2007年有明海赤潮発生時の広域表層流動特性

EXTENSIVE SURFACE CURRENT CHARACTERISTICS AT THE TIME OF RED TIDE EVENT IN ARIAKE BAY IN 2007

坂井伸一¹・多田彰秀²・坪野考樹¹・松山昌史³・吉井匠⁴・中村武弘⁵ Shin'ichi SAKAI, Akihide TADA, Takaki TSUBONO, Masafumi MATSUYAMA, Takumi YOSHII and Takahiro NAKAMURA

¹正会員 工博 電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
²正会員 工博 長崎大学教授 工学部 (〒852-852 長崎県長崎市文教町1-14)
³正会員 工博 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
⁴正会員 工修 電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
⁵正会員 工博 長崎大学教授 環境科学部 (〒852-852 長崎県長崎市文教町1-14)

Relationship between the two red tide events in Ariake Bay in August 2007 and the coastal current was investigated mainly by using surface current data with DBF ocean radars and the particle tracking simulation at the surface. In consequence, it was estimated that the first red tide disappeared due to the increasing vertical convection through the tidal mode change, even though the daily mean surface current flew northward where there were abundant nutrients near river mouths. While in case of the second red tide, it was estimated that the supply of nutrients from the bottom hypoxic water contributed to red tide growth, because the horizontal surface current pattern showed the gravitational circulation at Isahaya Bay, which assisted the growth of the oxygen-deficient water at the bottom layer. As a result of the particle tracking simulation, the amount of 82% particles remained in the analysis area after 48 hours run at the spreading mode of red tide, while only 36% particles remained at the vanishing mode of red tide.

Key Words : Ocean radar, surface current, red tide, Chattonella, Ariake Bay

1. はじめに

生態系の保全の面でも社会的関心が高い有明海では、 近年赤潮による漁業被害が頻発している. 国や大学等の 研究機関によって、赤潮発生機構の解明へ向けて精力的 な調査が実施されているが^{1),2)},範囲や項目,および時 期が限定的であり、未だ十分に解明されるに至っていな い.特に、赤潮が広域化する場合には、流動場との関連 性が重要になると考えられるが、広域流動に関する調査 データの不足から、海域流動場との物理的関連性に着目 した研究事例はほとんど見られない. 有明海の水質形成 に大きな影響を及ぼす河川流動や残差流の広域流動特性 に関して、田中ら³は、3次元数値シミュレーションによ り、湾奥では潮流による鉛直混合が大きいことにより、 エスチュアリー循環は形成されないと報告している. 一 方、大串ら4は、2005年夏季から2006年春季にかけての3 回(各1日)の現地観測により、いずれの日平均残差流 パターンとも,水平密度差による「表層流出,底層流 入」のエスチュアリー循環になると報告しており,基本 的な流動特性を例にとっても,未だ不明な点が多く残さ れている.

本研究では、有明海湾奥部で大発生した2007年8月の ラフィド藻シャトネラ赤潮を対象に、DBF海洋レーダ⁵⁰に よる観測データから求めた広域表層流動場と赤潮の広域 化との関連性について検討することを目的とする.

2. 現地観測の概要

長崎県雲仙市瑞穂町(以降,瑞穂局)と熊本県荒尾市 蔵満(以降,荒尾局)にDBF海洋レーダを設置し,2005 年から2008年にかけて,表層流動場の長期観測を実施し た.本研究で対象とした2007年8月における観測範囲を 図-1に示す.流動分布は,500mの格子データとして得ら れ,15分毎に更新される.ただし,8月上旬は機器のト ラブルが発生したため,8月11日から31日までの結果を 用いた.また,赤潮の発生状況の詳細を調べるために,



図-1に示した測点M0~M3において、多項目水質計(JFE アレック電子製)を用いて、水温、塩分、Chl-a、D0を 測定した.各測点の水深は順に8m、14m、9m、7mである. 観測は、2日に1度、一定の時間帯(9:30~10:30)に実 施した.また、DBF海洋レーダの両設置局において、風 向・風速、降雨量、日射量等の気象項目を測定した.た だし、Chl-aについては、検定用のデータを取得してい なかったため、多田ら⁶⁰が、2008年7月29日~8月13日に M0~M3測点において取得した検定データから検定曲線を 求め、その回帰式に基づいて値を変換した.よって絶対 値については留意しなくてはならないが、2008年も2007 年同様、ラフィド藻類シャトネラが、渦鞭毛藻類、珪藻 類に対して支配的であったことを確認している.

3. 赤潮の発生状況

有明水産振興センターの調査結果"によると、シャト ネラ赤潮は2007年8月1日に発生し、7日には湾奥西部全 域に拡大して11日頃までその勢力を維持し、その後14日 頃には一旦終息した.しかし、20日に再び全域に拡大し、 26日頃までその状態が続き、27日にほぼ終息、28日には 完全に終息した.新井⁸⁰は、通常、梅雨明け後は珪藻類 の赤潮によって大半の栄養塩が消費されてしまうが、こ の年は8月2日に大分県を通過した台風5号の影響による 大雨などで栄養塩が残存し、その後の好天によって海面 温度が平年よりも2℃程度高くなり、シャトネラの増殖 に適した環境(水温23~26℃、塩分29~31)が整ったこ となどが大発生の要因であると述べている.

大浦の潮位,瑞穂局の風速・風向(10分間平均,風向 は北から時計回りを正),累積日日射量,および累積日 降雨量と諫早潮受け堤防からの累積日排水量を図-2に, 諫早湾内の測点M3の水質調査結果を図-3に示す.図-2よ り,8月前半の有明海北西部を中心とする赤潮発生の過 程では,2日から4日にかけてのまとまった雨により大量



図-2 大浦の潮位,瑞穂の風速,累積日日射量,および累 積日降雨量と潮受け堤防からの累積日排水量

の栄養塩が筑後川等から供給されていると考えられること、さらに海域全体へ赤潮が拡大していく7日にかけて、 中潮から小潮へと変遷する時期となっており、風も比較 的弱く、海水の鉛直混合や水平拡散が小さい時期に重 なっていること、ならびに拡大期の5日から12日にかけ ての累積日日射量が多いなど、植物プランクトンが大量 発生する条件が揃っていることが確認できる.日射量に ついては、鯉渕ら¹¹が植物プランクトンが増殖する条件 と述べた20MJ/m²/dayを越えているとともに、前半の発 生時には水深2mあたりまで高温低塩分の成層が発達して いる.図-3より、表層のDOは5日から上昇を始め、7日か ら9日にかけて10mg/Lを越えた過飽和となり、底層では5 日過ぎから低下をし始めている.これは、表層で発生し た植物プランクトンが光合成によって酸素を供給したこ



図-3 測点M3の水温, 塩分, Chl-a, およびD0の時系列

とによってDOが上昇し、底層では小潮期に鉛直混合が低下したことや躍層の発達で底層への酸素の供給が制限されたためDOが低下したと考えられる.

一方,後半の赤潮発生期間は,前半と同様に小潮期に 当たっており,日平均で1~2m/s程度の南西風が卓越し ている.また,20日,23日,25日と雨が降っているが, 8月前半ほど雨量は多くなく,表層の密度躍層もそれほ ど強くない. Chl-aは,21日~25日にかけて表層~2m層 で200µg/Lを越えるレベルに達しており,特に25日は 2m層の値の方が大きくなり,24日の有明水産振興セン ターの調査結果と同じ傾向となった.このとき,底層の DOは,19日以降低下傾向を示し,M3地点では19日か ら25日にかけて貧酸素状態となっている.

4. 赤潮と日平均流動場との関連性

前半の赤潮消滅期である14日、後半の発生期に当たる

21日の日平均流速分布,および日平均流速から求めた水 平発散と渦度の分布を図-4に示す.水平発散と渦度につ いては,発散を正,反時計回りを正とし,観測データが 半分以上ある領域のみを図化した.

赤潮がまだ最盛期であった11日から13日にかけて、日 平均流は、全体的に10cm/s程度の北向きの流れが卓越し ていたが、消滅期の14日は、東側で南東流が見られるも のの、全体的には11cm/s程度の東北東の流れ場となった。 13日までは2m/s程度の南東風、14日は2m/s弱の南西風と なっており、風速は強くないものの日平均流への影響が 伺える. なお、14日の水平発散場を見ると、北側で発散、 南側では収束となっており、その大きさは最大で10⁴s⁻¹ 程度であった. 渦度については、11日が反時計回りの循 環場となっていたのに対し、14日は逆に時計回りの循環 場となり、その大きさは水平発散と同程度であった。

次に、8月後半の赤潮発生期である21日について見る と、赤潮が再度拡大した19日から21日にかけての日平均 流は、諌早湾から有明海北部中央海域へ向けて10cm/s程 度の北東流が卓越する特徴が見られた.この期間、潮受 け堤防からの排水はないが、19日と21日は1.8m/s程度の 南西風が卓越しており、弱風ではあるものの吹送流が日 平均流の形成に寄与していると考えられる.また、図は 割愛するが、23日と25日の日平均流は、解析領域北部で 弱い反時計回りの循環流、一方諫早湾湾口部を含む解析 領域南部では、23日の日平均流はほぼ0(日平均風速 0.3m/s)、25日は諫早湾湾奥からの10cm/s程度の北東流

(日平均風速1.5m/sの南西風)となった. このとき, 19 日以降のM0~M3において底層が高密度化している.山 ロ・経塚⁹が述べているように、小潮期に鉛直混合が弱 まると有明海湾央部と諫早湾との間の水平密度差に起因 した重力循環流が形成され,表層では軽密度水の流出, 底層では高密度水の流入が起こり、それに伴う底層の成 層化が貧酸素化の進行を誘発している可能性がある.底 層が貧酸素化すると、海底堆積物から鉄などの栄養塩が 溶出・供給されるため、今回のシャトネラ赤潮の発生へ の影響が考えられる.水平発散については、大浦沖を中 心に発散場となっており、渦度は21日~26日にかけて諫 早湾湾口部では時計回り,解析領域北部では反時計回り の循環場となり、その値は大潮期に比べて半オーダー程 度小さくなった. 柳ら¹⁰⁾は, 2005年8月5日の大潮時に諫 早湾沖合において、水質観測、およびGPS搭載漂流ブイ とHFレーダによる表層流動分布の観測を行い、水平発 散・収束のオーダーが10⁻⁵s⁻¹程度であったこと,水平発 散・収束および衛星画像から推定したChl-aの空間ス ケールは共に5~10kmであり,発散域で低Chl-a濃度,収 束域で高Chl-a濃度となったと報告している. 図−4から, 水平発散・収束の空間スケールは5~10km程度とほぼ同 程度であるが、オーダーは5×10⁵~10⁴s⁻¹程度と大きい 点や、赤潮発生域である解析対象域の西部域においては 発散場となっている点など、柳らとの相違点が見られる.



図-4 赤潮消滅期(14日)と発生期(21日)の表層における日平均流速,発散, 渦度の空間分布

前者の相違については、柳らが本海洋レーダと空間分解 能の違うHFレーダを用いていることや、観測当日の風 速場の違いによる影響が考えられる.後者の相違につい ては、本論文では栄養塩のデータがないため詳細な考察 は出来ないが、筑後川の流出による栄養塩を発生要因と する柳らの水平発散場の結果と逆になっていることから、 8月後半は、河川からの栄養塩供給よりも、海底からの 栄養塩供給が主要因となっている可能性が考えられる.

5. 粒子追跡シミュレーション

本章では、表層流動場の変動特性と赤潮との関連性を より詳細に検討するため、粒子追跡シミュレーションを 実施した.本モデルの特徴は、実際の表層流動分布の観 測結果に基づいて非定常に粒子追跡を行う点にある. た だし、今回対象とするシャトネラは、自己遊泳能力があ り、日中は表層、夜間は底層に鉛直移動することが知ら れている. 中野ら¹¹⁾によれば、その鉛直移動速度は1.5~ 2.0m/h (0.04~0.06cm/s) 程度であり、10m程度の水深の 諫早湾であれば、半日で表層から海底まで往復移動でき る.本海域では小潮期においても20~30cm/sの水平流速 があるため、シャトネラが日周運動をした場合において も、水平的にはほぼパッシブトレーサーとして移動する と考えられる.ただし、成層時など鉛直的に水平流速の シアがある場合は、その影響を受ける. 竹之内¹²⁾による 複数年の諫早湾湾口部の断面観測の結果では、夏季の密 度成層強度の違いや水深の違いによって、鉛直方向の水 平流速シアの大きさが変化している.シャトネラの鉛直 移動に関する挙動も不明なため、本研究では、シャトネ ラの鉛直移動に伴う水平流速シアの効果については、影 響が小さいと仮定して解析を進めることとした.

(1) モデルの概要と計算条件

粒子追跡モデルは、乱流拡散の取り扱いに一次マルコ フ連鎖の確率論を用いるもので、海洋学や海岸工学で幅 広く用いられている¹³. モデルの基礎式を以下に示す.

$$\begin{aligned} x_{t_{i+1}} &= x_{t_i} + u(x_{t_i}, t) \cdot \Delta t + u' \cdot \Delta t \\ &+ [\nabla_i u(x_{t_i}, t) \cdot \{u(x_{t_i}, t) \cdot \Delta t\}] \cdot \Delta t \end{aligned} \tag{1}$$

$$u_{t_i}' = \rho u_{t_{i-1}}' + \gamma_{t_{i-1}} \tag{2}$$

$$K = \overline{v^2} \cdot T_* \tag{3}$$

$$\rho = exp\left(-\frac{\Delta t}{T_*}\right) \tag{4}$$

ここで、(1)式は任意の粒子の時間ステップ Δt 毎の移動 量を表し、右辺第一項はiステップの粒子の位置、第二 項は流速uによる移流、第三項は(2)式に示す乱nu'が一 次マルコフ連鎖モデルに従うとしたときの乱流拡散、第 四項は流速の剪断応力による移流である.(2)式において、 ρ は0< ρ <1の定数、 γ は平均0、標準偏差 σ の正規乱数 であり、積分時間スケールについては、坂井ら¹⁴の研究 を参考に、 $T_*=42$ min、拡散係数 $K=5 \times 10^4$ cm²/sとした.

本モデルではDBF海洋レーダの観測データを用いるため、基本的に観測データが元々存在する領域(領域A) 内の粒子に主眼を置くが、潮汐による往復流が支配的な 流動場であるため、その領域を逸脱した粒子についても 軌道を追跡しておく必要がある.そのため、まず500m 間隔の観測データを100m格子に内・外挿し、流速ベク トルのデータ領域を図-1の観測範囲外に領域(領域B) まで拡大した.その際,半径500m内の観測データを元 に,距離の二乗の逆数を重み係数として内・外挿した. ただし,領域Aと領域Bとでは,データの信頼度に差が 生じるため,予備検討を踏まえて,信頼度の高い領域A に多くの粒子が滞留しうる2日間を解析期間とした.ま た,岸の流速は0とし,初期の粒子数に対して,粒子の 追加は行わなかった.タイムステップは,CFL条件など から1分と設定した.解析対象期間は,大潮期かつ8月前 半の赤潮が消滅していく時期である2007年8月11日0時~ 8月13日0時(ケース1)と,小潮期かつ後半の赤潮が発 生している時期である8月23日0時~8月25日0時(ケース 2)の2ケースとした.ケース1は干潮2時間前,ケース2 は満潮3時間前が計算開始時間に当たっている.

I⊠I–5

(2) 計算結果

図-5にケース1とケース2の12時間毎の粒子分布を示す. なお、図中に示した数値は、領域Aにおける初期の粒子 数(957個)に対する各時刻の粒子数を百分率で表示し ており、半日周潮流が卓越する本海域においては、1周 期毎の残存率の意味合いを持つ.ただし、領域Bからの 流入出を考慮するために、初期において領域Bにも均等 に粒子を配置し、結果は領域Aの分布のみを示している ことによって、一時的に100%を越える時刻も見られる.

ケース1では、粒子数が一旦は増加しているが、1日後には解析領域中央の南北に粒子が集積し(残存率64%)、その後分布が東寄りとなって、2日後には36%の粒子が残存する結果となり、赤潮が発生した大浦沖の西部海域





(b) ケース 2 (赤潮発生期) における 12 時間毎の粒子追跡結果(計算開始時刻 2007.08.23 00:00)



には、あまり粒子が集積していない.一方、ケース2の 結果を見ると、1日後にはケース1同様、領域A中央部の 南北に沿って粒子が集積しているが、湾奥に近い北部に その多くが集中している.その後、西部海域に反時計回 りに移動していき、2日後も領域Aの中央部に82%の粒子 が残存していることがわかる.また、12時間目の図を両 者で比較すると、ケース2は粒子の粗密の差が少なく、 水平方向の移流・拡散が小さいことが確認でき、海域表 層の粒子が有明海中央部に位置する領域A内を循環し、 領域から流出しにくい状況下であったことが判明した.

次に、代表的な粒子に対して、個別に1日毎の軌跡を 追跡した.図-6に8月前半の赤潮消滅期の11日、13日、 15日の結果、および後半の赤潮発達期の21日、23日、25 日の結果を示す.領域Aに位置する10個の粒子を5km毎 に選んで色分けし、計算開始位置を白抜き、1日の計算 後の位置をそれぞれの色塗りで軌跡を示した.なお、各 日の計算は、午前中の満潮時を計算開始時刻とした.

前半の11日から13日(中潮~大潮)にかけては日に よって差はあるものの,全体的に各粒子が南南東と北北 西のM₂分潮流の長軸¹⁴⁾にほぼ沿って移動し、最終的には 各粒子とも湾奥側の北方へ移動している.一方,14日を 境に16日(大潮~中潮)にかけては、各粒子とも東から 南東の方へ移動した. 11日~13日の平均風速は南東の風 約2m/s, 14日~16日の平均風速は南西の風約1m/sとそれ ほど強い風ではないものの、これらの粒子の軌跡から、 吹送流の影響を受けていると考えられる.以上の結果よ り、11日から13日にかけて、表層の水平流動場は、栄養 塩が豊富な湾奥へ滞留できる場であったが、大潮期へか けて鉛直混合が強まったことなどで、赤潮は消滅へ向 かったと考えられる、赤潮発生期の21日~25日の結果を 見ると、日によって違いはあるものの、全体的に西から 東へと各粒子は移動している. この期間は、前述のよう に1m/s前後の南西風が継続しており(23日のみほぼ無風 状態),弱風ではあるが吹送流が影響していると考えら れる. また、大潮期前後と比べ、各軌道の移動距離はか なり短くなっており,水平方向の移流・拡散が小さいこ とから、ほぼ同一の水質条件下で滞留することで、赤潮 が増殖しやすい状態を維持していると考えられる.

6. まとめ

DBF海洋レーダによる連続観測結果を基に、2007年8 月の前・後半に発生した赤潮の広域化と表層流動場の関 連性について解析した.その結果、粒子追跡シミュレー ションを通じて、赤潮はいずれも水平方向の移流・拡散 が小さくなる小潮期に拡大することを確認した.小潮期 は栄養塩がほぼ同一の海域に滞留することで、赤潮が増 殖しやすい状態が維持されていたと考えられる.また、 後半の拡大期は, 諫早湾の表層が流出傾向を示しており, これを補償する有明海中央部の高密度水の底層流入によ り,貧酸素水塊が発達し,底層から供給される栄養塩が 諫早湾湾口部の赤潮拡大に寄与した可能性が示された. 海洋レーダ観測と水質モニタリングを組み合わせること で,赤潮の広域化をある程度予知できると考えられる.

参考文献

- (2) 鯉渕幸生, 佐々木淳, 有田正光, 磯部雅彦: 有明海における 水質変動の支配要因, 海岸工学論文集, 50, pp.971-975, 2003.
- 橋本彰博, 関根章雄, 有田正光: 有明海北部海域の水質構造 と赤潮発生に関する一考察, 海岸工学論文集, 52, pp.931-935, 2005.
- 田中昌宏, 稲垣聡, 山木克則: 有明海の潮汐および三次元流 動シミュレーション, 海岸工学論文集,49,pp.406-410,2002.
- 大串浩一郎,速水祐一,濱田孝治,山本浩一,平川隆一:有 明海湾奥部における残差流の分布について,水工学論文集, 51,pp.1469-1474,2007.
- 5) 坂井伸一,平口博丸,松山昌史,坪野考樹,森信人,藤井智 史:広域流動観測のための高性能沿海洋レーダの開発,電 力中央研究所報告U02056,2002.
- 6) 多田彰秀,阿部和也,中村武弘,竹之内健太:2008年夏季に 諫早湾で発生した赤潮および青潮と水質動態の関連について,海岸工学論文集,56,pp.961-965,2009.
- 7) 松原賢,吉田幸史, 久野勝利:2007年度夏季に有明海佐賀県 海域で発生したChattonella赤潮,佐賀県有明水産振興セン ター研究報告, pp.39-47, 2009.
- 8) 新井康平:複数地球観測衛星データによる赤潮分布モニタ リング法,佐賀大学有明総合研究プロジェクト成果報告集, Vol.4, pp.95-98, 2008.
- 山口創一,経塚雄策: 諫早湾における貧酸素水塊の形成機構,海の研究, Vol.15, No.1, pp.37-51, 2006.
- 10) 柳哲雄,石井大輔,屋良由美子,日向博文,石坂丞二: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,海の研究,Vol.17,No.1,pp.39-48,2007.
- 中野拓治、山田耕士、金子俊幸、中嶋雅孝、本城凡夫:有明 海におけるCeratium furcaとChattonella属の日周鉛直運動の特 徴および躍層との関係、水環境学会誌、Vol.29, No.8, Page489-494, 2006.
- 12) 竹之内健太:有明海中央部海域における流動構造に関する 基礎的研究,長崎大学修士論文,83p,2008.
- Awaji, T. : Water mixing in a tidal current and the effect of turbulence on tidal exchange through a strait, J. Phys. Oceanogr., 12, pp.501-514, 1982.
- 14) 坂井伸一, 坪野考樹, 多田彰秀, 染谷真作, 竹之内健太, 水 沼道博: 内湾域における水平流動構造解明に対するDBF海 洋レーダの適用性に関する研究, 水工学論文集, 51, pp.1439-1444, 2007.

(2009.9.30受付)