

八代海の環境変動の要因分析に関する研究

滝川 清* ・田中健路** ・森 英次***
渡辺 枢**** ・外村隆臣***** ・青山千春*****

有明海と同様、環境悪化の悪循環に陥っていると懸念される八代海の環境変化の要因分析を行なうにあたり、水質や気象などの過去 26 年間のデータを用いて整理と解析を行なった。その結果、水質環境の変動特性により 5 つの海域に分類でき、夏季には海域全体にわたって強い密度成層が形成されており、特に湾奥部では貧酸素化が出現しており、近年の硝化能力の低下とともに赤潮多発の増加傾向と一致していることが判明した。また、3 次元の流動解析の結果、八代海の潮汐変動は有明海と連動していること、湾奥部での流動が中南部海域に対して停滞状態にあり水質環境の悪化傾向と一致していることなどが分かった。

1. はじめに

代表的な閉鎖性内湾である八代海・有明海の環境は、1980 年代より、生息生物の種および数が減り始め、赤潮の発生、漁獲量の減少や水質の悪化などが顕著となり、特に有明海では「ノリの色落ち」により莫大な被害が生じ、大きな社会問題となっている。これを契機として、有明海では、多くの機関・研究者を中心に調査・研究が積極的に開始され、環境悪化の要因分析等が鋭意すすめられている。一方、八代海の水質に関しては、不知火海定線調査・公共用水域水質調査等は定期的に行われているものの有明海ほどの調査・研究は少なく、環境変動の要因に関する系統化された知見は非常に乏しい現状にある。

本研究では、このような八代海域の環境悪化の原因解明にあたって、過去 26 年間に及ぶ浅海定線調査データおよび気象観測データの経年変化記録、また流動数値解析等から、八代海の環境変動特性を把握し、環境悪化の要因分析と海域環境の回復・改善方策の資料を得ることを目的として研究を行った。

2. 八代海域の環境変動特性

八代海の水質については、不知火海定線調査(熊本県：1975 年から 2000 年の 26 年間のデータ)および八代海域調査委員会資料(国土交通省、水産庁他、2001~2003)をもとに、それらの変動特性について調べた。

(1) クラスタ分析による海域特性

不知火海定線調査地点は、図-1 に示すように熊本県 20 点である。調査項目は水温、塩分の他に、溶存酸素(DO)、化学的酸素要求量(COD)やリン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)、ア

ンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、といった栄養塩濃度、透明度、pH が毎月 1 回の間隔で計測、分析されている。

不知火海定線調査データについて、地点毎の分布特性を明確化するために、水質項目データを用いてクラスター分析を行い、グループ毎の典型的な変動パターンを見出すことで水質環境の変動特性を調べた。26 年間にわたり、調査地点 20 のすべてのデータが揃っている、水温(表層)、塩分(表層)および透明度についてクラスター分析を行った結果、図-1 に示すように湾奥北部 A、湾奥南部 B、湾中央部 C、湾央南部 D、湾南部 E の 5 つの海域グループに分類された。

図-2 にグループ毎の月平均表層水温変動を示す。平均表層水温は、夏季は湾南部(group E)が湾奥部(group A, B)に比べて年較差が小さい傾向にある。これは湾南部に比べて湾奥部は水深が浅く、単位面積あたりの熱容量が小さくなり、大気側からの加熱が温度変化に反映されやすいことが主な要因として考えられる。その一方、グループ E の海域では、水深が深く単位面積あたりの熱

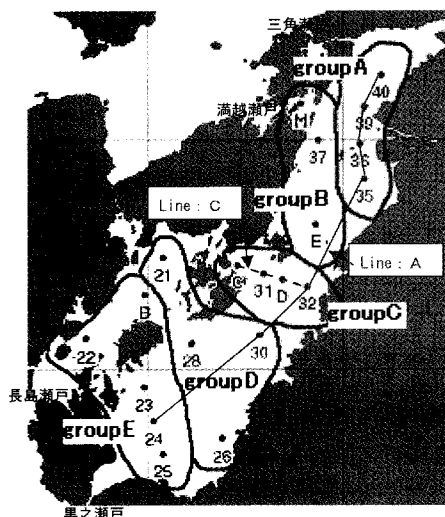


図-1 不知火定線調査地点(クラスター分類と縦横断線)

* 正 会 員 工 博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター

** 正 会 員 理 修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科

*** 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科

**** 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科

***** 正 会 員 熊本大学工学部技術部

***** 正 会 員 博(水) 独立総合研究所

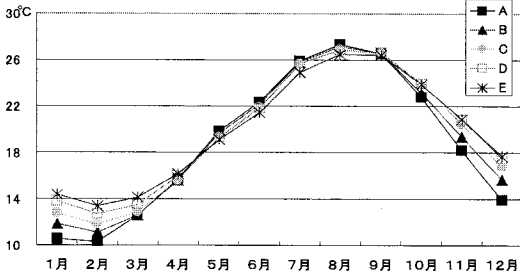


図-2 表層水温の年変動特性

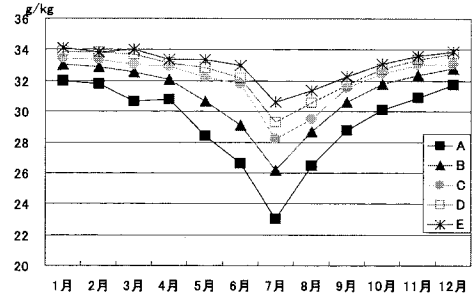


図-3 塩分(表層)の年変動特性

容量も大きくなり、かつ、外海である東シナ海との海水交換によって、水平方向の熱交換が行われるため、年較差は穏やかである。海域の温度差は、夏季は平均 $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 程度であるのに対し、冬季は湾南西部が奥部に比べて 4°C ほど高く、東シナ海を北上する暖流(対馬海流)の影響で湾南西部が相互作用を受け高くなっている。

図-3は表層塩分のグループごとの年変動を示す。海域全体として湾奥部(group A, B)において塩分が低く、湾軸方向に沿って南部(group E)にかけて高い傾向にある。年較差は湾南部において4‰、奥部では8‰と大きな開きがある。6月から8月の梅雨時期において降雨の影響により多くの淡水が流入され海域全体で塩分が下がっており、特に湾奥部では球磨川などの河川から流入量の増加により、23‰まで大きく低下している。

図-4にはグループ毎の透明度の月平均年変動を示す。調査地点35, 36, 39, 40の湾奥部(group A)の水深は5mほどであり、年間を通して透明度は低く年較差に大きな変化はない。また湾奥南部(group B)は球磨川河口域にあたり、生活廃水などの影響で透明度は悪くなっている。湾中央部(group C)から湾南部(group E)へ湾軸方向に南下するに従い、透明度は高くなっている。長島瀬戸、黒之瀬戸を通じて、外海からの海水の浸入の影響で透明度が高いと考えられる。また、夏季には降雨による球磨川等の河川水の流入によって、湾中央から湾南部において透明度が下がる。

(2) 水質変動特性

a) 水温・塩分・密度の特性

八代海の成層化の状況を把握するために、湾の縦横断面における水温、塩分、密度の鉛直分布特性を調べた。例として、図-1に示す、Line A, Line Cの断面での、2000年夏(7月)と冬(12月)の水温と塩分より求めた密度分布(σ_t)を図-5および図-6示す。

7月は梅雨時期の降雨のため、海域全体で表層の塩分が低下している。特に湾奥部(group A)では球磨川の河口にあたり、淡水の流入により表層の塩分が22‰と他の表層よりも6‰ほど低い。一方、真夏の強い日差しを受け

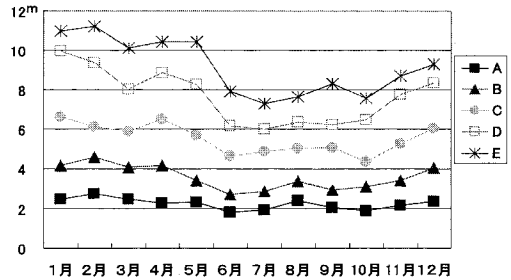
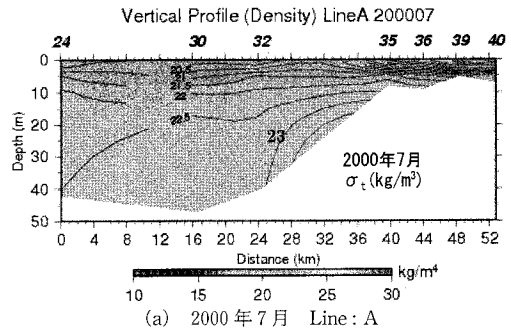
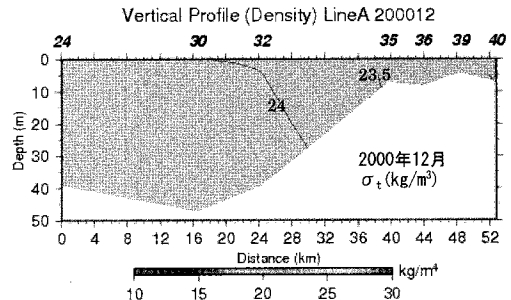


図-4 透明度の年変動特性



(a) 2000年7月 Line: A



(b) 2000年12月 Line: A

図-5 Line: Aでの密度鉛直分布

海水表面の水温はほぼ全域で 26°C 以上と高く、これらの結果、図-5(a)に示すように海域全体にわたって、非常に強い密度成層が起こっていることが明らかとなった。

12月には、図-5(b)に示すように水温は湾奥部のほう

が湾奥から湾南部よりも低く、塩分は逆に湾奥部が湾南部よりも低いため、表層から底層までほぼ均質な密度となり密度成層は生じない。

b) DO (表層) の経年変化

八代海の貧酸素化現象を把握するために図-7に示すように調査地点 22, 30, 40 の 3 点における 1991 年から 2000 年まで 10 年間の溶存酸素濃度の経年変化を調べた。いずれの地点も年の季節変化が明瞭であり、夏季には約 6 mg/l まで低下し、冬季に増加する傾向にある。溶液中の酸素濃度は温度に逆比例するので、通常、水温が高くなる夏場は DO が低くなるが、1995 年夏季において水温に対する飽和溶存酸素量よりも高い値になっている。これはクロロフィルを測定していないので明確ではないが、植物プランクトンの異常発生が起こったためと思われる。夏季は密度成層が起り、DO が低下。逆に冬季は密度成層が起らず、DO 値は夏季に比べて高い。2000 年夏に地点 40 において水産用水基準 4.3 mg/l を下回っており、湾奥部で貧酸素現象が進んでいると思われる。八代海の赤潮発生件数は近年増加の傾向にあり、夏季の密度成層発達に伴う貧酸素水塊の発達をそれを支える一因として考えられる。なお、DO は水深 5 m のみでしか計測されておらず、海底面近傍では、さらに DO の低下が想定され、海域を通じての貧酸素化に伴う環境悪化が懸念される。

c) 窒素循環

八代海域における窒素循環として、調査地点 40, 30, 22 での $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の経年変化を調べた。図-8 に、1989 年から 2000 年までの $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の経年変化を示す。各地点とも季節変動が大きいが、湾奥部の地点 40 が他の地点よりも数値が高い。これは湾奥へ注ぐ氷川、球磨川等の農地や都市部からの流入水の影響によるものと考えられる。

図-9 に $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比の経年変化を示す。いずれの地点も、この比が有明海と同様(滝川ら, 2003)、近年減少傾向にあり、特に湾奥 40 の地点では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高いことから、他の地点に比べて硝化能力が低い。湾奥部では表層 DO の経年変化でも貧酸素化が現れており、近年の湾奥部での赤潮の多発とも密接に関係しているものと思われる。

(3) 赤潮発生の特徴

八代海の赤潮発生状況については八代海域調査委員会資料(国土交通省他, 2001~2003)に基づき報告する。

図-10 は、赤潮発生場所の経年的変化を示したものである。1980 年代から 1990 年代前半までは、八代海の西部と南部を中心に赤潮が発生していたが、1990 年代後半になると八代海北部や湾奥にも赤潮が多発するようになった。これは先述したように、特に湾奥部での硝化能力の

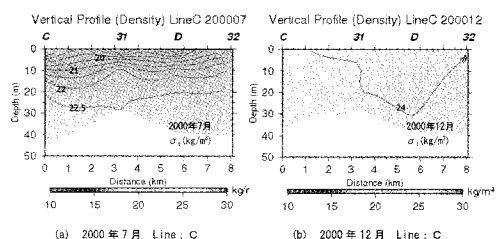


図-6 Line: C での密度鉛直分布

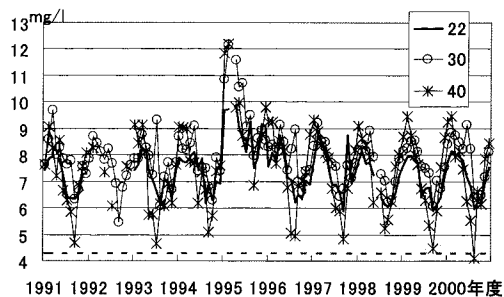


図-7 DO の経年変化 (地点: 22, 30, 40)

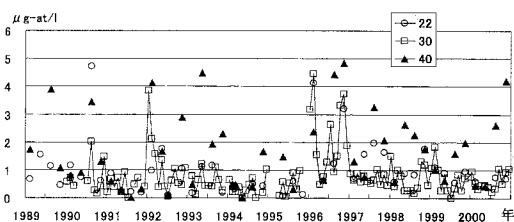


図-8 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の経年変化

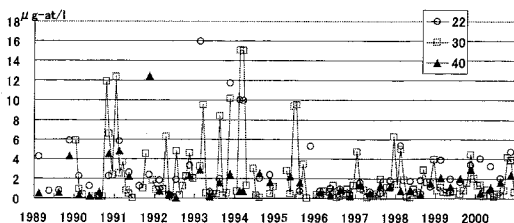


図-9 $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ 比の経年変化

低下や貧酸素化の傾向と対応している。また、赤潮の発生季節についても、1980 年代には夏季 (7~9 月) が約 80%, 秋季 (10~12 月) 5%, 春季 (4~6 月) 15% であったのに対し、1990 年代後半では、夏季 40%, 秋季 10%, 冬季 (1~3 月) 10%, 春季 40% と四季を通じて発生、特に、冬季と春季にも多発するようになった。赤潮の発生件数は年によって変動があるが 1980 年代からほぼ横ばいの 10 件前後である。赤潮の継続日数は、1980 年代前半では 1~7 日程度が大半であったものが、1990 年代になると 2 週間以上の長期的な赤潮が多くみられ

る。

図-11 は、八代海において漁業被害の原因種となる赤潮プランクトンの発生状況について、赤潮発生延べ日数と夏季の全日射量（熊本）、球磨川流量（横石）の平均値との関係を示したものである。図中の数字は年度を表す。夏季の日射量が多く、河川流量が少ない時には、水温も高くなり赤潮発生延べ日数が増加する傾向にあることが分かる。

3. 潮汐による流動特性

八代海は九州本土と天草諸島・長島に囲まれ、本渡瀬戸・三角瀬戸・満越瀬戸を通じて有明海と繋がり、長島瀬戸や黒之瀬戸を通じて東シナ海と繋がっている。この八代海の総面積は 1,200 km²、閉鎖度指数が 32.5 で、わが国の 1,000 km² 以上の内湾では最も閉鎖性の高い海域である。平均水深は約 23 m、最大水深は八幡瀬戸で約 73 m であるが、湾南部の水深は 20~50 m、中部で 30~50 m、北部では 20 m 以浅で干潟が発達し、奥部では満潮時でも水深は 5 m 未満である。有明海に次いで広大な干潟を有し、その面積は 4,465 ha であり、日本の干潟総面積の 9% に相当するものである。干潟が発達している湾奥部は内湾性が強く、湾中央から以南の南部地域は徐々に外洋性を帯びる。外洋水は長島瀬戸と黒之瀬戸から流入し、流入量は黒之瀬戸に比べて長島瀬戸は約 4 倍である。有明海と通じる三角瀬戸、満越瀬戸、本渡瀬戸では海水の交流は少ない。干満差は湾奥で 4 m 以上になり、このため長島瀬戸での潮汐流速は、大潮時には約 8 ノットにもなる。

八代海の潮汐による流動特性については余り知られておらず、詳細な知見は少ない。ここでは、潮汐流動の数値計算（2 次元および 3 次元計算）計算を行い、その概要を報告する。図-12 は、八代海の振動特性を示したもので、外洋からの入射波周期に対する八代海の各点（図中に示す各点）での振動応答を 2 次元の数値計算により算定した。八代海の湾振動周期は約 3 時間であり、これは台風 9918 号の時も観測されたが、八代海の長軸方向の固有振動周期である。また、9 時間以上の振動応答は有明海の固有周期（滝川ら、2002）による影響であり、八代海と有明海の潮汐流動を調べるに際しては相互の海域の影響を考慮する必要があることが分かる。

図-13、14 は、3 次元の数値流動モデル（ σ 座標モデル（POM2k））による計算結果である。計算メッシュは 1 km、鉛直 6 分割とし、入射波の振幅は 1.7 m で大潮時の潮汐変動を想定したものである。図-13 は上潮最大時および下げ潮最大時の断面平均の流速ベクトルを図示している。また図-14 は潮汐残差流ベクトルを図示したものであるが、河川からの流入を考慮しない場合（図-14

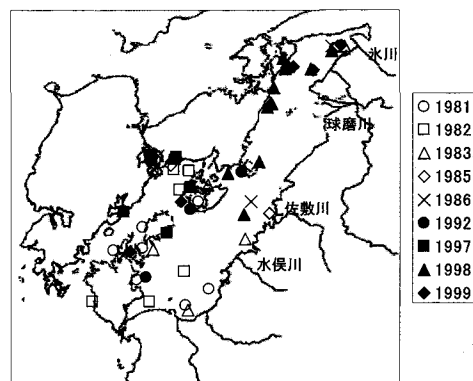


図-10 赤潮発生場所の経年変化

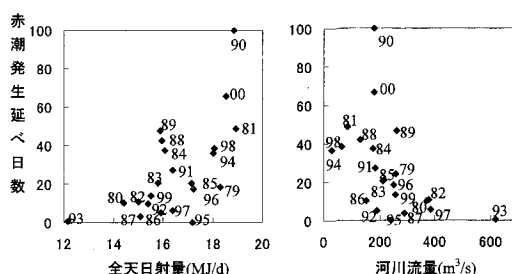


図-11 夏季の全日射量、河川流量と漁業被害赤潮の発生延べ日数

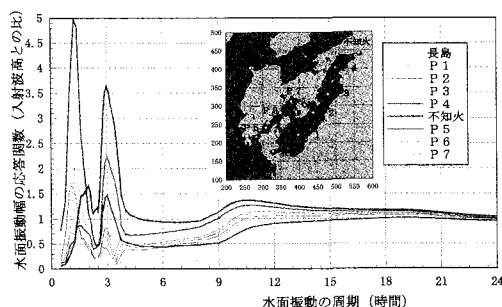


図-12 八代海の湾振動特性

(a))と比較のため、計画高水流量（氷川：900 m³/s、球磨川：7,000 m³/s、佐敷川：500 m³/s、水俣川：1,100 m³/s）を考慮した場合（図-14(b)）である。これらの流速ベクトルは実測結果（海上保安庁、1978）とも良く対応したものであるが、河川流量がある場合には、図-14(b)のように満越瀬戸、長島瀬戸を通じて流出するような残差流となる。なお、ここには図示していないが線流量の残差流は、八代海湾中央部の東岸から湾奥部での流量が小さく、潮汐流動が停滞する傾向にあることが算定されている。

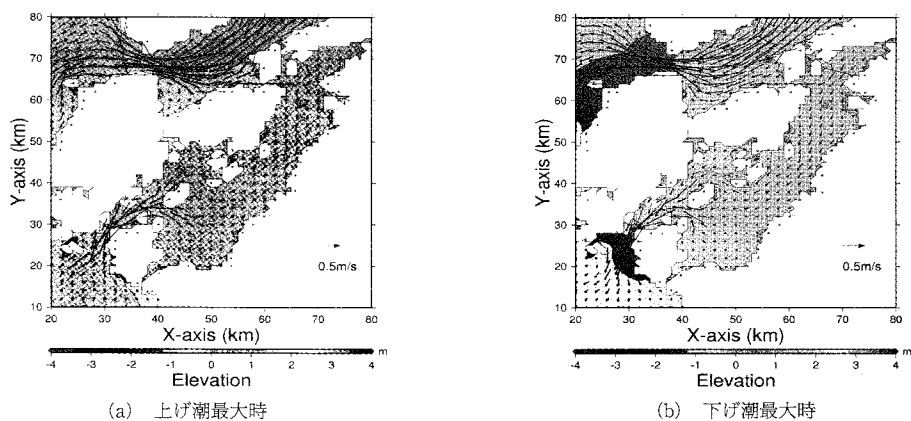


図-13 潮汐流速ベクトル (断面平均)

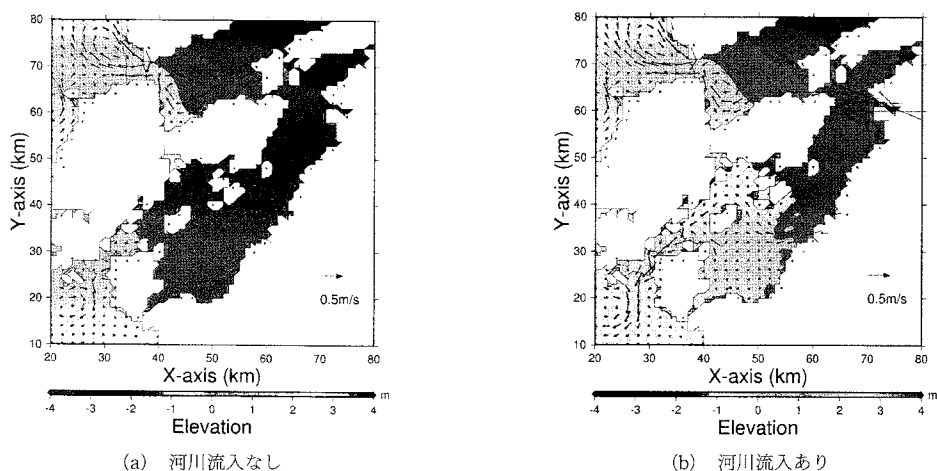


図-14 潮汐残差流ベクトル (断面平均)

4. おわりに

不知火海定線調査データの過去26年間の水質データを分析し、環境変動の時空間特性の把握を行った。その結果、水温・塩分・透明度の変動をクラスター分析することによって5つの海域に分類され、八代海では夏季に全域にわたって強い密度成層が形成されており、特に湾奥部では、貧酸素化が進行しており、硝化能力の低下傾向および近年の赤潮発生の増加傾向と一致することが判明した。また、3次元の流動解析の結果、八代海の潮汐変動は有明海と連動しており、従来の両海域を個別にした検討では不十分であること、また、湾奥部での流動が中南部海域に比して停滞状態にあり水質環境の悪化傾向

と一致していることなどがわかった。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)(2)(代表：滝川清；課題番号14208072：平成14～17年度)の補助によるものであり記して謝意を表します。

参考文献

- 海上保安庁 (1978): 島原湾・八代潮流図。
- 国土交通省・水産庁・熊本県・鹿児島県 (2001): 八代海域調査委員会資料 (第2回, 第3回)。
- 滝川 清・田淵幹修 (2002): 有明海の潮汐変動特性と海岸構造物の影響, 海岸工学論文集, 第49巻 (2), pp. 1061-1065。
- 滝川 清・田中健路・外村隆臣・西岡律恵・青山千春 (2003): 有明海干の過去25年間における海域環境の変動特性, 海岸工学論文集, 第50巻 (2), pp. 1126-1130。