

— 論 文 —

有明海における透明度の長期的上昇傾向及び赤潮発生との関連*

清本 容子[†]・山田 一來[‡]・中田 英昭[‡]・石坂 丞二[‡]・田中 勝久^{**}・
岡村 和磨[†]・熊谷 香^{‡‡}・梅田 智樹^{‡‡}・木野 世紀^{***}

要 旨

1975年4月から2005年3月までの30年間の浅海定線調査データをもとに、有明海における透明度の長期的上昇傾向を明らかにするとともに、透明度上昇と塩分変動や近年の赤潮発生状況との関連について解析した。透明度年平均値の有意な上昇は、湾奥西部の佐賀県沿岸から諫早湾湾口部に至る海域と、島原沿岸を除く湾中央部及び有明海湾口部で確認され、特に透明度上昇が顕著であった湾奥西部及び湾中央部海域では、近年赤潮が頻発している。季節別に見ると、湾中央部及び有明海湾口部の透明度上昇は周年にわたり認められたのに対し、湾奥西部の透明度上昇は、河川流量が少なく鉛直混合が進行する10~3月の平均値では顕著であったが、河川流量が多く成層が発達する4~9月の平均値では確認されなかった。10~3月の有明海湾奥西部海域における透明度の上昇は、潮流速の低下などに伴い、浮泥の巻き上がりが減少し、海域のSS濃度が低下したことが主な原因であると推察された。4~9月の有明海湾奥部及び湾中央部の熊本県沿岸域における透明度変動は、河川水の影響が大きいことが推察された。また、10~3月の有明海湾奥部では、透明度上昇に伴う植物プランクトンの光制限の緩和が、近年の赤潮頻発の一因となっていることが示唆された。

キーワード：有明海，透明度，長期変動，浮泥，赤潮

1. はじめに

有明海においては、湾奥西部の佐賀県海域や湾中央・湾口部の熊本県海域で経年的に透明度が上昇していること(横内ら, 2005)、特に1990年代後半の透明度上

昇が顕著であり、これと対応して赤潮の発生件数も急増していること(中田・野中, 2003)が報告されている。しかしながら、従来の有明海では、河川から大量に供給される粘土粒子が、大きな潮汐によって高濃度の浮泥となり、この浮泥が河口域において栄養塩や植物プランクトンを凝集・吸着して沈降させる役割を果たしているため、大規模な赤潮の発生はないと考えられてきた(代田・近藤, 1985)。また一般に、沿岸高濁度域においては、海水中の懸濁粒子による光制限が、植物プランクトンの現存量や増殖速度をコントロールする主要因の一つであるとされている(Cloern, 1987)。高濃度の浮泥による凝集・吸着作用や植物プランクトンの光制限は、有明海の赤潮発生を抑制してきた一因であ

* 2007年5月30日受領；2008年5月13日受理

著作権：日本海洋学会, 2008

[†] 独立行政法人水産総合研究センター西海区水産研究所

〒851-2213 長崎市多良町1551-8

主著者 e-mail address : ykiyo@fra.affrc.go.jp

[‡] 長崎大学水産学部 〒852-8251 長崎市文教町1-14

^{**} 独立行政法人国際農林水産業研究センター

〒305-8686 茨城県つくば市大わし1-1

^{‡‡} 福岡県水産林務部水産振興課

〒812-8577 福岡市博多区東公園7-7

^{‡‡} 佐賀県玄海水産振興センター

〒847-0122 佐賀県唐津市唐房6-4948-9

^{***} 熊本県環境生活部水環境課 〒862-0950 熊本市水前寺6-18-1

ると考えられる。

一方、近年の有明海では、赤潮の頻発化及び大規模化が懸念されている(堤ら, 2005; 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会, 2006)。堤ら(2005)は、夏季及び秋季から初冬にかけての有明海奥部における赤潮の発生には、河川水の流入による塩分成層の形成及び表層における栄養塩濃度の上昇が大きく関与していることを報告するとともに、このような環境条件下で発生する赤潮が、近年大規模化した可能性を指摘している。田中ら(2004)は、浮泥の巻き上げの減少による水中懸濁物の減少が透明度の上昇をまねき、海中の光条件を好転させることで赤潮の発生及び発達に関与している可能性を指摘している。環境省有明海・八代海総合調査評価委員会(2006)は、有明海における珪藻赤潮の発生機構に関わる近年の環境要因の変化として、流れの減少、高い透明度及び河川水量の減少等を挙げ、このうち透明度の上昇は、底泥中の珪藻休眠期細胞の発芽機会を増加させることで赤潮増加の原因になり得ると述べている。従って、透明度上昇の原因解明及び透明度上昇と赤潮発生との関連を把握することは、有明海における近年の環境変化を把握する上で重要な課題の1つと位置づけられる(農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 2002; 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会, 2006)。

有明海における透明度上昇には、河川から供給される懸濁物質の量や質の変化、潮流の流速低下による鉛直混合及び浮泥の巻き上げの低下、底生生物の減少に伴う底泥の生物攪拌効果の低下等による海域のSS濃度減少が影響している可能性が高いと考えられているが(中田・野中, 2003; 杉本ら, 2004)、明確な原因解明には至っていない。中田・野中(2003)は透明度の高い外洋水の影響について解析したものの、外洋水の有明海への流入量やその影響割合に近年大きな変化は生じていないと結論している。また、田中ら(2007)は、有明海における最大の流入河川である筑後川からの懸濁物質負荷量と筑後川河口域の透明度との関係について調べ、弱混合により塩分成層が強化される小潮期には、河川の出水に伴う大量の懸濁物質負荷が河口域の透明度に大きな影響を及ぼすものと考えられるが、大潮時には、懸濁物質負荷量と河口域の透明度の間には明瞭

な関係は認められなかったと述べている。

そこで本研究では、有明海における長期モニタリング観測である浅海定線調査のデータ(大潮時の観測値)を用い、諫早湾を除く有明海のほぼ全域を網羅する形で配置されている43定点において、過去30年間の透明度の長期変動を詳細に把握するとともに、代表点において、透明度変動と塩分変動や浮泥の挙動、風の強さとの関連を調べ、透明度上昇の原因について検討を行った。また、近年の赤潮発生状況と透明度上昇との関連についても解析を行った。

2. 材料と方法

有明海における浅海定線調査結果のうち、データが長期間継続して取得されている福岡県海域10点、佐賀県海域11点及び熊本県海域22点の計43点について、1975年4月から2005年3月までの30年間の透明度及び表層塩分の観測値を解析に用いた。各定点の位置及び有明海に流入する一級河川と海底地形の概要をFig. 1に示した。有明海における浅海定線調査は、漁場環境モニタリングを目的として、ほぼ月1回、原則として朔の大潮時に実施されている。調査点の推移や各項目の測定方法の詳細については、横内ら(2005)に記載されている。

各定点において、解析期間中の各年毎の透明度平均値を算出し、平均値の回帰直線の傾きから解析期間中の透明度の上昇幅(単位 m)及び上昇率(単位%)を求めて、長期の変動傾向を把握した。経年変化の有意性の検討は、平均値に対するKendallの順位相関により行った。また、4~9月(河川流量増大及び成層期、ノリ漁期外)と10~3月(河川流量減少及び鉛直混合期、ノリ漁期)の各々の期間の平均値を算出し、年平均値と同様に回帰直線及びKendallの順位相関を求め、季節毎の透明度の長期変動傾向の把握を試みた。

表層塩分値についても同様の解析を行い、透明度変動に及ぼす河川起源の低塩分水の影響を検討した。流入河川の流量変動を把握するため、流量年表の筑後川(瀬ノ下観測所)、菊池川(玉名観測所)、白川(世継橋観測所)及び緑川(城南観測所)の1975年~2003年までの年流量データを使用した。また、透明度変動と風の強

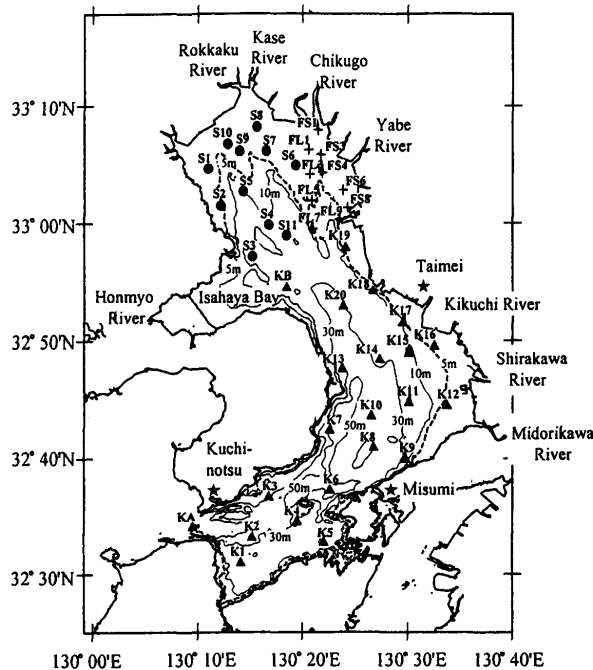


Fig. 1. Location of the monitoring sites in Ariake Bay in Fukuoka (+), Saga (●) and Kumamoto (▲) prefectures. Location of AMeDAS stations (★) and class A rivers were also shown with bottom topography.

さとの関連を検討するため、気象庁 AMeDAS データのうち、熊本県の岱明と三角、長崎県口之津の 1978 年 1 月～2001 年 3 月までの北方成分風の日平均風速データを使用した。これらの AMeDAS 観測点の位置を Fig. 1 に示した。なお、各 AMeDAS 地点における風データの観測条件や北方成分風の算出方法等の詳細は、木谷 (2005) に記載されている。

さらに、九州漁業調整事務所刊行の「九州海域の赤潮」(水産庁九州漁業調整事務所 2001-2007) に記載されている赤潮の発生場所及び継続日数の情報をもとに、浅海定線の各定点における 2000 年 4 月から 2005 年 3 月までの 5 か年間の年平均赤潮報告日数 (日/年) 及び 4～9 月と 10～3 月の平均赤潮報告日数 (日/半年) を計算し、近年の赤潮発生状況と透明度変動との関連を検討した。九州海域の赤潮の別表-4 (赤潮発生状況) に掲載されている赤潮のうち、有明海で発生したものを抽出し、その各々について、表に記載されている発生期間

の日数、別図-1 (月別赤潮発生状況) の地図上に記載されている赤潮発生水域で赤潮が継続していたものとして、浅海定線の各観測点が赤潮発生水域に含まれた日数を推定した。次に、これをもとに浅海定線の各定点における 5 か年間の年平均赤潮報告日数及び 4～9 月と 10～3 月の平均赤潮報告日数を計算し、解析に供した。

なお、九州海域の赤潮の別表-4 (赤潮発生状況) に記載されている赤潮報告は、県からの通報に基づき集計されているものであり、実際の発生件数よりも少ない場合も考えられる。そこで、各県調査機関によって取りまとめられている赤潮調査報告書の結果と、九州海域の赤潮に掲載されている情報の比較を行うとともに、九州漁業調整事務所が毎年夏季～秋季に独自に実施している赤潮飛行観測で視認された赤潮について、別表-4 への記載の有無を調べ、赤潮の通報率を計算することで誤差の検討も行った。

3. 結果

3.1. 透明度年平均値の長期変化

有明海における 1976 年と 2004 年の透明度年平均値の水平分布を Fig. 2 に示す。年平均透明度の最低値は、両年とも筑後川河口の定点 FS1 で観測され、1976 年には 0.5 m、2004 年には 0.4 m であった。最高値は、有明海湾口部で観測され、1976 年には 7.3 m (定点 K2)、2004 年には 10.9 m (定点 KA) であった。透明度は、基本的には浅海域で低く、水深が深くなるほど高くなる傾向にあった (Fig. 1, Fig. 2)。有明海湾奥北部の沿岸域では、両年とも年平均透明度は 1 m 以下と非常に低く、年代による透明度の差は小さかった。ただし、湾奥西部の塩田川河口沖 (定点 S1) では、1976 年の平均透明度が 0.9 m であったのに対し、2004 年には 1.2 m まで上昇していた。また、諫早湾口部では、1976 年には 2.4 m (定点 S3) と 2.8 m (定点 KB) であった透明度年平均値が、2004 年にはそれぞれ 2.9 m と 3.5 m まで上昇していた (Fig. 2)。有明海の湾中央部沿岸域の透明度年平均値は、東岸の熊本県側の荒尾市沿岸 (定点 K19) から緑川河口沖 (定点 K12) に至る海域では、1976 年には 1.5～2.4 m であったものが 2004 年には 2.3～3.3 m と 0.6～1.0 m 上昇していた。宇土半島沿岸 (定点 K9)

では、3.0 m から 6.2 m とさらに顕著な透明度上昇が認められた。一方、西岸の島原半島沿岸の定点 K13 及び定点 K7 では、1976 年と 2004 年の年平均透明度はそれぞれ 4.8 m と 4.6 m 及び 5.8 m と 6.0 m でほとんど差がなかった (Fig. 2)。有明海灣口部周辺 (定点 KA~K4) における透明度年平均値は、1976 年には 5.5~7.3 m であったのに対し、2004 年には 8.5~10.9 m に達している (Fig. 2)。

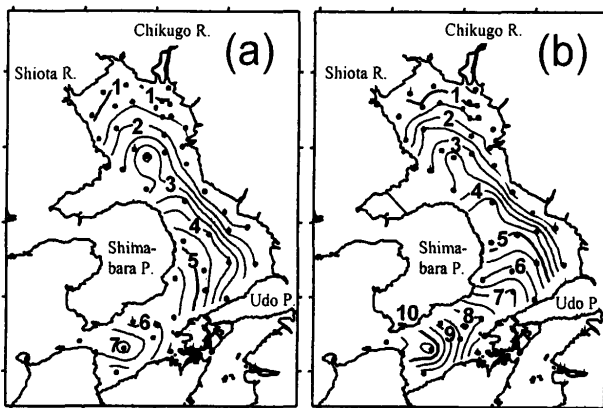


Fig. 2. Annual mean transparency (m) in Ariake Bay during 1976 (a) and 2004 (b).

透明度年平均値の回帰直線の傾きから求めた、各定点における 1976 年から 2004 年までの 29 年間の透明度の上昇幅 (単位 m) 及び上昇率 (単位%) を Fig. 3 に示した。平均値に対する Kendall の順位相関による経年変化の有意性の検定結果も併せて図示した。有明海では、最近 25 年間に湾奥西部海域で最大約 1 m、長洲以南では東寄りの海域で最大 2.5 m 透明度が増加したことが報告されているが (農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 2002), 本研究結果でも、全 43 点中 30 点で透明度年平均値に有意な上昇傾向が認められ、うち 19 点は危険率 0.1% 以下で有意な上昇であった。

透明度の上昇幅が最大となった海域は、透明度が比較的高い熊本県の湾中央部東部海域~湾口部であった (Fig. 3-a)。湾中央・湾口部の各定点では透明度年平均値の年々の変動が大きいため、1970 年代後半から 1980 年代前半にかけては経年的な変動傾向が不明瞭な定点もあるが、

1980 年代後半以降の海域平均透明度は、変動しながらも経年的な上昇傾向を示しており (横内ら, 2005), 大部分の定点で危険率 0.1% 以下で透明度の有意な上昇が認められた。特に、熊本県宇土半島沿岸 (定点 K9) では 29 年間で約 3.6 m (年平均値に対する Kendall の順位相関, $\tau = 0.759$, $p < 0.001$), 湾口部の早崎瀬戸 (定点 KA) では約 2.8 m (同, $\tau = 0.640$, $p < 0.001$) の透明度上昇が認められた。透明度の上昇率で見ると、上昇幅が最大であった宇土半島沿岸の定点 K9 で +159% (29 年間で約 2.6 倍), 菊池川河口沖 (定点 K17) で +97% (同, $\tau = 0.640$, $p < 0.001$), となったのを最高に、熊本県の菊池川河口沖から宇土半島に至る海域では、29 年間で透明度が 1.5~2 倍以上に上昇していた (Fig. 3-b)。また、熊本県の荒尾市沿岸 (定点 K19) 及び長洲港近傍 (定点 K18) や、有明海南部の天草大矢野島沖 (定点 K6) から早崎瀬戸 (定点 KA) に至る海域でも、透明度が 30% 以上上昇していた。ただし、長崎県島原市沿岸域 (定点 K13) の透明度年平均値は、1980 年代後半の 3 m 台を極小としてこれ以降は上昇傾向を示しているものの、それ以前は逆に低下傾向にあり、1970 年代後半と 2000 年代前半の透明度年平均値がいずれも 4~5 m 台 (Fig. 2) であるため、解析期間通算で見ると有意な変動傾向とはならなかった。

湾奥西部海域では、透明度年平均値は全体としてゆるやかな上昇傾向を示しており (横内ら, 2005), 特に佐賀県太良町沿岸の定点 S2 では、29 年間で透明度が 39% 上昇していた (同, $\tau = 0.463$, $p < 0.001$) (Fig. 3-b)。諫早湾の湾口北部海域では、透明度年平均値の年々の変動は湾奥部沿岸域よりもやや大きく、90 年代前半に極大となった後、2000 年代初頭にかけてはやや低下傾向となっていた。このため、透明度年平均値は有意な上昇を示したものの、その危険率は 5% 以下とやや高かった (Fig. 3)。湾奥東部の福岡県海域や湾奥北部の六角川河口近傍 (定点 S8, S9) では、透明度年平均値の年々の変動は小さく、経年的な増減傾向も認められなかった。

3.2. 季節別の透明度変動

横内ら (2005) は、有明海における水温及び塩分の鉛直勾配から、4~9 月を成層期、10~3 月を混合期と位

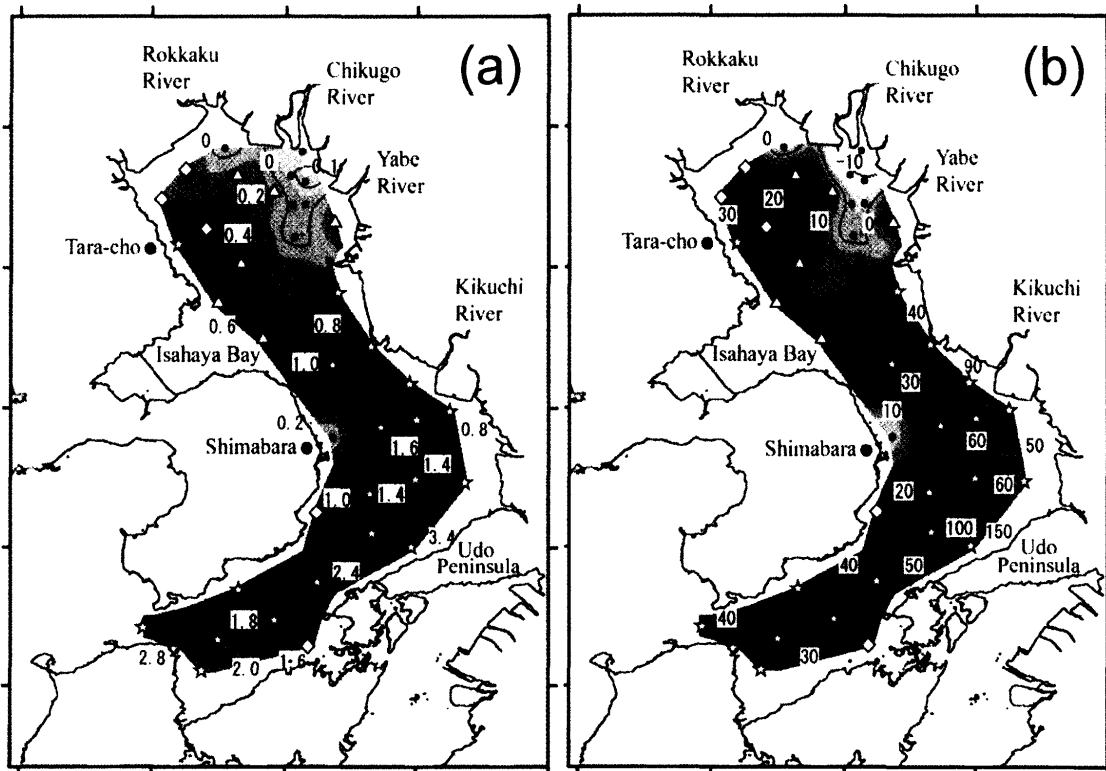


Fig. 3. Trend of annual mean transparency in Ariake Bay from 1976 to 2004 (a: change in mean transparency during the 29 years (m), b: increasing trend (%) of transparency). Statistically significant differences determined using Kendall's rank correlation coefficient, are shown by the following symbols (\triangle : $p < 0.05$, \diamond : $p < 0.01$, \star : $p < 0.001$).

置けている。また、筑後川流域の年間降水量の約7割は5~9月の梅雨期及び台風期に集中しており(気象庁 気象統計情報)、筑後川流量にも5~9月にかけて増加する明瞭な季節変動が認められる(久野ら, 2002)。以上の知見から、有明海では、4~9月を河川流量増大及び成層期、10~3月を河川流量減少及び混合期と大別することが可能である。また、有明海における透明度は、周年にわたり透明度が低い湾奥浅海域では季節的な変化は不明瞭であるものの、基本的には冬季に高く夏季に低くなる季節変動を示すことが報告されている(井上, 1985; 横内ら, 2005)。そこで、季節別の透明度の変動傾向を把握するため、1975年4月~2005年3月までの30年間における4~9月(河川流量増大及び成層期)及び10~3月(河川流量減少及び鉛直混合期)の透明度平均値の上昇率(単位%)を回帰直線の傾きから求め、経年変化の有意性の検定結果と併せてFig. 4に

示した。なお、有明海のノリ漁期は通常10月から翌年の2~3月までとなっており、後者の期間はノリ漁期にも一致する。

有明海の湾口部及び島原市沿岸を除く湾中央部では、両期間ともに透明度が有意に上昇していた。特に、年平均値で上昇率が最も高かった熊本県宇土半島沿岸(定点K9)では、1975年と2004年の4~9月の平均透明度はそれぞれ3.8 mと6.8 mで、この間の透明度上昇率は+165%に達した(平均値に対するKendallの順位相関, $\tau = 0.605$, $p < 0.001$) (Fig. 4-a)。また、10~3月の平均値でも、1975年には2.6 mであった透明度が2004年には5.8 mとなっており、+149% (同, $\tau = 0.572$, $p < 0.001$) の顕著な上昇を示した (Fig. 4-b)。熊本県菊池川河口沖の定点K17では、4~9月の平均透明度で+106% (同, $\tau = 0.568$, $p < 0.001$)、10~3月の平均値で+93% (同, $\tau = 0.591$, $p < 0.001$) の有意な上昇を

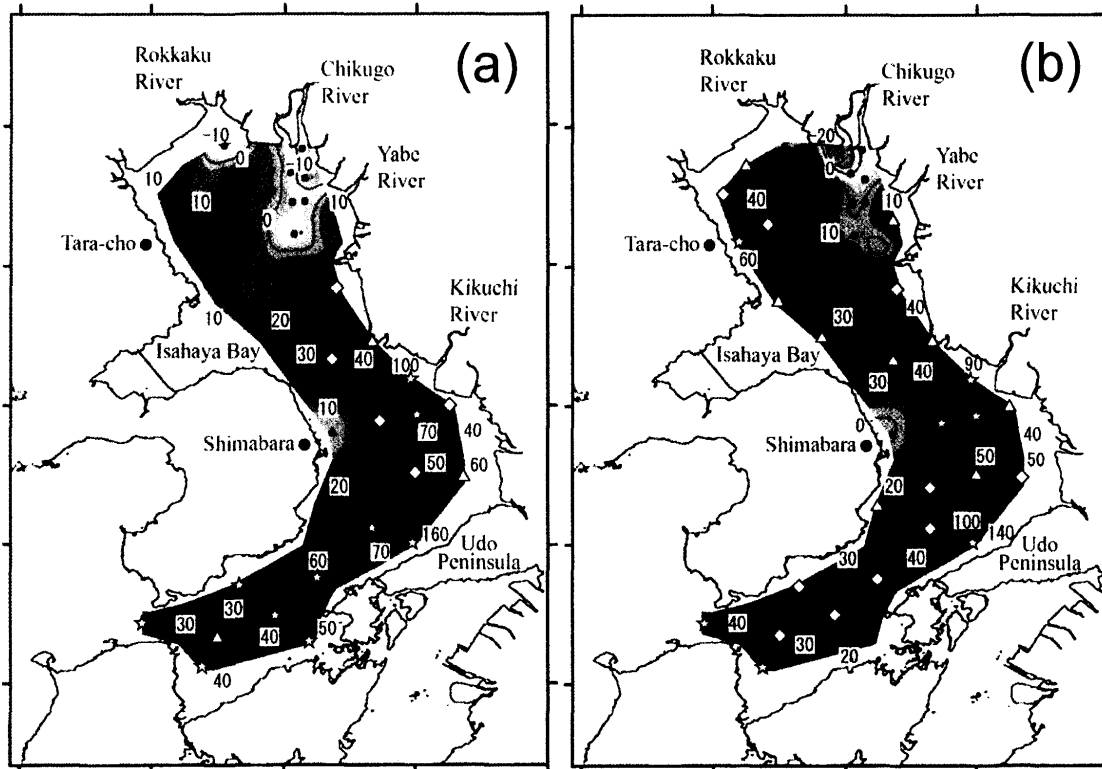


Fig. 4. Recent 30 years increasing trend (%) of semiannual mean transparency in Ariake Bay (a: during April to September, b: during October to March) from April 1975 to March 2005. Statistically significant differences determined using Kendall's rank correlation coefficient, are shown by the following symbols (\triangle : $p < 0.05$, \diamond : $p < 0.01$, \star : $p < 0.001$).

示した。

有明海湾奥部及び諫早湾の湾口部では、4~9月の平均値には有意な変動傾向は全く認められなかった (Fig. 4-a)。年平均透明度が有意な上昇を示した湾奥西部太良町沿岸の定点 S2 における 1975 年と 2004 年の 4~9 月の平均透明度は、1.3 m と 1.4 m でほぼ同値であった。一方、10~3 月の平均値では、湾奥西部から諫早湾湾口にかけての海域及び福岡県矢部川河口の南側で有意な透明度上昇が認められた (Fig. 4-b)。太良町沿岸の定点 S2 では、1975 年と 2004 年の 10~3 月の平均透明度は 0.8 m と 1.5 m で、+67% (同, $\tau = 0.503$, $p < 0.001$) の有意な上昇となった。

以上の結果から、有明海の熊本県沿岸域では、4~9 月 (河川流量増大及び成層期, ノリ漁期外) 平均値及び 10~3 月 (河川流量減少及び鉛直混合期, ノリ漁期) 平均値の両方で透明度が顕著に上昇していることが明ら

かになった。一方、湾奥西部の佐賀県海域では、10~3 月平均値での透明度上昇は明瞭であるものの、4~9 月の透明度平均値には上昇傾向は認められず、海域により透明度が上昇している季節が異なることが明らかになった。

3.3. 過去の赤潮発生及び「九州海域の赤潮」への報告状況

有明海を含む九州海域における赤潮の発生状況は、1978 年度に開始された赤潮情報交換事業等に基づき、関係機関から九州漁業調整事務所へ報告されたものについて、九州漁業調整事務所がとりまとめ、1978~1980 年までの結果は「九州西部海域の赤潮」として、1981 年以降の結果は「九州海域の赤潮」として年毎に報告されている (水産庁九州漁業調整事務所, 1979; 2007 等)。ここに有明海を発生海域とする赤潮が初めて掲載され

たのは1980年であるが、1983年以前の有明海の赤潮については、参考情報としての掲載にとどまっている(水産庁九州漁業調整事務所, 1979-1985)。また、報告時の海域区分として有明海が区分されたのは1988年からであり(水産庁九州漁業調整事務所, 1989)、これ以前は、有明海における赤潮の通報及び報告の取りまとめが、近年ほどは重要視されていなかったことがうかがえる。

一方、池末(1966)は、有明海の赤潮について、1958年に *Rhizosolenia* 属の珪藻が異常発生し、養殖ノリに色落ち被害を与えたこと、*Ceratium* や *Peridinium* 等の渦鞭毛藻による赤潮は、夏季に頻繁に発生するものの、極めて局所的で、かつ、潮の動きが大きいため永続しないことを報告している。また、2000年以前に *Rhizosolenia* 属の珪藻赤潮が養殖ノリに被害を与えた年として、前述の1958年以外に、1965年、1980年及び1996年の事例が報告されている(環境省有明海・八代海総合調査評価委員会, 2006)。以上の知見から、1950~1960年代には、すでに、ノリ漁期の珪藻増殖が養殖ノリに被害を与えるレベルに達する年があったものの、まれな事例であったこと、夏季の赤潮は、極めて小規模なものであったことがうかがえる。

また、有明海においては、ノリ漁期の珪藻赤潮を対象とした国庫補助による赤潮調査が、佐賀県では1982年から、福岡県では1985年から、熊本県では1986年から開始されており、その結果は関係機関により取りまとめられている(水産庁・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・鹿児島県・宮崎県, 1983等)。この調査は、ノリ漁場における珪藻赤潮の発生による養殖ノリの品質低下が発生するようになったことに伴い開始されたものであり、佐賀県有明海においては、昭和50年代に入り冬季に珪藻類が大量に発生するようになり、ノリ漁業に及ぼす影響が問題になっているとの記述がなされている(水産庁・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・鹿児島県・宮崎県, 1983)。1982年度から1989年度までの8年間の佐賀県有明海における調査結果についてみると、10~11月に珪藻類の増殖が認められたのは、1983年、1984年、1985年、1988年及び1989年の5か年、1~2月以降に珪藻類の増殖が認められたのは1983~1988年の6か年であり、1~2月以降の珪藻類の増殖はいずれも大規模

なものであったこと、このうち特に、1983年度のノリ漁期に発生した珪藻赤潮は、*Skeletonema costatum* 及び *Chaetoceros* spp. を主要構成種として11月上旬から2月中旬までの4か月以上にわたり継続し、細胞密度も20,000 cells mL⁻¹ を超えるものであったことが報告されている(水産庁・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・鹿児島県・宮崎県, 1984; 1995)。一方、「九州海域の赤潮」別表-4には、佐賀県海域における1983年及び1984年の10~11月、もしくは1983年、1984年及び1985年の1~3月を発生期間に含む赤潮の発生は報告されていない(水産庁九州漁業調整事務所, 1983-1991)。

以上の結果から、有明海におけるノリ漁期の珪藻赤潮の発生は、1970年代前半頃までは少なかったものの、1970年代後半~1980年前半頃から増加しはじめたものと推察される。一方、「九州海域の赤潮」別表-4のうち、特に1980年代前半までの報告件数については、実際の発生件数よりもかなり過小評価である可能性が高く、データを使用する際には注意が必要である。

次に、近年の「九州海域の赤潮」別表-4への赤潮掲載状況についての検討を行った。九州漁業調整事務所では、赤潮関連の事業の一環として、航空機を用いた九州海域における赤潮観測調査を実施している。これは事前に計画された日程・ルートで飛行し、ルート上で視認された赤潮を記録するもので、別表-4とは独立した形で「九州海域の赤潮」に結果が報告されている。この赤潮飛行観測は、近年では6~10月の期間に年間10回程度実施されており、2001年以降の結果については、図-7(赤潮飛行観測視認状況)に観測日及び視認海域が具体的に掲載されている(九州漁業調整事務所, 2002-2006)。そこで、2001年~2004年の4年間の結果について、飛行観測時に確認された赤潮が、「九州海域の赤潮」別表-4に記載されているか否かを調べて赤潮の通報率を試算した。

2001年~2004年までの4年間に、有明海上空をルートに含む赤潮飛行観測は、計36回行われ、このうち赤潮が視認されたのは32回、件数では54件の赤潮が記録されていた(九州漁業調整事務所, 2002-2006)。次に、「九州海域の赤潮」別表-4に掲載されている赤潮について、まず飛行観測が実施された日を赤潮発生期間に含む赤潮を選び出し、別図-1に掲載されている月別

の発生海域と、飛行観測で赤潮が視認された海域に重なる部分があるかを検討した。別図-1の発生海域の根拠となった観測と、飛行観測の実施日に時間的なずれがある可能性を考慮し、両方の地図に重なる海域がある場合は、両者を同一の赤潮である可能性が高いと判断した。その結果、54件の赤潮のうち、別表-4に掲載されていると判断されたものは35件(65%)であった。ただし、飛行観測結果については、迅速に関係県に通報するシステムが取られており、当該県が未確認であった情報については、その後に現地調査で原因種の同定等の確認作業が行われる場合もあることから(水産庁九州漁業調整事務所, 1982), 実際の通報率はこれより若干高いものと推察される。

3.4. 近年の赤潮発生状況

3.3節の結果から、「九州海域の赤潮」に掲載されている近年の赤潮発生状況は、依然やや過小評価である可能性もあるが、少なくとも実際の発生件数の2/3以上は報告されており、一定の精度はあるものと考えられる。そこで、「九州海域の赤潮」別表-4をもとに計算した、有明海浅海定線の各定点における2000年4月から2005年3月までの5年間の年平均及び季節平均の赤潮報告日数推定値をFig. 5に示した。年平均の赤潮報告日数が最も多かった海域は、湾奥北西部の佐賀県塩田川河口沖合域で、塩田川河口南側の定点S1では198日、河口東側の定点S9及びS10でも170日以上に達しており、塩田川河口沖合域では近年赤潮が頻発していることがわかる(Fig. 5-a)。さらに、湾奥部全域や湾央東部の長洲港外(定点K18)から緑川河口沖(定点K12)に至る熊本県沿岸域でも、年間に100日以上赤潮が報告されており、浅海域で赤潮が多発していることがうかがえる。一方、水深が比較的深い島原半島沿岸域における平均赤潮報告日数は30日以下と少なく、有明海湾口部では赤潮の報告はほとんどなかった。

季節別に見ると、4~9月の平均赤潮報告日数は、湾奥西部太良町沿岸域(定点S2)の79日が最高で、塩田川河口沖合では70日以上となっていた(Fig. 5-b)。また、50~70日程度の赤潮が、有明海湾奥部及び熊本県の湾央東部海域などの広範囲で報告されていた。10~3月には、海域による赤潮報告日数の差が4~9月より

も明瞭であり、佐賀県塩田川河口の南側(定点S1)で平均赤潮報告日数が123日に達したほか、湾奥西部海域や湾奥東部の矢部川河口沖及び熊本県の菊池川河口南側でも80日以上であった(Fig. 5-c)。一方、熊本県の荒尾沿岸(定点K19)及び島原半島北部周辺海域(定点KB, K20, K13, K14)における10~3月の平均赤潮報告日数は3~13日であり、4~9月と比べて少なかった。また、島原半島南部沿岸域及び有明海湾口部では、10~3月には赤潮は全く報告されなかった。

4. 考察

4.1. 透明度上昇の要因

4.1.1. 表層塩分変動との関連

有明海の透明度は、筑後川を始めとする一級河川が数多く流入する湾奥部や湾央東部などの浅海域では低く、主要な流入河川が存在せず水深も深い島原半島沿岸や湾口部では高いため(Fig. 1, Fig. 2), 透明度と塩分分布との関連が指摘されてきた(井上, 1985; 中田・野中, 2003)。実際に、湾奥中央部の筑後川河口沖合域では、塩分低下とSS濃度の上昇に明確な対応が認められており、河川水起源の高濁度水塊の挙動がSS濃度に影響を及ぼしていることが指摘されている(中川ら, 2002)。河川水の張り出しの強弱や分布域の変化は、経年的な透明度変動にも影響を及ぼしている可能性が考えられる。そこで、3.2節(Fig. 4)で10~3月の平均透明度に明瞭な上昇傾向があることが確認された湾奥西部佐賀県太良町沿岸の定点S2(観測時の平均水深7.8 m)と、4~9月及び10~3月の平均透明度がいずれも顕著に上昇している熊本県菊池川河口沖の定点K17(観測時の平均水深10.7 m)及び熊本県宇土半島沿岸の定点K9(観測時の平均水深23.8 m)の代表3定点において、透明度と、河川由来低塩分水の指標である表層塩分の経年変動との関連性を季節別に調べた。

太良町沿岸(定点S2)及び菊池川河口沖(定点K17)における4~9月平均表層塩分は、年による変動が大きく、経年的に有意な傾向は認められなかった(Fig. 6-a, b)。1975年から2003年までの間に、筑後川の4~9月の総流量が $40 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$ 以上となったのは1980年、

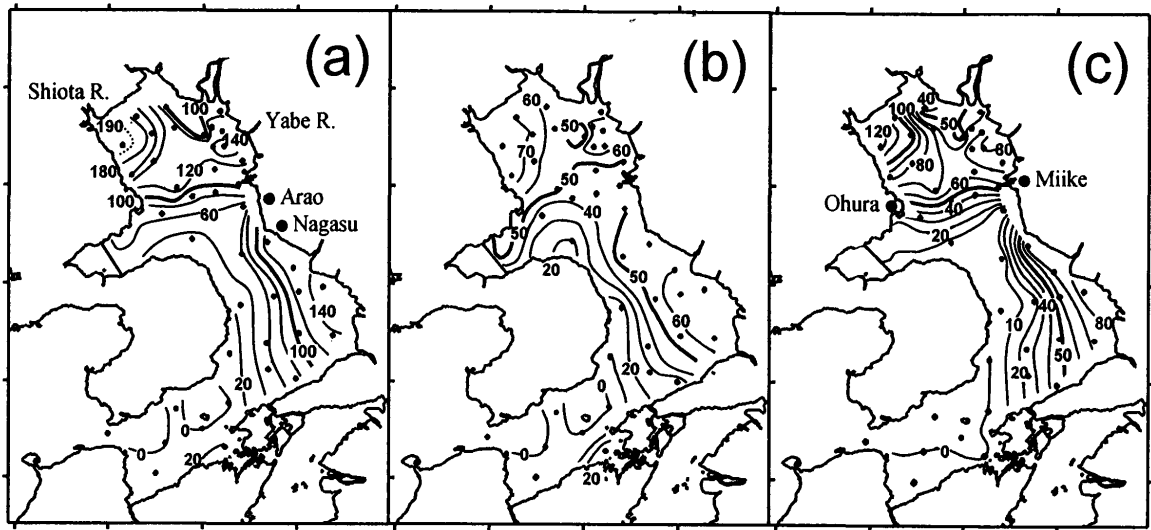


Fig. 5. Recent 5 years annual mean number of days with red tides (a) and semiannual mean number of days with red tides during April to September (b) and during October to March (c) in Ariake Bay from April 2000 to March 2005.

1991年、1993年及び1997年の計4回であるが、このうち1980年、1991年及び1993年の湾奥西部定点S2における4~9月平均表層塩分は明らかに低く、逆に4~9月の総流量が $10 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$ を下回った1978年及び1994年には、定点S2における4~9月平均の表層塩分は高くなっていった (Fig. 6-a, d)。有明海奥部に流入する最大の河川である筑後川の流量は、梅雨期や台風等に伴う豪雨時に顕著に増大するため (田中ら, 2007)、出水時には、筑後川起源の低塩分水の影響が有明海奥部西側の佐賀県海域まで及んでいたと考えられる。同様に、菊池川河口沖の定点K17における4~9月平均表層塩分は、菊池川の4~9月総流量が $17 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$ を超えた1980年及び1993年には低く、4~9月総流量が $3 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ y}^{-1}$ を下回った1978年及び1994年には高くなっており、定点K17は河川水の直接的な影響を受ける定点であることが推察される (Fig. 6-b, d)。また、定点S2及び定点K17ともに、4~9月の平均表層塩分が低下した年には、4~9月の透明度平均値も低くなる傾向が認められる。出水時には、河川からのSS負荷量も顕著に増加することから (田中ら, 2007)、河川由来低塩分高濁度水の移流 (中川ら, 2002) に伴い透明度が低下することが推察される。従って、これらの定

点では、梅雨や台風等の出水イベントに起因する塩分及び透明度の変動が大きいため、4~9月平均透明度に明瞭な経年変動が認められなかったものと考えられる。

熊本県宇土半島沿岸 (定点K9) では、上記の2定点と比較して、4~9月平均表層塩分の年々変動は小さく、30年間で+1.7の有意な塩分上昇が認められた (平均値に対するKendallの順位相関, $\tau = 0.292, p < 0.05$) (Fig. 6-c)。同様の表層塩分平均値の上昇傾向は、定点K9の沖側の定点K8 (30年間で+1.0 (同, $\tau = 0.264, p < 0.05$)) 及び天草大矢野島沖 (K9の南側) の定点K6 (30年間で+1.5 (同, $\tau = 0.425, p = 0.001$)) でも検出されたが、他の海域では認められなかった。一方、この間の菊池川、白川及び緑川の年間流量には経年的に明瞭な増減傾向は認められず (流量年表)、沿岸河川からの淡水流出量の変化そのものが、ここでの表層塩分上昇の原因であるとは考えにくい。滝川ら (1999; 2002) は、出水時の有明海中央部では、河川水が東岸の干潟上に広く拡散し、塩分や透明度低下の影響は湾中央部まで及ぶと報告しているが、4~9月の平均表層塩分に上昇が認められた上記の3定点では、4~9月の平均透明度も、いずれも50%以上の有意な上昇 (危険率0.1%以下) を示している (Fig. 4-a)。また、宇土半島沖の有明海中央部で

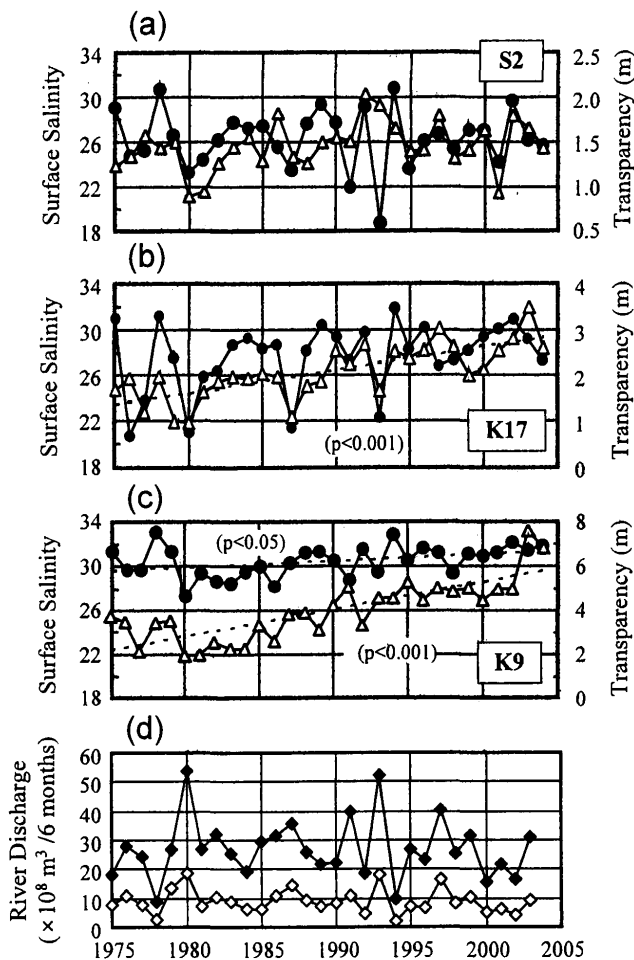


Fig. 6. Temporal variations in semiannual mean transparency (Δ) and semiannual mean surface salinity (\bullet) at sta. S2(a), sta. K17(b) and sta. K9(c) during April to September from 1975 to 2004. Numerical values show the levels of significance of Kendall's rank correlation coefficient. Time series records of total river discharge during April to September in Chikugo River (\blacklozenge) and Shirakawa River (\blacklozenge) were also shown (d).

は、近年夏季の成層度が低下しているとの指摘もある(柳・下村, 2004)。有明海における塩分成層の変化の実態については、必ずしも統一的な見解が得られているわけではないが(堤ら, 2007; 宇野木・佐々木, 2007), 干潟浅海域から沖合への低塩分高濁度水の波及の減少が、熊本県湾央東部海域の表層塩分変動及び透明度上昇の一因になっている可能性も考えられる。

以上の解析結果から、有明海奥部及び湾央東部の主

要河川河口沖合域における4~9月平均透明度は、河川由来の低塩分水の影響を受けて変動していることが示唆された。また、湾央東部の沖合域でも、沿岸域からの低塩分高濁度水の波及の強弱が、透明度変動に影響を及ぼしている可能性が推察される。ただし、定点S2(太良町沿岸)における4~9月の観測データ平均値及び筑後川総流量についてより詳細に見ていくと、1997年のように、4~9月の筑後川総流量が多くても表層塩分の平均値が低くならない場合や、2001年のように、総流量は多くないにもかかわらず、4~9月の表層塩分及び透明度の平均値が低下する年も見られる。堤ら(2007)は、有明海湾奥西部佐賀県海域における1990年~2000年までの6~8月の浅海定線調査の表層塩分と佐賀県白石町におけるAMeDAS降水量との比較から、同海域における表層塩分は、月間降水量よりも、調査直前の数日間の降水量と強い相関が認められることを明らかにしているが、今回の解析では、観測時の気象条件の影響については考慮できていない。また、浅海定線調査は、月1回大潮満潮時に実施されているので、河川水の影響を検討するためのデータとしては、必ずしも十分ではないと考えられる。豊水期の塩分と透明度変動との関連について、さらに詳細に把握するためには、時空間的により精密な観測結果に基づいた解析を行うことが必要であろう。

一方、10~3月平均値では、湾奥西部を含むより広域で透明度が有意に上昇しているが(Fig. 4-b), 上述の代表3定点(S2, K17, K9)における10~3月の平均表層塩分は、4~9月の平均値よりも総じて高塩分で年変動は小さく、いずれの定点でも明瞭な経年変動は認められなかった(Fig. 7-a, b, c)。10~3月の筑後川及び白川の総流量は、4~9月と比較して少なく、経年変動も小さい(Fig. 7-d)。また、冬季には鉛直混合も盛んになるため、4~9月と比較して河川水の直接的な影響は弱く、河川由来低塩分水の挙動以外の要素が、海域の透明度上昇に深く関わっていると推察される。

4.1.2. 浮泥との関連

筑後川などの河川から供給された多量の粘土鉱物は、感潮域で凝集体となった後、海域に輸送され、有明海

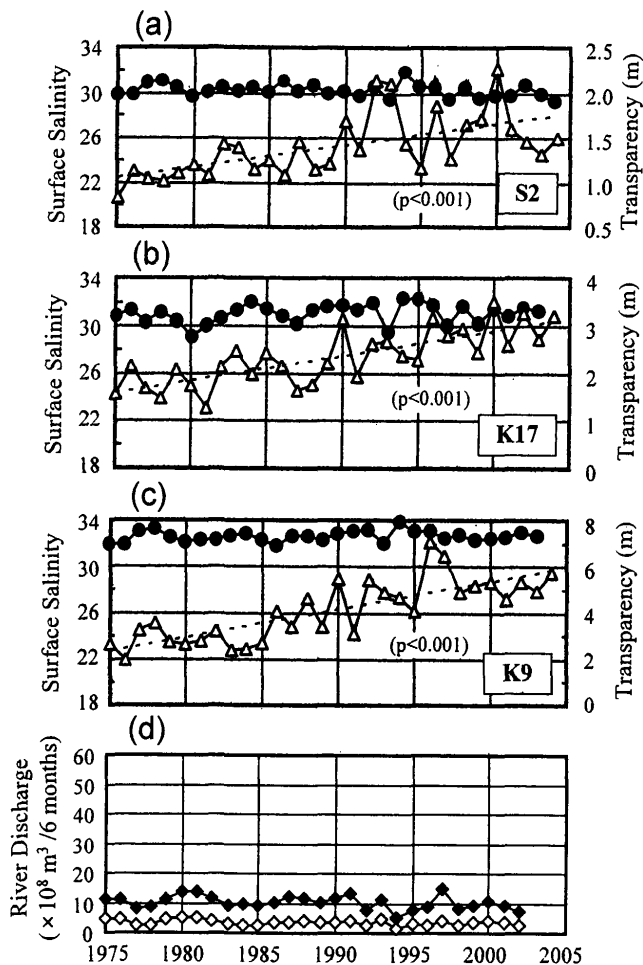


Fig. 7. Temporal variations in semiannual mean transparency (\triangle) and semiannual mean surface salinity (\bullet) at sta. S2(a), sta. K17(b) and sta. K9(c) during October to March from 1975 to Mar. 2005. Numerical values show the levels of significance of Kendall's rank correlation coefficient. Time series records of total river discharge during October to March in Chikugo River (\blacklozenge) and Shirakawa River (\diamond) were also shown (d).

奥部では潮汐により沈降・再懸濁を繰り返す高濃度の浮泥として存在している(代田・近藤, 1985; 田中・児玉, 2004)。このため高濁度となる有明海の筑後川河口域では、透明度とSS濃度、及び消散係数とSS濃度間に相関が認められており(田中ら, 2004; Tanaka and Kodama, 2007)、冬季には、有明海全域でSS濃度のみから上層の消散係数が算出可能である(大島・阿部, 2005)。これらのことから、有明海ではSS濃度の変動

が長期的な透明度変動に大きな影響を及ぼしていることが推察される。また、有明海湾奥部浅海域や熊本港沖の泥質物堆積域では、流速が増大する大潮時にSS濃度が増加、小潮時には減少し、底層で高濃度となる鉛直分布を示すこと(安田ら, 2005; 八木ら, 2005)、底泥と浮遊懸濁物質が類似した粒径特性を示すことから、潮流による浮泥の巻き上げ・沈降がSS濃度変動の主要因であることが指摘されている(中川ら, 2002)。Tanaka *et al.* (2007) は、2003年冬季の有明海奥部干潟域における大潮時の最大日平均浮泥現存量を 6.5×10^4 tons と推定しており、これは田中ら(2007)が推定した筑後川からの懸濁物質年負荷量の平均値 (22.0×10^4 t y^{-1}) の約30%に相当する膨大な量である。浮泥濃度の変動が、有明海浅海域における透明度変動の重要な要因となり得ることが推察される。

一方、近年有明海では、潮流速の減少が指摘されている。Manda and Matsuoka (2006) は、湾奥部浅海域における埋め立て干拓等、諫早湾堤防締切以外の原因による海岸線や海底地形の変化により、1940年代から1990年代までの間に、湾奥部の広域で潮流の流速が10~30%程度低下したと推察されること、さらに諫早湾締切の影響で、諫早湾内で10%以上、有明海湾中央部では5~10%程度潮流速が低下した可能性を指摘している。また、諫早湾堤防閉め切りの前後で、諫早湾奥の堤防前面では80~90%、諫早湾湾口部でも10~30%以上潮流の流速が低下したとの指摘もある(宇野木, 2002)。中川ら(2002)は、有明海奥西部海域の底面付近では流速が約 20 cm s^{-1} を超えるとSS濃度が顕著に増大することを報告しているが、例えば、冬季の諫早湾湾口北部付近における大潮下げ潮最強時の水深2 m層における流速は、1989年1月の観測では 22.9 cm s^{-1} であったのに対し、2001年1月には 16.3 cm s^{-1} と顕著に低くなったことが報告されている(農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 2002)。浮泥の巻き上げ限界流速には底泥粒子の粒径などの性状が関係するため、厳密にはその数値は海域により大きく異なるものと推察されるが、2002年の有明海湾奥北西部及び諫早湾の表層堆積物の含泥率は60%以上と高く、両海域にはMd $\phi 8$ 以上の粘土が広く分布していることから(岡村ら, 2005; 東, 2005)、諫早湾湾口部でも湾奥西部海域

と同様に浮泥の巻き上げ限界流速が 20 cm s^{-1} 程度であると仮定すると、諫早湾周辺で観測された流速低下は、浮泥の再懸濁を著しく低下させ、海域の SS 濃度を大きく減少させた可能性がある。また、有明海奥部における 20 cm の大潮差の減少 (宇野木, 2001) が、SS 濃度を 10% 以上減少させるとの指摘もある (田中・児玉, 2004)。有明海奥部海域においては、潮流速の減少による浮泥の再懸濁低下により海域の SS 濃度が減少したことが、透明度上昇の一因となっているものと推察される。

また、漁期中の有明海ノリ漁場では、ノリ網の影響で潮流の流速 (千葉・武本, 2002) や浮泥濃度 (田中ら, 2004) が減少することも報告されている。例えば、透明度上昇率が高かった熊本県沿岸域の調査定点は、ノリ養殖場内の船通しに位置していることから、10~3 月には、周辺のノリ養殖施設の存在が透明度に影響している可能性も考えられる。ただし、有明海におけるノリ養殖施設面積は、1985 年から 1999 年にかけて暫減傾向にあることから (農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 2002)、10~3 月における経年的な透明度の上昇傾向を、ノリ養殖施設の抵抗による潮流速や浮泥濃度の減少から説明することは困難である。

4.1.3. 風の影響

白川河口域では、洪水時に河川から供給されたシルト粘土が潮流や波浪による巻き上げや移動を繰り返し、特に、荒天時の高波浪によって多量の底泥が沖に輸送されることが報告されている (横山, 2005; 中川ら, 2002)。従って、風速や波浪等の海象条件も、有明海浅海域の SS 濃度や透明度を変動させる重要な要因の一つであると考えられる。特に冬季の有明海では、季節風等によって生じる吹送流が流動に及ぼす影響は無視できないとの指摘がされている (木谷, 2003)。有明海における風向については、井上 (1985) が、湾奥部では北~北北東及び西北西方向の頻度が非常に高いことを報告している。木谷 (2003) は、1977~2000 年までの有明海沿岸 6 地点の AMeDAS 定点における風速及び風向観測結果から、秋季から春季までは北方からの風が卓越しており、特に冬季にその頻度及び平均風速が大きくなる

こと、夏季には逆に南方からの風が卓越すること、一方東西成分風は通年弱いこと等を報告している。また、1978~2000 年にかけて、湾央東岸に位置する熊本県の岱明と三角及び有明海湾口部に位置する長崎県の口之津で、正の北方成分風 (北風) が直線的に有意に減少したこと、有明海湾奥沿岸に位置する佐賀県白石、福岡県大牟田及び湾央西岸に位置する長崎県島原では、北方成分風の有意な減少傾向は認められなかったことも指摘されている (木谷, 2005)。

木谷 (2005) によって、北方成分風の経年的な減少が指摘された岱明、三角及び口之津の AMeDAS 観測点のそれぞれ最も近傍に位置する菊池川河口沖の定点 K17、宇土半島沿岸の定点 K9 及び湾口早崎瀬戸の定点 KA では、いずれも 10~3 月の平均透明度が有意に上昇しており (Fig. 4-b)、風浪の低下と、10~3 月の有明海中央部及び湾口部における透明度の上昇が関連している可能性も考えられる。有明海浅海定線調査データには、台風等の極端な気象条件下での観測データは含まれていないが、ここでは、秋季~春季の有明海で卓越するとともに、近年風速が減少している可能性が指摘されている北方成分風の風速を風浪の指標とし、透明度との関連の有無を検討した。定点 K17 (観測時の平均水深 10.7 m)、定点 K9 (同 23.8 m) 及び定点 KA (同 65.3 m) の 3 地点と、定点 K17 の南側に位置する定点 K15 (同 13.9 m) において、1978 年~2001 年 3 月までの期間の 10~3 月に行われた浅海定線調査によって得られた、個々の透明度実測値と、最寄りの AMeDAS 観測点における観測当日の北方成分風の日平均風速データとの関係を調べた (Fig. 8)。なお、北方成分風の風速が負の値であった場合 (南風) は解析から除外した。

菊池川河口干潟の近傍に位置する定点 K17 では、北方成分風の日平均風速が最大の 2.9 m s^{-1} の時の透明度は 1 m と低く、逆に透明度が 4 m を超えた際の北方成分風の風速は 0.3 m s^{-1} 以下と静穏であるなど、風速と透明度との関連性が推察されるデータも得られた (Fig. 8)。中川ら (2002) も指摘するように、湾央東部の熊本県干潟縁辺域においては、SS 濃度や透明度の変動に対する風の影響は無視できないと考えられる。ただし浅海定線調査では、風浪が顕著になる荒天時には調査が行われていないことから、全体としては風速の

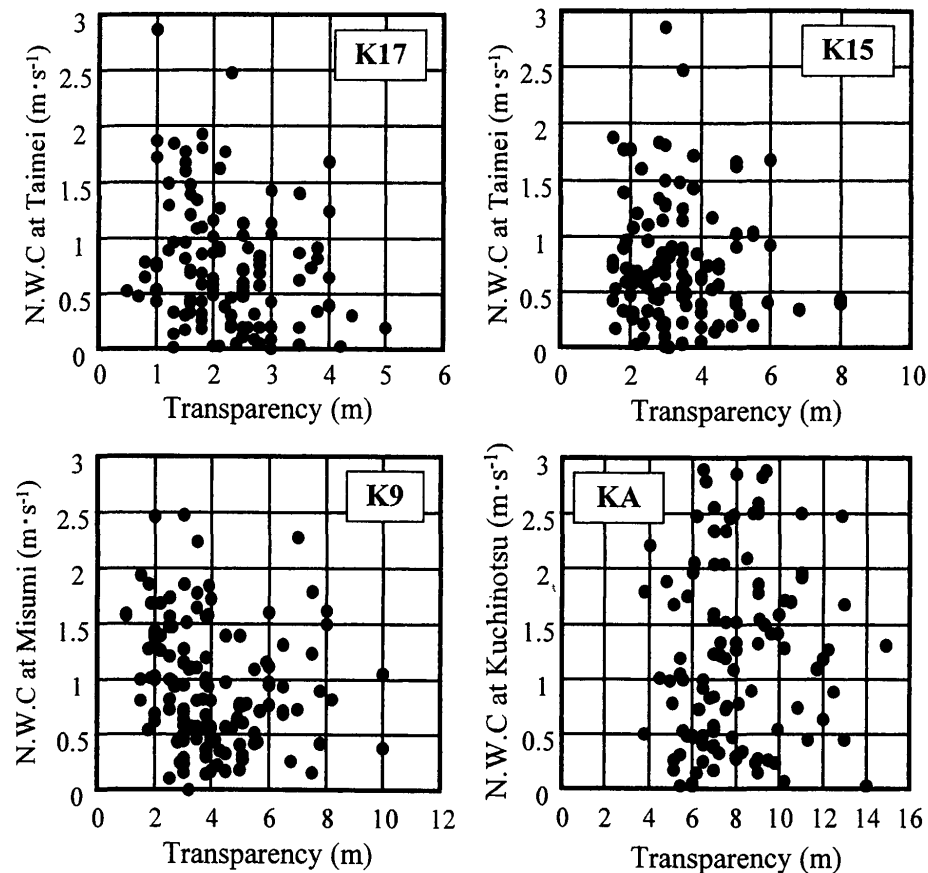


Fig. 8. Relationships between transparency and daily average north wind component (N.W.C) of the nearest AMeDAS station at sta. K17, sta. K15, sta. K9 and sta. KA during October to March from Jan. 1978 to Mar. 2001.

強弱に起因しない透明度変動が大部分であった。つまり、静穏時には、潮汐に伴う堆積物の巻き上げに起因するSS濃度の変動(中川ら, 2002)がより支配的であると考えられる。一方、定点K17の沖側に位置する定点K15では、北方成分風の風速と透明度との関連はより不明瞭であり、宇土半島沿岸の定点K9や湾口早崎瀬戸の定点KAでは両者の関連はほとんど認められないことから、湾中央部沖合域及び有明海湾口部においては、10~3月の透明度変動への風浪の影響は小さいものと推察された。以上のように、干潟縁辺部では風浪と透明度が関連する場合もあると考えられるが、北方成分風について解析した今回の結果からは、両者の関連性を充分には検討できなかった。既存の有明海浅海定線調査結果には、底泥の沖合への輸送が集中して行われている可能性が高い荒天時の観測データが含ま

れていないことから、荒天時の風浪が海域のSS濃度や透明度に及ぼす影響を把握するためには、連続観測の導入等、より詳細な解析が必要となる。

4.2. 透明度変動と赤潮発生との関連

4.2.1. 透明度上昇と赤潮の増加

石坂(2003)は、冬季の有明海における赤潮発生件数増加の原因として、栄養塩類の増加、光環境の改善及び底生生物の減少が考えられると述べ、このうち光環境の改善要因として、成層の発達及び真光層の深化を挙げている。また、環境省有明海・八代海総合調査評価委員会(2006)は、珪藻赤潮の発生機構に関わる近年の環境要因の変化として、流れの減少、高い透明度及び河川水量の減少等を挙げ、このうち透明度の上昇は、底泥

中に高濃度に存在する *Skeletonema* や *Chaetoceros* 等の休眠期細胞の発芽機会を増加させることで赤潮増加の原因になり得ることを指摘している。

3.2 節及び 3.4 節で、1975 年 4 月から 2005 年 3 月までの 30 年間の透明度の上昇傾向及び近年の赤潮発生海域について検討した結果、近年の有明海で 10~3 月に赤潮が頻発している海域は、湾奥西部の佐賀県海域、湾奥東部の福岡県大牟田市沿岸域及び湾中央部の熊本県沿岸域であり (Fig. 5-c), 過去 30 年間の透明度上昇率が顕著に高い海域 (Fig. 4-b) とほぼ一致していた。3.3 節で示したように、有明海のノリ漁期中の赤潮が、1970 年代前半までは少なかったとすれば、近年の赤潮発生日数を、1970 年代後半以降の赤潮の増加日数とほぼ同程度とみなすことが可能である。そこで本研究では、浅海定線の各定点における、過去 30 年間の透明度上昇率と、最近 5 年間の赤潮報告日数との関連を調べ、赤潮増加要因の一つと考えられる透明度上昇と、近年の赤潮増加との関連を検討した。その結果、大浦と三池を結ぶライン以北の有明海奥部海域において、過去 30 年間の 10~3 月平均透明度の上昇率と、最近 5 年間の 10~3 月平均赤潮発生日数との間に、有意な正の相関 ($r = 0.553$, $n = 18$, $p = 0.017$) が認められた (Fig. 9-a)。一方、元々透明度が高く、光制限が弱いと考えられる湾中央部では、両者に明瞭な関連性は認められなかった。

田中ら (2004) は、冬季の筑後川河口域における連続観測結果から、懸濁粒子濃度の減少による光条件の好転が、有明海奥部河口域での珪藻赤潮の発生及び発達に大きく関与していると指摘している。また、佐賀県ノリ漁場におけるノリの色落ち年と平常年の全天日射量の比較により、色落ち年の方が漁期中の全天日射量が多かったことが報告されており (川村, 2006), 大規模なノリの色落ち被害が起こった 2000 年 12 月の佐賀地方気象台における全天日射は、平年より約 15% 強かった (田中ら, 2003)。これらの知見は、湾奥部では海域の光条件が冬季における珪藻類の発芽や増殖を制御する要因の一つとなっており、ひいてはそれがノリの作柄にも影響を与えていることを示唆するものである (川村, 2006)。有明海における 10~3 月の赤潮の大半は珪藻赤潮であり (農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検

討委員会, 2002), 赤潮発生日数が多い海域における最近 5 か年間の 10~3 月の平均透明度は、1~2 m 程度と湾奥部の中では比較的高い (Fig. 9-b)。田中ら (2004) の冬季の筑後川河口域における観測事例でも、好天の小潮時で透明度が 1 m 以上となった際に珪藻赤潮が発生したことが報告されており、経年的な透明度上昇に伴い珪藻類の光合成の光条件が好転したことが、近年の有明海湾奥部における冬季の赤潮頻発の一因になっている可能性が推察される。

そこで、ノリ漁期の有明海奥部筑後川河口沖における既存の観測結果をもとに、透明度と補償深度 (1% 相対照度水深) の関係について検討した。SS 濃度と透明度の関係式として、田中ら (2004) の式 ($SS = 17.1 \times Trans^{-1.51}$) を、SS 濃度と消散係数 (k) の関係式として、Tanaka and Kodama (2007) の式 ($k = 0.062 \times SS + 0.28$) を使用し、Lambert の法則 ($I_d = I_0 \times e^{-kd}$) から、任意の透明度水深における補償深度を計算した。その結果、透明度を 0.5 m から 1.0 m に変化させると、補償深度は 1.5 m から 4.3 m へ増加した。有明海湾奥部の浅海定線調査定点は、その多くが水深 5 m 以浅のごく浅海域に位置していることから (Fig. 1), このような透明度上昇は、単に真光層の厚さを増大させただけではなく、海底付近まで光が到達する機会を増加させた可能性が推察される。このことは、透明度の上昇が、底泥中の珪藻休眠期細胞の発芽機会を増加させることで、赤潮増加の原因になり得るとした、環境省有明海・八代海総合調査評価委員会 (2006) の指摘とも一致するものである。

一方、4~9 月には、透明度の有意な上昇は湾中央部以南でのみ認められたのに対し (Fig. 4-a), 赤潮は、有明海湾奥部、諫早湾及び熊本県沿岸域などの広域で発生しており (Fig. 5-b), いずれの海域でも、過去 30 年間の 4~9 月平均透明度上昇率と、最近 5 年間の 4~9 月平均赤潮発生日数には関連性は認められなかった。有明海奥部で近年夏季及び秋季に発生している赤潮には、鉛直移動を行うラフィド藻や渦鞭毛藻類を原因種とするものも多いが (農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 2002; 川村, 2006), 例えば *Chattonella* 赤潮の発生は、富栄養化や貧酸素水塊と関係があることが指摘されている (環境省有明海・八代海総合調査評

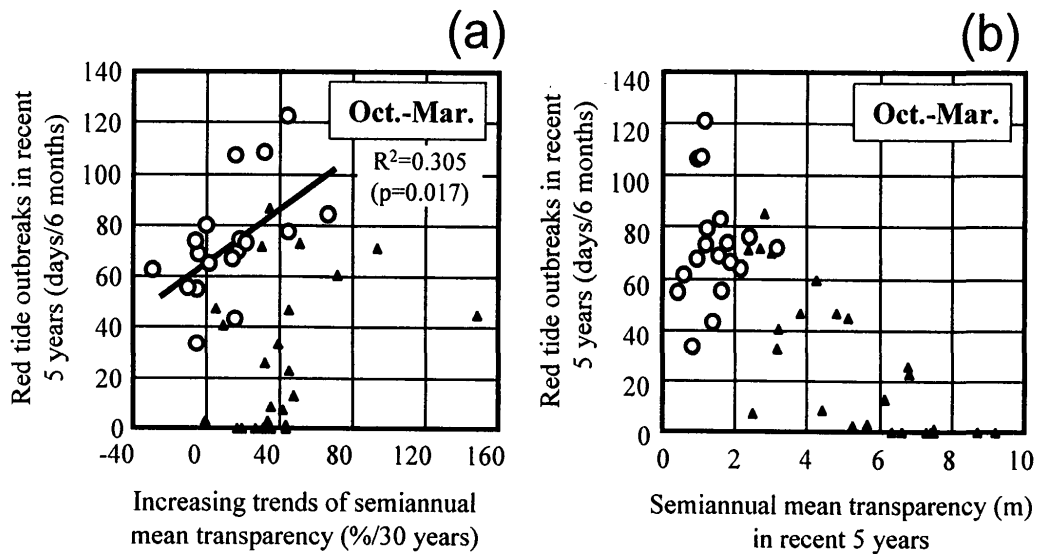


Fig. 9. Relation of semiannual mean number of days with red tides during October to March in recent 5 years to increasing trends of semiannual mean transparency in recent 30 years (a), and to semiannual mean transparency in recent 5 years (b). ○: Inner part, ▲: Central and outer part of Ariake Bay.

価委員会, 2006)。また、夏季の貧酸素水塊発生に伴うベントス等の植物プランクトン食者の減少が、赤潮の多発と長期化に深く関わっているとの指摘 (川村, 2006) もある。さらに、有明海における初夏及び晩秋のクロロフィル a 濃度の上昇は、降雨に伴う河川流量増加後に認められること (Ishizaka *et al.*, 2006), 秋季のクロロフィル a 濃度増加には、降雨等に伴う栄養塩の流入と塩分層が必要不可欠であること (石坂, 2003; 堤ら, 2005) 等も指摘されている。赤潮増加の主要原因は季節・海域や赤潮の原因種によって異なっており、夏季～秋季の赤潮発生には光環境以外の要素が深く関わっているものと推察される。

また、今回光環境との関連が示唆されたノリ漁期中における赤潮の発生メカニズムに関しても、秋季の降雨に伴う栄養塩の流入と成層構造の発達 (堤ら, 2005; 石坂, 2003) の影響や、ノリ漁期後期の栄養塩濃度低下による珪藻の増殖制限 (川口ら, 2004) 等、透明度上昇以外に考慮すべき要因が複数指摘されており、複数の要因が相互に関連している可能性もある。赤潮の発生機構及び頻発化の原因を明らかにするためには、季節・海域や赤潮原因種等を区分した上で、既存の赤潮モニタリングデータについて引き続き詳細な解析を進める

とともに、より精密な船舶観測や、設置型測器による連続観測データ等を解析に導入することが必要であろう。

4.2.2. 赤潮発生による透明度低下の可能性

植物プランクトンは海中で光を吸収・散乱することから、浮泥のような無機懸濁粒子だけではなく、植物プランクトン自身も海中での光の減衰に多大な影響を与える (Bricaud and Morel, 1986)。1970 年代末～1980 年代初頭の東京湾では、透明度と表層のクロロフィル a 濃度との間に双曲線で近似される関係があったことが報告されている (Brandini and Aruga, 1983)。また、富栄養化した大阪湾湾奥部の透明度は、植物プランクトンの消長に起因した明瞭な季節変動を示し、ブルーム季の春と秋に低くなること、一方、流速が早く海水の鉛直混合が盛んな大阪湾湾央から湾口部では、海底から巻き上げられた粒子状物質が透明度変動の一因であり、透明度に明瞭な季節変動は認められないことが指摘されている (星加, 2002)。これらの事例は、水中光の減衰に対して、植物プランクトンによる光吸収の影響が大きい場合があることを示唆するものである。近年浅海域を中心に赤潮の頻発が顕著となっている有明

海においても、赤潮による植物プランクトンの異常増殖が、海域の透明度を低下させる可能性について検討する必要性がある。

有明海湾奥部における浅海定線データの平均的な季節変動特性として、大型植物プランクトン現存量の指標であるプランクトン沈澱量及び透明度が、ともに1~3月の冬季に増加する季節変動を示し、プランクトン沈澱量が最大となる2月に透明度も最大となることが報告されている(横内ら, 2005)。また、2001~2002年の冬季及び夏季の大潮満潮時近傍に有明海全域で観測を実施し、上層の消散係数に占めるSS及びクロロフィルa量等の寄与率を計算した大島ら(2005)は、冬季の消散係数とSS濃度との間には有意な正の相関関係が認められること、消散係数に占めるクロロフィルaの寄与率は、いずれの季節、海域でも0~20%と低く、一方SSの寄与率は、湾口部では約15%と低いものの、湾奥部でSS濃度が 20 mg L^{-1} を超えるような海域では約80%に達することを報告している。2002年10月~2003年4月の筑後川河口沖合域において、濁度及びクロロフィルa濃度の連続観測を実施した田中ら(2004)は、観測期間中に2度の珪藻赤潮発生があったこと、赤潮発生の際の推定透明度は、観測期間の全データの中でも最高レベルの1mに達していたことを報告している。

今回解析に使用した2004年度までの有明海浅海定線調査データでは、クロロフィルa濃度が観測項目となっていなかったため、本研究では、現場観測値を用いて透明度とクロロフィルa濃度の関連性を直接評価することはできないが、上記の知見から、少なくとも冬季大潮期の有明海湾奥部においては、植物プランクトン増殖に起因する水中光の減衰が透明度変動に及ぼす影響は、浮泥等の懸濁粒子濃度変動の影響と比較してかなり小さいことが推察される。このことが、10~3月の有明海湾奥部で、赤潮の頻発と透明度の上昇傾向のいずれもが認められた一因ともなっていると考えられる。

ただし、大島ら(2005)及び田中ら(2004)が観測したクロロフィルa濃度は、最高で $30\sim 40 \mu\text{g L}^{-1}$ 程度であり、クロロフィルa濃度がこれを超えるようなきわめて濃密な赤潮については検討できていない。赤潮プランクトンによる水中光減衰が透明度変動に及ぼす影響は、赤潮の規模や原因種、季節や海域等の条件によ

ても異なる可能性があるため、今後は、透明度等の光観測と同時に、クロロフィルa濃度や植物プランクトン組成に関するデータも取得、蓄積し、透明度と赤潮時のクロロフィルa濃度の関連性についてより詳しく検討する必要があると考えている。

5. おわりに

福岡県、佐賀県及び熊本県が実施した浅海定線調査データから、有明海における透明度の長期的な上昇傾向を明らかにするとともに、透明度変動と塩分変動や浮泥との関連及び透明度上昇と赤潮発生との関連について解析を行った。本研究の結論は以下の通りである。

- 1) 有明海における1975年4月から2005年3月までの30年間の浅海定線透明度データを解析した結果、湾奥西部の佐賀県沿岸から諫早湾湾口部に至る海域や、熊本県の湾央東部海域及び有明海湾口部で、透明度年平均値の明瞭な上昇が確認された。一方、湾奥東部の福岡県海域や湾奥北部の佐賀県六角川河口近傍及び長崎県島原市沿岸では、透明度の有意な上昇傾向は認められなかった。透明度の上昇傾向は、湾央東部及び湾口部では周年にわたり、湾奥西部では、10~3月の平均値でより顕著であった。
- 2) 有明海湾奥西部海域における10~3月平均透明度上昇の主な原因は、長期的な環境変化(人為的環境改変によるものを含む)に伴う潮流速の低下が、浮泥の巻き上がりを減少させ、浅海域のSS濃度の低下を招いたことにあると推察された。また、有明海湾奥部及び湾央東部の熊本県沿岸域における4~9月平均透明度の変動は、河川起源低塩分水の挙動に関連するものであることが推察された。
- 3) 冬季の有明海湾奥部では、透明度上昇に伴う植物プランクトンの光制限の緩和が、近年の赤潮頻発の一因となっていることが示唆された。

本研究により、有明海湾奥部浅海域における10~3月平均透明度の上昇の主な原因であることが示唆された浮泥濃度の減少は、透明度上昇に伴う植物プランク

トンの増殖促進以外に、栄養塩類や有機物の動態、干潟の底質環境など、有明海の生態系にも重大な影響を与えると考えられている(日本海洋学会海洋環境問題委員会, 2001)。透明度が顕著に上昇している有明海湾奥西部の佐賀県海域では、近年、貧酸素水塊の頻発(木元ら, 2003)や底質の細粒化(近藤ら, 2003)、赤潮植物プランクトン起源の有機物の堆積及び底質の悪化(岡村ら, 2005)が報告されている。透明度上昇等による赤潮の頻発化が海底への有機物負荷量を増大させたため、底層での溶存酸素の消費が促進されて貧酸素化が進行し、底質環境の悪化につながった可能性が推察される。

今回解析に用いた有明海の浅海定線調査データは、モニタリングデータとして30年以上の長期にわたり蓄積され現在もデータ取得が継続されており、有明海における環境の長期変動を把握するための基礎資料として、その重要性はますます高まるものと推察される。しかしながら一方で、鉛直的に不連続なデータであること、月1回の大潮時の観測であること等の制約があり、鉛直的な水塊構造の把握や、潮汐変動等に伴う環境の短期変動の解析に供するには不向きなデータとなっている。今後は、長期的視点に立ったモニタリング観測を継続し、中長期スケールの環境変化を引き続き注意深く把握することに加え、重点ポイントを絞った、より精密な観測のデータも解析に組み入れることで、有明海の環境変動をさらに詳細に解析していく必要がある。

謝 辞

本研究において重要な基礎資料とした浅海定線調査データの取得を長年にわたり継続してこられた福岡県水産海洋技術センター有明海研究所、佐賀県有明水産振興センター及び熊本県水産研究センターの歴代の浅海定線調査担当者、並びに九州海域における赤潮の発生状況報告の集約にあられた水産庁九州漁業調整事務所の歴代の担当者に敬意を表すとともに、ここに記して謝意を表します。透明度変動と風データとの関連の解析にあたっては、株式会社ゼニライトブイの木谷浩三博士に御指導・御協力いただきました。心よりお礼申し上げます。また、データの解析にあたって御助言を頂いた熊本大学の山田文彦博士及び原稿取りまとめに際しご助言を頂いた西海区水産研究所の小谷祐一

博士に感謝申し上げます。

References

- 東 幹夫 (2005): 底質の変化. 日本海洋学会編, 有明海の生態系再生をめざして, p. 94-104, 恒星社厚生閣, 東京.
- Brandini F. P. and Y. Aruga (1983): Phytoplankton biomass and photosynthesis to the environmental conditions in Tokyo Bay. *Jap. J. Phycol. (Sorui)*, **31**, 129-147.
- Bricaud A., A. Morel, and L. Priour (1986): Optical efficiency factors of some phytoplankters. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 816-832.
- 千葉 賢・武本 行正 (2002): 諫早湾潮受け堤防の影響評価のための潮位観測値の分析と流況数値解析. 四日市大学環境情報論集, **5**, 39-70.
- Cloern J. E. (1987): Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Conti. Shelf Res.* **7**, 1,367-1,381.
- 星加 章 (2002): 物理化学環境. 水産研究叢書 49, 大阪湾の海域環境と生物生産, p. 12-34, 日本水産資源保護協会.
- 池末 弥 (1966): 有明海の自然条件. 水産増養殖叢書 10, 有明海における水産業展望, p. 3-16, 日本水産資源保護協会.
- 井上 尚文 (1985): 第 21 章 有明海 物理. 日本海洋学会沿岸海洋部会編, 日本全国沿岸海洋誌, p. 831-845, 東海大学出版会, 東京.
- 石坂 丞二 (2003): 宇宙から見た有明海の赤潮. 月刊海洋, **35**, 271-275.
- Ishizaka J., Y. Kitaura, Y. Touke, H. Sasaki, A. Tanaka, H. Murakami, T. Suzuki, K. Matsuoka, and H. Nakata (2006): Satellite detection of red tide in Ariake Sound, 1998-2001. *J. Oceanogr.*, **62**, 37-45.
- 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会 (2006): 委員会報告. 環境省有明海・八代海総合調査評価委員会, 85 pp.
- 川口 修・山本 民次・松田 治・橋本 俊也 (2004): 水質の長期変動に基づく有明海におけるノリ及び珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明. 海の研究, **13**, 173-183.
- 川村 嘉広 (2006): 有明海奥部のノリ養殖-影響する環境要因と自然環境への影響-. 海洋と生物, **28**, 603-610.
- 木元 克則・西内 耕・岡村 和磨 (2003): 有明海における溶存酸素分布. 月刊海洋, **35**, 261-265.
- 気象庁: 気象統計情報 (<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html>).
- 木谷 浩三 (2003): 有明海における冬季の平均流について. 海と空, **78**, 129-134.
- 木谷 浩三 (2005): 有明海における北方成分風の変動について. 海と空, **80**, 175-183.
- 国土交通省 (建設省) 河川局編: 流量年表

- 近藤 寛・東 幹夫・西ノ首 英之 (2003): 有明海における海底堆積物の CN 組成. 長崎大学教育学部紀要 -自然科学-, **68**, 1-14.
- 久野 祐輔・川村 明・神野 健二 (2002): 筑後川河川流況の長期的変動特性について. 第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集, 189-194.
- Manda A. and K. Matsuoka (2006): Changes in tidal currents in the Ariake Sound due to reclamation. *Estuaries and Coasts*, **29**, 645-652.
- 中川 泰之・今林 章二・末次 広児 (2002): 有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析. 海岸工学論文集, **49**, 566-570.
- 中田 英昭・野中 裕子 (2003): 有明海における海況の経年的な変化. 月刊海洋, **35**, 256-260.
- 日本海洋学会海洋環境問題委員会 (2001): 有明海環境悪化機構究明と環境回復のための提言. 海の研究, **10**, 241-246.
- 農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会 (2002): 有明海の現状について-13 年度調査と過去の資料の解析を踏まえて. 農林水産省有明海ノリ不作等対策関係調査検討委員会, 200 pp.
- 大島 巖・阿部 恵子 (2005): 有明海の上層における消散係数の算出式. 海の研究, **14**, 593-600.
- 岡村 和磨・田中 勝久・木元 克則・清本 容子 (2005): 有明海奥部と諫早湾における表層堆積物中の有機物の分布と安定同位体比. 海の研究, **15**, 191-200.
- 代田 昭彦・近藤 正人 (1985): 第 21 章 有明海 化学. 日本海洋学会沿岸海洋部会編, 日本全国沿岸海洋誌, p. 846-862, 東海大学出版会, 東京.
- 水産庁・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・鹿児島県・宮崎県 (1983): 昭和 57 年度九州海域赤潮予察調査報告書 (西海ブロック), 230 pp.
- 水産庁・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・鹿児島県・宮崎県 (1984): 昭和 58 年度九州海域赤潮予察調査報告書 (西海ブロック), 201 pp.
- 水産庁・福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・鹿児島県・宮崎県 (1995): 平成 6 年度九州海域赤潮調査報告書 (西海ブロック), 116 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1979): 昭和 53 年九州西部海域の赤潮, 30 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1980): 昭和 54 年九州西部海域の赤潮, 33 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1981): 昭和 55 年九州西部海域の赤潮, 33 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1982): 昭和 56 年九州海域の赤潮, 39 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1983): 昭和 57 年九州海域の赤潮, 43 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1984): 昭和 58 年九州海域の赤潮, 37 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1985): 昭和 59 年九州海域の赤潮, 32 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1986): 昭和 60 年九州海域の赤潮, 33 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1987): 昭和 61 年九州海域の赤潮, 33 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1988): 昭和 62 年九州海域の赤潮, 33 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1989): 昭和 63 年九州西部海域の赤潮, 57 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1990): 平成元年九州西部海域の赤潮, 55 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (1991): 平成 2 年九州西部海域の赤潮, 74 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2001): 平成 12 年九州海域の赤潮, 71 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2002): 平成 13 年九州海域の赤潮, 70 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2003): 平成 14 年九州海域の赤潮, 69 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2004): 平成 15 年九州海域の赤潮, 71 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2006): 平成 16 年九州海域の赤潮, 74 pp.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2007): 平成 17 年九州海域の赤潮, 82 pp.
- 杉本 隆成・田中 勝久・佐藤 英夫 (2004): 有明海奥部における浮泥の挙動と低次生産への影響. 沿岸海洋研究, **42**, 19-25.
- 滝川 清・鈴木 敦巳・古川 賢治・大本 照憲・山田 文彦 (1999): 有明海の白川・緑川河口域における干潟環境特性とその評価に関する研究. 海岸工学論文集, **46**, 1,121-1,125.
- 滝川 清・田中 健路・外村 隆臣・吉村 祥子・古市 正彦 (2002): 有明海の中中部海域における環境変動の要因分析. 海岸工学論文集, **49**, 1,066-1,070.
- 田中 勝久・児玉 真史 (2004): 有明海湾奥部の環境変動に及ぼす浮泥の影響. 水環境学会誌, **27**, 307-311.
- 田中 勝久・児玉 真史・熊谷 香・藤本 尚伸 (2004): 有明海筑後川河口域における冬季のクロロフィル蛍光と濁度変動. 海の研究, **13**, 163-172.
- Tanaka K., K. Okamura, K. Kimoto, H. Yagi, and M. Kodama (2007): Citrate-dithionite-bicarbonate extractable phosphorus (CDB-P) pool in the suspended and surface sediments of the tidal flat area in the inner Ariake Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **63**, 143-148.
- Tanaka K. and M. Kodama (2007): Effects of resuspended sediments on the environment changes in the inner part of Ariake Bay, Japan. *Bull. Fish. Res. Agen.*, **19**, 9-15.

- 田中 勝久・清本 容子・岡村 和磨・児玉 真史 (2007): 筑後川懸濁物質負荷の実態と有明海北部域環境への影響. 海と空, **82**, 81-86.
- 田中 健路・滝川 清・成松 明 (2003): 有明海とその周辺海域における近年の気候変動の傾向. 海岸工学論文集, **50**, 1,171-1,175.
- 堤 裕昭・木村 千寿子・永田 紗矢香・佃 政則・山田 一岩・高橋 徹・木村 成延・立花 正生・小松 利光・門谷 茂 (2005): 陸域からの栄養塩負荷量の増加に起因しない有明海奥部における大規模赤潮の発生メカニズム. 海の研究, **15**, 165-189.
- 堤 裕昭・堤 彩・高松 篤志・木村 千寿子・永田 紗矢香・佃 政則・小森田 智大・高橋 徹・門谷 茂 (2007): 有明海奥部における夏季の貧酸素水発生域の拡大とそのメカニズム. 海の研究, **16**, 183-202.
- 宇野木 早苗 (2001): 海域の環境を決める海水の流れ. 科学, **71**, 912-920.
- 宇野木 早苗 (2002): 有明海における潮汐と流れの変化-諫早湾干拓事業の影響を中心にして-. 海と空, **78**, 19-30.
- 宇野木 早苗・佐々木 克之 (2007): 有明海異変の発生システムについて. 海の研究, **16**, 319-328.
- 八木 宏・井瀬 肇・石田 大暁・灘岡 和夫・中山 哲巖・小谷 正幸 (2005): 冬季有明海湾奥部浅海域における底層懸濁態物質の空間構造と輸送特性. 海岸工学論文集, **52**, 941-945.
- 柳 哲雄・下村 真由美 (2004): 有明海における成層度の経年変動. 海の研究, **13**, 575-581.
- 安田 秀一・松永 信博・徳永 貴久・阿部 淳・高島 創太郎・河野 晋悟・宇都 帝信・鬼塚 剛・伊沢 瑞夫・河野 史郎 (2005): 有明海北部海域の物理的環境特性-淡水流入に伴う潮流・濁度・溶存酸素の変動と有明海の副振動-. *J. Natl. Fish. Univ.*, **53**, 41-56.
- 横内 克巳・半田 亮司・川村 嘉広・吉田 雄一・山本 憲一・清本 容子・岡村 和磨・藤原 豪 (2005): 有明海における水質環境の水平分布と経時変化. 海と空, **80**, 141-162.
- 横山 勝英 (2005): 河川の土砂動態が有明海沿岸に及ぼす影響について-白川と筑後川の事例-. 応用生態工学, **8**, 61-72.

Long-term Increasing Trend of Transparency and its Relationships to Red Tide Outbreaks in Ariake Bay

Yoko Kiyomoto[†], Kazuki Yamada[‡], Hideaki Nakata[‡],
Joji Ishizaka[‡], Katsuhisa Tanaka^{**}, Kazumaro Okamura[†],
Kaori Kumagai^{††}, Tomoki Umeda^{††}, and Seiki Kino^{*}

Abstract

Transparency data over a 30 year period (April 1975 to March 2005) were analyzed to evaluate the long-term trend of transparency in Ariake Bay. Red tide datasets were used to examine the relationship between the trend of increasing transparency and red tide outbreaks. Significant increases in transparency and red tides were detected in the western area of the inner part and in the eastern area of the central part. Such a trend of increasing transparency in the inner Ariake Bay was more remarkable in October to March when river discharge is low and vertical mixing occurs, compared to April to September when river discharge is high and stratification develops. Our results suggest that the decrease of resuspension of bottom sediments due to the reduced tidal current is one of the major factors leading to the increase of transparency, which has resulted in the increase of red tide outbreaks in the inner part of Ariake Bay especially in October to March. While, in April to September, fluctuations in river water inflow affect the variation of transparency especially in the inner part and in the eastern shallow area of the central part in Ariake Bay.

Key words: Ariake Bay, Transparency, Long-Term Fluctuation, Suspended sediment,
Red tide

(Corresponding author's e-mail address: ykiyo@fra.affrc.go.jp)

(Received 30 May 2007; accepted 13 May 2008)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

[†] Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, 1551-8 Taira-machi, Nagasaki, 851-2213, Japan

[‡] Faculty of Fisheries, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki, 852-8521, Japan

^{**} Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 1-1 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8686, Japan

^{††} Fukuoka Prefectural Office, 7-7 Higashi-kouen, Hakata, Fukuoka, 812-8577, Japan

^{††} Saga Prefectural Genkai Fisheries Research and Development Center, 6-4948-9 Toubou, Karatsu, Saga, 847-0122, Japan

^{*} Kumamoto Prefectural Office, 6-18-1 Suizenji, Kumamoto, 862-0950, Japan