

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

西村 司* ・小林智尚** ・泉 照久***
田中總太郎****・杉村俊郎*****・畠山祐二*****

1. NOAA による黒潮の瞬間乱流場計測

1.1 流路のパターンから海洋乱流のプロセスへ

本論文は、四国海盆海洋乱流場に卓越する中規模渦の組織的渦構造の運動学的実体を記述し、太平洋沿岸水域環境との間の乱流論的プロセスを議論するものである。

黒潮の乱流エネルギー強度は、北大西洋の湾流に匹敵する。海洋物理学においては、すでに 1970 年代半ば、吉田 (1976) が先行する湾流研究を概説し、黒潮変動の乱流論的研究開始の緊急性を説いた。だが、以降の黒潮研究の多くは、流路の実在を暗黙の前提としたまま、その蛇行非蛇行パターンの選択性を主要命題としてきた (関根 1993)。同様に、沿岸海洋研究の殆んども又、沖合いの黒潮流路の蛇行非蛇行を前提とするにとどまった (杉本ら 1992)。吉田 (1976) の問題提起以降すでに 20 年あまり、黒潮の海洋乱流研究は未だ本格化していない。

1980 年代初頭著者らは、海洋気象衛星 NOAA 搭載可視赤外映像センサー AVHRR を導入して黒潮の乱流論的研究を開始した (西村ら 1986, Nishimura et al. 1995)。本論文では、NOAA/AVHRR 瞬間海洋乱流場計測結果を材料に、黒潮と沿岸水域環境との間に進行する組織的渦構造の非線型プロセスの議論への道筋を示す。

1.2 可視化と瞬間乱流場計測

室内の乱流研究の例にならい、まず流れの可視化によって代表スケールを同定した後、エネルギー保有領域の乱流成分の運動学を把握する。図-1 (a) に、流れの可視化の例を示す。日本列島周辺約 3,000 km 四方の海洋乱流場が日に 4 回、NOAA/AVHRR データ直接受信によってモニターされている。海洋乱流の情報を多く含むデータに対して、国土地理院 300 万分の 1 地形図を基本図として斜軸正角割円錐投影法による精密幾何補正が施こされる (田中ら 1982)。解析には海面水温の指標である熱赤外バンドのデータが使われる。1 つのシーンの南

北の平均海面水温には、20°C に及ぶ輝度値の差が生じる。可視化の際には、空間的ハイパスフィルタによってこの千 km スケールの輝度値のバイアス成分がカットされる (大津ら 1994)。図-1 (a) のグレースケール強調画像では、1990 年 3 月 10 日 18 時 18 分における四国海盆内の海洋乱流場全体の組織的渦構造が、百 km スケールの中規模渦の内部構造に焦点を絞って可視化されている。

図-1 (b) は、シーマーク追跡法によって計測された海面流速ベクトル分布を海底地形図上にオーバーレイしたものである。この NOAA データと翌日 2 時 40 分に得られたそれとが、ともに同一の基本図の上に精密幾何補正される。双方を重ね合わせると陸地部分は一致するが、海面水面の微小パターンは約 6 時間の移流のために位置がずれる。このずれの量から海面流速ベクトル分布を計測することができる。すなわちこの方法は、空間スケール千 km、サンプリング時間約 6 時間の瞬間乱流場計測手法と位置づけることができる (田中ら 1982)。

1.3 串本一浦神潮位差データの wavelet 解析

海洋乱流場計測手法としての NOAA/AVHRR の弱点は、雲の妨害によって時系列データ収集の困難なことである。そこで、潮岬先端の串本および浦神の両検潮所間の潮位差毎時データが、潮岬先端に及ぼす黒潮の動圧時系列データとして導入された (西村ら 1986)。

従来の黒潮研究では、この時系列の数日～数年成分が流路の蛇行非蛇行の現象論的指標として使われてきた (Kawabe 1980)。ここでは、数時間～数日スケールの短周期成分を潮岬からの中規模渦の生成と剝離、および太平洋岸乱流境界層の発達と縮小に関する時間および周波数領域のデータと位置づけ、wavelet 解析手法を導入してこれらのイベントの時間領域分解能を向上させている (洵上ら 1992)。図-2 に、1991～93 年の解析例を示す。

1.4 乱流論的にみた黒潮と湾流の沿岸水域環境

黒潮の乱流論的議論においては、湾流との比較が有効である。Taft (1972) は湾流の流路論を黒潮に直接応用し、船上観測の統計によって、典型的な蛇行流路が潮岬沖の膠洲海山および第二紀南海山上を通るとし、海山群による流れ学的地形効果を指摘した。たしかに、彼に始まる黒潮流路論を前提に図-1 (b) の NOAA/AVHRR

* 正会員 工博 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科
** 正会員 工博 東京理科大学助手 理工学部土木工学科
*** 工修 東京理科大学理工学研究科 (現: 東洋建設)
**** 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

瞬間乱流場計測結果をみると、彼の言う安定な大蛇行流路が判読できる。

一方、乱流論的観点からこれをみると、卓越するのはむしろ四国海盆内に拘束された径 300 km ほどの右転左旋の渦対である。ここに、海面下 2,180 m に頂上をもつ膠洲海山は表層の黒潮流路というよりむしろ深層に及ぶ中規模渦を空間的に拘束しているものと解釈できる。

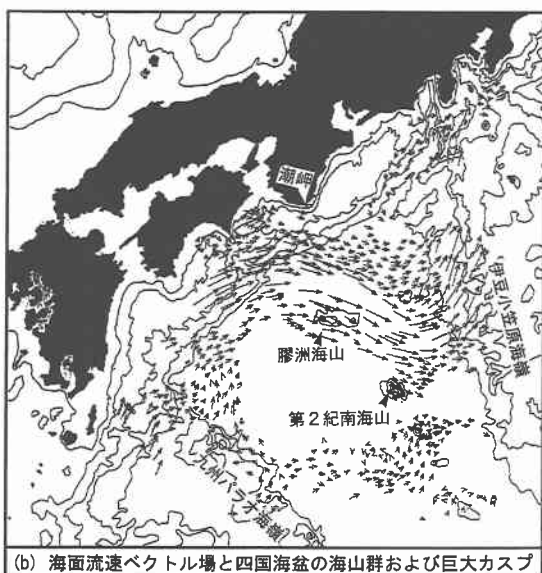
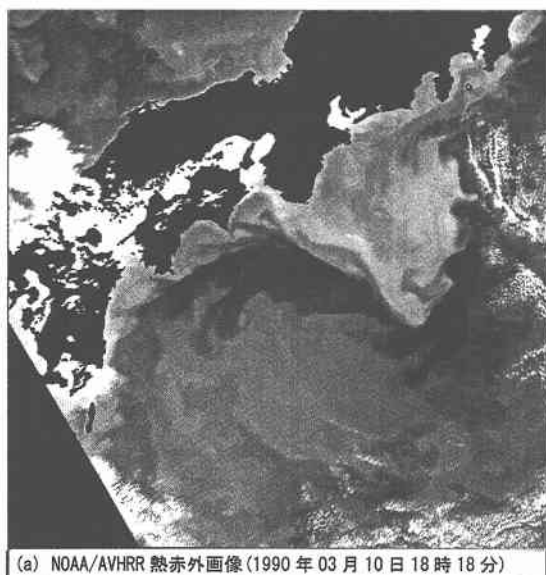
そもそも「蛇行」の用語は、1940 年代 Iselin らによって湾流流軸変動の記述に使い始められた(寺本 1976)。彼らは海上観測をもとに、Hatteras 岬沖合いの湾流が蛇行して約千 km 下流の New-England 海山群に至るとした。一方 70 年代、乱流論に立脚した湾流変動観測によって、この海域には New-England 海山群直上に発生して海岸線に向けて西進する湾流リングの卓越することが示された(Richardson 1983)。ここに、湾流においては流路の「蛇行のパターン」は中規模渦の「乱流論のプロセス」に帰着したことになる。ただしこの場合、四国海盆のような空間的制約要因を欠くために、中規模渦の自由

度は高い。すなわち、空間スケールは同等であっても、湾流蛇行の時間スケールは黒潮蛇行よりも小さい。

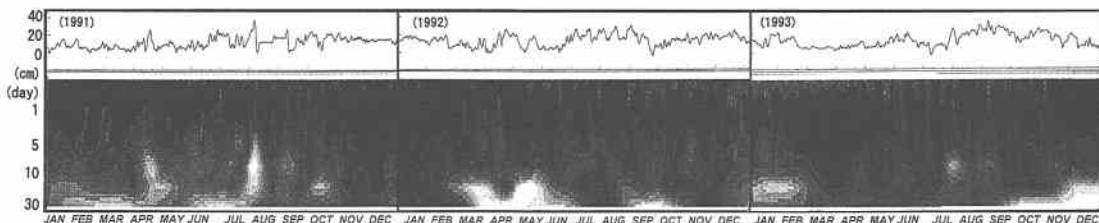
一方、Hatteras 岬上流の沿岸水域には、約 150 km 間隔のカスプ状の岬(巨大カスプ)に同期して、径百 km の中規模渦が生成する(Lugt 1983)。だが、下流沖合いの New-Englands 海山群とは約千 km 離れるために、双方の乱流論のプロセスは近似的に線形独立に進行する。

黒潮と湾流との違いは、双方の置かれた固体地球的条件にある。湾流域は、1 枚の地殻プレートに乗っている。緩勾配の陸棚が展開し、巨大カスプも未発達である。一方、黒潮域には計 4 枚のプレートが衝突し、秩序構造をもつ急峻な海底地形を現出する。太平洋岸の巨大カスプと九州パラオ海嶺および伊豆小笠原海嶺は、二等辺三角形形状の四国海盆を形成する。中央には、膠洲海山や第二紀南海山などの海山群が一直線状に並ぶ。そして太平洋岸には、流れ学的により有効な巨大カスプが形成される。

図一にみるように、四国海盆における黒潮の蛇行現象は中央や周囲の海山群だけでなく海岸線の巨大カスプ



図一 四国海盆における黒潮の海洋乱流場の可視化と海面流速ベクトル分布および海底地形



図二 串本-浦神潮位差の 36 時間以上成分時系列および wavelet 絶対値の時間周波数分布

からの渦の発進のプロセスと直接に関連する。太平洋岸の岬の先端から剝離した渦は、遠州灘の冷水左旋渦に合併し、この中規模渦に運動エネルギーを補給している。また、土佐沖の右転暖水渦は、遠州灘左旋渦と渦対を組織することによって黒潮系暖水の補給を受ける。さらに、その西進運動は上流側の九州パラオ海嶺にブロックされ、Hatteras 岬沖の中規模渦ほどの自由度には恵まれない。すなわち黒潮蛇行の物理には、巨大カスプと海山群とに起因する空間時間スケールの異なる離散的な複数乱流成分間の非線形相互作用を考慮しなければならない。

2. 巨大カスプからの渦の発進

2.1 発進渦の瞬間乱流場計測

日本列島太平洋岸に特有の巨大カスプは、沿岸の壁面乱流境界層内の vortex-generator の機能を備えている。図-1 にみるように、最も有効なそれは、潮岬である。1991 年の 5 月 17 日 3 時 34 分から 19 日 3 時 12 分にかけて、約 48 時間におよぶ時系列的な NOAA/AVHRR 計測が実現し、潮岬からの発進渦のプロセスが計測された(久野 1991)。

図-3 に、計測結果の一部を 12 時間ごとに抜粋して示す。流れの可視化によれば、17 日夕に潮岬から舌状に延びた冷水の帯が、翌 18 日朝から夕にかけて左旋の渦を巻いている。この非定常現象の代表スケールは 1 日と判断できる。一方、海面流速ベクトル分布図をみると、慣性振動や潮汐によると思われる変動成分を除けば、この 24 時間ほぼ定常な流速場が実現したとみてよい。着目する対象のこの時間スケールの違いは、同一の NOAA/AVHRR データから加工されたこの 2 種のデータが、対

象とする同一の乱流現象のそれぞれ Lagrange 的、および Euler 的な情報を与えることに起因する。すなわち、本質的に非定常な乱流のプロセス研究においては、流れの可視化だけでなく、空間および時間的な流速分布の計測が不可欠である。現在のところ、日本列島周辺海洋乱流場において日・百 km スケール成分を対象に双方を一挙に実現し得るのは、この NOAA/AVHRR 瞬間乱流場計測のみである。

2.2 組織的渦構造と沿岸急潮のプロセス

図-3 によれば、熊野灘と遠州灘における壁面乱流境界層には、潮岬から発進した左旋渦、その下流約 200 km の左旋渦、および沿岸水域の右転暖水渦が卓越する。しかも、これらの径百 km スケールの渦は、あたかも 1 つの歯車群のように噛み合った秩序構造を組織している。図 2 の串本-浦神潮位差時系列解析、沿岸定置水温データおよび海洋速報や天気図などからの情報を総合することによって、この組織的渦構造は、1991 年 5 月 8 日~14 日の約 1 週間で形成されたこと、さらにそれが大気中の低気圧による擾乱に応答したことが示されている。

数日・百 km の代表スケールを備えたこの乱流現象は、熊野灘や遠州灘の沿岸水域環境の支配要因となる。その典型例は沿岸急潮である。いま、図-3 のように潮岬から径 100 km ほどの左旋渦が発進したとしよう。熊野灘の海岸線には、潮岬に向かう「上り潮」、岬の先端からは沖合いに向かう「下り潮」が出現する。漁師によって伝承されてきた「低気圧の来襲に伴うシケ潮あるいは沿岸急潮」である。一方、この左旋渦の周縁に巻き込まれた黒潮は、途中沿岸水と混合することなく、ほぼ 1 日の行程で岬の背部の海岸線を直撃する。

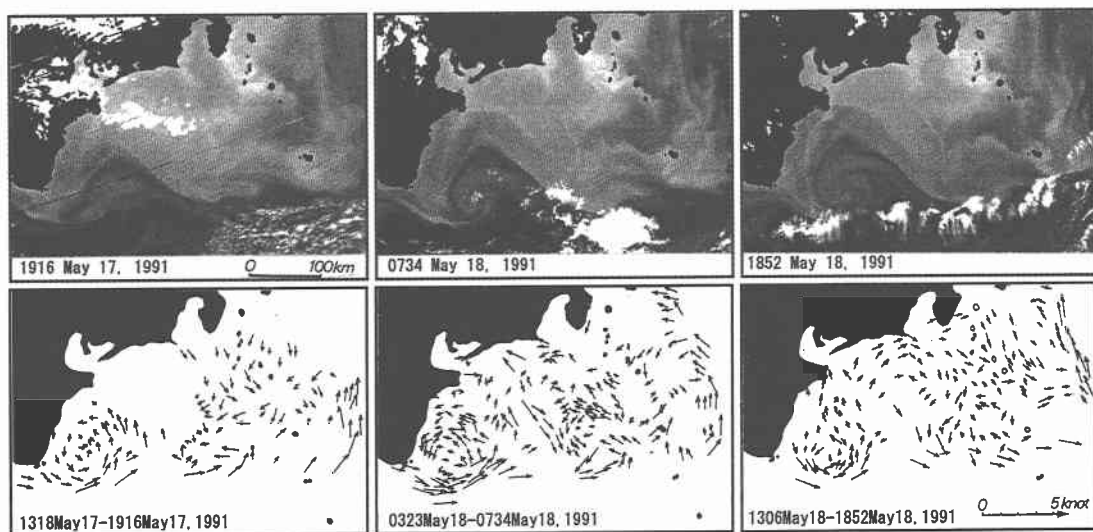


図-3 潮岬からの渦の発進プロセスの NOAA/AVHRR 瞬間乱流場計測例

宇田 (1984) による「海と漁の伝承」を参考にすると、この沿岸急潮イベントによって、岬の背部の沿岸水域環境が短期間に急変すること、それに伴ないブリ定置網が大漁あるいは流失すること、それらの現象が太平洋岸巨大カスプの背後に共通することが判断できる。

2.3 黒潮流路パターンへの影響

従来より、黒潮流路の蛇行と非蛇行パターンは、遠州灘冷水塊の、それぞれ成長と縮小に対応すると言われている (吉田 1976)。いま遠州灘を壁面乱流境界層とみなすならば、内部における組織的渦構造のプロセスは、境界層外縁の間欠的な変動、すなわち突発的な黒潮変動をもたらすはずである。事実、海上保安庁水路部によれば、1989年12月に遠州灘に発生した黒潮大蛇行がこの91年5月末に消滅した。これは、潮岬から発達した左旋渦が黒潮系暖水を遠州灘冷水左旋渦のなかに連行し、内部に右転暖水渦を形成した時期に対応する。この場合は、乱流境界層内の vortex-generator は、主流の質量、運動量および熱量を境界層内に持ち込むことによって、境界層を減衰させる機能を果たしたことになる。

3. 四国海盆による組織的渦構造の空間的固定

3.1 逆カスケード過程の瞬間乱流場計測

図-2の串本-浦神潮位差時系列をみると、ここに生じた非蛇行状態は1993年3月まで持続したことが記録されている。図4に示す3枚のNOAA画像は、1993年春季の計測例である。流れの可視化画像に、海面流速ベクトル計測結果がオーバーレイされている。以下の判読によって、この非蛇行から蛇行への変化は四国海盆内の離散的な逆カスケード過程に帰着することが示される。

(a) 1993年2月4日 従来の流路論に従えば、黒潮の流路は太平洋岸に沿って直進している。一方、乱流論的観点から興味深いのは、沖合いの黒潮と海岸線との間に挟まれた乱流境界層内の組織的渦構造である。潮岬およびその上流側の巨大カスプの先端から左旋渦が発進し、乱流境界層のエネルギー保有成分となっている。潮岬背部の熊野灘と遠州灘には、図-3に示した1991年5月の状況と同様の組織的渦構造が再現され、この乱流論的プロセスの決定論的性質を裏付けている。

(b) 1993年4月2日 岬の先端から次々と左旋渦の供給を受けて乱流境界層は発達する。発達した境界層は2月21日の低気圧通過を引き金に合体を開始し、潮岬の背部に径200kmほどの真円状の左旋渦を形成する。この逆カスケード過程の時間スケールは1月である。

(c) 1993年4月19日 遠州灘の左旋渦は、上流からの渦の補給を受けてさらに成長するが、変形して細長くなる。それに替わって、黒潮系暖水の補給を受けた土佐沖右転渦が真円状に成長し、この左旋渦とともに四国海

盆に固定された1つの渦対を組織するに至る。この逆カスケード過程の時間スケールは20日である。

3.2 組織的渦構造の離散モードと黒潮流路

巨大カスプの先端から発達する左旋渦、太平洋沿岸乱流境界層が合体した潮岬背部の左旋渦、それに育てられた土佐沖の右転渦、そして四国海盆内に組織された左旋・右転の渦対……一連の乱流の逆カスケード過程を経て、四国海盆には離散的な複数スケールの渦成分からなる組織的渦構造が形成される。ここに、ほとんどのプロセスに潮岬が関与していることがわかる。これらの乱流の逆カスケード過程が四国海盆の海底地形によって運動学的に支配されるものとしよう。湾流とは異なり、渦の配列の自由度は制限され、この海底地形に応じていくつ

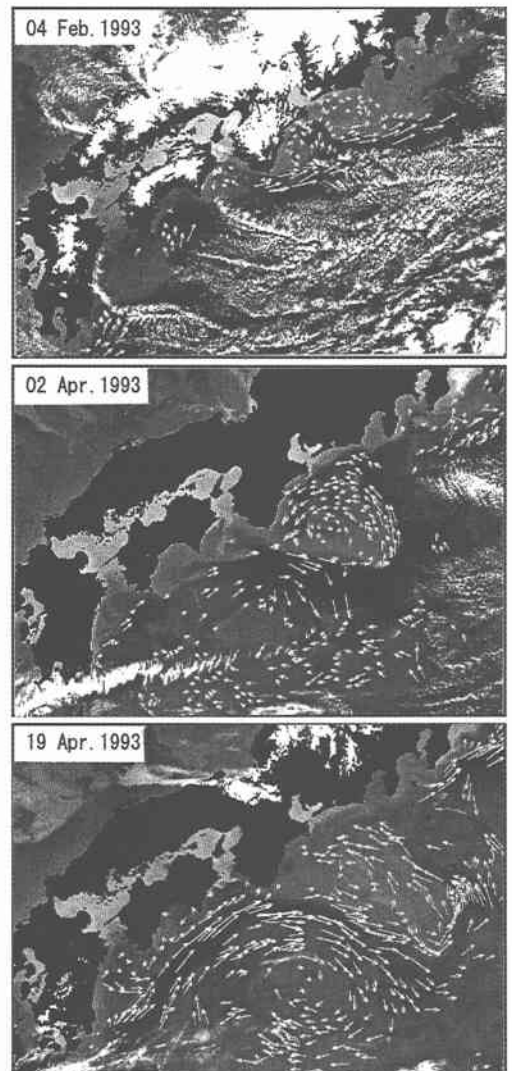


図-4 四国海盆における乱流の逆カスケード過程

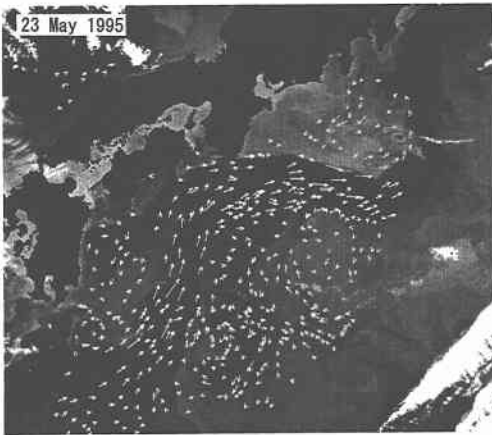


図-5 四国海盆における高次モードの組織的渦構造

かの離散的なモードが卓越するはずである。以下に、これらのモードと黒潮流路のパターンとの対応を示す。

まず、図-1のモードは Taft (1972) の典型的な大蛇行流路に対応する。四国海盆中央の海山群は、その左右に深層に達する右転左旋の渦対を固定し、結果として直上に黒潮流路を固定したように見える。一方、図-4のモードは、同じく左旋右転の渦対だが、その空間的な固定の位相が異なる。すなわち、海面流速ベクトル場を海底地形図にオーバーレイすると、土佐沖の右転渦の中心が鰐洲海山(-2,180 m)の頂上にびたりと一致することがわかる。これは、この右転渦が水面下約2 kmの深層に及ぶ鉛直構造を備え、海面表層の黒潮を支配することを意味する。これらの2つのモードは、いずれも小數大径の中規模渦によって組織され、低次モードと呼ぶ。

図-5に、高次モードの計測例を示す。図-1の低次モードと同様に、四国海盆内の中規模渦群は中央の海山群によって2分されている。だが、1つ1つの渦の径は小さくその数は多い。それに応じて蛇行の振幅は小さく波長は短くなり、結果として非蛇行流路を現出する。

さて、過去50年間の黒潮蛇行の歴史によれば、継続期間5年以上に及ぶ黒潮大蛇行が1934~44年および1975~80年の計2回記録されている。1939年6~7月の旧海軍による一斉調査をもとに小長(1981)の描いた500 m深等水温線図をみると、四国海盆に右転、左旋、右転の3個の渦が見事に固定され、その安定した渦の噛み合わせは長寿命の大蛇行流路を現出している。中央の「大冷水塊」が細長いのは、これが鰐洲海山と第二紀南海山とに固定された2つの左旋渦から構成されたためである。この第3の低次モードはさきの2つのケースよりも安定であり、1975~80年の大蛇行においても出現し、こ

の乱流のプロセスの再現性を裏付けている。

以上のように、本論文では日本列島太平洋岸水域環境が四国海盆内の黒潮の組織的渦構造の乱流論のプロセスと不可分なものであることを示した。ここに、定量的な乱流計測にあたって HRPT データを御提供願った東北大学大気海洋センターに深甚の謝意を表したい。また、本研究は文部省科学研究費 No. 04452234 および No. 07650607 を受けている。

参 考 文 献

- 宇田道隆 (1984): 海と漁の伝承, 玉川大学出版部, 392 pp.
- 大津仁史, 田中總太郎, 杉村俊郎, 畠山祐二, 小林智尚, 西村 司 (1994): 海洋の組織的渦構造強調のための NOAA/AVHRR ハイパスフィルタ処理, 日本リモートセンシング学会第16回学術講演会論文集, pp. 147-150.
- 小長俊二 (1981): 1934~1943年の大蛇行, 海洋科学, No. 138, pp. 271-277.
- 杉本隆成・秋 孝尚 (1992): 黒潮沿岸域における急潮の発生機構, 沿岸海洋研究ノート, 30巻, 1号, pp. 45-57.
- 関根義彦 (1993): 日本南岸の黒潮流路の力学について, 海の研究, Vol. 2, No. 4, pp. 261-275.
- 田中總太郎, 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.
- 寺本敏彦 (1974): 海流の蛇行, 海洋物理学 I, 東京大学出版会, pp. 161-206.
- 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. 31, pp. 57-70.
- 久野一郎, 田中總太郎, 杉村俊郎, 畠山祐二, 西村 司 (1991): 気象衛星 NOAA による潮岬からの発達渦の時系列的追跡, 日本リモートセンシング学会第11回学術講演会論文集, pp. 283-286.
- 洲上吾郎, 田中總太郎, 杉村俊郎, 畠山祐二, 西村 司 (1992): 黒潮変動のメカニズム確定を目的とする沿岸潮位データの WAVELET 解析, 日本リモートセンシング学会第12回学術講演会論文集, pp. 55-58.
- 吉田耕造 (1976): 海洋力学における歴史的展望—主として海洋循環論をめぐって, 海洋物理 II, 東京大学出版会, pp. 201-240.
- 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.
- Lugt H. J. (1983): Vortex Flow in Nature and Technology. Jon Wiley & Sons. 297 pp.
- Nishimura T., T. Kobayashi, S. Tanaka, T. Sugimura, Y. Hatakeyama (1995): The Coherent Structure inside the Oceanic Turbulence around Japan-Islands-Chain. 132 pp.
- Richardson P. L. (1983): Gulf Stream Rings. Eddies in Marine Science, Springer verlag, pp. 19-43.
- Taft B. A. (1972): Characteristics of the flow of the Kuroshio south of Japan, KUROSHIO, University of Tokyo Press, pp. 165-216.