

日本南岸の黒潮大蛇行の発生の兆候について

関根 義彦*

On the Signs of Formation of the Kuroshio Large Meander South of Japan

Yoshihiko SEKINE*

Abstract

The Kuroshio south of Japan shows bimodal path characteristics between a large meander path and a no meander path. As an initial step to predict the bimodal path change of the Kuroshio, a transition process from a no meander path to a large meander path is studied in the present study. It is pointed out that the transition process is classified into two subprocesses; the first process is a generation of a small meander off the southeastern coast of Kyushu and the second process is an abrupt amplification of the small meander into a large meander south of central Japan. Almost all small meanders decay rapidly over a continental slope off Kyushu without further amplification of the small meander. The amplification of a small meander has a tendency to occur over a flat region in the north Shikoku Basin southeastern off of the Kii Peninsula. It is also pointed out by a simple analytical model and by numerical experiments that the current path is almost stable over the continental slope, but it is unstable over a flat region. This explains the observational evidences that the large meander path is formed over a flat region, whereas the small meander decays over the continental slope. The enhanced eastward shift of the small meander in the formation periods of the large meander is due to the larger eastward advection by intensified upper layer velocity of the Kuroshio. This is commonly indicated by the maximum sea level difference between Naze and Nishinoomote across the Tokara Strait. It is suggested that the appearance of the large meander path of the Kuroshio is possibly predicted by the eastward shift of the small meander upto a flat region southeastern off of the Kii Peninsula in coincidence with the maximum sea level difference across the Tokara Strait which is more than 20 cm.

1. はじめに

日本南岸の黒潮には代表的な流路として大蛇行流路と非大蛇行流路(直進流路)の二つがあり,多くの観測や理論的研究がなされてきた。特に大蛇行流路が黒潮に独特のものであり,湾流その他の西岸境界流には同じ現象が観測されないことから特に大蛇行流路の力学過程に重点を置いた研究が多い。しかし,従来の観測結果による黒潮流量・流速などの大小とその時の黒潮流路の選択の関連が現在まで正確な流量・流速データの不足からはっきりせず(例えば,SEKINE,1990),多種の力学モデ

ルの結果の解釈に対する明確な観測データの基礎が得られていない。この点については,素過程として黒潮大蛇行・非大蛇行の変化過程を詳細に見ることが黒潮流路の力学に対して一つの有益な情報を与える可能性がある。このような視点から,関根(1989)では大蛇行流路から非大蛇行流路の移行過程の兆候が大蛇行に伴う大冷水塊の消滅などに注目して調べられた。その結果として,(1)晩春から秋にかけて生じる大冷水塊の強化(低温化)過程が弱いこと,(2)伊豆海嶺の西側斜面に沿う北上流が無いこと,(3)伊豆海嶺上で黒潮流軸が八丈島より南へ移動すること,により黒潮大蛇行の消滅の予知が可能であることが示された。これに続き本論では反対に非大蛇行流路から大蛇行流路への移行過程を従来の観測データおよびそれに関連する理論結果を総合することにより考察する。

1991年11月11日受理

*三重大学生物資源学部海洋環境学講座 Institute of Oceanography, Faculty of Bioresources, Mie University, 1515 Kamihamachou, Tsu, Mie 514, Japan.

2. 大蛇行流路への移行過程

従来の観測で得られた黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への移行期間の流路変化をFig. 1に示した。移行はまず九州南東沖で小蛇行が発生して東進し、遠州灘沖でさらに蛇行が増幅されて形成される。注目すべきはこの移行過程が従来観測されたほとんどの例でほぼ共通することである。

九州南東沖の黒潮小蛇行は通常『引き金蛇行』(trigger meander)ともいわれるように (SOLOMON, 1978), 黒潮大蛇行への移行に先立つ現象である。しかし、すべての九州南東沖の小蛇行が黒潮大蛇行に移行するのではなく、その大半は九州南東沖で消滅することに注意が必要である。また、黒潮大蛇行が形成されている期間にも黒潮小蛇行は形成される。Fig. 2に九州南東沖に小蛇行が存在していた期間を示す。小蛇行はほぼ毎年冬から春にかけて発生するが、この図の中で大蛇行に移行したものは1969, 1975, 1984年の3つであり、残りの小蛇行は発生後数ヶ月の間に消滅している。したがって、Fig. 1に示した大蛇行への移行過程の流路の変化と合わせて考えると、黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への移行は九州南東沖に小蛇行の発生の過程 (Process I) と小

蛇行が遠州灘沖で増幅して大蛇行が形成される過程 (Process II) の二つの過程に別けて考えることが必要となる。この二つの過程を模式的にFig. 3に示した。

九州南東沖の小蛇行の発生 (Process I) に関しては SEKINE and TOBA (1981 a) により屋久島の南で小蛇行の発生期に黒潮のGEKによる流速がそれ以外の期間の平均と比較して $30\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度大きいことが示された。さらに、この流速の増加は屋久島の南の方が下流の四国沖より先行しており、四国海盆への黒潮流入流速の増加による非線形効果で小蛇行が発生する可能性が指摘された。この解析結果を基礎に九州沖の小蛇行の発生域を模式化した数値モデル実験が行われ、(i)南北に走る陸岸地形のある海域では小蛇行のような流路は定常状態ではほぼ存在しないこと (SEKINE and TOBA; 1980), (ii) 流速の増加を与えた非定常状態では、非線形効果により九州東岸の陸棚斜面上で流路が沖側の水深が大きい海域に移動し小蛇行が形成される。また、そのときの下層に生じるストレッチング効果で低気圧渦である種子島冷水が形成されること (SEKINE and TOBA, 1981 b), などの点を示されている。このようにして九州南東沖に形成された黒潮小蛇行は徐々に東進する。この過

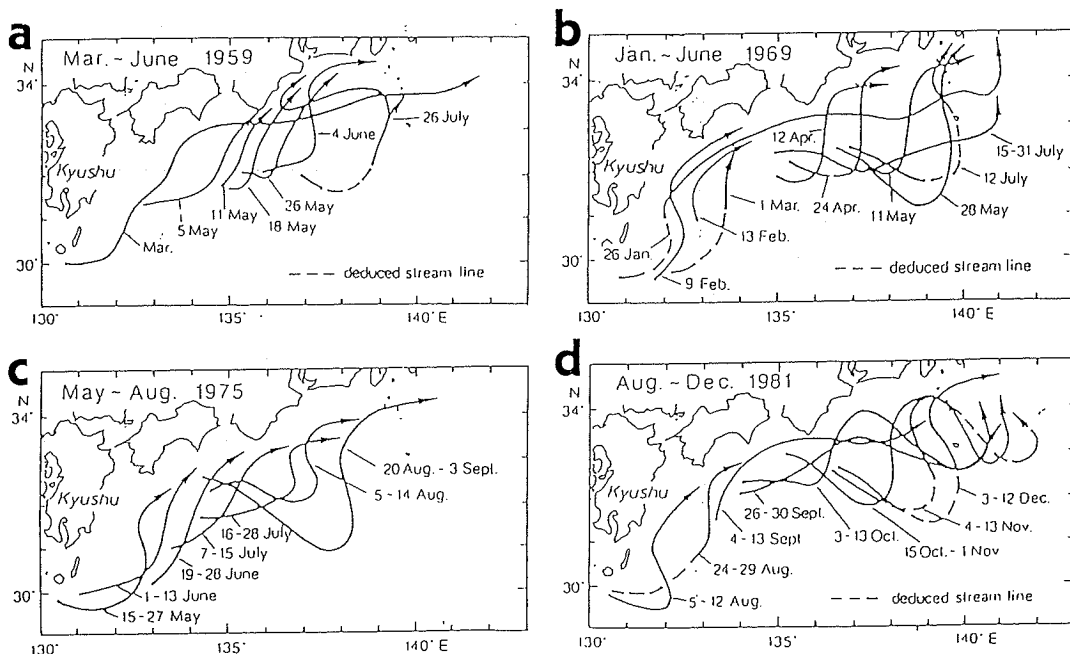


Fig. 1. Variation in the Kuroshio path during the formation of periods of the large meander path south of Japan. (a) After YOSHIDA (1961), (b) after SHOJI (1972), (c) after NISHIDA (1982) and (d) based on data of the Hydrographic Department.

程は概ね黒潮の一般流で東に流される運動と惑星ロスピ波として小蛇行が西進する運動の兼ね合いとして理解される (NITANI, 1975)。

黒潮大蛇行の形成に関して重要なのは、東進した小蛇

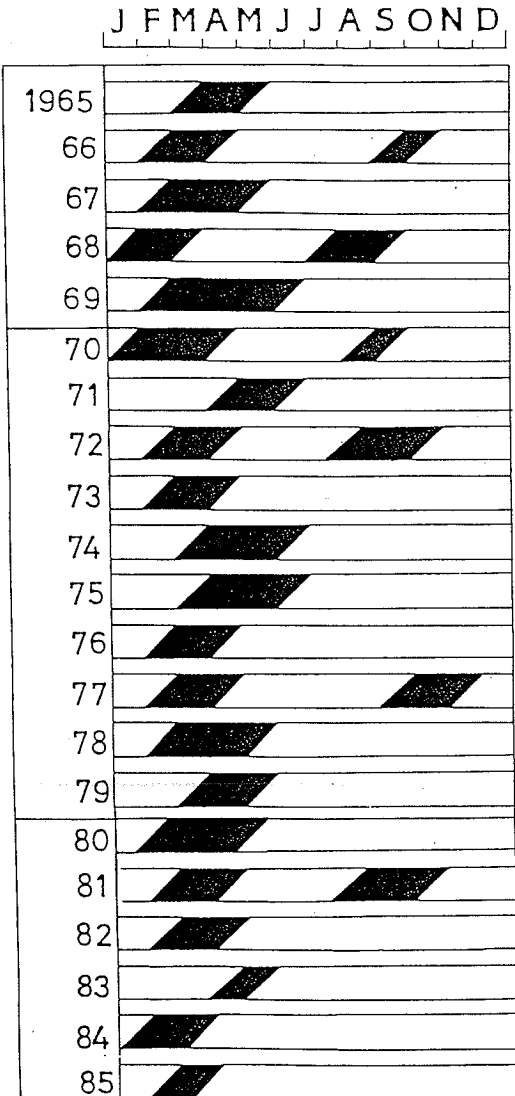


Fig. 2. Occurrence and existence of the small meander off southern Kyushu. The black band periods show the presence of a small meander determined from the Ten-Day Marine Report published by Japan Meteorological Agency.

行がさらに増幅されるProcess IIの発生である。これに関して二谷 (1977) は従来の観測データの解析により、四国沖まで小蛇行が東進すれば大蛇行に発展するのに対し九州南東沖では大蛇行に発展する小蛇行と消滅する小蛇行の流路に大きな差異がないことを示した。この問題の力学的背景をみるため、1965年から1979年間のProcess IIが発生した場合と発生しない場合の二つの小蛇行の流路の変化をFig. 4に比較した。両者の違いに注目すると、Process IIが発生する場合には九州南東沖で生じた小蛇行が紀伊半島の南以東まで移動しているのに対し、消滅した小蛇行は東進距離が小さくほぼ九州南東沖に停滞している傾向がみられる。この違いはFig. 3に示し

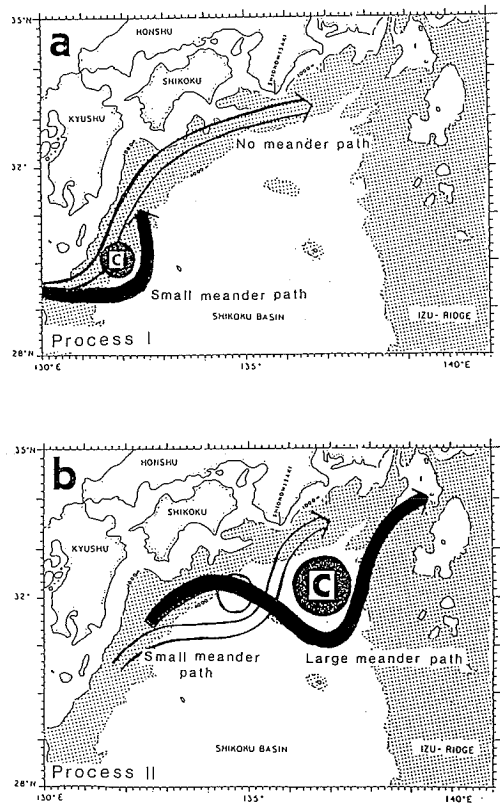


Fig. 3. Schematic representation of the transition process from no meander path to large meander path. (a) Generation of a small meander southeastern Kyushu (Process I) and abrupt amplification of the small meander off Kii Peninsula (Process II).

た大蛇行への移行過程の二つのプロセスと対応する。すなわち、消滅する小蛇行はFig. 3 a に示したProcess I のみが実行されるが、大蛇行に発展する場合にはProcess II がその後実行されるということである。ここで注目されるのは海底地形とProcess II の発生の関連である。消滅した小蛇行の場合には斑点で示した陸棚斜面上に流路が存在するが、大蛇行に発展する場合には紀伊半島の沖の平坦部で小蛇行の増幅が行われている (Fig. 4)。この違いは黒潮流路の安定・不安定に注目した時に、陸棚斜面上では流路が安定で小蛇行が増幅されないのに対し、平坦部では不安定で小蛇行が増幅される可能性を示唆している。海流の安定・不安定問題については従来より多くの研究がある (例えば、PEDLOSKY, 1979など)。Process II の形成と陸棚斜面の地形効果について次に考察する。

3. 黒潮小蛇行の増幅 (Process II) 発生の背景

まず簡単な形で陸棚斜面の地形効果を考える。Fig. 5 a はIKEDA (1983) による不安定モデルの模式図である。今、密度躍層を境として密度が一様な二つ層のからなり、上層にシアアの無い一様な流速を持つ西岸境界流を考える。IKEDA (1983) では陸棚斜面効果の大小を表す斜面の勾配を変化させて、流れの安定不安定が擾乱の波数との関連から調べられた (Fig. 5 b)。九州沖、四国沖の海域では陸棚斜面が岸に近くなるほど水深は小さくなるので、海底勾配を代表する無次元パラメータ hy ($hy = L \tan \theta / RoH$; Table 1 参照) は正の範囲にある。Fig. 5 b により hy が約0.2より小さい場合で波数 k が1以下の範囲では不安定となることがわかる。九州・四国沖の陸棚斜面域で hy の値を推定したのがTable 1 である。ここでは hy をそのほぼ最大と最小となる場合

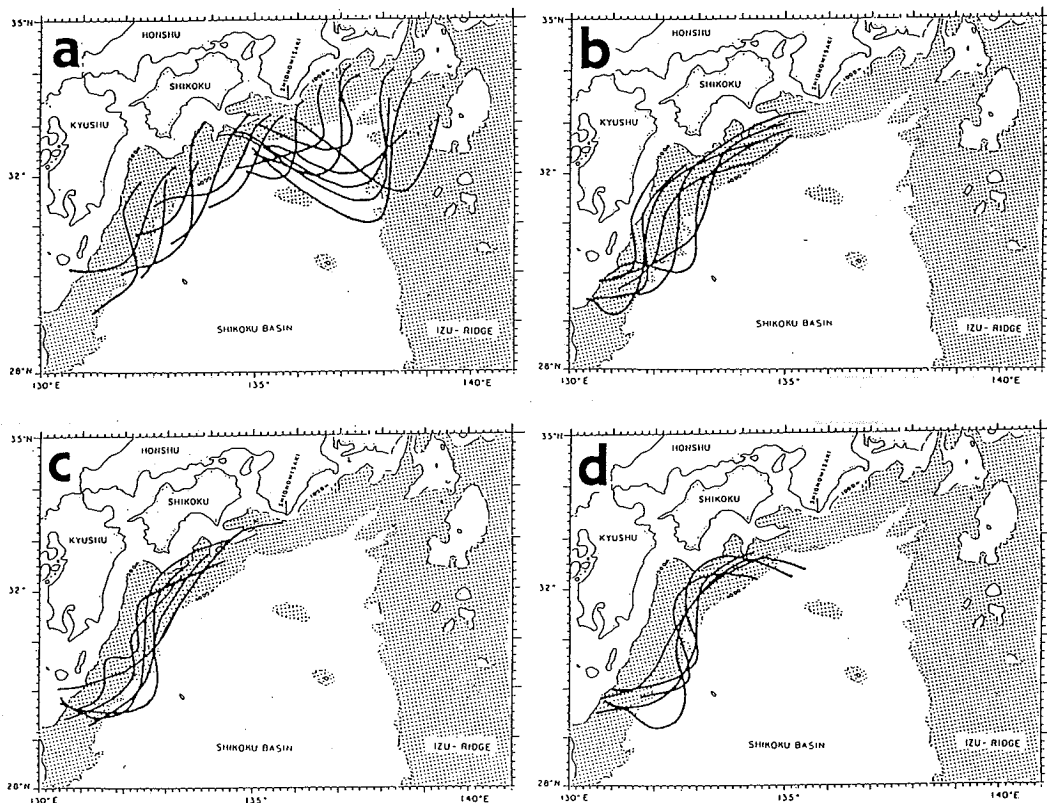


Fig. 4. Superposition of the main axis of the Kuroshio during the generation of small meander south of Japan. (a) Path of the small meanders with the Process II. Paths of decayed small meanders without the Process II, (b) in 1965-1969, (c) in 1970-1974 and (d) in 1975-1979. Regions with a depth of 1,000-4,000m are stippled. Data source is the Ten-Day Marine Report published by Japan Meteorological Agency.

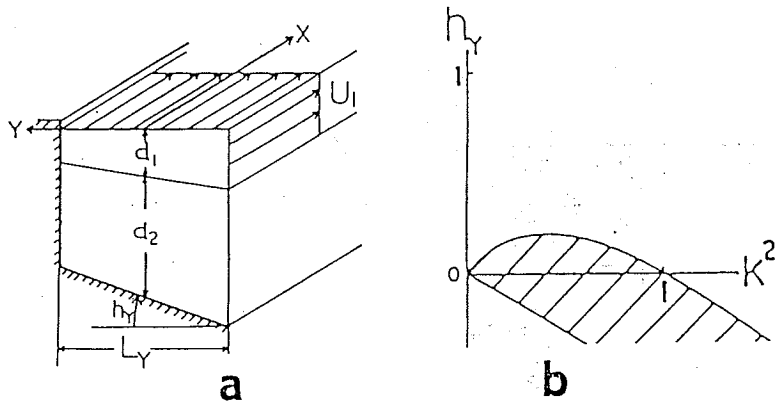


Fig. 5. (a) Schematic representation of the instability model of the flow over a constant slope proposed by IKEDA (1983). (b) The instability range (hatched area) on a wavenumber k vs topographic parameter hy plane.

をそれぞれ各パラメータに与えて、その変化範囲を推定した。 hy は最小でも0.2程度であり、最大では10程度になる。この hy の変化範囲では波数によらず陸棚斜面上では安定である (Fig. 5 b)。しかし、平坦部では hy が0となるため波数が1以下では不安定となる。非常に単純化したモデルの適応ではあるが、九州南東沖の陸棚斜面上にある小蛇行は安定であるのに対し紀伊半島沖の平坦部では流れが不安定であることが示唆され、Fig. 4に示した観測事実と合致する結果を与えている。

同じ問題を数値モデル実験で検討する。ここでは、日本南岸の陸棚斜面を簡単に模式化したモデル(Tモデル)と水深が3,800mの平坦な海底を持つモデル(Fモデル)の二つを調べ (Fig. 6)、形成される流路の特性を比較する。両モデルとも準地衡流近似を仮定しないプリミティブ二層モデルを採用し、二つのモデルの上層にのみ60 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)の同じ流入出を与える (詳細はSEKINE and TOBA, 1981 b 参照)。両モデルで北

側の陸岸境界は粘性境界とし、その他の境界は非粘性境界とする。境界での流入出には0から π までの範囲の正弦関数型の速度分布を与える。東西の格子点の間隔は25 km、南北のそれは20kmである。

得られた結果をFig. 7に示す。Tモデルでは流入境界の近くで西岸境界流となった流路が北向きに曲がり、それより下流では北側の陸棚斜面に沿う傾向が時間と共に強くなる。下層では等深線に沿う流れが卓越する。上層の流れでは等深線に沿う初期の流路が徐々に傾圧的応答がすすみ、等深線に沿う流路から西および北側の境界に沿った流路に変化していく。

Fモデルの結果 (Fig. 8) では上層下層ともに流れが顕著な蛇行を示し、渦の切離や合体などを繰り返す。流れの時間変化が著しい。平坦な海底地形では流れが蛇行を生じやすいことがわかる。Tモデルとの結果の対比から、陸棚斜面の有無の差のみで生じる流れに大きな違いが生じることが示唆される。

Table 1. Evaluation of the topographic parameter hy ($=L \tan \theta / RoH$) for the continental slopes off kyushu and Shikoku, over which the Kuroshio flows.

Case	Representative horizontal scale L (km)	Representative Velocity scale U ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Ocean depth H (km)	Gradient of slope $\tan \theta$	Rossby number $R_0 = U / Lf_0$	hy
maximum	100	50	2	0.02	0.1	10^2
minimum	30	100	3	0.01	0.5	0.2

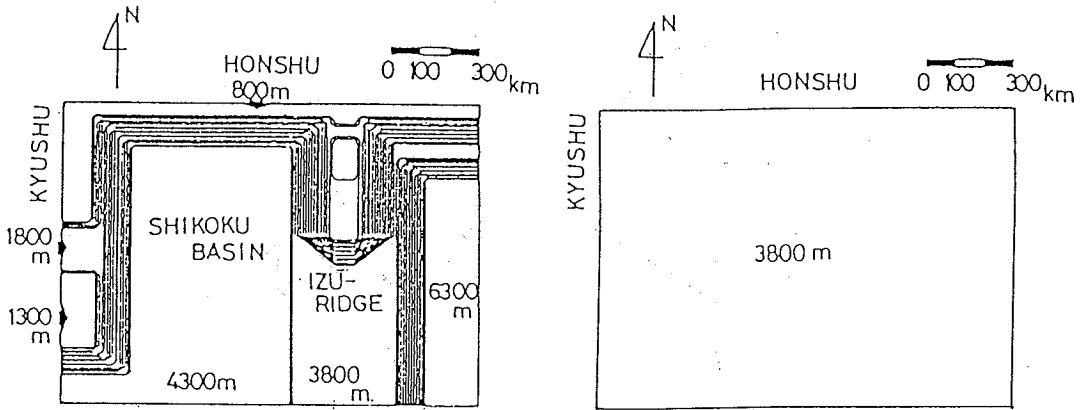


Fig. 6. Schematic view of the model ocean, T model (left) and F model (right). The contour interval of the depth of the T model is 500m and a flat bottom with a depth of 3,800m is employed in F model.

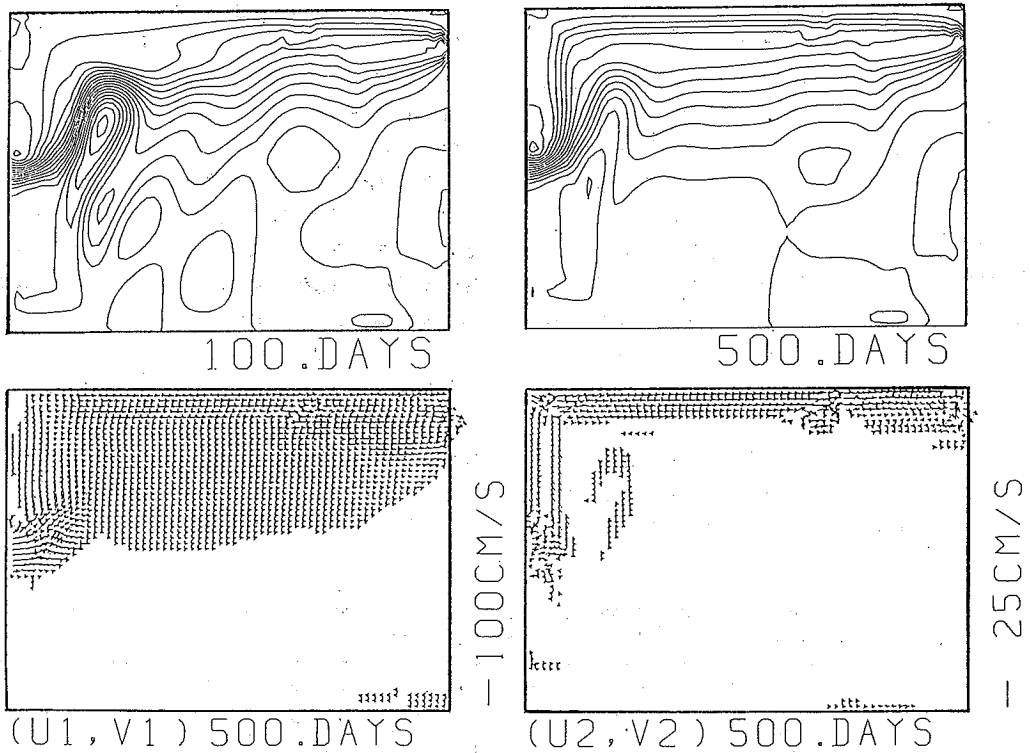


Fig. 7. Results of T model. Patterns of the total volume transport function (upper two panels), velocity fields of the upper layer (U1, V1) and lower layer (U2, V2) at the 500th day. Contour interval of the total volume transport function is 5 Sv. No velocity vectors below $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ in the upper layer and $1\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ in the lower layer are plotted.

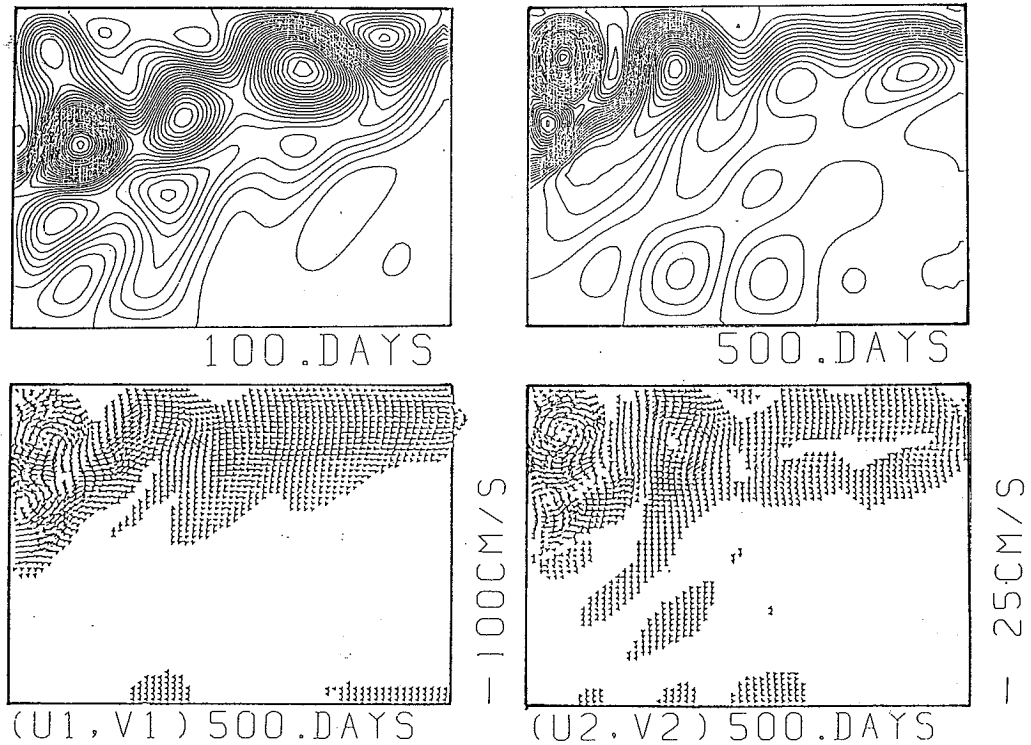


Fig. 8. Same as for Fig. 7 but for F model.

両モデルの流れの時間変化を詳細にみるため、モデルの領域内部の数点における流速ベクトルのスティックダイアグラムをFig. 9に示した。Tモデルではすべての点において流れの向きがほぼ一定で流速の大きさのみが時間の経過とともに定常状態に向けてゆっくりと変化していく。一方、Fモデルでは流れの蛇行や渦の切離の形成やその後の移動などで流向・流速の時間変化が著しい。400日程度以降ではほぼ全点で同じ形の波動パターンが卓越してくる。Fモデルでは一定の流れのパターンが定常解として生じないことがわかる。以上の数値モデルの結果はIKEDA (1983) による解析モデルのそれと一致し、平坦部では流れが不安定となり蛇行しやすくなるが、陸棚斜面上の流れは安定で蛇行を生じにくいことが示唆される。

4. まとめと議論

日本南岸の黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への移行過程についてその発生の予知を中心に調べた。主な結

果をまとめると次のようになる。

(1) 黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への移行過程は第一に九州南東沖に小蛇行が発生する過程(Process I)とこの小蛇行が東進して紀伊半島南東沖の平坦な海域で増幅される過程(Process II)の二つに別けることが可能である。

(2) Process I はほぼ毎年主に冬から春にかけてみられるが、その大半はさらに増幅されずProcess IIを生じないで九州沖の陸棚斜面上で消滅する。その小蛇行の発生は吐噶喇海峡からの急激な流入流速の増加で生じる下流(東方向)への移流効果と離岸して行くときに生じる下層のストレッチング効果による可能性が高い。

(3) 黒潮の小蛇行が消滅するかProcess IIが発生するかの差異は、黒潮小蛇行が紀伊半島南東部沖の四国海盆の平坦部まで東進するか否かによる。平坦部まで移動した小蛇行は増幅されて大蛇行に移行し、九州沖の陸棚斜面上に停滞した小蛇行は短期間で消滅する。平坦部では流れが不安定となり、蛇行が生じる傾向が強いのに対

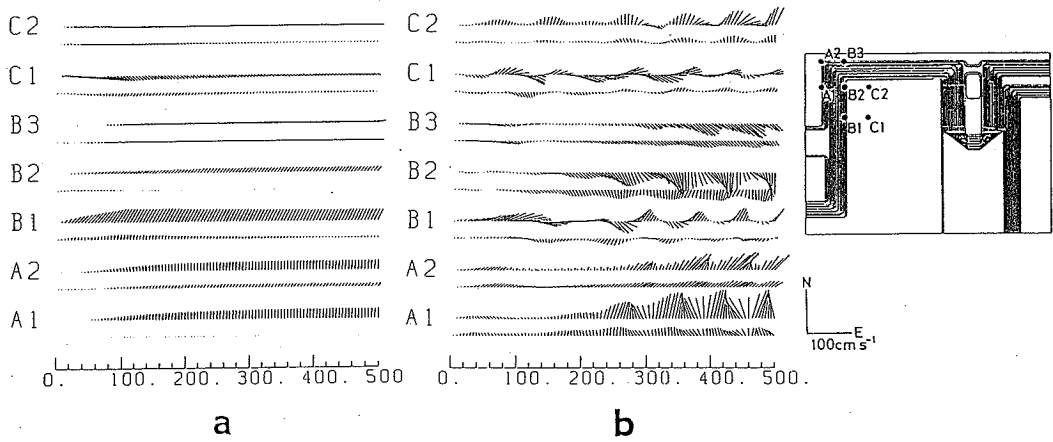


Fig. 9. Stick diagrams of the velocity vectors at the seven points shown at right. (a) T model and (b) F model. Upper and lower consecutive sticks at each station show the upper layer velocity vectors and lower layer velocity vectors, respectively.

し、陸棚斜面上では流れが安定でほぼ岸にそって流れる傾向が強い。

以上の結果を模式的に示すとFig.10のようになる。黒潮大蛇行の形成にはProcess IIの発生が必要であるが、この点に関しては黒潮小蛇行が紀伊半島南東部の平坦部

まで移動する要因がなんであるかということが重要となる。NITANI (1975) などにより黒潮小蛇行を東に運ぶものは黒潮の流れによる移流効果であることが指摘されている。また、各種ロスビー波やケルビン波などを考えても西進するものが多く、東進するものはみられない(例

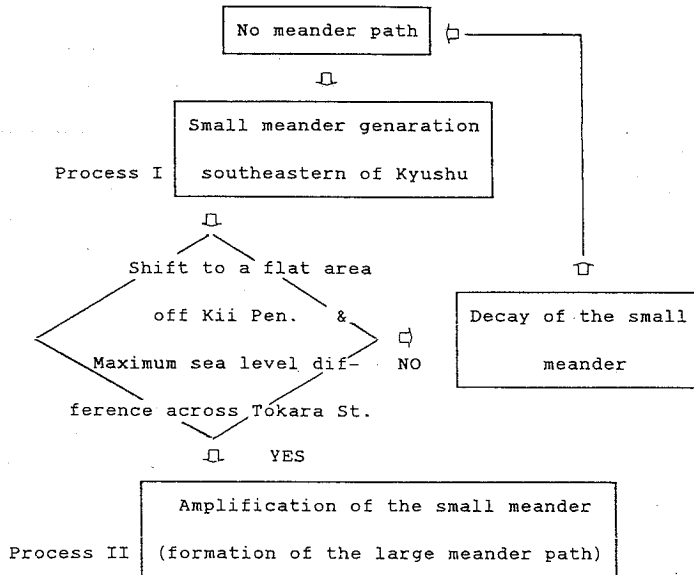


Fig.10. Schematic representation of the transition process from no meander path of the Kuroshio to the large meander path south of Japan.

日本南岸の黒潮大蛇行の発生の兆候について

えば、PEDLOSKY, 1979; GILL, 1982)。したがって、移流効果が重要であるとすると黒潮小蛇行の形成期の黒潮流速が大きい程その小蛇行は東に運ばれることになる。黒潮流速を正確に測定するには直接測流によるしかないが、黒潮が日本南岸に流入する吐噶喇海峡を挟む地点の水位差などから地衡流近似を仮定して黒潮の流れの強弱を推定することが可能である。一例としてFig.11に名瀬と西之表の潮位の時間変化とその差異を示した。両地点ともに潮位は夏に最大冬に最小となる季節変動が卓越するが、より低緯度の名瀬とより高緯度の西之表ではやや位相がずれている。したがって、潮位差では名瀬と西之表の位相の差異が重要となる。1975年と1981年の黒潮大蛇行の形成期期間 (Fig. 1 参照) に関連してはKAWABE (1980) や五十嵐 (1986) などによっても指摘されているように、20cmを越える明確な潮位差の極大が黒潮大蛇行の形成にやや先立ってみられる。この極大をはさむ潮位差が正となる期間の潮位差の大きさはそ

他の期間のそれと比較して大きい。定性的な議論ではあるがこの極大流速期に九州沖で発生した小蛇行が相対的により東まで移流された可能性が示唆される。また、1977年の春にも潮位差の極大値がみられる。この期間は黒潮大蛇行がすでに形成されていた期間である。しかし、黒潮の大蛇行が『春風』と名前が付けられた冷水渦を切離した期間に相当する (例えば、上平ほか, 1978)。冷水渦の切離は流れが一般に大きい時に生じることが予想され、この潮位差が黒潮の流速の有為な意味を持つことが示唆される。

以上を簡単にまとめると、(a)九州沖で発生した黒潮小蛇行が紀伊半島南東沖の比較的平坦な海域まで東進すること。(b)名瀬と西之表の水位差が20cmを越える顕著な極大を生じること。以上の二つの事項から、黒潮大蛇行の発生がほぼ予知できる可能性が示唆される。これらは原因と結果の関連であるが、黒潮の非大蛇行流路から大蛇行流路への移行の予知を考慮した場合には独立し

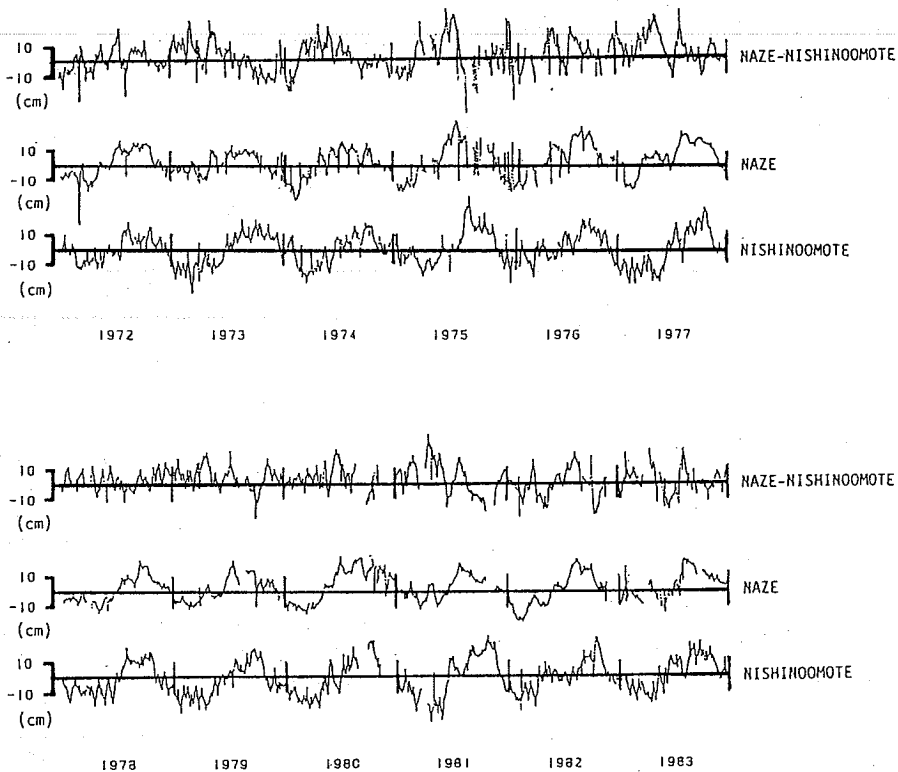


Fig.11. Time variation in the sea level at Naze and Nishinoomote across the Tokara Strait and their difference (in cm).

た現象として考えることも可能である。また、大蛇行期間中に発生する小蛇行もあり、紀伊半島東部まで東進すれば大蛇行との相互作用が考えられる。小蛇行の存在は無くとも、前に述べた黒潮大蛇行に伴う大冷水塊の切離現象は流速変化に伴う大蛇行の変化の現れと解釈できる。

黒潮の大蛇行・非大蛇行流路の選択と流量・流速の大小との関連に関しては前にも述べたように観測結果から明確な関連が得られていない。従来の黒潮大蛇行の力学の研究では、陸棚斜面の地形効果を無視した平坦な海底を仮定すると大蛇行期に流量・流速が小さく非大蛇行期にそれらが大きいという結果が得られている（例えば、WHITE and McCREARY, 1976; CHAO, 1984など）。しかし、日本南岸の陸岸効果や陸棚斜面などの海底地形効果を加味すると反対に大蛇行期に流量・流速が大きく非大蛇行期に小さくなる結果（YOON and YASUDA, 1987; SEKINE, 1990など）が得られている。この研究では大蛇行期間の全体を見ていないが、少なくとも大蛇行の形成期には黒潮の流速が大きいたことが示唆される。また、黒潮小蛇行の発生が冬から春にかけてほぼ毎年みられることは黒潮の季節変動がその流路の変動に影響を及ぼしていることを示している。従来の黒潮流路の変動には経年変化が目立ってきたが、季節変化も重要であることが示唆される。今後より詳細な観測の実行が必要となる。

5. 謝 辞

本研究を行うにあたり特にいろいろと有益なコメントをいただいた東北大学理学部鳥羽良明教授、海上保安庁の石井春雄、五十嵐耕両氏、ベッドフォード海洋研究所の池田元美博士に深く感謝いたします。また、従来の水温データなどを提供していただいた気象庁および海上保安庁水路部に厚くお礼申し上げます。

文 献

CHAO, S-Y. (1984) Bimodality of the Kuroshio. *J. Phys. Oceanogr.*, **14**, 92-103.
 GILL, A. E. (1982) *Atmosphere-ocean dynamics*. Academic Press, pp 662.
 五十嵐 耕 (1986) 日本南岸の水位変動. 東北大学理学研究科修士論文.
 IKEDA, M. (1983) Linear instability of a current along a bottom topography using a three-layer model. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 208-223.
 海上保安庁水路部 (1981) 海洋速報, Nos., 16-24.
 上平悦朗・南 秀人・石崎 廣・江口 博・西沢純一 (1978) 東海道沖大冷水塊の切離について. 神戸

海洋気象台彙報, **195**, 1-15.
 気象庁 (1965-1984) 海況旬報, Nos., 657-1376.
 KAWABE, M. (1980) Sea level variations around the Nansei Islands and the large meander in the Kuroshio south of central Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**, 227-235.
 NISHIDA, H. (1982) Description of the Kuroshio meander in 1975-1980. (I) *Rep. Hydrogr. Res.*, **17**, 181-207.
 二谷 穎男 (1977) 遠州灘沖の黒潮大蛇行の発生, 維持, 減衰過程. 海洋科学, **9**, 26-36.
 NITANI, H. (1975) Variation of the Kuroshio south of Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **31**, 154-173.
 PEDLOSKY, J. (1979) *Geophysical fluid dynamics*. Springer Verlag, New York, 624 pp.
 SEKINE, Y. and Y. TOBA (1980) A numerical study on path of the Kuroshio with reference to generation of small meanders southeast of Kyushu. *Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser.*, **5**, Geophysics, **27**, 39-55.
 SEKINE, Y. and Y. TOBA (1981a) Velocity variation of the Kuroshio during formation of the small meander south of Kyushu. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **37**, 87-93.
 SEKINE, Y. and Y. TOBA (1981b) A numerical experiment on the generation of the small meander of the Kuroshio off southeastern Kyushu. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **37**, 234-242.
 関根義彦 (1989) 日本南岸の黒潮大蛇行の消滅の兆候について. 水産海洋研究ノート, **53**, 364-371.
 SEKINE, Y. (1990) A numerical experiment on the path dynamics of the Kuroshio with reference to the formation of the large meander path south of Japan. *Deep-Sea Res.*, **37**, 359-380.
 SHOJI, D. (1972) Time variation of the Kuroshio south of Japan, In *Kuroshio-Its Physical Aspects*. Univ of Washington Press, 217-234.
 SOLOMON, H. (1978) Occurrence of small "trigger" meanders in the Kuroshio off southeastern Kyushu. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **34**, 81-84.
 WHITE, W. B. and J. P. McCREARY (1976) The Kuroshio meander and its relationship to the large-scale ocean circulation. *Deep-Sea Res.*, **23**, 33-47.
 YOON, J. H. and I. YASUDA (1987) Dynamics of the Kuroshio large meander. Two-layer model. *J. Phys. Oceanogr.*, **17**, 66-81.
 吉田昭三 (1961) 遠州灘沖冷水と黒潮の変動について. その1. 水路要報, **67**, 54-57.