

# 瀬戸内海における流況の数値シミュレーション

和田 明\*・角 湯 正 剛\*\*

## 1. はじめに

瀬戸内海は、その規模が東西約 450 km, 南北 18~50 km 程度であり、その中に大小約 3 000 の島々が散在し、その流況はかなり複雑である。

著者らは、内海における物質の拡散問題を論じる第一歩として、内海において実施された流動の連続観測記録を統計解析し、内海の流況および分散特性の特徴として次の結果を得た<sup>1)</sup>。(i) 内海における潮流は、半日周潮流が卓越し、その潮流振幅は、幅の狭い海峡部では約 100 cm/sec と速く、湾や広い灘では 10~30 cm/sec 程度である。(ii) 内海中央部における半日程度以下のタイムスケールに対する拡散係数は、 $10^5 \sim 10^6$  cm<sup>2</sup>/sec である。

内海において比較的タイムスケールの短い物質の拡散問題を考える場合、内海の平均的な流況は重要な役割を果たす。本研究は、内海における流動の統計解析結果をもとに、内海を縦横 1 km, 鳴門、関門の海峡部を 500 m の格子群に分割し、内海の流況を数値シミュレーションした結果について論じたものである。

## 2. 内海における潮位変動記録の調和解析

内海における潮汐の調和定数は、多数の観測点について求められている。しかし、流速変動の連続観測を行った観測期間は約 1 か月間であり、その期間内の潮位変動がこれらの調和定数とどの程度差異があるのかを調べるために、内海の沿岸海域の 10 測点で、昭和 47 年 7 月~9 月に観測された潮位記録の調和解析を行い、調和定数の算定を行った。

図-1 に、流動の観測を行った期間である昭和 47 年 7 月 10 日より 8 月 14 日までの約 1 月間 (ケース II)、夏季の期間として、7 月より 9 月までの 3 月間 (ケ

ース III) の場合の調和解析結果と、気象庁により報告されている調和定数<sup>2)</sup> (ケース I) との位相差、潮汐振幅の比較を示す。田辺を位相 0 とした場合の他の各地点との位相差、潮汐振幅とも、内海の東部では、ケース II はケース I と比較して若干小さくなっている。ケース III も同様の傾向を示すが、その差は小さく、ケース I と比べてほとんど差異は認められない。昭和 45 年、46 年についても、冬季 (12 月~2 月)、夏季の各 3 月間の潮位記録について解析を行ったが、ケース I とほぼ同じ値となった。これらの結果より、1 月程度の観測期間より求められる調和定数は、長期間の潮位記録より算定されたものとは若干の相違を生じるが、3 月程度の観測期間より

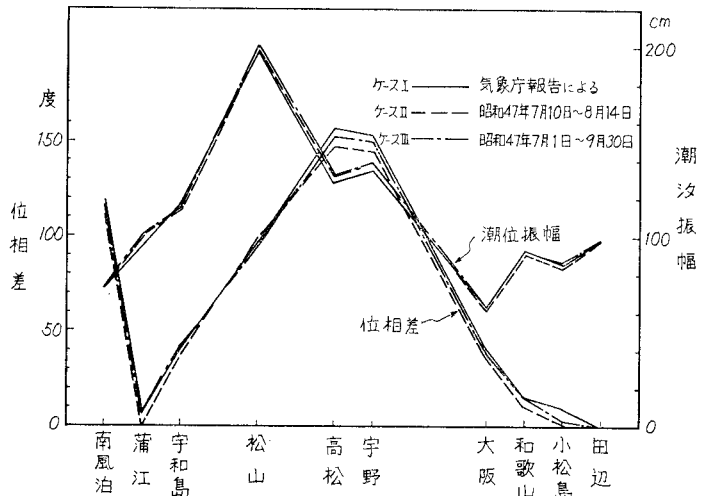


図-1 内海における  $M_2$  潮成分の潮汐振幅と位相差

求めたものはほとんど変化がなく、この程度の観測期間より求めた調和定数で、その地点のものを代表できることが認められた。

## 3. 内海における流況のシミュレーション

### (1) 基本方程式

海域における流動を支配する運動ならびに連続方程式は、次式で示される。

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + A_N \nabla^2 u + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + fv \quad \dots (1)$$

\* 正会員 工博 電力中央研究所土木技術研究所

\*\* 正会員 工修 電力中央研究所土木技術研究所

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \nabla^2 v + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - fu \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $x, y$ : 東, 北方向の座標軸,  
 $z$ : 鉛直方向の座標軸,  $u, v, w$ : それぞ  
 れ  $x, y, z$  方向の流速,  $P$ : 圧力,  $A_h$ ,  
 $A_z$ : 水平, 鉛直方向の渦動粘性係数,  $f=$   
 $2\omega \sin \varphi$ : コリオリ力,  $\omega$ : 地球自転角速  
 度,  $\varphi$ : 緯度,  $\rho$ : 水の質量,  $g$ : 重力加  
 速度。

式 (3) の左辺は微小であるので省略し, 式 (3) を水面  
 $S$  から水深  $z$  まで積分すると次式となる。

$$P - P_0 = \rho g(S + z) \dots \dots \dots (5)$$

ただし,  $P_0$ : 水面での圧力 (一定)。このとき

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho g \frac{\partial S}{\partial x}, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \rho g \frac{\partial S}{\partial y} \dots \dots \dots (6)$$

ここで, 平均流速  $U, V$  を次式で定義する。

$$U \equiv \frac{1}{b-S} \int_S^b u dz, \quad V \equiv \frac{1}{b-S} \int_S^b v dz \dots (7)$$

式 (4) を水面  $S$  より海底  $b$  まで積分する。

$$(b-S) \left\{ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right\} + w_b - w_s = 0 \dots \dots \dots (8)$$

ここで, 海面ならびに海底での  $w$  は

$$w_s = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y},$$

$$w_b = \frac{db}{dt} = u \frac{\partial b}{\partial x} + v \frac{\partial b}{\partial y} \dots \dots \dots (9)$$

式 (9) の  $u, v$  を  $U, V$  と等しいと仮定すると, 式 (8)  
 は次式となる。

$$-\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (10)$$

ここに,  $M = (b-S)U, \quad N = (b-S)V$ 。

同様に, 式 (1), (2) を海面  $S$  から海底  $b$  まで積分す  
 る。ただし,  $w$  に関する項は, 他の項と比較して微小で  
 あるので無視すると, 次式となる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + U \frac{\partial M}{\partial x} + V \frac{\partial M}{\partial y} = -gh \frac{\partial S}{\partial x} + A_h \nabla^2 M$$

$$+ A_z \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)_b - \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)_s \right\} + fN \dots \dots \dots (11)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + U \frac{\partial N}{\partial x} + V \frac{\partial N}{\partial y} = -gh \frac{\partial S}{\partial y} + A_h \nabla^2 N$$

$$+ A_z \left\{ \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)_b - \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)_s \right\} - fM \dots \dots \dots (12)$$

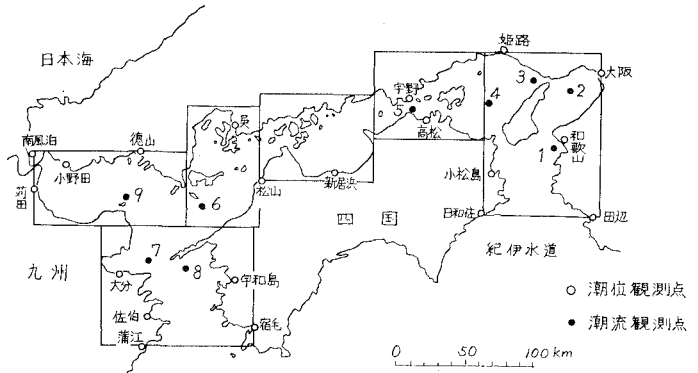


図-2 内海の計算領域と潮位, 流速観測点

ただし,  $h = b - S$ 。摩擦に関する項としては次式を用  
 いる。

$$A_z \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)_s = A_z \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)_s = 0$$

$$A_h \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)_b = k_b u \sqrt{u^2 + v^2} \doteq k_b U \sqrt{U^2 + V^2},$$

$$A_h \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)_b = k_b v \sqrt{u^2 + v^2} \doteq k_b V \sqrt{U^2 + V^2}$$

ここに,  $k_b$ : 海底摩擦係数。

以上より, 式 (10), (11), (12) が数値計算に用いる基  
 本方程式である。これらの式を差分化して数値シミュレ  
 ーションを行った。用いた差分法は, Lax-Wendroff に  
 よる差分法であり, 空間差分としては中央差分, 時間差  
 分としては前進差分を用いた。

(2) 数値計算条件

数値計算を行う領域としては, 図-2 に示すように紀  
 伊水道側田辺一日和佐地点より, 豊後水道側宿毛一蒲江  
 地点まで, 関門海峡は南風泊の地点まで含み, 図に示す  
 ように6ブロックに分割して計算を進めた。関門海峡,  
 鳴門海峡については, 500 m の小格子群とし, 他の海域  
 はすべて 1 km の格子群とした。格子点の数は, 約  
 24 000 点としている。

数値計算の条件としては, 実測結果より渦動粘性係数  
 $A_h = 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$  とし, 海底摩擦係数  $k_b = 0.0026$  とし  
 た。初期条件としては,  $S = 0, M = N = 0$  とし, 境界条  
 件としては, 境界点での潮位実測記録の調和解析結果よ  
 り,  $M_2$  潮のみを対象として, 表-1 のとおりとし, 潮  
 汐周期は 12 時間とした。数値計算の時間間隔は, 数値

表-1 数値計算の境界条件

地 点	紀伊水道		豊後水道		関門海峡
	田 辺	日 和 佐	宿 毛	蒲 江	南 風 泊
振 幅 (cm)	47.6	47.3	53.0	47.4	36.2
位 相 差 (度)	0	0	7.7	8.1	119.2

計算上の安定性から定まり、本計算においては7.5秒にとっている。また計算上の安定性を考え、関門、鳴門の両海峡については、基本式中の慣性項を省略したが、他の海域についてはすべての項を含んでいる。

#### 4. 数値シミュレーション結果とその考察

紀伊水道、豊後水道、関門海峡で潮位を設定し、3周期まで数値計算を行った。内海の中央部ではまだ若干計算は定常状態に達していないが、その他の海域ではほぼ潮位、流速とも定常状態となっている。

潮位について計算値と実測値の比較を行った。図-3に、内海より抽出した15点の半周期の潮位曲線を示す。全点ともほぼ周期12時間の正弦曲線形状となり、倍潮成分はほとんど認められない。各点での潮汐振幅を実測値と比較したのが図-4である。実測値としては、図-1の気象庁報告によるものを用いた。全体的に計算値の方が少し大きな値となっているが、新居浜より西側の諸地点については実測値と良く合致している。しかし、大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸の近辺である大阪、姫路、宇野、高松の各点については、計算値は実測値と比べてかなり大きな値となっている。図-5に同じ地点について、田辺を位相0とした場合の他の地点の位相差を示す。潮汐振幅とは逆に全体的に計算値は実測値より小さくなっている。新居浜より西側の諸地点については、潮汐振幅の場合と同様その差は小さく、ほぼ実測値と等しいと考えられる。しかし、備讃瀬戸、播磨灘についてはその差は大きい。一般に、内海の潮汐については次のことがいわれている<sup>2)</sup>。紀伊水道より北上する $M_2$ 潮浪は、約2時間で明石海峡に達するが、この海峡を通過するのに約2時間を要し、さらに播磨灘中央部に達するには約1時間を要する。また、潮汐振幅は、外洋から明石海峡に達するまでに約1/3に急減する。これらの事実より、 $M_2$ 潮浪の進行に対しては、大阪湾、明石海峡がかなり大きな障害物となっているが、今回の計算についてはそれが明確に現われなかった。内海の西側については、そのような障害物がないため全体的に良く合致するのである。

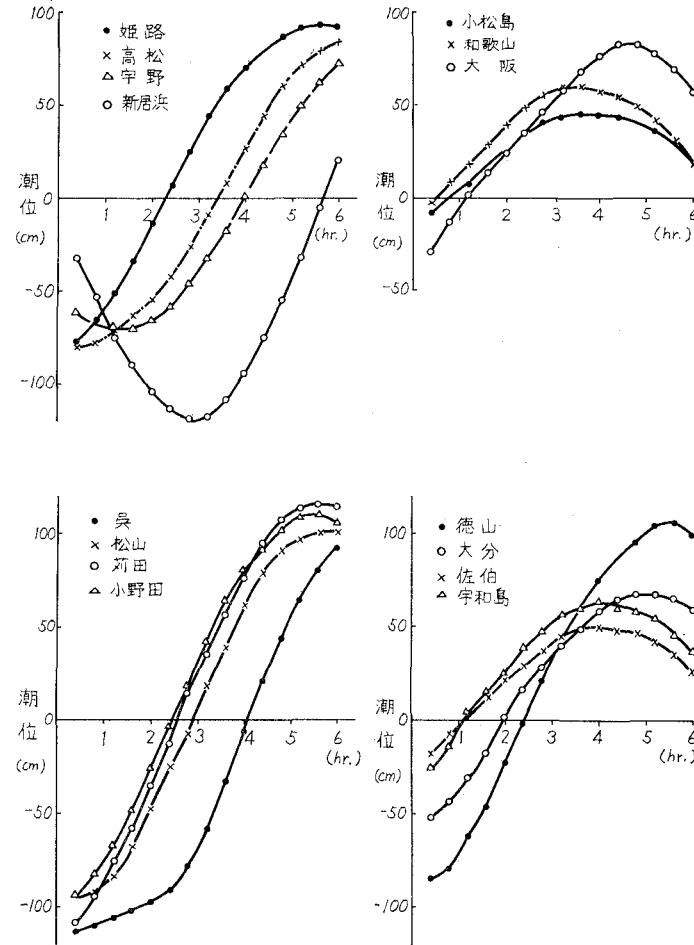


図-3 内海諸地点の潮位曲線の計算結果

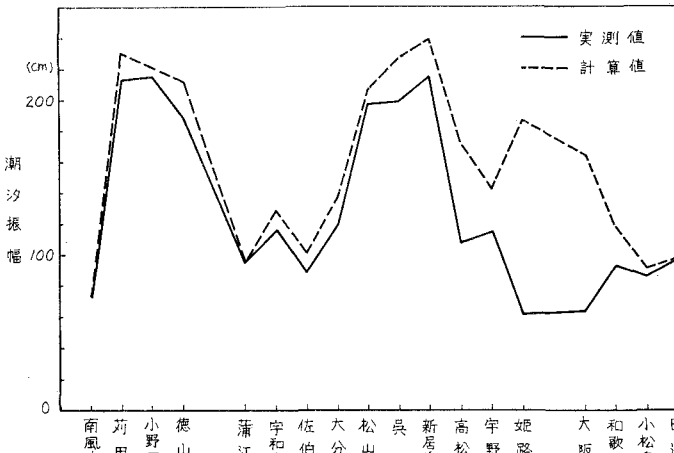


図-4 内海諸地点の $M_2$ 潮成分の潮汐振幅の実測値と計算値との比較

図-6に示す。豊後水道、紀伊水道につ

内海で、昭和47年7月~8月に環境庁で行った流動観測点における半日周潮流の潮流槽円の実測値と計算値との比較を

いては、通産省の実測によるものである。全体的に、楕円形状は、その方向、流速値に若干の差異は認められる

が、観測精度を考慮すれば良く一致しているものと考えられる。図中の数字は、図-3の潮位曲線の時間を示す。

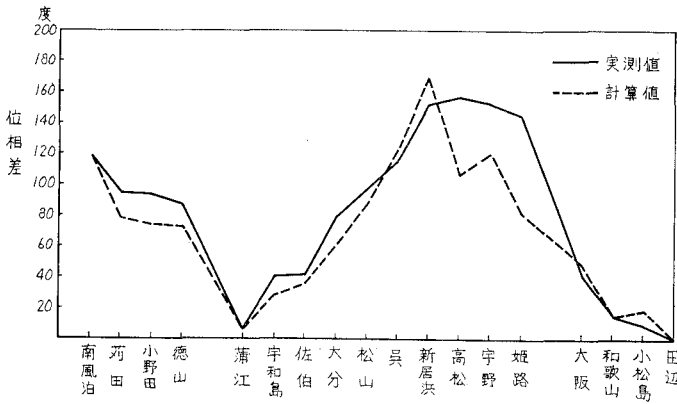
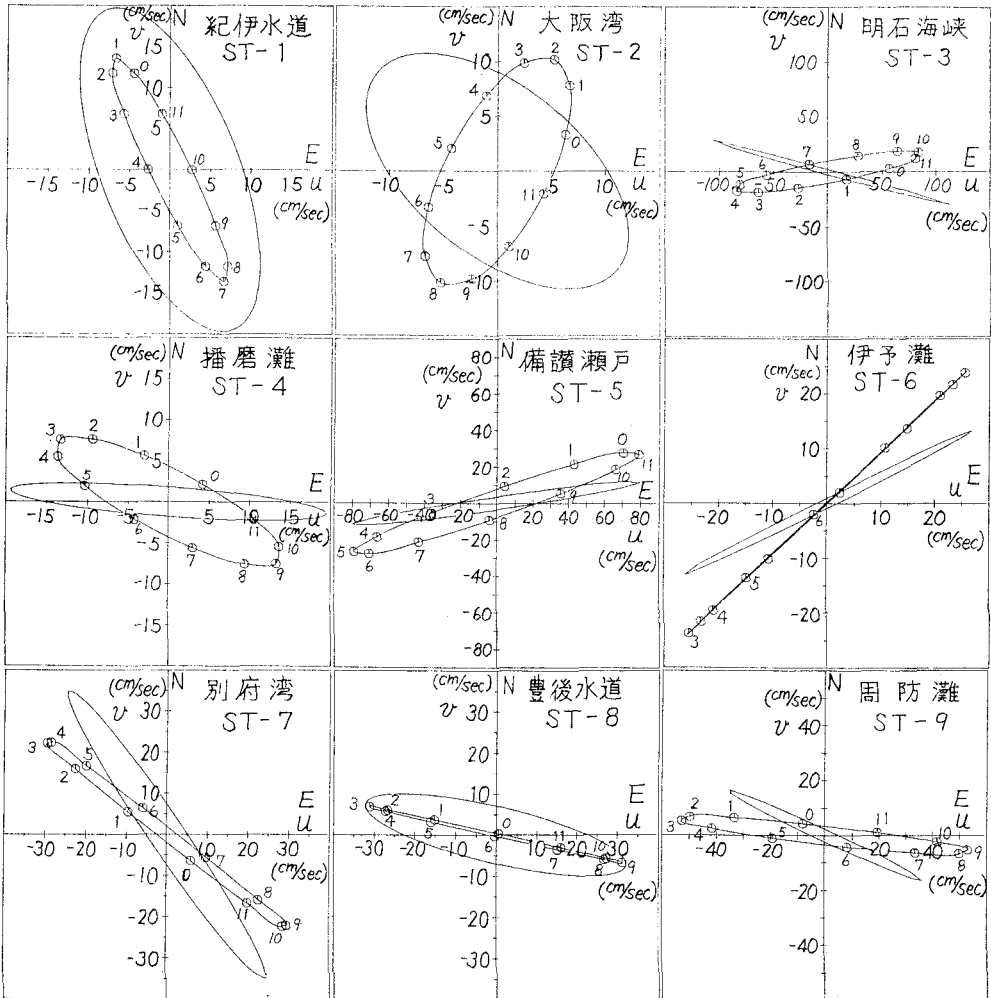


図-5 内海諸地点の  $M_2$  潮成分の位相差の実測値と計算値との比較

明石海峡で高低潮時、大阪湾では高低潮時の2時間前、紀伊水道では3時間前に最強流速となり、一般に観測されているものと一致している。しかし、明石海峡の潮位の位相差は実測値と差があるため、明石海峡、友ヶ島水道、紀伊水道ではほぼ同時刻に転流するという観測結果とは、明石海峡で若干の相違がある。大阪湾、紀伊水道については上記の実測結果を満足している。図には掲載しなかったが、鳴門海峡についてはその最強流速は約3.3 m/sec となり、海峡の中央部での実測値の8 knot (≒4 m/sec) とほぼ同じ値となっている。備讃瀬戸の転流は、ほ



( 図中 — 実測値 —○— 計算値 )

図-6 内海諸地点の  $M_2$  潮成分の潮流楕円の実測値と計算値との比較

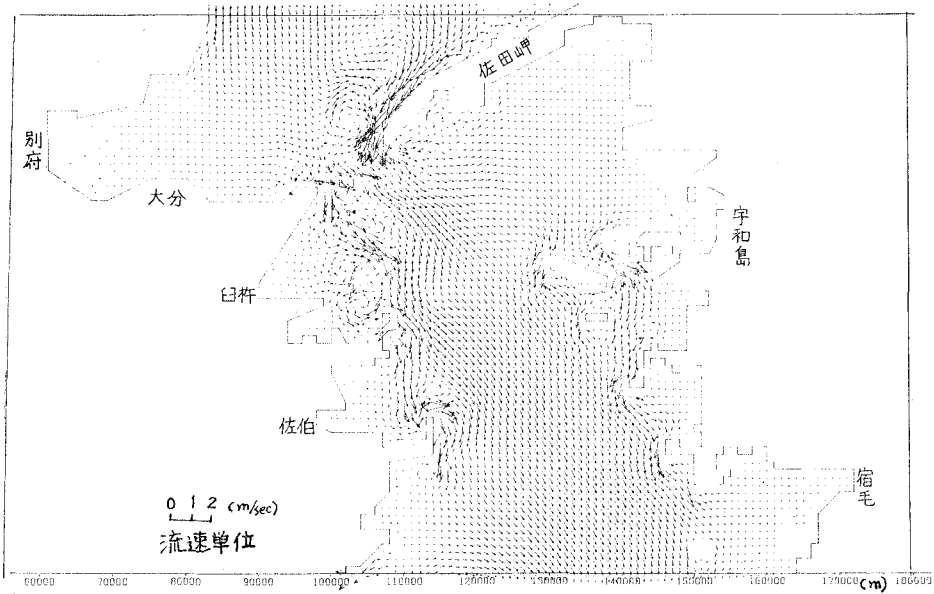


図-7 豊後水道における南流最強時の流速分布の計算結果

ほ宇野の高低潮時であり、実測結果と一致している。豊後水道側では、実測では、速吸瀬戸、周防灘でほぼ同時に転流し、伊予灘東部で約1時間、安芸灘東部で約1.5時間、来島海峡で約2時間それより遅れるとされているが、計算値もこれらと良く一致している。

内海全体の流況パターンについては、紙面の関係上掲

載できないので、その一部として、豊後水道の南流最強時の流速分布図を 図-7 に示す。別府湾より豊後水道に流入する流速分布は、この付近の実測結果を良く再現している。豊後水道に点在している島の上流側には反流域が生じ、かなり細部の流況パターンをも再現している。

内海における恒流については、播磨灘、大阪湾で時計回りの還流、巖難では、反時計回りの2つの還流、周防灘西部より別府湾に南下する恒流等が報告されている<sup>13,9)</sup>。本計算においても、一潮汐周期の残差流として恒流を求めたが、計算誤差が含まれるためか、明瞭な恒流パターンは認められなかった。しかし、周防灘より別府湾にかけては、図-8 に示すとおり、南下する恒流がみられ、一般に観測されるものと同じパターンである。

## 5. おわりに

瀬戸内海という大きな領域を対象に、かなり小さな格子群で流況のシミュレーションを行った。細部の検討は行わなかったが、明石海峡、播磨灘の潮汐を除いて、流況、潮汐ともほぼ実際の内海の状態を再現することができた。明石海峡、播磨灘については今後検討し、別な機会に報告する予定である。

これらの流況のシミュレーション結果をもとに、タイムスケールの比較的短い物質の移流、分散問題を解く予定である。

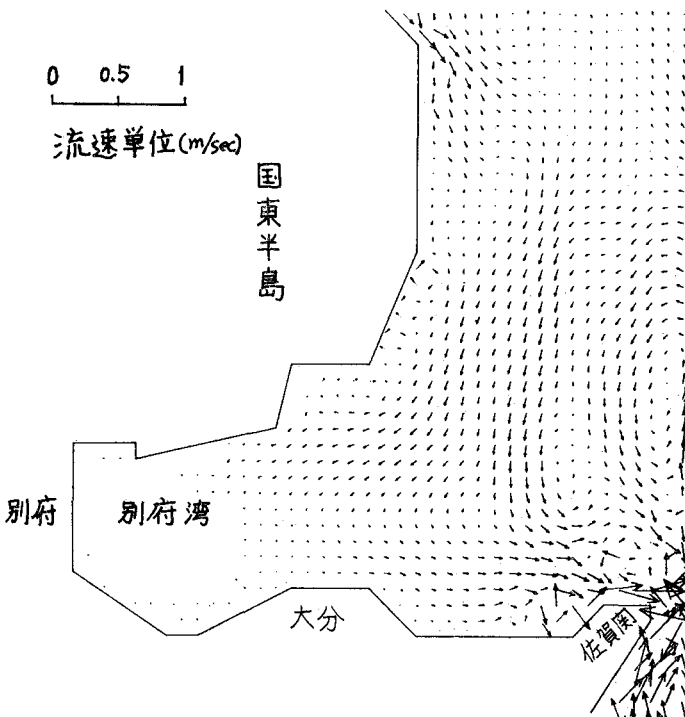


図-8 周防灘、別府湾における恒流速の計算結果

最後に、本研究の計算を手伝っていただいた三菱総合研究所の安達氏、海老原嬢に謝意を表す。

#### 参 考 文 献

1) 和田 明・角湯正剛：瀬戸内海における流況と

分散特性，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 297～302，1974.

2) 海洋気象学会：瀬戸内海の気象と海象，pp. 227～240，Vol. 13，No. 1，2 合併，1967.

3) 産業公害防止協会：瀬戸内海海況調査報告書.

---