

サンゴ礁造園モデル海域の海水流動特性 —その1, 中城湾の海水流動シミュレーション—

河野 健^{*1} ザビエ・レンハルト^{*2}

サンゴ礁の回復を人為的に促進する技術を開発する為に1988年より沖縄県と共同で「サンゴ礁造園技術の研究開発」を進めている。

知念村地先のサンゴ礁造園モデル海域には人口ノルが設置され、サンゴの移植実験が行われているが、この海域の環境特性を把握するための手段の一つとして、海水の流動特性に着目した。そして、この海域の流れが、この海域を含む中城湾全体の流れの中のどのような部分であるかを認識するため、数値シミュレーションを行った。

その結果、中城湾内に潮汐残差流が存在する可能性が明らかとなり、また、シミュレーションを行う上での問題点が明らかとなった。

キーワード：サンゴ礁造園技術、海水流動の数値シミュレーション、潮汐残差流

The Characteristic of the Flow at the Model Area for the Sea Test of the “Coral Reef Project” —PART I The Numerical Simulation on the Flow in Nakagusuku Bay—

Takeshi KAWANO^{*3} Xavier LENHARDT^{*4}

In order to develop techniques that promote the restoration of coral communities, the “Coral Reef Project” was started in 1988 in corporation with the OKINAWA prefecture.

An artificial knoll was constructed at the model area for the sea test, located near the shore of Chinen-son Village in Nakagusuku Bay. Here experiments in coral transplantation were carried out.

As a way to grasp environmental conditions of this area, numerical simulations of the water circulation of Nakagusuku Bay were studies.

*1 海洋開発研究部

*2 科学技術庁フェロー (研究当時 海洋開発研究部)

*3 Marine Research and Technology Department

*4 S. T. A. Fellowship Awardee

The results pointed to a possible existence of tidal residual current, and also clarified some problems concerning the simulation technique.

Key Words : Coral Reef Project, Numerical Simulation of water circulation, Tidal Residual Current

1 はじめに

サンゴ礁は生きた防波堤として、台風などによる波浪や海岸侵食から沖縄本土をまもるばかりでなく、生産性の高い海域として、漁政上も重要であり、また、観光資源としても重要な役割を果たしている。

しかし、近年、赤土の流入や、オニヒトデの異常発生による食害によって、サンゴは多大な影響をうけている。海洋科学技術センターでは、サンゴの回復を人為的に促進する技術を沖縄県と共同で研究開発することとし、1989年より「サンゴ礁造園技術の研究開発」に着手した。1988年の沖縄本島周辺のサンゴ礁の現状調査¹⁾などを通じ、沖縄県南部の知念半島南部をサンゴ礁造園モデル海域とし、ここにサンゴ破片の移植基盤である人工ノルを設置し、サンゴを移植し、その成長をモニターしてきた。²⁾

サンゴ礁造園モデル海域のある中城湾は、北部を勝連半島、南部は与那原町から知念村へと西から東へ突出する知念半島によって囲まれ、東側に開口した南北約20km、東西約10kmのCの字形の湾である。(図1) その上、この中城湾の東側には北から浜比嘉島、浮原島、南浮原島、津堅島、久高島などの島嶼が並び、しかもこれら島嶼の他にもバリアリーフによってふさがれた複雑な地形となっている。リーフの外側のスロープは急峻で、リーフ内の水深が数10mであるのに、外側は4~8kmで水深200mに達する。(図2) このような複雑な地形を有する海域においては、潮汐や風によって恒流が存在する可能性が高いと言える。恒流は湾内の物質拡散や、湾内水の交換に重要な役割を果たすことが知られており、知念村地先に位置するサンゴ礁造園モデル海域の流れが、中城湾内全体の流れの中のどのような部分であるのかを確認することは大変重要である。現在、中城湾のような比較的広域にわたる流れを同時に観測する手法

は確立しているとは言えないので、数値シミュレーションによって、その概要を把握することを試みた。この数値シミュレーションは、潮汐に起因する潮汐残差流を考慮している。

2 シミュレーション手法

2.1 支配方程式³⁾

座標系を図3のようにとる。鉛直上向きにZ、東方向が、北方向をYとする。平均海面をZ=0とし、平均水面から海底までの深さをh、平均水面から海面までの高さをととする。

このように座標系を設立すると、回転する地球上では、X、Y方向に対する運動方程式として、

$$\frac{Du}{Dt} = 2\omega(v \sin \phi - w \cos \phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Kh \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau^{(x)}}{\partial z} \dots\dots\dots 2.1.1$$

$$\frac{Dv}{Dt} = 2\omega(u \sin \phi - w \cos \phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Kh \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau^{(y)}}{\partial z} \dots\dots\dots 2.1.2$$

ただし、

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \dots\dots\dots 2.1.3$$

ここでu, v, wはx, y, z方向の流速成分、 ρ は海水の密度、 ω は地球自転の角速度、 ϕ は緯度、pは圧力、khは渦動粘性係数の水平成分である。 $\tau^{(x)}$ 、 $\tau^{(y)}$ はそれぞれx, y方向の摩擦応力であ

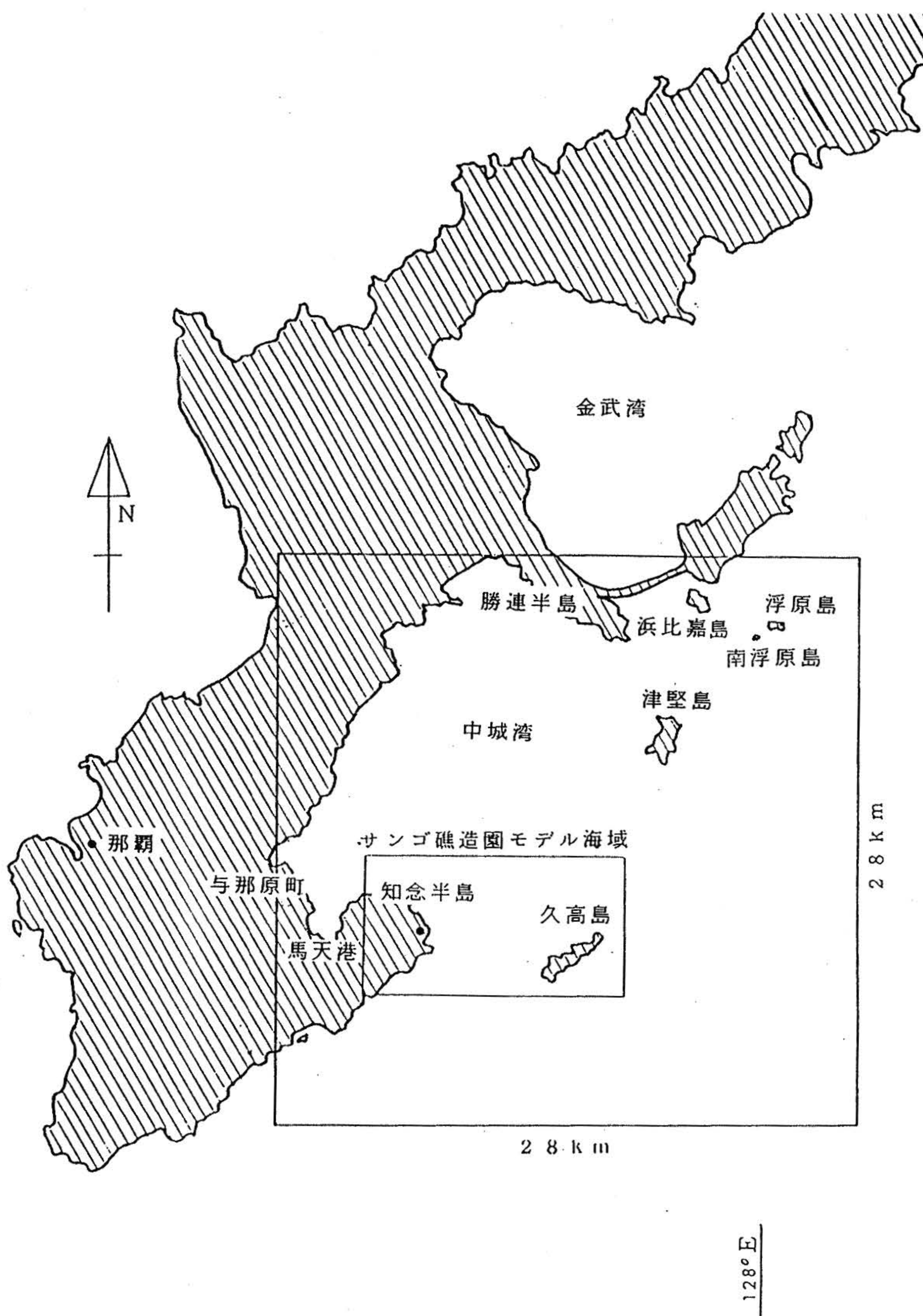


図 1 数値シミュレーション海域
Fig. 1 Simulated Area (outer square)

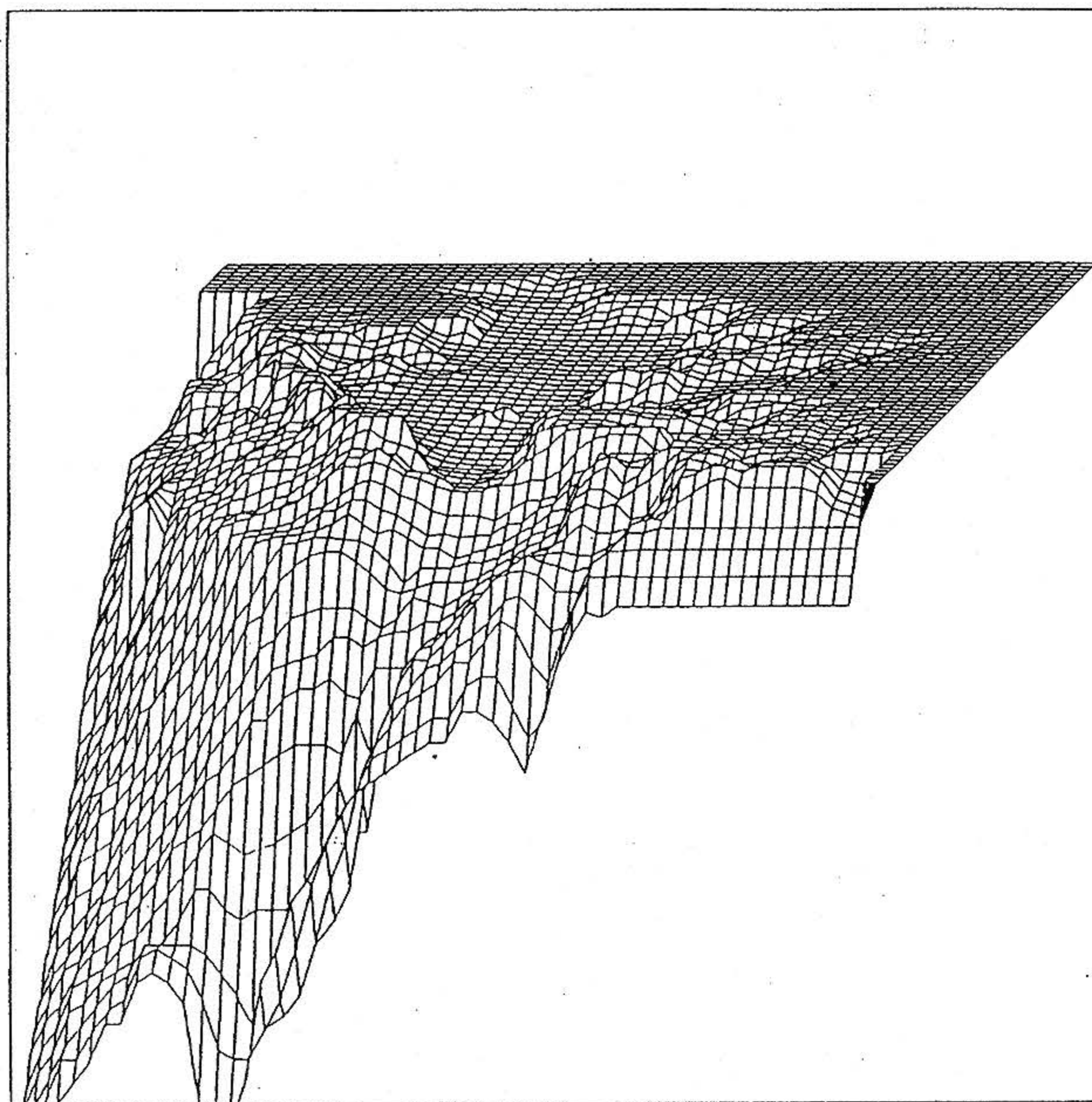


図 2 数値シミュレーション海域の海底地形の鳥瞰図

Fig. 2 Perspective View of Simulated Area

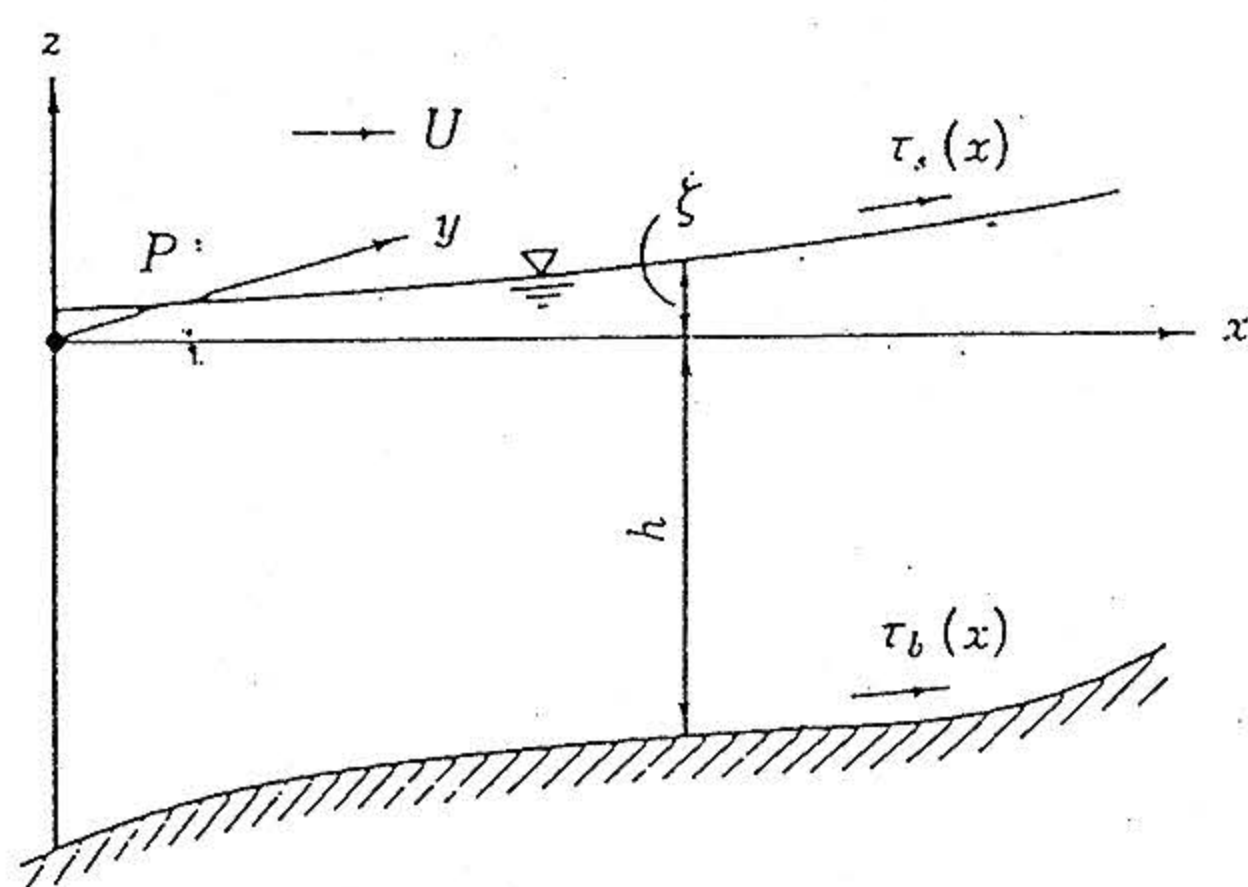


図 3 座標系

Fig. 3 Coordinate System

る。

また連続の式は、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots 2.1.4$$

であり、これを用いると、

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) \quad \dots\dots\dots 2.1.5$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(vw) \quad \dots\dots\dots 2.1.6$$

と書ける。

また圧力 p は静水圧分布すると考えて、

$$p = P_0 + \rho g (\zeta - z) \quad \dots\dots\dots 2.1.7$$

但し、ここで P_0 は大気圧、 ζ は平均水面からの海面高さである。式2.1.1, 2.1.2の左辺を式2.1.5, 2.1.6とし、式2.1.7を代入して、海底 ($z = -h$) から海面 ($z = \zeta$) まで積分すると、

$$\frac{\partial u(\zeta + h)}{\partial t} + \frac{\partial u^2(\zeta + h)}{\partial x} + \frac{\partial uv(\zeta + h)}{\partial y}$$

$$=fv(\zeta+h)-g(\zeta+h)\frac{\partial\zeta}{\partial z} \\ +K_h(\zeta+h)\left(\frac{\partial^2u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u}{\partial y^2}\right)+\frac{\tau_s^{(x)}-\tau_b^{(x)}}{\rho(h+\zeta)} \\ \dots\dots\dots 2.1.8$$

$$\frac{\partial v(\zeta+h)}{\partial t}+\frac{\partial uv(\zeta+h)}{\partial x}+\frac{\partial v^2(\zeta+h)}{\partial y} \\ =-fu(\zeta+h)-g(\zeta+h)\frac{\partial\zeta}{\partial y} \\ +K_h(\zeta+h)\left(\frac{\partial^2v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2v}{\partial y^2}\right)+\frac{\tau_s^{(y)}-\tau_b^{(y)}}{\rho(h+\zeta)} \\ \dots\dots\dots 2.1.9$$

ここで f はコリオリ係数($=2\omega\sin\phi$), τ_s は海面での摩擦応力 τ_b は海底での摩擦応力である。また, 式2.1.8, 2.1.9を導くあたって w を含むコリオリ力は他の項に比して無視できるものとして省略した。また, 大気圧 P_0 は一定とした。

$$\tau_s^{(x)}, \tau_s^{(y)} \text{ はそれぞれ} \\ \tau_s^{(x)} = \gamma_s^2 \rho_a U_x \sqrt{U_x^2 + U_y^2}, \\ \tau_s^{(y)} = \gamma_s^2 \rho_a U_y \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad \dots\dots 2.1.10$$

ここで, U_x, U_y はそれぞれ風速の x 成分, y 成分, γ_s^2 は海面との摩擦係数, ρ_s は空気の密度である。また,

$$\tau_b^{(x)}, \tau_b^{(y)} \text{ は} \\ \tau_b^{(x)} = \gamma_b^2 \rho u \sqrt{u^2 + v^2}, \\ \tau_b^{(y)} = \gamma_b^2 \rho v \sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots\dots 2.1.11$$

と表される。ここで γ_b^2 は海底との摩擦係数である。また, 連続の式も同様に海底から海面まで積分すると,

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}+\frac{\partial u(\zeta+h)}{\partial z}+\frac{\partial v(\zeta+h)}{\partial y}=0 \\ \dots\dots\dots 2.1.12$$

となる。

2.2 差分展開⁴⁾

式2.1.8, 2.1.9及び式2.1.12を差分展開して解くが, その際各変数は, 図4の様な位置に定義する。即ち, 格子点上(○印)に平均水面から高さ h , 格子中央(+印)平均水面からの高さ ζ , 格子点と格子点の中央(△印)に流速 u, v を定義する。

これを時間に関して, 前進差分, 空間に関して中心差分により展開する。即ち,

$$SX^{i,j}(t+\Delta t)=SX^{i,j}(t)-\frac{g}{2}\left(\frac{\Delta t}{\Delta S}\right)\times \\ \left\{\zeta^{i,j}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)+\zeta^{i-1,j}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)+h^{i,h}+h^{i,j+1}\right\} \\ \times\left\{\zeta^{i,j}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)-\zeta^{i-1,j}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)\right\}+BX^{i,j} \\ \dots\dots\dots 2.2.1$$

$$SY^{i,j}(t+\Delta t)=SY^{i,j}(t)-\frac{g}{2}\left(\frac{\Delta t}{\Delta S}\right)^2\times \\ \left\{\zeta^{i,j-1}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)+\zeta^{i,j}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)+h^{i,j}+h^{i+1,j}\right\} \\ \times\left\{\zeta^{i,j-1}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)-\zeta^{i,j}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)\right\}+BY^{i,j} \\ \dots\dots\dots 2.2.2$$

ここで

$$\left\{\begin{array}{l} SX=M\frac{\Delta t}{\Delta S}=(\zeta+h)u\frac{\Delta t}{\Delta S} \\ SY=M\frac{\Delta t}{\Delta S}=(\zeta+h)v\frac{\Delta t}{\Delta S'} \end{array}\right. \\ \dots\dots\dots 2.2.3$$

$$\begin{aligned}
BX_{i,j} = & -\gamma_b^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta S} u_{i,j} \sqrt{(u_{i,j})^2 + \frac{1}{16} (v^{i-1,j} + v^{i-1,j+1} + v^{i,j} + v^{i,j+1})^2} \\
& + \frac{f \Delta t}{4} (SY^{i-1,j} + SY^{i-1,j-1} + SY^{i,j} + SY^{i,j+1}) \\
& - \frac{1}{4} \frac{\Delta t}{\Delta S} \{ (SX^{i,j} + SX^{i+1,j}) (u_{i,j} + u^{i+1,j}) - (SX^{i-1,j} + SX^{i,j}) (u^{i-1,j} + u_{i,j}) \} \\
& - \frac{1}{4} \frac{\Delta t}{\Delta S} \{ (SX^{i,j-1} + SX^{i,j}) (v^{i-1,j} + v^{i,j}) - (SX^{i,j} + SX^{i,j+1}) (v^{i-1,j+1} + v^{i,j+1}) \} \\
& + K_h \frac{\Delta t^2}{2 \Delta S^2} \{ (\zeta_{i,j} + \zeta^{i-1,j} + h_{i,j} + h^{i,j+1}) (u^{i+1,j} + u^{i-1,j} + u^{i,j+1} + u^{i,j-1} - 4u_{i,j}) \} \dots\dots\dots 2.2.4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
BY_{i,j} = & -\gamma_b^2 \frac{\Delta t^2}{\Delta S} v_{i,j} \sqrt{(v_{i,j})^2 + \frac{1}{16} (u^{i,j-1} + u^{i,j} + u^{i+1,j-1} + u^{i+1,j})^2} \\
& - \frac{f \Delta t}{4} (SX^{i,j-1} + SX^{i,j} + SX^{i+1,j-1} + SX^{i+1,j}) \\
& - \frac{1}{4} \frac{\Delta t}{\Delta S} \{ (SY^{i,j} + SY^{i+1,j}) (u^{i+1,j-1} + u^{i+1,j}) - (SY^{i-1,j} + SY^{i,j}) (u^{i,j-1} + u_{i,j}) \} \\
& - \frac{1}{4} \frac{\Delta t}{\Delta S} \{ (SY^{i,j-1} + SY^{i,j}) (v^{i,j-1} + v^{i,j}) - (SY^{i,j} + SY^{i,j+1}) (v^{i,j} + v^{i,j+1}) \} \\
& + K_h \frac{\Delta t^2}{2 \Delta S^2} \{ (\zeta_{i,j} + \zeta^{i,j-1} + h_{i,j} + h^{i+1,j}) (v^{i+1,j} + v^{i-1,j} + v^{i,j+1} + v^{i,j-1} - 4v_{i,j}) \} \dots\dots\dots 2.2.5
\end{aligned}$$

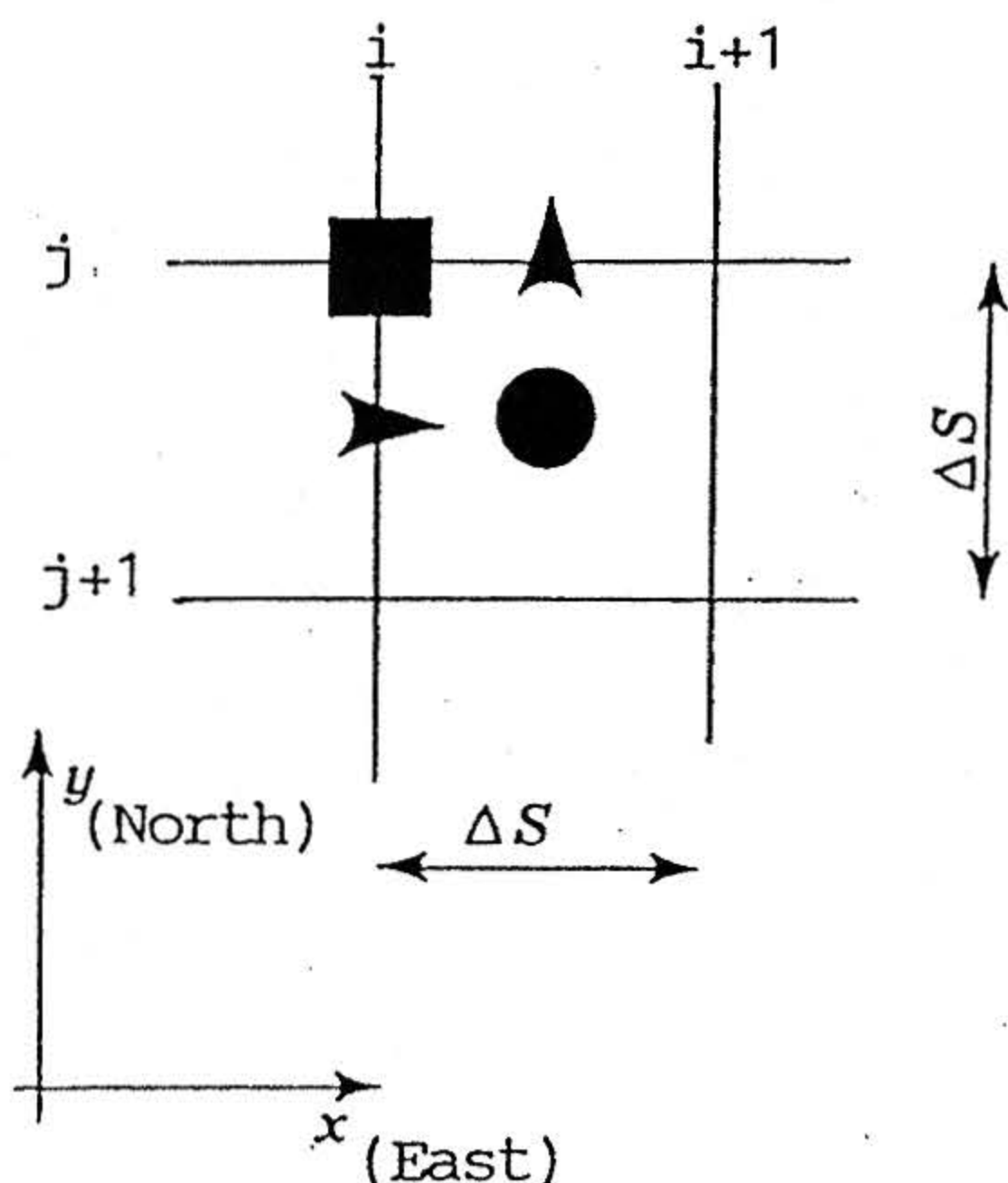


図 4 流速、深度、潮高の定義点

Fig. 4 Definition of (i, j)

- $h_{i,j}$: 水深 : water depth
- $\zeta_{i,j}$: 潮高 : surface elevation
- ▶ $u_{i,j}$: 流速 (X成分)
: u-velocity (along x-axis) and $Sx_{i,j}$
- ▲ $v_{i,j}$: 流速 (Y成分)
: v-velocity (along y-axis) and $Sy_{i,j}$

また、平均水面からの高さは、

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) &= \zeta_{i,j} \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) - SX^{i+1,j}(t) \\ &+ SX^{i,j}(t) - SY^{i,j}(t) + SY^{i,j+1}(t) \\ &\dots\dots\dots 2.2.6 \end{aligned}$$

と差分展開される。

時間進行に関しては、図 5に示す様に、

- ①時刻 t における SX , SY を $SX(t)$, $SY(t)$ とする。
 - ②時刻 $1/2\Delta t$ 後の海面のデータ $\zeta(t+1/2\Delta t)$ をもとに、 $SX(t+\Delta t)$, $SY(t+\Delta t)$ を計算する。
 - ③この $SX(t+\Delta t)$, $SY(t+\Delta t)$ をもとに $\zeta(t+3/2\Delta t)$ を計算する。
- という様に SX , SY と ζ とが交互に計算されて行く。

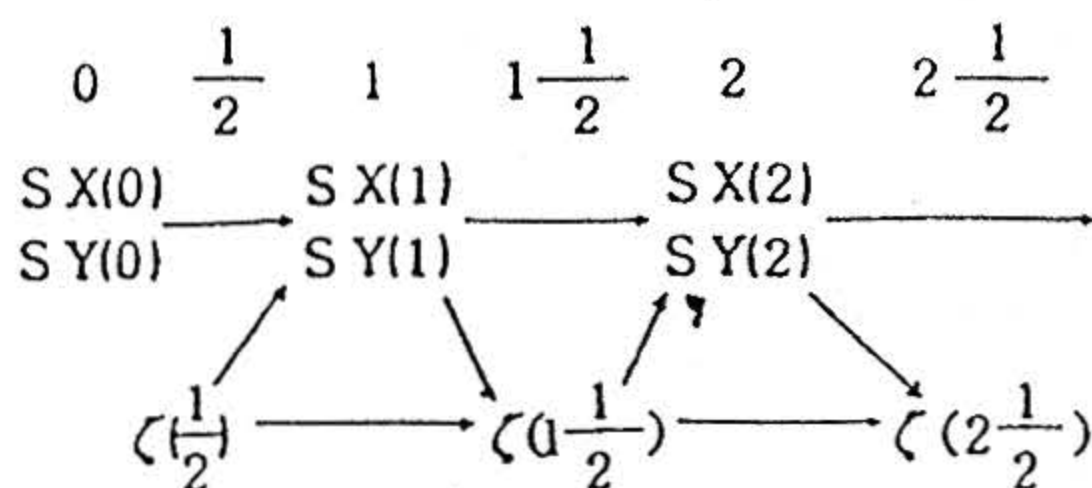


図 5 時間進行
Fig. 5 Time Marching

2.3 境界条件

1) 海底地形及び計算領域

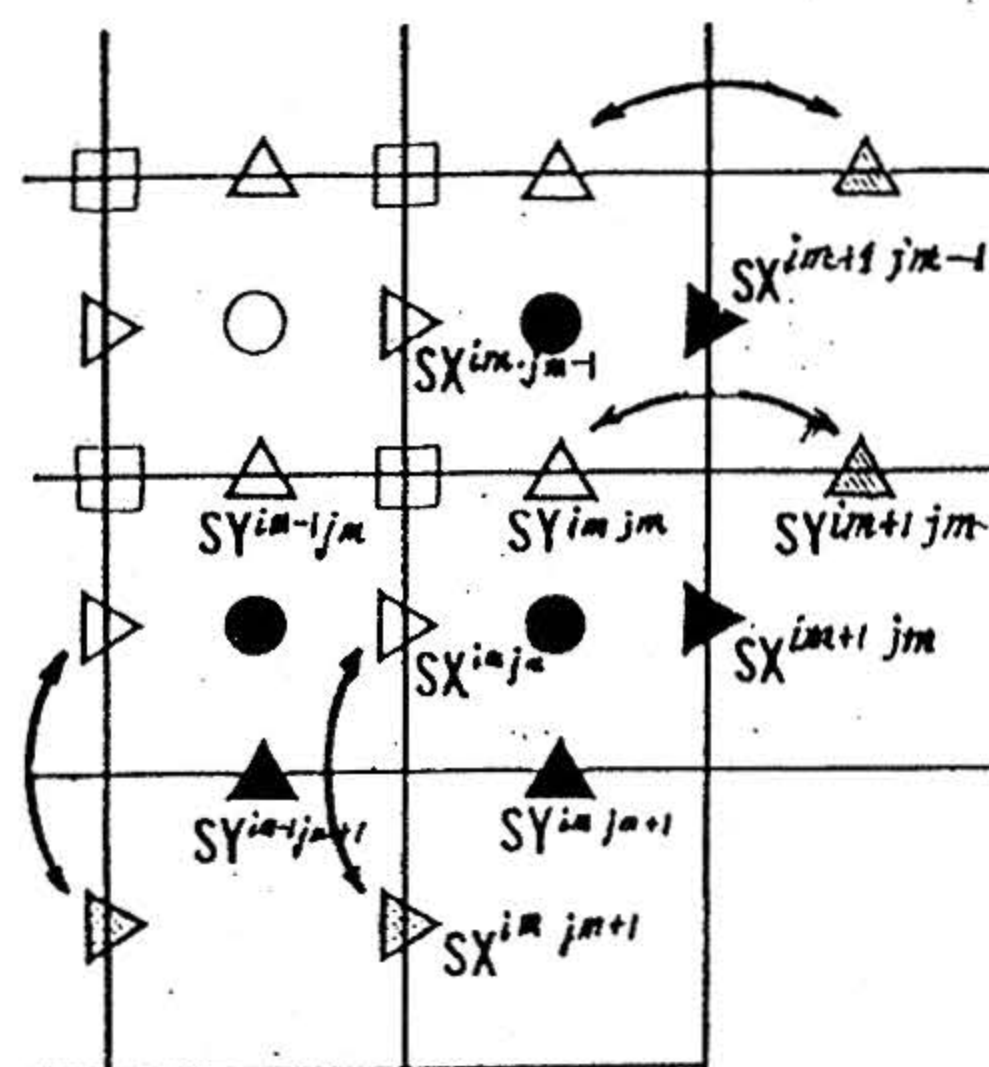
海底地形即ち h に関しては、海上保安庁による海図から読み取った。但し、リーフ上に関しては、深度は全て2mと仮定した。また、計算領域は東北部及び南西部の一部を除き海岸線から深度200mの地点までとした。

2) 海面高 ζ について、島嶼及びリーフの外側で深度200mの地点において、半日周期の下記のような正弦関数で与えられる潮汐を境界条件として与えた。

$$\zeta = A1 \cdot \sin(2\pi t/B1) \quad \dots\dots\dots 2.3.1$$

ここで $A1$ が潮汐の振幅、 $B1$ が周期である。

また流速に関しては、開境界と平行な方向に関しては等値、垂直な方向に関しては下記のような連続の式によって求めている。(図 6)



- 潮汐をサイン関数で与える点
: point of tide input
- ▷ 等値外挿 : point of equal extrapolation
- ▶ 連続の式に基づく計算値
: calculated from Continuity Eq.

図 6 開境界での SX , SY の外挿法

Fig. 6 Open Boundary Condition

$$\begin{aligned} SX^{im+1,j}(t) &= SX^{im,j}(t) - \{ (SY^{im,j}(t) \\ &- SY^{im,j+1}(t)) + (\zeta^{im,j}(t+1/2\Delta t) \\ &- \zeta^{im,j}(t-1/2\Delta t)) \} \end{aligned}$$

$$SY^{im+1,j} = SY^{im,j} \quad \dots\dots\dots 2.3.2$$

$$\begin{aligned} SY^{i,jm+1}(t) &= SY^{i,jm}(t) - \{ (SX^{i+1,jm}(t) \\ &- SX^{i,jm}(t)) + (\zeta^{i,jm}(t+1/2\Delta t) \\ &- \zeta^{i,jm}(t-1/2\Delta t)) \} \end{aligned}$$

$$SX^{i,jm+1} = SX^{i,jm} \quad \dots\dots\dots 2.3.3$$

但し、角では

$$\begin{aligned} SX^{im+1,jm} &= SY^{im,jm+1} \\ &= 1/2 \{ SX^{im,jm} - SY^{im,jm} - \zeta^{im,jm}(t+1/2\Delta t) \\ &- \zeta^{im,jm}(t-1/2\Delta t) \} \quad \dots\dots\dots 2.3.4 \end{aligned}$$

(3) 海岸線

海岸線に関してはno-slipの境界条件、即ち境界での流速を0とする条件を課してる。(図 7) 即ち、 $j \leq b$ が海岸線とすると、

$$SX^{i,b-1} = -SX^{i,b}, SY^{i,b} = 0 \quad \dots\dots\dots 2.3.5$$

又, $i \leq b$ が海岸線とすると,

$$SY^{b-1,j} = SY^{b,j}, SX^{b,j} = 0 \quad \dots\dots\dots 2.3.6$$

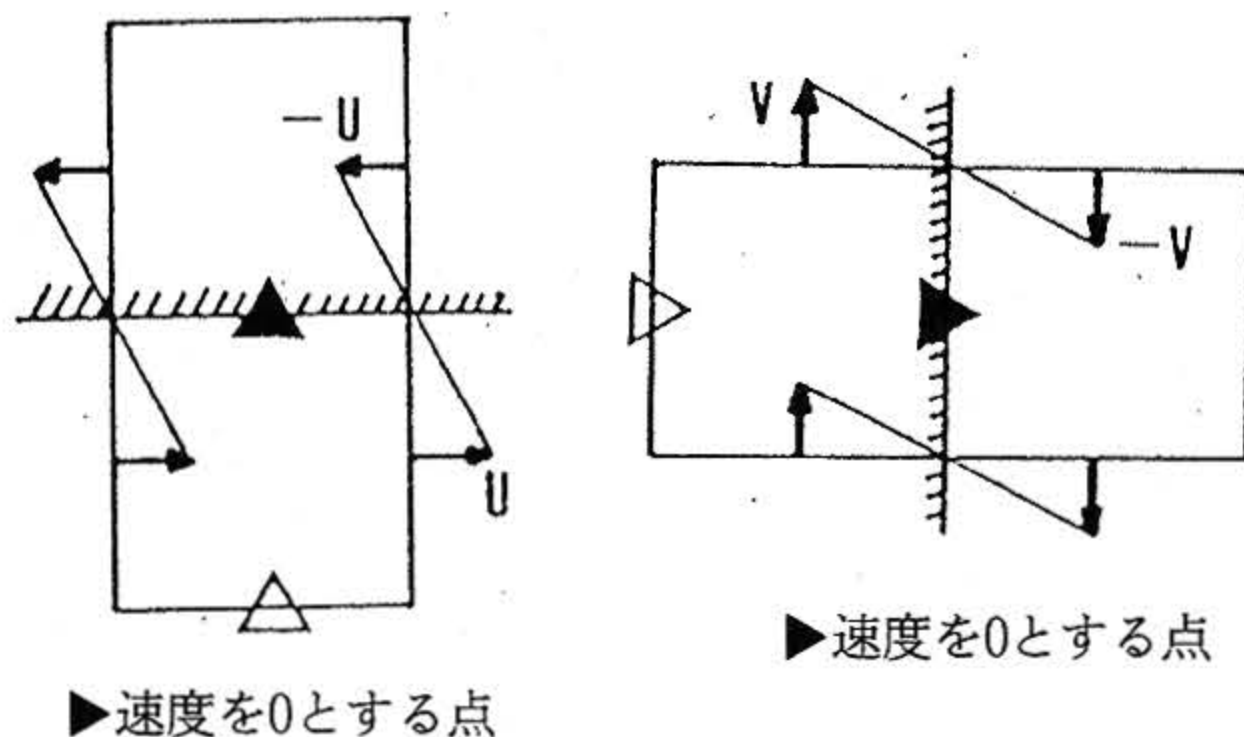


図 7 海岸線での速度の外挿入法
(no-slip condition)
Fig. 7 No-slip Boundary Condition at
shoreline

3 計算結果

3.1 潮汐流

式2.1.8, 2.1.9の内, 海底での摩擦のみを考慮に入れて計算したものが図8～図11である。計算条件は, 表1の通りである。

表 1 潮汐流の計算条件

Table 1 Culcation Condition

格子点数	約3000
格子間隔	ds=500m
時間間隔	$\Delta t=0.0005$ hour
水平渦動粘性係数	$Kh=100\text{m}^2/\text{S}$
海底摩擦係数	$\gamma_b=0.05$
コリオリパラメータ	$f=-0.000066\text{rd}/\text{S}$
潮汐振幅	$A1=0.9\text{m}$
潮汐周期	$B1=12$ hour

図8は流速0からスタートし, 1周期後の12hのときの潮汐流である。リーフ上やリーフとリーフ, リーフと島嶼の間から外洋水が流れ込む様子がシ

ミュレートされている。図9は潮位0.9m即ち15時間後の流況で, 図8に比して流速は遅いもののまだ外洋水の流入が続いている。図10は再び潮位が0となった18時間後の様子であり, 湾内水がリーフ間等から湾外へと流出している。図11は21時間後の様子で, やはり湾内水が湾外へと流出している様子がシミュレートされている。尚, これらの流速ベクトル図には, リーフ外の流速ベクトルは描かれていない。

この12時間後から24時間後までの1周期の流れを積分したものが図12で, 潮汐残差流である。この図によると, 中城湾の中心に右回りの大きな残差流があり, 馬天港, 与那原近傍の海域に反時計回りの残差流の渦が表れている。この潮汐残差流に, 各点での深度($\zeta+h$)をかけて流量としたものが図13である。これによると, 中城湾中心部の大きな時計回りの残差流は, 知念岬方面からリーフに沿っての流れが, 久高島の間大きな水路からの流入とぶつかり方向を変えて形成している様に見える。また, この図においても馬天港, 与那原近傍海域に反時計回りの残差流の渦が顕著に表れている。久高島と知念半島の間や久高島と津堅島の上に点在するリーフの上にも大きなフラックスが見られる。しかし, 本シミュレーション法は比較的起伏のなだらかな海底地形を有する海域においては現象をよくシミュレートするが, 久高島と津堅島の上に点在するリーフの上などの流れは, 本方法そのままでは必ずしもうまくシミュレートされていないと考えられる。

3.2 風による流れ

本計算には, 現在のところ風の影響が含まれていない。即ち, 式2.1.8, 2.1.9で $\tau_s=0$ とおいている。これは, 本来, 時間と場所関数である風のデータが得られないためである。しかし, もし, 風が全域にわたって, 一定であるとした場合, どのような影響があるかを考慮したものが図14及び図15である。この図も, ベクトルは, 流速にその点での深度をかけた流量で示してある。風速はどちらも $10\text{m}/\text{S}$, 風向が 45° と 225° である。この風の影響のみによって, 風向が 225° のときは反時計まわり, 風向が 45° のときには時計回りの流れが, 中城湾中部で形成され, また, 流量も大きい, 従って, 風が中城湾内の流れに与える影響は充分に大

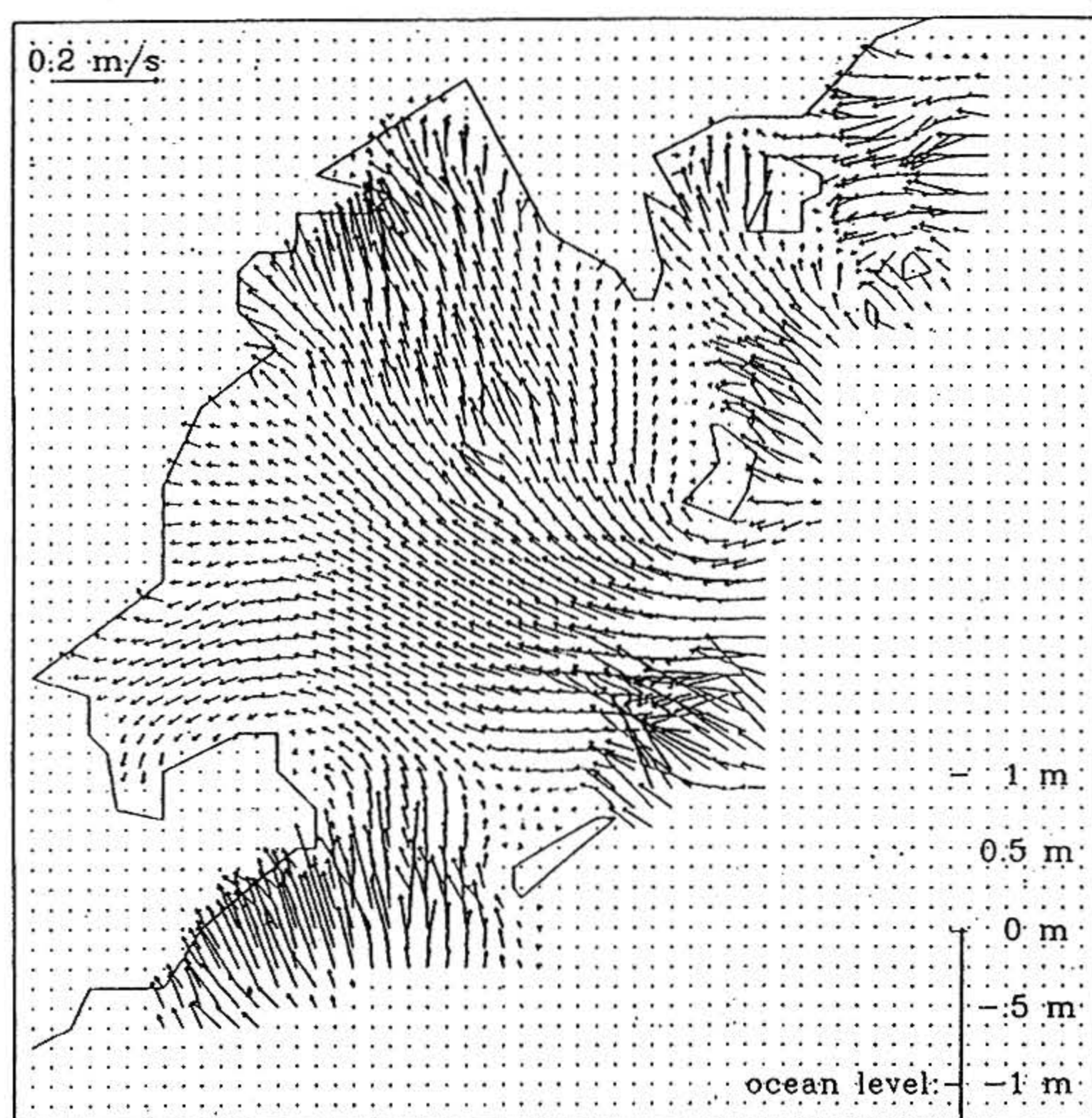


図 8 中城湾の潮汐流の数値シミュレーション結果計測開始後12時間経過（第2周期目）

Fig. 8 Simulation Result (Tidal Current) $t=12$ hour

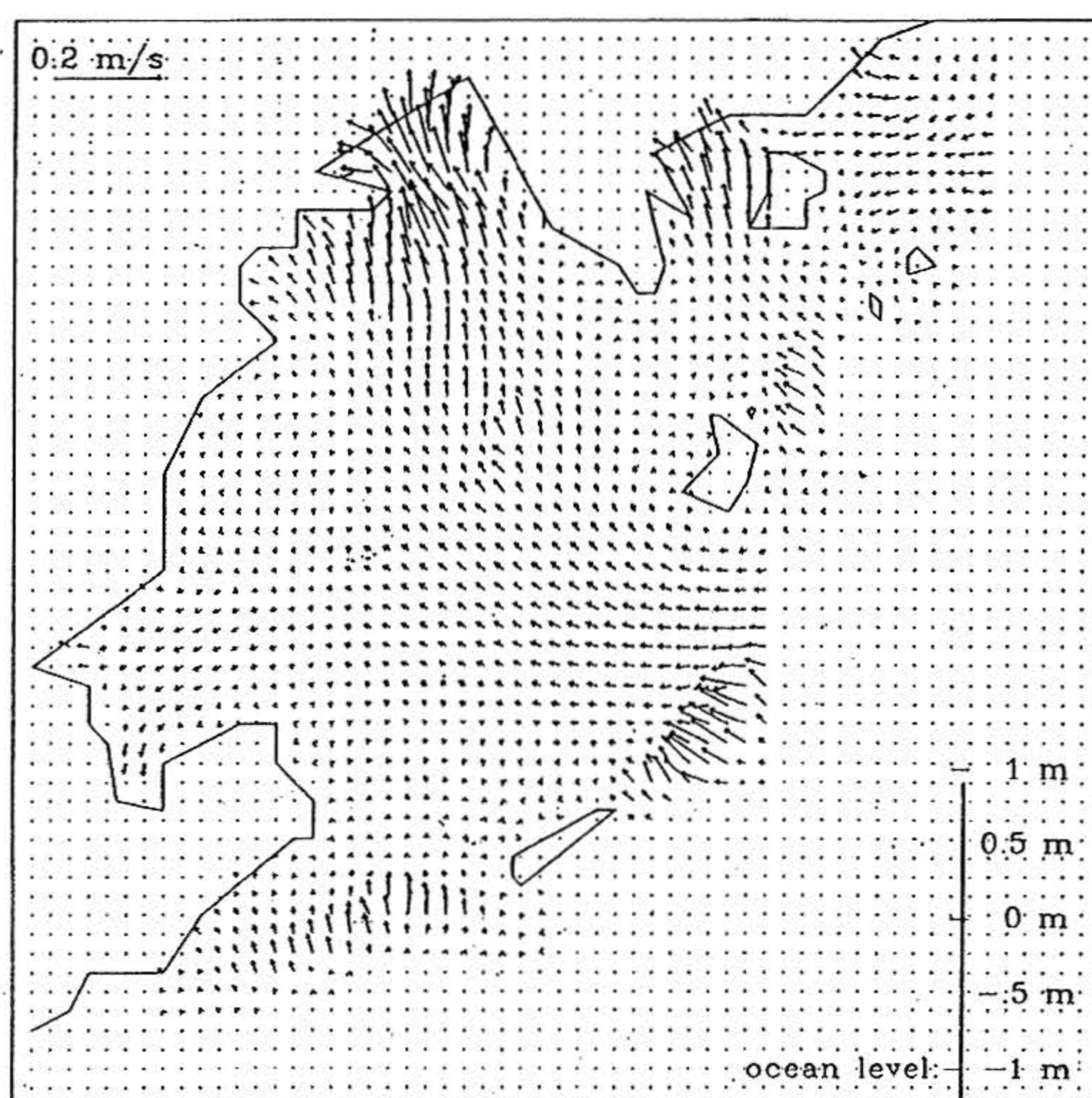


図 9 中城湾の潮汐流の数値シミュレーション結果計測開始後15時間経過（第2周期目）

Fig. 9 Simulation Result (Tidal Current) $t=15$ hour

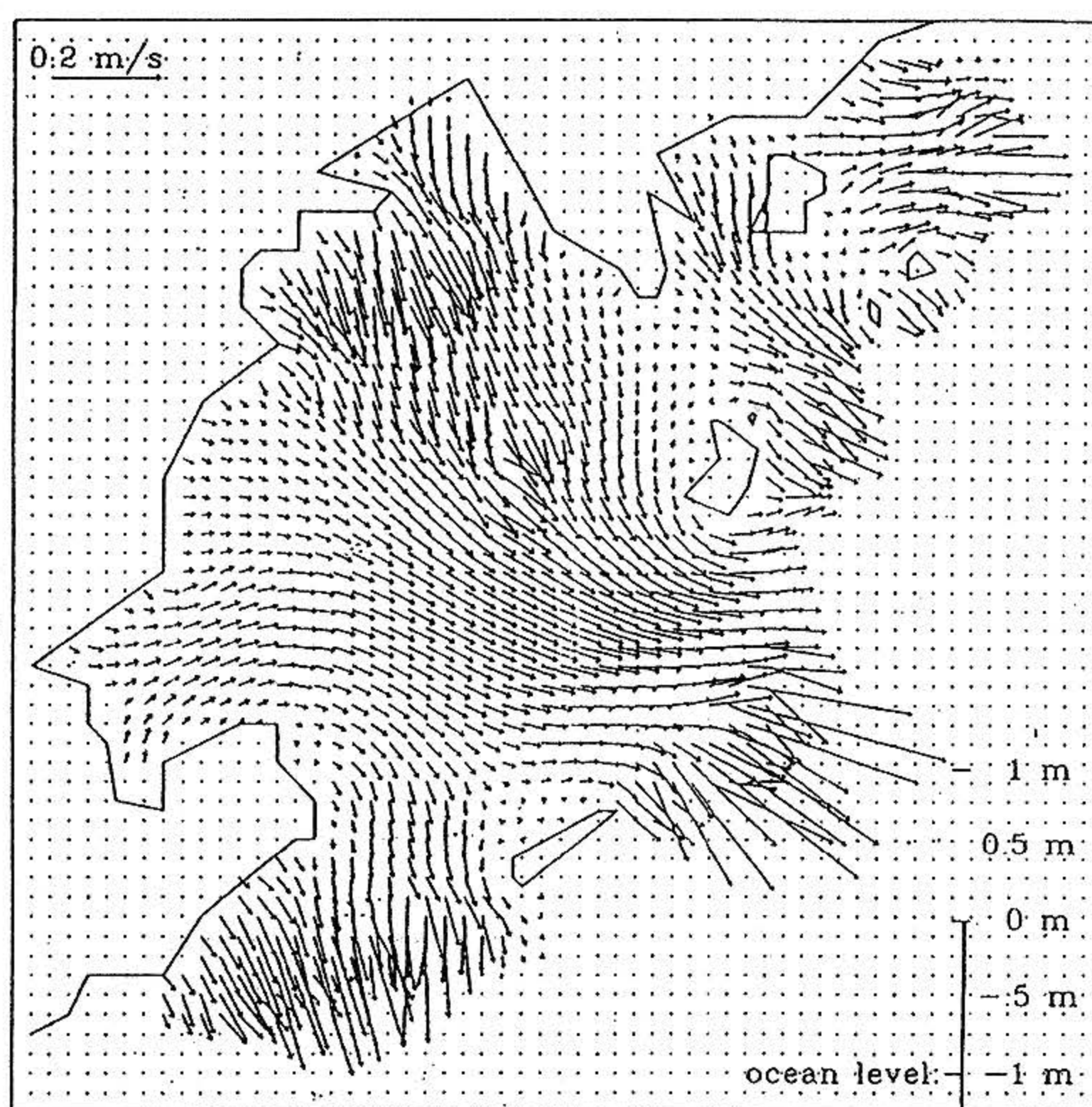


図 10 中城湾の潮汐流の数値シミュレーション結果計測開始後18時間経過 (第2周期目)

Fig. 10 Simulation Result (Tidal Current) $t=18$ hour

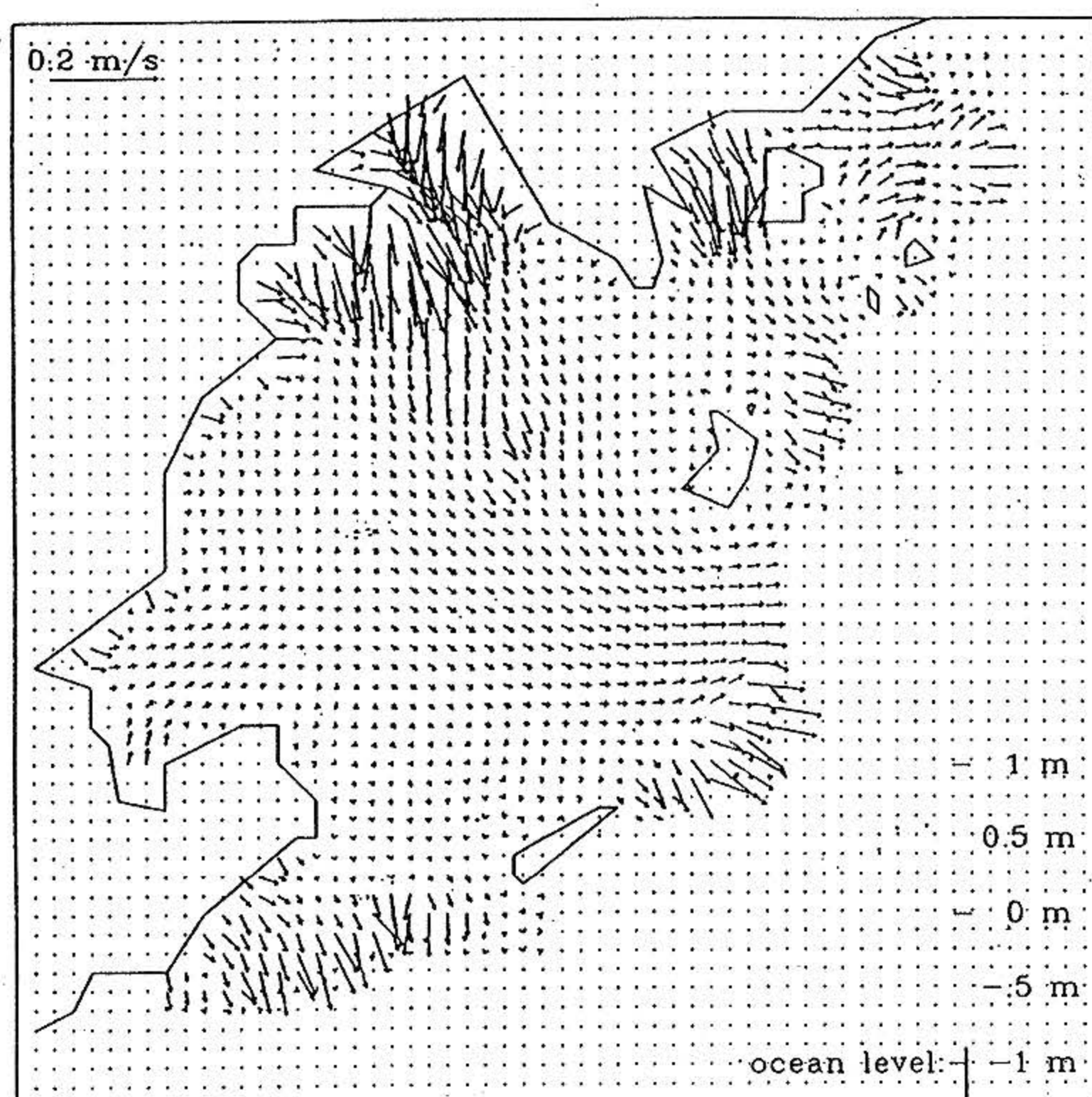


図 11 中城湾の潮汐流の数値シミュレーション結果計測開始後21時間経過 (第2周期目)

Fig. 11 Simulation Result (Tidal Current) $t=21$ hour

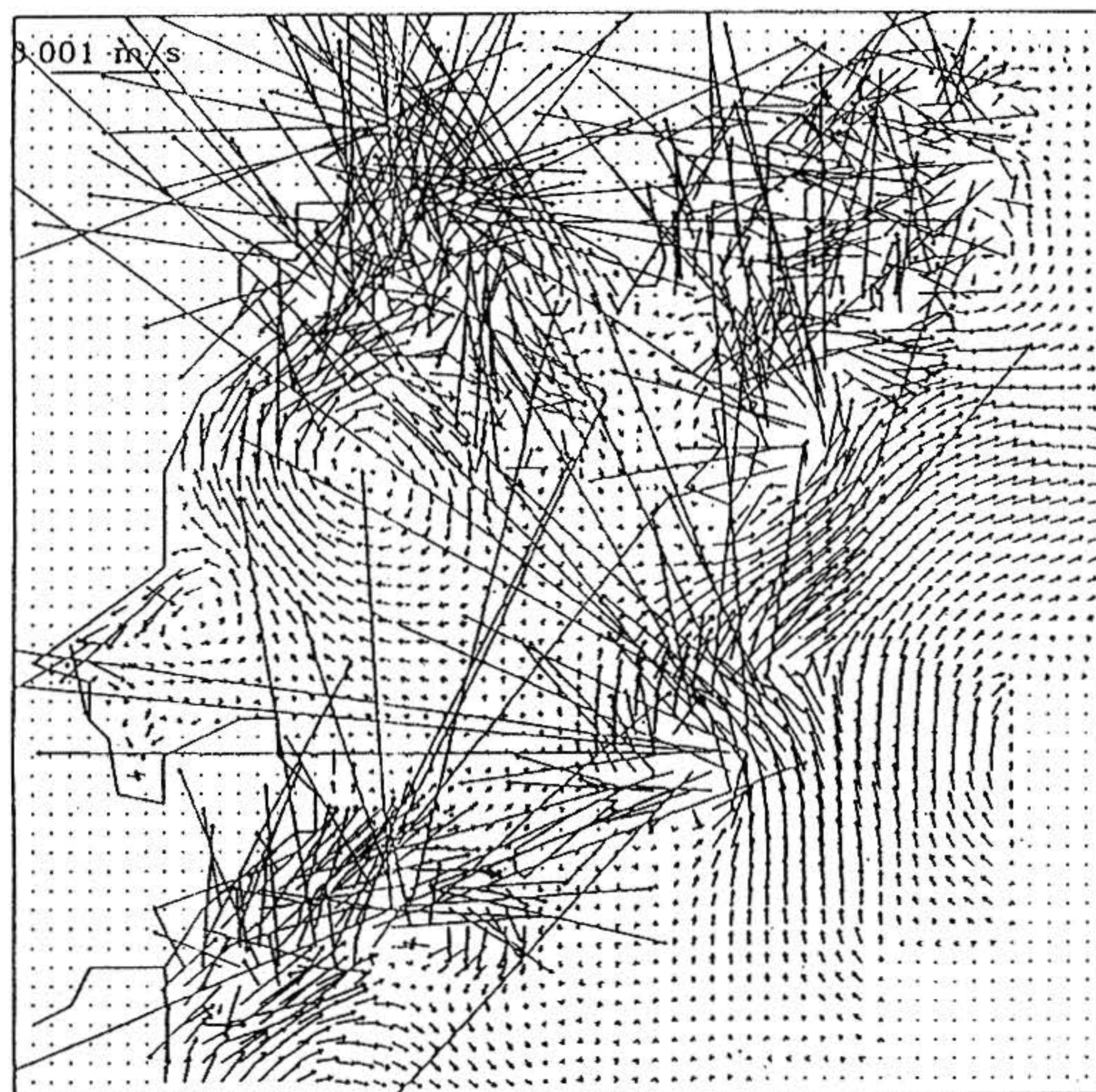


図 12 中城湾の潮汐残差流の数値シミュレーション結果（計測開始12時間後から24時間後までの1周期分の流速の積分値

Fig. 12 Simulation Result (Tidal Residual Current) (from $t=12$ hour to $t=24$ hour)

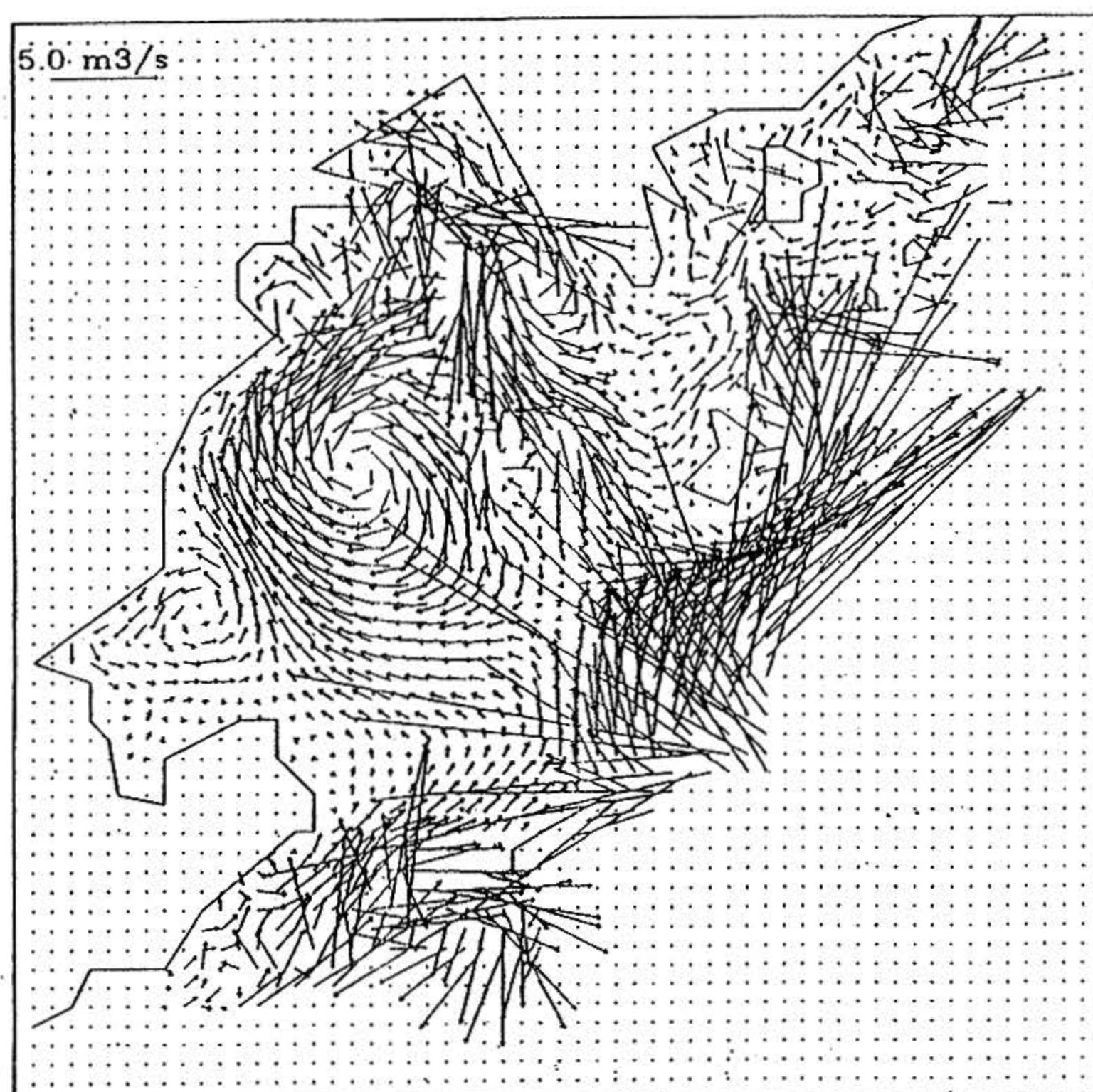


図 13 中城湾の潮汐残差流（流量）の数値シミュレーション結果（計測開始12時間後から24時間後までの1周期分の流速の積分値

Fig. 13 Simulation Result (Tidal Residual Flux) (Tidal Residual Current $\times$ depth)

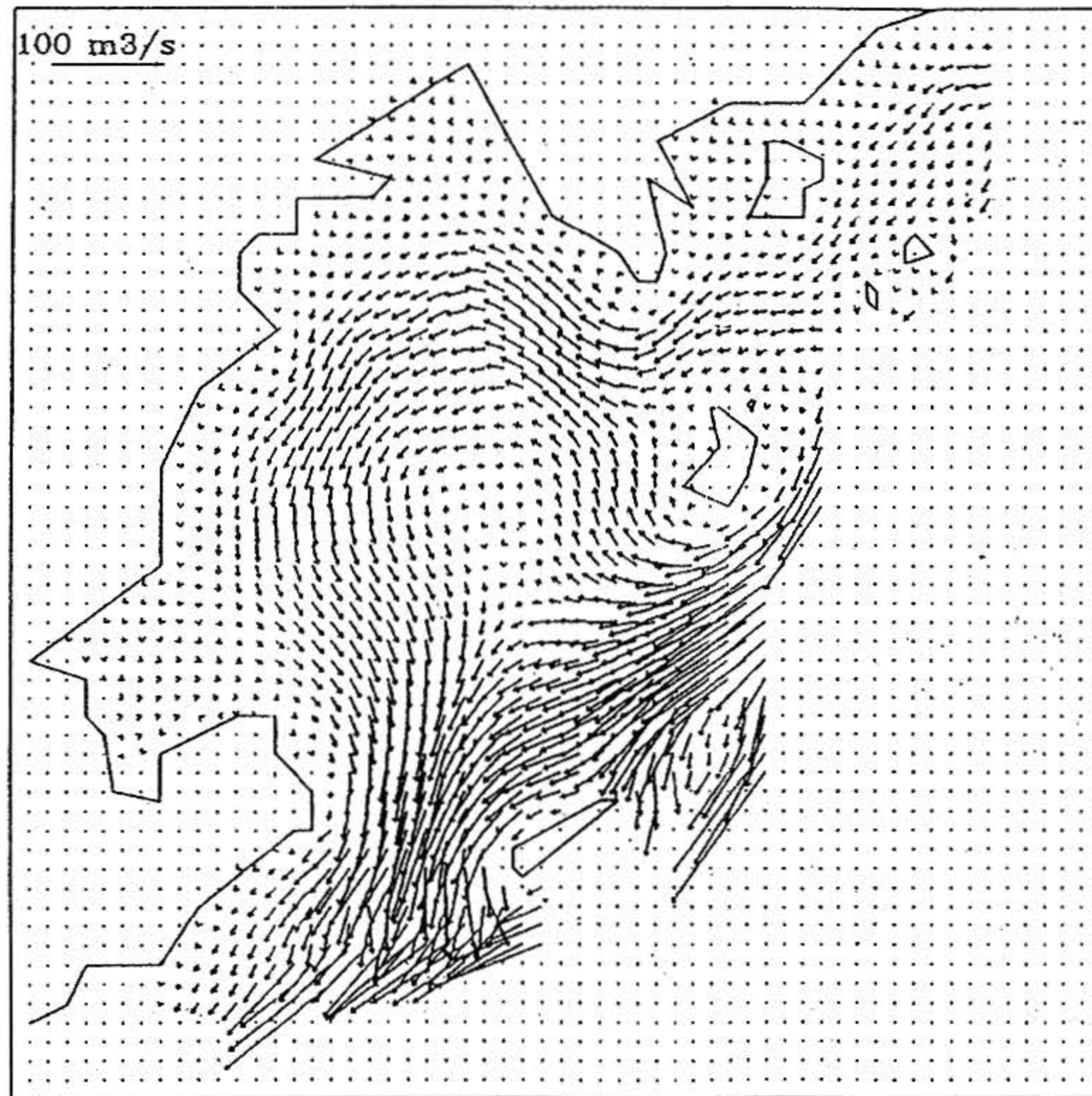


図 14 風による流れのシミュレーション結果 (風速10m/s, 風向225°)

Fig. 14 Simulation Result (Wind-driven, Current)

(Velocity 10m/s, Direction 225 degree)



図 15 風による流れのシミュレーション結果 (風速10m/s, 風向45°)

Fig. 15 Simulation Result (Wind-driven, Current)

(Velocity 10m/s, Direction 45 degree)

きく、本来無視できるものではない。この風をどのように計算に組み込むかは、今後の大きな課題の一つである。

3.3 リーフ上の流れのモデル化

そこで、実験によって得られたデータ及び潮汐表をもとに、リーフ上の流れをモデル化することを試みた。

コマカ島と平瀬の間のリーフ上に設置された流速計のデータ⁹⁾のうち、比較的海の荒かった時のものをもとに、流速を

$$V=0.07\sin\omega t+0.13 \quad \cdots\cdots\cdots 3.2.1$$

と近似する。文献5)によると、比較的海が荒い場合、流れはリーフの中に入る方向に卓越する。また、このときの水深は、潮汐表をもとに

$$h=0.7\sin\omega t+2.3 \quad \cdots\cdots\cdots 3.2.2$$

と近似する。そして、 $V \times h$ をとり、

$$q=0.05\sin^2\omega t+0.25\sin\omega t+0.3 \quad \cdots\cdots\cdots 3.2.3$$

とし、

$$SX=q_x \cdot \Delta t / \Delta S \quad \cdots\cdots\cdots 3.2.4$$

$$SY=q_y \cdot \Delta t / \Delta S \quad \cdots\cdots\cdots 3.2.5$$

としてリーフ上の流れをモデル化する。ここで $\omega=2\pi/12$ hourである。このモデルを用いた場合のシミュレーション結果が図 16～図 19である。

リーフ上の流れをモデル化していない図 8～図 11に比べるとリーフの存在する部分以外にも津堅島のまわりの流況や、湾内北西部の海岸付近や与那原付近などで全般的に流速が遅くなる傾向などの差異が見られる。

これらを先の図 16と同様に1周期分積分し、各点で深度をかけて流量としたものが図 20である。図 13と図 20を比べるとその相違は大きく、図 13でみられた中城湾内中心部の時計回りの残差流や馬点港、与那原町近傍の海域の反時計回りを残差流は、図 3.13ではみられず、その代わり津堅島のまわりを回る残差流が顕著である。また中城湾南西部から流入し、久高島・津堅島間の水路から流出するというパターンが表れている。

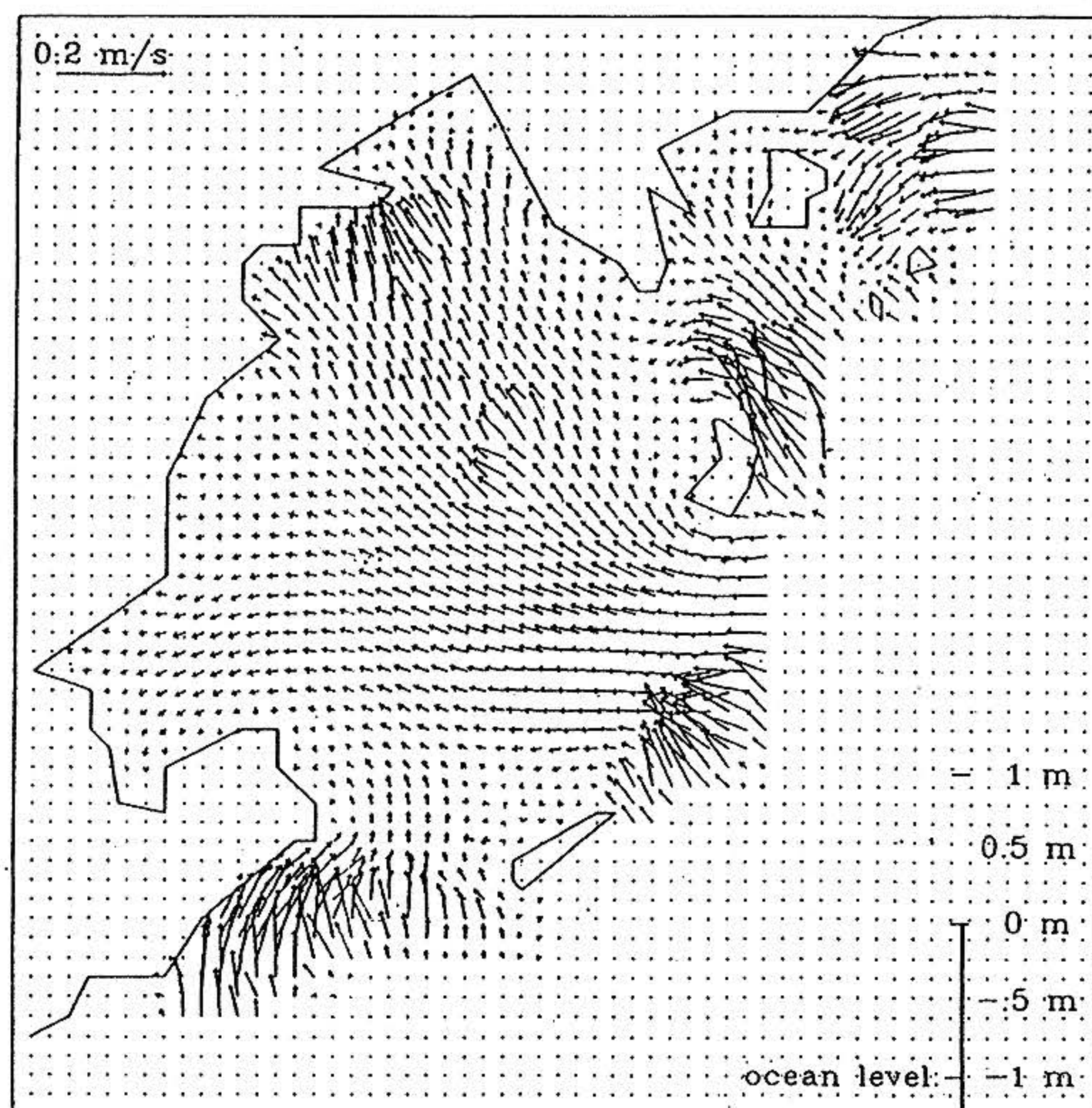


図 16 リーフ上の流れをモデル化した場合の中城湾の潮汐流の数値シミュレーション結果
計測開始後12時間経過（第2周期目）

Fig. 16 Simulation Result (Tidal Current with Modelized Feef Input) $t=12$ hour

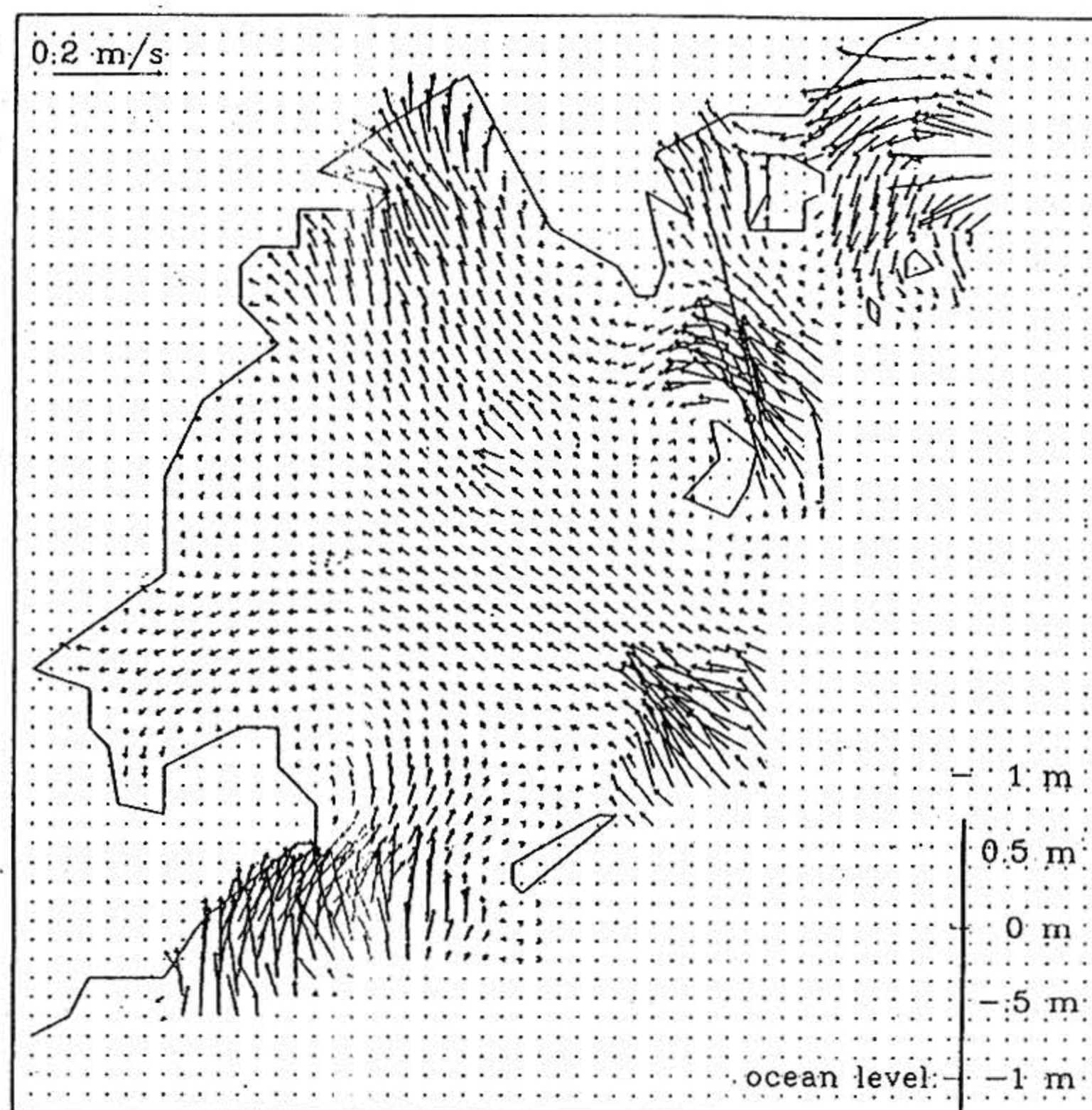
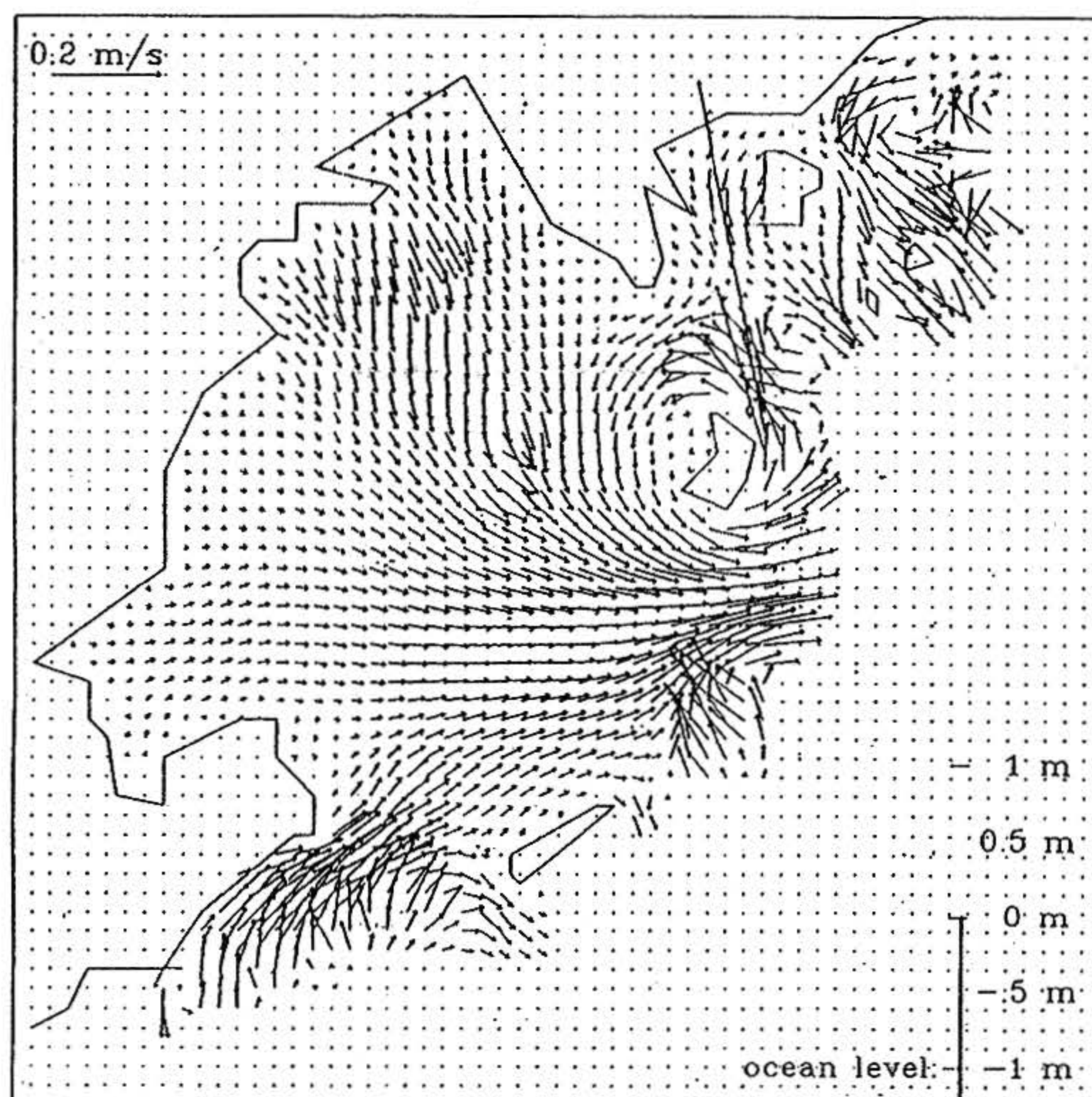


図 17 リーフ上の流れをモデル化した場合の中城湾の潮汐流の数値
シミュレーション結果計測開始後15時間経過（第2周期目）

Fig. 17 Simulation Result (Tidal Current with Modelized Feef Input) $t=15$ hour



・図 18 リーフ上の流れをモデル化した場合の中城湾の潮汐流の数値
シミュレーション結果計測開始後18時間経過（第2周期目）

Fig. 18 Simulation Result. Tidal Current with Modelized Feef Input) $t=18$ hour

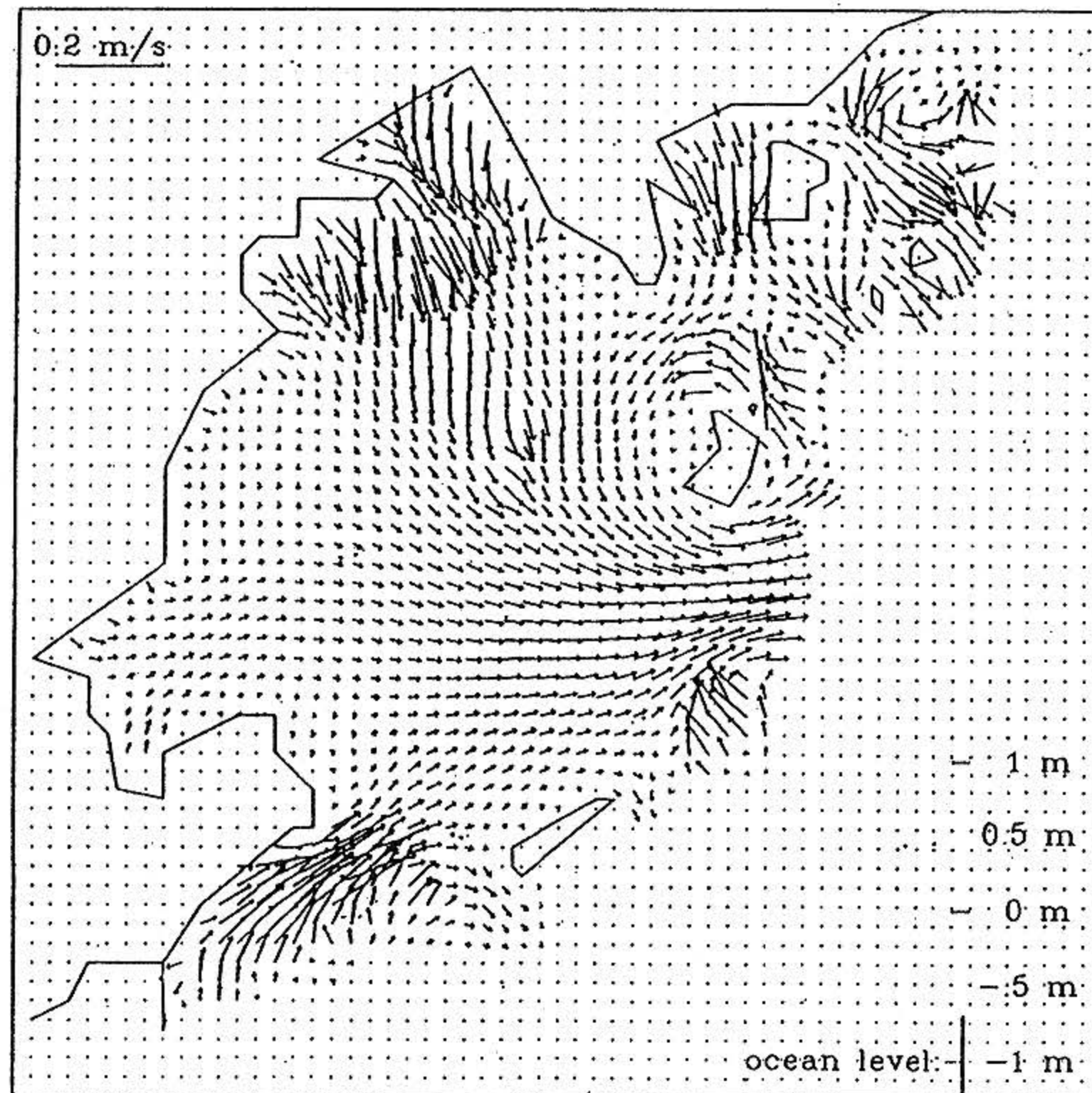


図 19 リーフ上の流れをモデル化した場合の中城湾の潮汐流の数値
シミュレーション結果計測開始後21時間経過（第2周期目）

Fig. 19 Simulation Result. Tidal Current with Modelized Feef Input $t=21$ hour

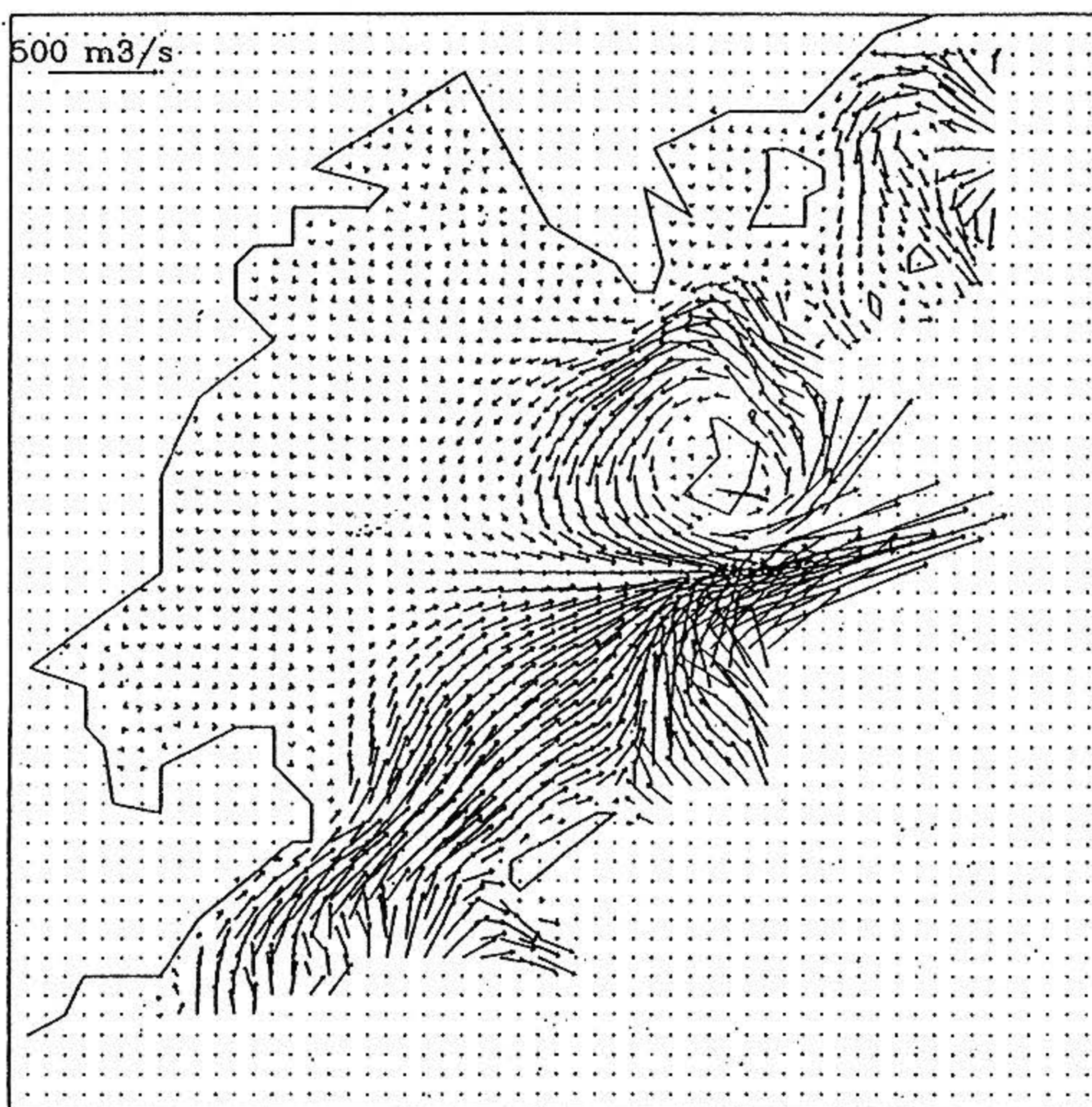


図 20 リーフ上の流れをモデル化した場合の中城湾の潮汐残差流（流量）の数値
シミュレーション結果（計測開始12時間後から24時間後までの1周期分の
流速の積分値に水深をかけて流量としたもの）経過

Fig. 20 Simulation Result. Tidal Current Flux with Modelized Feef Input
(from $t=12$ hour to $t=24$ hour)

4 結 論

本シミュレーションは未だに完全なものとは言えないが、潮汐を考慮したシミュレーションによって、中城湾内の恒流の存在の可能性が示唆されていると考えられる。

また、本シミュレーション法は比較的なだらかな海底地形を有する海域に適用すると現象をよくシミュレートし得る方法であり、湾内のシミュレーションには問題はないが、リーフ近傍の急峻な地形の部分をうまく処理する必要がある。その意味でもリーフ上の流れのモデル化は中城湾内の流れに大きな影響を与えるので、この点をさらに検討する必要がある。さらに、本計算例においては Δt がかなり小さい値となっているが、これはリーフなど複雑な海底地形を取り扱うには格子間隔が大きすぎるためである可能性がある。そこでより細かい格子系で計算する必要性も考えられる。

いずれにしても、湾内の恒流には潮汐に起因するもの、リーフ上の流れによるものの他にも風による吹送流などが考えられ、これらが相互に影響しあって構成されている。従って、より詳しい観測によりシミュレーションに用いることのできるインプットデータや、シミュレーション結果の妥当性を判断できるようなデータを得るとともに、潮汐、リーフ上の流れ、風などを組み込んだ計算を行う必要がある。

これまでの計算から、サンゴ礁造園モデル海域の流れの特徴をあげると、海水はモデル海域南部のバリアリーフ、リーフ間の水路からはいりこみ、一部は久高島西側から流出、大部分は北東ないし、北西方向の中城湾へと入り込むという傾向があるように思われる。

参考文献

- 1) 工藤君明, 本多牧生: 沖縄本島周辺のサンゴ礁の現状調査, JAMSTEC TR21 (1989), pp. 121 ~ pp. 142
- 2) 工藤君明, 大西 毅, 本多牧生: サンゴ移植・観測システムについて, JAMSTEC R23 (1990), pp. 345 ~ pp. 369
- 3) 岩垣雄一, 榎木 亨: 海岸工学, 共立出版(株), (1979)
- 4) ISHIKAWA, M.: A Study of Model for Costal Environment Management, 東京大学工学部化学工学科 博士論文 (1989)
- 5) 河野 健, 工藤君明: サンゴ礁造園モデル海域の海水流動特性—その2, サンゴ礁造園モデル海域内の計測調査, JAMSTEC R25 (Now Appear)

(原稿受理: 1990年11月6日)