

八重山諸島周辺での物理環境計測

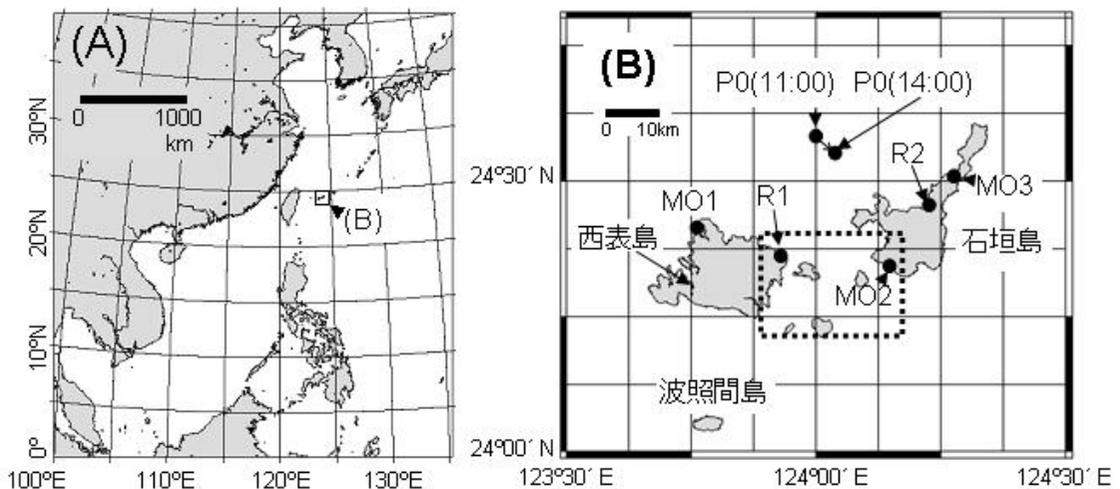
長尾 正之¹⁾・橋本 英資¹⁾・高杉 由夫¹⁾・児島正一郎²⁾
佐藤 健治²⁾・森本 昭彦³⁾・鈴木 淳¹⁾・渋谷 拓郎⁴⁾

1. はじめに

日本のサンゴ礁は、近年の地球環境の変動あるいは人為起源の問題による劣化の危機に直面している。主要な劣化原因として、サンゴ礁地域の埋め立て、海岸構造物や沿岸道路の建設、表土の流出、サンゴの天敵であるオニヒトデの大発生、そして近年の高水温傾向による大量のサンゴ白化が挙げられる。さらに、サンゴの再生産性の低下も考慮すべき要素である。これに関しては、主にサンゴの再生産性が高い区域の探索を目的として、サンゴ産卵後に卵や幼生がどのように移動するかに関して、観測結果に基づいた数値実験による研究がすでに行われている(田村ほか, 2005; Nakada *et al.*, 2006)。しかし、海中には

数値実験では再現が難しい大小の渦による乱れが存在しており、これにより小さなサンゴ卵や幼生が、実際に水平および鉛直方向にどの程度分散するかを知っておくことが、実際の環境評価の際にはさらに必要となる。また、近年の大規模なサンゴ白化の主要因とされている高水温化の影響を検討する場合でも、対象海域での海水の平均的な運動による熱輸送に加えて、海中乱流による分散の効果も捉えておくことが重要である。

そこで我々は、保全すべきサンゴ礁およびその周辺海域の流れ、波浪、物質と熱の輸送現象を監視する計測技術を開発するために、八重山諸島をモデル海域に設定し、海中混合現象の現場での直接計測と、リモートセンシング技術(海洋レーダ)のベストミッ



第1図 モデル海域と観測点配置。(B)の点線は石西礁を示す。長尾ほか(2007)を改作。

1) 産総研 地質情報研究部門
2) 情報通信研究機構 沖縄亜熱帯計測技術センター
3) 名古屋大学 地球水循環研究センター
4) 西海区水産研究所 石垣支所

キーワード: サンゴ礁, 海洋鉛直微細構造, 海洋レーダ, 石西礁, 西表島, 石垣島, 水温

クスを探索する研究を行っている。ここでは、その一部を紹介する^(注1)。

2. 方法

2.1 モデル海域

モデル海域の琉球列島八重山諸島は、台湾、中国、日本を含む東アジアでも最大のサンゴ礁である石西礁を有する(第1図)。石西礁は東西20km、南北15kmで水深10m未満の浅い礁池を有する。八重山諸島は黒潮流軸に近い場所にあるため、その影響を受けていると考えられる。琉球列島のサンゴ礁では高い生物多様性が報告されている(Veron and Minchin, 1992)。一方で、沿岸域への赤土や栄養塩の流入、魚の乱獲などによる人為起源のストレスにさらされている。このほか、最近では大規模なサンゴ白化が問題となっている。石西礁の水深は10m以浅が大半である。一方で、水深100mを超える水域は、石西礁の周辺に存在している。石西礁とその周辺海域は礁嶺で基本的に隔てられているので、周辺海域の海水はいくつかの水路を通じてか、海水位が礁嶺を上回ったときに内部に浸入する。特に、海水交換率の悪い浅い礁池は水温が上昇しやすくなるため、夏にサンゴ白化が生じやすいと考えられる。今回の計測では、まず、こういった問題の背景となる、石西礁の周辺海域における物質や熱の輸送現象の把握を行うために、その北部海域を対象として計測を実施した。

2.2 海洋鉛直微細構造測定装置

海洋乱流の鉛直微細構造を測定するために、我々は自由浮上型の微細構造測定装置(ターボマップ4)を利用した(写真1)。この装置は、特に沿岸域の浅い水域において海底付近から海水面までの鉛直混合強度を測定するために、2001年に産業技術総合研究所が設計・開発した(長尾ほか, 2004, 2005)。ターボマップ4は、シアプローブ(Lueck et al., 2002)を持ち水平方向流速の鉛直傾度の乱れを計測できるほか、高感度水温計(FPO7)、クロロフィル蛍光強度計、ならびに濁度計、深度計を有している。さらに、加速度計(水平2成分と鉛直1成分)を持ち、自由浮上中の安定性を確認できる。装置内部の空洞により、初期の浮力は正(鉛直上向き)である。そのため、装置を海中に落下させるために、自動切り離し装置に重りを付



写真1 自由浮上型海洋鉛直微細構造測定装置。

けて自由落下させる。自動切り離し装置にはケブラーロープが取り付けられ、ロープに張力がかかると重りが切り離される。装置が一定深度に達したら、このケブラーロープを強く引き、重りを装置から切り離して浮力で自由浮上させた。自由浮上中に装置はサンプリング周波数256Hzで鉛直微細構造のデータを集集する。仮に浮上速度が60cm/sで一定だとすると、鉛直方向の空間分解能は2mmとなる。

乱流によるエネルギー逸散率(ϵ)は鉛直シアのデータにより、式(1)で推定できる(e.g., Crawford and Osborn, 1980)

$$\epsilon = \frac{15}{2} \nu \left(\frac{du'}{dz} \right)^2, \quad (1)$$

ここで、 u' は水平方向の流速の乱れ成分であり、シアプローブで計測される。 z は鉛直上向きの座標、 ν は海水の動粘性係数である。式(1)の上線は、ある水深区間で平均を取ることを示す。本研究では、区間の大きさは2.5mとした。

海洋鉛直微細構造の測定は、位置が決まった観測点では実施せず、漂流ブイに沿った水塊追跡として行った(第1図)。最初に、2005年9月15日11:00に、漂流ブイをP0(N24° 35' 00", E124° 00' 00")に投入した。続いて、水深100m以浅の海洋鉛直微細構造を約30分間隔で、14:00まで取得した。鉛直分布の総数は8である。14:00に漂流ブイはN24° 33' 05.86",



写真2 R2に設置されている海洋レーダ。

E124° 02′ 14.50″に達した。また、この測定時に、水平方向平均流速 U の鉛直分布を ADCP (RDI社製 Workhorse 600kHz)により、層厚1mごとに求めた。

2.3 海洋レーダ

海洋表層の広域水平流速場を観測するために、我々は情報通信研究機構が開発したHF海洋レーダを使用した(井口ほか, 1990; Ohno, 1991; 大野, 1993)。このレーダにより、トカラ海峡、日本海(Ohno, 1991; 大野, 1993)、豊後水道(Takeoka *et al.*, 1995)、大阪湾(Takahashi *et al.*, 2000)で、すでに流動および海象の観測がなされている。このレーダは陸上設置型であり、従来の方法に比べて広範囲の海域観測の省力化を図ることができる。我々はこのレーダシステムを第1図のR1とR2に、2005年8月25日から9月30日まで設置した。写真2は、R2に設置されている海洋レーダを示している。このレーダシステムは長さ60mのフェイズドアレイアンテナを持つ。レーダビームは正面方向から左右に±45°の範囲で電氣的に向きが変えられる。システムは、周波数24.515MHz(波長: 12m)の電波を海面に向かって発信し、最大距離75kmまでの範囲で表層から後方散乱波を受信することができる。そして、約70kmまでの範囲内で、表層流速ベクトル、海洋波のスペクトル、表層の風の向きが、受信信号の周波数解析により測定できる。Steward and Joy (1974)の議論によると、HFレーダが感知する測定深度は表面波の波長の1/13であるとされている。

HF海洋レーダの場合には共鳴する波浪成分の波長が約6mなので、レーダによる流速の計測水深は、約0.45mとなる(土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会編, 2001)。

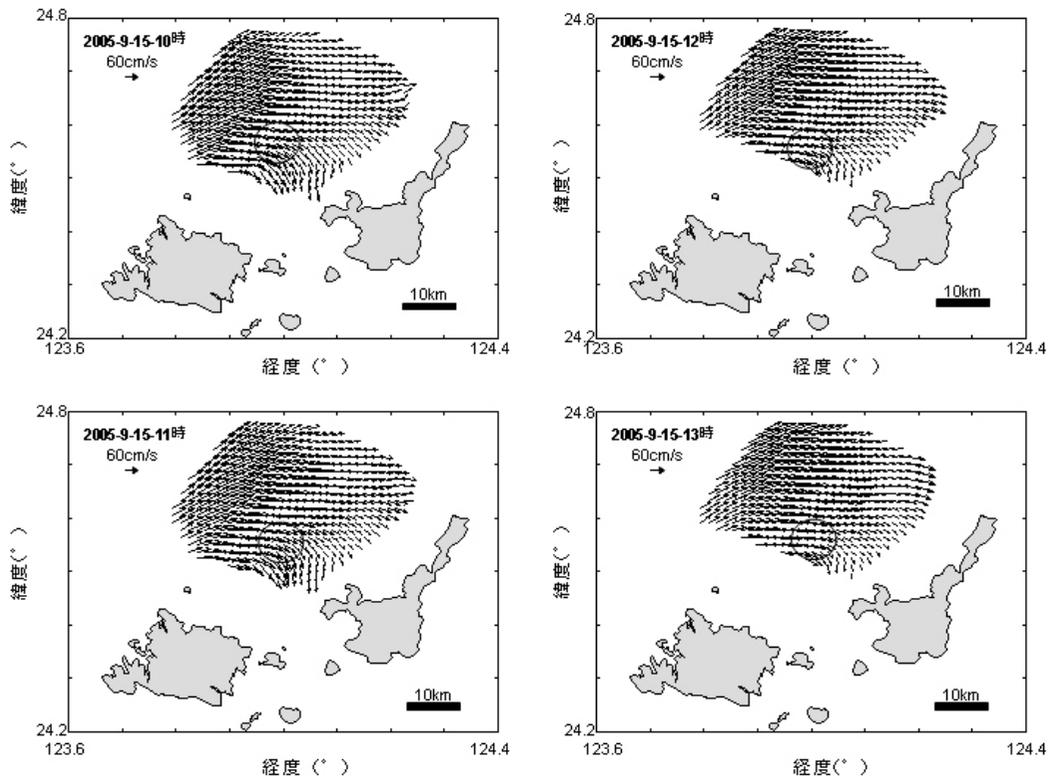
3. 結果と考察

第2図は9月15日の石垣島北部沿岸域での水平流速分布の時間変化を示している。50cm/sを超える南東方向の強い沿岸流が観測されている。この日以外の水平流速分布から、この強い沿岸流が9月中旬だけに現れ、8月下旬と9月下旬には現れなかったことがわかっている。

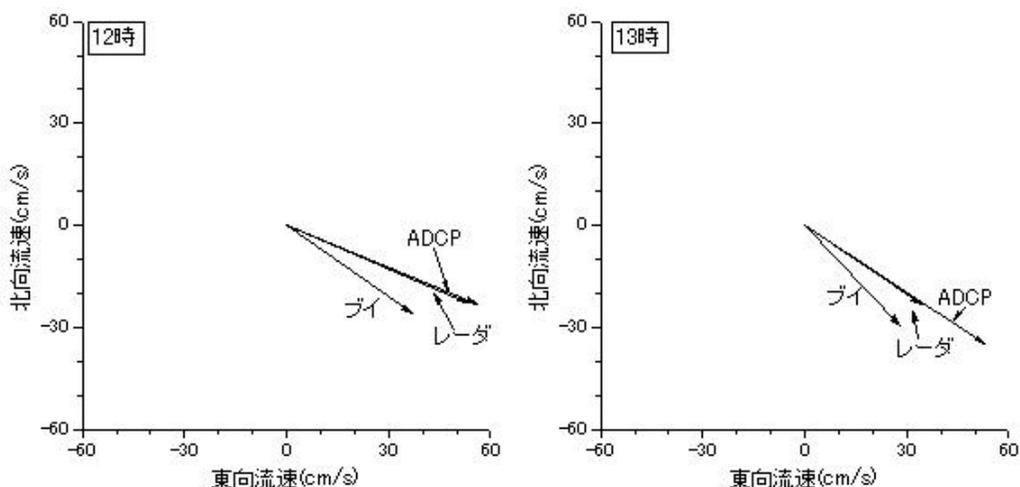
漂流ブイに取り付けたGPSの軌跡を使い、表層流のおよその強さと向きを推定することができる。放流開始地点から回収地点までの流下距離を5km、流下時間を3時間とすると、ブイの速度は47cm/sで向きは133°(南東)であることがわかった。この強い流下速度は、黒潮から分岐した強い沿岸流の存在を示唆する。第3図は、この方法と、海洋レーダおよびADCPで観測された表層の水平流速を比較したものである。ADCPで観測される流速は表層の値ではなく水深2.62mでのものであるが、三つの流速ベクトルはほぼ一致している。したがって、鉛直微細構造測定中に強い沿岸流が存在したことは間違いない。

第4図はターボマップ4の測定値と式(1)から計算された水温とエネルギー逸散率(ϵ)の鉛直分布を示している。これによると、観測中に、海水面から水深7m程度までの水温は時間とともに徐々に上昇した。また、同時にほぼ様な水温を持つ層の厚みが増加し、水温躍層の下端が海底方向に移動していたことがわかる(第4図(b))。また、乱流によるエネルギー逸散率 ϵ の値(第4図(c))が海水面直下で時間とともに増加していること、それと同時に、高い ϵ を持つ層の厚みが時間とともに増大していることがわかる。したがって、海面表層では、熱の供給による水温上昇と、混合による水温一様化が、ほぼ同時に生じたと考えられた。

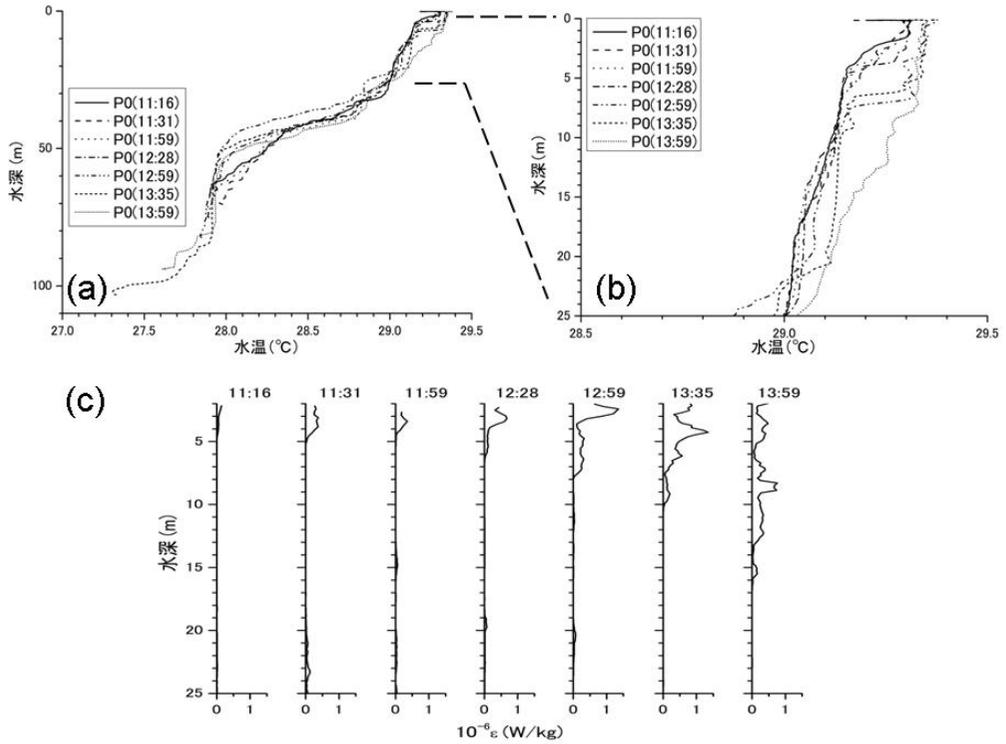
我々は、この表層混合が風により生じたと考えている。第5図は気象庁が西表(第1図のMO1)、石垣(MO2)、伊原間(MO3)で計測した風速ベクトルを示している。たとえば、MO1(西表)では風速は8:00から徐々に増加し14:00に最大6m/sに達した。この傾



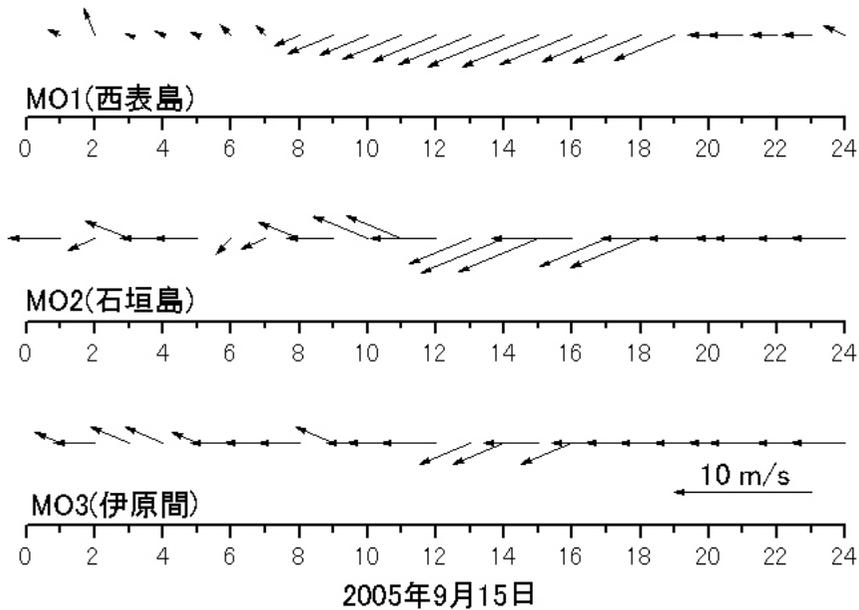
第2図 海洋レーダが捉えた表層流速の平面分布時間変化(2005年9月15日11:00-14:00). ○は微細構造観測水域. 長尾ほか(2007)を改作.



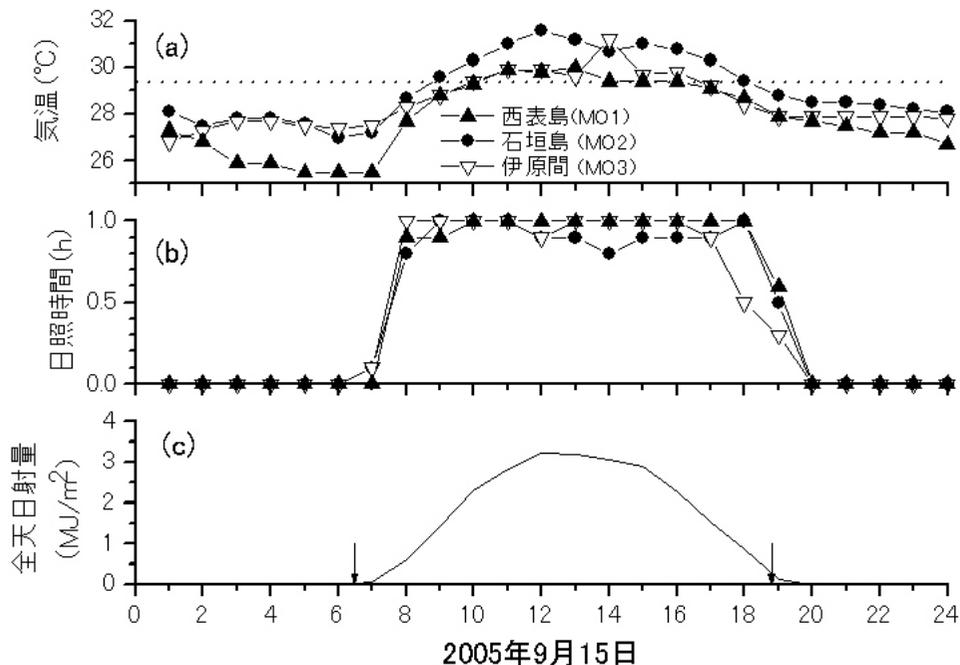
第3図 漂流ブイ, 海洋レーダ, ADCPで得られた表層流速. 長尾ほか(2007)を改作.



第4図 (a) 水温鉛直分布図の時間変化. (b) (a) の水深25m部分を拡大したもの. (c) ϵ 鉛直分布の時間変化. 長尾ほか(2007)を改作.



第5図 西表(MO1), 石垣(MO2), 伊原間(MO3)の風速・風向(気象庁). 長尾ほか(2007)を改作.



第6図 2005年9月15日の(a)気温, (b)日照時間, (c)全天日射量の時間変化. 全天日射量は石垣島観測所(MO2)のみで観測. (a)の点線は29.35°Cを示す. この温度は, 微細構造観測中(11時から14時)の最大と考えられる海洋表面水温. (c)の↓は日の出, 日の入り時刻(海上保安庁). 長尾ほか(2007)を改作.

向は他の気象観測地点でも同様だった. また, 各気象観測地点で, 風速が最大に達したときの風向は北東ないしは東であった. これらの風向は, さきほどのプイの流下方向(南東)とは明らかに異なっている. しかし, 風速が時間とともに増大する様子は, 水温躍層が下方向に移動する様子や, 表層でエネルギー逸散率の高い層が発達していく様子と整合していることから, 風が表層近傍の混合層の発達の原因だと考えられた.

一方で, 海水面を介した熱の出入りがない場合, 風による混合現象は, 密度界面の下にある冷たい海水を暖かい表層混合層に輸送するため, 時間とともに混合層の水温が徐々に下がるはずである. しかし, 今回の観測ではそうならない. むしろ, 表層混合層の水温は時間とともに上昇する. これは, 強い日射が最表層の混合層に熱を与え続けていたためであると考えられる. 第6図は9月15日の気象観測地点の気温変化と日照時間, 全天日射量(MO2の石垣のみ)を示している. 全天日射量の横軸にある下向き矢印

は日の出(06:29)と日の入り(18:48)を示している. 日照時間はある1時間の間に直射日光が地表を照射した時間である. 第6図(b)の日照時間から, 9月15日の石垣島周辺は快晴であり, 海面は十分な日射を吸収していたと考えられた. 日中の西表(MO1)の気温は約30°Cであり, 一方, 海洋鉛直微細構造を測定中(11:00-14:00)の海水面の水温は, 気温より0.65°C低い最大29.35°Cに達した. 前述のとおり, 正の熱の供給が表層混合層に行われない状態で表層混合が起こる場合, 下層から冷たい海水が混合層に入り込むため, 混合層の水温は少し下がるはずである. しかし, 第6図から推察されるように, 今回の計測期間中は大気と日射が表層に十分な熱を供給したので, 表層の混合層が発達している途中においても, 表層混合層の水温が上昇したと考えられた.

4. まとめと今後の課題

海洋表層での流れを海洋レーダで, また, 乱流混

合強度の直接計測を浮上型海洋鉛直微細構造測定装置で同時に計測した。その結果、流速が約50cm/sに達する強い沿岸流を捉えることができた。一方で、海水面近傍で水温の上昇と層の一様化が起きていること、同時に表層近傍のエネルギー逸散率 ϵ も増大するとともに、 ϵ の増大が海水面直下に広がっている様子が捉えられた。また、 ϵ の増大が海面表層に限られること、観測時間帯は風が一定方向に吹き続けていたことから、この混合層の発達を起こすエネルギーは沿岸流ではなくて風から供給されていることが推定された。今後は、岸の影響を受けにくい沖合側に観測点を伸ばし、観測時間を長めにとって同様の観測を行いたいと考えている。

謝辞：本研究の遂行にあたって、環境省国際サンゴ礁研究・モニタリングセンターからは、野外調査の拠点としての実験室貸与を含め、多大なご支援を賜った。また、西海区水産研究所石垣支所には、敷地内への海洋レーダ設置を認めていただいた。以上記して深甚なる謝意を表す。なお、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤(B)(No.17360240、代表：児島正一郎)、同若手(B)(No.17760414、代表：長尾正之)、および、名古屋大学地球水循環研究センター共同研究(代表：長尾正之、受入教官：森本昭彦)の助成を受けてなされた。また、この小論は産総研 地質情報研究部門 沖縄海域調査検討チーム会議で口頭発表した内容の一部をまとめたものである。発表の機会を与えて下さった会議関係者の方々に感謝する。

(注1) 本小論は、土木学会水工学論文集第51巻に連載された長尾ほか(2007)の一部であることを付記する。

引用文献

- Crawford, W.R. and Osborn, T.R. (1980) : Microstructure measurements in the equatorial Atlantic undercurrent during GATE. *Deep-Sea Res.*, 26A1, 285-308.
- 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会編(2001) : 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 212p.
- 井口俊夫・梅原俊彦・大野裕一(1990) : 短波海洋レーダによる海流と波浪の計測. *海と空*, 66, 191-206.
- Lueck, R.G., Wolk, F. and Yamazaki, H. (2002) : Oceanic velocity microstructure measurements in the 20th century. *J. Oceanogr.*, 58, 153-174.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫(2004) : 瀬戸内海における鉛直混合強度の測定. *海岸工学論文集*, 51, 946-950.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫・千葉 賢・山形陽一(2005) : 英虞湾における鉛直混合強度の測定. *海岸工学論文集*, 52, 341-345.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫・児島正一郎・佐藤健治・森本昭彦・鈴木 淳・渋谷拓郎(2007) : 海洋レーダと海洋鉛直微細構造測定装置による強い沿岸流の表層での混合現象. *水工学論文集*, 51, 1433-1438.
- Nakada, S., Ishihara, Y. and Harashima, A. (2006) : A numerical simulation of sea-surface currents in the Sekisei Lagoon and the coral egg larvae transport. *Proc. 10th Int. Coral Reef Symp.*, 864-871.
- Ohno, Y. (1991) : HF ocean radar observations of ocean current. *J. Com. Res. Lab.*, 38, 377-385.
- 大野裕一(1993) : 通信総合研究所における短波海洋レーダの開発の現状と実験結果. *NAVIGATION (日本航海学会誌)*, no.116, 62-68.
- Steward, R.H. and Joy, J.W. (1974) : HF radio measurements of surface currents. *Deep-Sea Res.*, 21, 1039-1049.
- Takahashi, S., Yuasa, I., Takarada, M., Nadai, A. and Hisaki, Y. (2000) : Observation of tidal and residual circulations in Osaka Bay by HF radar. *La mer*, 37, 145-152.
- Takeoka, H., Tanaka, Y., Ohno, Y., Hisaki, Y., Nadai, A. and Kuroiwa, H. (1995) : Observation of the Kyucho in the Bungo Channel by HF radar. *J. Oceanogr.*, 51, 699-711.
- 田村 仁・灘岡和夫・鈴木庸彦・宮澤泰正・三井 順(2005) : 沖縄・石西礁湖自然再生計画立案のための熱・物質輸送数値シミュレーション. *海岸工学論文集*, 52, 1161-1165.
- Veron, J.E.N. and Minchin, P.R. (1992) : Correlations between sea surface temperature, circulation patterns and the distribution of hermatypic corals of Japan. *Cont. Shelf. Res.*, 12, 835-857.

NAGAO Masayuki, HASHIMOTO Eisuke, TAKASUGI Yoshio, KOJIMA Shoichiro, SATOH Kenji, MORIMOTO Akihiko, SUZUKI Atsushi and SHIBUNO Takuro (2007) : Physical field measurement around the Yaeyama Islands.

<受付：2007年3月27日>