

黒潮と湾流における海洋乱流場の組織的渦構造と沿岸水域環境

西村 司* ・杉本 彰** ・福永 健一***
田中總太郎**** ・杉村 俊郎***** ・畠山 祐二*****

1. 目的と背景

本論文の目的は、極軌道海洋気象衛星 NOAA 搭載可視赤外映像センサ AVHRR を用いて黒潮と湾流の瞬間乱流場を計測し、双方の海洋乱流場に卓越する組織的渦構造とその沿岸水域に及ぼす流体力学的作用とを比較することにある。日本列島の沿岸水域環境を議論するとき、沖合い側の境界条件として「黒潮」の振る舞いを考慮する必要がある。だが、黒潮に対する従来の海洋学的知見をみると、その多くは蛇行もしくは非蛇行の形態をとる黒潮の「流路」を対象としており、沿岸水域環境にしばしば大変動をもたらす「乱流」の記述は殆んどみない。また、沿岸水域調査に際して、黒潮の現況を各種メディアによって把握しようとしても、記述の基礎となる海洋観測そのものが、「乱流」の視点を欠いた従来の知見に立脚してデザインされている。

前報において著者らは沿岸水域環境におけるこの種の「海洋乱流の問題」を提示し、NOAA/AVHRR データによる可視化と SeaMark 追跡法による瞬間乱流場計測とを使って黒潮のもたらす中規模渦の組織的渦構造と沿岸水域環境との間の乱流論的プロセスを記述した(西村ら 1996)。本論文では、さらに湾流の乱流計測を実施して黒潮のそれと比較し、日本列島沿岸水域環境が沖合いの中規模渦に直接支配されることを示す。

2. NOAA/AVHRR による瞬間乱流場計測

1996 年以降、日本列島周辺海洋乱流場を対象とした瞬間乱流場計測を目的として、NOAA/AVHRR の高解像度 HRPT データ直接受信が行なわれている。カバーする海域は、アンテナ設置点である東京理科大学土木工学教室(北緯 35 度 55 分, 東経 139 度 54 分)を中心とする半径約 2,500 km の範囲に及ぶ。この 2000 年 5 月の時点では NOAA 12 号, 14 号および 15 号が稼動中であり、毎

日 7~10 シーンのデータが収集されている。中規模渦に焦点を絞った熱赤外データのグレースケール強調処理によって海洋乱流場の可視化が行なわれる。雲の少ないデータが連続して収集された場合、海面微細パターン追跡法の 1 つである SeaMark 追跡法を適用して海面流速ベクトル場を計測する(田中ら 1982)。

図-1 に、1998 年 4 月 19 日における瞬間乱流場計測例をもとの熱赤外面像にオーバーレイして示す。SeaMark 追跡法の適用にあたって、すべてのデータは、ランベルト正角円錐図法によって基準地図の上に精密幾何補正される。数時間の時間差をもって収集された 1 組の熱赤外面像を同一の PC モニター上に交互に表示することにより、微細海面水温パターンの移動ベクトルを計測し、データ収集時刻の差で割ることによって海面流速ベクトル場が求められる。さらに、議論をより一般的なものとするために、北米東海岸に面した「湾流」の瞬間乱流場計測がインターネットを利用して実施されている。まず、NOAA/CoastWatch の www サイトをととして毎日の可視化が行なわれ、さらに NOAA Satellite Active Archive からダウンロードした HRPT データを使って瞬間乱流場計測が行なわれる。

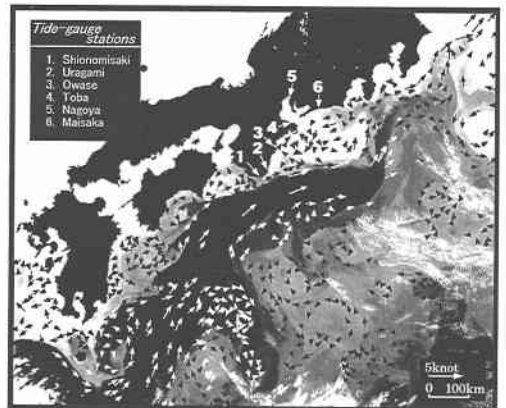


図-1 黒潮に面した太平洋岸の海洋乱流場と熊野灘沿岸の各検潮所の位置(1998 年 4 月 19~20 日)

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

** 工修 東京久栄 建設環境統括部 設計部

*** 東京理科大学大学院理工学研究科

**** 正会員 工博 (財)RESTEC 技術研究部長

***** 正会員 工博 (財)RESTEC 技術研究部主任研究員

***** 正会員 理修 アジア航測株式会社 環境部技術部長

3. 潮岬先端における串本―浦神の潮位差

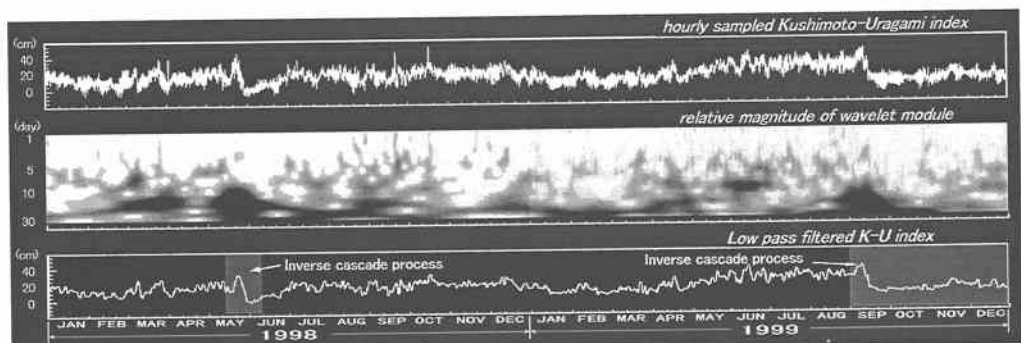
黒潮と沿岸水域環境との相互作用の数値的な指標として、熊野灘の沿岸潮位を採用する。図-1に串本、浦神、尾鷲、鳥羽、名古屋および舞阪の各検潮所の配置を示す。この沿岸潮位は地点データではあるが古くより時系列的に測定されてきており、NOAA/AVHRR 瞬間乱流場解析の補完データとして有効である。図-2は、気象庁より入手した1998年以降の沿岸潮位毎時データに wavelet 解析を施こしたものである。まず、図-2(a)のように串本―浦神の潮位差データから、潮岬に作用する黒潮の動圧成分を抽出した。上段の時系列は、毎時データをそのまま示している。中段のグレースケール画像は、毎時データに連続 wavelet 変換を施こして絶対値の相対的強さを時間領域と時間スケール領域とに分解して示している。そして下段の時系列は、まず毎時データに離散 wavelet 変換を施こした後、36時間以上の成分のみを逆変換して潮汐成分をカットしたものである。海洋学の知見によれば、この串本―浦神の潮位差はいわゆる「黒潮流路の蛇行・非蛇行」の指標となることが知られている。すなわち、黒潮が潮岬に接岸するとき潮位差は上昇し、離岸するとき下降する(川辺1980)。図-2(a)によれば、1998年5月下旬および1999年9月上旬に10日スケ

ルのイベントが生じ、それがこの時系列の上昇・下降の現象として記録されたことがわかる。また、98年のイベントに比較して99年のそれがより長い時間スケールの現象であったことが判断できる。事実、それぞれが黒潮の小規模および大規模な「蛇行」に対応することは水路部から毎月2回発行される「海洋速報」によって確認された。

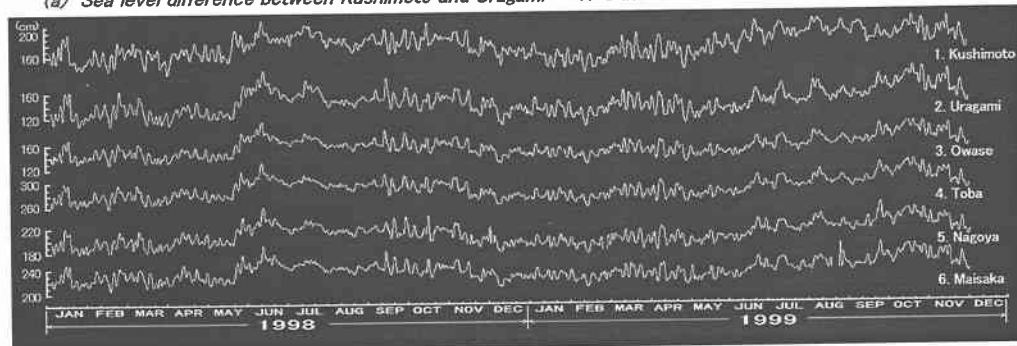
ここに、沿岸水域環境の視点に立てば、黒潮の「流路の離岸・接岸」というよりむしろ「海岸線との間に介在する乱流境界層の発達・減衰」としての取り扱いが適している。事実、次節において、これら2つのイベントは、太平洋岸乱流境界層内に進行した規模の異なる逆カスケード過程に起因したことが示される。

4. 乱流境界層の逆カスケード過程

1998年～99年において、それぞれ特徴的な2つのタイプの逆カスケード過程が進行した。図-3に1998年5月下旬の計測例を示す。まず図(a)、(b)には九州東岸から土佐湾にかけて発達した乱流境界層の19～20日の状況が記録されている。そして図(c)～(f)は21～27日にかけてこの乱流境界層が室戸岬を通過して紀伊水道に流入したプロセスを示す。それに伴って、黒潮の潮岬に対する動圧が強くなり、串本―浦神の潮位差はピークを



(a) Sea level difference between Kushimoto and Uragami ... K-U index



(b) Sea level elevation at each tide gauge station

図-2 1998～99年における熊野灘沿岸潮位の変動 (a) 串本―浦神の潮位差 (b) 各検潮所の地点データ

迎えている。さらに図 (g) には、乱流境界層内の左旋の渦度が合体して形成された直径約 150 km の中規模渦が潮岬を通過しようとする状況を捉えている。それに伴って串本—浦神の潮位差は零となっている。従来、この乱流論のプロセスは「九州東岸で発生した黒潮小蛇行の東進と潮岬沖における増幅」の現象として記述されてきたものである。

図—4 に 1999 年 9 月以降の計測例を示す。まず図 (a) をみると、9 月初旬に開始した逆カスケード過程が 10 月 30 日にはすでに終了し、潮岬沖に直径約 300 km の左旋渦が形成されている。「海洋速報」を参照すると、この逆カスケード過程は 98 年 5 月のそれより大規模であったと判断できる。すなわち、それまで潮岬によって 2 分されていた上下流の境界層が合体したために、潮岬沖の左旋渦の規模も大きくなっている。この図にはまた、土佐沖に東進中の直径 100 km ほどの右転渦が記録されている。次に、図 (b) に 11 月 20 日の状況を見ると、この右転渦が潮岬沖左旋渦とペアになって 1 個の vortex-dipole を組織している。さらに図 (c) に 12 月 16 日の状況を見ると、右転渦は西進して四国海盆中央の膠州海山 (−2,180 m) および第 2 紀南海山 (−670 m) の間を抜けている。最後に図 (d) に翌 2000 年 1 月 4 日の状況を見ると、右転渦の西進運動は四国海盆西端の九州—パララ海嶺によってブロックされたことがわかる。

5. 熊野灘沿岸潮位の上昇

1998—99 年における 2 つの逆カスケード過程は、それぞれ時間スケールの異なる熊野灘沿岸潮位の上昇をもたらした。図—2 (b) に、各検潮所における時間スケール 36 時間以上成分から構成した潮位変動を示す。98 年初夏においては、串本—浦神の潮位差変動と同期して急激な潮位上昇が生じ、6 月 13 日における低気圧 (988 hPa) の上空通過によってピークに達している。一方 99 年晩秋に

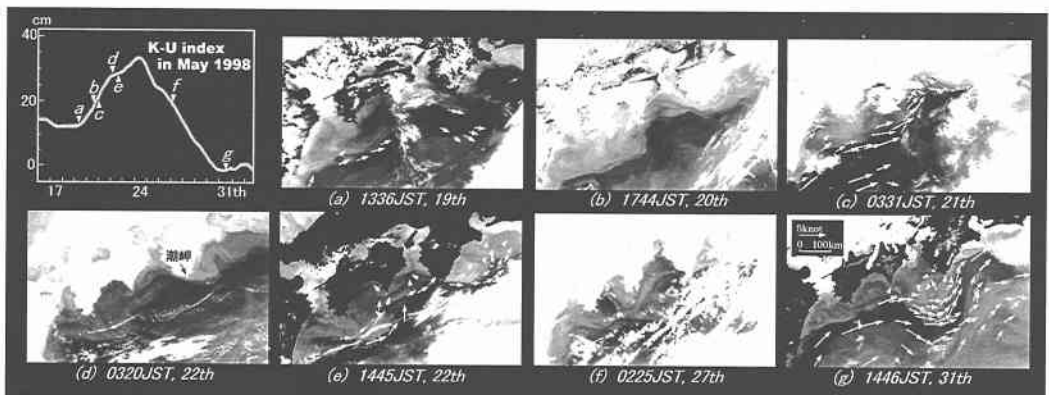
おいては、串本—浦神の潮位差変動より約十日ほど遅れて緩やかな潮位上昇が生じ、翌 10 月中旬にピークに達している。ただし、9 月 24 日の一時的な潮位上昇は台風 18 号 (950 hPa) に起因する。

吉田 (1978) は 1971 年 9 月初旬に生じた異常潮位を論じ、その成因として「沿岸に誘起された反流と黒潮との間に大きな渦度ができるから、それが反時計回りの大きな水平渦に発展する可能性がある」と述べている。これはまさに、黒潮と海岸線との間に介在する乱流境界層の逆カスケード過程を念頭に置いたに相違ない。

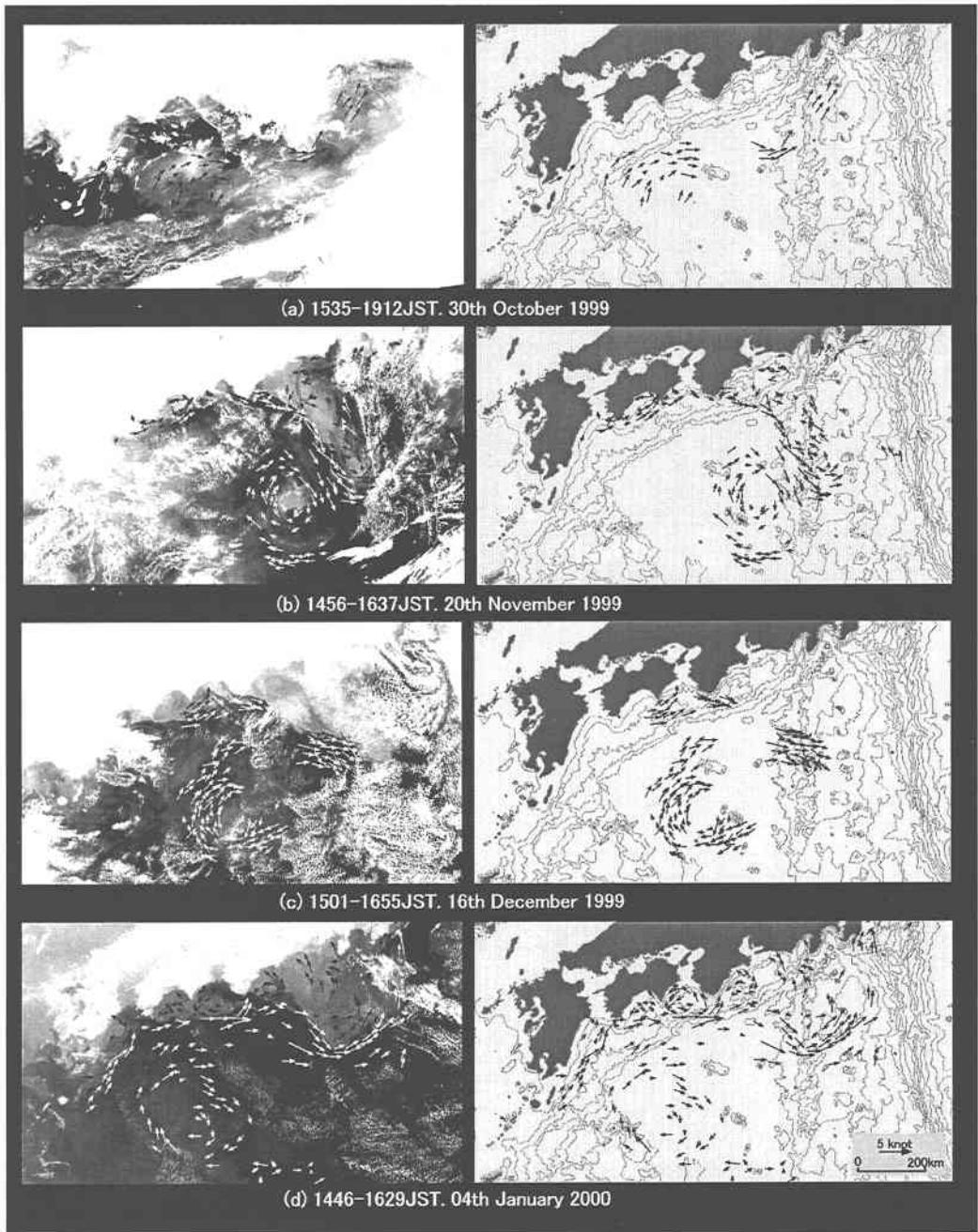
6. 湾流リングと大陸棚

湾流の乱流論的側面はいわゆる「湾流リング」として知られ、すでに多くの研究例がある (Richardson 1983)。図—5 に、NOAA/AVHRR 瞬間乱流場計測例を示す。Hatteras 岬からその約 1,000 km 下流の New-Englands 海山群までの海域に、湾流リングが卓越する。まず図 (a) に 1999 年 3 月 17 日の状況を見ると、湾流の左手に [Ring-1] および [Ring-2] の 2 個の右転の中規模渦が記録されている。次に図 (b) に同年 6 月 5 日の状況を見ると、これらの右転渦はそれぞれ大陸棚に沿って西方および西南に向かって移動している。この状況は、黒潮とはおおいに様相を異にする。たとえば 200 m 深の等深線に着目すると、黒潮の場合は潮岬に接している。これに対し、湾流域では海岸線より約 200 km 沖合いに位置しているために、沿岸水域環境がこれらの乱流成分から直接の影響を受けることは少ないものと考えられる。また、Hatteras 岬上流の北大西洋カ岸乱流境界層においては、太平洋岸のような逆カスケード過程は観察されてはいない。

ここに、米国海洋大気局 NOAA による CoastWatch および Satellite Active Archive をとおしてのデータ提供に深甚の謝意を表したい。また、本研究は文部省科学



図—3 1998 年 5 月下旬に生じた太平洋沿岸乱流境界層の逆カスケード過程



図一 1999年9月以降に生じた四国海盆内の乱流論的過程

研究費 No. 11650535 を受けて実施されている。

参考文献

中總太郎, 杉村俊郎, 西村 司, 二宮 泰, 畠山祐二 (1982): NOAA-6/AVHRR データによる黒潮流動ベクトル図の作成と海洋渦および短周期蛇行に関する考察, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 2, No. 3, pp. 11-30.

西村 司, 畠山祐二, 杉村俊郎, 田中總太郎 (1986): 黒潮研究への渦運動論的アプローチ, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 6, No. 3, pp. 57-70.

西村 司, 小林智尚, 泉 照久, 田中總太郎, 杉村俊郎, 畠山祐二 (1996): 黒潮の組織的渦構造と沿岸水域環境との間の乱流論的過程, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 411-415.

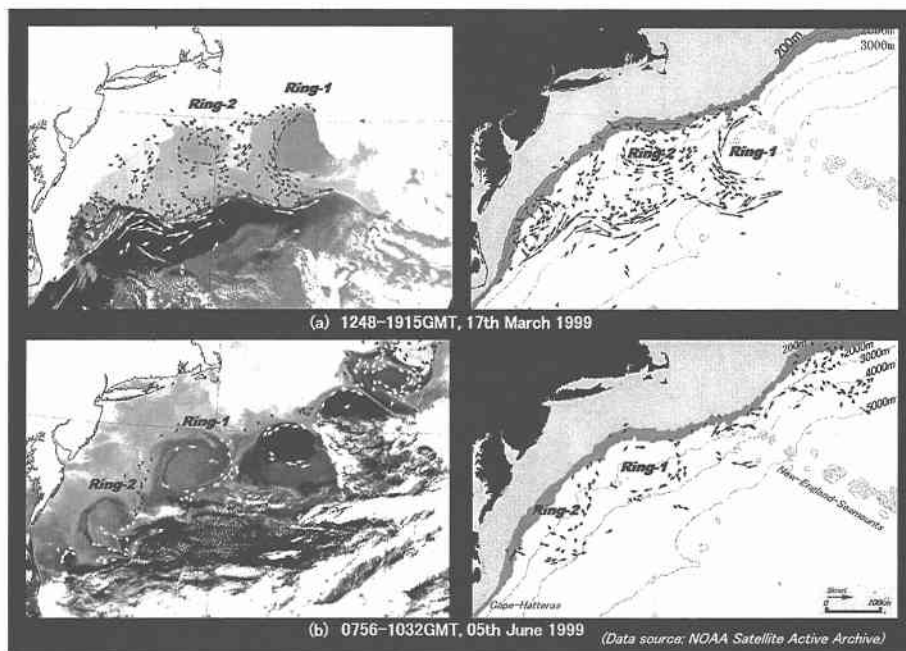


図-5 NOAA/AVHRR 瞬間乱流場計測による 1999 年 3～6 月における湾流リングの振る舞い

吉田耕造 (1978): 黒潮, 第 3・海の研究—わたくしの回想—, 海洋出版株式会社, pp. 129-186.

Kawabe, M. (1980): Sea level variations along the south coast of Japan and the large meander in the Kuroshio, J.

Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 97-104.

Richardson, P. L. (1983): Gulf Stream Rings, Eddies in Marine Science, Springer Verlag, pp. 19-43.