

[研究成果]

地球の温暖化で変化した日本南岸の黒潮流路の選択特性

関根義彦

三重大学大学院生物資源学研究科海洋気候学教室

1. はじめに

大気中の二酸化炭素などの温室効果ガスの増加により地球の温暖化が進み、大気の大循環の変化とその影響を強く受ける海洋循環についてはいろいろと注目すべき問題があります。本論では日本南岸の黒潮の直進流路や大蛇行流路の選択特性の変化について議論することになります。

日本南岸の黒潮には図1に示すように代表的な流路として直進流路と大蛇行流路があります。一般に地球自転によるコリオリ力の大きさを示すコリオリのパラメータの緯度変化により、強い海流は黒潮や湾流のように大洋の西側に生じます。この強い流れは一般的に大陸棚斜面上では流路が比較的安定であり、その下流の大洋底上の海域で不安定な蛇行を行います。図1のような大陸棚沖で安定した大蛇行を行うのは黒潮だけです。

黒潮のみが安定した大蛇行を行う理由は図1からも推定されるように、伊豆海嶺という変わった海底地形があり、日本の陸地の存在で陸岸が南北方向というより東西方向に走り、地震の発生からも予想されるように海洋のプレートが日本の方に押し寄せるために大陸棚斜面が急ですぐに大洋底に落ち込むためです。北アメリカの東海岸は南北に走るため東西方向からの傾きが大きく、陸棚斜面も緩やかで海溝もなく斜面の面積が大きくなっています。以上の黒潮が定常な大蛇行を行う根本的な理由は温暖化の影響も受けず、今も変わりません。

2. 1970年代の黒潮の数値実験

従来より日本南岸の黒潮流路の力学については多くの研究があります。図2に示したのは1977年頃当時仙台の片平にあった東北大学の大型計算機センターのコンピュータ(ACOS 700)で計算した黒潮の数値実験のモデルと結果です。このモデルでは密度が一様な順圧モデルを仮定しており、コリオリの力のために流れは鉛直方向に一様になり、伊豆海嶺などの等深線に沿う流れが卓越します。流れが等深線を横切ると鉛直方向に流れの伸縮が生じ、新たな渦が発生して定常状態は得られません。図2左図の流入流速を増加させた場合が右図ですが、流速増加によっていろいろな流れの変化が生じます(Sekine, 1980)。

図2は東北大学の大型計算機センターで初めて行われた地球流体力学関連の数値実験であり、メモリーや計算速度との関連から密度成層を含む詳細な黒潮の数値実験は当時の大型計算機を独占して長時間使うことが必要となり、なかなか大変でした。現在のパソコンはメモリーが豊富で図2のモデルの100日程度の時間積分は5分位の計算時間で実行することができます。1970年代は現在のパソコンよりやや劣る計算能力を持つ計算機が大学に一つしかなく、図2のモデルの計算時間は当時の大型計算機で30分位でした。皆で共有して使うため、カードで入力してから1時間もかかって計算が終わりました。この時代の状況と比較すると現在の計算機の普及には目を見張るものがあります。

天気予報と本質的に同じ海洋の流体力学の数値解では注意しなければならぬ点が多数あります。外洋の大きなスケールではコリオリ力と圧力傾度力がバランスするために、その残り

に予知する時間変化が含まれることとなります。これは困った問題で、圧力傾度力は圧力を P としてベクトルの $\text{grad } P$ で現されるため rot を取って、有名な公式 $\text{rot}(\text{grad } P) = 0$ を用います。 $\text{rot } V$ (V は速度ベクトル) を扱い、運動方程式ではなく渦度方程式を解くこととなります。

海域と考えられる所に格子点を配置して、差分式をそのまま計算すると津波のような極めて速度の速い波を計算することになり、数値計算の時間間隔を極めて小さくする必要があります。格子点の計算では CFL 条件があり、格子点間隔を波が伝播する時間や移流で流される時間よりも、時間間隔を小さくする必要があります。これを守らないと光速よりも速い海流が生じるようになり、計算機が計算不能を示します。これを防ぐ方法はいくつかありますが、一番確実なのは海面に蓋をすることです。これにより海面で発散が無くなり、それをうまく使うために流線関数を用います。流線関数を用いると $\text{rot}(V)$ はポアソンの方程式となり、渦度方程式で求めた新しい $\text{rot}(V)$ について流線関数を求めることとなります。

実は渦度方程式の $\text{rot}(V)$ の計算よりもポアソンの方程式の流線関数の計算の方が計算量が圧倒的に多く実際の計算のほとんどとなります。ポアソンの方程式の計算で有力なもの ADI 法ですが (Mitchell, 1969 など)、考えている海が長方形でない場合には SOR 法が使われます (岸保, 1968 など)。SOR 法は Gauss-Seidel 法のようなポアソンの方程式をきちんと差分化するよりも少し大きい変化を与えることで速い収束を狙ったものです。SOR 法ではその変化の割合である緩和定数の決定が微妙です。Frankel (1950) による格子点の数から求める公式がありますが、計算時間が最小になる緩和定数を与えればはかぎらず、初期の 10 ステップ位で最適値をいろいろとサーチして決めてから計算を実行します。

3. 黒潮流路の選択特性

図 1 に示した黒潮の二つの安定な流路の選択状況についてみると、1975 年以前の 10 年はほぼ直進流路であり、1976 年から 1988 年までは大蛇行流路が卓越して生じ、1989 年以降は再び直進流路が卓越して生じています。

黒潮の流路については前にも述べたように北岸の東西方向からの傾きが特に重要であり、この北岸の傾きの違いの影響を調べたものが図 3 です。北岸が東西に走っている場合、初期の岸沿いの流れは不安定となり、大蛇行が発生します (図 3 a)。岸が 10 度傾いた場合 (図 3 b) には蛇行の振幅が小さくなりますが蛇行は生じます。ところが岸が 20 度以上傾いた場合 (図 3 c d) には初期の岸に沿う流れは安定で、蛇行は生じません。南北に走る岸があると岸に沿う流路が生じやすいことが理解されます。南北の岸沿いに西進する惑星ロスビー波がトラップされるためです。

このため陸岸が東西方向に走るモデルでは、図 4 a に示すように黒潮の流れが小さい時に大蛇行流路、大きい時に直進流路となります。この力学では西向き惑星ロスビー波と東向き黒潮の流れの移流効果のバランスとなり、移流効果が大きくなると蛇行が下流に流されて直進流路になり、流れが小さいと両者がバランスして定常な大蛇行流路となります。これに対して陸の東西方向からの傾きをモデル化すると (図 4 b)、図 3 からも推量されるように岸に沿う流れの特性が強くなり、離岸して大蛇行流路を生じるためには岸に沿う傾向を上回る強い東向きの流れが必要となり、大きい流速の時に大蛇行流路、小さい時に直進流路となります。この結果が 2000 年あたりまで黒潮の流路選択特性と考えられていました。

4. 最近の黒潮流路選択特性

1989 年以降の直進流路が卓越する黒潮流路の選択特性に関連して、図 5 に 1975 年以降の 4 つの大蛇行流路の平均パターンを示します。この図は海上保安庁が出している海洋速報を用いて都井岬から犬吠埼までの黒潮流路の離岸距離を月ごとに求め、各大蛇行の出現期間全

体で離岸距離を平均したものです。1975年に発生した大蛇行は室戸岬沖から紀伊半島沖にかけて離岸距離が大きく御前崎以東で小さいのに対し、1981年以後の大蛇行は紀伊半島で離岸距離が小さく、御前崎以東で離岸距離が大きくなっています。

図5の伊豆海嶺上の流路をみると、1975年発生の大蛇行は斜線部で示した水深1000mで浅い海域が切れている比較的深いゲート領域を通っていますが、1981年以後の大蛇行はゲート領域の南側を通る傾向があり、伊豆海嶺の海底地形効果を受けていることが考えられます。黒潮が伊豆海嶺の上に乗ると大蛇行に伴う低気圧渦(図1のL)がより早くスピンドウンして、大蛇行が消滅します。つまり、1975年にできた大蛇行はうまく四国海盆にマッチして長期間存在したのに対し、1981年以降の大蛇行は東の下流に形成され、四国海盆にうまくマッチしていないことが示唆されます。

1981年以降の黒潮大蛇行の東側への移行は前にも述べたように黒潮流速が増大して東に流されることに起因します。東シナ海では1975年発生の大蛇行期間より1981年以降の大蛇行期間の方が黒潮流量が大きいことが示されており(Qiu and Miao, 2000)、トカラ海峡の潮位差の解析からも同様な結果が得られています(関根と陳, 2003)。これらにより1989年以降の直進流路の卓越はこの流速増大に伴い大蛇行が下流にながされ、伊豆海嶺の地形効果で消滅していることが考えられます。よって黒潮の流速が相対的に小さい時に大蛇行が可能ということになり、黒潮流路の流速への依存性は図6のようになります。およそ1999年以前では図4bに示されたように上の矢印の範囲が考えられましたが、それ以降は下の矢印の範囲に移行したということです。結果的に黒潮流速が多い時に大蛇行流路だったのが、最近は流速の少ない時に大蛇行流路という結論になっています。後者は図4aの結果と同じことになりますが、図4aでは伊豆海嶺の地形効果を考慮していない点が大きく異なります。つまり図4aでは惑星ロスビー波と黒潮の東向きの移流効果のバランスだったのに対し、後者では伊豆海嶺の海底地形効果による蛇行流路の消滅が主体となっています。

5. おわりに

地球の温暖化による影響はいろいろな面で厳しいものがあります。これに関連したことで、一般に研究することは犯人らしき人を逮捕する警察とある面で共通点があります。研究の目的を設定することは犯人のめぼしをつける過程とよく似ています。犯人にめぼしをつけることが特に重要であることは明らかですが、研究でも目的の設定で因果関係の無いものに注目したら大変なことになります。今日の不安定な状態にある大気や海洋の研究では、研究の目安を設定して考察すること、つまり犯人の推定をすることが難しくなっています。最近の社会でも新しい犯罪というか手口の巧妙な犯罪が多くなり、この面でも研究と犯人捜査は似た面があります。

かつて1970年代の前半に東北大のある先生が授業中『流体力学は乱流になると非線形で解析的には解けず、計算機によるごり押し数値計算になる。見通しが悪く、頭の良い人はやらない方が良い。』といわれたことがあります。当時は微分方程式などの解析解が貴重であると考えられていた時代なので、大気や海洋の数値実験などをやろうと考えていた学生には厳しい指摘でした。頭の良い人とは解析的な数学に強い人のことか、計算機べったりになる人への非難か、数値解の内容を計算機でよく工夫して理解すれば解析解と同じような解析はできるはず、などなどいろいろと考えました。今日この点について考えてみると、解析的に解けるような研究問題が残り少なくなり、計算機で大量の計算をするような研究が多くなる傾向があります。『解析解が数値解より数段上ですばらしい』という格言も、現在は少し意味が薄れているかもしれません。

参考文献

- [1]Akitomo, K., T. Awaji and N. Imasato : Kuroshio path variation south of Japan. 1 Barotropic inflow-outflow model. J. Geophys. Res., **96**, pp.2549-2560 (1991).
- [2]Frankel, S.P. : Convergence rates of iterative treatments of partial difference equations. Math. Tables Aids Comput. **4**, pp.65-75 (1950).
- [3]岸保勘三郎 : 数值予報新講, 地人書館, pp.180(1968).
- [4]Mitchell, A.R. : Computational methods in partial differential equations. John-Wiley. pp.251 (1969).
- [5]Qiu, B and W. Miao : Kuroshio path variations south of Japan. Bimodality as a self-sustained internal oscillation. J. Phys. Oceanogr., **30**, pp. 2124-2137 (2000).
- [6]Sekine, Y. : A numerical experiment for bottom effect of the Izu Ridge on path of the Kuroshio . On the formation of stationary current path with an increase in volume transport. Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5 Geophysics **27**, pp.19-25 (1980).
- [7]Sekine, Y: Coastal and bottom topographic effects on the path dynamicsof the western boundary current with special reference to the Kuroshio south of Japan. La mer **26**, pp.99-114 (1988).
- [8]関根義彦, 陳 苗陽 : 離岸距離の解析による日本南岸の黒潮流路の変動特性. 海の研究, **12**, pp.277-289 (2003).
- [9]Yasuda, I., J.H. Yoon and N. Sugihara : Dynamics of the Kuroshio large meander - Barotropic model-. J. Oceanogr. Soc. Japan, **41**, pp.259-273 (1985).

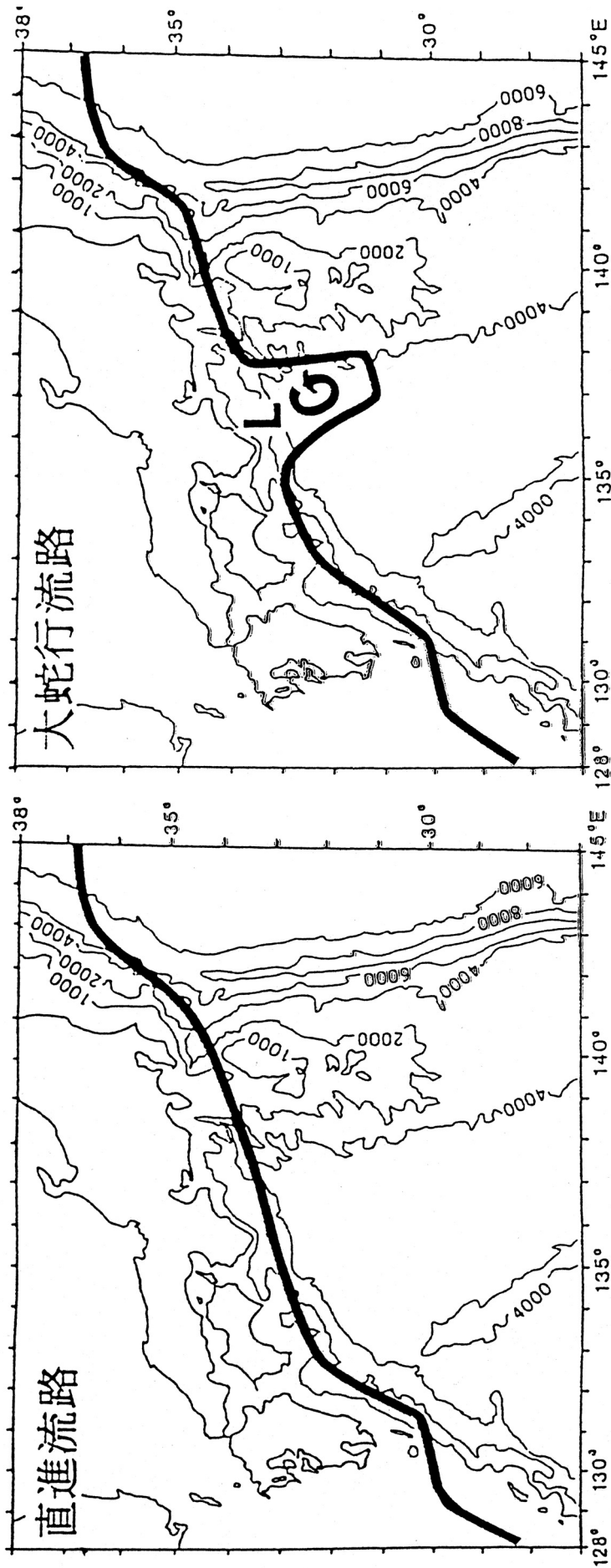


図1 日本南岸の黒潮の二つの代表的な安定した流路。直進流路（左図）と大蛇行流路（右図）。大蛇行に伴う低気圧循環をLで示した。

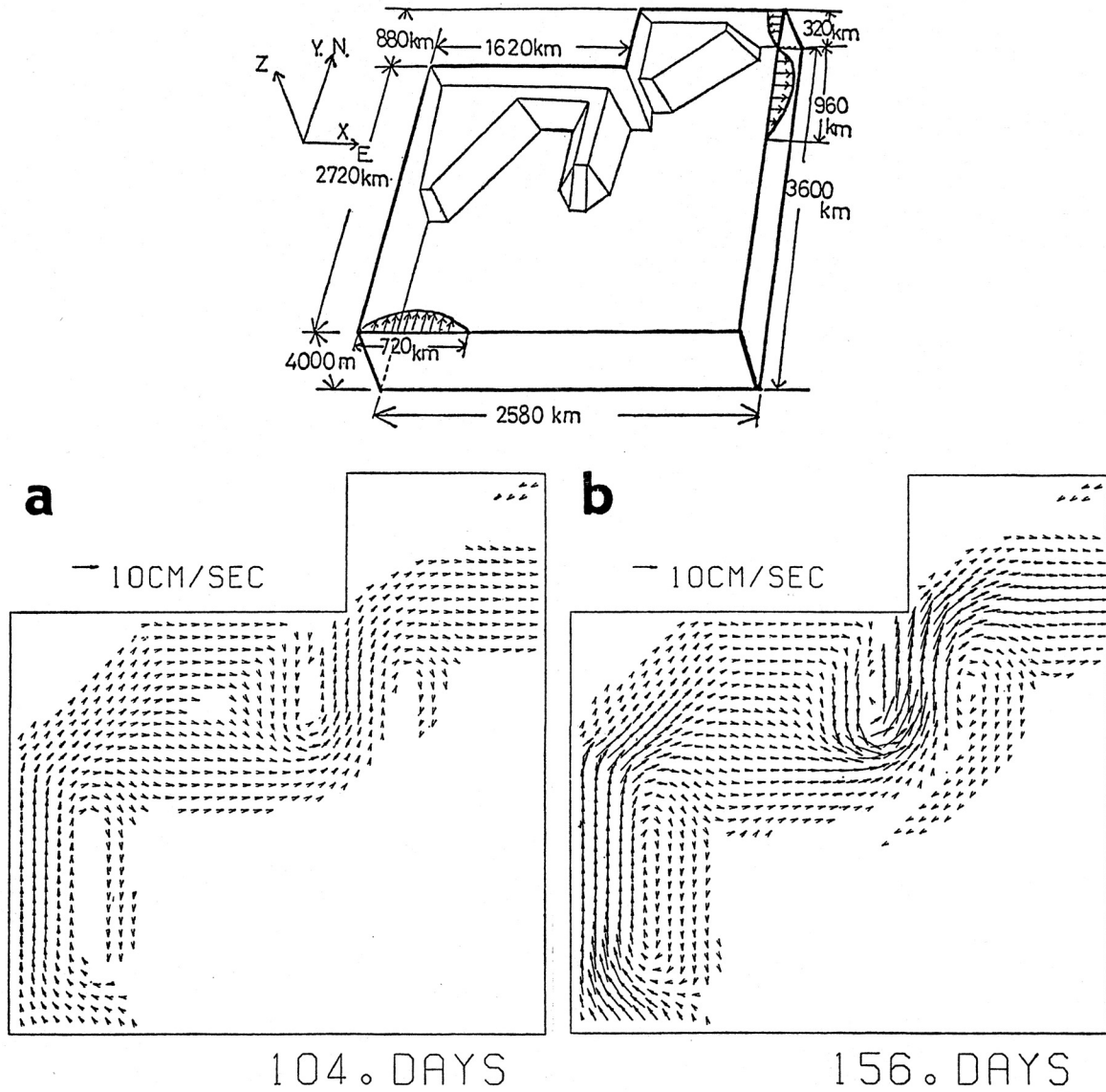


図2 黒潮に及ぼす伊豆海嶺の海底地形効果を調べた数値モデルの模式図（上図）と結果（下図）。（a）流入出の質量輸送を 30Sv（ $1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3\text{ sec}^{-1}$ ）にした場合、（b）質量輸送を 30 Sv から 80 Sv に増加させた場合。

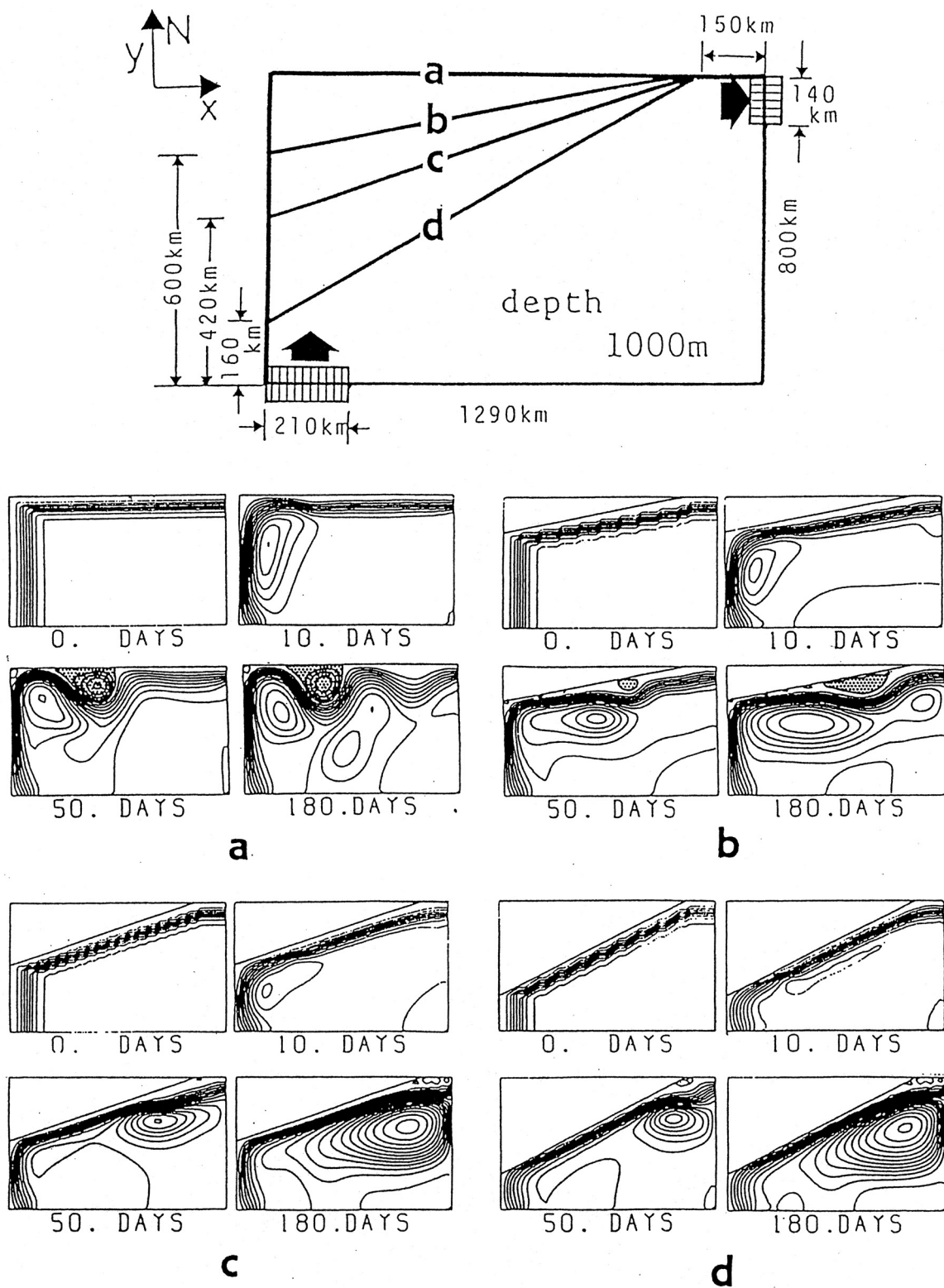


図3 北岸の東西方向からの傾きの差異を調べた数値モデルの模式図（上図）と結果（下図）（Sekine (1988)）。（a）北岸の東西方向からの傾きが無い場合、（b）10度傾いた場合、（c）20度傾いた場合、（d）30度傾いた場合。流線関数の間隔は5 Sv で、低気圧循環である負の流線関数の領域を斑点で示した。

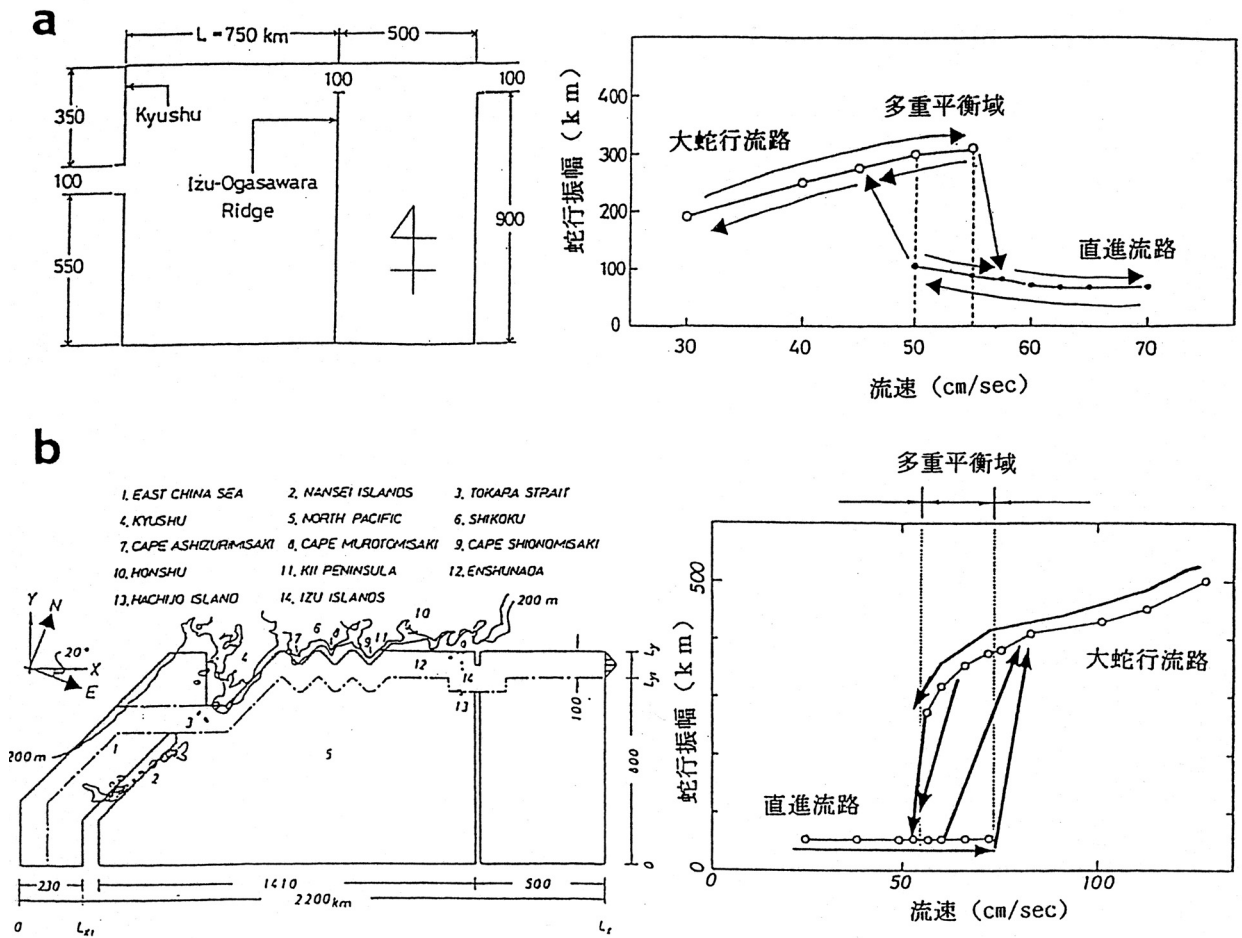


図4 黒潮の流路を調べた数値モデル実験の模式図(左図)と結果として得られた流路の蛇行振幅の流入流速への依存性(右図)。

(a) Yasuda et al. (1985) の場合、(b) Akitomo et al. (1991) の場合。

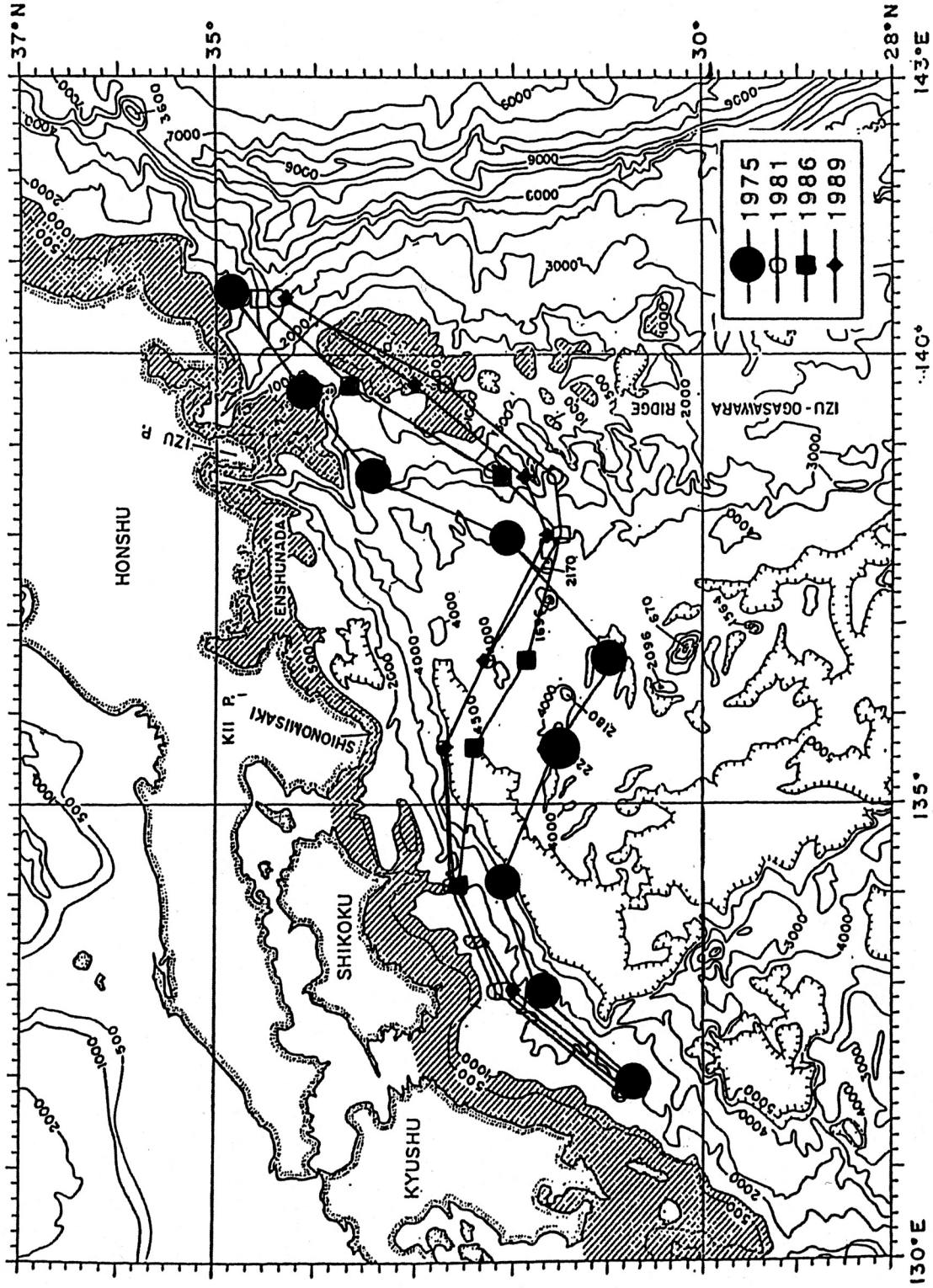


図5 離岸距離から示した黒潮大蛇行の平均的な流路のパターン(関根と陳, 2003)。各大蛇行の標記はその大蛇行の形成年として右下に示した。

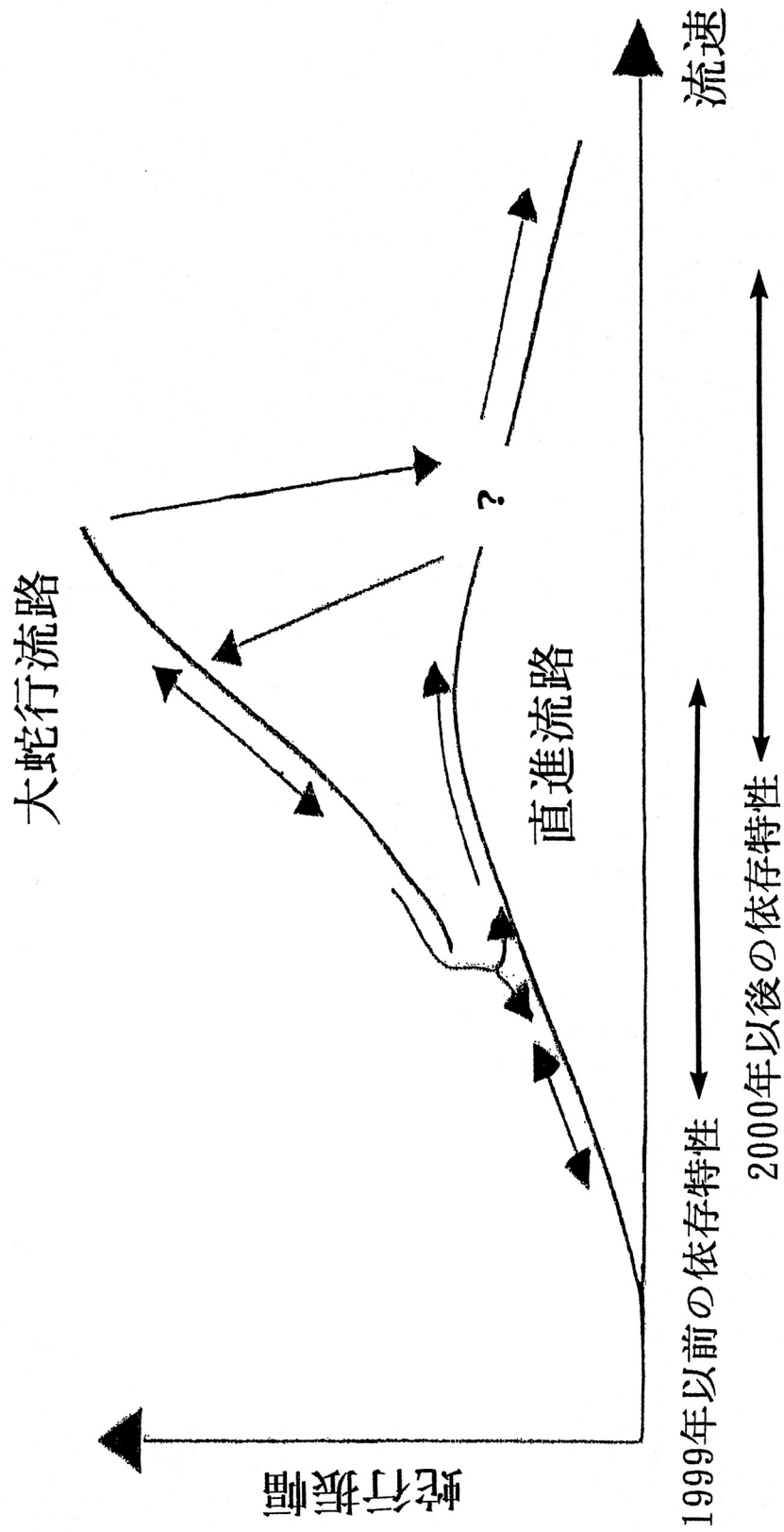


図6 黒潮の流路の黒潮流速依存性。1999年と2000年の境は概ねの境である。