

2004年の東シナ海南西部における黒潮の変動 と与那国島・石垣島の潮位変動の関係

The relationship between Kuroshio Current in the southwest of East China Sea and the
sea level at Yonaguni and Ishigaki Islands in 2004

児島正一郎¹・佐藤健治²

Shoichiro KOJIMA and Kenji SATOH

¹正会員 工博 (独)情報通信研究機構 沖縄亜熱帯計測技術センター
(〒904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納4484)

²非会員 工修 (独)情報通信研究機構 沖縄亜熱帯計測技術センター
(〒904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納4484)

Kuroshio Current in the southwest of East China Sea is continuously observed by Long-Range Ocean Radar (LROR) that National Institute of Information and Communications Technology (NICT) is developing for measuring sea surface currents and waves at the coast and ocean. By the continuous observations, it is clarified that Kuroshio has two current patterns. In addition, to evaluate the influence of Kuroshio at the coastal region, the current patterns of Kuroshio are compared with the sea level at Ishigaki Island and Yonaguni Islands. As a result of these comparisons, it is clarified that the abnormal sea level at the coastal region of Ishigaki and Yonaguni Islands depends on the variation of Kuroshio.

Key Words : Long-Range Ocean Radar , Kuroshio Current, Sea level

1. はじめに

東シナ海南西部における流動, 熱環境, 水質及び生物環境は, 台湾と与那国島の間から北上する黒潮の影響を受けている. 特に, 与那国島や石垣島など八重山諸島の沿岸域における熱環境, 水位, 水質, 流動等は黒潮とその周辺の流動(渦構造)によって大きな影響を受けている. これまで東シナ海南西部における流動の調査は, 船舶や漂流ブイを用いた短期的な調査しか実施されてこなかった. このため, 東シナ海南西部における黒潮及びその周辺海域の流動特性を十分に解明することができなかった.

本研究では, 独立行政法人情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターが開発した遠距離海洋レーダによって東シナ海南西部の表層流計測を実施し, 黒潮とその周辺海域の流れの特性を明らかにする. また, 本研究では, 与那国島と石垣島に設置された潮位計の観測結果と遠距離海洋レーダで計測した表層流を比較することにより, 黒潮の変動が与那国島と石垣島の沿岸潮位に及ぼす影響を明らかにする.

2. 遠距離海洋レーダについて

独立行政法人情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターでは, 沖合200kmまでの表層流及び波浪を面的に計測することが可能な遠距離海洋レーダ(アンテナ方式: DBF (Digital Beam Forming) 方式, 中心周波数 9.25MHz)の開発を行っている. 遠距離海洋レーダによって表層流計測を行う場合, 他の海洋レーダ(例えば, 狭ビーム走査方式の海洋レーダ)と比較して観測海域が広く同時性を保った計測を行うことが可能である. また, 高波浪時においても安定して表層流と波浪の計測が可能である. しかしながら, その空間分解能(視線方向: 7 km)は他の海洋レーダ(49.1MHzの海洋レーダで0.5km, 24.515MHzの海洋レーダで1.5km)と比較して低く, 電離層の状態に起因する外来ノイズの影響を受けて精度良く計測することが困難になる場合がある.

図1に遠距離海洋レーダのアンテナ設置位置(石垣局(124° 14' 34", 24° 29' 48")と与那国局(123° 01' 11", 24° 27' 50"))とその観測範囲を示す. 観測範囲は石垣サイトと与那国サイトからそれぞれ200km以内の灰色の海域である. 表1に遠距離海洋レー

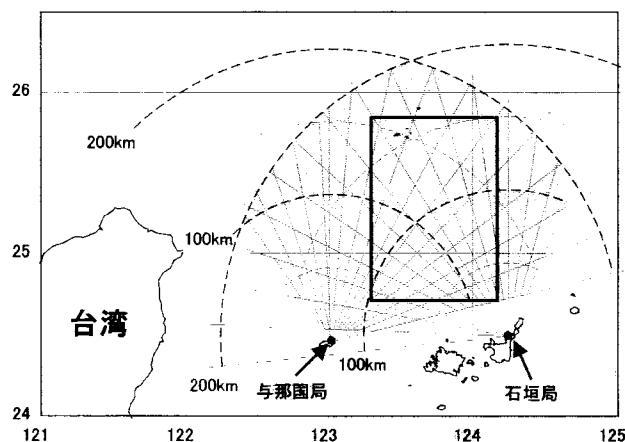


図1 観測対象海域

ダの主要諸元を示す。遠距離海洋レーダではDBF方式を採用しているため、送信用アンテナと受信用アンテナは分離されている。送信用アンテナには3エレメントの八木アンテナを使用しており、水平方向のビーム幅が120°のファンビームを海面に照射する。受信用アンテナは2エレメント八木アンテナ16基からなる全幅250mのリニアアレイアンテナで構成されている。16基の各素子アンテナはそれぞれに受信機とA/D変換器を備え、各素子からの出力信号をデジタル処理することにより、角度分解能が8°以下（アンテナ正面方向）のビームを形成することできる。

3. 東シナ海南西部における黒潮の変動

これまで海上保安庁が毎月2回発行している海洋速報では、本研究の観測海域（東シナ海南西部）を流れる黒潮の流路の変動はほとんどないことが報告されている。本研究では、従来の計測機器よりも時空間分解能が高い遠距離海洋レーダを用いた表層流の時系列解析することによって、東シナ海南西部における黒潮の変動特性を明らかにする。

(1) データセット

観測の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観測された2003年11月～2004年11までの表層流データを用いた。解析には、1時間に一回計測された表層流データを1日平均したものを用いた。

(2) 解析

1日平均の表層流データを時系列解析した結果、東シナ海南西部における黒潮の流路には、大きく分けて2つのパターンがあることが明らかになった。一つは黒潮の流路が八重山諸島から離れた大陸棚の縁を流れる場合（パターン1（離岸流路）、図2-(a)）で、もう一つは黒潮の流路が八重山諸島の近くを流れる場合（パターン2（接岸流路）、図2-(b)）である。また、観測期間中、黒潮の流路は短期的に変動（数十日程度）する向きがあった。

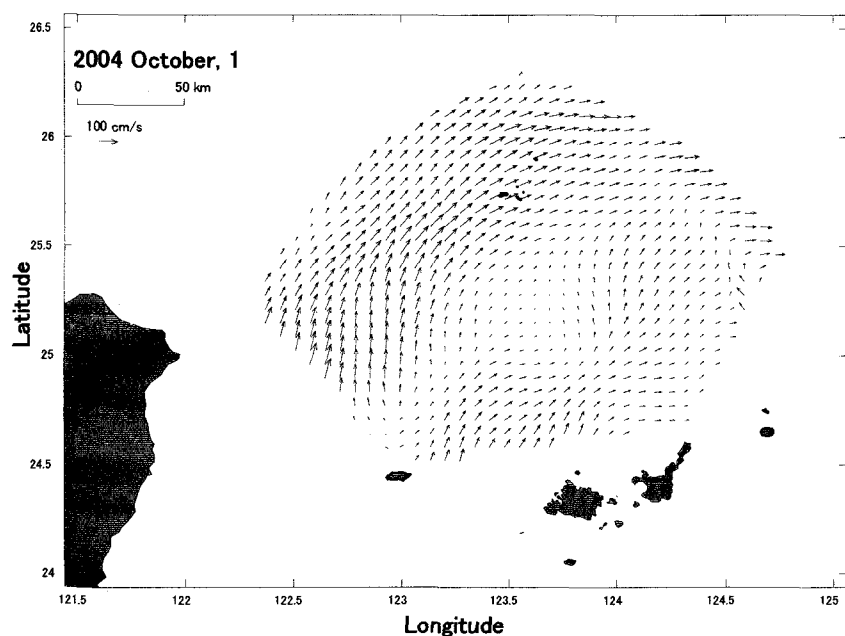
表1 遠距離海洋レーダの諸元

レーダ形式	FMICW
周波数	9.2 MHz
掃引周波数幅	22 kHz
周波数掃引間隔	0.7 s
送信出力	1kW(ピーク), 500W(平均)
距離分解能	7 km
速度分解能	2.5 cm/s
アンテナ	16素子アレイアンテナ (受信) DBF(Digital Beam Forming)
ビーム幅	8～10°
観測範囲	±60°

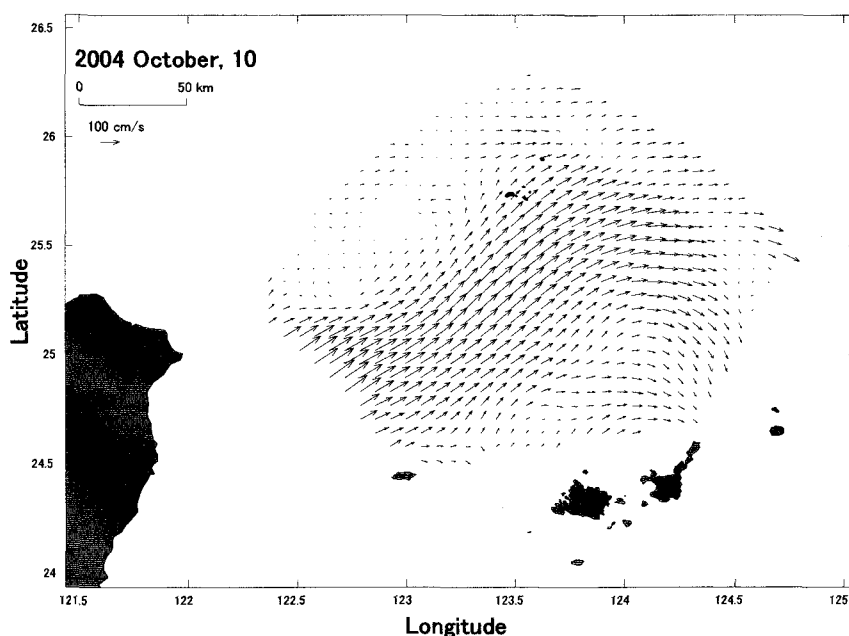
離岸流路（パターン1）は、これまでの海洋学の知見（大陸棚の縁に沿って黒潮が流れる）と一致した流路である。黒潮が離岸流路で流れるときには、黒潮と八重山諸島（与那国島・西表島・石垣島）との間の海域にメソスケールの高気圧性（時計回り）の渦が発達する場合がある。この場合、このメソスケールの渦は下流域である沖縄本島方向（北東方向）に移動し、中規模渦となる。この中規模渦の挙動に関しては、灘岡ら（2004）がJCOPE（Japan Coastal Ocean Predictability Experiment）黒潮モデルによる三次元計算結果を解析することで明らかにしている。灘岡らの解析によると、この中規模渦は本研究の観測対象海域で黒潮から分離し、北東に進行した後、暖水塊として沖縄本島沿岸に接近し、沖縄本島沿岸の流動場や熱環境に顕著な影響を与えている。残念ながら、今回の観測では観測期間の問題（観測期間が短い）からこの中規模渦の発生周期を把握することができなかった。しかしながら、今後、長期間のデータを解析することで、この中規模渦の発生メカニズムとその周期を明らかにできる可能性がある。

接岸流路（パターン2）は、これまでの海上観測（船舶等による観測）によって観測されることがない流路である。黒潮が接岸流路で流れるときには、黒潮と大陸棚の縁の間に低気圧性のメソスケールの渦が生成される。この低気圧性の渦は、黒潮と八重山諸島の間に生成される高気圧性の渦のように下流域に移動することなく、数日～数十日で消滅する。この低気圧性の渦の形成によって生じる強い湧昇流は、海底より海面付近に栄養塩を供給していると考えられる。今後、海色センサーで計測されたクロロフィルaとの比較を行うことにより、この低気圧性の渦と栄養塩の関係が明らかにできる可能性がある。黒潮が接岸流路のときには、離岸流路のときのような高気圧性の渦が黒潮と八重山諸島の間で発達する様子を確認することができなかった。

東シナ海南西部における黒潮の流路は、図2のように南北に大きく変化する。そこで、この海域の黒潮の流路と流速の変動特性を明らかにするために、図1の黒枠で囲まれた海域における東西方向の表層流の平均流速を算定した。図3に東シナ海南西部（図1の黒枠で囲まれた



(a) パターン 1 (離岸流路)



(b) パターン 2 (接岸流路)

図 2 黒潮の変動パターン

海域)における東西方向の平均表層流速の時系列変動を示す。縦軸は基準線(石垣島沿岸)からの距離を表し、140km付近は尖閣諸島周辺海域の表層流の平均流速を表している。図3において、黒潮の流路は速度が速い部分(黒色部分)で表現されている。遠距離海洋レーダで観測される表層流には、黒潮の流速成分と吹送流成分が含まれている。このため、図3の短周期成分(1日~5日程度)の変動は、吹送流に起因する変動成分であると考えられる。一方、図3の長周期成分(数十日程度)の変動は、黒潮の変動に起因する変動成分である。図3より、観測海域において、黒潮の流軸(本研究では流速が一番

速い部分を流軸とする)の幅と流速は大きく変動することが明らかになった。また、黒潮の流路は南北に大きく変動するが、支配的な流路は離岸流路(図2-(a))であることも明らかになった。

接岸流路は観測期間中に2回(2003年12月と2004年10月中旬)発生しているが、その発生メカニズムに関しては現在のところ不明である。一つの可能性としては、八重山諸島の南に高気圧性の中規模渦が存在し、それが黒潮に取り込まれことによって黒潮の流路が接岸流路になったと考えられる。今後、他の観測データ(例えば、海面高度計のデータ)を利用し、黒潮の接岸流路の発生

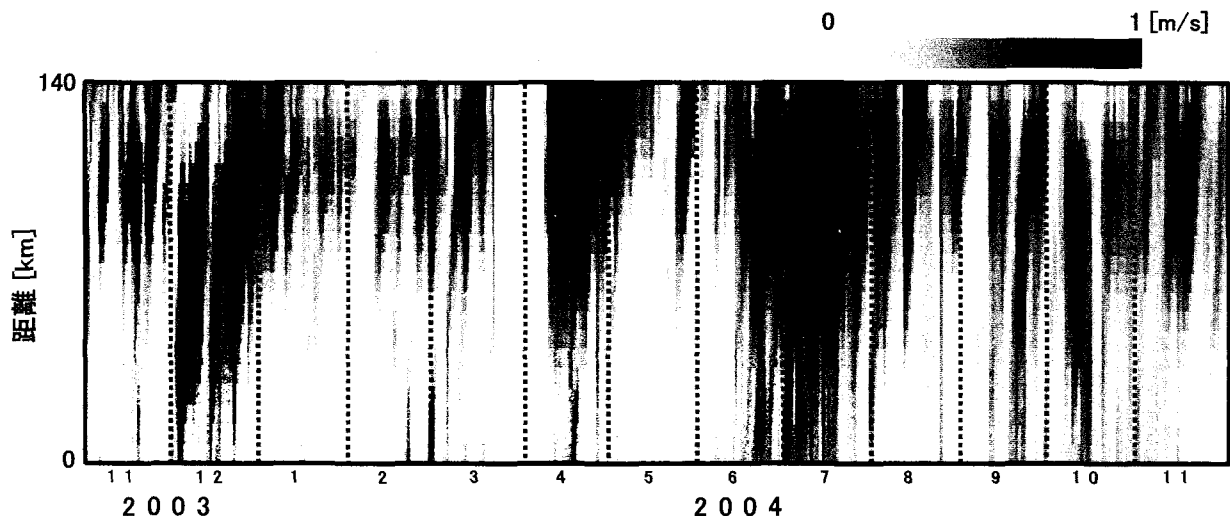


図3 東シナ海南西部における黒潮の東西方向の平均流速の時系列変動

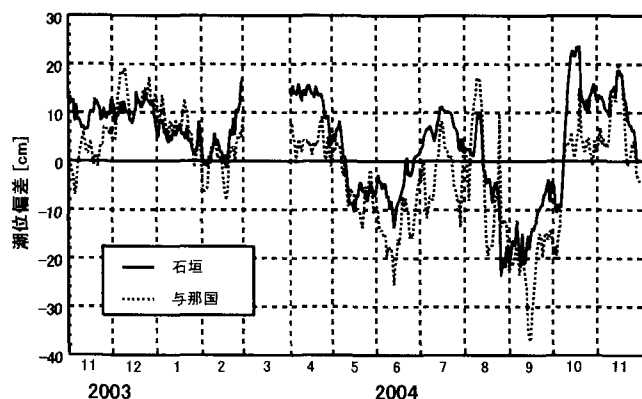


図4 与那国島・石垣島の潮位偏差

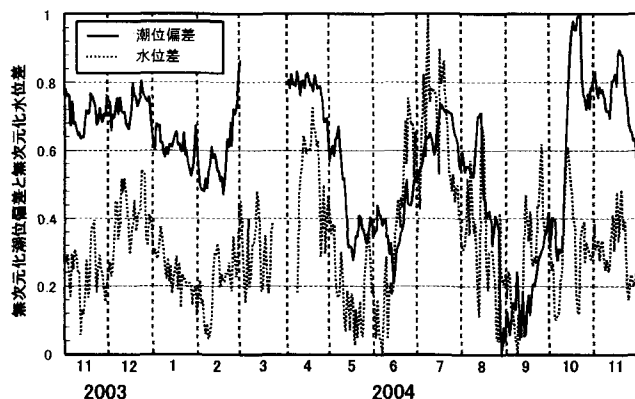


図5 潮位偏差と水位差の比較

メカニズムに関して検討を行う必要がある。

4. 沿岸潮位の変動特性について

八重山諸島の潮位は黒潮の流れによって、東シナ海南西部の大陸棚上の潮位よりも高くなっている。そして、その変動は黒潮の流路の幅と速度と密接に関係していると考えられる。そこで、黒潮が石垣島と与那国島の潮位に及ぼす影響を評価するために、石垣島と与那国島の潮位変動と遠距離海洋レーダで観測された表層流との定性的な比較を行った。

(1) データセット

使用した潮位データは、石垣島 ($124^{\circ} 09'$, $24^{\circ} 20'$) と与那国島 ($122^{\circ} 57'$, $24^{\circ} 27'$) に設置されている検潮所のデータを用いた。沿岸潮位の気圧補正には、石垣島地方気象台 ($124^{\circ} 09.8'$, $24^{\circ} 20.2'$) で計測している気圧データと与那国島観候所 ($123^{\circ} 0.6'$, $24^{\circ} 28'$) で計測している気圧データを用いた。気圧補正は静圧的な方法 (1 hPaの気圧上昇に対しては1cmの潮位低下が起きるとして補正) で行った。

(2) 解析

解析は、気圧補正した観測潮位から天文潮位を差し引いた潮位偏差の一日平均を用いた。図4に石垣島と与那国島における潮位偏差を示す。両者の潮位偏差を比較すると、その変動パターンは類似し、約4ヵ月周期で変動していることがわかる。また、八重山諸島沿岸域では約20cmの潮位上昇を引きこす場合 (2004年10月中旬の石垣島の潮位) と約40cmの潮位低下を引き起こす場合 (2004年9月中旬の与那国島の潮位) があることが明らかになった。これらの潮位偏差の変動 (図4) と黒潮の流路の変動 (図2) とを比較した結果、以下のことが明らかになった。

- 沿岸潮位が平常時よりも高いとき (異常な潮位上昇) には、黒潮の流路の幅は広く、その流速は速い (例えば、2004年7月)。
- 沿岸潮位が平常時よりも低いとき (異常な潮位低下) には、黒潮の流路の幅は狭く、その流速は遅い (例えば、2004年5月～6月)。

5. 黒潮と沿岸潮位の関係

黒潮と沿岸潮位の関係を明らかにするために、遠距離海洋レーダで観測した表層流から海面高度を推算し、沿岸潮位との比較を行った。

(1) 海面高度の推算

表層流から海面高度を推算するために、黒潮及びその周辺の流動では地衡流平衡が成立し、その密度構造は一樣と仮定する。さらに、表層流の流速を黒潮の平均流速とみなすことにより、任意の二地点 x_1 , x_2 における水位差 $\Delta\eta$ は以下の式によって計算することできる。

$$\Delta\eta = \frac{f}{g} \int_{x_1}^{x_2} v dx \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 f はコリオリパラメータ、 v は平均流速をそれぞれ表している。本研究では式(1)に黒潮の東西方向の平均表層流速(図3)を代入することで、尖閣諸島周辺海域と石垣島周辺海域の水位差 $\Delta\eta$ を推算した。

(2) 沿岸潮位との比較

図5に無次元化した石垣島の潮位偏差と無次元化した尖閣諸島周辺海域と石垣島周辺海域の水位差の比較を示す。無次元潮位偏差 $\Delta\eta_0$ と無次元水位差 σ_0 は以下の式によって計算した。

$$\Delta\eta_0 = \frac{\Delta\eta - \Delta\eta_{\min}}{\Delta\eta_{\max} - \Delta\eta_{\min}} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\eta$ は石垣島における潮位偏差、 $\Delta\eta_{\min}$ は観測期間中の石垣島における潮位偏差の最小値、 $\Delta\eta_{\max}$ は観測期間中の石垣島における潮位偏差の最大値、 σ は尖閣諸島周辺海域と石垣島周辺海域の水位差、 $\sigma_{\min}$ は観測期間中の尖閣諸島周辺海域と石垣島周辺海域の水位差の最小値、 $\sigma_{\max}$ は観測期間中の尖閣諸島周辺海域と石垣島周辺海域の水位差の最大値をそれぞれ表している。両者を比較すると、冬季(10月～3月)に両者の変動パターンが異なっている。これは、冬季に黒潮の流れとは反対方向(西向き)の吹送流が卓越するため、遠距離海洋レーダで観測している表層流が黒潮の平均流としてみなせなくなっているためである。しかしながら、吹送流が発達しない夏季(4月～9月)においては両者の変動パターンは一致しており、遠距離海洋レーダで観測した表層流から黒潮に起因する石垣島周辺海域の潮位変動が推定でき

る可能性がある。

6. まとめ

- (1) 遠距離海洋レーダで計測された一日平均の表層流のパターン解析結果より、黒潮の流軸が八重山諸島の近海を流れる場合(接岸流路)と外洋を流れる場合(離岸流路)の2つのパターンがあることが明らかになった。
- (2) 遠距離海洋レーダで計測された一日平均の表層流の時系列解析により、黒潮の流軸付近の流速と流軸の幅の変動が大きいことが明らかになった。
- (3) 黒潮の変動(流軸の流速と流軸の幅)と与那国島・石垣島の潮位を比較検討の結果、遠距離海洋レーダで計測された黒潮の変動と与那国島・石垣島の潮位変動の間には高い相関関係があり、黒潮の変動が与那国島・石垣島の潮位を変動させていることが明らかになった。さらに、2004年の与那国島・石垣島における潮位変動の周期は、約4ヶ月であることが明らかになった。
- (4) 遠距離海洋レーダで観測した表層流から尖閣諸島周辺の水位と石垣島周辺の水位の差を推算し、石垣島の潮位偏差と比較した結果、冬季においては両者の変動は一致しなかった。これは遠距離海洋レーダで観測される表層流に含まれる吹送流成分が卓越するためである。しかしながら、夏季においては両者の変動は一致した。このことより、遠距離海洋レーダで観測される表層流より黒潮に起因する石垣島周辺の潮位偏差を推定できる可能性がある。

参考文献

- 1) 鈴木庸壹, 灘岡和夫, 宮澤泰正, 波利井佐紀, 安田仁奈: JCOPEおよび沿岸域モデルを用いたサンゴ・オニヒトデ幼生広域輸送特性の把握, Vol. 51, pp. 1146-1150, 2004.
- 2) 佐藤健治, 松岡建志, 児島正一郎, 藤井智史: 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, 2004.
- 3) 灘岡和夫, 三井順, 濱崎克哉, 波利井佐紀, 田村仁, 鈴木庸壹: 沖縄・石西礁湖における海水流動構造および濁質・淡水・熱輸送特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, Vol. 50, pp. 1036-1040, 2003.
- 4) 松岡建志, 佐藤健治, 児島正一郎, 藤井智史: 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, 2003.
- 5) 三井順, 灘岡和夫, 鈴木庸壹, 熊谷航, 石神健二, 波利井佐紀, Enrico C. Paringit, 田村仁, 安田仁奈, 飯塚広: 沖縄・石西礁湖における海水流動および濁質・熱・サンゴ幼生輸送特性解明のための総合的観測と解析, Vol. 51, pp. 1055-1059, 2004.