

有明海北部海域の水質構造と赤潮発生に関する一考察

橋本彰博*・関根章雄**・有田正光***

有明海において 2001 年から 2003 年に実施された現地観測（有明プロジェクト I, II）により得られた結果を再整理し、特に鉛直分布の特徴に注目して水質の空間分布特性を考察した。また、同海域における赤潮の発生と気象の関係について統計解析を実施した。得られた主要な結果は、(1) 諫早湾北部の水質は有明海本体および風の影響を受けやすく、他の水域とは異なる水質特性を示す、(2) 単回帰分析の結果、珪藻類は気温、風速と河川流入量に、鞭毛藻類は風速に対して赤潮発生との間に強い正の相関関係が確認された、等である。

1. はじめに

2000 年に起きたノリの色落ち問題を契機に、有明海では様々な機関により水質や流速のモニタリングが実施され有益なデータが蓄積されるとともに、有明海の水質構造について多くの知見が得られ始めている（例えば鯉渚ら, 2003）。しかしながら、モニタリングデータは時間的には密である一方で空間的には限られたポイントにおける情報しか得ることが出来ず、同海域の水質ならびに流動の全体像を明らかにするには到っていない。この様な状況を踏まえて、著者らは有明海において比較的密な空間情報を収集するとともに、同海域の水質・流動特性を明らかにするために 2001 年より超音波ドップラー流速計（以下、ADCP）ならびに多項目水質計を駆使した現地観測（有明プロジェクト I, II）に参加している。

本研究では、現在までに蓄積された観測結果を再整理し、有明海北部海域における水質の空間分布特性について鉛直分布の特徴に注目して考察することにより新たな知見を得ることを目的とする。更に同海域において発生した赤潮についてのデータを整理し、気象と赤潮発生の関連についても明らかにする。

2. 観測概要

観測は有明プロジェクト I および II として実施された。観測では一潮汐間の水質変動を把握するため、多項目水質計を用いて水温、塩分、DO、Chla、濁度の鉛直分布ならびに透明度、風向・風速を測定した。観測地点は有明海を 5 区域、諫早湾を 2 区域に分け有明海北部海域を網羅するように配置した。ADCP を用いた流動測定も同時に行っており、有明海で 5 測線、諫早湾口で 1 測線の計 6 測線を設けた。また、2002 年には 7 月から 9 月の 3 ヶ月間にわたり、諫早湾を対象に大潮、小潮の満潮時に水温、塩分、DO、Chla、濁度の鉛直分布の測定も

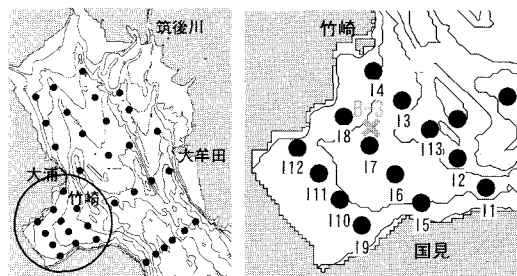


図-1 観測地点（左：全体、右：諫早湾詳細）

合わせて実施した。観測地点を図-1 に示す。なお、観測の詳細については小松ら (2003, 2004) を参照されたい。

3. 観測結果および考察

(1) 有明海北部海域の水質分布特性

まず、2003 年夏季の有明海表層における塩分平面分布を図-2 に示す。一般にいわれているように、筑後川等から流入した河川水がコリオリの影響を受けて西側の鹿島・太良沖に輸送されて南下する様子が伺える。また、この希釈塩水は有明海西側沿岸から竹崎島付近に到り、諫早湾の北部にわたって分布している。このように、諫早湾の水質構造は有明海本体より流入する水塊の影響を強く受けることが推測される。そこで、密度および DO の鉛直分布特性を調べた。ここでは底層部の勾配に特徴が見られた DO について図-3(a) に示すようなタイプ別 (Type1: 中層で大きな勾配を伴う分布, Type2: 底層において大きな勾配を有する分布, Type3: それ以外の分布) に分類し、水域毎にどのタイプが出現しやすいかを検討した。検討に際して、諫早湾湾口、湾中央、湾奥を南北 2 地点ずつ 6 海域に分け、分布の形状別に分類を行い出現回数から特性を調べた。その結果、北部では Type1 の出現回数が多い一方、Type3 が少なかったのに対し、南部では Type3 が多く、防潮堤からの排水の影響を除くと中層以深で急激な変動をする分布は少なかった (図-3(b))。

以上のことから、諫早湾では湾軸を境に DO の鉛直

* 正 会 員 博(工) 東京電機大学助手 理工学部

** 正 会 員 修(工) 建設技術研究所 グラム室

*** 正 会 員 工博 東京電機大学教授 理工学部

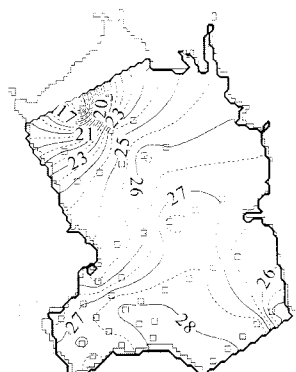


図-2 満潮時における表層塩分の平面分布

分布特性が異なり、湾外水の影響を強く受けていることが確認された。

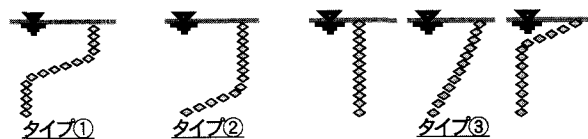
(2) 諫早湾における低酸素水の形成過程

有明海北西部および諫早湾北部で底層 DO が低下した2002年7月31日の湾口部および湾中央部の測点における DO と密度の鉛直分布を図-4 に示す。諫早湾北側 (I4, I8) の DO は他の地点よりも低く、密度分布も明らかに異なる分布を示している。また、底層 DO の時系列をみると (図-5)、諫早湾北側に位置する I4, I8 地点は他の地点に比べて水深が浅いにも拘わらず DO の変動が異なっており、満潮後もこの2地点だけ低い値のままであることが分かる。この時の湾口部及び湾中央部の密度の断面分布をみると (図-6)、北部 (図左側) において密度の分布が不連続になっており、諫早湾の外から水塊が流入していることが推測される。さらに底層における水温と塩分の相関を調べると (図-7)、満潮時及び下げ潮時における I4 と I8 地点のプロットのみがほぼ重なっており、両地点の水質特性が湾内の他の地点とは異なることが分かる。以上のことから、諫早湾の北側の水質構造は前節で示した様に湾外水の影響を強く受けることが確認できる。このことが同水域底部の DO の低下に何らかの影響を及ぼしていることが示唆される。

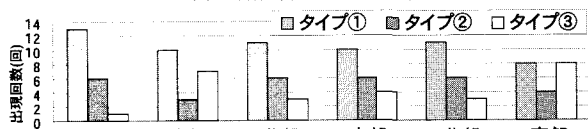
(3) 風に伴う水質変動特性

大浦における潮位と B-3 地点における風向・風速、DO、密度および Chl. a の時系列を図-8 に示す (鯉渚ら, 2003 を参照)。図より、底層の DO が急激に上昇し表層と同程度の値にまで回復するケースが4回確認でき、いずれの場合も北東風が連吹している期間であること、このうち7月9日～11日にみられる DO の変動と他の3期間では DO の回復の仕方が異なっていることが見て取れる。

まず、7月9日～11日に注目すると、底層の DO、密度、Chl. a は全て潮汐の変動に対応しているのに対して、表層・中層ではそのような変動は確認できないことから



(a) DO鉛直分布の分類形状



(b) 鉛直分布形状の出現回数

図-3 DO の鉛直分布特性

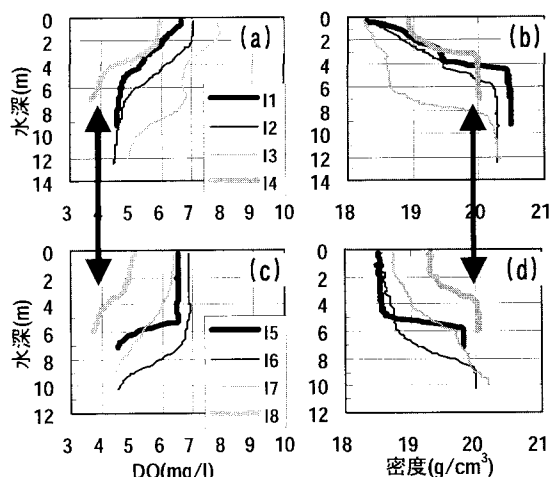


図-4 湾口部における DO (a)、密度 (b) および湾中央部における DO (c)、密度 (d) の鉛直分布

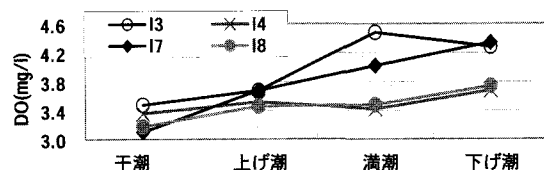


図-5 湾口および湾中央北部における底層 DO の時系列

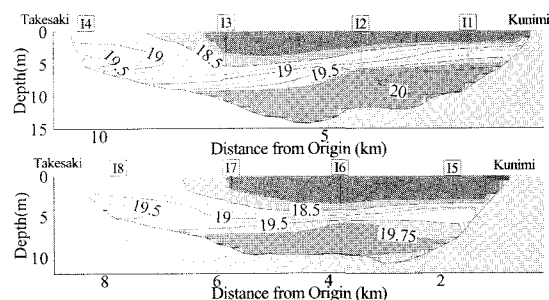


図-6 湾口および湾中央部における密度横断分布

表層と底層では水塊の起源が異なると推測される。7月9日以前の変動をみると、7月2日の大規模な出水に起

因する表層密度の低下が確認でき、湾奥部には低密度の水塊が存在していたことが推測される。このことより、7月9日～11日の変動は北東風の連吹により表層水が湾奥に吹き寄せられた結果、補償流により湾奥部から輸送された低密度水を捉えた結果と考えられる。

一方、他の3ケースは共通して北東風が吹き始めるとまもなく底層のDO、密度が急激に変化している。ここで、7月26日は台風9号が最接近した日、他の2ケース(8月18日、29日)も台風接近による強い北東風が連吹した日である。北東よりの風は諫早湾内に波浪をもたらすことから、上記3ケースは強い北東風による波浪が鉛直混合を促進した結果と考えられる。いずれにしても、諫早湾におけるDOの上昇には北東からの風が影響を及ぼしていることが分かる。

4. 赤潮形成と気象要因の関係

大きな潮流により大規模な赤潮はそれほど発生しなかった有明海において、近年その発生回数、規模がともに増大している。既往の研究から、有明海において夏季に発生する赤潮は高温水・低風速・無降水の条件下で高日射が継続した時、植物プランクトンが増殖し赤潮に到ることが確認されている(鯉渕ら, 2002)。赤潮の形成には気象、水質、地形特性等、様々な因子が影響を及ぼしていると考えられるが、ここでは特に赤潮発生の初期段階で影響を及ぼすと考えられる気象を取り上げる。解析には九州海域の赤潮(水産庁九州漁業調整事務所, 1988～2002)のデータを整理して1988年から2002年までの15年間について有明海北部海域を対象に発生期間、発

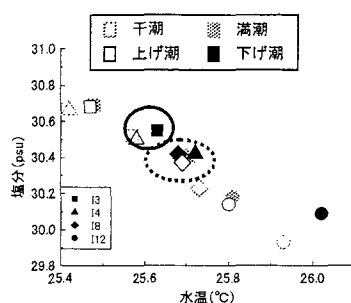


図-7 諫早湾北部における水温と塩分の相関図

生回数、発生海域等を調べるとともに、赤潮発生と気象要因との関係について統計解析を行った。

(1) 年別赤潮発生件数と発生日数の経年変化

有明海北部海域における赤潮発生件数および発生日数の経年変化を図-9に示す。年毎にバラつきがあるものの、閉め切り前では件数、日数ともに比較的小さな値であるのに対して、閉め切り後は右肩上がりに増加している。赤潮多発年である1995年と2001年について、赤潮発生1件あたりの発生日数を算出したところ、1995年は一件あたり約14日間であるのに対して2001年は約25日間と赤潮継続期間が大幅に増加していた。このことから、気象要因だけではなく水質等の変化に起因して赤潮が増加した可能性が考えられる。

珪藻類および鞭毛藻類の1988年から2002年までの季節別年平均赤潮発生延べ日数を図-10に示す。図より、有明海北部海域では珪藻類は夏及び冬に、鞭毛藻類は夏に多く発生する傾向であることが分かる。また、堤防によ

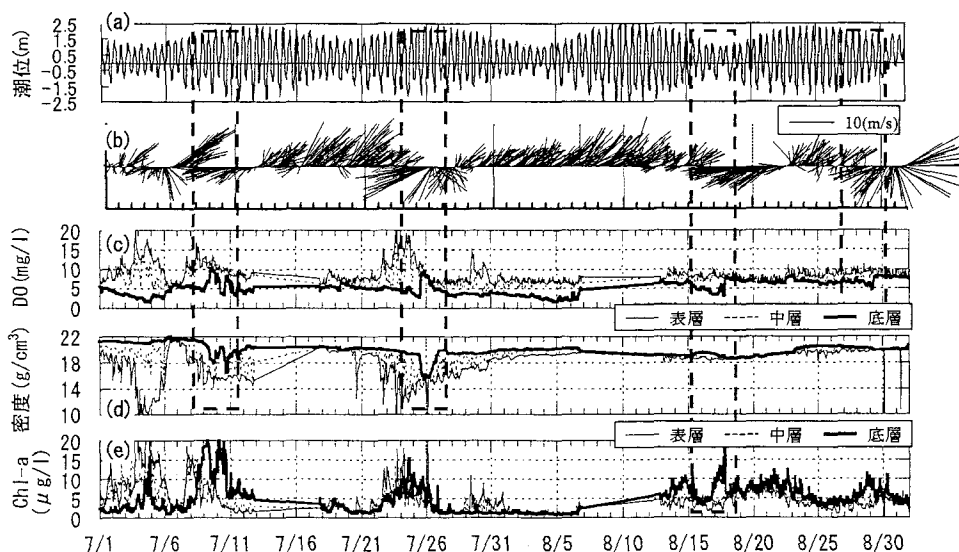


図-8 (a)大浦における潮位、(b)風向・風速、B-3地点における(c)DO、(d)密度、(e)Chl-aの時系列(鯉渕ら(2003)による観測の元データを引用・作図)

る閉め切り後には珪藻類は1年を通して、鞭毛藻類は夏の発生日数が大幅に増加している。

(2) 赤潮発生日数と気象の統計的解析

赤潮発生と気象との関係について、①赤潮形成時の気象要因と赤潮発生日数との関係に対して重回帰分析を、②赤潮発生15日前～当日までの気象と赤潮発生日数に対して単回帰分析を行い、結果を考察した。

a) 資料および解析方法

解析にあたっては山本ら(1996)が三河湾を対象に行った方法を参考にした。赤潮のデータは1988年～2002年の15年間に有明海北部海域で発生した赤潮発生日数、気象データには佐賀気象台で観測されたデータ及び筑後川の河川流量データを用い、赤潮の形成に影響を及ぼすと考えられる気温、風速、河川流入量、日射量を説明変数とした。また、赤潮発生日数は珪藻類(運動性無し)、鞭毛藻類(運動性有り)の2つに分けて季節別に集計した。季節は12～2月を冬季、3～5月を春季、6～8月を夏季、9～11月を秋季とした。気温と風速は発生日からの平均値、河川流入量と日射量は発生期間の積算値を用いた。ここで、重回帰分析を行う際、各説明変数間で多重共線性の有無を確認する必要がある。本研究においても、説明変数として採用した4つの気象要因について分散拡大要因(VIF)による多重共線性の検定を実施したところ、いずれの解析においてもVIFは最大で1.71となり、多重共線性の問題はないと判断された。

b) 赤潮形成時の気象との関係

赤潮形成と気象に対して重回帰分析を行った結果を表-1に示す。まず、15年分のデータ全てに対して重回帰分析を行ったところ、気象要因は珪藻類のみに対して有意な影響を及ぼすという結果が得られた。気象要因のうち気温が最も大きく寄与しており、標準偏回帰係数は-0.335であった。これは冬季における赤潮発生日数が1年を通して最も多いことに起因していると考えられる。

次に季節別の赤潮発生状況と気象要因について重回帰分析を実施したところ、鞭毛藻類に対しては有意な結果がえられなかったが、珪藻類に対しては春季において有意と判断された。また、気象要因としては、珪藻類では風速および日射量、鞭毛藻類では気温が赤潮形成に有意な影響を及ぼしていることが分かった。

c) 赤潮形成前の気象の影響について

閉め切り後の1997年～2002年までの7年を対象に、赤潮発生前の気象要因と赤潮発生延べ日数に対して実施した単回帰分析の結果のうち、有明海で問題となる冬季の珪藻類および夏季の鞭毛藻類の結果を図-11に示す。

まず、珪藻類について見ると、日射量には目立った相関は見られないが、気温、赤潮形成12日前の河川流入量および8日前の風速にはそれぞれ強い正の相関が見られ

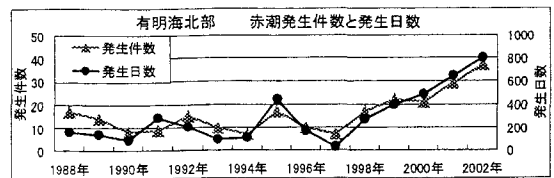


図-9 赤潮発生件数と発生日数の経年変化

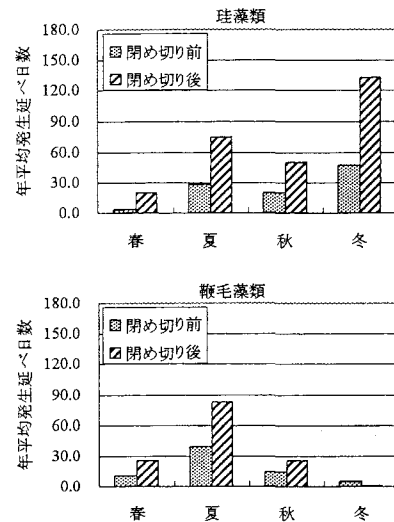


図-10 1988年～2002年における季節別の年平均赤潮発生延べ日数(上:珪藻類,下:鞭毛藻類)

る。また、風速は赤潮形成直前には負の相関に変化している。つまり、冬季の珪藻類は気温の高い条件下において、10日程度前の出水による栄養塩の流入と風による攪乱、その後の静穏な海象が赤潮の発生に影響を及ぼすことが分かる。

鞭毛藻類では、発生前の日射量に負の相関が、風速については14日前の風速に正の相関、形成10日前から負の相関が見られた。ラフィド藻類・渦鞭毛藻類等の鞭毛藻類の増殖には強風による吹送流、強い潮流によるシストの巻き上げ、鉛直混合による底層栄養塩の有光層への補給が関係していると考えられており(岡市, 1997)、上記もこのことを示唆する結果と推測される。

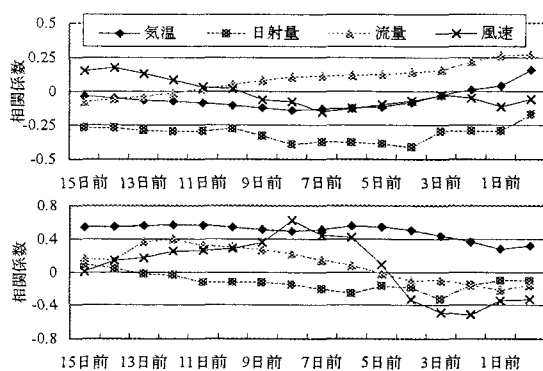
以上の結果から、冬季の珪藻類、夏季の鞭毛藻類ともに赤潮発生前の気象が赤潮形成に大きく影響を及ぼしており、既往の報告を支持する結果が得られた。

5. ま と め

本研究では、数年間にわたり実施された現地観測結果を再整理し、特に鉛直分布に注目して水質の平面分布特性の考察を行った。また、統計解析により赤潮の発生要因の検討を行い、赤潮発生と気象との関連性について考察した。本研究で得られた知見を以下に示す。

表-1 赤潮発生日数と気象要因との重回帰解析結果(*は有意水準0.05を示す)

	期間	標準偏回帰係数				重相関係数
		気温	風速	河川流入量	日射量	
珧藻類	1988~2002	-0.335*	0.046	-0.040	-0.013	0.408*
鞭毛藻類	1988~2002	0.039	0.120	-0.080	-0.103	0.151
珧藻類	春期	-0.409	-0.646*	-0.277	-0.785*	0.836*
	夏期	0.011	0.152	-0.149	-0.214	0.283
	秋期	-0.215	0.054	-0.023	0.291	0.308
	冬期	0.031	0.030	-0.115	0.097	0.152
鞭毛藻類	春期	0.012	0.167	0.042	-0.271	0.314
	夏期	0.292*	0.004	-0.022	-0.123	0.281
	秋期	-0.016	0.344	-0.063	-0.127	0.360
	冬期	—	—	—	—	—

図-11 単回帰分析結果
(上:鞭毛藻類(夏),下:珧藻類(冬))

- DOの鉛直分布特性を調べたところ、諫早湾では湾軸を境に分布特性が異なり、湾北側では湾外水の影響を強く受けた水質分布となっていた。このことが同水域底部のDOの低下に何らかの影響を及ぼしていることが示唆される。
- 諫早湾におけるDOの上昇には、北東からの風が影響を及ぼしていることが確認された。
- 赤潮発生と気象要因について、統計解析を行った。単回帰分析の結果、気象要因のうち、珧藻類は気温、風速と河川流入量に、鞭毛藻類は風速に対して赤潮発生との間に強い正の相関関係が確認された。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究A「有明海の流れ構造の解明と蘇生・再生のための調査研究」(研究代表者小松利光、課題番号14205075)の援助を受けた。本稿で使用した観測データは「有明プロジェクトII」の一環として観測されたものである。また、2002年の観測データは九州大学環境流体力学研究室によって観測されたものである。ここに記し甚大なる謝意を表する。

参考文献

- 岡市友利編(1997)：赤潮の化学，第二版，恒星社厚生閣，337p。
- 鯉淵幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2002)：2001年における有明海の水質の動態解明，海岸工学論文集，第49巻，pp.1056-1060。
- 鯉淵幸生・佐々木淳・有田正光・磯部雅彦(2003)：有明海における水質変動の支配要因，海岸工学論文集，第50巻，pp.971-975。
- 小松利光・安達貴浩・金納 聡・矢野真一郎・小橋及子・藤田和夫(2003)：有明海における流れと物質輸送に関する現地観測，海岸工学論文集，第50巻，pp.936-940。
- 小松利光・矢野真一郎・齋田倫範・松永信博・鶴崎賢一・徳永貴久・押川英夫・濱田孝治・橋本彰博・武田誠・浅井孝二・大串浩一郎・多田彰秀・西田修三・千葉賢・中村武弘・堤裕昭・西ノ首英之(2004)：北部有明海における流動・成層構造の大規模現地観測，海岸工学論文集，第51巻，pp.341-345。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1988)：昭和63年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.26-33。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1989)：平成元年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.24-31。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1990)：平成2年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.24-31。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1991)：平成3年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.24-37。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1992)：平成4年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.26-37。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1993)：平成5年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.21-27。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1994)：平成6年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.21-26。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1995)：平成7年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.21-27。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1996)：平成8年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.21-28。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1997)：平成9年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.22-26。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1998)：平成10年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.26-33。
- 水産庁九州漁業調整事務所(1999)：平成11年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.34-41。
- 水産庁九州漁業調整事務所(2000)：平成12年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.24-35。
- 水産庁九州漁業調整事務所(2001)：平成13年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.26-35。
- 水産庁九州漁業調整事務所(2002)：平成14年九州海域の赤潮，水産庁九州漁業調整事務所，pp.22-32。
- 山本民次・岡井 満：三河湾における赤潮形成と気象要因に関する統計的解析(1996)：水産海洋研究，第60巻，第4号，pp.348-355。