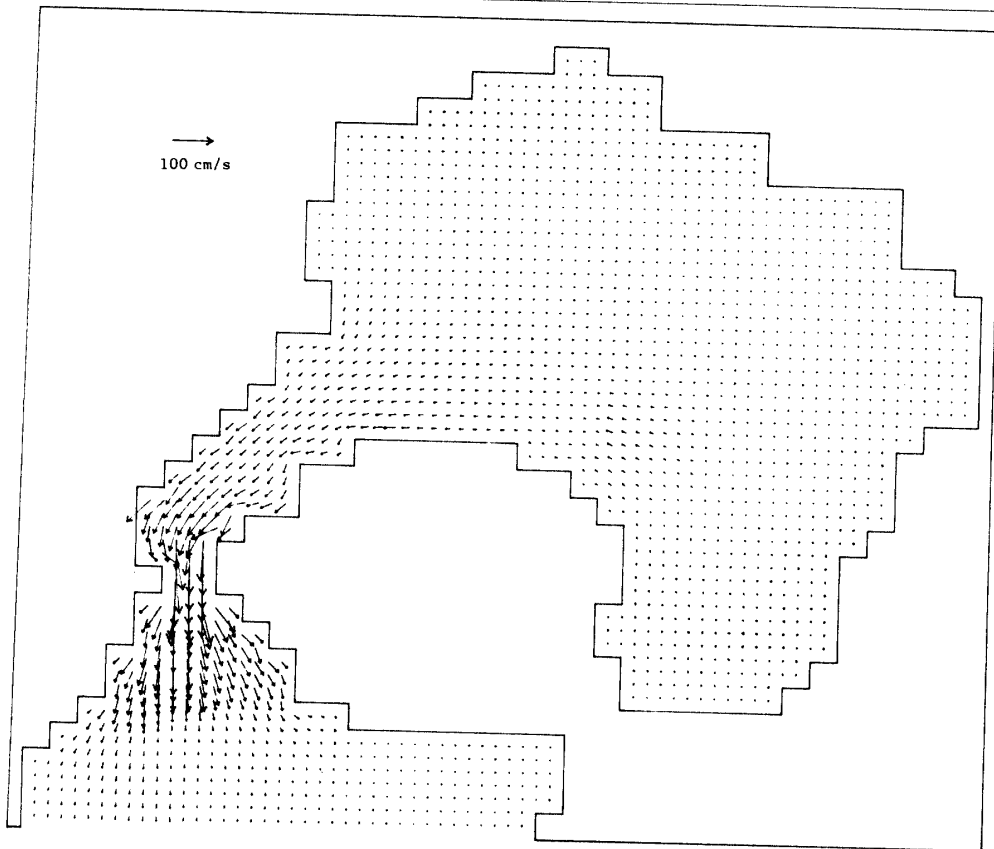
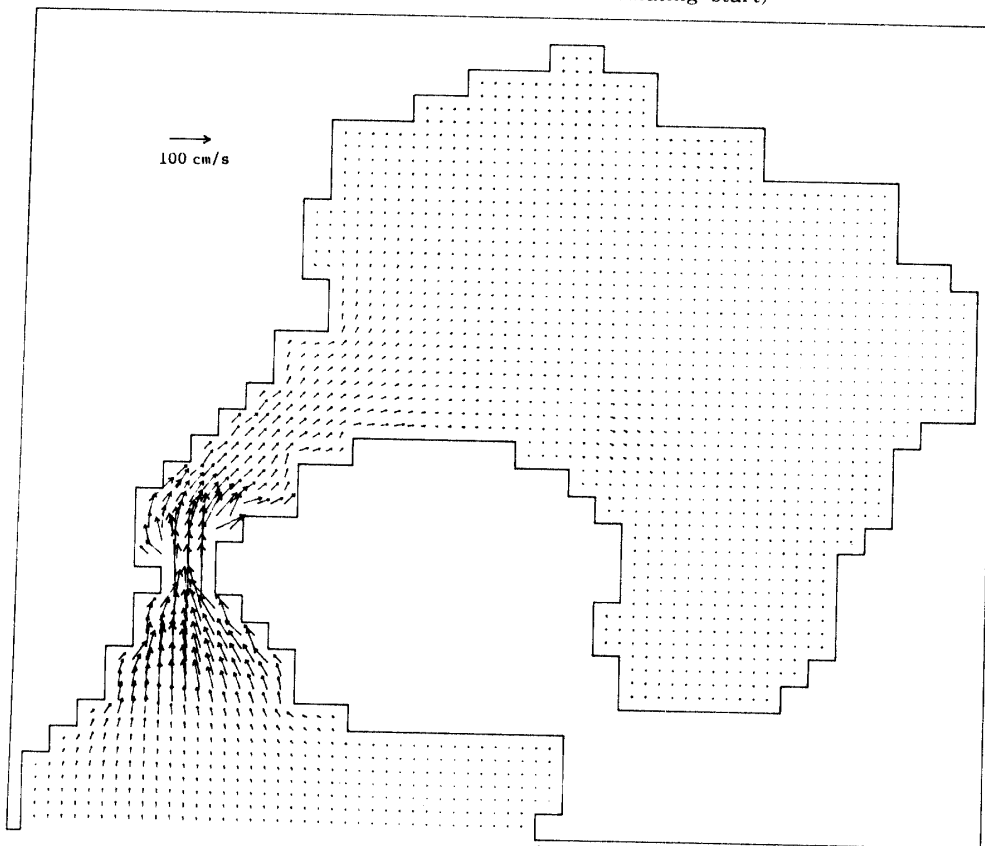


Fig. 2. Division of Kagoshima Inner Bay into two dimensional elements calculated.



(a) Ebb tide (28 hour after calculating-start)



(b) Flood tide (33 hour after calculating-start)

Fig. 3. Distribution of tidal velocity in Kagoshima Inner Bay.

$$\begin{aligned}
 & q_y(m, n+1, j+1/2) = q_y(m, n+1, j-1/2) \\
 & - \frac{q_x(m, n+1, j-1/2)}{H(m+1, n, 3)} \left\{ q_y(m+2, n+1, j-1/2) \right. \\
 & - q_y(m, n+1, j-1/2) \left. \right\} \frac{dt}{dx} - \frac{q_y(m, n+1, j-1/2)}{H(m+1, n, 3)} \\
 & \left\{ q_y(m, n+1, j-1/2) - q_y(m, n-1, j-1/2) \right\} \frac{dt}{dy} \\
 & - g \cdot H(m+1, n, 3) \left\{ H(m, n+2, j) - H(m, n, j) \right\} \frac{dt}{dy} \\
 & - gn^2 \frac{q_y(m, n+1, j-1/2) \cdot q_{xy}}{H(m+1, n, 3)^{2.333}} dt \dots\dots\dots (4.b)
 \end{aligned}$$

となる。ここで

$$q_{xy} = \{q_x(m+1, n, j-1/2)^2 + q_y(m+1, n, j-1/2)^2\}^{1/2}$$

なお Leap-Frog 法を用いて不定流解析を行う場合、水位（水深）および流量（流速）の計算は交互に独立して行うので、計算格子点以外の諸量は補間および平均操作によって求める。

上式 (3), (4) 式に境界条件および初期条件を設定して数値計算を行う。なお、このような複雑な境界形状を有する湾などの潮流解析を行う場合、陸域と水域との境界点における補間計算には工夫を要する。ここでは森等<sup>4)</sup>が提唱した境界処理の方法によった。

なお、湾内の水温や塩分の変化に伴う密度流については考慮に入れていない。

**適応例とその考察**

内湾の一例として鹿児島湾の湾奥を選び、鹿児島港付近を起点として潮位を与え、この振動が湾奥にどのような形で伝播していき、どのような潮流速度を形成するかをシミュレートした。

**1. 計算条件**

計算は Fig. 2 に示すように N-S 方向を 400m 間隔に 63 個、E-W 方向を同じく 400m 間隔に 71 個分割して解析した。潮位の境界条件は、鹿児島港付近の潮汐の振幅を H=1.00m（ほぼ同地点での大潮時の潮差に等しい）とした正弦波を与えた。潮位の周期は 12.5 時間とした。粗度係数は一律に n=0.03 とした。また計算時間間隔は 10 秒で行った。なお湾内へ流入する 8 河川の流入量は画一的に各河川の平水流量を想定した。

**2. 適用結果**

前記の解析手法を用いて、鹿児島湾奥への適応結

果の一例を Fig. 3-(a) および (b) に示す。図の (a) は下げ潮時（計算開始から 28 時）、(b) は上げ潮時（同じく 33 時）の流速ベクトル図である。鹿児島湾奥は Fig. 4 に示すように、カルデラによる特有な地形構造であることから、湾奥では他の海湾に類を見ないほど急深（最深では 200m）である一方、桜島水道の狭窄部では水深 20~40m と浅くかつ狭い。このような地形条件が固有の潮流を形成してい

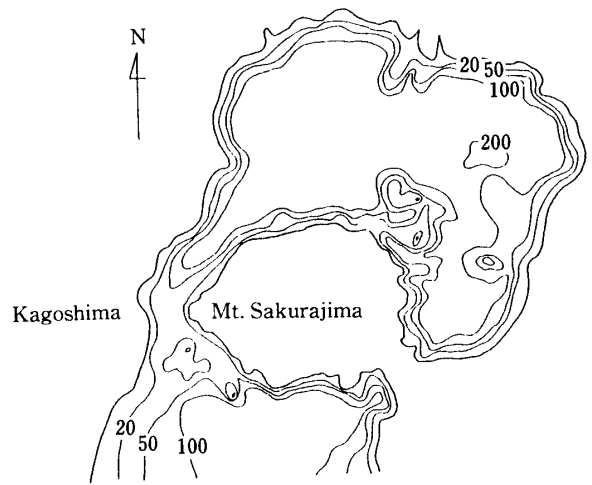


Fig. 4. Topography of Kagoshima Inner Bay. (The numbers denote the depth in meter).

る。すなわち湾奥ではいずれの潮位時でも、潮流速度は微小である。ただ湾奥での大潮時の実測の流速<sup>3)</sup>の 10~25cm/sec に比べて、計算ではやや小さな値を示している。これは計算では 2 次元で解析したために、水深方向の流速は、いわゆる平均流速となる。これに対して実測値は比較的浅い部分（概ね水深 5m 付近）で観測された結果であるためであろう。前述のように桜島水道での狭窄によって、湾奥の深海部はいわばデットウォーター状の様相を呈し、底層付近の流動は極めて微小であると推察され、結果的には表面流が卓越することになる。ただ湾奥での外海とのマクロに見た交流の状況などを把握するには、表面流速よりもむしろ平均的な値で示した方が有意義な面もあろう。

湾奥の南部ではやや流速が大きく（この付近は水深がやや浅い）、北部および東部ではいずれの潮位時でも潮流速度が極めて緩慢である。いずれにしる、湾奥での潮流の動きは鈍くて拡散の進み方が遅く、汚濁の影響が大きいことが推測される。

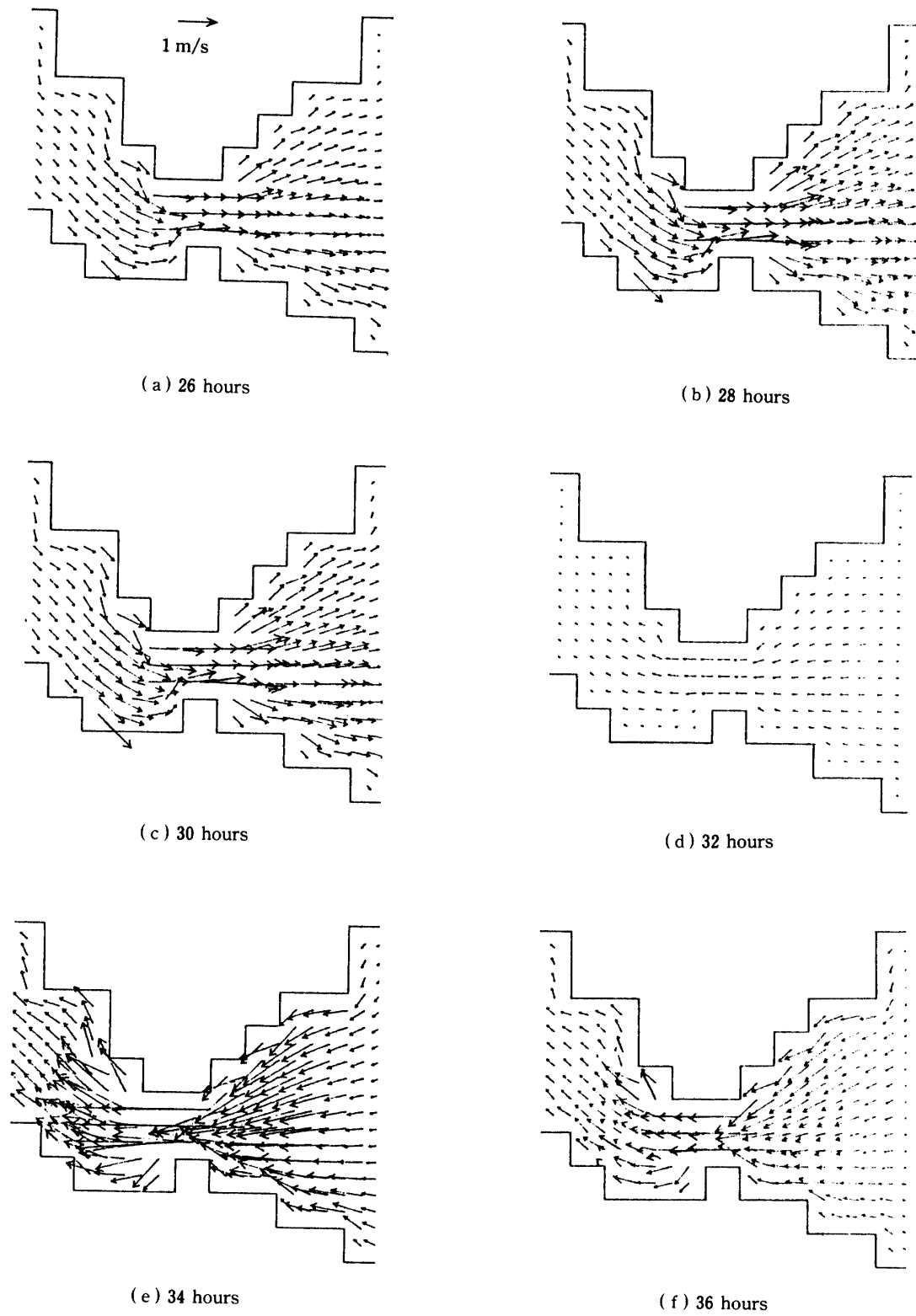


Fig. 5. Distribution of tidal velocity in Sakurajima Channel.  
(Hour denotes time after calculating-start and the left direction of chart points the North).

一方桜島水道の狭窄部での潮流速度は、潮汐に応じて大きく変化する。Fig. 5-(a)~(f) に狭窄部での26時から36時までの2時間毎の潮流速度を示す。図から明らかなように、潮流速は10cm/sec程度から150cm/sec内外まで幅広く変化している。実測でも同地点で最大では100cm/sec以上の値を示しているが、計算値のほうがいくぶん大きな値を示した。これは鹿児島港付近に潮位の境界を与えたために、潮汐の振動の影響がやや過大に評価されたためとも考えられる。

湾内に流入する河川の流量が潮流に及ぼす影響について考察した。Fig. 6は、河川からの流入流量を時間と共に正弦波状に最大時で平水流量の10倍入力した場合の潮流の動向を示す。湾奥での河川の流入方向からして、下げ潮時か上げ潮時かによって河川流量の影響は異なるが、Fig. 6はその影響が大きい下げ潮時（計算開始から28時）に河川流入量が増加した場合を示す。Fig. 3-(b)と同じ時刻であるが、Fig. 6とFig. 3-(b)とを対比した場合、潮流速度

の差異は極めて微小である。これは湾奥では水深が大きいために河川流量の影響が顕著には現れないためと思われる。また桜島水道の狭窄部では、流速が速いためにその影響は際だつこともない。ただここでも解析が2次元モデルであるために、表面流に及ぼす影響が軽減されているきらいはある。しかし総体的には河川水の潮流に及ぼす影響は少ないと判断される。

なお、今後はこのように計算された潮流によって、海水がどのように拡散され、外海と交流されていくのかについて解明したい。

### 要 約

内湾の潮流の問題を解明するために、2次元モデルによるシミュレーションを行った。適用例として鹿児島湾奥を選び、河川の流入量をも加味した計算を試みた。2次元流の取扱いであるために、表面流の実測流速とはやや異なった値を示した場合も生じたが、湾内の潮流の動向を推測するには支障はない

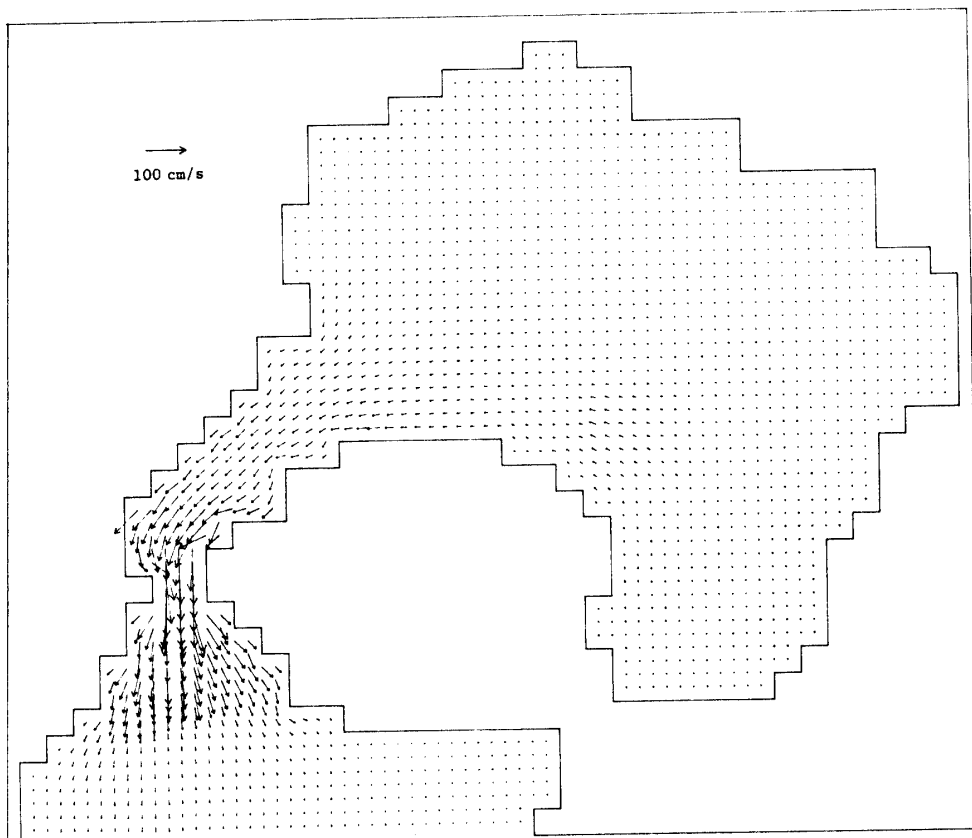


Fig. 6. Distribution of tidal velocity in Kagoshima Inner Bay in case when the discharges of rivers are 10 times of ordinary river discharge (28 hour after calculating-start).

と考えられる。その結果、湾奥ではいずれの潮位時でも、潮流平均速度は微小であり水質汚濁の影響を受け易い事、桜島水道の狭窄部では最大1.5m/sec程度の流速を形成するなど、鹿児島湾奥の流況の一端を知ることができた。また、河川水の潮流に及ぼす影響は大きくはないと判断される。

**謝辞** 終わりに本研究は、科学研究費総合研究(A)「内湾における土砂堆積過程に関する研究」の補助を受けた。この研究の機会を与えて戴いた代表者戸原義男九州大学教授に謝意を表したい。また数値解析のご教唆を頂いた九州大学の森健氏および平松和昭氏に謝意を表したい。

## 文 献

- 1) 河原田礼次郎・戸原義男・加藤治：内湾海水の動態についての水理学的研究(I)，鹿大農学部報告，No. 26，231-235 (1976)
- 2) 河原田礼次郎・戸原義男・加藤治：内湾海水の動態についての水理学的研究(II)，鹿大農学部報告，No. 30，233-238 (1980)
- 3) 第十管区海上保安本部：鹿児島湾の潮流 (1977)
- 4) 森健・戸原義男・加藤治：二次元不定流解析における境界処理の一工夫，昭和63年度農業土木学会大会講演要旨集，24-25 (1988)

## Summary

In order to clarify the problem of tidal current in the inner bay, numerical simulation was investigated by two dimensional numerical model.

As an example, Kagoshima-wan was chosen, and the above mentioned calculation was tried, paying due regard to discharges from the rivers.

The tidal velocity by calculation slightly differed from the current value measured at near water surface, but there was no inexpedience for presuming tidal current in the inner bay. As the results, the mean tidal currents at inner part of the bay were fixed to be quite slow at every tide, hence an apprehension about water corruption thereabouts. And at Sakurajima Channel maximum currents were nearly 1.5m/sec. The discharges from the rivers were little referred to tidal currents.