

サンゴ礁海域の海水流動数値シミュレーション

中村 仁*¹ 工藤 君明*¹

サンゴ礁海域では、複雑な海底地形を伴うために、その流れを捉えることは難しい。しかし、このような内湾の複雑な流れと同時に外洋の流れとの相互作用を把握することによって、サンゴ幼生の分散や赤土の拡散等を予測することが可能となる。そこで、広く外洋域も含めたサンゴ礁海域での海水流動をシミュレーションするために数値モデルを開発した。2層フリーレベルモデルを用いてパラメーター実験を行い、流れに及ぼす潮流と吹送流の効果や外洋域での計算の安定性について検討した。外洋域で鉛直渦動粘性係数を大きくとることにより安定した計算が可能となった。また、漂流ブイの観測結果との比較により、シミュレーションの適応性を検討した。その結果、中城湾において北北東や南南西に対する流れのパターンの傾向をつかむことができた。また、湾内の流れのパターンは風況の変化に敏感に反応することが示された。

キーワード：サンゴ礁，潮流，吹送流，鉛直渦動粘性係数，漂流ブイ

Numerical Simulation Study on Flows in Coral Reefs

Hitoshi NAKAMURA*² Kimiaki KUDO*²

Coastal currents on the coral reef are difficult to understand its structure because of the complex bottom topography in such areas.

However, dispersion of coral larvae and red soil can be predicted by examining the interaction of complex flows in a bay and ocean currents outside of it.

Towards this objective, a numerical model was developed to simulate coastal current movements on the coral reef, as well as in the open sea at large.

In a parameter experiment with two-layered free level model, the effect of the tidal current and wind-driven current on the flow, and stability of calculation for outer sea areas were evaluated.

Stability was achieved using the greater coefficient of vertical eddy viscosity in outer sea areas.

* 1 海域開発研究部

* 2 Marine Development Research Department

Comparisons to observations of drifting buoys showed the viability of the simulation. As a result, the flow pattern in the middle area of the bay, with wind blowing in the north-northeast and south-southwest directions, could be identified.

It was also found that flow patterns inside the bay were sensitive to wind changes.

Key words : Coral reef, Tidal current, wind-driven current, Vertical eddy viscosity, Drifting buoy

1 はじめに

サンゴ礁海域では、サンゴ礁による海底地形がリーフ等を形成し外洋へと続いているため、非常に複雑な海水流動を引き起こす¹⁾。流れの場を知る手法としては、数値シミュレーションは有用であり、東京湾等の閉鎖性内湾では多層レベルモデルがよく用いられている²⁾。当センターにおいても1988年から1991年にかけて実施したサンゴ礁造園技術の研究開発プロジェクトの2次元単層の海水流動の数値モデルの開発を行った。³⁾ このモデルでは、急峻な海底地形をもつ海域の計算に弱く、安定した計算結果を得るためには Δt を小さくと

らなければならなかった。本研究では湾内と外洋との流れの交換を捉えると共に、漂流ブイの動きをシミュレーションできる数値モデルの開発を行った。対象海域は、沖縄県本島南部の中城湾である(図1)。比較のための観測データとして、当センターで開発したGPS精密測位漂流ブイによる漂流軌跡の結果を用いた^{4) 5)}。

2 数値モデル

2.1 基本式

本モデルは、潮流および吹送流による流動現象をシミュレーションするものであるが、特に外洋までの海底地形を含めた湾内外の海水流動を捉えられるようにした。図2は、モデル海域の海底地形の等深線図である。ただし、モデルにおいては200m以深は計算の安定性を考慮して200m均一とした。海水は、非圧縮粘性流体とし、静水圧近似を用いた基本式系は、以下に示す運動方程式と連続の式で表される。

(1) 水平方向の運動方程式

$$\frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + K_h \nabla^2 u + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + K_h \nabla^2 v + K_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad \dots (2)$$

(2) 鉛直方向の運動方程式

鉛直方向の運動方程式は本来(3)式のように表されるが、ここでは加速度項、非線形項、粘性項は重力と圧力項に比して無視できる。

$$\frac{Dw}{Dt} + g = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + K_h \nabla^2 w + K_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad \dots (3)$$

鉛直方向の運動方程式は次式で近似できる。

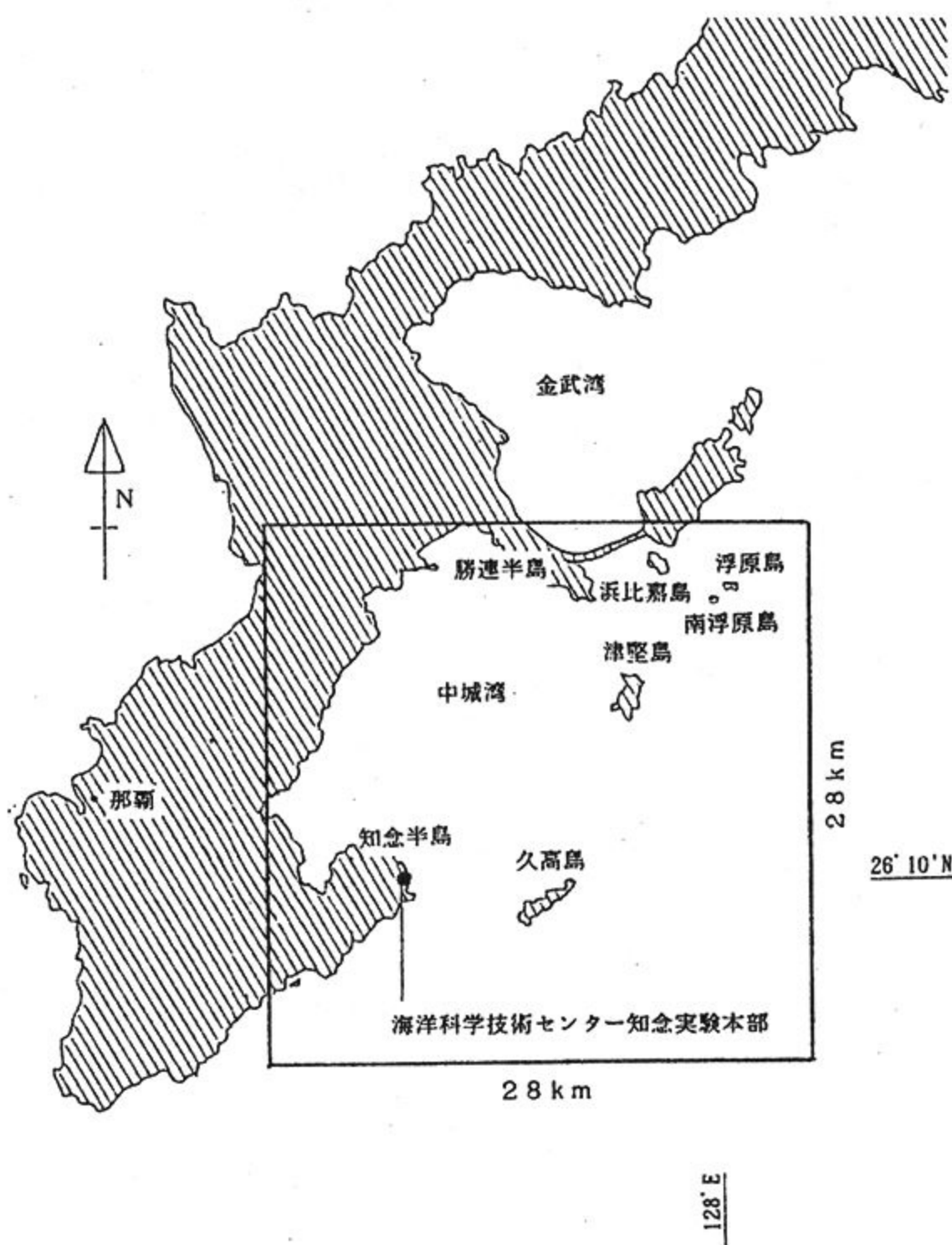


図1 沖縄本島におけるモデル海域
Fig. 1 Model area in Okinawa main island.

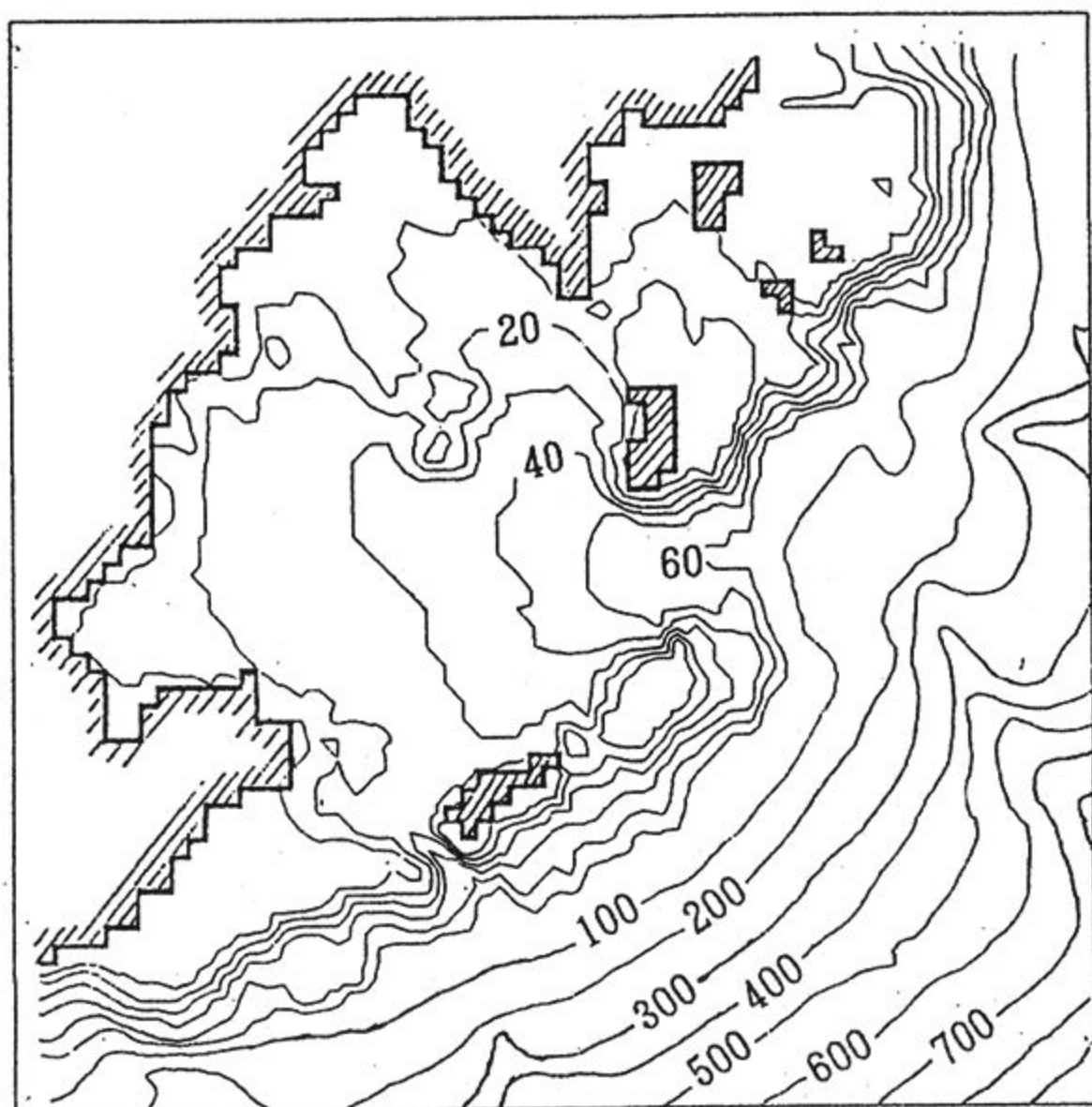


図2 モデル海域の海底地形 (単位: m)
Fig. 2 Bottom topography of model area.

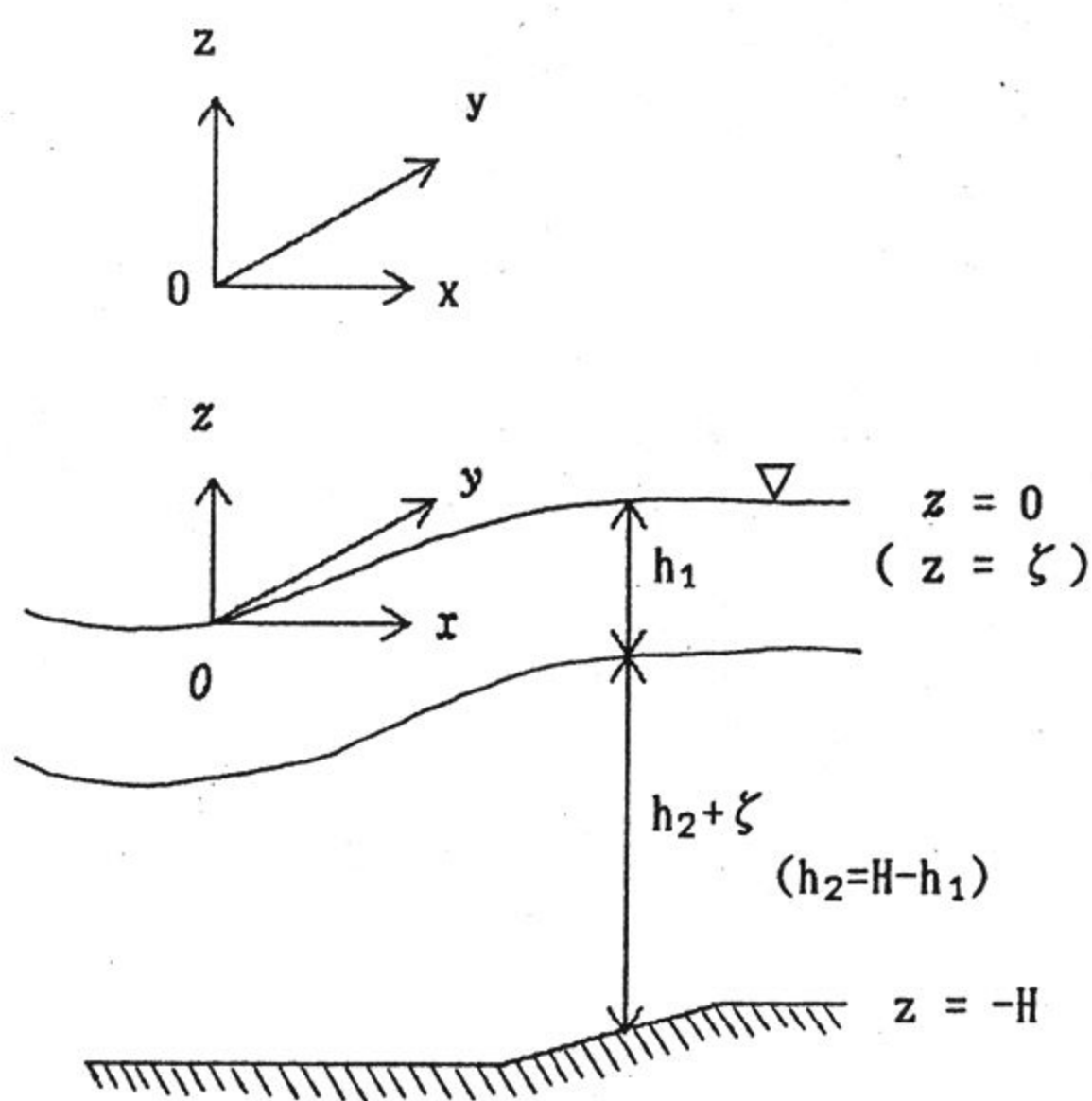


図3 2層フリーレベルモデルの座標系
2層フリーレベルモデルの座標系 (x, y, z) と空間固定座標系 (x, y, z) との間には $x=x, y=y, z=z-\zeta(x, y, t), t=t$ が成り立つ。

Fig. 3 Coordinate system of free level model. It is described by $x=x, y=y, z=z-\zeta(x, y, t)$ and $t=t$ between this coordinate system ; (x, y, z) and fixed one ; (x, y, z) .

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

(4)式において、海面 $z = \zeta$ で圧力 $p = p_0$ (大気圧) とすると、

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

(3) 連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots (6)$$

ただし、 $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$,
 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ とする。

(4) 海面と海底の境界条件

海面で ($z = \zeta$),

$$\frac{D(z-\zeta)}{Dt} = w - \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots (7)$$

$$K_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\rho_a}{\rho_w} C_d W_x |W|,$$

$$K_z \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\rho_a}{\rho_w} C_d W_y |W| \quad \dots (8)$$

海底で ($z = -H$)

$$\frac{D(z+H)}{Dt} = u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} + w = 0 \quad \dots (9)$$

$$K_b \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_b^2 u \sqrt{u^2 + v^2},$$

$$K_b \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_b^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad \dots (10)$$

ここで、 u, v, w は x, y, z 方向の流速、 ζ は水位変化量、 H は水深、 f はコリオリのパラメータ、 ρ_a, ρ_w は空気および海水の密度、 p は圧力、 K_h, K_z は水平及び鉛直渦動粘性係数、 g は重力加速度、 γ_b^2 は海底摩擦係数、 C_d は海面の抵抗係数、 W_x, W_y は海上10mの風速の x 及び y 成分である。

2.2 2層フリーレベルモデル

モデルのタイプは、レイヤーモデルとレベルモデルに大別される。密度成層の強い海域では鉛直方向の流れが生じにくいためレイヤーモデルが有効であり、複雑な海底地形や風による鉛直循環を伴う海域のは鉛直流計算の可能なレベルモデルが適している⁶⁾。本研究ではサンゴ礁海域の複雑な海底地形を考慮して、レベルモデルを用いることにしたが、その中でもフリーレベルモデルを使用した。フリーレベルモデルは以下のような特徴がある⁷⁾。

- ① 曲線座標系に基づく3次元的なモデル。
- ② 原点は自由表面に置く。
- ③ 鉛直的な潮汐流による人工的な鉛直混合が減少する。
- ④ 水平変動が層の厚さを上回る浅瀬や複雑な海底地形においても計算が行える。

自由表面上に座標の原点を取り、鉛直上向きに正のz軸をとる直交座標系を考える(図3)。

ここで、 ζ の変動周期は振幅に比べ非常に長いいため、自由表面の傾斜は無視できる。したがって、式(1)~(9)に示された空間固定座標系(x, y, z, t) (活字文字) に対するフリーレベルモデルの座標系(x, y, z, t) (イタリック文字) への座標変換は次式のようになる。

$$x=x, y=y, z=z - \zeta(x, y, t), t = t \quad \dots (11)$$

$$u=u, v=v, w = \frac{Dz}{Dt} = w - \frac{D\zeta}{Dt} \quad \dots (12)$$

式(12), (13)によって得られる2層フリーレベルモデルの運動方程式及び連続の式は、以下のようになる。ただし、 h_1 は1層目の厚さ、 h_2 は水深Hから1層目の厚さ h_1 を引いた値と定義する。すると、2層目の厚さは $h_2 + \zeta$ となる。

(1) 上層の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(u_1 h_1)}{\partial t} + \frac{\partial(u_1^2 h_1)}{\partial x} + \frac{\partial(u_1 v_1 h_1)}{\partial y} - (uw)_{z=h_1} \\ & = f v_1 h_1 - g h_1 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + K_h h_1 \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) \end{aligned}$$

$$-K_z \frac{(u_1 - u_2)}{H + \zeta} + \frac{\rho_a}{\rho_w} C_d W_x |W| \quad \dots (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(v_1 h_1)}{\partial t} + \frac{\partial(u_1 v_1 h_1)}{\partial x} + \frac{\partial(v_1^2 h_1)}{\partial y} - (vw)_{z=h_1} \\ & = -f u_1 h_1 - g h_1 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + K_h h_1 \left(\frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} \right) \end{aligned}$$

$$-K_z \frac{(v_1 - v_2)}{H + \zeta} + \frac{\rho_a}{\rho_a} C_d W_y |W| \quad \dots (14)$$

(2) 下層の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial\{u_2(h_2 + \zeta)\}}{\partial t} + \frac{\partial\{u_2^2(h_2 + \zeta)\}}{\partial x} \\ & + \frac{\partial\{u_2 v_2(h_2 + \zeta)\}}{\partial y} + (uw)_{z=h_1} \\ & = -f v_1(h_2 + \zeta) - g(h_2 + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + K_h(h_2 + \zeta) \left(\frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} \right) - K_z \frac{(u_2 - u_1)}{H + \zeta} \\ & - \gamma_b^2 v_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \quad \dots (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial\{v_2(h_2 + \zeta)\}}{\partial t} + \frac{\partial\{u_2 v_2(h_2 + \zeta)\}}{\partial x} \\ & + \frac{\partial\{u_2^2(h_2 + \zeta)\}}{\partial y} + (vw)_{z=h_1} \\ & = -f u_1(h_2 + \zeta) - g(h_2 + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + K_h(h_2 + \zeta) \left(\frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} \right) - K_z \frac{(v_2 - v_1)}{H + \zeta} \\ & - \gamma_b^2 v_2 \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \quad \dots (16) \end{aligned}$$

(3) 連続の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = w - \frac{\partial}{\partial x} \{u_2(h_2 + \zeta)\} - \frac{\partial}{\partial y} \{v_2(h_2 + \zeta)\} \quad \dots (17)$$

ただし,

$$w = -\frac{\partial(u_1 h_1)}{\partial x} - \frac{\partial(v_1 h_1)}{\partial y} \quad \dots (18)$$

ここで, ζ は海面の鉛直変位, u, v の添え字は1層目, 2層目を表す。また, w は1層目と2層目の境界面に生じる鉛直流である。

2.3 差分化

差分展開は, すべて陽差分を用いた。差分化した格子において計算される変数は図4のような位置に定義する。時間に対しては水位と流れを $\Delta t/2$ ずらして交互に計算していく前方差分を用いた。空間に対しては中央差分, ただし移流項については上流差分を用いた。上流差分を導入したことにより, 以前のモデル³⁾に比べて空間ステップはそのままでタイムステップを約3倍にして安定した計算が行えるようになった。それぞれの差分式の基本的な形は,

(1) 前方差分

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left\{ F^{i,j} \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - F^{i,j}(t) \right\} \quad \dots (19)$$

(2) 中央差分

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta s} \{ F^{i+1,j}(t) - F^{i-1,j}(t) \} \quad \dots (20)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta s} \{ F^{i,j+1}(t) - F^{i,j-1}(t) \} \quad \dots (21)$$

(3) 上流差分

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} = & \frac{1}{2} \{ F^{i,j}(t) + |F^{i,j}(t)| \} \cdot \\ & \frac{1}{\Delta s} \{ F^{i,j}(t) - F^{i-1,j}(t) \} \\ & + \frac{1}{2} \{ F^{i,j}(t) - |F^{i,j}(t)| \} \cdot \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\Delta s} \{ F^{i+1,j}(t) - F^{i,j}(t) \} \quad \dots (22)$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{1}{2} \{ F^{i,j}(t) + |F^{i,j}(t)| \} \cdot$$

$$\frac{1}{\Delta s} \{ F^{i,j}(t) - F^{i,j-1}(t) \}$$

$$+ \frac{1}{2} \{ F^{i,j}(t) - |F^{i,j}(t)| \} \cdot$$

$$\frac{1}{\Delta s} \{ F^{i,j+1}(t) - F^{i,j}(t) \} \quad \dots (23)$$

ここで, F は代表される変数, Δt は時間ステップ, Δs は空間ステップ, i, j は計算位置の座標を示す。

境界条件については, 陸地との閉境界ではnon-slip条件とした。また外洋での開境界では, 境界内側の値をそのまま外側の値に置き換える一様開境界条件を用いた。

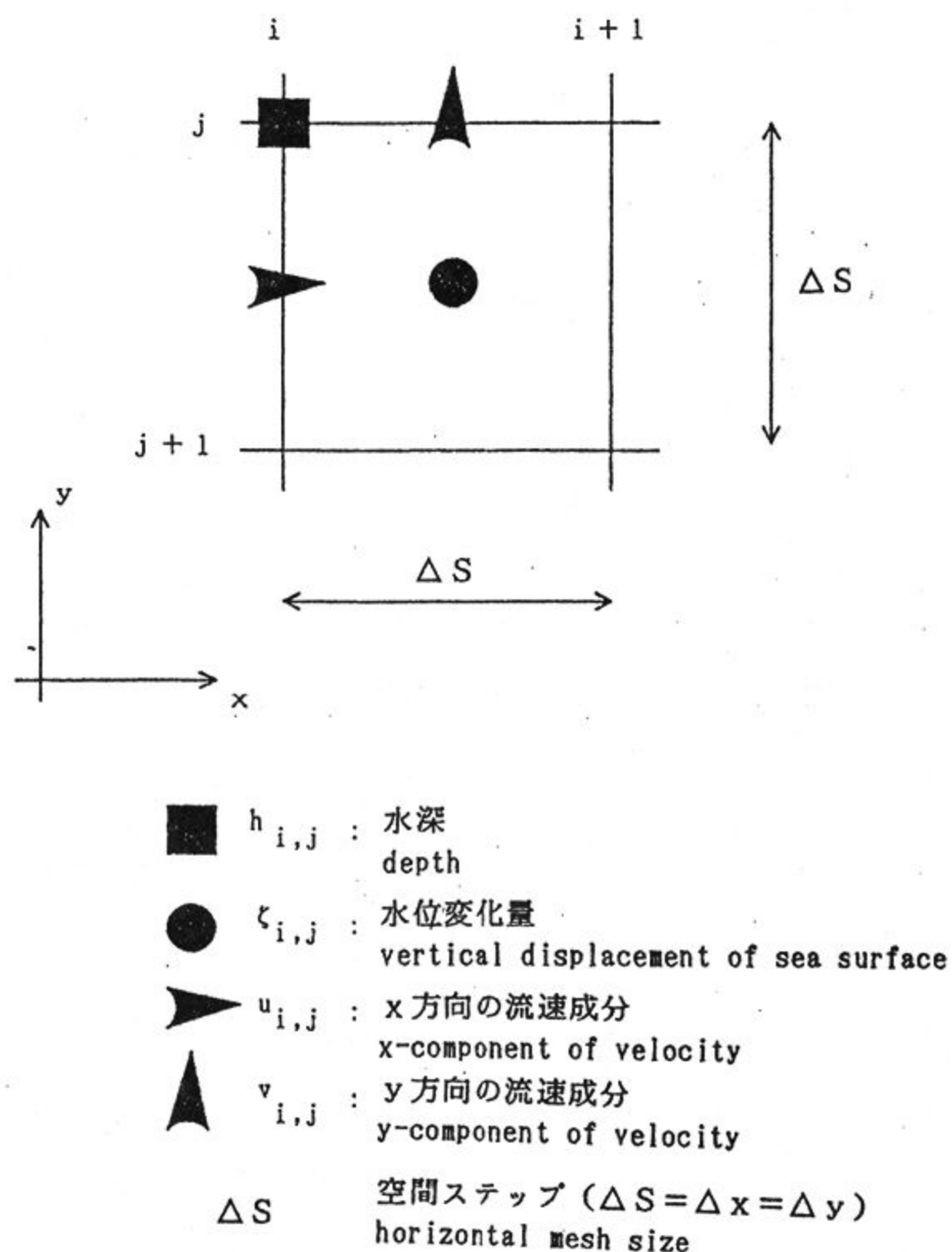


図4 メッシュ割付と変数の定義

Fig.4 Variables allocated on mesh system.

2.4 パラメータの設定

各パラメータの初期値は、表1に示した。各項目の値は次のように与えた。

(1) 空間及び時間ステップ: Δx , Δy , Δt

空間ステップは全体の格子数と海底地形を十分に表現できる長さがバランスするように、500mとした。時間ステップは重力波の進行速度を考慮した安定条件

$$\Delta t < \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{2gh_{max}}} \quad \dots (24)$$

より、本モデルで用いた $\Delta x=500\text{m}$, $g=9.8\text{m/s}^2$, $h_{max}=200\text{m}$ を代入すると、 $\Delta t < 7.9\text{sec}$ となる

が、ここでは計算の安定性を考慮し $\Delta t=6\text{sec}$ とした。

(2) 水平及び鉛直渦動粘性係数: K_h , K_z

水平方向は沿岸では $10^0 \sim 10^2 \text{m}^2/\text{s}$ 程度といわれているので⁸⁾、その平均的な値をとり、 $10 \text{m}^2/\text{s}$ とした。一方鉛直方向では、一般には、 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 程度であるが、その値を用いると、大水深海域、特に開境界付近で不安定が生じ、計算を長時間続けることはできなくなった。そのため、安定した計算が行える値として $K_z=0.1 \text{m}^2/\text{s}$ を用いた。しかし、この値は一般的な値に比べて1オーダー大きいと、不安定を起こす外海域(水深60m以深とした)にのみ用い、それ以外の海域では、 $K_z=0.01 \text{m}^2/\text{s}$ を用いて安定した計算結果を得た。

表1 2層フリーレベルにおけるパラメータ初期値一覧

table 1 Initial values of parameters used for 2-layer free level model.

Parameter	Value
Time step : Δt	6 sec
Horizontal mesh scale : $\Delta x, \Delta y$	500m \times 500m
Bottom friction coefficient : γ_b^2	0.0026
Drag coefficient : C_d	0.05
Horizontal eddy viscosity : K_h	10 m^2/s
Vertical eddy viscosity : K_z	0.1 m^2/s
Coriolis parameter : $f=2\Omega \sin \phi$	$6.4 \cdot 10^{-5}/\text{s}$
Thickness of upper level : h_1	10 m
Tidal conditions	
Number of component tide : N	1
Angular velocity : $\omega_1=2\pi/T_1$	0.5235988 rad/h
Amplitude : a_1	1 m
Lag (upper left) : ϕ_{11}	3.44 °
(lower left) : ϕ_{12}	1.72 °
(upper right) : ϕ_{13}	1.72 °
(lower right) : ϕ_{14}	0 °

(3) コリオリカ: f

$f=2\Omega \sin \phi$ より, 中城湾のほぼ中央の緯度 $\phi=26.2^\circ$ を代入して $6.4 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$ とした。ここで, Ω は, 地球自転の角速度である。

(4) 1層目の厚さ: h_1

中城湾では淡水流入がほとんどないため成層はみられないので, 観測した漂流ブイのドローグの位置が1層目の中央に来るように10mとした。また, h_1 を大きくすると, 1層目の流れを抑えられることから, 流れの強さを調節するパラメーターとして15mという値も用いた。

(5) 海底摩擦係数及び海面の抵抗係数: r_b^2, C_d

数値モデルにおいて一般に広く使われている値を用い, 海底摩擦係数は0.0026, 海面の抵抗係数は0.05とした。

2.5 外部条件

(1) 潮汐

潮汐は開境界において潮汐振幅を強制水位として与える。4分潮まで与えられるが, 本モデルでは中城湾の卓越周期である半日周期(12時間)のみを用い, 振幅は1mとした。計算領域の4角で次式のように振幅, 遅角を与え, その間の開境界については, それをはさむ2点の潮位を直線補間することにより水位を制御した。

$$\zeta = \sum_{n=1}^N (a_n \cdot \sin(\omega_n t - \phi_n)) \quad \dots (25)$$

ここで, N は分潮数, ω_n は第 n 分潮の角速度, a_n は振幅, ϕ_n は遅角である。

(2) リーフ条件

リーフ上では水深が浅いため, 砕波などの作用によりリーフ内側に強い流れを生じる。この流れを以下のような実験式を用いて表現した³⁾。この条件を線境界で設定し(図5), 線境界に対して垂直方向の成分の流量を湾内向きに強制的に与えてリーフ特性を再現した。差分格子上的のリーフの計算点は図6のようになる。

$$V = 0.07 \sin \omega t + 0.13 \quad \dots (26)$$

$$h = 0.7 \sin \omega t + 2.3 \quad \dots (27)$$

$$q = V \times h \quad \dots (28)$$

ここで, ω は潮汐周期の角速度, t は時刻, V, h はリーフ上の流速及び水深, q は線流量である。

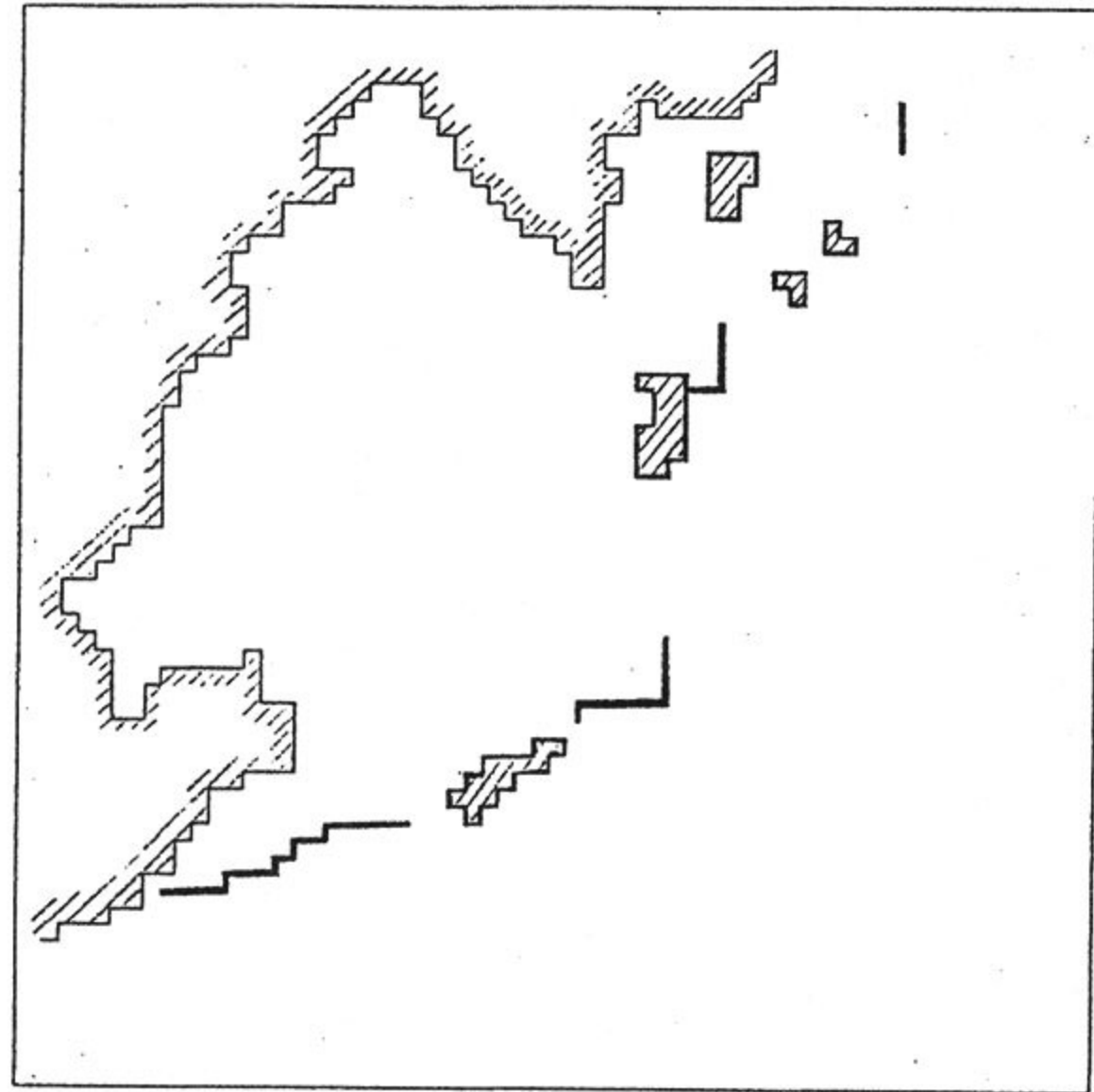


図5 リーフ条件を与える線境界(太線)
Fig. 5 Line boundaries with reef condition (bold lines)

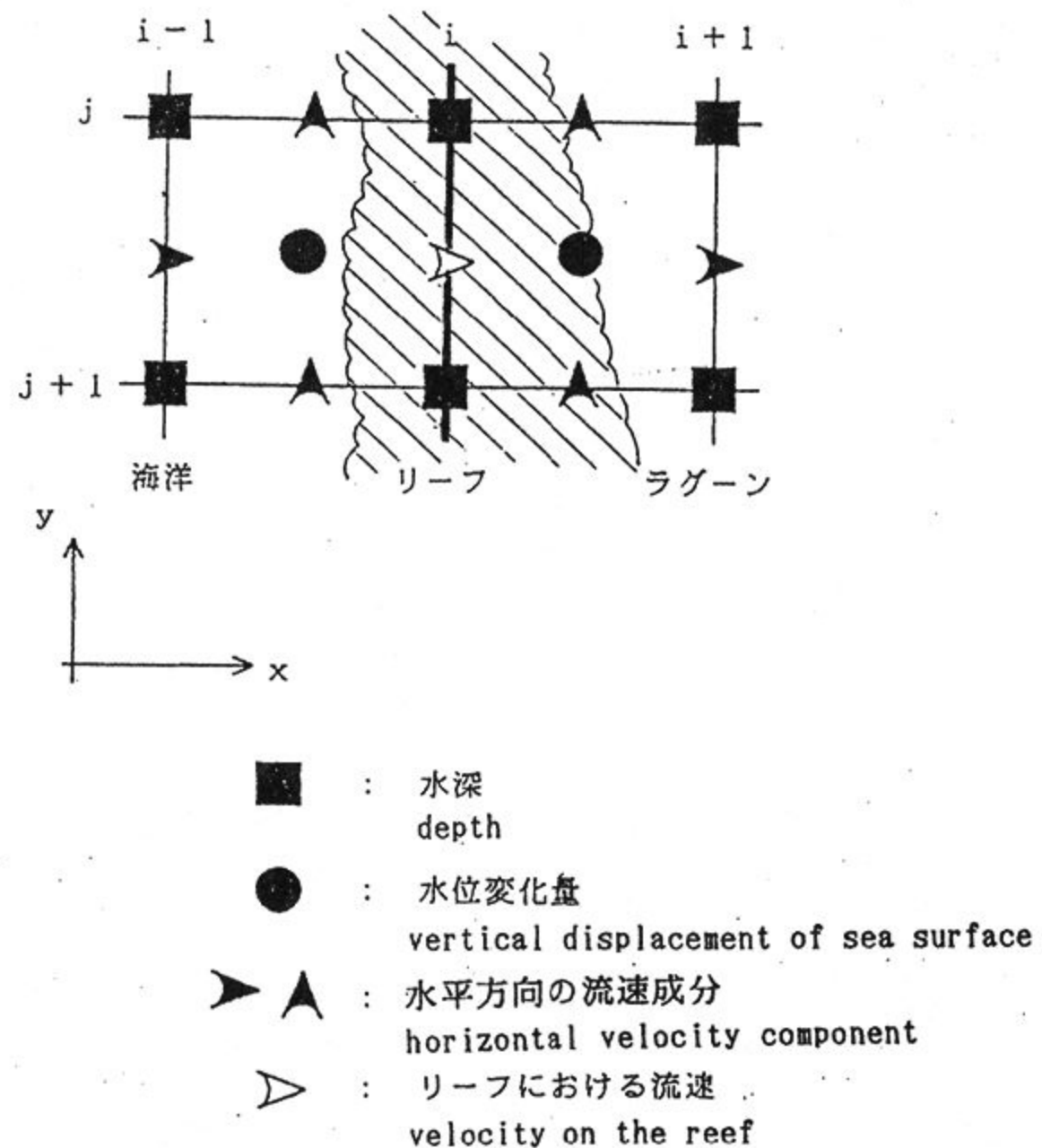


図6 リーフの計算点 y方向の線境界の場合(太線, $x=i$)
Fig. 6 Calculation point on the reef condition. In case of line boundary of y-direction (bold line, $x=i$).

(3) 風況の設定

海面を吹く風は、風向、風速、連吹時間を時間単位で与える。複数の条件を設定することで風況の時間変化を表現できる。ただし、空間的分布については一様である。

3 海水流動シミュレーション

中城湾における海水流動パターンに及ぼすモデルのパラメータの効果を知るために、風況、鉛直渦動粘性係数などに対するパラメータ実験を行った(表2)。

表2 中城湾における数値モデルのパラメータ実験

Table 2 Parameter test of numerical model in Nakagusuku bay.

case	model type	wind		Kz (m ² /s)	h ₁ (m)
		dir.	vel. (m/s)		
1	single layer	-	-	-	-
2		NNE	8	-	-
3	2-layer free level	-	-	0.1	10
4		NNE	8	0.1	10
5		SSW	5	0.1	10
6		NNE	8	0.05	10
7		NNE	8	0.01	10
8		NNE	8		10
9		NNE	8	0.1 (D>60m)	15
10		SSW	5	0.01 (D≤60m)	15
11		SSW	*		15
12		SSE	9	(D:depth)	15

* : 0→6→8→4m/s

3.1 単層モデルと2層フリーレベルモデル

風のない状態では、中城湾の流れは上げ潮時に津堅島南側と久高島西側から顕著な流入があり湾全体に広がり、下げ潮時はちょうど逆向きの流出が見られる(図7)。このような流れは実際に中城湾で見られる潮流のパターンであり、単層モデルと2層フリーレベルモデルの差はほとんどない(図7, 図8)。しかし、風が吹くことによって単層モデルと2層フリーレベルモデルでは流れのパターンに明確な差が生じる。図9は北北東風8m/sの風を一様に与えたときの湾中央部からの漂

流ブイの軌跡である。黒丸印が漂流スタート地点で、点は1時間ごとの位置を示している。岸に近い流れは、ほぼ同じだが、湾口や湾中央付近では、2層フリーレベルモデルの方が風向に沿う流れが卓越する。すなわち、単層モデルに比べ2層フリーレベルモデルの方がより現実的な吹送流をシミュレーションできるといえる。したがって、これ以降では全て2層フリーレベルモデルについて扱う。

3.2 流れに及ぼすパラメータの効果

(1) 風況の効果

海域全体に一様に風を与えることによって、湾内の流れのパターンは大きく変化する。風のない場合、南南西5m/s、北北東8m/sの3つの条件で風況の効果と比較した。図10, 図11, 図15(a)は各条件での上層の残差流(潮流の効果を除くため、12時間目から24時間目の1周期分の流れを積算したもの)である。風なしの場合(図10)は、湾内に顕著な流れは全く見られず、湾外でもリーフ条件のある部分に湾内への流入が見られるだけである。これは地形等による残差流への影響がほとんどないことを示している。一方、風が吹くと、北北東風(図15(a))では反時計回り、南南西風(図11)では時計回りの流れが岸に沿って卓越する。特に湾北部の浅瀬では流れが強い。

さらに、風を一様に与えた状態で時間に対して一様な場合と時間を変化させた場合で流れのパターンを比較した。南南西5m/sの場合で、風向は変えずに、風速を0→6→8→4m/sと時間変化させた(図12)。風向が同じでも風速が変わるだけで流れのパターンは大きく変化することがわかる。

(2) 鉛直渦動粘性係数(K_z)の効果

K_zの値は上層と下層の鉛直シアーを決めるだけでなく、上層に生じる吹送流の強さにも影響する。図13は北北東風8m/sでK_z=0.1m²/sと0.05m²/sのときの漂流ブイの24時間の軌跡である。岸に近いところでのブイの軌跡はほぼ同じだが、湾中央部及び湾口付近ではK_zが小さい方が風向成分がやや強くなっている。すなわち、K_zの値が小さいほど風の影響が大きくなる。ところが、K_zをもっと小さくして0.01m²/sとすると、外海域で計算の不安定が生じてしまう。

そこで、K_zの値は海域によっても異なること

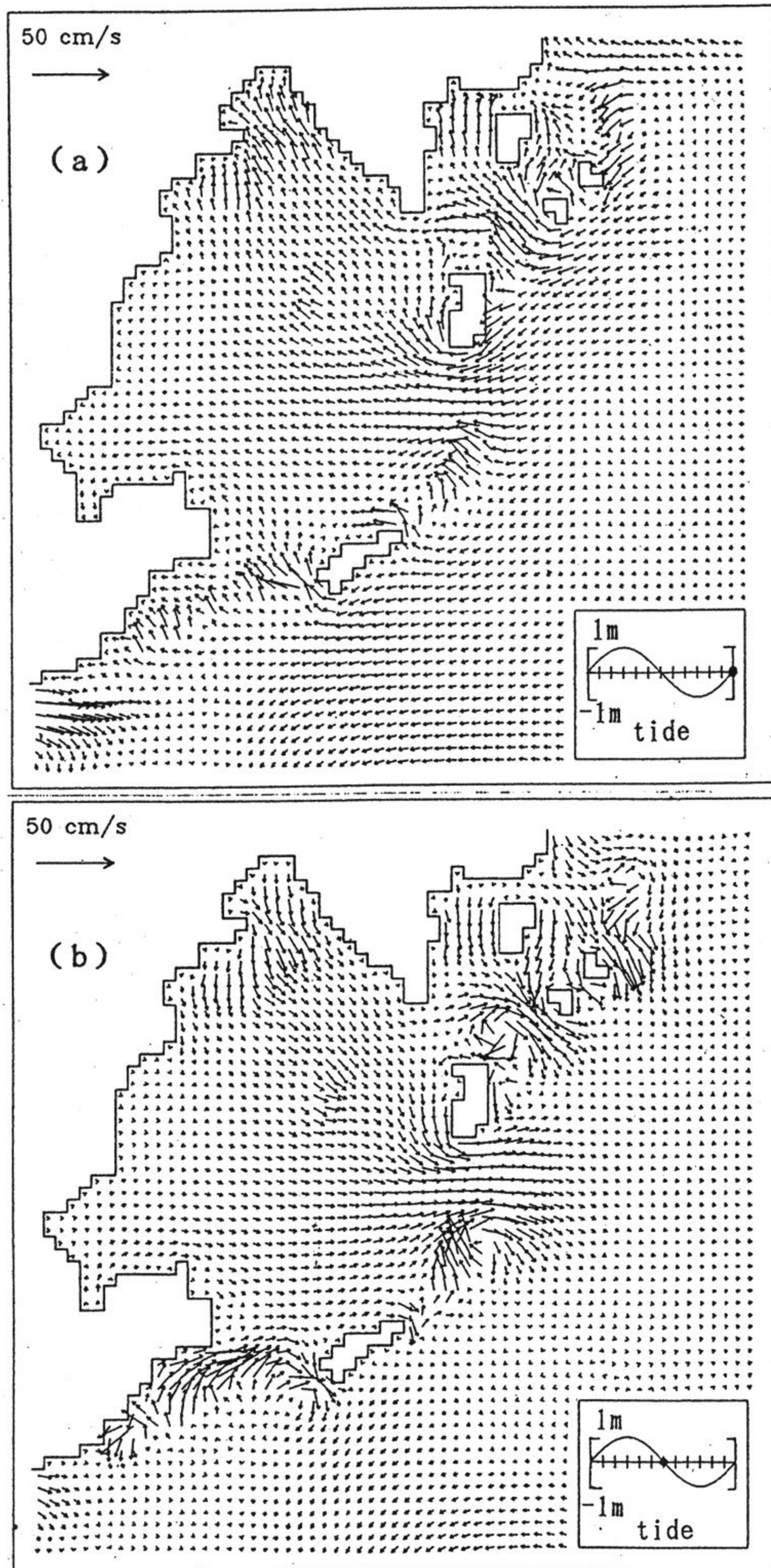


図7 中城湾における潮流シミュレーション[単層モデル (case 1)]

(a)上げ潮時 (24時間目), (b)下げ潮時 (18時間目)

Fig. 7 Tidal current simulation in Nakagusuku bay. [single layer model (case 1)]

(a)flood current (t=24hr), (b)ebb current (t=18hr)

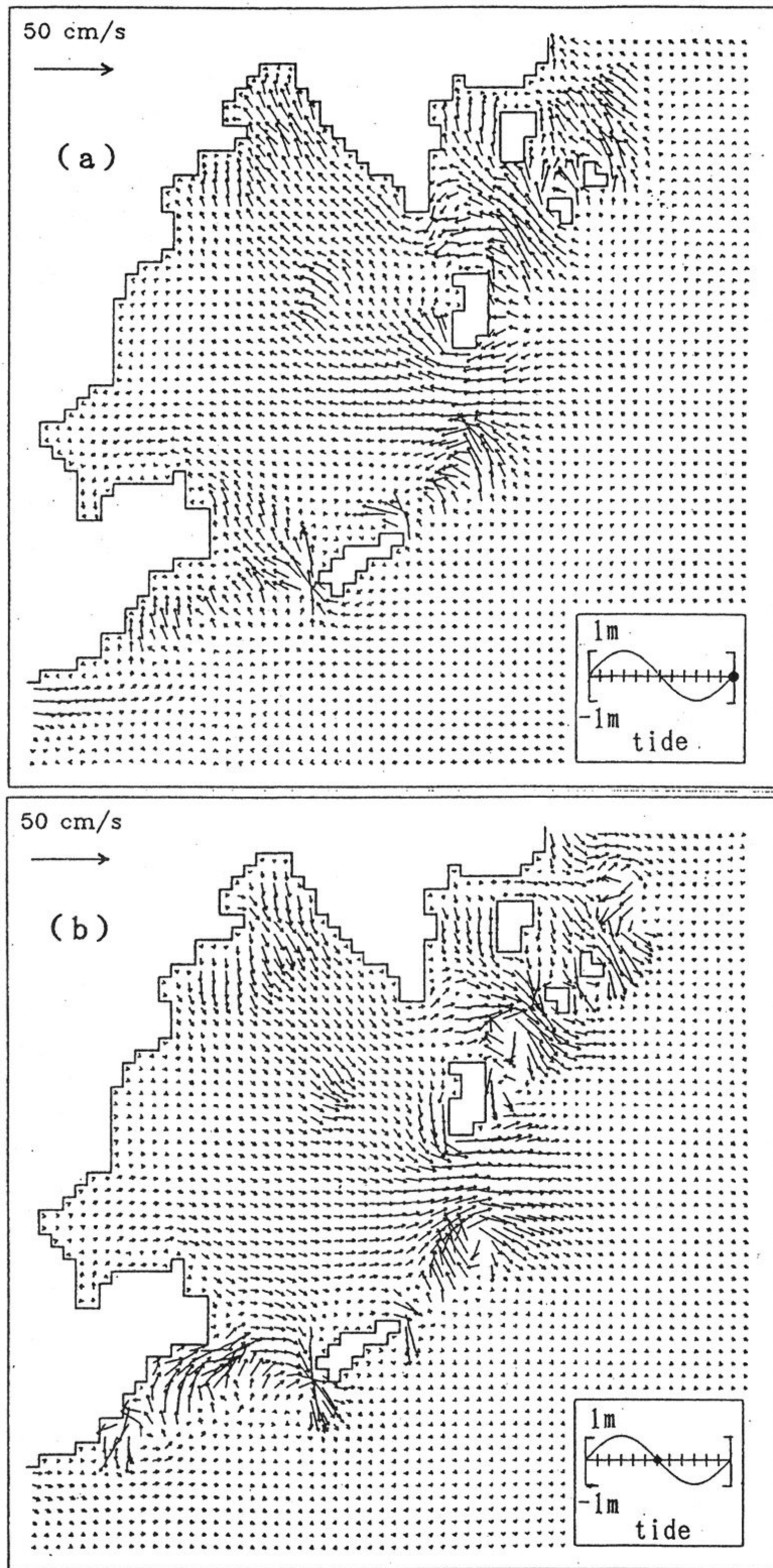


図8 中城湾における潮流シミュレーション (上層) [2層フリーレベルモデル (case 3)]
 (a)上げ潮時 (24時間目), (b)下げ潮時 (18時間目)

Fig. 8 Tidal current simulation in Nakagusuku bay. (upper level). [2-layer free level model (case 3)] (a) flood current (t=24hr), (b) ebb current (t=18hr)

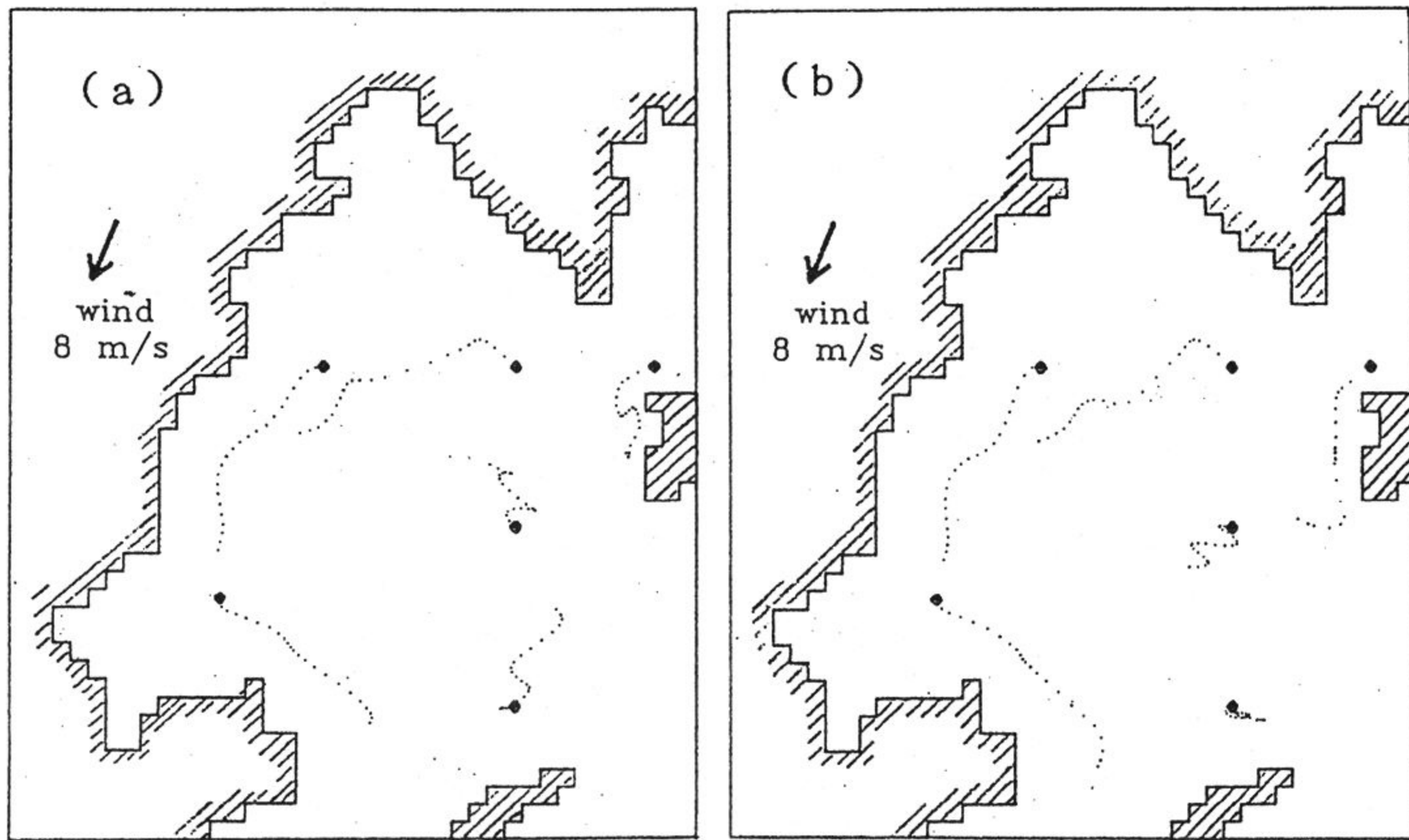


図9 単層モデルと2層フリーレベルモデルの流れの比較 (黒丸(●)はブイの漂流開始地点, 点(•)は1時間おきのブイの位置を示す。)

(a)単層モデル [case 2], (b)2層フリーレベルモデル [case 4]

Fig. 9 Comparison of water movements between single layer model and 2-layer free level model. (Black circle (●) and dot (•) indicate drifting start point and position of buoy at every hour respectively.)

(a)single layer model [case 2], (b)2-layer free level model [case 4]

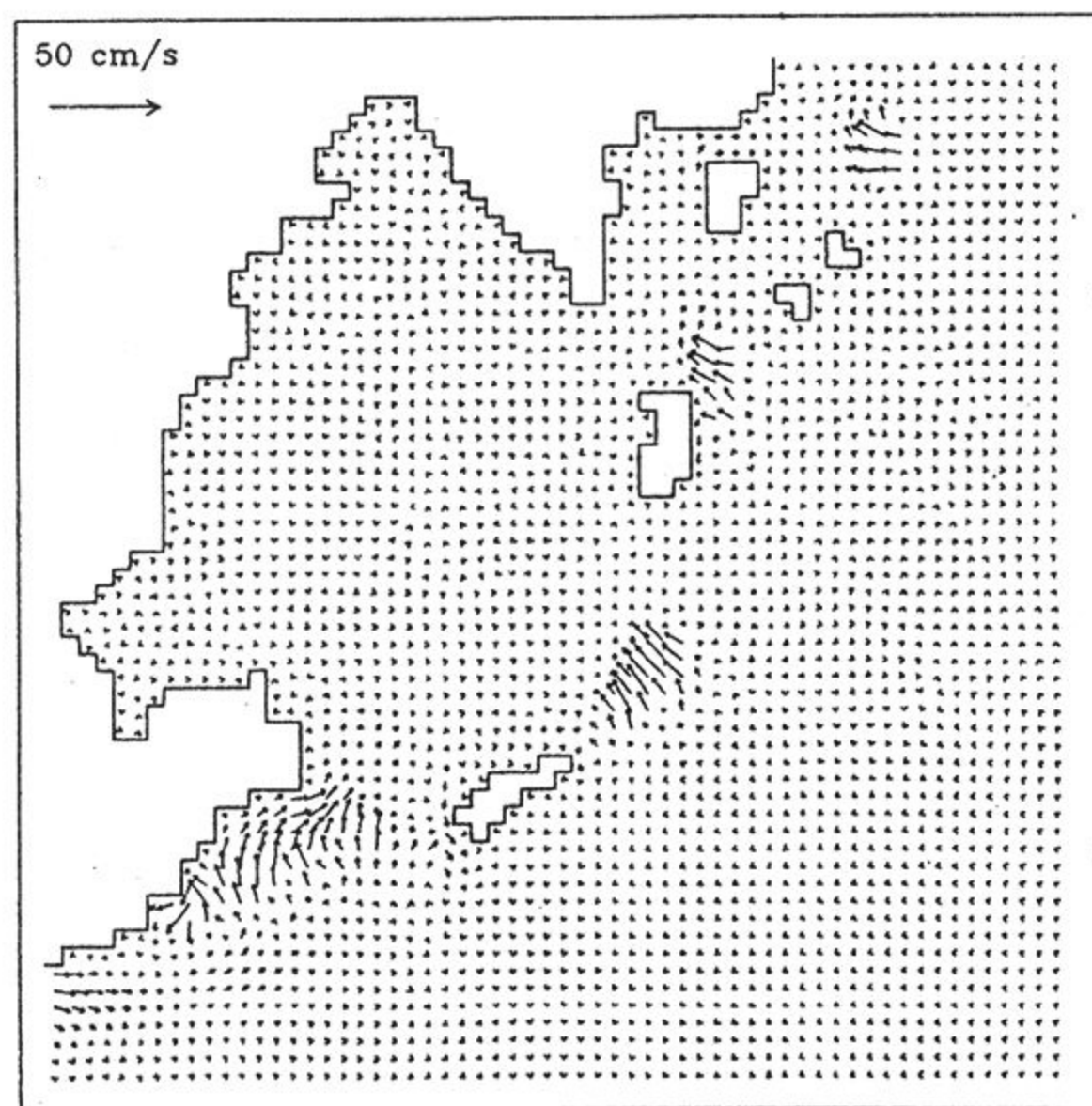


図10 中城湾における潮汐残差流 (上層) 12時間目から24時間目まで [case 3]

Fig.10 Tidal residual current in Nakagusuku bay (upper level) from t=12hr to t=24hr. [case 3]

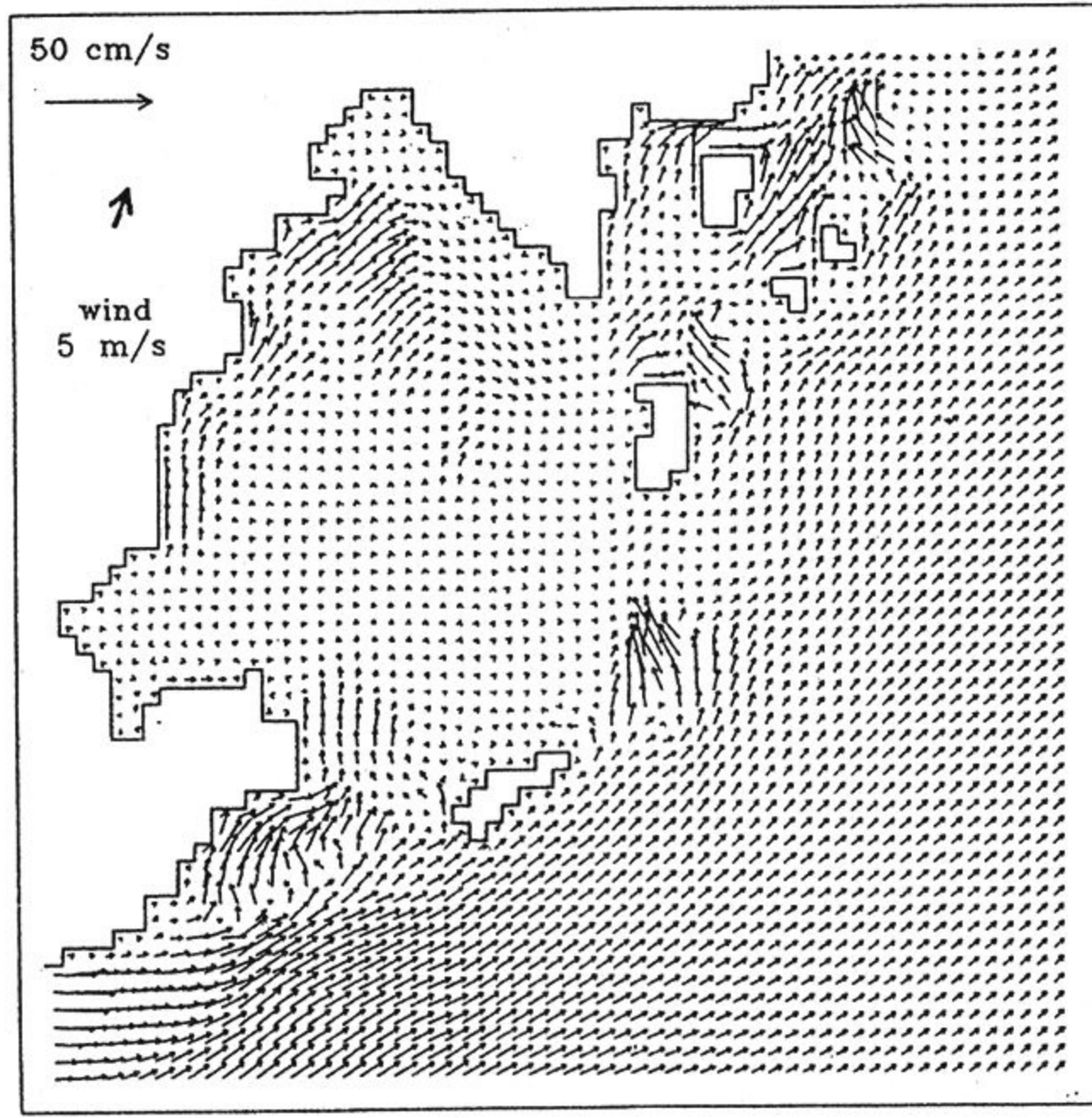


図11 南南西風 5 m/s 時の残差流 (上層) 12時間目から24時間目まで [case 5]
 Fig.11 Residual currents in upper level with the wind of SSW 5 m/s.
 Calculation from t=12hr to t=24hr. [case 5]

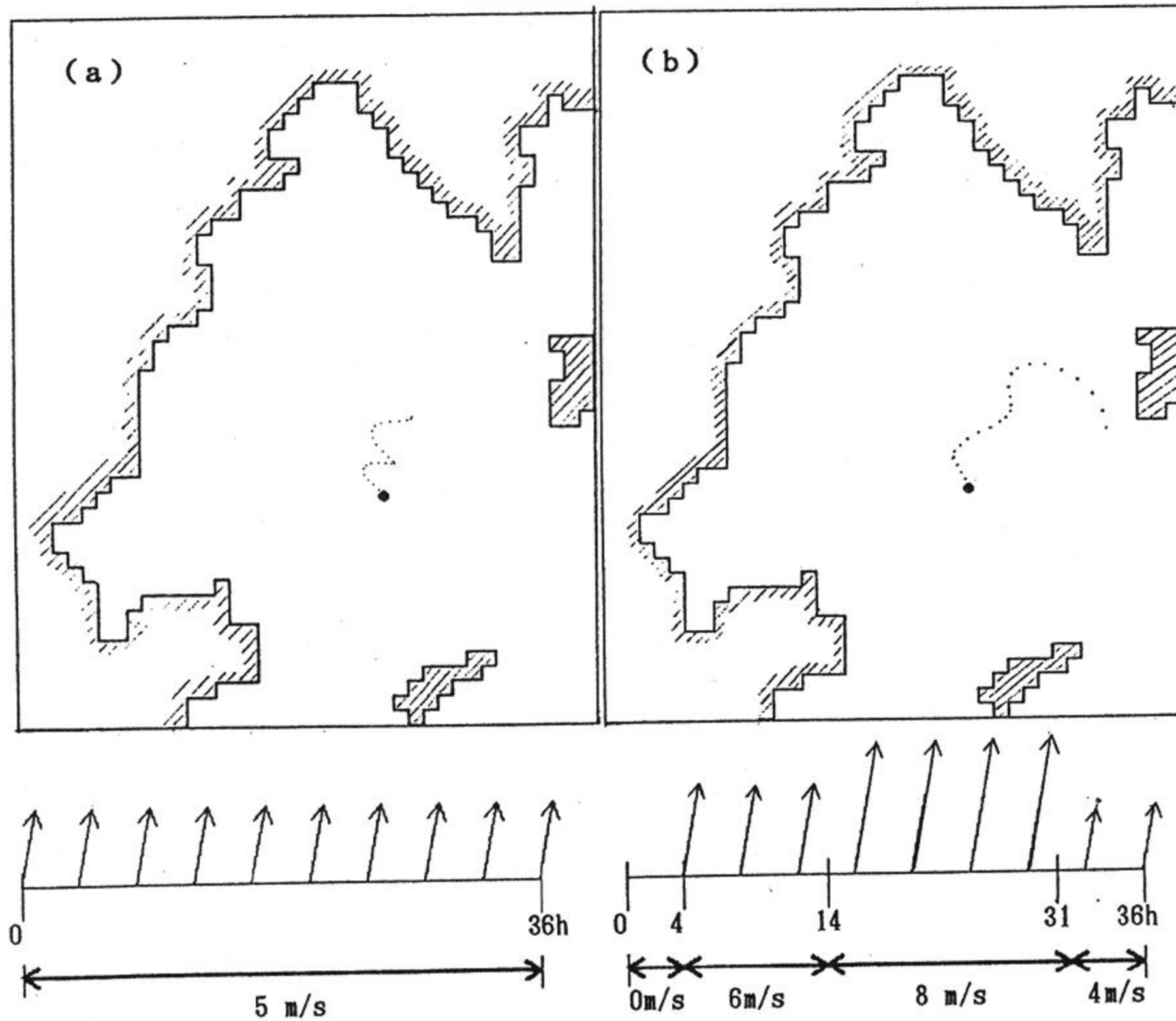


図12 風況の変化による流れのパターンの比較 (上層)
 (a)風一様 [case 10], (b)風時間変化 [case 11]
 Fig.12 Comparison of flows in upper level with different wind patterns.
 (a)constant wind [case 10], (b)variable wind [case 11]

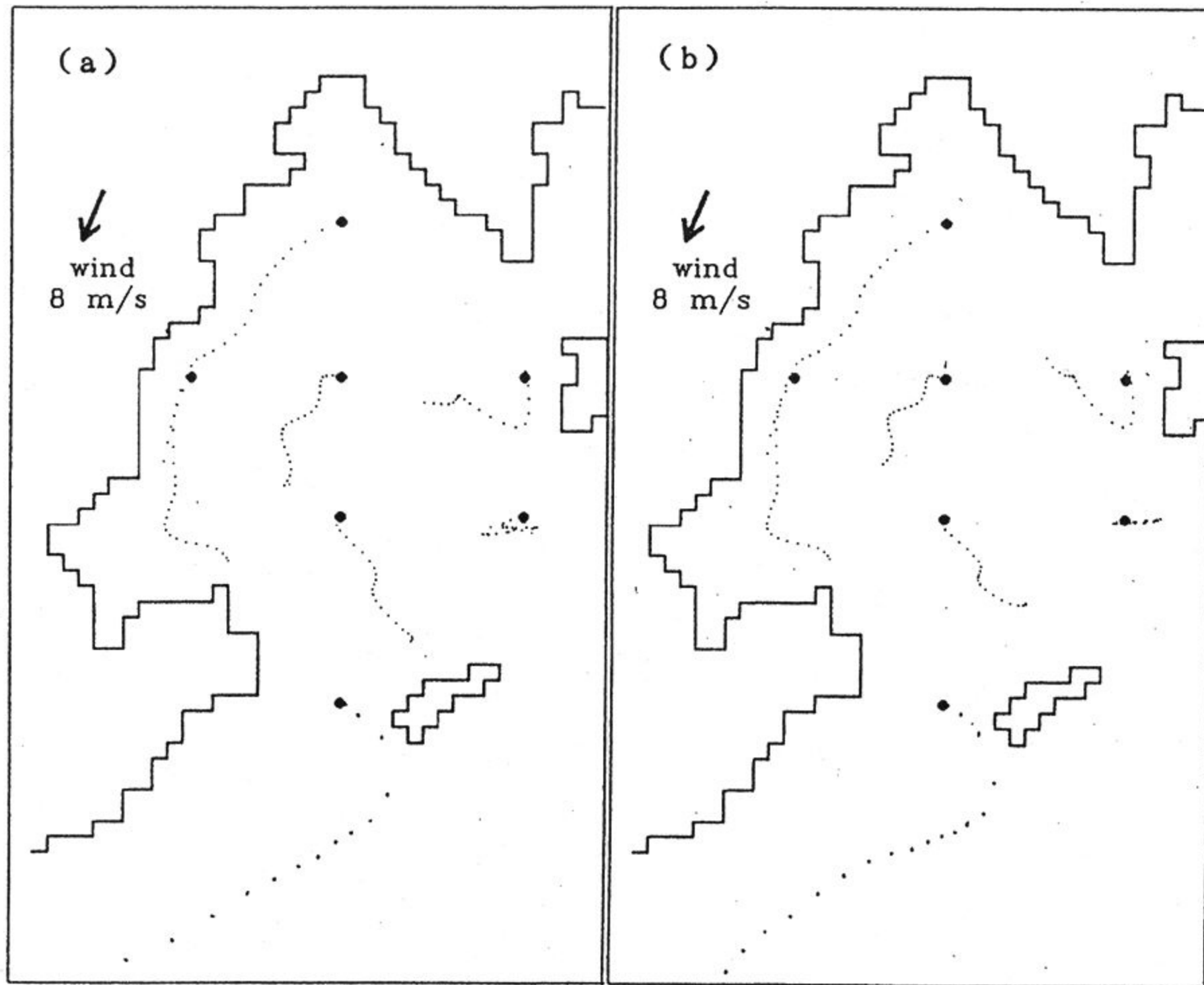


図13 異なる鉛直渦動粘性係数によるパターンを比較 (上層) (マークの意味は図9と同じ。)
 (a) $K_z=0.05\text{m}^2/\text{s}$, (b) $K_z=0.1\text{m}^2/\text{s}$ [case 7]

Fig.13 Comparison of flows in upper level with different vertical eddy viscosity. (Mean of the wach mark is similar to Fig. 9.)
 (a) $K_z=0.05\text{m}^2/\text{s}$ [case 6], (b) $K_z=0.1\text{m}^2/\text{s}$ [case 7]

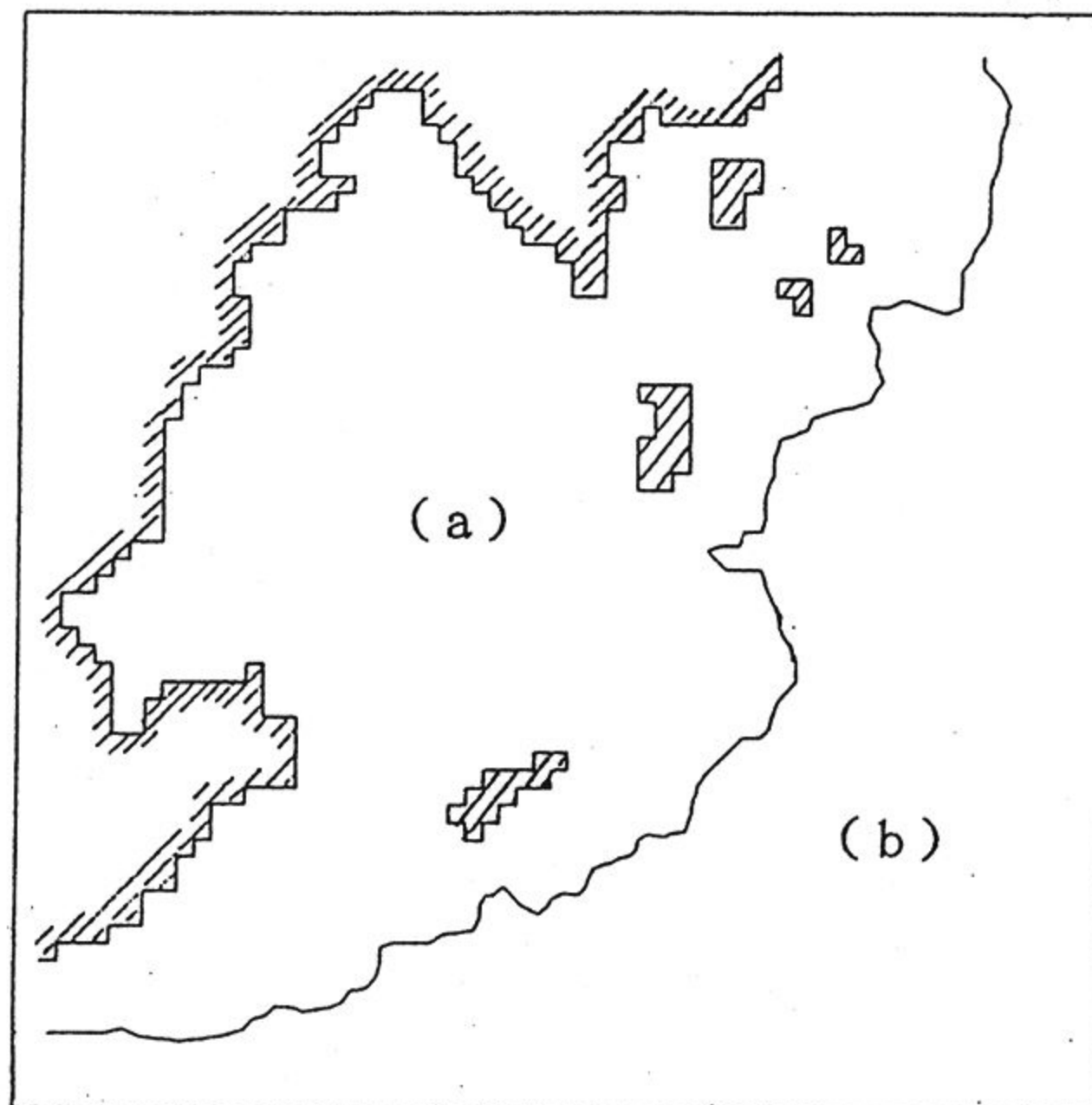


図14 K_z を変える領域の定義 (海域(a)と(b)の境界線は水深60mの等深線。)

Fig.14 Definition of area with different values of K_z . (Boundary line between areas (a) and (b) is here defined as isobath of 60m.)

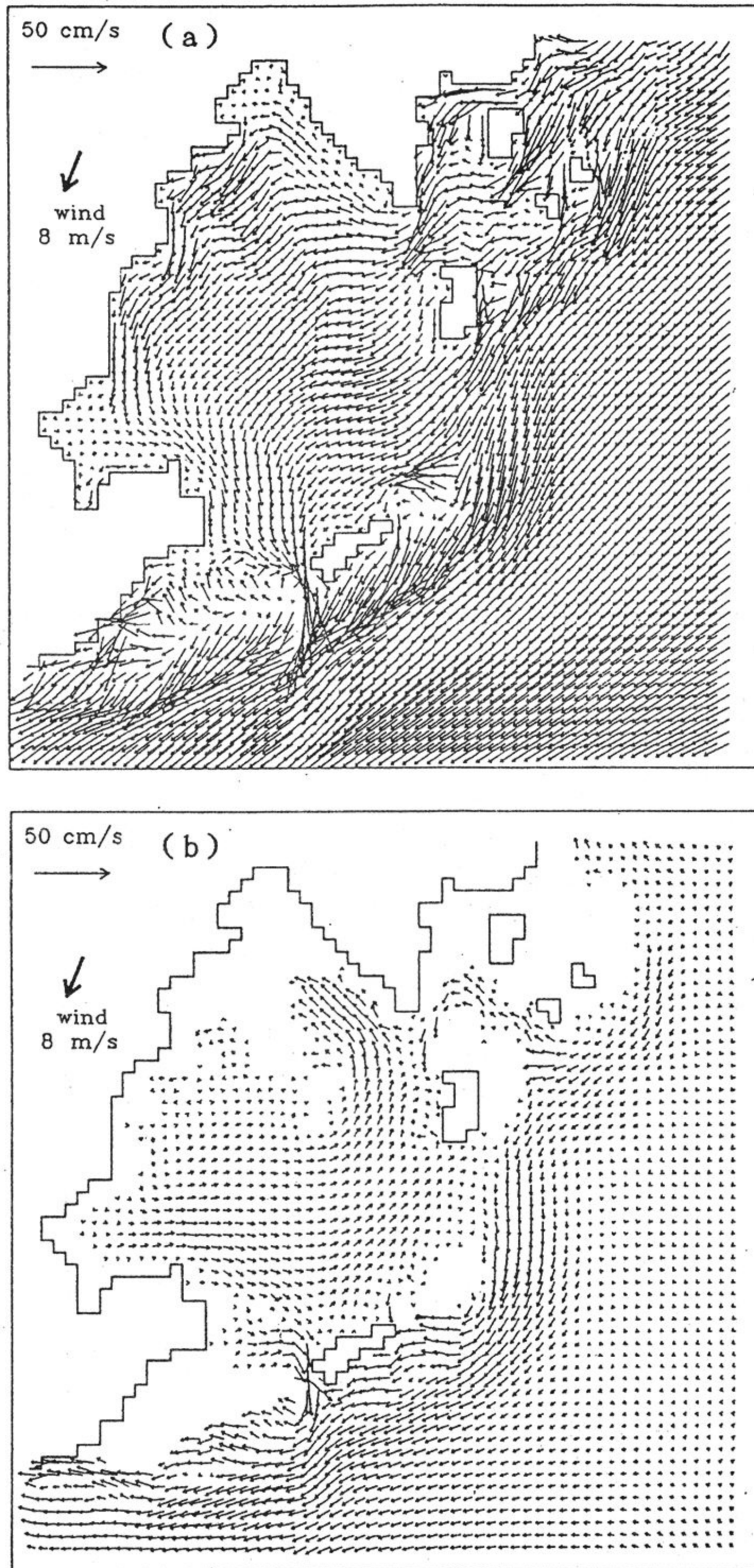


図15 水深により K_z を変えたときの残差流 (北北東風 8 m/s , 水深 60m 以浅で $K_z=0.01\text{m}^2/\text{s}$, $K_z=0.1\text{m}^2/\text{s}$) (a)上層, (b)下層 [case 8]

Fig.15 Residual current in changing value of K_z by depth ($K_z=0.01\text{m}^2/\text{s}$ in depth $\leq 60\text{m}$ and $K_z=0.1\text{m}^2/\text{s}$ in depth $> 60\text{m}$).

(a)upper level, (b)lower level [case 8]

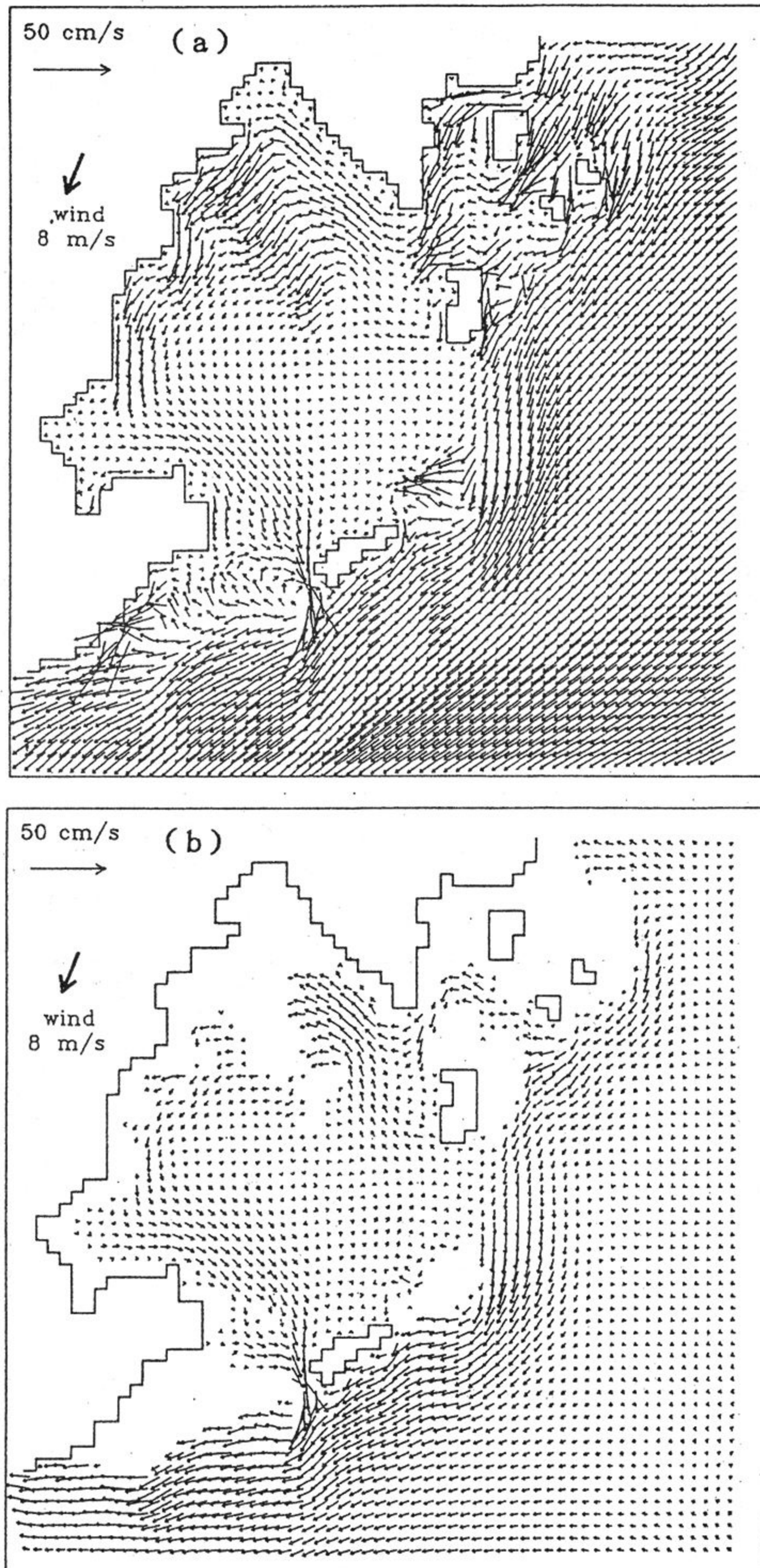


図16 K_z 一様ときの残差流 (北北東風 8 m/s , $K_z=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$) (a)上層, (b)下層 [case 4]
 Fig.16 Residual current with constant K_z (wind of NNE 8 m/s , $K_z=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$).
 (a) upper level, (b)lower level [case 4]

(N 26°)

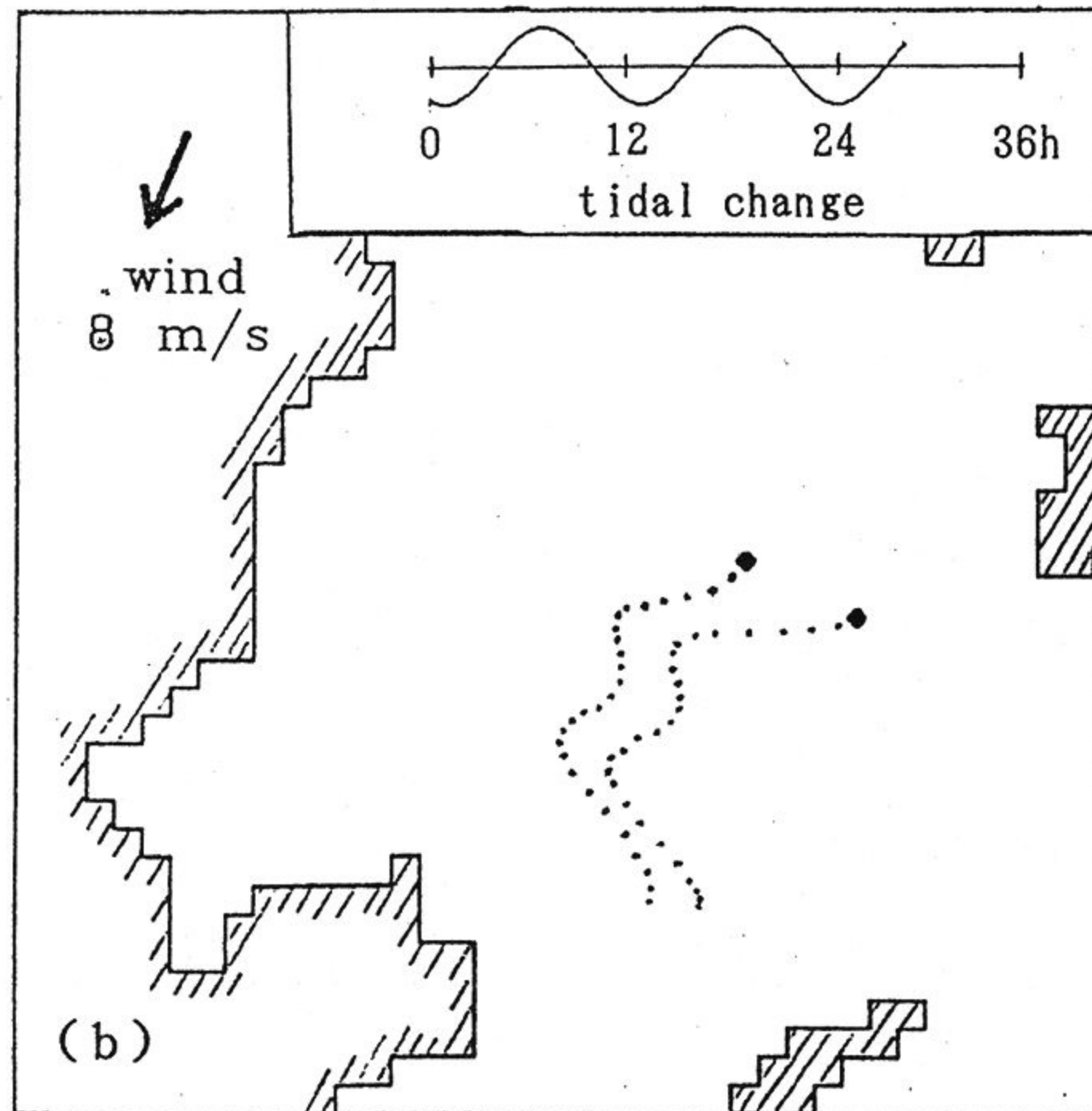
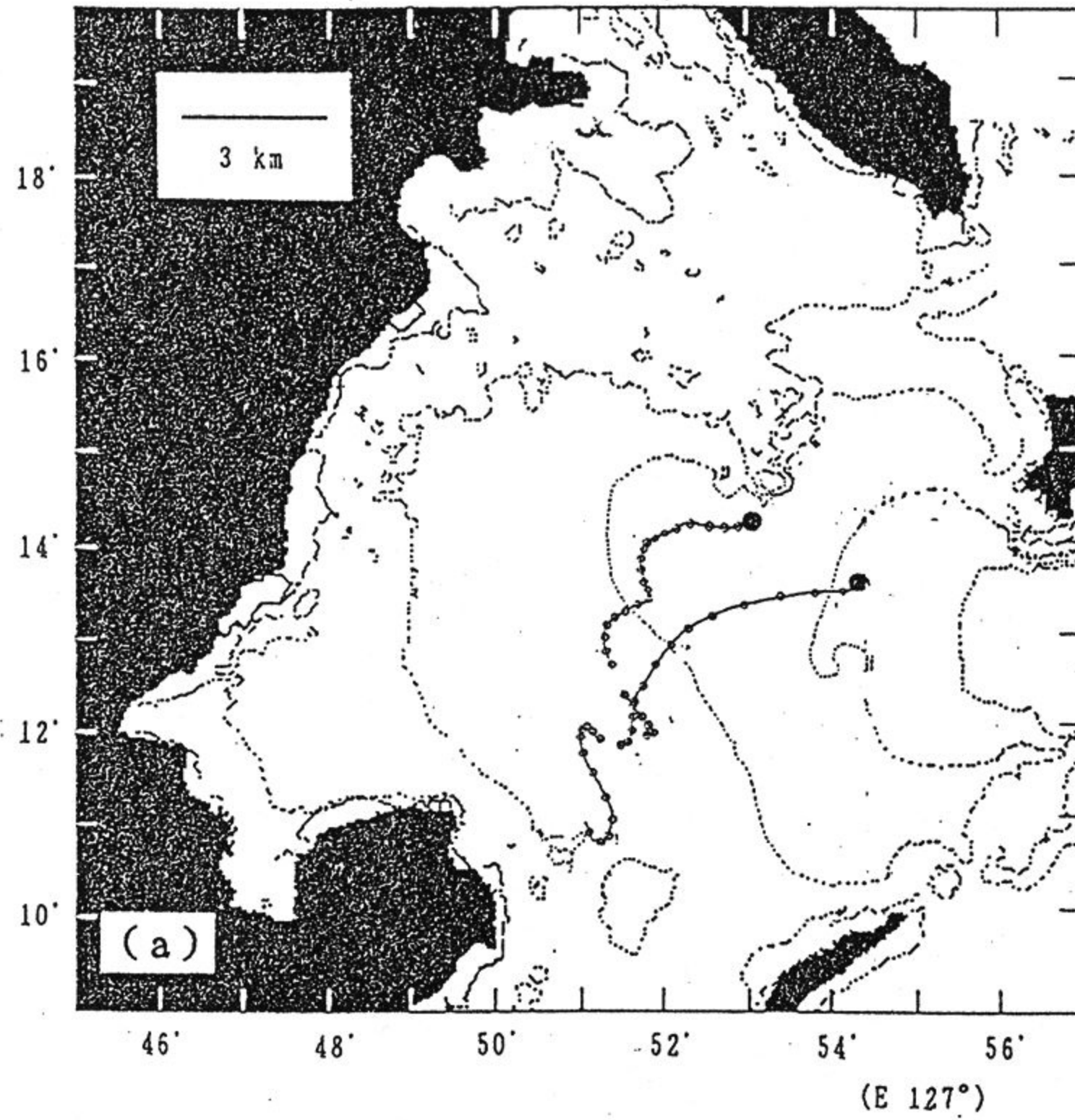


図17 中城湾における漂流ブイの軌跡 (1991年9月21日~22日)

(a)観測結果, (b)シミュレーション結果 [case 9]

(マークの意味は図9と同じ。潮汐振幅は1 m。)

Fig.17 Trajectories of drifting buoys in Nakagusuku bay. (21-22. Sep. 1991)

(a)observation result, (b)simulation result [case 9]

(Mean of the each mark is similar to Fig. 9. Amplitude of tide is 1 m.)

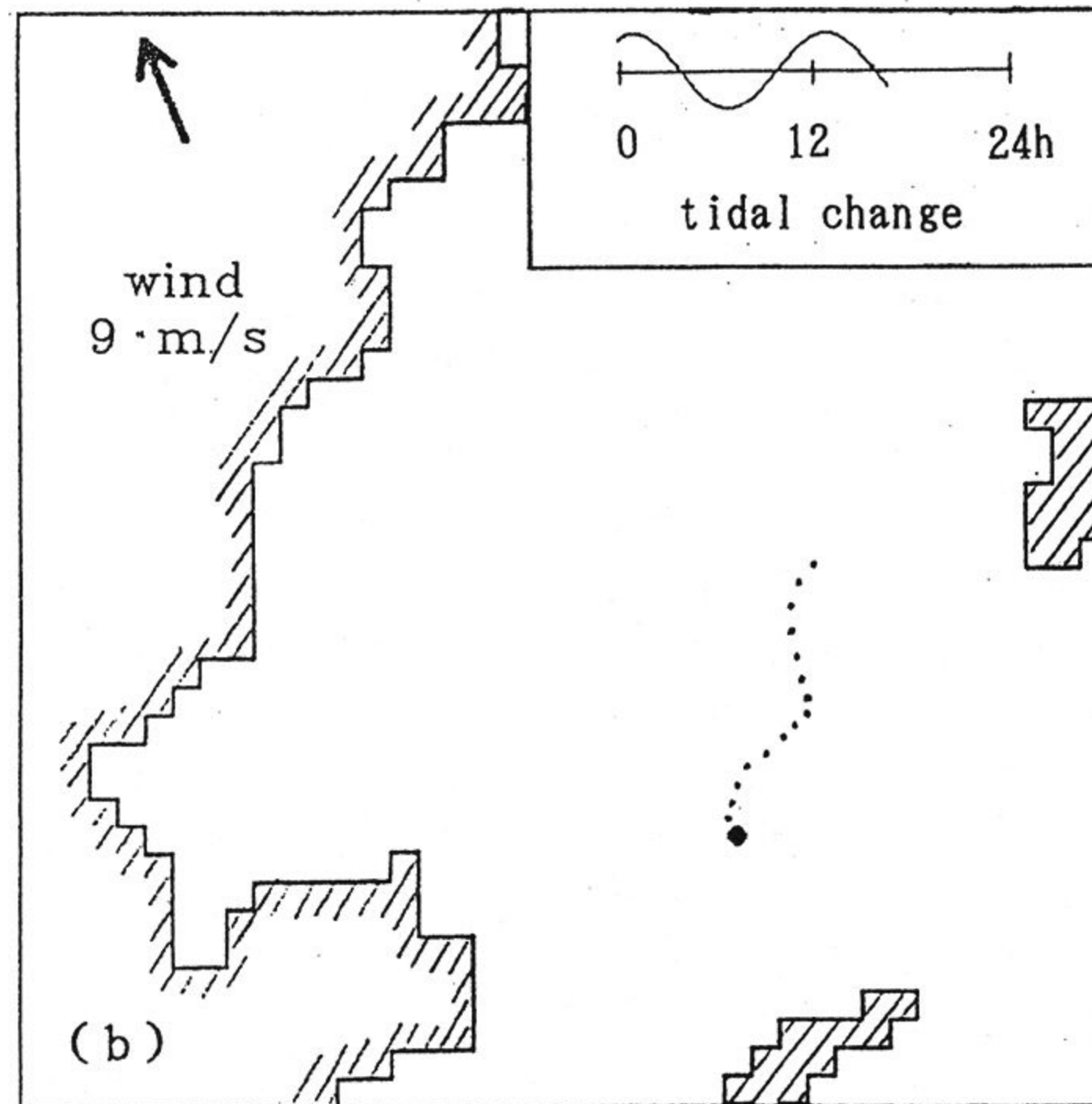
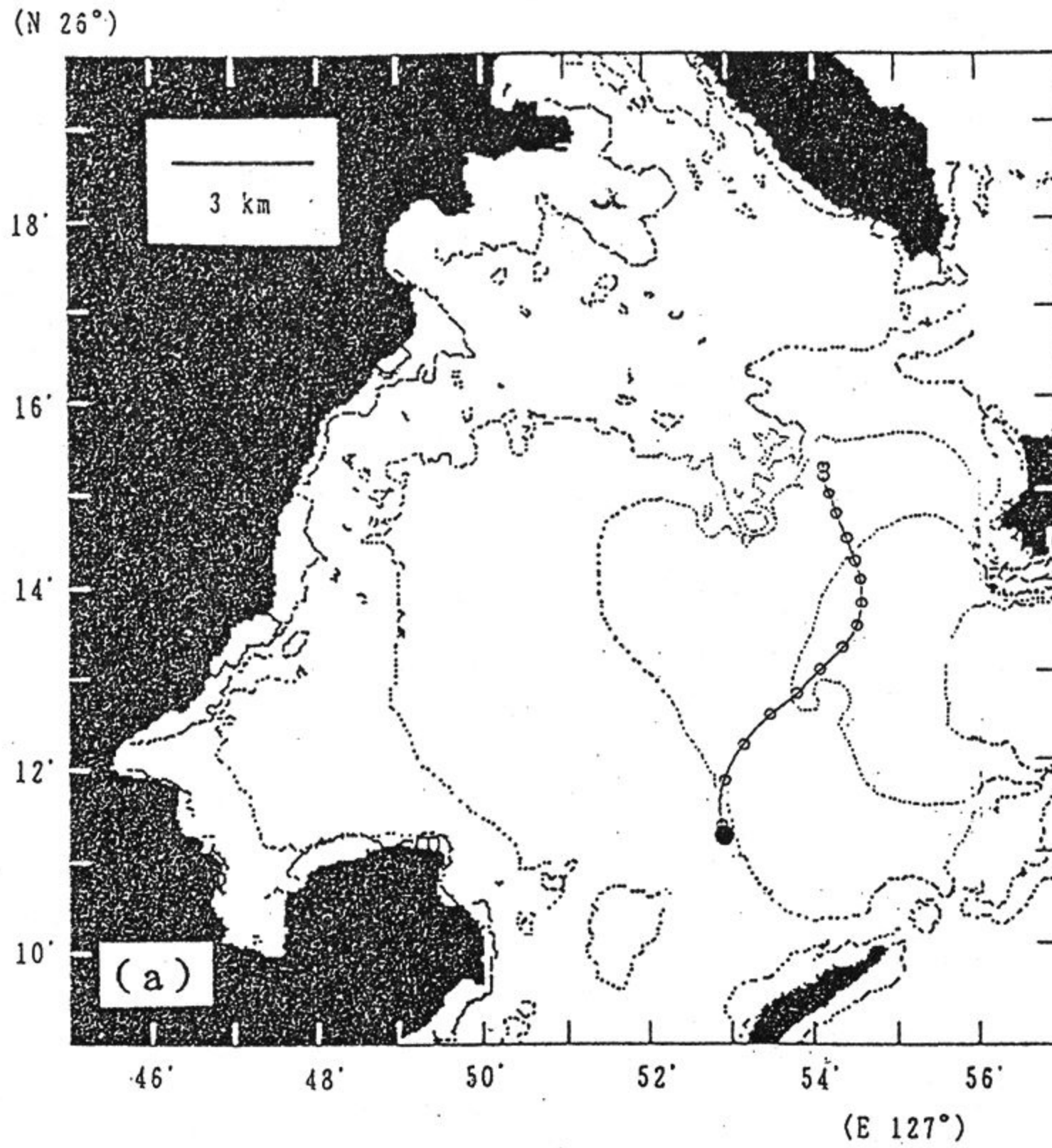


図18 中城湾における漂流ブイの軌跡 (1992年9月23日~24日)

(a)観測結果, (b)シミュレーション結果 [case 12]

(マークの意味は図9と同じ。潮汐振幅は1 m。)

Fig.18 Trajectories of drifting buoys in Nakagusuku bay. (23-24 Sep. 1991)

(a)observation result, (b)simulation result [case 12]

(Mean of the each mark is similar to Fig. 9 . Amplitude of tide is 1 m.)

から、浅海域と外海域との境界を水深60mの等深線で定義し(図14)、60m以深の外海域では $K_z=0.1\text{m}^2/\text{s}$ 、それ以外の浅海域は $0.01\text{m}^2/\text{s}$ として計算を行った。(図15)また、同時に全域一様に $K_z=0.1\text{m}^2/\text{s}$ とした計算も行い(図14)それらを比較した。図16では上下層共にほぼ同じ流れとなるが、図15では湾口付近で上下層の流向が異なることがわかる。また湾中央から湾口(久高島-津堅島間)にかけての流れが明らかに異なり、湾内で風向に沿う強い流れが現れる。したがって、 K_z の値は、外海域では大きくとることによってより安定した計算を行うことができる。

3.3 実際の漂流ブイ軌跡との比較

著者らは中城湾において1991から92年にかけてGPS精密測位漂流ブイによる海水流動調査を行った。その観測結果として、十数mの精度の漂流ブイの軌跡と観測期間中の現場の風向風速データが得られている³⁾⁴⁾。これらのデータの中から、91年9月21日~22日、92年9月23日~24日の2つのケースの漂流ブイの軌跡についてモデルと観測結果との比較を行った。モデルでは上記の水深60m等深線の境界で K_z を変えた形で計算を行ったが、湾内の吹送流の効果が強かったため、それを抑えるために h_1 を15mとした。

(1) 91年9月21日~22日の軌跡

これは、2つのブイをほぼ同時に干潮のおよそ1時間前に投入して、約29時間漂流させたものである(図17)。風況は期間中平均してほぼ北北東風 $8\text{m}/\text{s}$ で、これを一様に与えた。共に風下方向に流れる傾向は同じだが、モデルでは等速で久高島西端に向かっているのに対し、実際の軌跡は知念半島の方へ向かって徐々に減速している。モデルでは知念半島沖から久高島西端を通して外洋へ抜けていく流れが卓越しているが、実際の流れは、知念半島に沿って外洋へ出ていくようである。特に、モデルでは干満による軌跡の蛇行が緩やかだが、実際の軌跡は鋭く転向している。この動きは潮流によるものだが、モデルではこのような鋭い転向がみられないことから、潮流の効果が弱いと考えられる。また、実際の軌跡では2つのブイの投入位置が3km程離れただけで、全く異なる軌跡をたどるのに対し、モデルではほぼ水平移動するだけである。しかし、潮流による蛇行を繰り返

しながら、風下方向に流れていく傾向は捉えることができたといえる。

(2) 92年9月23日~24日の軌跡

これは、満潮のおよそ1時間前に湾中央南部からブイを投入し、約15時間漂流させたものである(図18)。風の条件は一様に南南東 $9\text{m}/\text{s}$ で、観測時風況とほぼ同様である。投入直後のブイの動きは、実際の軌跡と一致しているが、モデルではブイの軌跡の外海側へのふくらみが小さいことから、潮流による引き潮の効果が弱いことがわかる。3.3(1)の場合と比べると、軌跡は単純になっているが、実際のブイの速度は時間と共に変化しており、シミュレーションの結果では、投入直後のブイの速い動きがみられずほぼ等速で移動している。漂流ブイ観測時に、引き潮の乗ったブイが津堅島南側から外海へ抜けてしまうのではないかと思われたが、実際には湾内に留まり北上する軌跡が得られた。このような流れの傾向はシミュレートできたといえる。

4 おわりに

今回実際に観測から得られた漂流ブイの軌跡データを比較のために使用できたことは、数値モデルを用いてサンゴ礁海域の海水流動を検討する上で極めて有効であった。この漂流ブイデータは中城湾内に存在する小規模の複雑な流れが、風況の違いにより全く異なるパターンになることを示しているが、本モデルではまだこのような細かい流れのパターンのシミュレーションはできていない。しかし、中城湾において北北東風や南南西風により生じる流れのパターンのそれぞれの傾向をつかむことができたといえる。また、湾内の小規模の流れは風向が一定であっても風速が変化するだけで敏感に反応し、異なる流動パターンを形成することがわかった。

モデルのタイプとしては、単層モデルよりも2層フリーレベルモデルの方がより現実に近い吹送流をシミュレートできることが示された。今後は、多層モデルへと拡張していくことによって、さらに実用的なモデルになることが期待される。

計算の安定性の問題では、従来は不安定であった水深の大きい外海域を広く取り入れても、その外海域に対して、 K_z の値を大きくすることによ

て安定した計算を行うことが可能となった。

計算時間については、上流差分を用いたことにより、陽差分でありながらタイムステップを従来の約3倍にあたる6秒で計算可能となった。しかし、これでもまだタイムステップが小さいために多くの計算時間を必要とし、不安定も起こしやすい。陽差分モデルにおけるこれらの問題点を解決するためには、安定条件においてタイムステップに制約をもたない陰差分を用いることが必要である。

謝 辞

最後になりましたが、2層フリーレベルモデルを開発する際にご協力して頂いた国際航業(株)海洋エンジニアリング事業部技師長徳田正幸博士に深く感謝の意を表します。また、論文作成にあたり有益なご討論を頂いた海域開発研究部2Gの横澤均研究員に感謝いたします。

参考文献

1) K.P.Black, P.J.Moran and L.S.Hammond : Numerical models show coral reefs can be self-seeding . Mar. Ecol. Prog. Ser. , 74, 1-11. (1991)

- 2) 藤野正隆・多部田茂 : 多層モデルによる海水流動解析—東京湾内への海水流動への応用—日本造船学会文集, 170, 367-393. (1991)
- 3) 河野 健・ザビエ-レンハルト : 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—海洋科学技術センター試験研究報告, 25, 33-48 (1991)
- 4) 工藤君明・寺尾 裕・中村 仁 : GPS精密測位漂流ブイシステムによる海水流動の調査研究. 海洋調査技術, 3(1), 21-31. (1992)
- 5) 工藤君明・寺尾 裕・中村 仁 : GPS精密測位漂流ブイによるサンゴ礁の流れの計測. 海洋科学技術センター試験研究報告, 30, (Now, Appeqar)
- 6) Ishikawa, M. : A Study of Model for Coastal Environment Management. Tokyo Univ. doctoral thesis, 313pp. (1989)
- 7) 堀江 毅・沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究. 港湾技研資料, 360, 運輸省港湾技術研究所, 222pp. (1980)
- 8) 和達清夫 監修: 海洋大辞典. 東京堂出版, 東京, 589pp. (1987)

(原稿受理:1993年6月1日)