

— 論 文 —

有明海湾奥部における表層低塩分水の水平収束・発散と クロロフィル *a* 濃度の関係 *

柳 哲雄[†]・石井 大輔[†]・屋良 由美子[‡]・日向 博文^{**}・石坂 丞二^{††}

要 旨

有明海湾奥部における低塩分・高クロロフィル *a* 濃度の表層水塊の挙動を CTD・漂流ブイ・HF レーダー・衛星画像観測により調査した。クロロフィル *a* 濃度が高い低塩分表層水塊は、海面下わずか 1 m 程度の厚さしか持たないが、その下の層とは異なった収束・発散構造を持っていた。この薄い表層水塊中の収束・発散構造はクロロフィル *a* 濃度と有意な相関を持っていた。有明海の赤潮発生規模が 1998 年以降大規模化した理由を明らかにするためには、この薄い表層低塩分・高クロロフィル *a* 濃度水塊の挙動特性を明らかにする必要がある。

キーワード：有明海湾奥部，低塩分水塊，高クロロフィル *a* 濃度水塊，赤潮

1. はじめに

有明海湾奥部における赤潮に関して、堤ら (2003) は 1998 年以降赤潮発生規模が大規模化したこと、赤潮発生に対して海面付近における厚さ数 m の低塩分水塊 (高栄養塩濃度，高クロロフィル *a* 濃度) の果たす重要性を指摘した。しかし、この表層低塩分水塊が有明海湾奥部においてどのような挙動特性を示し、その挙動特性がどのように赤潮発生規模の変化と関わるのかは明らかにされていない。

有明海湾奥部には大きな干満差によって干潟が発達し、東京湾や大阪湾など同程度の大きさを持つ他の閉鎖的内湾と比較すると、より強い潮流が卓越している (塚本・柳，2002)。赤潮を形成する植物プランクトンは

流れによって移動する水塊中で増殖・死滅するので、赤潮の発生・消滅機構 (クロロフィル *a* 濃度の増減機構) を定量的に明らかにするためには、水塊を追跡しながら、クロロフィル *a* 濃度の増減に関わる、栄養塩・光 (濁り)・流動条件などを詳細に調査する必要がある。実際には広範囲にわたる潮流流程 (上げ潮流，下げ潮流で水塊が移動する距離) 内で長時間，多数の水塊を同時に追跡して、上述したような調査を行うことは困難である。

一方、石坂 (2004) は、クロロフィル *a* 濃度が定量的には過大評価されるが、時間・空間分解能に優れた衛星画像を用いて、有明海の表層赤潮が解析可能であることを述べている。さらに、有明海では近年 HF レーダーが整備され (日向ら，2005 a)，国土交通省九州地方整備事務局・下関港湾空港技術調査事務所によって、湾奥部の 1 時間ごとの表層流速分布が公開されている (<http://www.ariake-yatsushiro-system.jp/>)。

したがって、水塊を追跡しながら行う現地観測と衛

* 2006 年 7 月 24 日 受領；2007 年 7 月 11 日 受理
著作権：日本海洋学会，2007

† 九州大学応用力学研究所 〒 816-8580 春日市春日公園 6-1
主著者 e-mail address : tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp

‡ 九州大学総合理工学府 〒 816-8580 春日市春日公園 6-1

** 国土技術政策総合研究所 〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1

†† 長崎大学水産学部 〒 852-8521 長崎市文教町 1-14

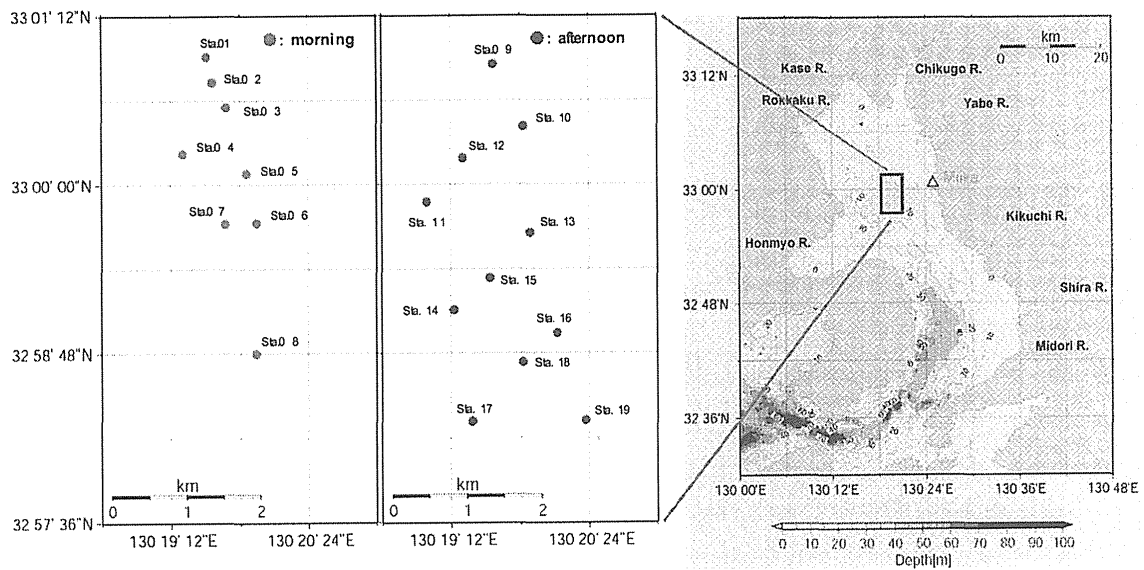


Fig. 1. Observation stations near the Chikugo River mouth in Ariake Bay.

星画像・HF レーダー観測を組み合わせることにより、赤潮発生機構に関して、時間的にも空間的にも密な調査が有明海湾奥部で行える可能性はある。

本研究では、CTD・漂流ブイ・HF レーダー・衛星画像を用いた現地観測により、有明海湾奥部における赤潮発生に関連した、表層の低塩分・高クロロフィル a 濃度水塊の挙動特性を明らかにすることを試みる。

2. 現地観測

現地観測は2005年8月5日(月齢29.6;大潮,晴天), Fig. 1に示す有明海湾奥部において行った。満潮から干潮に至る午前・午後、それぞれ3個のGPS(Global Positioning System)付き漂流ブイ(Fig. 2に示すように海面下2 mに抵抗体ドロークの中心がある)を一辺約1 kmの三角形の頂点に投入し、約3時間追跡して、流速と収束・発散の時間・空間変化を調べた。そして漂流ブイにより得られた流速をHFレーダーにより得られた流速分布と比較検討した。

用いられたHFレーダーはフェイズドアレイ-FMICW型、中心周波数24.515 MHz(長野日本無線株式会社製)で、距離分解能は1.5 kmである。長洲(32°55.05'N, 130°26.31'E)と国見(32°52.34'N, 130°18.22'E)の2局から電波を送受信している。

GPS搭載漂流ブイによる測位誤差は±10 m程度で

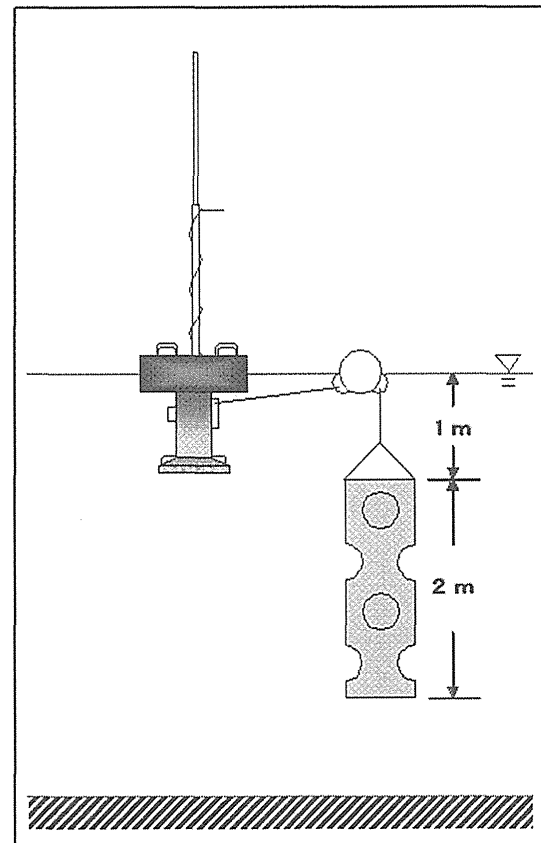


Fig. 2. GPS drifting buoy with the holey sock drogue.

あり、GPS位置情報取得間隔が17分なので、漂流ブイによる流速測定誤差は±1.0 cm s^{-1} 程度である(石

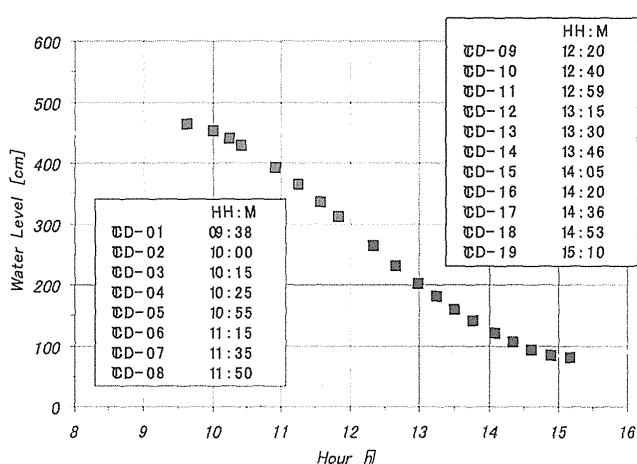


Fig. 3. Tidal variation at Miike Harbor and the times of CTD observation on 5 August 2005.

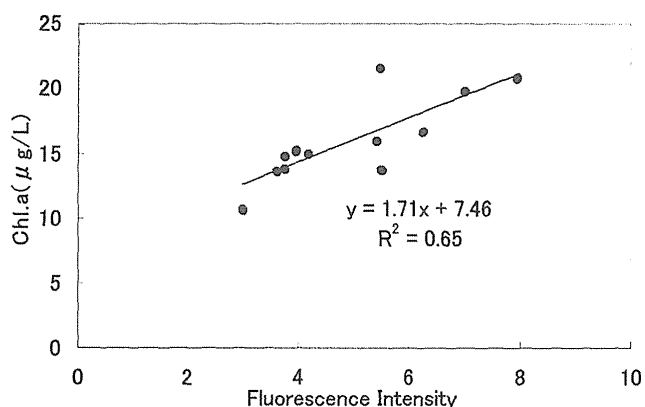


Fig. 4. Relation between chlorophyll a concentration and fluorescence intensity 0.5 m below the sea surface.

井ら, 2007)。また, HF レーダーによる流速測定誤差は $\pm 4.8 \text{ cm s}^{-1}$ 程度である (日向ら, 2005b)。

さらに, 漂流ブイを追跡しながら, 約 20 分間隔で計 19 点 (Fig. 1 中の Stas. 1~19) において蛍光光度計付き CTD (COMPACT-CTD, アレック電子社製) を投入し, 0.1 m 間隔で水温・塩分・蛍光強度の鉛直分布を観測するとともに, 表層海水を採取し, 直ちに船上で孔径 $0.7 \mu\text{m}$ の GF/F フィルターを用いて濾過し, クロロフィル a 濃度計測用のサンプルを得た。フィルターはアルミ ホイルに包んで冷蔵し, 研究室で蛍光法 (古谷ら, 1996) によりクロロフィル a 濃度を計測した。Fig. 3 に三池港の潮汐変化と午前・午後の各点における CTD 観測時刻を示す。

Fig. 4 に CTD 搭載の蛍光光度計により測定された

蛍光強度とクロロフィル a 濃度分析値の検定直線を示す。両者は良い相関関係 (相関係数 = 0.81) を示している。以下この論文では, この検定直線を用いて蛍光光度計による読み取り値をクロロフィル a 濃度に換算してその分布を示す。

3. 観測結果

午前と午後の観測により得られた海面下 0.3 m 層の水温・塩分・密度・クロロフィル a 濃度の水平分布を Fig. 5 に示す。午前より午後の方がクロロフィル a 濃度が高く, 午後の観測において観測海域南部に高温・低塩分・低密度・高クロロフィル a 濃度 (最大約 $20 \mu\text{g L}^{-1}$) の水塊が存在していた。午前と午後の観測海域中央線に沿った水温・塩分・密度・クロロフィル a 濃度の鉛直断面分布を Fig. 6 に示す。午前・午後ともに, 海面下 5 m 付近に主塩分・密度躍層が存在していた。午後の観測時, 観測海域南部に見られた低塩分・高クロロフィル a 濃度水塊は海面下厚さ 1 m と非常に薄かった (測定間隔は 0.1 m)。この低塩分・高クロロフィル a 濃度水塊の中心部 Sta. 18 における水温・塩分・密度・クロロフィル a 濃度の鉛直分布を Fig. 7 に示す。海面下に厚さわずか 1 m の低塩分・低密度・高クロロフィル a 濃度の水塊が存在している。ここでのクロロフィル a 濃度は海面下 0.9 m で最大 $30 \mu\text{g L}^{-1}$ に達していた。

水産庁・九州漁業調整事務所による「九州の赤潮」によれば, この時期, 佐賀県海域では *Gymnodinium sanguineum* と *Ceratium furca*, 福岡県海域では *Ceratium furca* と, いずれも渦鞭毛藻の赤潮が発生していた (<http://ay.fish-jfrca.jp/ariake/gn/index.asp>)。

Fig. 8 に午前・午後の観測における 0.5 m 層の塩分とクロロフィル a 濃度の相関関係を示す。午前中は, 塩分とクロロフィル a 値の間に有意な相関は見られないが, 午後は低塩分ほどクロロフィル a 濃度が高くなっている。午前と午後で, 塩分とクロロフィル a 濃度の相関が異なる理由としては 1) 低塩分水塊に含まれていると思われる筑後川起源の栄養塩を使って, 午前中は日照時間不足で有意な相関は見られなかったが, 午後になり十分の日照時間の後, 植物プランクトンが増加して, 塩分とクロロフィル a 濃度に良い相関がみられ

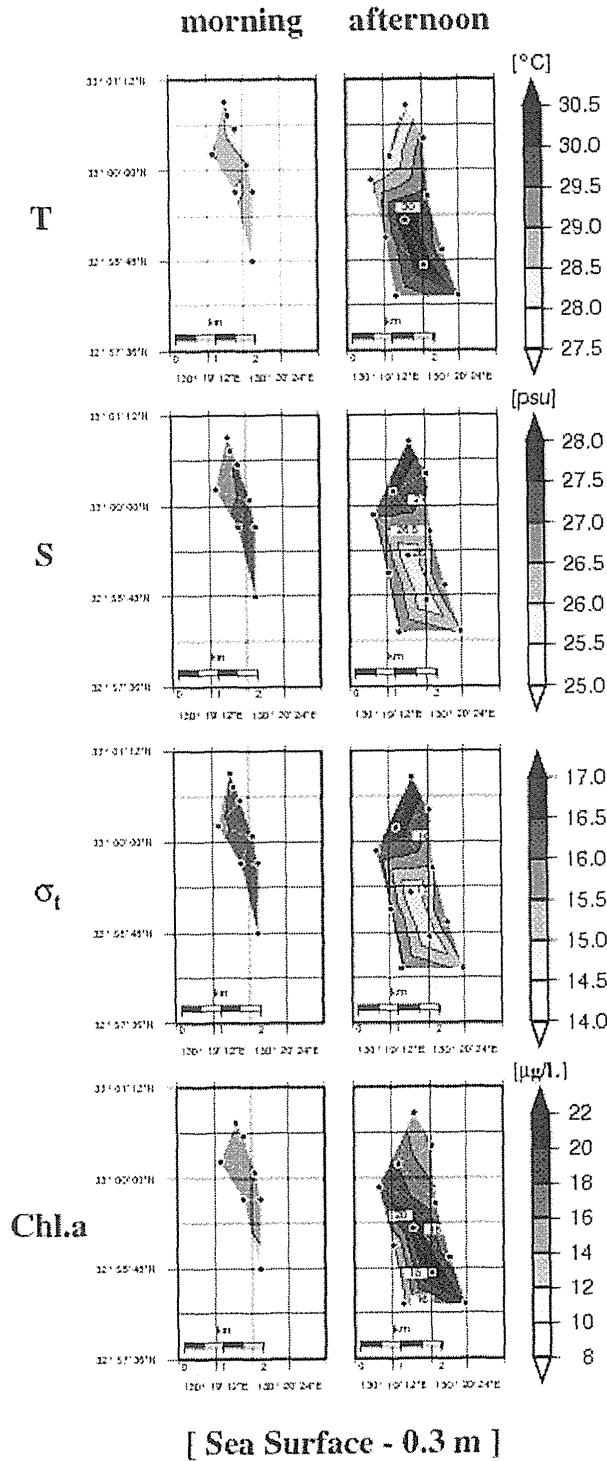


Fig. 5. Horizontal distributions in water temperature, salinity, density (σ_t) and chlorophyll *a* concentration 0.3 m below the sea surface in the morning (left) and afternoon (right) on 5 August 2005.

るようになった, 2) 渦鞭毛藻が午後になって表層の低塩分水塊に鉛直移動してきた, ことが考えられる。し

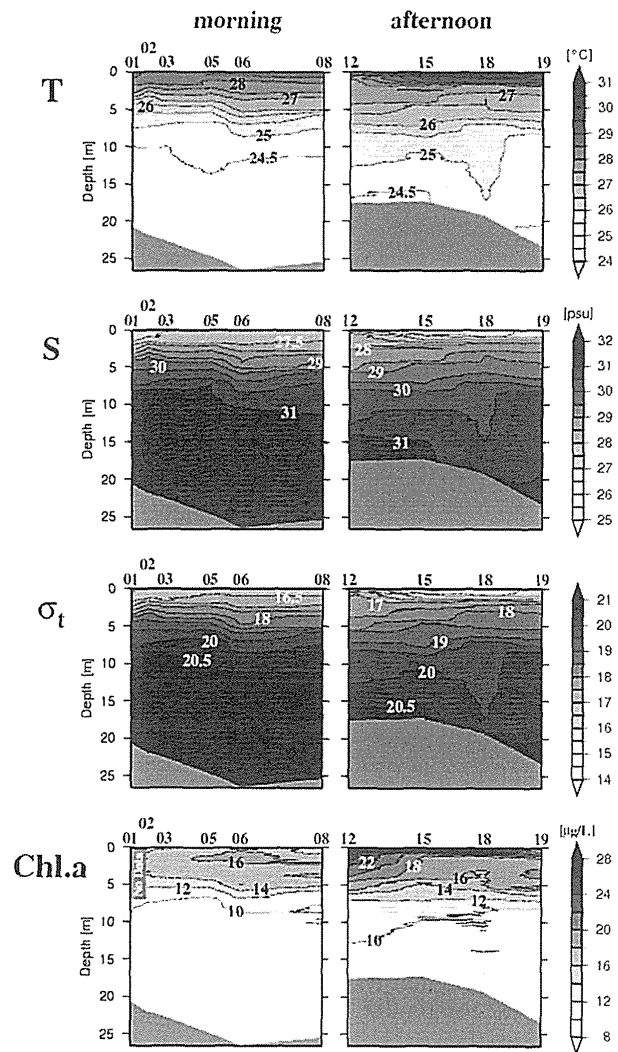


Fig. 6. Vertical distributions in water temperature, salinity, density (σ_t) and chlorophyll *a* concentration along the center line in the morning (left) and the afternoon (right) on 5 August 2005.

かし, 渦鞭毛藻が低塩分水塊を好むという報告はないので, 現在のところ, 理由はよくわからない。

漂流ブイを用いた午前と午後の流動観測結果を Fig. 9 a), b) に示す。図中には約 17 分ごとのブイの位置と 3 台のブイにより形成される三角形の面積が破線で印してある。午前は次第に南向きの流速を増加させながら, 午後は南向きの流速を減少させながら, とともに南東方向にブイは流れた。

3 台の漂流ブイにより得られた 1~3 m 層の流速を 1 時間平均して得られた東方・北方成分流速を, HF レーダーにより 1 時間ごとに得られていて, 1.5 km の水平

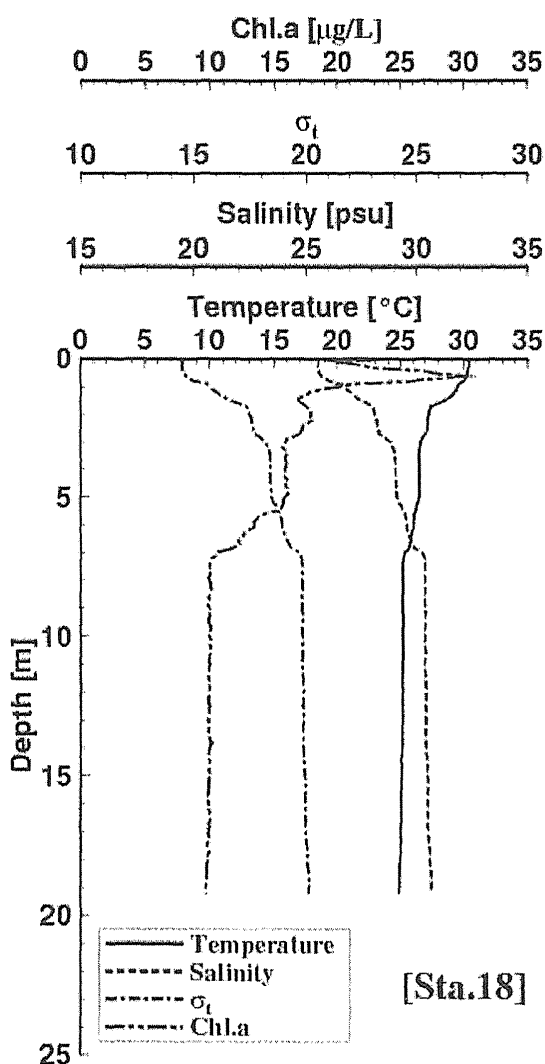


Fig. 7. Vertical profiles of water temperature, salinity, density (σ_t) and chlorophyll *a* concentration at Sta. 18 on 5 August 2005.

スケールで平均された、0~1 m 層の東方・北方成分流速と比較したものを Fig. 9 c), d) に示すが、両者はほぼ一致している。

HF レーダーにより観測された午前 (10:00) と午後 (14:00) の流速ベクトル分布を Fig. 9 e), f) に示す。有明海湾奥部全域で下げ潮流となっていた。

3 台の漂流ブイが形成する三角形の面積 (1 辺約 1 km) の時間変化から求めた海面下 1~3 m 層の収束・発散値の 1 時間ごとの時間変化と、漂流ブイの流れた海域における HF レーダーによる流速値 (1.5 km の水平スケールの平均) から求めた海面下 0~1 m 層の収束・発散値の 1 時間ごとの時間変化を比較したものを Fig. 10

a) に示す。表層混合層内で水柱が鉛直的に同様な収束・発散構造を持つ場合、HF レーダーによる収束・発散値は、 $1.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の精度で、観測水深の異なる漂流ブイによる収束・発散値とよく一致することがすでに明らかにされている (石井ら, 2007)。Fig. 10 a) によると、HF レーダーにより観測された海面下 0~1 m 層は午前・午後とも発散していて、その平均値は $2.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ であるが、漂流ブイにより観測された海面下 1~3 m 層では午前は収束、午後の 15 時は発散している。午前・午後の観測期間は下げ潮時で、約 6 時間の間に平均水深 25 m の海域で約 4 m の海面降下があったので (Fig. 3), 水柱平均としては潮汐によって $7.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (4 m / 25 m / 6h) の水平発散があったはずである。Fig. 10 a) によると、海面下 0~1 m, 1~3 m の収束・発散の絶対値は 10^{-5} s^{-1} の桁で、潮汐による水柱平均の発散値より 1 桁大きい。

以上の結果は低塩分・高クロロフィル *a* 濃度の表層 (0~1 m 層) 水塊の収束・発散特性は、亜表層 (1~3 m 層) の収束・発散特性や、潮汐による水柱全体の収束・発散特性とは異なっていたことを示している。

Fig. 10 b), c) に HF レーダー流速観測値から求めた海面下 0~1 m 層の 8 月 5 日の 10:00, 14:00 の収束・発散値水平分布を示す。ブイが漂流していた有明海湾奥部の低塩分水塊の発散域は 5~10 km の水平スケールを持っていたことがわかる。b) と c) を比較すると、収束・発散の位置は少し異なっているが、その水平スケールはほとんど変化していない。

このような表層水の収束・発散水平分布は河川水の拡がり、水平・海底地形、海上風の渦度などによって決まると考えられるが、その詳細な機構は今後の研究課題としたい。

Fig. 10 d) に HF レーダー観測海域に対応した海域における 8 月 5 日 10:59 JST の海面画像 (JAXA (宇宙航空研究開発機構) で処理した NASA の TERRA/MODIS) を示す。水平分解能は 1.1 km である。観測海域南部に最大約 $8 \mu\text{g L}^{-1}$ に達する高クロロフィル *a* 濃度領域が存在している。衛星によるクロロフィル *a* 濃度の観測値の高い海域の値、約 $8 \mu\text{g L}^{-1}$ は Fig. 5 に示した 10:55 の Sta. 5 の表層クロロフィル *a* 濃度観測値約 $14 \mu\text{g L}^{-1}$ の約半分となっている。衛星からのクロロフィル *a* 濃

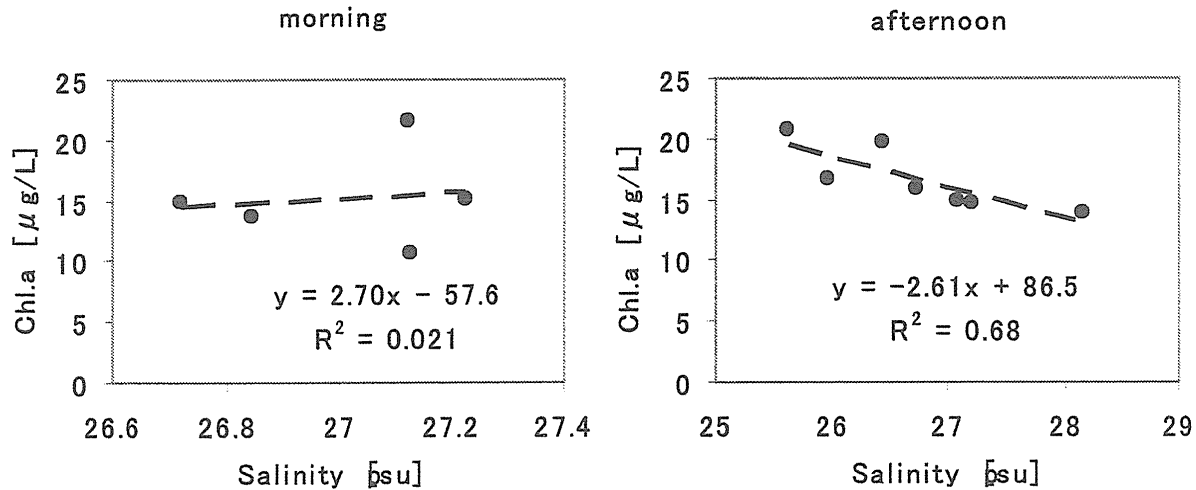


Fig. 8. Correlation between salinity and chlorophyll *a* concentration at 0.5 m depth in the morning (left) and afternoon (right) on 5 August 2005.

度観測値は過小評価になっていて、絶対値としては正確ではない。しかし、従来の有明海における衛星画像を用いた研究(石坂, 2004)をもとに, Fig. 10 d)はクロロフィル *a* 濃度の相対的な水平分布を捉えていると判断して、以後の解析を行う。

Fig. 10 d) によると、クロロフィル *a* 濃度のパッチ構造の水平スケールは 5~10 km で Fig. 10 b), c) に示した水平収束/発散域の水平スケールとよく対応している。しかも、10:00 の水平発散域は低クロロフィル *a* 域、水平収束域は高クロロフィル *a* 域とほぼ対応していて、表層水の収束・発散構造が植物プランクトン濃度に影響を与えていることを伺わせる。そこで、太陽光を得て植物プランクトンが増殖可能な 7:00~10:00 の HF レーダーによる収束・発散の平均値と、衛星により観測された 10:59 のクロロフィル *a* 値の相関を求めてみる。

HF レーダーの各正時の値は前後 30 分間の流速平均値をとっているため、7:00~10:00 の収束・発散平均値は 6:30~10:30 の間の流速値をもとに計算されている。HF レーダーによる流速観測データによると、この海域の中央部において、6:30~8:30 は平均流速 20 cm s^{-1} の上げ潮流で、表層水塊は北北西方向に 1.4 km 移動し、8:30~10:30 は平均流速 14 cm s^{-1} の下げ潮流で、表層水塊は南南東方向に 1 km 移動し、結局、正味の水塊移動距離は 0.4 km となる。HF レーダーの水平分解能は 1.5 km なので、6:30~10:30 の間に移動した水

塊のラグランジュ的な収束・発散値は各メッシュ内で計算可能となる。各点の 7:00~10:00 の平均収束・発散値と、その点に最も近い点の衛星画像により得られた 10:59 のクロロフィル *a* 濃度の相関を計算した。

結果を Fig. 11 に示す。相関係数は 0.58 で、両者の相関は有意である ($p < 0.01$)。Fig. 11 によると、収束域で高クロロフィル *a* 濃度、発散域で低クロロフィル *a* 濃度となっている。このことは、表層低塩分水塊内のクロロフィル *a* 濃度は、表層の水平収束の影響によりさらに高くなることを示していて、表層低塩分水塊の収束・発散構造が赤潮発生機構と関連していることを示唆している。

4. おわりに

今回の観測により以下のことが明らかになった。

- 1) 衛星で観測された表層クロロフィル *a* 濃度分布と HF レーダーで観測された表層 1m の水平収束・発散構造は有意な相関を持ち、植物プランクトンのパッチネス構造には水平収束・発散構造が影響を与えている。
- 2) 表層 1m の水平収束・発散はその下層の水平収束・発散とは異なる構造を持っている。

今回の漂流ブイによる観測は海面下 1~3 m 層の収束・発散の状況しか直接には捉えることが出来なかった。次回は漂流ブイ抵抗体の中心を、Fig. 7 に示した密

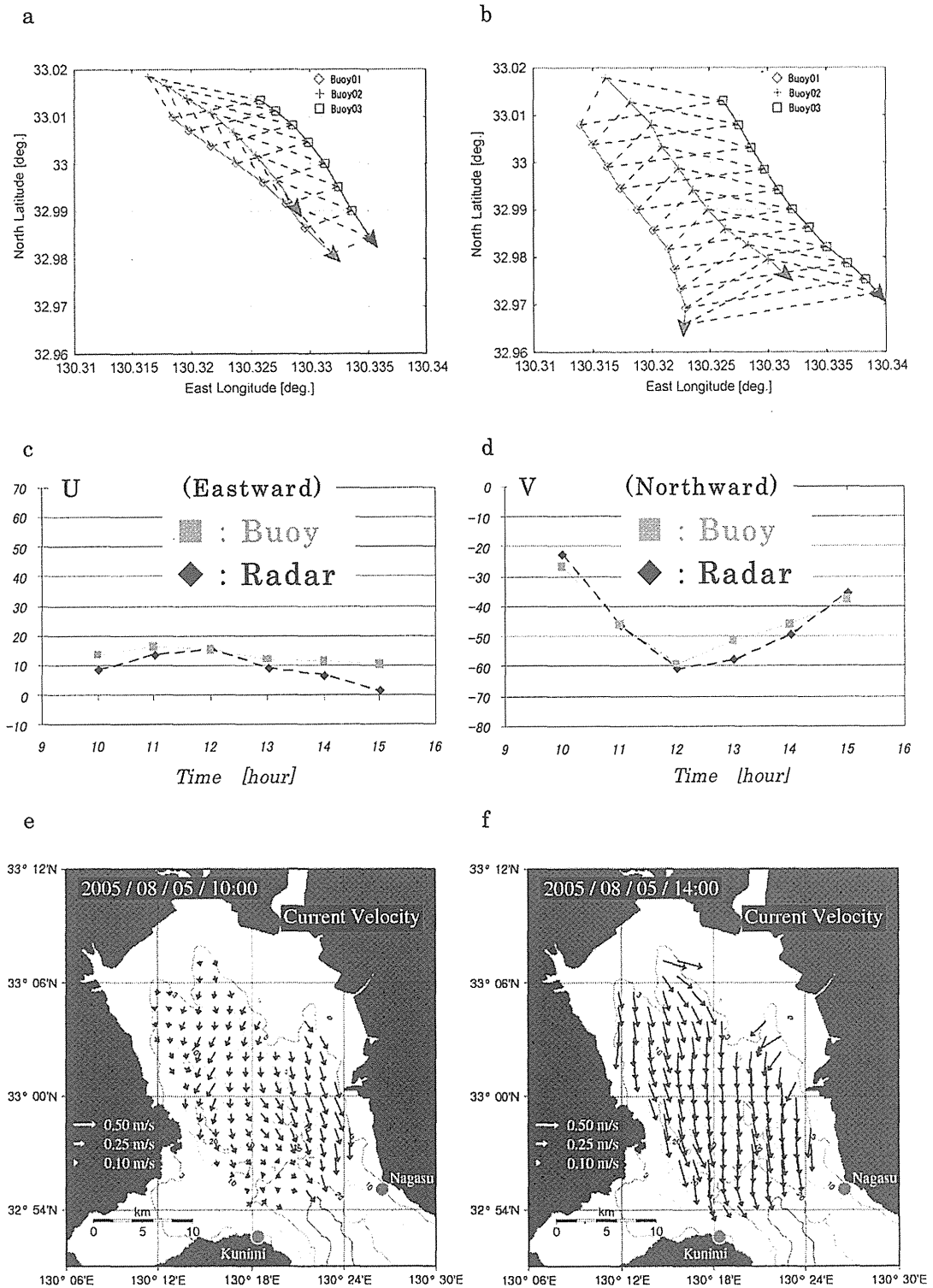


Fig. 9. Results of buoy's tracking in the morning (a) and the afternoon (b), and the comparisons of E-W component (c) and N-S component (d) between buoys and HF radars, and the horizontal distributions of surface velocities observed by HF radars at 10:00 (e) and at 14:00 (f) on 5 August 2005. Two full circles in e) and f) show the HF radar sites.

度鉛直分布をもとに、0.5 m 層 (表層)、4 m 層 (躍層)、8 m 層 (底層) にそれぞれ持つ計 9 個のブイを用いた現

地観測を、上げ潮流時・下げ潮流時、さらに大潮時・小潮時に別々に行って、各層の流動、収束・発散特性と

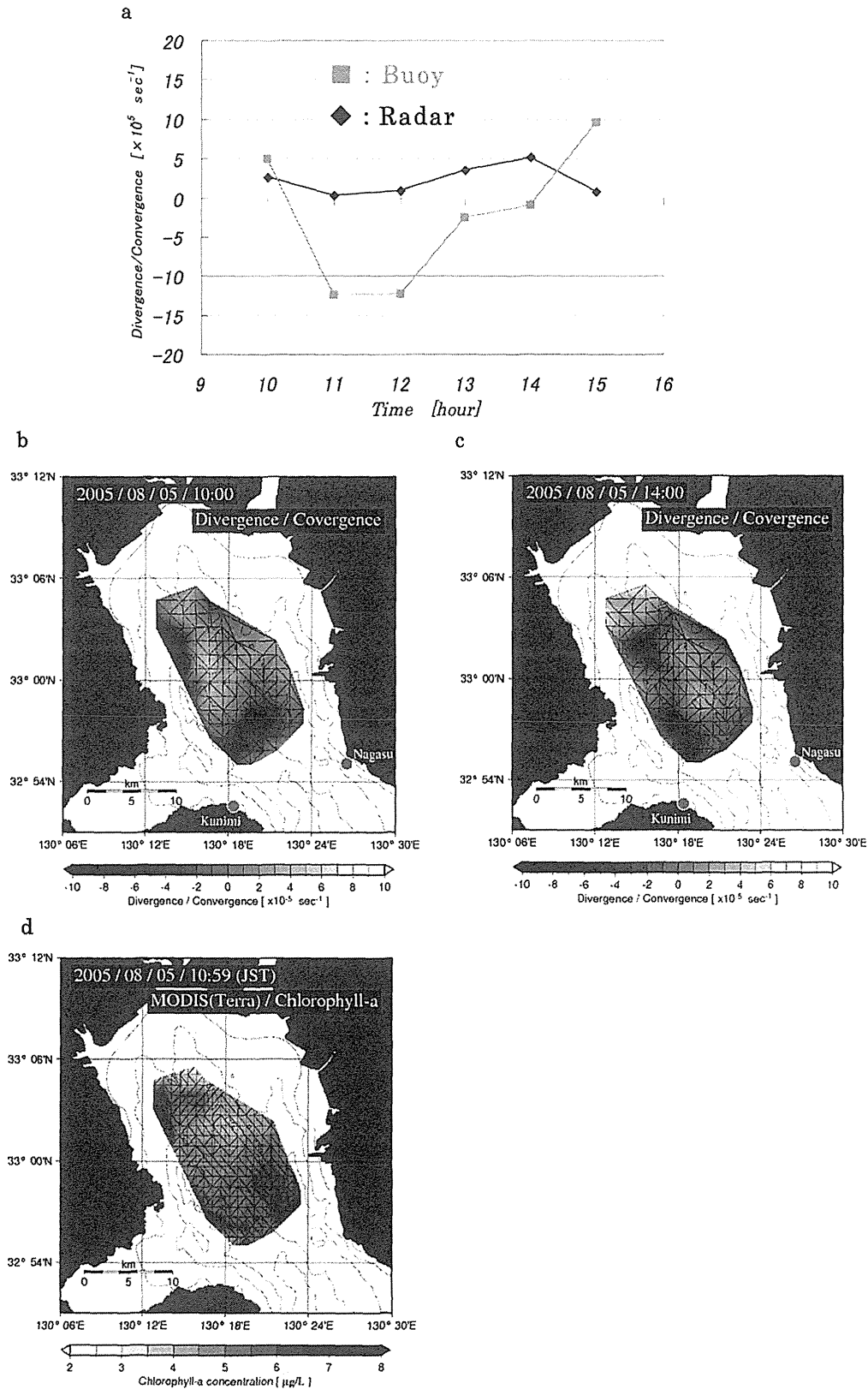


Fig. 10. Comparison of estimated convergence/divergence by HF radars and drifting buoys (a), convergence/divergence field observed by HF radars at 10:00 in the morning (b) and 14:00 in the afternoon (c) on 5 August 2005, and chlorophyll *a* concentration by MODIS obtained at 10:59 in the morning on August 2005 (d).

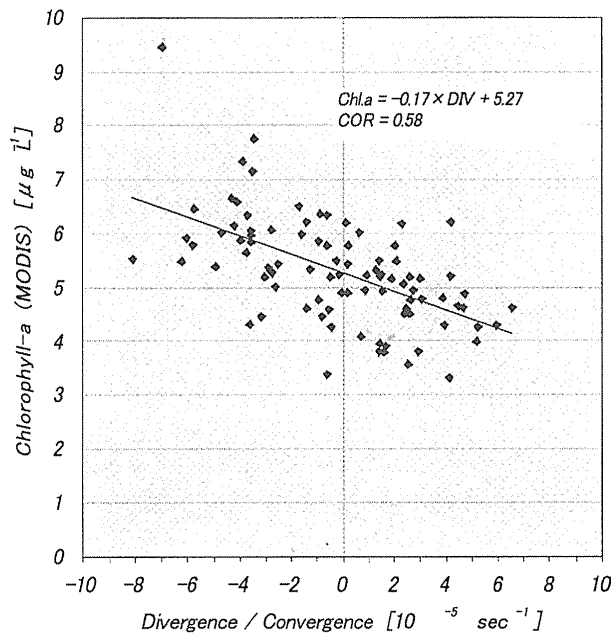


Fig. 11. Correlation between averaged divergence/convergence from 7:00 to 10:00 and chlorophyll *a* at 10:59.

表層低塩分・高クロロフィル *a* 濃度水塊の挙動特性の関係を明らかにしたいと考えている。

貴重なコメントを頂いた査読者に感謝する。

References

- 古谷 研・岸野 元彰・川崎 清 (1996): 校正・検証のためのトールステータ取得マニュアル. 蛍光法によるクロロフィル *a* の測定, NASDA/EORC OCTS Technical Memorandum, 10-12.
- 日向 博文・吉田 秀樹・中川 康之 (2005 a): HF レーダーによる冬季有明海湾奥部の表層流況観測. 2005 年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 130.
- 日向 博文・金津 伸好・佐藤 健治・松岡 建志・藤井 智史・高尾 敏幸 (2005 b): HF レーダーによる東京湾の M_2 潮流観測. 沿岸海洋研究, **43**, 51-60.
- 石井 大輔・柳 哲雄・吉川 裕・増田 章 (2007): 漂流ブイと海洋レーダーを用いた対馬海峡における表層収束・発散場の評価. 海の研究, **16**, 237-251.
- 石坂 丞二 (2004): サテライトから見た有明海の赤潮動態. 沿岸海洋研究, **42**, 43-46.
- 堤 裕昭・岡村 絵美子・小川 満代・高橋 徹・山口 一岩・門谷 茂・小橋 乃子・足立 貴浩・小松 利光 (2003): 有明海湾奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係. 海の研究, **12**, 291-305.
- 塚本 秀史・柳 哲雄 (2002): 有明海の潮汐・潮流. 海と空, **78**, 31-38.

Behavior of Surface Water with Low Salinity and High Chlorophyll *a* Concentration in the Head of Ariake Bay and its Relation to Surface Divergence

Tetsuo Yanagi ^{*}, Daisuke Ishii ^{*}, Yumiko Yara [†], Hirohumi Hinata [‡], and Joji Ishizaka [§]

Abstract

The characteristic behavior of surface water with low salinity and high chlorophyll *a* concentration in the head of Ariake Bay, was elucidated by intensive field observations using CTD, drifting buoys, HF radars and satellite images. Such surface water mass has only 1 m thickness and has a different divergence/convergence character from that in the lower layer. Such a divergence/convergence character has a close relation to the chlorophyll *a* concentration, that is, the high chlorophyll *a* concentration area coincides with the surface convergence area.

Key words: Head of Ariake Bay, high chlorophyll *a* water mass, low salinity surface layer, red tides, surface convergence

(Corresponding author's e-mail address: tyanagi@riam.kyushu-u.ac.jp)

(Received 24 July 2006; accepted 11 July 2007)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

^{*} Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

[†] Department of Earth System Science and Technology, Kyushu University, 6-1 Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

[‡] National Institute for Land and Infrastructure Management, 3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826, Japan

[§] Department of Fisheries, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo, Nagasaki 852-8521, Japan