

## 新海水導入による大村湾潮汐シミュレーション

植木 弘 信\* ・ 宇 都 幸一\*\*

野 中 稀 平\*\*\* ・ 栗 須 正 登\*\*

A Tide Simulation of Introduced New Sea Water in Ōmura Bay.

by

Hironobu UEKI

(Graduate Student, Kyushyu University)

Kouichi UTO

(Department of Mechanical Engineering)

Marehei NONAKA

(Sasebo Technical College)

Masato KURISU

(Department of Mechanical Engineering)

Recently the field survey, the model observation, and the numerical simulation are reported for countermeasement of pollution in Ōmura Bay. It's seems that the best way for the improvement of pollution in Ōmura Bay is to introduce the new sea water from outer sea to Ōmura Bay. The numerical simulation technique is used for the analysis of tide in Ōmura Bay, the results obtained are as follows.

If the flow rate of new sea water introducing is one hundred million tons per a tidal cycle, the mean sea level rises a 15 cm in height by the introduced water, but the oscillation amplitude of tide is not changed. The tidal current is little change at the center and the north parts in the bay. In the proximity of the introducing point of the new water and south west part, the value of velocity and the phase of tidal current are change. In whole region of the bay, it is seemed that the permanent tidal flow has a little increment, as results of new water introduced.

## 1. 緒 言

長崎県では環境部が中心となり、大村湾の汚染の現状調査<sup>1)</sup>および汚染改善の対策が進められている。この研究は、長崎県の依頼を受けて上記事業の一環として実施したものである。また、長崎県には、知事の諮

問機関である水質審議会が設けられており、県内の水質に関する技術的検討が行なわれているが、この審議会で大村湾の水質についての検討結果の一つは以下のようなものである。大村湾の汚染対策については、現地調査<sup>1~4)</sup>や水理模型による実験結果<sup>5), 8)</sup>また、コンピ

昭和53年11月18日受理

\* 九州大学大学院

\*\* 機械工学科

\*\*\* 佐世保高専

ーターによる数値シミュレーションの結果, 3), 4), 6), 7)など, 報告がなされている。これら多数の報告書を水質審議会で検討の結果, 大村湾は代表的な閉鎖海域(大村湾⇔佐世保湾⇔外洋)であるため, 潮の干満に際して針尾瀬戸を通して佐世保湾との海水の出入りがあるが, これは汚染した同じ海水が出入するだけで外海水との交換が十分には行なわれていない。したがって現状での汚染状況が今後ますます進むものと推定される。したがって, 同湾の水質改善の本質的な対策は, 外海域より新海水を導入することが最も望ましいことであるとの結論が出された。本数値シミュレーションは審議会の結論を受けて実施したものである。

数値シミュレーションは, 大きく分けて, 潮流モデルによる潮汐のシミュレーションと, 拡散モデルによる拡散シミュレーションの2つに分けられる。シミュレーションの手法は, 前者については, 文献(2, 6, 7)に報告したものをを用い, 新海水の導入により大村湾の潮汐がいかに変化するかがこの報告の主題であり, この種の研究は他に前例のないものである。またこの変化した潮流の上での拡散シミュレーションが後で, 本誌別報で報告する。

## 2. 基礎および潮流モデル

### 1) 基礎式

潮汐現象は Navier-Stokes の運動方程式および連続の式で表わされる。

NS方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ &+ \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_{cv} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ &+ \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - f_{cu} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ &+ \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} (1)$$

連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式(1)において

i) コクオリ力は重力に比べて非常に小さいのでこれを無視する。

ii) 潮汐は長波であり, それに伴う流体の運動においては, 水深に比べ波長が非常に大きいので式(1)の第

三式において, Z方向の加速度を無視する。

iii) 自由水面からの水位(潮位 $\zeta$ )を鉛直下方に正とする。

なる条件のもとに式(1)を書き換えると,

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ &+ \nu^* \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A1 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ &+ \nu^* \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A1 \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1')$$

式(1)'および式(2)は三次元の方程式であるが, これを二次元的に考えるためZ方向について各式を積分すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= - \left\{ \frac{\gamma^2}{h+\zeta} \sqrt{U^2+V^2} + 2 \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right. \\ &+ \left. \frac{U}{h+\zeta} \cdot \frac{\partial(h+\zeta)}{\partial x} \right\} M \\ &- \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{U}{h+\zeta} \frac{\partial(h+\zeta)}{\partial y} \right\} N - g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= - \left\{ \frac{\gamma^2}{h+\zeta} \sqrt{U^2+V^2} + 2 \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} \right. \\ &+ \left. \frac{V}{h+\zeta} \cdot \frac{\partial(h+\zeta)}{\partial y} \right\} N \\ &- \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{V}{h+\zeta} \frac{\partial(h+\zeta)}{\partial x} \right\} M - g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= - \left( \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

また, 水平粘性項は非常に小さいので次式のように運動方程式からはずし, これだけ別に計算を行なう。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= A1 \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= A1 \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで

x, y : 直角座標

t : 時間

$\zeta$  : 平均水面からの水位

h : 平均水面

g : 重力の加速度

u, v : それぞれx, y方向の流速

$\gamma^2$  : 海底摩擦係数

A1 : 渦動粘性係数

また, 上に用いたM, Nは

$u = U + u'$ ,  $v = V + v'$ ただし

$$\int_{-\zeta}^h u' dz = 0, \quad \int_{-\zeta}^h v' dz = 0$$

とするとき

$$M = \int_{-\xi}^{\eta} u dz = (h + \zeta)U \quad \text{：単位長さ当りの } x \text{ 方向の流量}$$

$$N = \int_{-\xi}^{\eta} v dz = (h + \zeta)V \quad \text{：単位長さ当りの } y \text{ 方向の流量}$$

$U, V$  : それぞれ  $x, y$  方向の平均流速

$u', v'$  :  $U, V$  に対する 1 次微小量とする。

また、新海水導入地点においては、連続の式(2)の代りに次式を用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + dQ = 0 \quad (2')$$

ここで  $Q = Q(t)$  は導入水量で半 cycle 合計  $\int dQ = 1$  億トンである。

iv) 差分式

平面における差分点を図 1 のように定義し、時間的な差分点を次の様に定義し、式(2), (3), (4)を差分化すると式(5), (6), (7)のように変形される。

$$\zeta^{k+1} = \zeta(T)$$

$$\zeta^{k-1} = \zeta(T - \Delta T)$$

$$M^{k+\frac{1}{2}} = M(T + \frac{1}{2}\Delta T)$$

$$M^{k-\frac{1}{2}} = M(T - \frac{1}{2}\Delta T)$$

$N$  は  $M$  と同様に定義する、また  $\Delta T$  は時間ステップである。

$$M_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = A \cdot M_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} + C \cdot N_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} + E \cdot (\zeta_{i,j}^k - \zeta_{i,j-1}^k) \quad (5)$$

$$N_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = B \cdot N_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} + D \cdot M_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} + E \cdot (\zeta_{i,j}^k - \zeta_{i,j}^k) \quad (6)$$

$$\zeta_{i,j}^{k+1} = \zeta_{i,j}^k - (M_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} + N_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} - N_{i+1,j}^{k-\frac{1}{2}}) \Delta T / \Delta S \quad (7)$$

ここで

$$A = 1 - \left\{ \frac{\gamma^2}{h + \zeta} \sqrt{U^2 + V^2} + 2 \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{U}{h + \zeta} \frac{\partial(h + \zeta)}{\partial x} \right\} \Delta T$$

$$B = 1 - \left\{ \frac{\gamma^2}{h + \zeta} \sqrt{U^2 + V^2} + 2 \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{h + \zeta} \frac{\partial(h + \zeta)}{\partial y} \right\} \Delta T$$

$$C = - \left\{ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{U}{h + \zeta} \frac{\partial(h + \zeta)}{\partial y} \right\} \Delta T$$

$$D = - \left\{ \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{h + \zeta} \frac{\partial(h + \zeta)}{\partial x} \right\} \Delta T$$

$$E = -g(h + \zeta) \Delta T / \Delta S$$

$\Delta T$  : 時間メッシュ間隔

$\Delta S$  :  $X-Y$  平面メッシュ間隔

である。

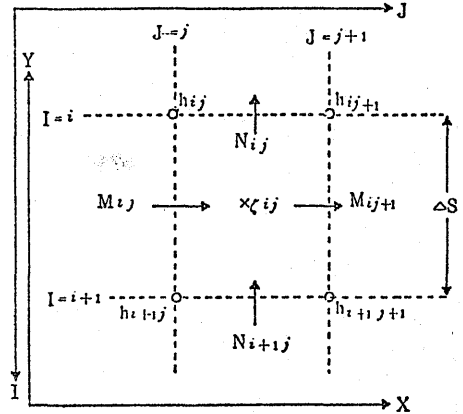


Fig. 1 The Points of Finite Difference in X-Y Plane

### 3. 海水導入

#### 3.1 海水導入地点

海水導入地点は、図 2 に示すように、角力灘、三重地点より、大村湾の時津地点へのルートを選定した。この理由は両地点が距離的に最小であること、時津地点が大村湾の湾奥に位置するためである。

#### 3.2 潮位差と潮位の位相

導入地点の三重(角力灘)と時津(大村湾)の潮位と位相を図 3 に示した。これにより両地点には  $M_2$  潮位で 56 cm, 位相で 2 時間 31 分の差があることがわかる。同図の(+)の部分では角力灘より大村湾への導入が可能で(-)の部分では水路に一方通行の弁を設け、これを閉じることにより逆流を防ぐものとした。

### 4. コンピューターシミュレーション

現状の大村湾の潮汐シミュレーションは図 4 に示すようなメッシュに区切り、これにしたがって計算を行っている(6), (7), 導入する新海水を上乗せする場合も同メッシュに従うのに越したことはないが、このような手法は他にも余り試みられないほど複雑でありしかもコンピューターに膨大な計算時間を要求する。このため、図 5 に示すように等価メッシュで実行した。図 6 は等価モデルの水深図である。等価モデルの針尾瀬戸は、鶴首のような直線水路とし、佐世保湾も単純な

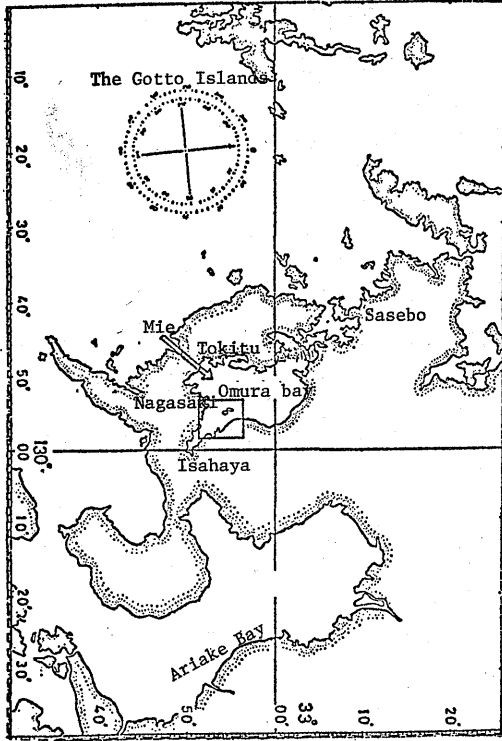


Fig. 2 The Introduced Point

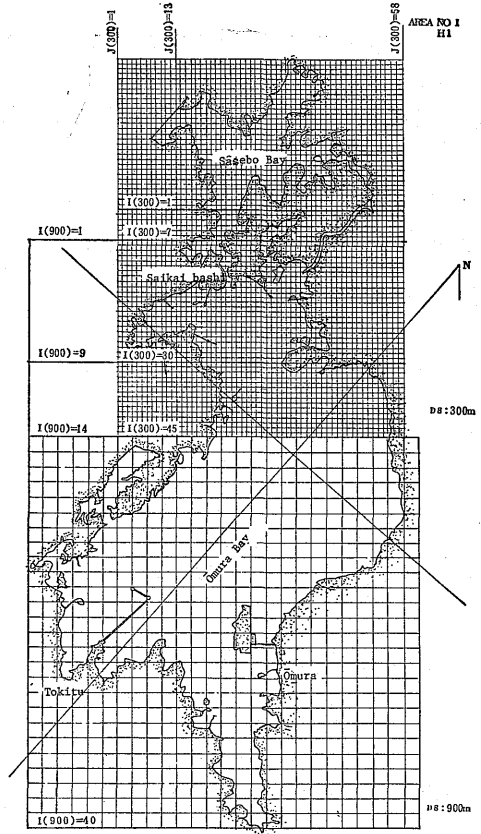


Fig. 4 The Mesh of the Tide Calculation

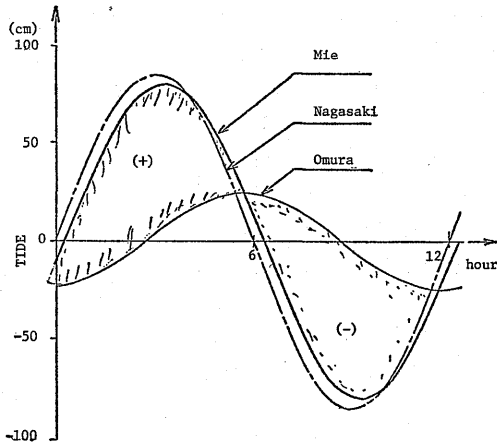


Fig. 3 The Tides of Observation

四角形としている。

新海水を1億トン(半サイクル毎)導入した場合(破線)と、現状の潮位(実線)を数値シミュレーションした結果を図7に示した。B, C, D, E, Fはそれぞれ大村湾の周辺をとりまく五観測点(4)での1サイクル中の潮位変動である。いずれの地点においても

平均潮位が約15cmほど新海水を導入することによって上昇する。しかし、最高最低の潮位差はその影響を受けない。新海水を導入しない現状の場合と、1億トンの新海水を導入した場合の潮流のパターンを比較するため、潮流ベクトル図および潮流楕円図を次に示す。図8は流入時(満潮時から9時間目)の状況で(a)は $Q=0$ , (b)は $Q=1$ 億トンの場合である。前述の通り $Q=1$ の時は大村湾の平均潮位が約15cm上昇するため佐世保湾からの流入が減少し、西海橋近傍の潮流ベクトルの大きさが小さくなっている。これに反して湾奥の津水湾では逆に、新海水を導入しない時より大きくなっており、その変化の割合は他の海域における値より大きい。図9は流出時(満潮時から3時間目)の状況で、(a)は $Q=0$ , (b)は $Q=1$ 億トンの場合である。導入した1億トンの海水は西海橋を通して佐世保湾へ流出することになり、その近くの潮流ベクトルは $Q=1$ のときの方が大きくなっている。一方、津水湾でも流入時と同様潮流が大きくなり、このことは津水湾の汚染改善にも有効に作用している。

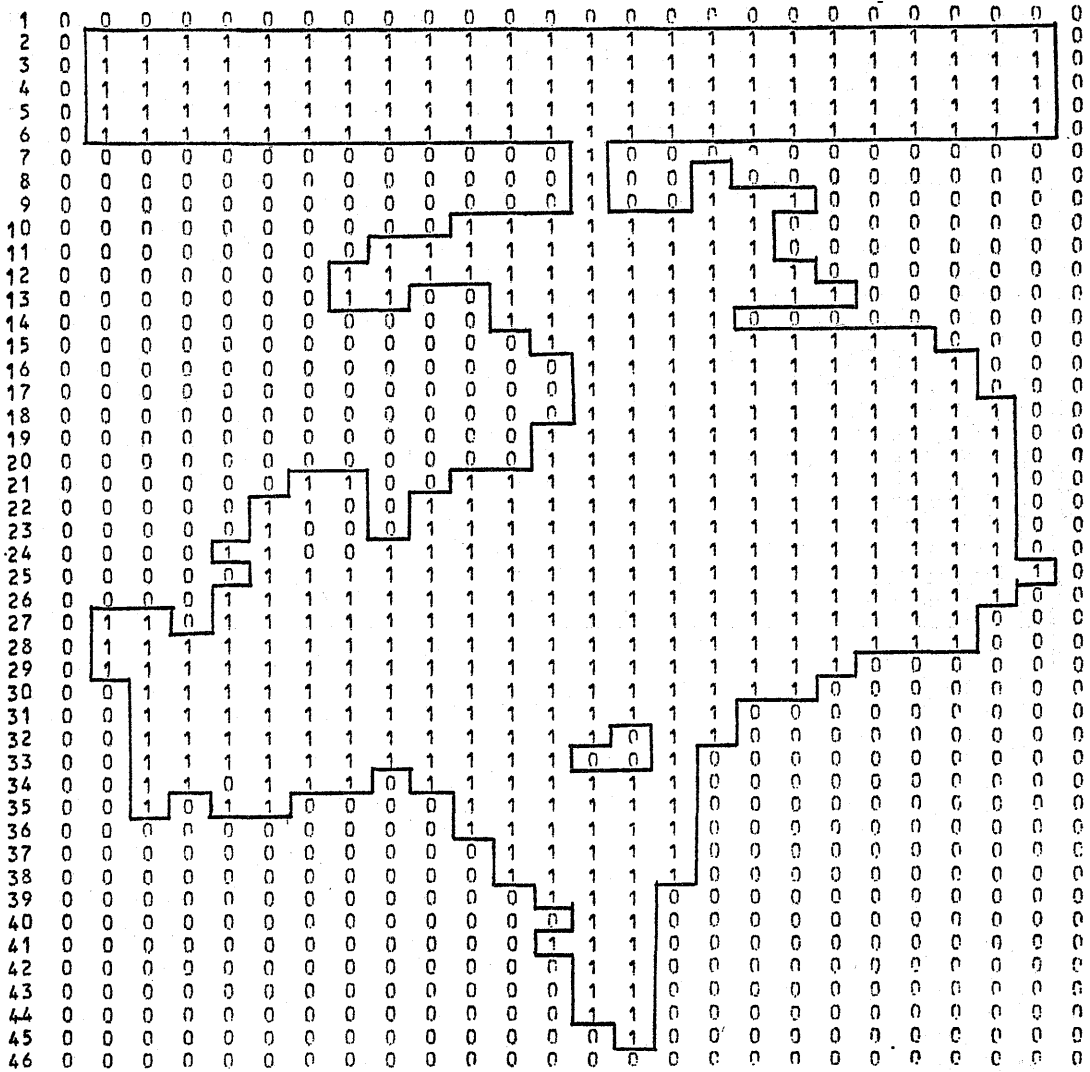


Fig. 5 The Equivalent Mesh

さらに新海水導入による潮流の変化を詳細に調べるため、図10に示すNo.1からNo.12までの代表点におけるM<sub>2</sub>潮の潮流楕円図を求めた。No.1,4,5,6,8,11,12においては、新海水導入によっても現状と大きな差異が認められなかったので省略し、ここではNo.2,3,7,9,10地点における潮流楕円図をQ=0の場合とQ=1億トンの場合について図11～図20に示す。図11, 12に示すNo.2地点（西海橋裏）では、他の地点に比して潮流がかなり大きいため、潮流表示の尺度を他の8倍にしている。No.2,7,9,10地点では潮流楕円の大きさおよび恒流（1サイクル平均潮流）も増加している。またNo.3の大崎半島南部では、潮流楕円は小さくなっているが恒流がかなり大きくなっている。全体的にみれば、大村湾の中央部および北部では新海水導入によって潮流

はさほど影響を受けないが、新海水導入地点に近い大村湾南西部（No.7,9,10地点）ではその影響が大きい。

### 5. 結 言

本研究は新海水導入による大村湾の潮流変化をコンピュータシミュレーションしたものである。このシミュレーションは半サイクルに1億トンの新海水を導入することに基づいてシミュレートしたものであり、新海水の具体的な導入技術等に関しては、他の研究者により進められているが、このシミュレーション結果を要約すれば以下ようになる。

(1) 潮位変化について

- i) 新海水を1億トン導入することにより大村湾の平均水位は15cm上昇する。



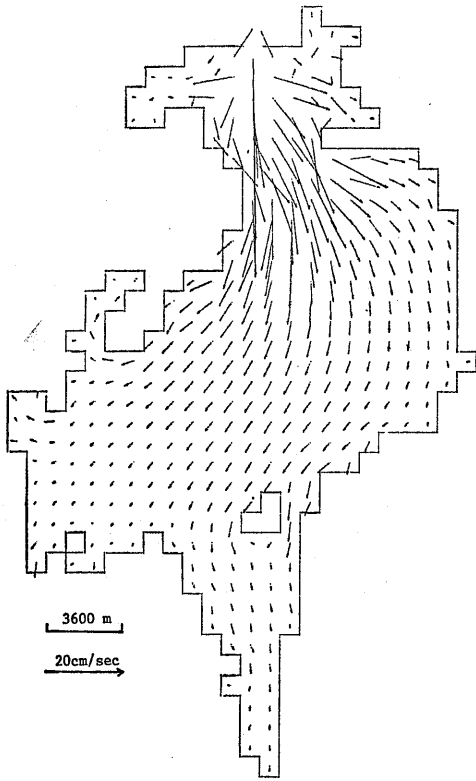


Fig. 8-(a) The Vector of Tidal Current

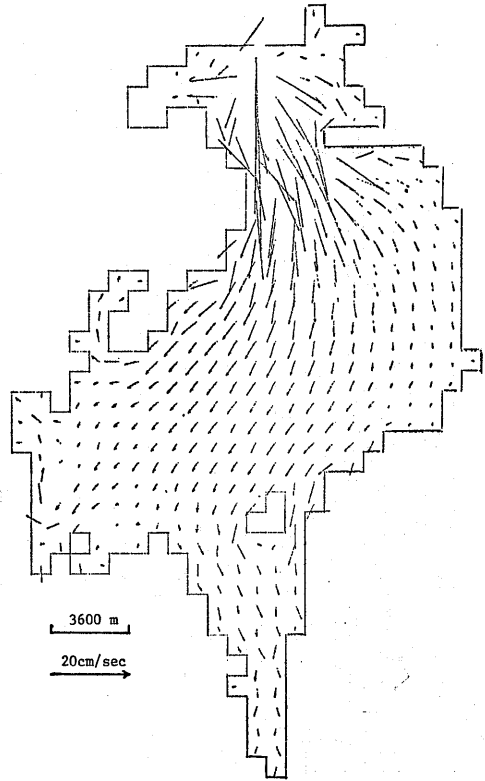


Fig. 8-(b) The Vector of Tidal Current

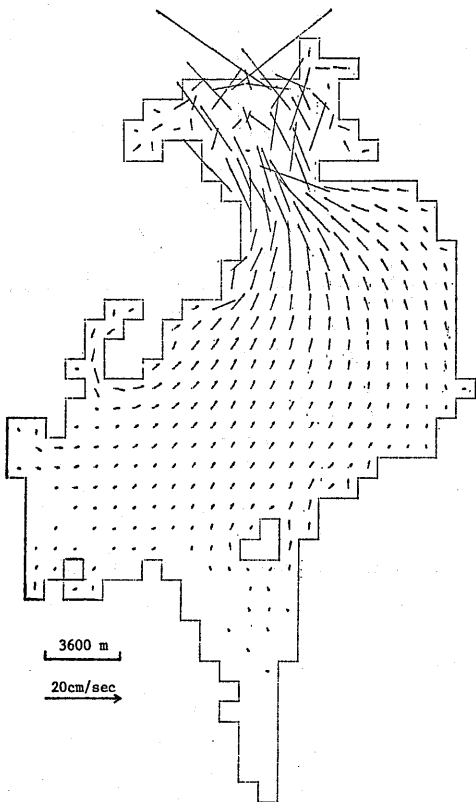


Fig. 9-(a) The Vector of Tidal Current

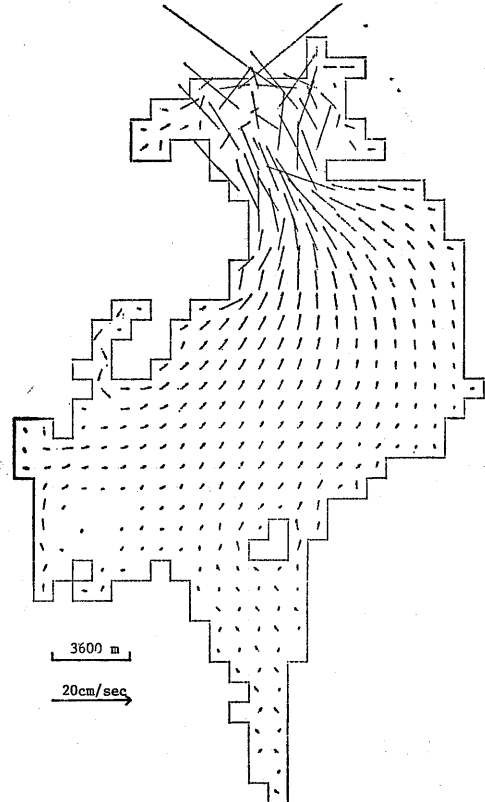


Fig. 9-(b) The Vector of Tidal Current

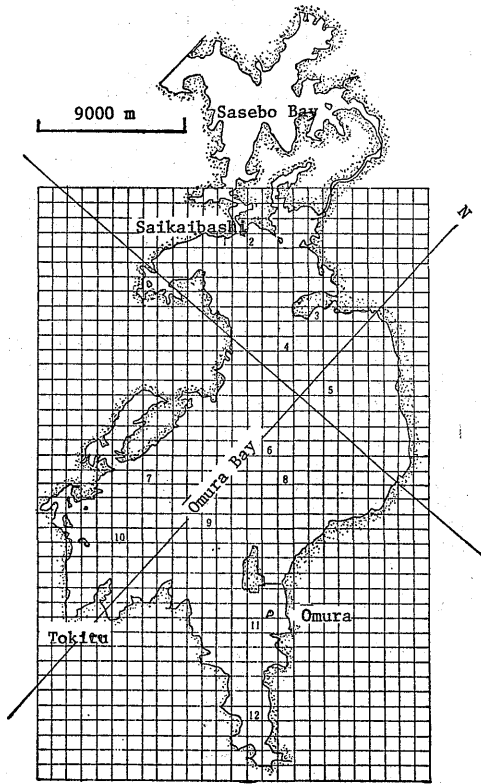


Fig. 10 The Points of Current Curve

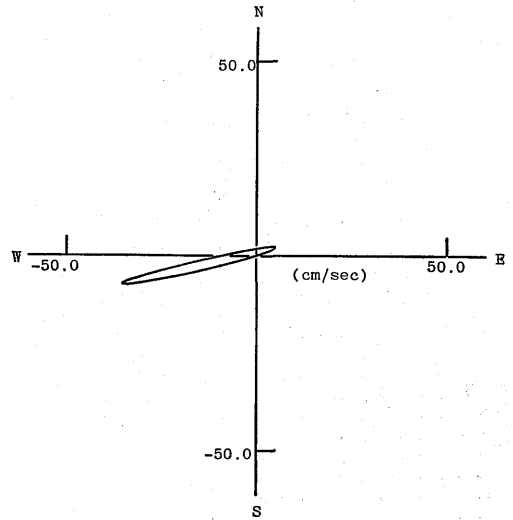


Fig. 12 The Current Curve (No2) 10<sup>8</sup> ton

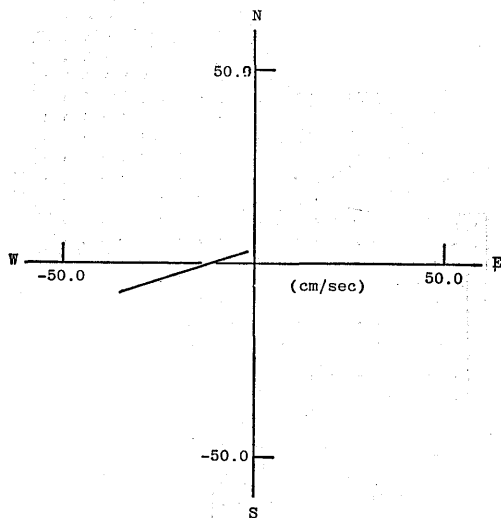


Fig. 11 The Current Curve (No2)

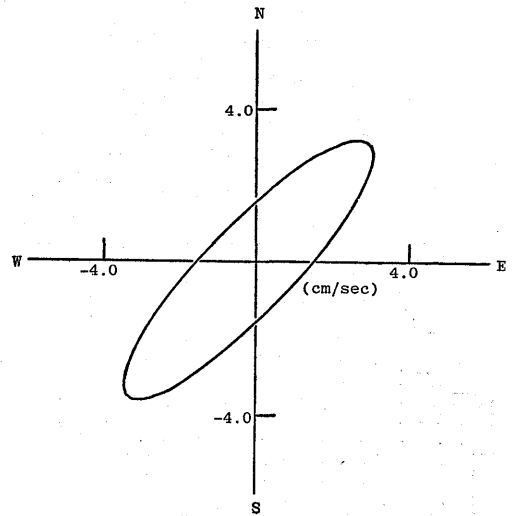


Fig. 13 The Current Curve (No3)



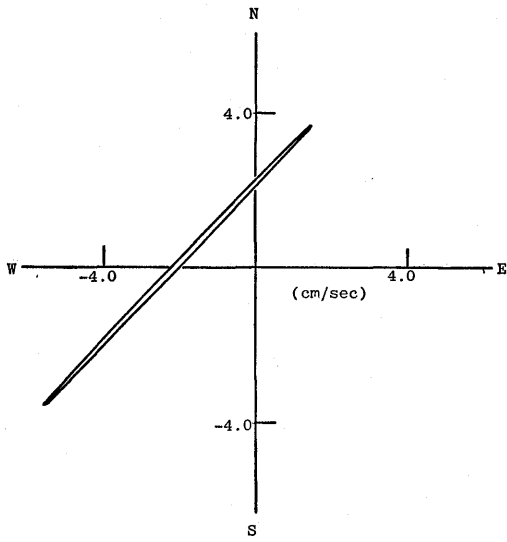


Fig. 14 The Current Curve (No3)-10<sup>8</sup>ton

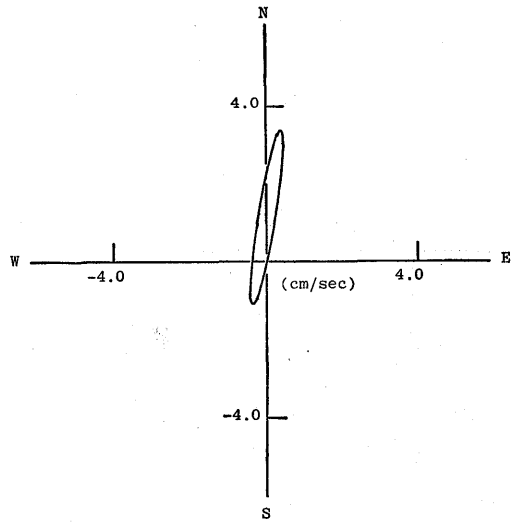


Fig. 16 The Current Curve (No7)-10<sup>8</sup>ton

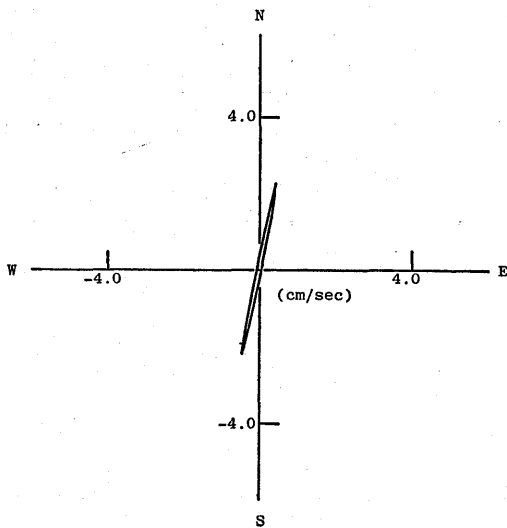


Fig. 15 The Current Curve (No7)

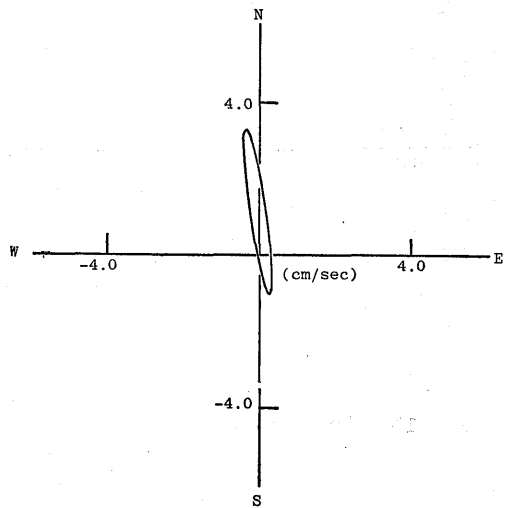


Fig. 17 The Current Curve (No9)

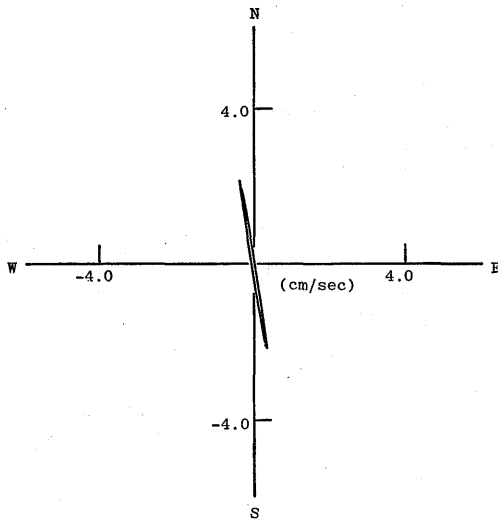
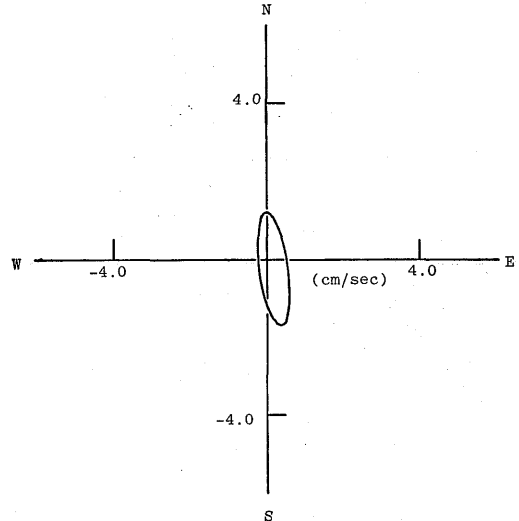
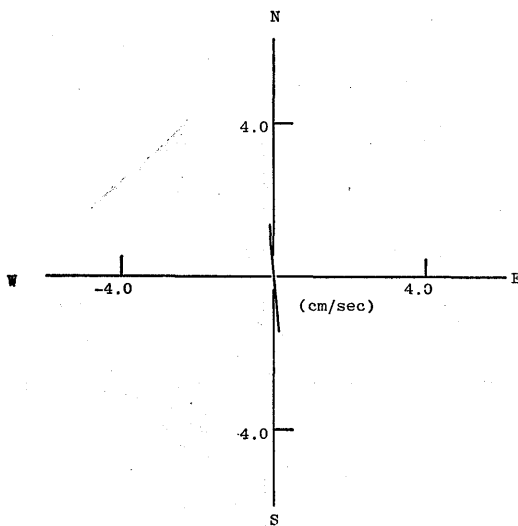
Fig. 18 The Current Curve (No9)- $10^6$  tonFig. 20 The Current Curve (No10)- $10^6$  ton

Fig. 19 The Current Curve (No10)

- ii) 潮位振幅は現状とほぼ等しい22cm程度である。
- (2) 潮流について
- i) 大村湾の中央部および北部では新海水導入による潮流変化はあまりみられない。
- ii) 新海水導入地点附近や大村湾南西部では新海水導入により潮流の大きさおよび、南北成分と東西成分の時間的位相差が生じる。
- iii) 大村湾全域について恒流成分が生じる傾向にある。

### (3) 新海水導入による潮流の拡散に対する影響

拡散については別報でくわしくのべるが、ここでは潮流変化が拡散におよぼす影響を述べてみると、次のようになる。

- i) 新海水導入により潮流の恒流成分が生じることは1サイクルについてみると拡散物質が潮流により移動することとなり、時津や津水湾に流入する汚染物質をより速く外海に流出させる。また潮流の各方向成分が時間差を生ずることは水平的な移流拡散を速進させる。よって新海水導入により生ずる恒流および時間差は大村湾に局部的に高濃度な分布を生じさせないと同時に、汚染物質をすみやかに外海に流出させる。

### 参考文献

- 1) 長崎県環境部 公共用水域水質測定結果 昭和45年~52年
- 2) 長崎大学水産学部 大村湾水質汚濁対策報告書 昭51.3)
- 3) 日本下水道公団 大村湾水質汚濁解析調査 昭51.3)
- 4) 長崎大学工学部 大村湾水質汚濁対策報告書 昭51.3
- 5) 富樫, 中村, 宇都, 田中 大村湾の潮汐水理模型実験 昭51.5 第23回海岸工学講演論文
- 6) 栗須, 野中, 宇都 大村湾の潮汐シミュレーション(1) 昭50.11 佐世保高専研報
- 7) 栗須, 野中, 宇都 大村湾の潮汐シミュレーション(2) 昭52.11 佐世保高専研報
- 8) 栗須, 中村, 田中 大村湾の流動および拡散 昭52.7 長崎大学研報