

黒潮・親潮合流域における海流の力学: 海底地形の効果

西垣 肇（大分大学教育福祉科学部）

概要

黒潮と親潮は東日本の東岸で合流する。そこには「混乱水域」と呼ばれる海域がみられ、黒潮系の海水と親潮系の海水が、それぞれ渦として混在する。この構造の成因を解明することを長期的目標とし、大型計算機を用いて一連の数値実験を行っている。本研究では、海底地形が房総半島沖における黒潮の離岸によぼす効果に注目する。結果として、海底斜面には、海流の不安定を抑えて黒潮の離岸を促す効果があることがわかる。また、最下層の流れに力学的調節作用があり、これが離岸の流れパターンの維持をしていることが示唆される。海嶺・海山・海溝も、流れパターンに大きく影響することが示される。

1. はじめに

黒潮と親潮は、東日本の東岸で合流する。このふたつの海流は、図1に示す3つの水域をつくる。親潮水域には親潮系の低温・低塩分の海水が、黒潮水域には黒潮系の高温・高塩分の海水がみられる。中間の「混乱水域」とよばれる水域には、黒潮系水の一部と親潮系水のおよそ半分が進入し、それぞれが渦をつくりながら混在し、徐々に混合される。

本研究の長期的な目標は、この構造がどのようにしてできるのか、なぜ全面衝突的な流れパターンにならないのか、その海流の力学を解明することである。

海洋物理学で用いられる数値モデルは、ひとつの分類法として「実験的モデル」と「シミュレーション的モデル」に分けられる。「実験的モデル」は現象の理解を目的とし、理想化された簡単な条件が用いられる傾向にある。その性格は、諸条件をコントロールして行われる実験、場合によっては、紙と鉛筆で解けない数式を解く道具である。「シミュレーション的モデル」は現象の再現と予報を目的とし、条件は現実的で複雑である。その性格は、観測の代わりに近い。（観測は費用と人手がかかるため、その密度・頻度に限界がある。）

黒潮・親潮合流域の問題に対して、主に実験的モデルによる研究から、多くの要因が指摘されている。特に、黒潮の房総半島沖における離岸に重要なものとして、海上風パターン、海洋の鉛直構造、海岸地形、海底地形、海水運動にかかる粘性などがあげられる。どの説も

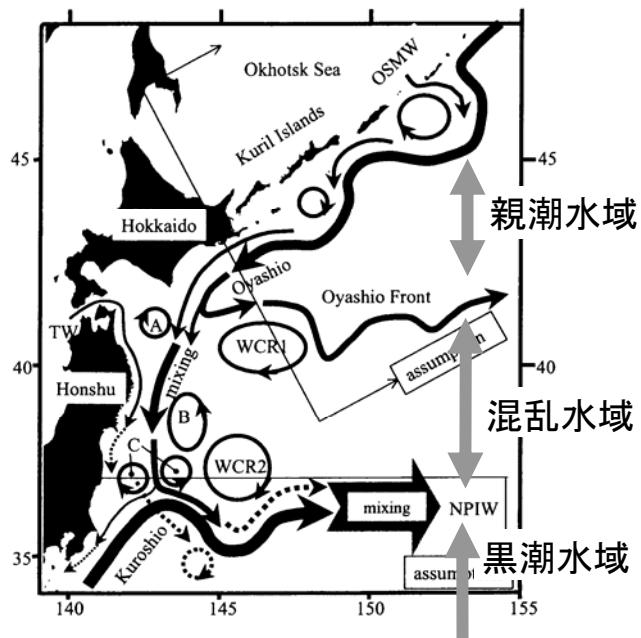


図1：黒潮・親潮合流域における海流の模式図。

Shimizu et al. (2001) より。

有力だが、決定的と言えるものはまだない。シミュレーション的モデルでは、近年この海域の現象がかなりよく再現されている。しかし、このタイプのモデルは複雑で、中で起こっている現象の理解には向きである。したがって、実験的モデルや理論モデルを用いることも必要である。

本研究では、実験的モデルを用いて一連の数値実験を行い、この海域における海流の力学を検討する。特に、海底斜面などの海底地形の効果に注目する。

2. 研究方法

理想化された条件のもと、数値実験を行う。図2にその一例を示す。モデルは北太平洋を想定し、海岸地形のうち西部の南西—北東向きの部分が日本南岸、岬型のところが房総半島を、それぞれ表現する。海流を海上風の応力で駆動する(図2b)。鉛直には一様密度の海水層からなる層状構造とする(図2c)。

支配方程式のうち、運動量の式を示す。

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} - fv_k = -\frac{\partial M_k}{\partial x} + (\text{visc}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} + fu_k = -\frac{\partial M_k}{\partial y} + (\text{visc}) \quad (2)$$

ここで (u_k, v_k) は k 層目の水平流速を表す。詳細な説明は省略するが、数式が複雑で解析的に解くことができないため、計算機が必要である。

解法は、空間と時間を格子化する差分法を用いる。格子間隔は水平方向に経度 $1/10$ 度 (一部のケースで $1/5$ 度), 時間ステップは 225 秒 (同 450 秒) である。計算量の一例は、格子数 $511 \times 1001 \times 6 = 3.1 \times 10^6$ 点、時間ステップ 3.1×10^6 回 (3000 日分), 使用 CPU 時間は 3000 日分の計算あたり 1,460 時間である (kyu-cc, 自動並列化, 4CPU 使用, 実時間 480 時間)。同量の計算を研究室のマシンで行う場合 150 日間の計算時間が見込まれるので、大型計算機の利用は欠かせない。

3. 結果と考察

3.1 海底斜面の効果

鉛直に重なる海水は、上下の海水が同じ方向に流れる傾向がある。このため、海底地形があるとき海流は等深線に沿いやすい。ここでは、日本南岸の海底斜面の効果を調べるために、平坦海底のケース (ケース 1) と西岸に海底斜面のあるケース (ケース 2) を実行し、比較検

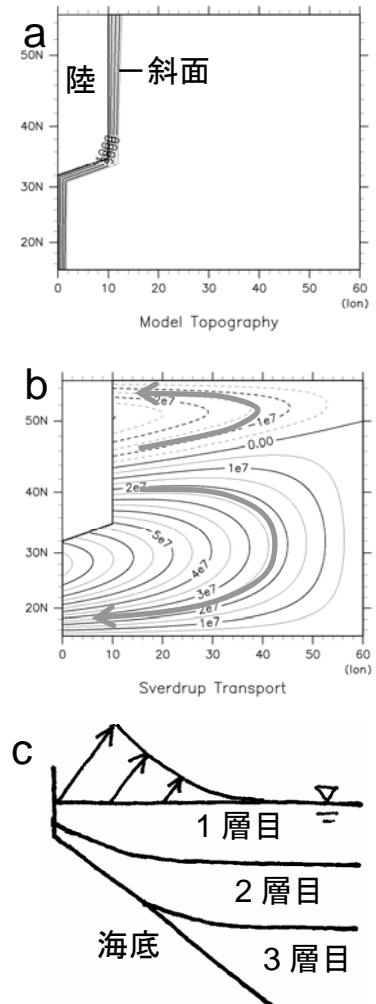


図2: 数値モデル。a: 海岸・海底地形。b: 与える風応力と風成循環理論に基づく流れパターン。c: 鉛直断面の模式図。

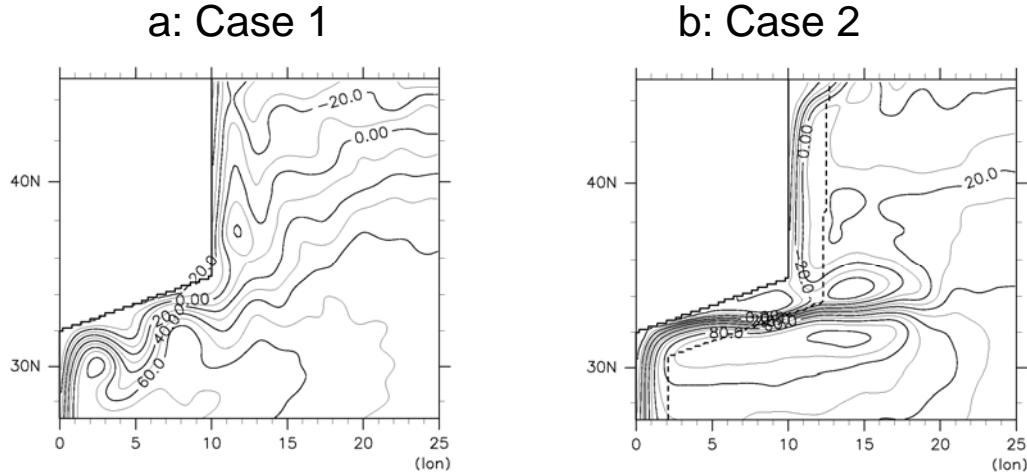


図3：時間平均の海面高度分布。表層流は等高線に沿う。破線は4000 m の等深線（海底斜面の外洋側端）を表す。a: 平坦海底のケース。b: 海底斜面つきのケース。

討する。それぞれの時間平均の流れパターンを図3に示す。ケース1（平坦海底、図3a）では、日本南岸において黒潮に対応する強い海流がみられるが、時間変動が大きい。房総半島沖では強いジェット流がみられず、黒潮離岸に対応する流れは不明確である。ケース2（海底斜面つき、図3b）では、日本南岸から房総半島沖におよぶ強いジェット流がみられ、時間変動が小さく安定的である。

この差異の理由は、検討の結果、以下のとおりであることがわかった。日本南岸における海底斜面は、海流の力学的不安定（傾圧不安定）を抑える作用がある。この作用がはたらかないケース1では流れが不安定で時間変動が大きく、ジェット流がくずれる。ケース2では力学的不安定が抑えられてジェット流が下流まで維持され、黒潮離岸が実現されやすい。

ケース2において、日本南岸で黒潮が海岸を離れ、その沿岸側に流れの弱い海域（よどみ域と呼ぶ）がみられる。このよどみ域が存在し、維持されることが、安定的な離岸の実現に重要と思われる。

よどみ域の存在・維持の理由は、検討の結果、以下のとおりであることが示唆された。弱い力学的不安定によって上層の運動エネルギーの一部が下層に運ばれ、上層の強流直下に下層の再循環流が生じる（図4の矢印）。この下層流が

「流量一層厚バランス」（上層流量と等密度面深度の拘束的な関係）に対する調節作用としてはたらき、よどみ域が維持される。

3.2 海嶺・海溝・海山の効果

海底の地形は変化に富んでいる。比較的大規模な地形に、伊豆諸島のある伊豆海嶺、東経170度線に沿うように位置する天皇海山列、東日本の沖合から伊豆海嶺の東に位置する日本海溝・伊豆海溝がある。他に比較的小さい起伏がある。

前節の数値実験は、これらの地形を条件に含まな

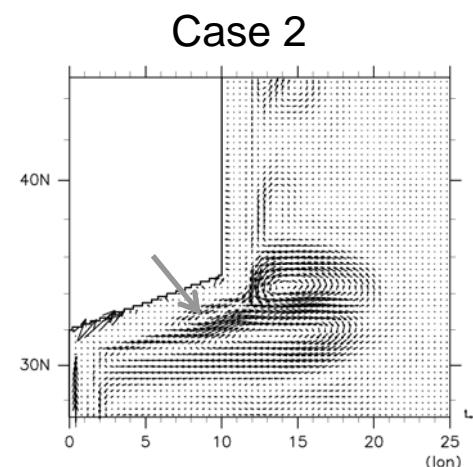


図4：ケース2（図3b）の最下層流。

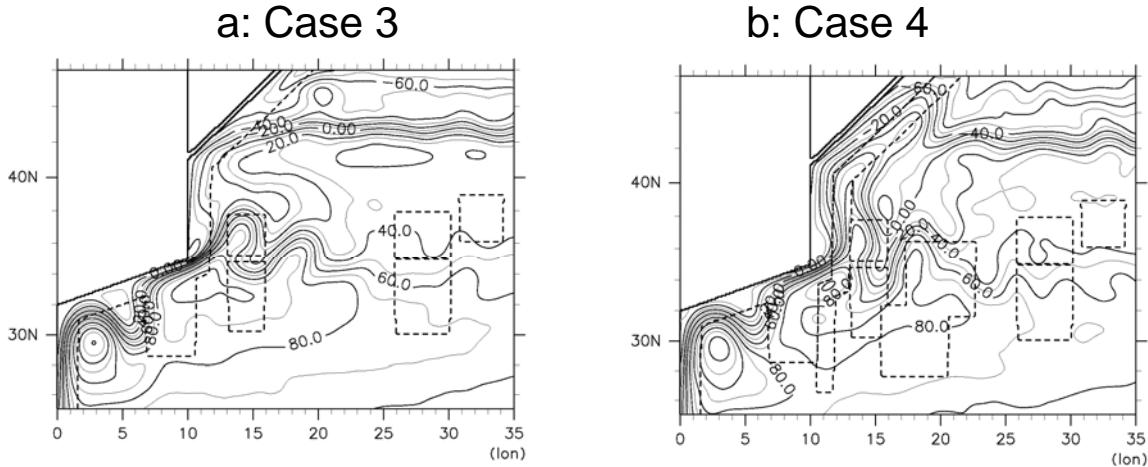


図3：時間平均の海面高度分布。表層流は等高線に沿う。破線は6000 m の等深線を表す。a: 海溝なしのケース。b: 海溝ありのケース。

い。ここでは海嶺、海溝、海山の効果を検討するため、各種の地形を含めて一連の数値実験を実行する。

海溝の効果を示す例として、海溝のないケース（ケース3、図4a）と海溝を含むケース（ケース4、図4b）を挙げる。ケース3（海溝なし）では黒潮が北緯35度で海底斜面を横切る。ケース4（海溝あり）では、黒潮の一部が千島列島南部沿岸に達する（現実的でない）。上層の黒潮が海溝を横切りにくいことが示唆される。

一連の実験より、上層の流れパターンは海底地形（比較的小さい起伏を含めて）に敏感であることが示される。しかし、現実的でないという問題があり、実験条件の見直しが必要である。

4. むすび

黒潮・親潮合流域における海流の力学を解明することを目指し、大型計算機を利用して数値実験を行っている。力学の理解を容易にするため単純化された地形を用いている。日本南岸の海底斜面の効果について、「沿岸側よどみ域の存在と維持に注目する」という新たな視点より、新たな力学過程を提案した。海嶺・海溝・海山の効果については、流れパターンが海底地形に敏感であることが示された。しかし、モデル海の海水流動と現実海洋との対応がわるく、今後の検討が必要である。

参考文献

- Shimizu, Y., I. Yasuda, and S. Ito, 2001: Distribution and circulation of the coastal Oyashio Intrusion, *J. Phys. Oceanogr.*, **31**(6), 1561-1578.