

黒潮系暖水の遠州灘～熊野灘への流入と挙動

児島正一郎*・風間 聡**・沢本正樹***

1. はじめに

沿岸域の海況変動に対する外力には、四つの境界からのもの、すなわち、河口、海岸を通じて伝わる陸からのもの、海流などの変動による沖合いからのもの、海面を通じて伝わる風による熱、水の運動量交換など気象的要因によるもの、懸濁粒子の堆積や巻上げなどの海底からのものなどがある。このうち、太平洋沿岸域の環境について考える際には、海流、すなわち黒潮、親潮の変動による影響が極めて重要となる。特に、潮岬より東側の遠州灘と熊野灘の海域では、黒潮の変動性が富むため、黒潮から波及する暖水によって大きな影響を受けている。にもかかわらず、従来の沿岸域の研究では、黒潮が沿岸域に及ぼす影響について十分に議論されていない。

このことは、海難事故における漂流物の予測の不正確さや漁業予測の不確実性によって示されている。例えば、1993年7月18日に遠州灘沖合いで発生した「ANDHIKA」の木材流出事故や1993年11月20日に熊野灘沖合いで発生した「SUCCESS No. 1」の木材及び油流出事故における海上保安庁による流出木材や流出油の漂流予測は、満足のいくものではなかった。つまり、我々はこの海域について、過去に様々な調査や研究を行ってきたが、

その流動については、まだ完全に把握していないのである。

そこで本研究は、図-1に示す遠州灘～熊野灘周辺海域に対する黒潮の影響を船による海上観測と人工衛星NOAAによる衛星観測によって、この海域で起きている物理現象について議論を行なった。また、ここで起きている物理現象のプロセスとメカニズムについて議論を行うために、これらの観測結果とE. P. L. Roberts (1993)が行った水理学的基礎実験との比較を行なった。

2. 海上観測

(1) データセット

海上観測データとして、第四管区海上保安本部が1994年4月26日～1994年5月9日まで行った遠州灘～熊野灘周辺海域390×260 kmのADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) によって得られた海表面流速データを用いた。ADCPは、航走中連続して流れを観測できるという特徴を持っている。今回の観測では、経度10'毎の観測線を設けてデータを収集した。

(2) 解析

ADCPによって観測された海表面流速データを7 km間隔のメッシュデータに補間し、海表面流速ベクトル図を作成した。図-2にこれを示す。黒潮が潮岬沖合い(画面左隅)から伊豆海嶺(画面右隅)に向かって流れている。黒潮を乱流現象としてみると、黒潮と海岸線の間に発達する乱流境界層は、遠州灘と熊野灘である。また、遠州灘と熊野灘は、紀伊半島というパッフルの後ろに広がる後流域でもある。

さらに、このベクトル場を空間微分し、渦度場 ω を計算し、表示を行った。図-3にこれを示す。渦度場 ω は、 $\omega > 0$ ならば左旋渦(正の渦)を表わし、 $\omega < 0$ ならば右旋渦(負の渦)を表わしている。そして、表示は、モノクロ16階調で行い、黒色に近いほど左旋渦が卓越していることを表わしている。この図より、潮岬からの剝離渦が、流下方向である伊豆海嶺に向かって流され、その間に、徐々に大きく発達している様子を確認することができる。これより、潮岬は、工学用語で言うところの「vortex maker」の働きをし、絶えず流下方向である伊豆海嶺に向

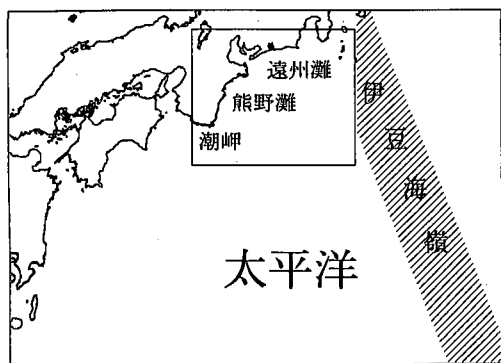


図-1 対象地域

* 学生会員 東北大学大学院土木工学専攻
 ** 正会員 博(工) 東北大学助手 工学部土木工学科
 *** 正会員 工 博 東北大学教授 工学部土木工学科

かって乱れ成分を供給し、この乱れ成分によって遠州灘と熊野灘の流動は支配されている。

3. 衛星観測

(1) データセット

海上観測は、時間スケールの非常に大きい現象を把握するには適しているが、遠州灘や熊野灘内の流動のような時間スケールの小さい現象を把握することには適していない。これは、観測に要する時間に制約があるからである。時間スケールの小さい現象を観測するためには、その現象が次の現象に変化する前に全体を観測しなければならない。つまり、短時間での観測が要求されるのである。しかし、船による海上観測では、遠州灘～熊野灘内で起きているメソスケールの現象を、短時間の間にすべて観測することは難しい。そこで、メソスケールの物理現象を小さい時間スケールで観測することができる衛星観測を行う。衛星観測データとして、東北大学理学部大気海洋変動観測研究センターが直接受信し、作成して

いる JAIDAS. ch4 の熱赤外線データを用いた。このデータは、天気が悪くなければ毎日得られるデータである。これにより、時系列的に遠州灘と熊野灘内の流動を観測することができる。

(2) 解析

図-4 に、1994 年 5 月 9 日の JAIDAS. ch4 の熱赤外線画像を示す。表示はモノクロ 16 階調で行い、白色に近いほど温度が高いことを示している。この図において、黒潮は温度の高い部分（図の下側）を流れている。潮岬からの剥離渦は、熊野灘の南東側（図-4 の中央より斜め左下の小円で囲んだ部分）から流入し、熊野灘に径 50 km 程度の左旋暖水渦を形成している。また、これよりも前に発生した剥離渦が、遠州灘上に径 70 km の暖水と冷水が混じり合った左旋渦を形成している。さらに、この熱赤外線画像を空間微分し、温度勾配を計算し、表示を行った。計算は R. O. Duda ら (1971) の研究で使用された Sobel の微分オペレータを用いて行った。図-5 にこの計算結果の温度勾配図を示す。表示は、モノクロ 16 階調で

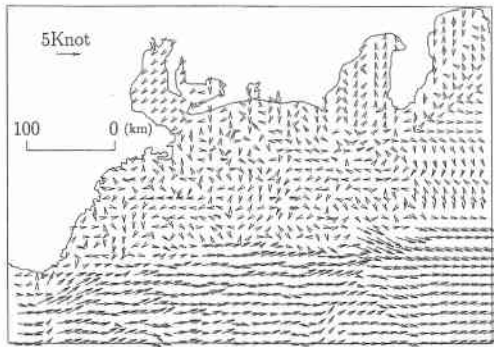


図-2 海表面流速ベクトル

-0.54 $1.14 \times 10^{-4} (1/s)$

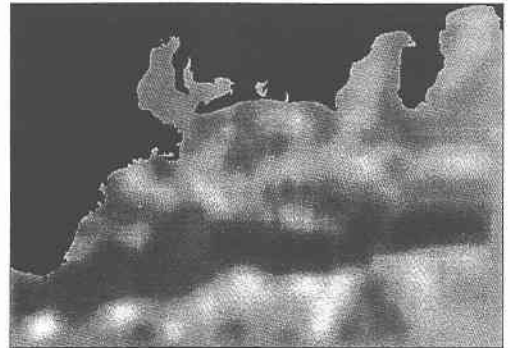


図-3 渦度場

8 $12(^{\circ}C)$



図-4 JAIDAS. ch4 (MAY9, 1994)

0 255



図-5 温度勾配

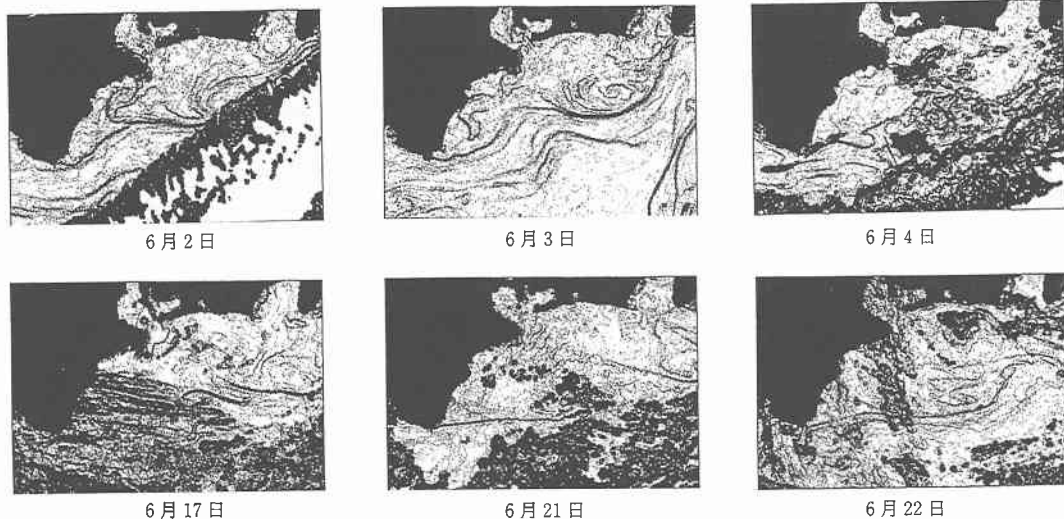


図-6 時系列観測

行い、黒色が濃いほど温度勾配が大きいことを示している。温度勾配が大きい部分（黒い部分）では、フロントが形成され、プランクトンや魚が集まる好漁場になっている。また、この温度勾配図は、熱赤外線画像より潮岬からの剥離渦の構造をよく表わしている。そこで、この温度勾配図を用いて潮岬からの剥離渦の挙動を観測する。

図-6 に、温度勾配を用いた潮岬からの剥離渦の時系列観測の一例を示す。潮岬からの剥離渦は、下流方向に行くに従いその径を大きくしながら、沿岸域の冷水を巻き込んで暖水と冷水が混じり合った渦に変化し、石廊崎沖合（伊豆海嶺の前）で最大となる。その後は、伊豆海嶺上を下流方向に進むにつれ徐々に弱くなり、最終的に伊豆海嶺を越えることができず消滅する。この剥離渦の発生から消滅までの一連のサイクルは、約 20 日間であった。ただし、今回の時系列観測は 1994 年 5 月 30 日から 1994 年 6 月 25 日の期間で実施し、観測期間中、黒潮の流軸が変化なく N 型（直進型）を保ち、黒潮前線波動による流軸の変動は見受けられなかった。また、この値は、フェリーによって観測された黒潮系暖水の遠州灘～熊野灘への流入周期 20 日と一致している（笠井ら, 1994）。

4. 水理学的基礎実験との比較

海上観測と衛星観測より、潮岬からの剥離渦が遠州灘と熊野灘に流入し、そこでの流動と熱環境に大きな影響を与えていることがわかった。そこで次に、この海域で起きている物理現象を簡単な水理学的基礎実験と比較することにより、そのメカニズムの解明を行う。

(1) 実験内容

今回、遠州灘～熊野灘周辺海域内の流動と比較した水理学的基礎実験は、E. P. L. Roberts (1994) が行った実験である。この実験は、図-7 に示すような長方形管路内にバップル (vortex maker) を一定間隔に配置し、低レイノルズ数で遷移状態の乱流現象を再現しようとした実験である。

(2) 比較検討

図-8 にレイノルズ数 $Re=132$ のときの実験で得られた流線を示す。この図において、二つのバップルをそれぞれ紀伊半島と伊豆海嶺とし、その間を遠州灘～熊野灘とすると、その流動のパターンは、遠州灘～熊野灘で起きている流動のパターンと類似している。

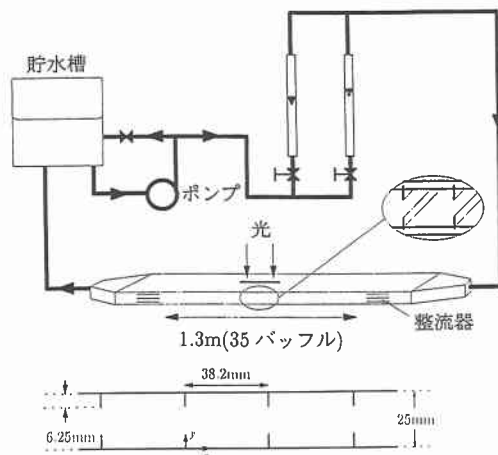
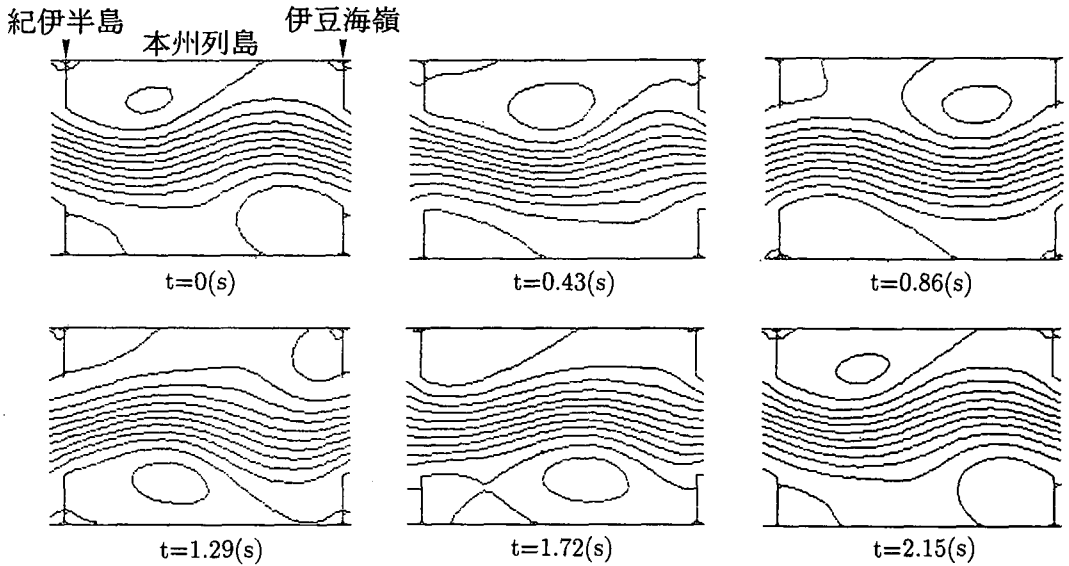
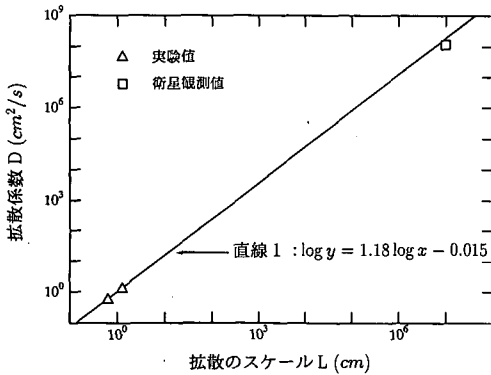


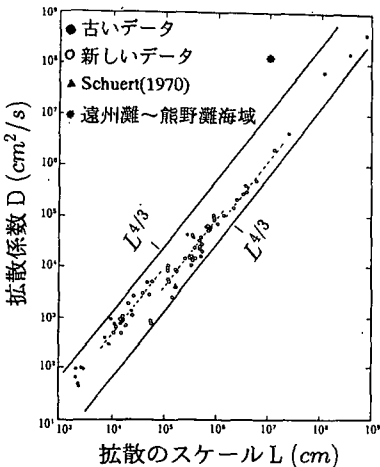
図-7 実験装置 (E. P. L. Roberts, 1994)



図—8 時系列観測 (E. P. L. Roberts, 1994)



図—9 拡散スケールと拡散係数の関係



図—10 他の海域との比較

次に、この二つの流れにおける拡散係数 D の比較を行った。拡散係数 D は、以下の式によって求める。

$$D = \frac{s}{t} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 t は渦が発生してから消滅するまでの時間、 s は渦が最大に発達したときの推定面積を表している。これにより求めた拡散係数 D と拡散スケール L （渦が最大に発達したときの推定径）との関係を図—9に示す。この図における直線1は、実験で得られたデータを直線回帰計算し、求めたものである。この直線の傾き1.18は、リチャードソンの相似則から得られる $4/3 (=1.33)$ に非常に近い値を取っている。また、この回帰直線より遠州灘～熊野灘の拡散係数を推定すると $0.017 \text{ (km}^2/\text{s)}$ となり、衛星観測から得られた $0.012 \text{ (km}^2/\text{s)}$ と非常に近い値を取っており、実験と実海域（遠州灘～熊野灘）とは相似関係にあると考えられる。ただし、今回の場合、実験でのサンプル数が、二つと極めて少ないデータから直線回帰計算を行って、実海域との比較を行ったため信頼性が低いので、現在まで行われた他の海域での拡散スケールと拡散係数の関係と、今回の観測結果との比較を行った。図—10に、他の海域で観測された拡散スケールと拡散係数の関係を表すグラフに、今回の観測値をプロットしたものを示す。これより、この海域の拡散係数が、他の海域の拡散係数よりもかなり大きい値を取っていることがわかる。これは、この海域での拡散が潮岬からの剥離渦によるメソスケールでの渦拡散によるものであるのに対し、他の海域での拡散が擾乱によるものであるため、拡散を進行させる空間スケールが大きく異なっているた

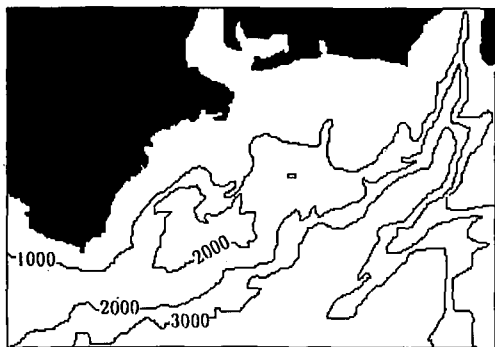


図-11 海底地形

めにこのようなちがいが生じている。つまり、メソスケールの剥離渦による乱流エネルギー散逸量が極めて高いため、この海域での拡散を大きなものにしていく。

最後に、実験と実海域の流れに働く力のメカニズムの比較を行なった。この二つの流れにおける決定的な違いは、その空間スケールの大きさである。つまり、実海域における流動は、メソスケールで起きているため、地球自転の効果がかなり大きく働く。それに対して、実験における流動は、マイクロスケールで起きているため、地球自転の効果は無視できる。このように、この二つの流れに働く力のメカニズムは、全く異なったものである。それでは、どうしてこの二つの流れのパターンは類似するのであろうか？ その答えは、実海域における海底地形にある。図-11に遠州灘～熊野灘周辺海域の海底地形を示す。この図より、実海域における剥離渦の発生から消滅までの一連のサイクルは、次のように考えられる。潮岬で発生した剥離渦は、等深線に沿って熊野灘、遠州灘と進み、まわりの海域に比べて極端に水深が浅くなっている伊豆海嶺上で、地形性 β 効果によるスピンドウンによって消滅してしまうため、あたかも伊豆海嶺上にバッフルがあるかのような流れのパターンを示しているのである。このように実験と実海域では、流れに働く力のメカニズムは異なるが、その流れのパターンは類似するのである。

5. まとめ

遠州灘～熊野灘の流動と熱環境を支配している最大の要素は、潮岬からの剥離渦である。そして、この剥離渦によってこの海域では、他の海域よりも大きい拡散係数となっている。今後は、黒潮の変動とこの剥離渦の発生周期の関係を調べ、その因果関係を明らかにしていかなければならない。また、剥離渦が石廊崎沖合に達したとき、黒潮系暖水が駿河湾内に流入している様子を確認しているので、この暖水がどれくらいの周期で湾内に流入しているのかを調査していく。

謝辞：本研究の実施にあたり、第四管区海上保安本部より海上観測データの提供を受け、日産科学振興財団より助成を受けた(代表：沢本正樹)。また、公表にあたり小川記念基金の援助を受けた。ここに記して謝辞を表します。

参考文献

- R. O. Duta and P. E. Hart (1971): Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, pp. 267-272.
- E. P. L. Roberts (1993): A numerical and experimental study of transition processes in an obstructed channel flow, J. Fluid. M (1994), vol 260, pp. 185-209.
- 笠井亮秀・木村伸吾・杉本隆成 (1994): 熊野灘・遠州灘への黒潮系暖水の流入, 月刊海洋 Vol. 26, No. 11, pp. 703-708.
- 菊池剛仁・田中総太郎・杉村俊郎・畠山祐二・小林智尚・西村 司 (1994): 1993年秋季の日本周辺海域の流動—NOAA11, 12/AVHRR 遠赤外データによる観測, 1994年春期海洋学会論文集, pp. 150-151.
- 木村龍治 (1983): 地球流体力学入門, 東京堂, 247 p.
- 杉村俊郎・田中総太郎・畠山祐二・西村 司・洲上五郎 (1993): 1992年秋季の日本周辺海域の流動—NOAA11/AVHRR 遠赤外データの解析, 1993年秋期海洋学会論文集, pp. 66-67.
- 杉本隆成 (1994): 総論：黒潮沿岸域の流動と海水交換, 月刊海洋 Vol. 26, No. 11, pp. 673-678.
- 田中総太郎・畠山祐二・菊池剛仁・西村 司 (1993): 1992年春季の日本周辺海域の流動—NOAA11, 12/AVHRR 遠赤外データの解析, 1993年春期海洋学会論文集, pp. 254-255.
- 淵 秀隆・西村 実・菱田耕造・岩下光男・相馬正樹 (1970): 海洋物理 I, 東海大学出版会, pp. 322-375.
- 力石國男 (1978): 平均的な黒潮の流れ, 月刊海洋 Vol. 1, No. 2, pp. 21-28.