

遠距離海洋レーダによる東シナ海南西部の表層流観測

児島正一郎¹・佐藤健治²・小賀百樹³
長尾正之⁴・澁野拓郎⁵

本研究では東シナ海南西部における流動場の時空間変動特性を明らかにするために、遠距離海洋レーダによって計測された表層流データを用いて東シナ海南西部における黒潮とその周辺の流動場の時系列解析を行った。解析の結果、東シナ海南西部に流入する黒潮には2つの流路パターン（離岸流路と接岸流路）が存在し、数十日～数百日間隔で不規則に変動していることが明らかになった。また、黒潮と八重山諸島に挟まれるの海域では、与那国島の西と東から発生した時計回りの渦と反時計回りの渦によって海洋性乱流場が形成されることが明らかになった。さらに、台湾の北東から反時計回りの渦が生成され、下流方向に移動することが明らかになった。

1. はじめに

東シナ海南西部における漁業環境や海洋環境（流動場、熱環境、水位、水質など）は、台湾と与那国島の間から流入する黒潮とその周辺の流動場（渦構造）によって引き起こされる物理・化学・生物環境の変動に支配されている。このため、これまで多くの研究者が東シナ海南西部における海況観測の重要性について指摘してきた。例えば、市川ら（1997, 2002）は漁業資源の維持・管理や海洋環境保全のために東シナ海の家況をモニタリングし、海況変動を予測する技術を確立する必要があると指摘している。

これまで東シナ海南西部における黒潮及びその周辺の流動場の観測は、船舶による ADCP 観測や人工衛星による海面高度観測等がその中心であった。例えば、気象庁は石垣沖の黒潮横断定期観測を実施している。市川（1994）はこの黒潮横断定期観測線データを用いて、東シナ海における黒潮流量の短期変動特性を明らかにしている。しかしながら、これまで東シナ海南西部における面的な流動場の観測は、実施されたことはなかった。これは既往の観測機器（例えば、ADCP など）によって、高い時空間分解能で面的に流動場を観測するためには、多大な労力と費用が必要となるため実施されなかった。このため、東シナ海南西部における流動場の面的な変動特性については十分に解明されてこなかった。

本研究では東シナ海南西部における黒潮とその周辺の流動場の面的な変動特性を明らかにする第一段階として、高い時空間分解能を有し、面的な表層流計測が可能な遠距離海洋レーダによる東シナ海南西部の表層流観測

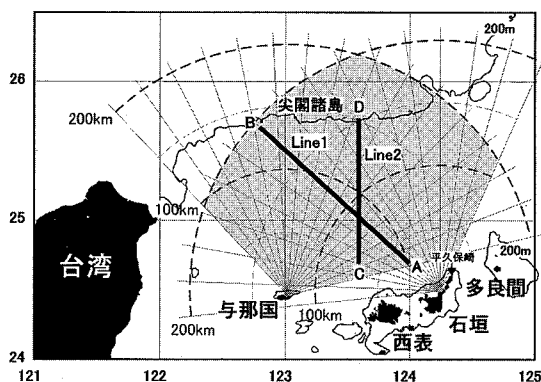


図-1 遠距離海洋レーダの設置位置と観測対象海域

を実施し、黒潮とその周辺の流動場（渦構造）の変動特性を定性的に明らかにすることを目的とする。

2. 遠距離海洋レーダについて

遠距離海洋レーダは黒潮に代表される海流を計測することを目的に、2000 年より（独法）情報通信研究機構によって開発が進められ、2001 年 7 月中旬より試験観測が開始された。これまでの検証実験によって、遠距離海洋レーダによる表層流計測は実用レベルにあることが示されている。例えば、松岡ら（2003a, 2003b）は遠距離海洋レーダの観測海域に ADCP を搭載した係留ブイを設置して表層流の精度検証を行い、その有用性を明らかにしている。また、佐藤ら（2005）は、GPS を搭載した漂流ブイを用いて黒潮が流れている海域の精度検証を実施し、その有用性を明らかにしている。

遠距離海洋レーダは図-1 に示す石垣島（東経 124° 14' 34", 北緯 24° 29' 48"）と与那国島（東経 123° 01' 11", 北緯 24° 27' 50"）にそれぞれ設置され、それぞれのレーダ局から 16 方向に電波を発射して 200 km 沖まで（図-1 の灰色部分）の海表面観測を実施している。表-1 に遠距離海洋レーダの主要諸元を示す。遠距離海洋レー

1 正会員	博(工)	(独法)情報通信研究機構 研究員
2	工修	内閣府総合科学技術会議事務局 参事官補佐
3	理博	琉球大学助教授 大学院理学部
4 正会員	博(工)	(独法)産業技術総合研究所 研究員
5	博(学術)	(独法)水産総合研究センター 生態系保全研究室長

表-1 遠距離海洋レーダの諸元

レーダ形式	FMICW
周波数	9.25 MHz
掃引周波数幅	22 kHz
周波数掃引間隔	0.7 s
送信出力	1 kW (ピーク), 500 W (平均)
距離分解能	7 km
速度分解能	2.5 cm/s
表層流の測定水深	約 1.2 m
アンテナ	16 素子アレイアンテナ (受信) DBF (Digital Beam Forming)
ビーム幅	8° (アンテナ正面)
観測範囲	±60° (アンテナ正面に対して)

ダには、2つの大きな特徴がある。

第一の特徴は、全観測海域の同時性を保った海表面観測が可能なことである。遠距離海洋レーダではアンテナ方式として、送信波の位相を制御することにより任意の方向に電波を送信し、海面からの後方散乱波を受信する狭ビーム走査方式ではなく、電波を全観測範囲に送信し、海面からの後方散乱波をアレイアンテナで受信し、その出力信号をデジタル処理することにより任意の方向からの後方散乱波に分離するデジタルビームフォーミング (DBF) 方式を採用している。これにより、全観測海域の同時性を保った海表面観測が可能になっている。

第二の特徴は、広域の海表面観測が可能なことである。遠距離海洋レーダは使用する電波の周波数を低くすることで、従来の海洋レーダ (例えば、24.515 MHz の海洋レーダ) よりも距離伝播の損失を小さくして広域の海表面観測を可能にしている。しかしながら、低い周波数の電波を使用したことにより、遠距離海洋レーダでは電離層の状態の影響を強く受け、著しく S/N 比が低下して観測に支障をきたす場合がある。

3. 解析に使用したデータセットについて

東シナ海南西部における黒潮とその周辺の流動場の時系列解析を行うために、本研究では1時間間隔で観測された表層流のデータセットから日平均の表層流のデータセットを作成した。また、東シナ海南西部における渦構造とその挙動を明らかにするために、日平均の表層流から渦度を算定し、日平均の渦度場のデータセットを作成した。本研究では流動場と渦度場の解析に、2002年1月1日～2005年12月31日 (4年間) の日平均の表層流のデータセットと日平均の渦度場のデータセットを使用した。

4. 東シナ海南西部の流動場解析

本研究では、全観測期間 (2002年～2005年) にお

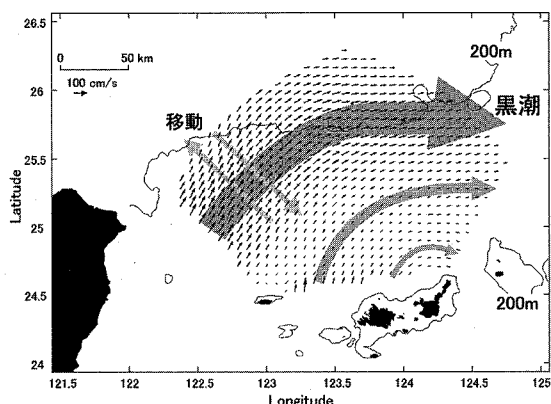


図-2 東シナ海南西部における平均表層流ベクトル (2002年～2005年)

る表層流の流速ベクトルの平均と表層流の流向・流速の分散を算定し、東シナ海南西部における流動場の特性を明らかにする。また、全観測期間中の流動パターン (黒潮とその周辺に発達する渦構造) を定性的に判読することにより、東シナ海南西部における流動場の時空間変動特性を明らかにする。その上で、東シナ海南西部に流入して来る黒潮の時間変動特性を明らかにする。

(1) 東シナ海南西部における流動場の特性

図-2に全観測期間 (2002年～2005年) を平均化した表層流ベクトルを示す。東シナ海南西部における黒潮 (流速が1 m/s以上ある部分) は台湾と与那国島の間から東シナ海南西部に流入し、尖閣諸島がある大陸棚上でその進行方向を北東方向から東方向に変えて流れている。一方、黒潮と八重山諸島に挟まれる海域における表層流は、大部分が北東方向から東方向に向かって流れている。しかしながら、平久保崎の北方海域における表層流は南東方向に向かって流れており、その一部は石垣島と多良間島の間から太平洋に流入していると考えられる。

図-3(a), (b)に全観測期間 (2002年～2005年) における表層流の流速と流向の分散を示す。東シナ海に流入する黒潮はその流速を大きく変動させるが、その流向はほとんど変動させることなく流れている。これは、黒潮がこの海域において、その流軸 (流速が速い部分) の位置を東西方向に変動させていることと季節風によって発達する吹送流 (南向きの流れ) の影響を強く受けていることがその原因として考えられる。一方、尖閣諸島がある大陸棚近くの黒潮は、その流速と流向をほとんど変動させることなく流れている。このことより、黒潮の流路が大きく変化する尖閣諸島周辺海域において、黒潮の表層流の一部が分岐して大陸棚上に流入しないことを確認した。

黒潮と八重山諸島に挟まれる海域では表層流の流向が

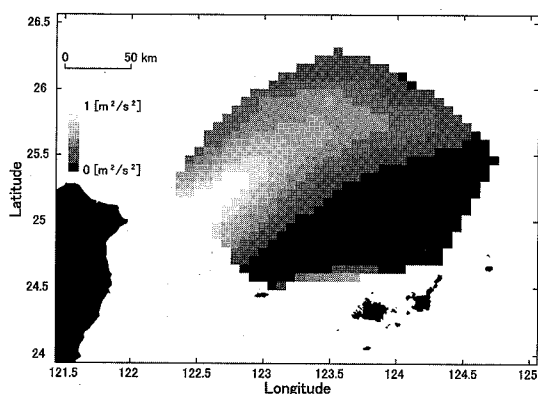


図-3(a) 東シナ海南西部における表層流の速度の分散 (2002年～2005年)

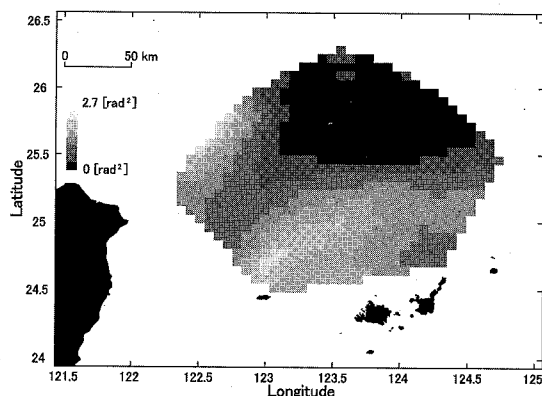


図-3(b) 東シナ海南西部における表層流の流向の分散 (2002年～2005年)

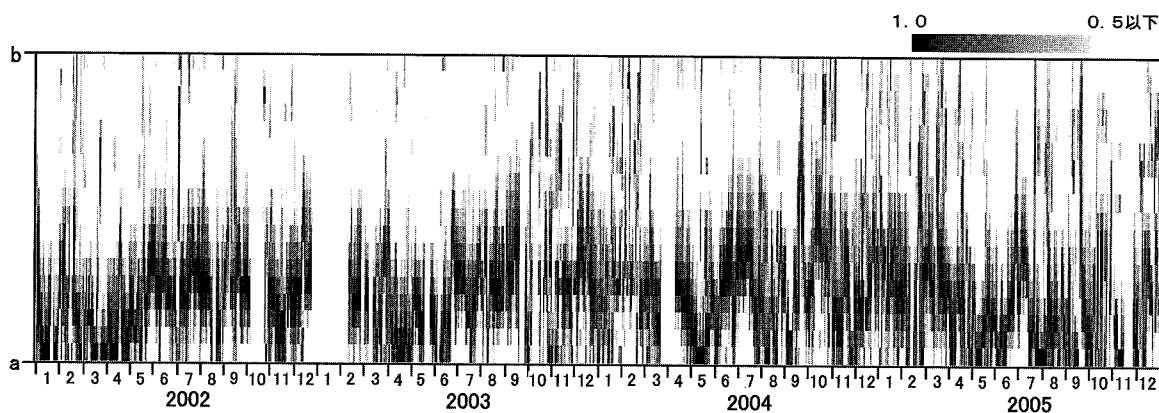


図-4 Line 1 上の無次元化した日平均表層流速の時間変動 (2002年～2005年)

激しく変動している。これは与那国島から発生した擾乱が下流域に拡散しながら伝播することにより、この海域に海洋性乱流場が形成されるためだと考えられる。また、台湾の北東海域においても、表層流の流向が激しく変動している。これは台湾の北東から発生した擾乱が下流域に伝播することにより、この海域に海洋性乱流場が形成されるためだと考えられる。

(2) 東シナ海南西部の流動場の時空間変動特性

東シナ海南西部の流動場の時空間変動特性を明らかにするために、日平均の表層流ベクトルの定性的な時系列解析を行った。その結果、東シナ海南西部に流入する黒潮の流路には、与那国島から離れて東シナ海南西部に流入するパターン（離岸流路）と与那国島の近くから東シナ海南西部に流入するパターン（接岸流路）の2つがあり、不規則に変動（図-2の矢印で示した部分）している。一方、黒潮と八重山諸島に挟まれる海域では、時計回りの渦と反時計回りの渦が様々なスケールで存在し、下流方向に移動している。これらの渦が西表島・石垣島沿岸域に接近することによって、表層の外洋水が西表

島・石垣島沿岸域に流入し、その流動場や熱環境などを大きく変動させる。

(3) 東シナ海南西部に流入する黒潮の時間変動特性

東シナ海南西部に流入する黒潮の時間変動特性を明らかにするために、図-1のLine1における表層流の時間変動を解析した。遠距離海洋レーダで計測される表層流の流速ベクトルは、水深約1.2mの流速ベクトルである。このため、計測される表層流には黒潮などに代表される地衡流成分と吹送流などに代表される非地衡流成分が含まれている。

東シナ海南西部では冬季に北からの季節風が卓越する。このため、冬季において東シナ海南西部に流入する黒潮の表層流（北向きの流れ）は、季節風（北風）によって発達する吹送流（南向きの流れ）の影響を強く受けている。これゆえ、黒潮の時間変動特性を明らかにするためには観測された表層流データから吹送流成分を分離する必要がある。通常、表層流における吹送流成分は海上で計測された海上風や人工衛星（散乱計）によって計測された海上風から推算する。しかしながら、高い時間分解

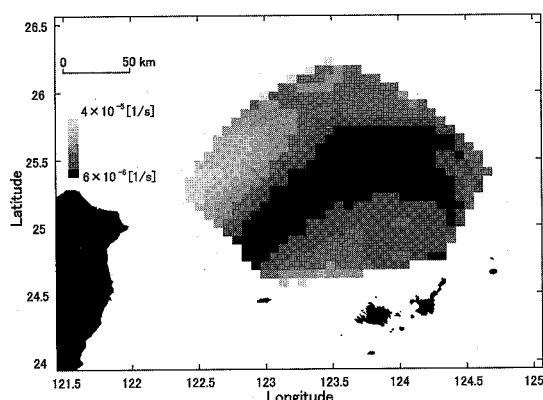


図-5(a) 東シナ海南西部における正の平均渦度
(2002年～2005年)

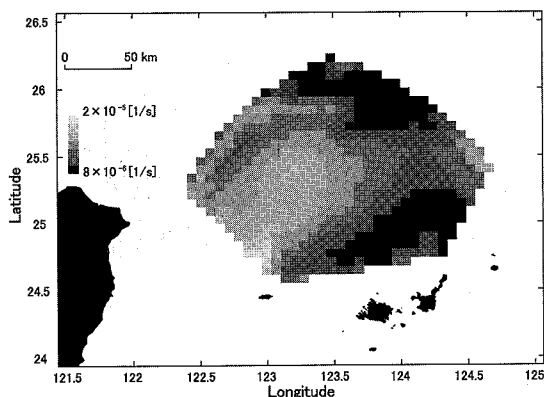


図-5(b) 東シナ海南西部における負の平均渦度
(2002年～2005年)

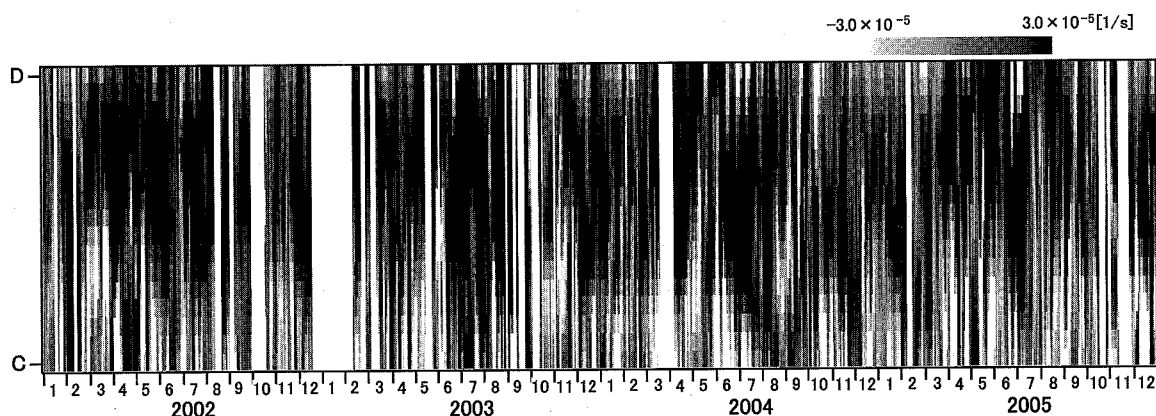


図-6 Line 2 上の日平均渦度の時間変動 (2002年～2005年)

能 (1 時間～1 日単位) を有した計測器による面的な海上風観測は東シナ海南西部において実施されていない。このため、海上風から日平均の吹送流成分を推算することは不可能である。そこで、本研究では Line1 上の日平均表層流データをその最大流速によって無次元化することで、吹送流の発達度によって変動する表層流の変動成分を低減した。その上で、Line1 上における黒潮の表層流の時間変動特性を定性的に評価した。

図-4 に Line1 上の無次元化した日平均表層流速の時間変動を示す。この図において、黒色は流速が大きいことを表している。本研究では各観測日における最大流速の 50 % を越える表層流を黒潮の表層流と定義した。Line1 上を通過する黒潮は不規則にその位置を変動 (離岸流路⇄接岸流路) させ、短期 (数十日) 的に変動する場合と長期 (数ヵ月) 的に変動する場合がある。また、Line1 上の黒潮はその流軸を約 40～60 km の範囲で変動させ、その流路幅を約 30～90 km の範囲で変動させている。

5. 東シナ海南西部の渦度場解析

本研究では全観測期間 (2002 年～2005 年) の平均渦度場を算定することにより、東シナ海南西部における渦構造の特性を明らかにする。また、日平均渦度場データを定性的に時系列解析することにより、この海域における渦構造の時空間変動特性を明らかにする。その上で、黒潮と八重山諸島に挟まれる海域における渦の時間変動特性を明らかにする。

(1) 東シナ海南西部における渦構造の特性

図-5(a), (b) に全観測期間 (2002 年～2005 年) で平均化した正 (反時計回り) と負 (時計回り) の渦度場をそれぞれ示す。台湾の北東海域では正の渦度 (図-5(a)) が卓越している。これは台湾の北東で発生した反時計回りの渦が、下流域に減衰しながら伝播しているためだと考えられる。また、与那国島の北東海域では正の渦度 (図-5(a)) が卓越している。これは与那国島の東で発生した反時計回りの渦が下流域に拡散しながら伝播しているためだと考えられる。一方、黒潮の進行方向に対して

右側の海域では負の渦度 (図-5(b)) が卓越している。これは与那国島の西で発生した時計回りの渦が、黒潮と共に下流域に伝播しているためだと考えられる。

以上より、黒潮と八重山諸島に挟まれる海域では、黒潮周辺海域で時計回りの渦が発達し、八重山諸島周辺海域で反時計回りの渦が発達する渦構造が形成されることが明らかになった。

(2) 東シナ海南西部の渦度場の時空間変動特性

東シナ海南西部の渦度場の時空間変動特性を明らかにするために、日平均渦度場の定性的な時系列解析を行った。その結果、黒潮と八重山諸島で挟まれる海域では、反時計回りと時計回りの渦が不規則に発生し、下流方向に移動している。この海域に発達する渦の空間スケールは、時計回りの渦が約 50~100 km で、反時計回りの渦が約 40~70 km 程度である。また、これらの渦の移動速度は下流方向に約 15~30 km/day である。一方、台湾の北東から発生する反時計回りの渦は下流方向に発達しながら、大陸棚まで移動する。

(3) 黒潮と八重山諸島に挟まれる海域の渦度場の時空間変動特性

黒潮と八重山諸島で挟まれる海域における渦度場の時空間変動特性を明らかにするために、図-1 の Line2 における渦度の時間変動を解析した。図-6 に Line2 上の日平均渦度の時間変動を示す。この図において、黒色は負の渦度が卓越していることを表し、白色は正の渦度が卓越していることを表している。Line2 上を通過する渦の時間変動と空間変動は非定常であり、これらの渦の発達と移動によってこの海域に海洋性乱流場が形成される。さらに、黒潮の時間変動 (図-4) と比較すると、八重山諸島沿岸域近くに発達する反時計回りの渦は黒潮が接岸流路の時に発達する傾向にあることが明らかになった。

6. ま と め

本研究では東シナ海南西部における流動場の変動特性を明らかにするために、遠距離海洋レーダで計測された表層流の解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 東シナ海南西部に流入する黒潮には、離岸流路と接岸流路の2つの流路が存在し、数十日~数百日間隔で不規則に変動していることが明らかになった。一方、大陸棚に沿って流れる黒潮の流路の変動は小さく、安定していることが明らかになった。また、黒潮の流路

が大きく変わる尖閣諸島周辺海域において、黒潮の表層流の一部が分岐して大陸棚上に流入しないことを確認した。

- (2) 黒潮と八重山諸島に挟まれるの海域では、与那国島の西と東から発生した反時計回りの渦 (空間スケール: 約 30~70 km) と時計回りの渦 (空間スケール: 約 50~100 km) によって、海洋性乱流場が形成されていることが明らかになった。これらの渦は下流方向に約 15~30 km/day で移動し、西表島・石垣島の沿岸近くを通過する際には、これらの渦によって表層の外洋水が西表島・石垣島沿岸に流入する可能性が高いことが明らかになった。
- (3) 反時計回りの渦が台湾の北東から頻繁に発生し、下流方向の大陸棚に移動することが明らかになった。

謝辞: 本研究は、海上保安庁海洋情報部より 500 m グリッドの海底地形データの提供を受けた。また、文部科学省科学研究補助金基盤 (B) (代表: 児島正一郎) の補助を受けた。ここに記して謝辞を表します。

参 考 文 献

- 市川洋 (1994): 東シナ海における黒潮流量の短周期変動特性の推定, 月刊海洋, Vol.26, No. 2, pp. 81-85.
- 市川洋 (1997): 東シナ海の観測研究, 月刊海洋, Vol.29, No. 1, pp. 39-43.
- 市川洋・市川敏弘・松野健・前田広人・中村啓彦・仁科文子 (2002): 東シナ海の時海況モニタリングの研究, 月刊海洋, Vol. 34, No. 1, pp. 23-32.
- 近藤正人 (1985): 東シナ海・黄海漁場の海況に関する研究 - I 50 m 深及び底層における平均水温・塩分の分布, 西海区水産研究所研究報告, Vol.62, pp. 19-66.
- 佐藤健治・松岡建志・藤井智史 (2002): 東シナ海の黒潮流入部における遠距離海洋レーダ観測, 通信総合研究所季報, Vol.48, No. 2, pp. 221-227.
- 佐藤健治・松岡建志・児島正一郎・藤井智史 (2004): 東シナ海の黒潮流入部における遠距離海洋レーダ観測, 沿岸海洋研究, 第 41 巻第 2 号, pp. 119-127.
- 佐藤健治・児島正一郎・松岡建志 (2005): 遠距離海洋レーダと漂流ブイによる流れの同時観測, 海洋短波レーダによる日本沿岸海況監視システムの開発, 九州大学応用力学研究所「海洋レーダに関する研究集会」予稿集 pp. 81-85.
- 松岡建志・佐藤健治・児島正一郎・藤井智史 (2003a): CRL 遠距離海洋レーダによる東シナ海黒潮流入域の表層流速場観測, リモートセンシング学会秋季学術講演会論文集, pp. 249-250.
- 松岡建志・佐藤健治・児島正一郎・藤井智史 (2003b): 遠距離海洋レーダによる東シナ海黒潮上流域の表層流速場時系列観測, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 47