

東中国海陸棚縁辺域の黒潮の構造と変動*

伊藤集通**

広島大学大学院生物圏科学研究科

Structures and Variabilities of the Kuroshio at the East China Sea Shelf Break

Toshimichi Ito

*Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima 724, Japan*

第1章 序 論

北太平洋の亜熱帯循環の一部である黒潮は、北半球の大気・海洋の熱環境の維持・形成に非常に重要な役割を担っている。黒潮の存在とその変動は、黒潮に接する日本の周囲においても気象の変動や漁場の形成などのさまざまな面で人間生活に大きな影響を及ぼす。特に沿岸水と黒潮水の接するフロント域は、水温や溶存物質濃度が劇的に変化する領域であり、観測の困難さや現象の複雑さから、この領域で起こっている種々の現象の多くは、未だ解明されていない。

本論文では、東中国海陸棚縁辺域の黒潮フロント域における海水の混合交換機構と海流場の時間空間変動について、特に陸棚斜面上での黒潮水の陸棚上への湧昇に着目して研究を行った。湧昇は海洋における鉛直循環作用の一つで海洋の深層から表層へと栄養に富んだ海水を輸送するため、海洋の化学的、生物的環境の形成にも重要な役割を担うが、これまでこのような海域で湧昇の発生を示すはっきりとした証拠は未だ示されていない。本研究は、溶存栄養塩を化学トレーサーに用い海水混合と水塊分布を調べ、海流場は直接計測するという化学・物理の両面から陸棚斜面上の湧昇現象の解明にアプローチした。特に海流場の計測には、同時に多深度層の測流を行い、瞬時にその測点の流速の鉛直分布を得ることのできる最新の測器である ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) を使用した。

第2章 東中国海黒潮域の混合解析と水塊分析

本章では研究対象海域における海水混合と水塊分布を従来の水温、塩分に加え化学トレーサーとして溶存態のケイ酸 (以降単にケイ酸と略す) 濃度に着目して研究した。

広島大学総合科学部紀要Ⅳ理系編, 第20巻 (1994)

*広島大学審査学位論文

口頭発表日 1994年2月23日, 学位取得日 1994年3月2日

**現在の所属 広島大学工学部

観測は1987年5月7日～6月10日、東京大学海洋研究所所属の研究船「白鳳丸」を使用して実施した。調査対象海域で黒潮と陸棚斜面域を横切る2本の観測線を設定し、黒潮上流側にある東中国海南西部の測線をA-line、下流側にある東中国海北東部の測線をB-lineと呼ぶ。A-lineでは約50km間隔の7測点で、B-lineでは、約100km間隔の5測点でCTDを用い水温と塩分の鉛直分布を観測した。これと同時に各測点で各層採水を実施し、採取された海水サンプルを化学分析し塩分やケイ酸濃度を求めた。この観測では、音響ピンガーを用いることにより海底上10m以内の海水サンプルを採取することに成功した。

A-、B-lineそれぞれの観測断面で、水温、密度、ケイ酸濃度の等値線は陸棚縁辺部で明瞭な隆起構造を示した。この隆起構造内部には、周囲の陸棚水にみられない低温、高ケイ酸濃度の水塊が存在した。この水塊の中心部で見られた最低水温、最高ケイ酸濃度は、陸棚斜面のすぐ近くにある黒潮内の250m深と350m深の水温とケイ酸濃度にそれぞれ対応した。このことは、隆起構造内で見られたこの水塊が黒潮起源であり、等値線の隆起構造が黒潮中層水の湧昇によって形成されたことを示唆する。また、水温とケイ酸濃度では黒潮内の対応深度が異なることから、湧昇の過程で海水の混合が生じていることも示唆される。そこで、黒潮水の陸棚斜面上での鉛直混合の様子を調べる方法として混合曲線と混合範囲曲線を用いた混合解析法を新たに考案した。混合解析の結果、隆起構造中心部の水塊は、A-lineでは深度範囲90～360m、B-lineでは深度範囲150～230mの黒潮水の鉛直混合によってそれぞれ形成されることがわかった。同時に本研究で考案した新しい混合解析法は、海水の混合範囲を一意的に決定できる優れた長所を有することも示された。次に90～360m深度層の黒潮水が混合してできる混合水がA-lineの鉛直断面内でどのように分布するかを、水温-塩分図(T-S図)と水温-ケイ酸濃度図(T-Si図)を用いる水塊分析により検討した。T-S図、T-Si図から求めた断面分布図はともに黒潮中層水を起源とする混合水が陸棚斜面をはい上り陸棚上に達している様子を示した。しかしながら、T-Si図から求めた分布図の方が黒潮混合水が陸棚上へより深く侵入する様子を示し、隆起構造周辺の水温やケイ酸濃度の等値線の分布の様子などもT-S図よりT-Si図から求めたものの方がより良く一致した。これらの結果はまた、黒潮フロント域で混合解析、水塊分析を行う際には成層度の弱い塩分よりもケイ酸の方がよりよいトレーサーとなることも示すものである。

第3章 海流場の空間構造

本章では、黒潮の空間構造について特に陸棚斜面域の水平流速と鉛直流速に着目して論じている。

海流場の観測は、1991年9月2～3日に、沖縄西方の黒潮と陸棚斜面を横切るように設定した観測線上を往復するように行われた。海流の計測に使用した測器は、九州大学応用力学研究所で製作されたDRAKEと呼ばれる主翼と水平尾翼をコントロールすることで潜航深度とロール運動を制御できる高性能の翼制御型曳航式ADCPである。この観測では、海流の計測と同時に観測線上の9測点で水温、4測点で水温・塩分の鉛直分布の観測も実施した。

観測の結果、対象海域の黒潮の全断面にほぼ相当する600m深までの海流場の計測に成功した。水平流速は観測断面の大部分で黒潮の流軸方向である北東流を示したが、陸棚斜面の海底付近で黒潮と反対方向の南西に流れる反流を示した。この水平流速を黒潮に沿う座標系を用いて黒潮主流方向成分(v)と黒潮直交方向成分(u)に分解して調べた。その結果、u流速はv流速が正流から反流に入れ変わる境界付近で収束し、さらにその収束域の周辺で鉛直流速成分(w)は上向きとなった。そして上昇流の最大値は 1.7 cm s^{-1} という驚くほど大きな値に達することが発見された。以上

の観測結果より、本海域で観測された上昇流は黒潮の水平流速の収束により誘起されていると結論した。

第4章 海流場の時間変動

この章では黒潮海流場の時間変動を、約1年間の変動と黒潮フロントの蛇行に関連した短周期の変動に着目して論じた。

曳航式 ADCP 計測と同じ測線上の陸棚斜面上の1点(測点 M0)と黒潮中心部付近の1点(測点 M2)の計2測点で係留式 ADCP による海流場の長期連続計測を行った。この係留観測では、測点 M0、M2ともに約400mの深度に ADCP を上向きに設置した。観測期間は、1990年12月10日～1991年11月30日の355日間におよんだ。途中の8月31日と9月1日には、バッテリーの交換とシステムの保守のため係留系全体をいったん船上に揚収し再設置したため、データはその2日間の揚収期間を境に前期と後期の2部分にわかれた。この観測では、各測点での流速の鉛直プロファイルの変動のほかに ADCP 設置深度における水温の変動も記録した。

測点 M0 では、前・後期の全観測期間にわたって流速と水温のデータを得ることに成功した。これに対して測点 M2 の前期観測では、観測を開始してすぐに測器がダルマザメと呼ばれる深海ザメによる食害を受けてほとんどデータが得られなかったが、後期観測では全期間にわたって流速と水温のデータを得ることに成功した。まずこれらの観測データをスティック図で表示して概観すると、測点 M0、M2 の海流は平均的には黒潮の主流方向である北東流を示したが、10～20日周期で流向・流速が変動していたことが一見してわかった。流向・流速は全観測深度層でほぼ同時に変動しており、黒潮流軸方向の流速はゆっくりと加速し素早く減速すると言った鋸の歯状パターンを示した。測点 M0 の中・深層では減速期に南西向きの黒潮逆流がしばしば発生し、その減速過程において流速ベクトルは反時計回りに回転するように推移した。さらに、各測点で流速の極小あるいは逆流が見られるとき、ADCP 設置深度の水温が低下した。次に水平流速データを、第3章と同様に黒潮に沿う座標系を用いて流速成分 (u 、 v) に分解して詳細な解析を行った。その結果、 v 流速では、逆流を含めた流速の極小値が周期的に発生し、その平均発生周期は約14日と見積もられた。 u 流速では v 流速の変動に対応して冲向きの流速 ($u > 0$) と陸向きの流速 ($u < 0$) が交互に発生し、 u 流速が負から正に転じるとき 1/4 周期遅れて v 流速が極小となることがわかった。深度-時間図上で、負の u 流速は表層から発生しはじめてゆっくりと深層へと伝播し、 u 流速が正へ転じる時には全層でほぼ同時に起こった。また、各深度層の u 流速を観測期間で平均化した結果、測点 M0 のデータでは前・後期ともに330m以浅で陸向きの流速となり、後期観測だけの測点 M2 のデータでは全観測層で陸向きの流速となった。陸向き(負)の u 流速は、黒潮水が陸棚斜面を駆け上ることにより上昇流を誘起することができる。観測期間中の u 流速データから上昇流速は、平均的には 0.1cms^{-1} のオーダーであり、最大で 0.6cms^{-1} に達すると見積もられた。

第5章 総合考察

ここでは第2章～第4章の議論を総合し、黒潮フロント域における海水の混合過程および混合水塊の分布を黒潮フロントの時・空間変動と関連づけた次のような新しい海流場のモデルを提案する。

1) 黒潮フロントは約14日周期で蛇行し、この蛇行はしばしば反時計回りにオーバーターンし逆流を発生させる。このオーバーターンは冷水渦に至ることもある。2) 黒潮フロントのオーバーター

ンの内側では水平流速が収束し強い上昇流が発生する。3) 年間を通じて陸棚斜面上の u 流速は平均的には陸向きであり、陸棚斜面上の上昇流の発生はこのことから説明できる。4) 陸棚上で見られた水温やケイ酸濃度の等値線の隆起構造は黒潮中層水の湧昇により形成され、黒潮の流軸方向にも凹凸の構造を持つ dome 構造となっている。5) dome 内で見られた水塊は黒潮中層水が陸棚斜面を湧昇する過程で混合してできた水塊である。

第6章 結 論

東中国海陸棚縁辺域では、水温やケイ酸濃度の等値線が隆起構造を形成する。隆起構造内の水塊は、混合曲線と混合範囲曲線を用いた新しい混合解析から黒潮中層水の混合で生成できることがわかる。T-S 図、T-Si 図を水塊追跡のため利用できるが、本海域では鉛直方向の塩分の変化が小さいため、T-S 図よりも T-Si 図の方が有利である。この海域の海流場の空間構造は、 v 流速の正流と反流の境界で u 流速が収束し、その周囲に上向きの w 流速が存在するという特徴的な構造となる。海流場の時間変動では、黒潮の流向・流速が約14日の周期で変動し、中・深層ではしばしば反流の発生に至る。反流が発生するとき、水平流速ベクトルは時間の推移とともに反時計回りに回転する。さらに、 u 流速と v 流速の変動は、位相が1/4周期ずれている。各章で個々に得られたこれらの結果は、第5章で提案した黒潮フロントの蛇行に基づく海流場のモデルによって矛盾なく説明できる。