

西岸境界流域海洋乱流場における中規模渦の振る舞いと海底地形

西 村 司*・二 瓶 泰 雄**・佐 藤 慶 太***

四国海盆の海洋乱流場に卓越する中規模渦は、北太平洋の西岸境界流である黒潮とこの海盆特有の海底地形に支配されている。本論文では、2000 年 11 月～翌 2001 年 11 月の NOAA/AVHRR 瞬間乱流場計測によって把握された直径約 150 km の冷水右転渦の振る舞いを記述する。この渦は観測期間中に膠洲海山を時計まわりに計 4 回周回した後、九州パラオ海嶺を越えて四国海盆より脱出した。その結果、四国海盆の時計回りの循環はコアを消失して減衰し、黒潮の流路は蛇行から非蛇行へと形態を変えた。この一連の現象は、1999 年秋に生じた冷水右転渦による四国海盆の循環強化と黒潮の非蛇行から蛇行への変化と比較される。

1. 背景と目的

黒潮や湾流などの西岸境界流は、直面した大陸東岸沖合にエネルギーレベルの高い海洋乱流場を形成する。従って、日本列島周辺や北米大陸東岸の沿岸海域環境評価の際には、少なくとも数百 km 沖の外洋を含めた海洋乱流場の実態、特にエネルギー保有成分である空間スケール百 km の中規模渦の振る舞いを把握する必要がある。

著者らは日本列島周辺海域をフィールドとし、極軌道海洋気象衛星 NOAA による瞬間乱流場計測によって、中規模渦の実態と沿岸流動環境に及ぼす影響とを調査してきている。まず、岬から発達する左旋渦が黒潮と海岸線の間の沿岸乱流境界層内に組織的渦構造を形成すること、および四国海盆乱流場の逆カスケード過程が黒潮の挙動に影響することを示した(西村ら, 1996)。次に、湾流海域と比較し、列島太平洋岸では黒潮との間に陸棚の発達を欠くために、沿岸海況が沖合の中規模渦の直接的影響下にあることを示した(西村ら, 2000)。さらに、数百 km 沖の海山群が中規模渦の運動を制御して沿岸水域環境の支配要因となる事例を報告した(西村ら, 2001)。

本論文では 2000～2001 年の海洋乱流場計測結果をもとに、四国海盆中央の冷水右転渦の運動と海底地形の効果、およびそれに伴う沿岸潮位と黒潮流路の変動とを記述する。併せて、釧路沖暖水右転渦と海山群の関係、および湾流海域暖水右転渦と陸棚斜面との関係を示す。

2. 四国海盆中央の冷水右転渦

(1) NOAA/AVHRR データによる可視化

1996 年 3 月に NOAA/AVHRR データ直接受信アンテナを設置して以降、半径約 2,500 km におよぶ海洋乱流場のモニタリングを継続しつつある。2001 年 5 月 17 日に受信されたデータから、図-1 のように、四国海盆中

央に 1 個の冷水右転渦の卓越することが、定量的に可視化された。図-1(a)のグレースケール画像は、当日 1 時 40 分に受信された熱赤外データを強調処理して四国海盆における海面水温分布を示したものである。相対温度の高い黒潮系暖水は暗く、沿岸海域と四国海盆中央の冷水域は明るく表現されている。都井岬と九州パラオ海嶺の隙間(−4,000 m)を通過して四国海盆に流入した黒潮は、足摺岬沖、室戸岬沖を経て潮岬沖に至り、遠州灘沖冷水塊を迂回した後に伊豆海嶺上八丈島の南側を通過して海盆より流出している。この画像を海洋乱流場の可視化画像とみたとき、最も顕著な成分は紀伊水道沖約 300

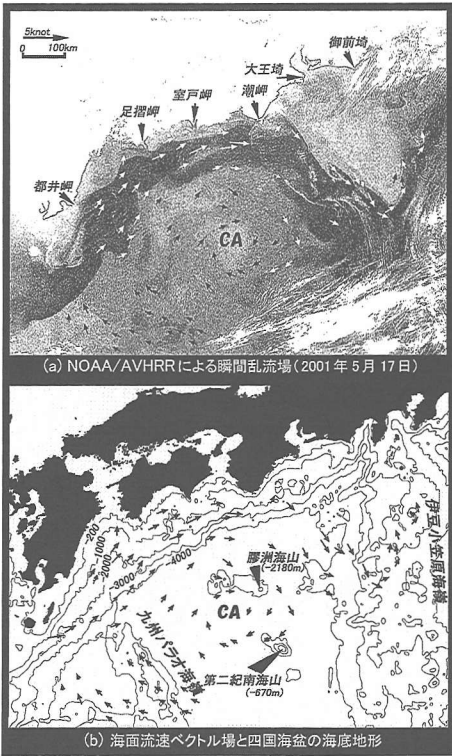


図-1 NOAA による可視化 (CA: 冷水右転渦)

* 正 会 員 工 博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科
** 正 会 員 博(工) 東京理科大学講師 理工学部土木工学科
*** 学生会員 修(工) 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻

kmの四国海盆中央に位置する直径約150 kmの冷水塊(CA)である。

海洋乱流場の定量的な記述のために、Sea Mark 追跡法による瞬間乱流場計測が行なわれた。まず、このAVHRR データと同日4時57分のデータとが同一諸元のLambert 正角投影法によって精密幾何補正される。これらの熱赤外面像を同一のPCモニター画面上に切り替え表示すると、微細な海面水温パターンが移流によって位置を変える。その移動ベクトルを計測し、データ収集時間の差で割ることによって海面流速ベクトル場が定量化される。

図-1(a)の熱赤外面像および図-1(b)の海底地形等高線図には、計測された海面流速ベクトル分布が可視化されている。これらから、四国海盆中央の冷水塊の実体が膠州海山(-2,180 m)の西側斜面に接した右転の中規模渦(CA)であり、渦の内部の海面水温は周囲より約2°C低く、渦の直径は約150 km、相対渦度は $1 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$ であることがわかる。また、この渦は四国海盆全域におよぶ直径約400 kmの時計回りの循環のコアをなしており、循環の外延を迂回する黒潮流路は「C型」の蛇行流路を採っている。

(2) 串本-浦神潮位差時系列の wavelet 解析

いわゆる「黒潮流路の変動」に着目したKawabe(1980)によれば、黒潮が蛇行状態のときには潮岬先端の串本湾の潮位は熊野灘に面した浦神湾の潮位に等しいが、非蛇行状態のときには約20 cm高くなる。本研究では、この「串本-浦神潮位差」を潮岬における黒潮動圧の時系列信号とみなし、wavelet 解析によって四国海盆海洋乱流場

の時間・周波数情報を抽出している。図-2に、四国海盆内の冷水右転渦に関連した串本-浦神潮位差時系列の解析結果を示す。図-2(a)は、1999年~2001年の潮位差の毎時データをそのままプロットしたものである。図-2(b)の画像は、原データに連続 wavelet 変換を施し、絶対値の相対的強さを可視化している。暗い部分は、その時刻にその時間スケールの変動成分が卓越することを示す。図-2(c)は、離散 wavelet 変換後に32時間以下の成分をカットし、逆変換によって再構成した潮位差時系列である。

まず、図-2(c)の時系列に、「黒潮流路の変動」の指標となる年スケールの変動に着目する。1999年9月上旬に、それまで約20 cmあった潮位差が潮位差零の状況に変化し、そのままの状況が2001年8月まで推移した。これは、それまで非蛇行状態にあった黒潮流路が蛇行流路に転じ、その2年後に再び非蛇行状態に戻ったことを示す。一方、図-2(b)の串本-浦神潮位差 wavelet 成分強度分布図をみると、これら2回の黒潮流路の変動時に十数日の時間スケール成分がいずれも高いエネルギーを保有している。ここでは、2001年5月17日にNOAAによって検出された四国海盆中央の冷水右転渦(CA)の振る舞いと、串本-浦神潮位差との関係を検討する。

3. 冷水右転渦の運動と四国海盆の海洋乱流場

(1) 冷水右転渦の時計まわりの周回運動

2001年5月17日に計測された四国海盆中央の冷水右転渦(CA)は、それ自身活発に動く。その振る舞いを調べるために、まず渦の中心の軌跡を追跡する。この作業

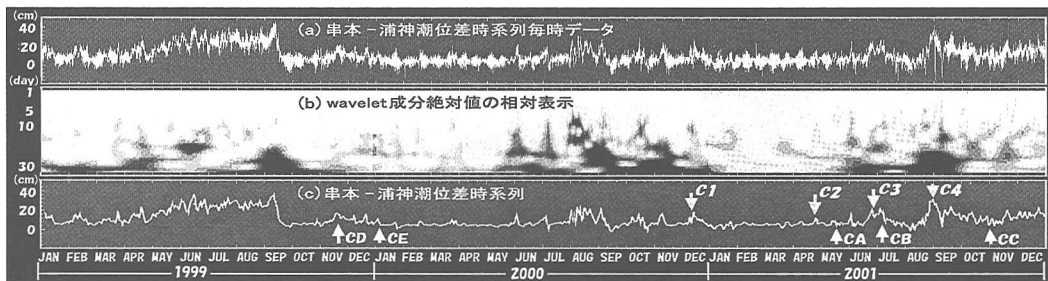


図-2 串本-浦神潮位差時系列の wavelet 解析 (1999年1月~2001年12月)

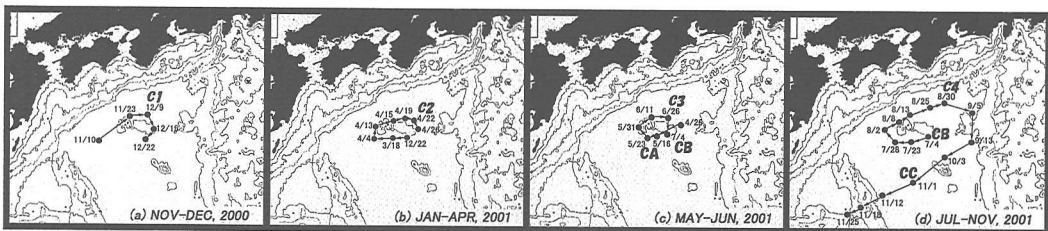


図-3 冷水右転渦の膠州海山まわりの周回と四国海盆からの脱出 (2000年11月~2001年11月)

には、直接受信データによる可視化画像に加えて三重県科学技術振興センター水産研究部の www サイトよりダウンロードした SST 画像を使用する。図-3 は、観測日を挟んで約 1 年間、すなわち 2000 年 11 月～翌 2001 年 11 月にわたって、NOAA 画像上に読み取った冷水右転渦 (CA) の中心の軌跡を海底地形図上にプロットしたものである。図中の符号 (CA)～(CB) および (C1)～(C4) は、同一の右転冷水渦 (CA) のその時点における位置を示す。この符号は、図-2(c) の串本-浦神潮位差時系列にも付されている。

これらの軌跡図をみると、この 1 年間に冷水右転渦 (CA) は膠洲海山を中心に直径約 150 km の時計回りの周回運動を計 4 回繰り返したことがわかる。図-3(a), (b), (c) は、それぞれ 2000 年 11 月～12 月、翌 2001 年 1 月～4 月および 4 月～7 月の周回運動である。そして図-3(d) は、2001 年 7 月に始まった冷水右転渦 (CA) 最後の周回運動と、それに続く四国海盆からの脱出の軌跡を示している。

(2) 冷水右転渦の四国海盆からの脱出

2001 年 7 月初頭、それまで四国海盆中央の膠洲海山周辺に停滞していた冷水右転渦 (CA) が、最後の周回運動を開始した。図-4 に代表的な 3 つの時期の瞬間乱流場計測結果を示す。まず、図-4(a) は運動を開始した 7 月 4 日の状況を示している。図-1(a) の 5 月 17 日の状況と比較すると、いずれにおいても四国海盆中央の冷水右転渦が四国海盆全体におよぶ時計回りの循環のコアとなっている。しかし、5 月 17 日には真円状であった循環

は、この 7 月 4 日にはすでに東西に扁平な形状に変形している。それに対応して、黒潮が潮岬に接岸しており、図-2(c) にみる串本-浦神潮位差の一時的な上昇 (CB) をもたらしている。

最後の周回運動を開始した冷水右転渦は、図-3(c) の軌跡図にみるように、まず西進して 7 月 28 日には室戸岬南方約 250 km に達した。その後北上して 8 月 2 日には、黒潮の沖合側に接触して東進運動を開始した。同 8 月 25 日には潮岬南方約 200 km 沖に達して東南東に向きを変え、9 月 5 日には伊豆海嶺にブロックされて西側斜面に沿って南下、9 月 13 日には四国海盆を西南西に横断する西進運動を開始し、第二紀南海山 (-670 m) の北側を通過して 11 月 1 日には四国海盆西側海域に達した。図-4(b) に当日に計測された瞬間乱流場をみると、冷水右転渦 (CC) が室戸岬南方 400 km の九州パラオ海嶺の東側斜面に接している。

この最後の周回運動の特徴は、冷水右転渦が四国海盆内にとどまることなく、九州パラオ海嶺を越えて脱出したことである。図-3(d) にみるように、この渦は 11 月 18 日には、すでに駒橋第 2 海山と駒橋海山の間の稜線の谷間 (-4,000 m) を通過している。図-4(c) に、12 月 2 日の瞬間乱流場を示す。冷水右転渦の四国海盆からの脱出によって、海盆全体におよぶ時計回りの循環のコアは消失した。それに伴ない、遠州灘冷水左旋渦の一部が伊豆小笠原海嶺を越えて四国海盆から流出し、黒潮流路は「蛇行」から「非蛇行」へとその形態を変えている。



図-4 冷水右転渦の四国海盆からの脱出と黒潮変動 (2001 年 7 月 12 月)

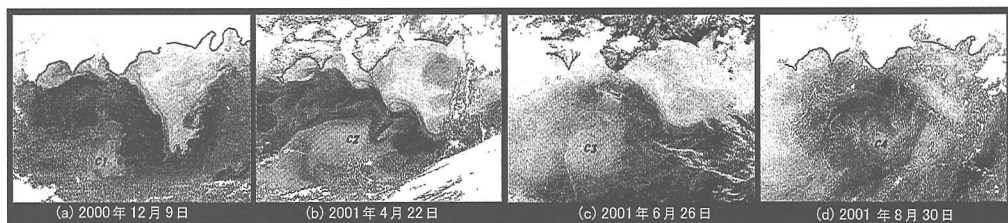


図-5 冷水右転渦の潮岬への接近と vortex-dipole の形成

(3) 冷水右転渦の潮岬への接近

膠洲海山を中心とする冷水右転渦の時計回りの周回運動は、その周回ごとに計4回の潮岬への接近と、沿岸乱流境界層との相互作用とをもたらした。図-5のNOAA画像は、それぞれの状況(C1~C4)を可視化したものである。いずれも図-1に可視化された渦(CA)自身のそれぞれ異なった時点における潮岬への接近を可視化している。図-2(c)に串本-浦神潮位差時系列をみると、いずれの接近時(C1~C4)においても潮位差のピークがみられ、潮岬沖合200 kmにまで接近したこの冷水右転渦が沿岸海象に及ぼす効果を示している。

まず、図-5(a)のNOAA画像に2000年12月9日の状況(C1)をみると、図-1に示した翌2001年5月17日の状況(CA)にきわめて類似した状況がみられる。すなわち、四国海盆中央の冷水右転渦(C1)が海盆全体におよぶ時計まわりの循環のコアをなす状況がすでに半年前に出現し、このとき遠州灘冷水左旋渦もまた十分に発達し、その周囲を「C型の蛇行流路」が迂回している。

しかし、この状況が半年間にわたって定常的に推移したわけではない。従来、たとえ蛇行から非蛇行への年スケールの黒潮変動には至らなくとも、この遠州灘冷水塊は数十日スケールの消長を繰り返し、それを迂回する黒潮蛇行の振幅の増減をもたらすことが知られている。水路部発行の「海洋速報」によれば、この遠州灘冷水左旋渦はその後4月下旬にかけていったん規模を縮小したが、その後成長に転じて5月下旬にはふたたび十分に発達したと記録されている。図-5(b)のNOAA画像は、この遠州灘冷水左旋渦の減衰期から成長期への転換点にあたる2000年4月22日に受信されたものである。黒潮は潮岬から離岸し、冷水右転渦の潮岬への第2の接近(C2)に伴う串本-浦神潮位差の上昇は軽微である。注目すべきは、上流側の足摺岬あるいは室戸岬から発達した直径数十 km の左旋渦の列が沿岸境界層の外縁を流下し、潮岬との間の隙間を通り抜けて遠州灘冷水塊に合併していることである。すなわち、この時期、沿岸乱流境界層内の「逆カスケード過程」によって、遠州灘冷水左旋渦が成長し、結果として黒潮蛇行の振幅が増大したこ

とがわかる。

一方、これとは対照的に、図-5(c)および(d)は、四国海盆の冷水右転渦と遠州灘冷水左旋渦との双方の消滅の過程において得られたものである。まず、潮岬への冷水右転渦の第3回目の接近(C3)をみると、前2回の接近(C1, C2)と同様に黒潮が潮岬に接岸したことがわかる。しかし、図-2(c)上に串本-浦神潮位差時系列をみると、今回(C3)における潮位差時系列のピークは前回(C1, C2)より高く時間幅もより広がっている。しかも、この冷水右転渦が潮岬より離れて膠洲海山沖に出た状況(CB)に至っても、もとの潮位差零の状況には復帰していない。すなわち、黒潮は潮岬に接岸したままであり、沿岸乱流境界層内の逆カスケード過程も、それによる遠州灘冷水左旋渦の成長もみられない。

最後の第4回目の接近(C4)の様相は、図-5(d)に記録されている。図-3(d)の軌跡図に計4回の接近(C1~C4)を比較すると、このときの冷水右転渦(C4)が潮岬に最も接近している。その後、この冷水右転渦は遠州灘冷水左旋渦との相互作用によって1個のvortex-dipoleを組織し、東進運動を加速して9月5日には伊豆小笠原海嶺西側斜面に達し、そこで西進運動に転じて四国海盆からの脱出のコースをとるに至っている。それに伴って、串本-浦神潮位差は上昇したままの状況となり、図-4(c)に示した状況が継続することになる。すなわち、四国海盆中央の冷水右転渦(CA)の消滅に伴って、遠州灘冷水左旋渦が減衰し、結果として黒潮流路は「N型の非蛇行流路」を採るに至ったことになる。

(4) 冷水右転冷水渦の発生

以上によって、図-1に可視化された四国海盆中央の冷水右転渦(CA)の消失の過程と黒潮流路の蛇行から非蛇行への一連の変化との関係が記述された。ここに、この冷水右転渦の発生の過程を概観しておく必要がある。NOAA/AVHRRによるモニタリングの結果を過去に遡ってみてゆくと、この冷水右転渦(CA)の起源は、1999年秋季に生じた黒潮変動にあることがわかる。すなわち、このとき四国海盆の海洋乱流場に「逆カスケード過程」が生じ、その結果として、黒潮流路が非蛇行から蛇行に

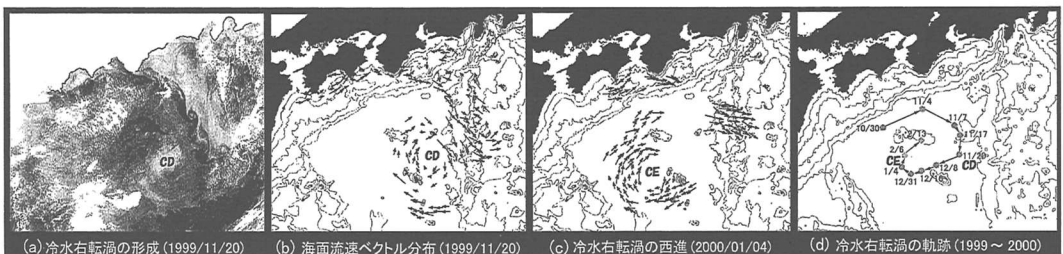


図-6 1999 年秋における vortex-dipole の形成と冷水右転渦の挙動

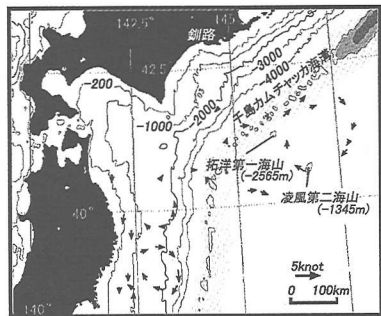


図-7 釧路沖の暖水右転渦

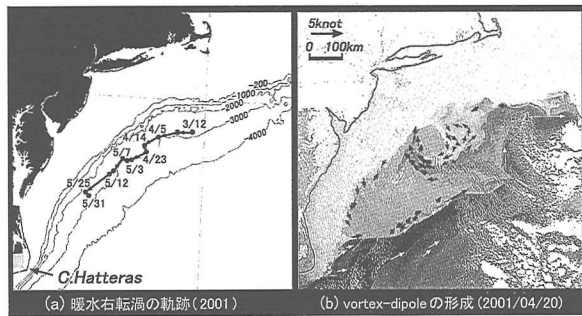


図-8 湾流海域 Hatteras 岬沖の暖水右転渦

転じた(西村ら, 2000). 図-2(c)にみるように, まず 1999 年 9 月上旬にそれまで約 20 cm あった串本-浦神潮位差が突然零の状況に転じた. このとき, 潮岬によって上下流に 2 分されていた沿岸乱流境界層が合併を開始して直径 300 km の左旋の渦を形成した. 次に, 10 月末に, 四国海盆内の土佐沖約 200 km に出現した 1 個の冷水右転渦がこの逆カスケード過程によって形成された沿岸の冷水左旋渦に接近し, 逆回転の渦同士の相互作用によって潮岬沖に 1 つの vortex-dipole を組織するに至った. 図-6(a)は, この第 2 の逆カスケード過程の終了した 1999 年 11 月 20 日の NOAA 画像を示す. このとき, 図-6(b)によれば, 冷水右転渦(CD)は膠洲海山と第 2 紀南海山の東側に位置したことがわかる. 成長した冷水右転渦は, その後 vortex-dipole の組織を解消して西進し, 膠洲海山と第 2 紀南海山の間の隙間を抜けて四国海盆西側水域に出た. 図-6(c)に 2001 年 1 月 4 日の状況を示す. 図-6(d)に, この冷水右転渦(CD)の軌跡をみると, 九州パラオ海嶺を越えることなく, 2000 年 2 月 13 日には四国海盆中央の膠洲海山に達したことがわかる.

4. 釧路沖と湾流域における暖水右転渦

(1) 釧路沖の暖水右転渦

四国海盆の膠洲海山や第二紀南海山のように, 外洋の平坦な海底から離散的に屹立する海山は, 中規模渦の運動を制御することによって海洋乱流場の渦構造の組織性を高めている. たとえば, 銚子沖の黒潮主流域においては, 海岸線から約 300 km 離れた数個の海山群がこの海域の乱流構造と, それによる黒潮・親潮の乱流混合を支配している(西村ら, 2001).

ここでは, 釧路沖海山群による暖水右転渦のブロッキング現象について述べる. 図-7 に 2001 年 4 月 14 日の瞬間乱流場計測例を示す. 釧路沖の拓洋第一海山(-2,565 m)と凌風第二海山(-1,345 m)の東側に, 直径約 200 km の暖水右転渦がみられる. この渦は, 少なく

とも同年 8 月 20 日までの約 4 ケ月間, この位置に静止し続けたことがモニターされている. この暖水右転渦の運動には, 隣接する最深部-7000 m に及ぶ千島カムチャッカ海溝が北側からの制約を及ぼしている. 海溝と中規模渦との関係については, 未だ測定例が少ない.

(2) Hatteras 岬沖の暖水右転渦

中規模渦の運動に及ぼす陸棚斜面の効果は, 湾流海域の Hatteras 岬沖において顕著に現われる(Robinson, 1983). 図-8(a)は, 2001 年 3 月 12 日~5 月 31 日に記録した Hatteras 岬沖の暖水右転渦の西進運動である. 途中, 渦の運動をブロックする海山がないために, 渦は陸棚斜面に沿って西進運動を続けて岬の北東 200 km 地点に到達し, そこで減衰した. この西進運動も単調ではなく, 途中 4 月 14 日から 1 週間ほど停止し, むしろ南進運動がみられた. 図-8(b)に 4 月 20 日の瞬間乱流場をみると, このとき暖水右転渦が 1 個の冷水左旋渦と vortex-dipole を組織したことがわかる.

謝辞: 三重県科学技術振興センター水産研究部および NOAA/SAA よりデータと情報を受けている. 深甚の謝意を表したい. なお本研究は科学研究費補助金基盤研究(c)(2), No. 13650573 を受けて実施されている.

参考文献

- 西村 司・小林友尚・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プロセス, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 411-415.
- 西村 司・杉本 彰・福永健一・田中總太郎・杉村俊郎・畠山祐二 (2000): 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, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1376-1380.
- 西村 司・猪爪高見・福永健一 (2001): 日本列島周辺海洋乱流場における海山群の中規模渦構造制御メカニズム, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1461-1465.
- 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.
- Robinson, A. R. (1983): Eddies in Marine Science, Springer-Verlag, 609 p.