

陸棚斜面の影響を受けた非線形孤立渦の挙動

国立防災科研 松浦 知徳 (Tomonori Matsuura)

気象研 蒲地 政文 (Masafumi Kamachi)

1. まえがき

海洋中の強い孤立渦は、黒潮やメキシコ湾流等の西岸強化流の不安定現象（順圧・傾圧不安定）の結果として生み出される (Holland et al., 1982), それらは陸棚斜面等の海底地形との相互作用を頻繁に起こしている (Louis and Smith, 1982; Brooks and Legkes, 1982; Evans et al., 1985)。特に、黒潮から発生した暖水塊が長期間存在している東北沖の海底斜面は勾配が急であり、そこから相互作用を起こした時、準地衡流力学では正確に表現できない現象が発生していると考えられる。本研究では、海底地形の影響を強く受けている渦の挙動をベータ近似した二層プリミティブ方程式を使った数値実験によって調べた。

大陸棚近辺で観測される渦は、惑星のスビー波と同時に、地形性スビー波としても分散していく (Louis and Smith, 1982)。大陸棚近辺の海では、海底斜面が急なため、地形性ベータ効

果は惑星ベータ効果より10~100倍程度大きい。線形の準地衡流力学において、渦が惑星にスビー波として分散していく時、モードカップリングは起きないが、地形性にはスビー波として分散していく時、モードカップリングを起こす。このことは、海底斜面の効果が運動エネルギーから有効位置エネルギーを生み出し得ることを意味している。西岸に急勾配の海底斜面がある場でのバトロピック的な高気圧性渦は、惑星にスビー波を放出しながら西進し、斜面によって渦柱が締められると渦対を形成する (Smith and O'Brien, 1983; Matsuura and Kamech, 1989)。この渦対の形成は、モドンの形成の一要因と考えられる。

2. 斜面上のバトロピックな渦

バトロピック場で、海表面は固定壁を仮定し、海底地形として、西岸から離れるにしたがい、指数関数的に水深が深くなる場合の無次元渦位方程式は以下のよう書き下す。

$$\omega \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \psi - \delta \cdot S \frac{\partial \psi}{\partial x}) + R_0 \frac{1}{h} J[\psi, (\nabla^2 \psi - \delta \cdot S \frac{\partial \psi}{\partial x})]$$

(I)

(II)

$$+ \delta \cdot S \left\{ 1 + 2R_0 \left(\frac{\nabla^2 \psi - \delta \cdot S \frac{\partial \psi}{\partial x}}{h} \right) \right\} \frac{\partial \psi}{\partial y} + \varepsilon \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

(III)

(IV)

(V)

$$\begin{cases} u = -\frac{1}{h} \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ v = \frac{1}{h} \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{cases}, \quad (2)$$

(2)

ここで, $\omega = 1/f_0 T$, $R_0 = U/f_0 l$, $\delta = b/H$, $S = l/L$, $\varepsilon = \beta l/f_0$.
 (f_0 : コリオリパラメータ, U : 渦の代表速度, l : 渦の代表スケール, b : 地形の代表高さ, H : 平坦な部分の水深, L : 地形の代表幅, β : ベータ定数). 上記のパラメータに対し, 以下のような制限を与える。 $\omega \sim R_0 < O(1)$, $\hat{\beta} = \varepsilon/R_0 \leq O(1)$, $\delta \leq O(1)$, $S \sim O(1)$.
 (1)式において, δ, S のみか, た項が地形の変化に関連する項である。(1)式の(I)は非定常項, (II)は移流項, (III)が地形性ベータ項, (IV)は非線形の地形性ベータ項である。(IV)項は低気圧性渦と高気圧性渦によって符号が変わり, それぞれの渦の分散の仕方が非常に異なることを示している。(V)は惑星ベータ項である。

海底地形が平坦な場合 ($\delta = 0$), (1)式は

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 \varphi) + J[\varphi, \nabla^2 \varphi] + \hat{\beta} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

と簡略化できる。ここで, $\varphi = \psi/H$ である。(3)式は β 面上の準地衡流渦位方程式である。この方程式で支配される渦は, 惑星ベータ効果による自己推進作用により, 高・低気圧性渦はともに西へ移動する。さらに, 非線形効果のために, 低気圧性渦では北向き, 高気圧性渦では南向きの移動成分をもつ (図 1(a))。渦の発展として, イスビーラークは低気圧性渦では南東方向に, 高気圧性では北東に放出されていく。つまり, それぞれの渦は進行方向と逆方向にイスビー波を放出し

ながら移動していく。

(1)式で, $\delta s < R_0$ の条件を課すと海底地形の中々やかな場合に導けるバロトロピックな準地衡流渦位方程式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 \varphi) + J[\varphi, \nabla^2 \varphi] + \hat{\beta} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \hat{\beta} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

ここで, $\hat{\beta} = \delta s / R_0$ である。ここでは, 渦のスケール程度の海底斜面が西岸にあり, その東には平坦な地形を設定している。この場合, 地形性はスビー波としての渦の伝播は南向きである。それに對する非線形項により, 低(高)気圧性渦に対して西(東)向きの移動成分をもつ(図1(b))。したがって, 惑星ベータ効果と西岸の斜面による地形性ベータ効果が働く非線形渦では, 低(高)気圧性渦は西(南)への強い移動傾向を示す。スビーウェークは, 低気圧性渦ではその東側に, 高気圧性渦ではその北側に形成される。実際, 今回の実験でも, 高気圧性渦は南へ移動していく(図3(b))。一方, 低気圧性渦は, 南への移動及びその渦の北側に高気圧性渦の形成が見られる(図3(b))。

強い海底地形の場合, つまり, $\delta s \sim O(1)$ のときには(1)式の(I)~(V)のすべての項を考慮しなければならない。この場合, 前述までの渦の発展・移動にさらに付け加えられる特徴は, 低気圧性渦と高気圧性渦の違いにより異なる, た地形性スビー波の分散性を示すことである。低気圧性渦では, (IV)項が正とな

り(Ⅲ)項と合わさって分散性が強まり、一方、高気圧性渦では(Ⅳ)項が負となり、(Ⅲ)項から(Ⅳ)項が差し引かれ分散性が弱まる(図2(a),(b)比較)。

β 面上の直立壁近傍での非線形渦の挙動については、壁で形成されるステewartson境界層より渦のスケールが大きい場合には、鏡像効果が作用すると考えられてきた(安田等, 1986; Smith, 1986)。西岸の壁に低気圧性渦が近づくと、渦の強さに比例し壁からの距離に反比例した南向きの移動速度が誘起される。(1)式から、急な斜面($\delta \leq O(1)$)の場合には、この海底斜面によっても鏡像の効果が現われることが予想される(図1(c))。(1)式において、 $\psi = \psi_0 + R\psi_1 + R^2\psi_2 + \dots$ のように流量 ψ を1スビー数 R で展開すると $O(R^0)$ で、

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial y} = 0, \quad \text{つまり} \quad u_0 = 0, \quad (5)$$

となる。このことは、 $O(R^0)$ で急な海底斜面が直立壁と同じ役割を果たしていることを示している。今回のバトロピックに近い二層モデルの渦における数値実験で、 $\delta \leq R_0$ のすべてのケースで鏡像効果による移動が発生した。

3. 斜面勾配を変化させたときの非線形渦の挙動

西岸の海底地形の高さを変化させることにより、高気圧性渦がどのように発展及び移動するかを調べた。初期渦としては、上層の最大速度 $U_1 = 100 \text{ cm s}^{-1}$ で下層の最大速度 $U_2 = 80$

cm s^{-1} , $l = 60 \text{ km}$ のガウス渦とした。具体的には海底地形の高さ及び形はケース A からケース G までの 7 ケースについて数値実験を行った。ケース A はバロトロピック成層が式 (3) で支配される平坦な海底地形の場合である。ケース B は一次関数の斜面に対する準地衡流渦位方程式 (4) で支配される場合である。ケース C ~ F は式 (1) のすべての項が重要となる一次関数の形の急な勾配の海底斜面の場合であり, C から F になるほど勾配が急になる。ケース G はケース F と同じ β の値をもつが斜面形が一次関数でなく指数関数で東北沖の海底斜面に近いものである。

斜面の勾配の強さを变化させた数値実験において, ケース B ($\beta_0 < 1$) の渦の挙動は, ケース C ~ G ($\beta_0 \geq 1$) の挙動と非常に異なる。ケース B では, 渦の上下層ともに斜面上にのり上げ, バロトロピックな地形性ロスビー波を合散させることにより急激に減衰し, 海底地形のない場合 (ケース A) より弱い上層だけの渦を形成する (図 3 (a))。斜面をのり上げた渦の下層は, 北側に低気圧性渦を形成し合散して, いさ (55 日 ~ 70 日), そのときの伝播方向は南である (図 3 (b))。一方, ケース C ~ G では, 下層は斜面をのり上げる事ができず, 強い地形性ベータ効果のために渦対を形成し, 上下層が分離し, その時, 非常に強い上層だけの渦をつくる (図 4 (a), (b))

ケースF)。パラメータ範囲から判断すると、ケースC ($\beta = 1$) が準地衡流力学の範疇とそうでないものの境目である。実際、プリミティブ方程式を使用した数値実験では、その違いが顕著に出ている。したがって、急勾配の海底斜面で、その効果が重要となる問題では準地衡流渦位方程式を使用することは不適当と考えられる。

渦の移動に関しても、ケースBとケースC～Gのグループで異なる(図5(a), (b))。ケースBはケースAに近い移動パターンを示すのに対し、ケースC～Gは斜面をのり上げることはできずに、領域の南西部を複雑に動いている。この違いの一番大きな要因は、下層に渦対を形成するかどうかという点にある。渦対を形成した場合には、東向き成分が生まれ、上層も下層の渦対と分離し上層だけの渦になるまで東へ移動していく。

ケースC～Fに対して、渦の移動の β 依存性を調べてみたところ、下層に渦対が形成されるまで(40日まで)は、 β が大きいものほど南への移動が小さい(図5)。このことは、惑星ベータ効果と移流による南への移動及び地形性ベータ効果による南への移動を考慮合わせ(図1(a), (b))と、 β が大きいものほど強い鏡像効果が働いているものと考えられる。

4. あとがき

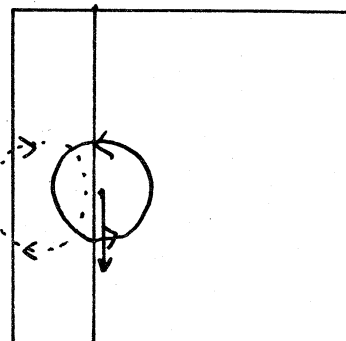
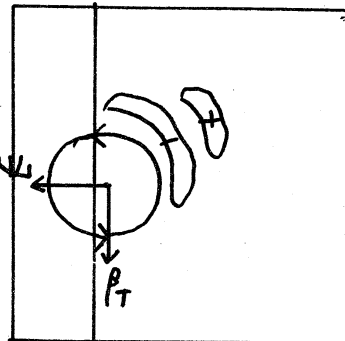
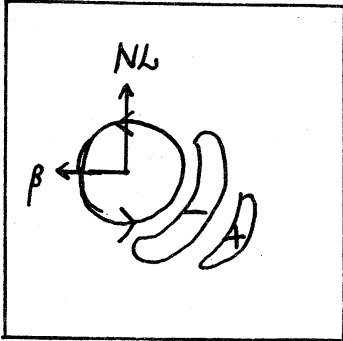
強い孤立渦に対する海底地形の影響を明らかにするため、 β 近似した二層プリミティブ方程式を使って、斜面勾配の急な場での高・低気圧性渦の相違、斜面勾配の強さを変化させた時の高気圧性渦の挙動の違いを数値的に調べた。その結果、非線形地形性ベータ項は、低気圧性渦に対しては地形性はスビー波としての分散性を強め、一方、高気圧性渦に対しては分散性を弱めることがわかった。斜面勾配の強さに対しては、 $\beta < 1$ と $\beta \geq 1$ で高気圧性渦の挙動が非常に異なり、 $\beta \geq 1$ に対しては、準地衡流力学では表現できない力学範囲であることを明らかにした。

参考文献

- Brooks, D. A. & Legeckis, R.V., 1982, J. Geophys. Res., 82, 5469-5476.
 Evans, R. H., Baker, K. S., Brown, O. B., & Smith, R. C., 1985, J. Geophys. Res., 70, 8803-8811.
 Holland, W., Harrison, D. & Semtner, A. J., 1983, in Eddies in Marine Science, 380-403, Springer-Verlag.
 Louis, J. P. & Smith, P. C., 1982, J. Phys. Oceanogr., 12, 56-73.
 Matsuura, T. & Kamachi, M., 1989, Elsevier Oceanogr. Ser., 50, 561-575.
 Smith, D. C. & O'Brien, J. J., 1983, J. Phys. Oceanogr., 13, 1681-1697.
 Smith, D. C., 1986, J. Phys. Oceanogr., 16, 1250-1272.
 安田一郎, 奥田邦明, 水野恵介, 1986, 東北水研報告, 48, 67-86.

(a) 惑星ベータ効果 (b) 地形性ベータ効果 (c) 鏡像効果

低気圧性渦



高気圧性渦

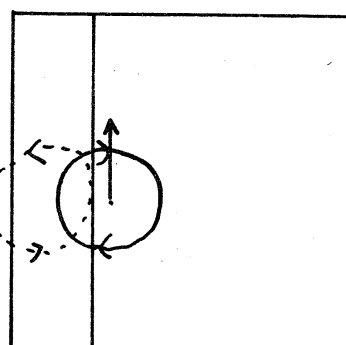
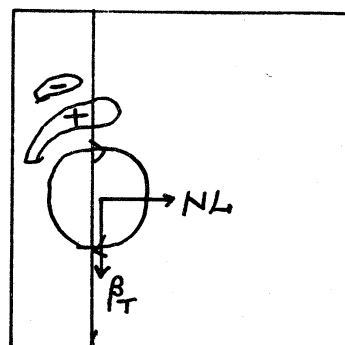
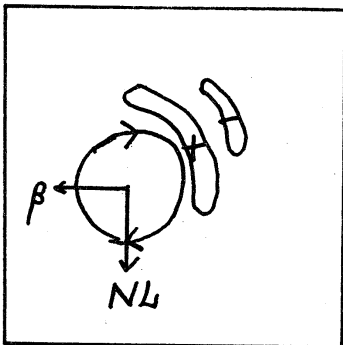
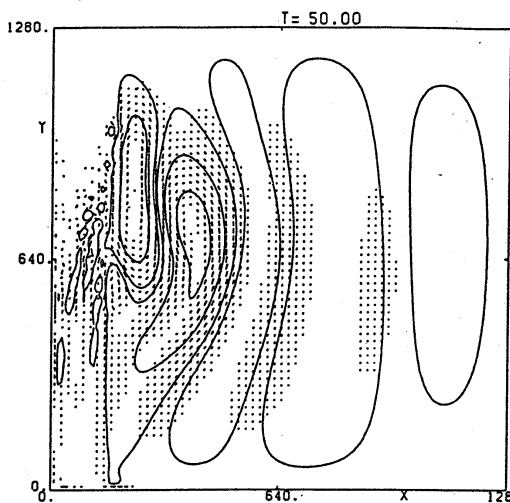
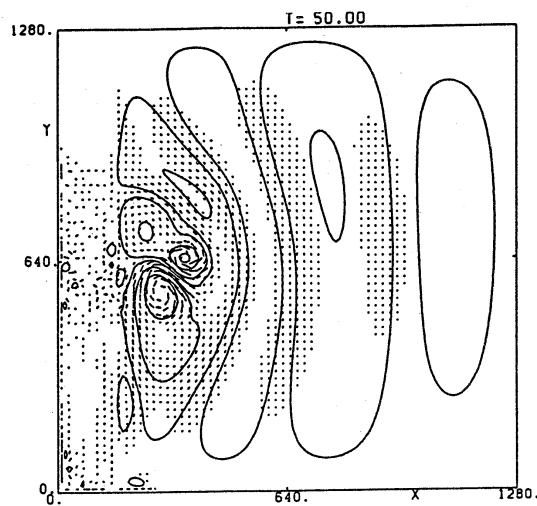


図1. 渦の移動に関する模式図. 矢線は渦の移動方向を示す.



(a) 低気圧性渦



(b) 高気圧性渦

図2. バルトロミウスの初期渦の50日後の下層の圧力分布及び速度ベクトル. (a)では初期の渦はすでに分散している. (b)では渦が形成されている.

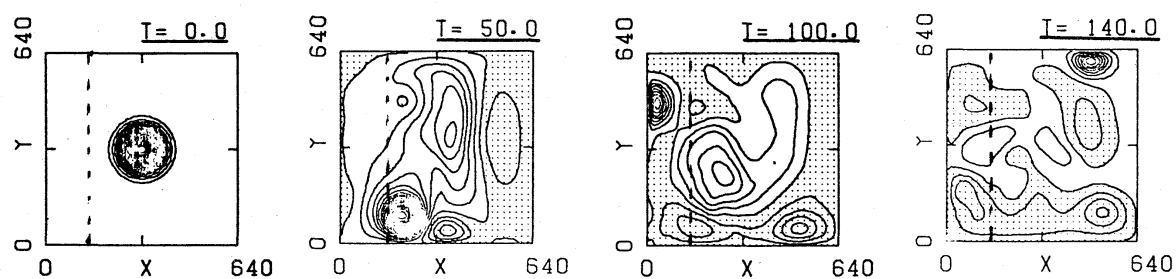


図3(a) Case Bの上層の圧力分布.

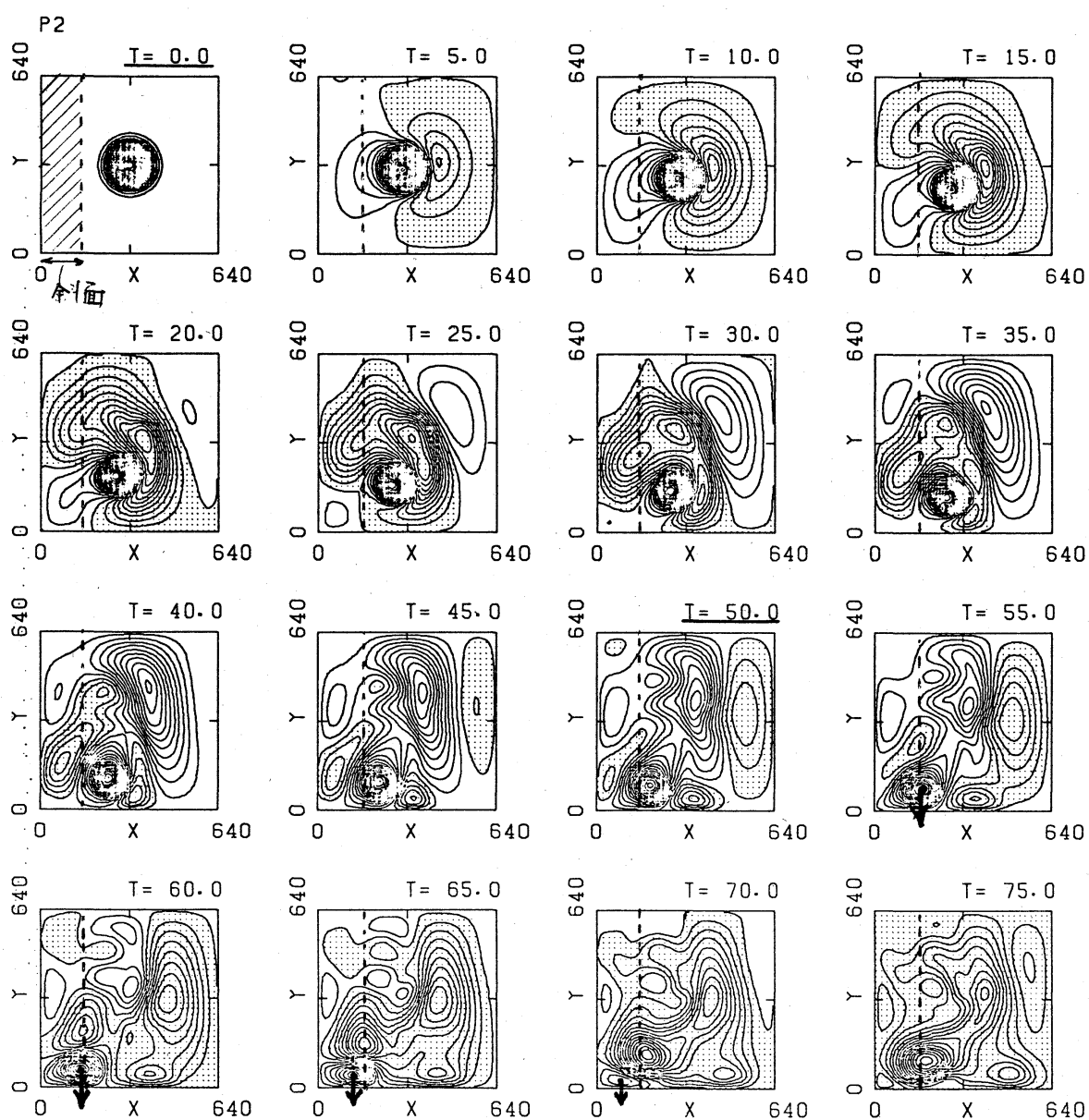


図3(b) Case Bの下層の圧力分布.

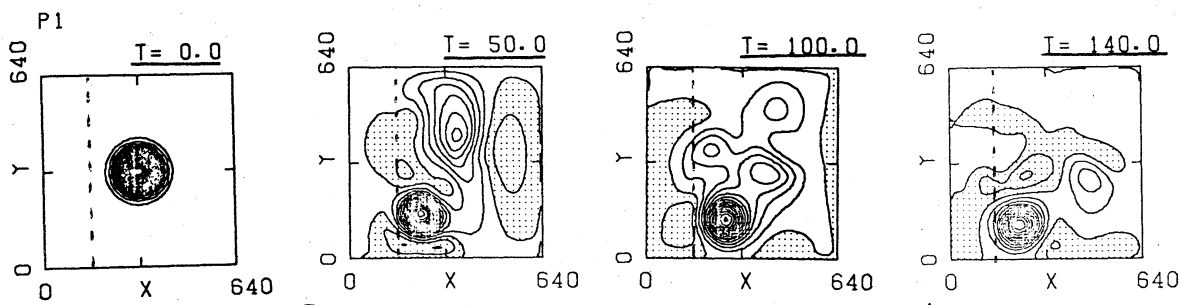


図4(a) Case F の上層の圧力分布.

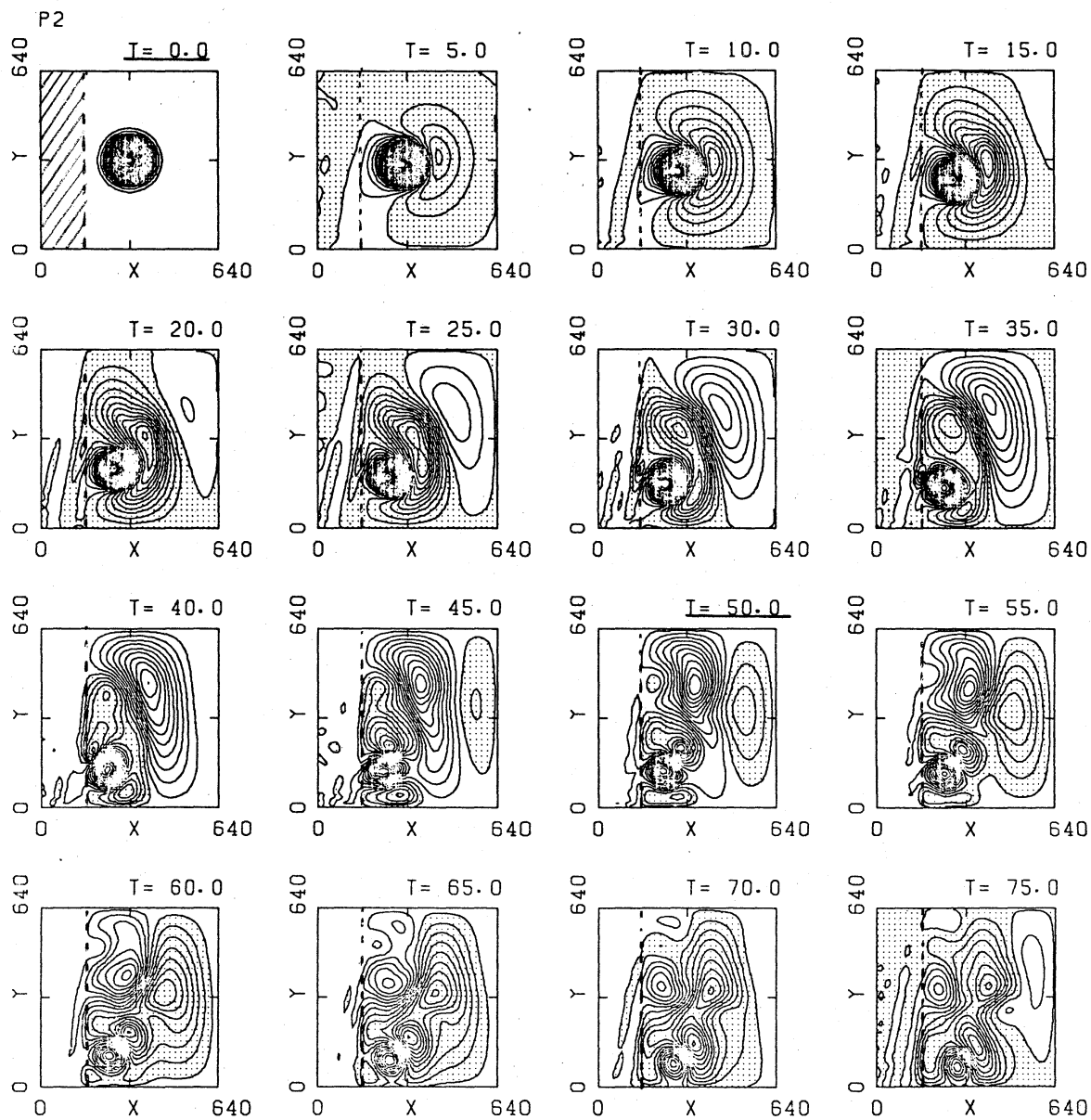


図4(b) Case F の下層の圧力分布.

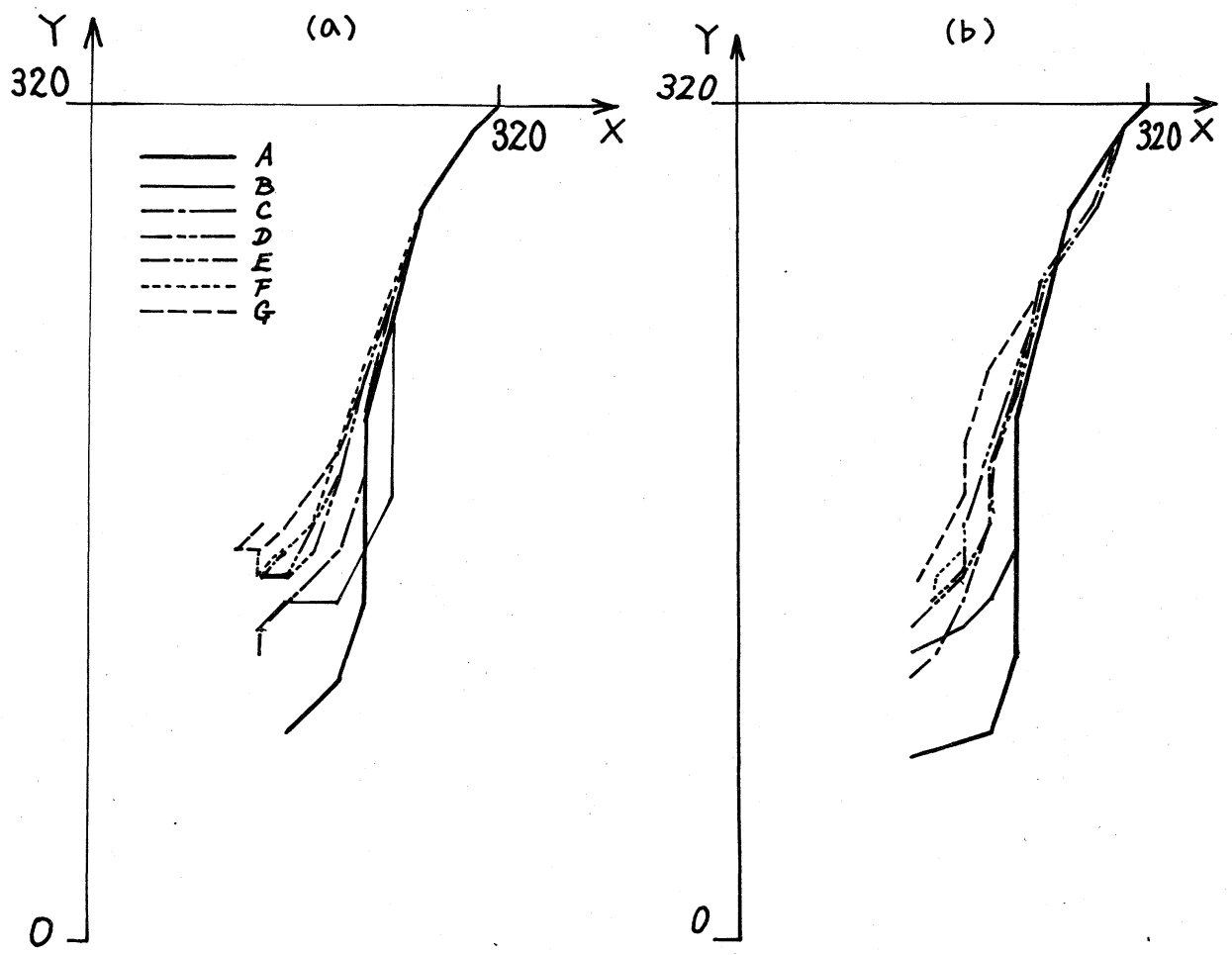


図5. 滑の移動の軌跡. (a): 上層, (b): 下層.