

令和元年6月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06513

研究課題名(和文) 有明海における栄養塩の輸送プロセスと一次生産システムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of the nutrient transport processes and the primary production systems in Ariake Sea

研究代表者

松永 信博 (MATSUNAGA, NOBUHIRO)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：50157335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：九州農政局が諫早湾内の6地点において測得した長期多点同時水質データを解析した。赤潮の指標であるクロロフィルa (Chl.a)濃度の解析から、諫早湾において赤潮の発生頻度とその規模は減少しており、赤潮の発生は収束する傾向にあることが示された。海底付近の溶存酸素(DO)濃度の解析から、貧酸素水塊の発生頻度ならびにその規模も収束する傾向が示された。重回帰分析により、DO濃度の第一の支配因子は水温であり、水温の上昇によりDO濃度は減少するという強い負の相関が認められた。第二の因子は密度成層であり、表層と低層の密度差の増加によりDO濃度が減少するという同じく負の相関が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有明海西部に位置する諫早湾では1997年にその奥部が締め切られ、約15km²の干潟を含む35.5km²の浅海域が消失した。2000年冬季には海苔の大凶作が発生し、諫早湾の干拓事業と海苔の大凶作との関係が社会問題となった。そのような社会背景において、九州農政局がこれまで蓄積してきた膨大な長期多点同時水質観測データを解析し、諫早湾内における赤潮ならびに貧酸素水塊の経年変化を明らかにした。その結果、諫早湾内における赤潮の発生頻度ならびに赤潮の規模は減少し、収束傾向にあることを明らかにした。また、貧酸素水塊の発生頻度ならびにその規模も減少し、収束傾向にあることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The secular variations of red tide and anoxic water mass in Isahaya Bay were investigated based on the water quality data which the Kyushu Regional Agricultural Administration Office has measured at six measuring stations since 2002. The concentration of Chl.a was analyzed as the index of red tide and the DO concentration near the sea bed as the index of anoxic water mass. In Isahaya Bay, the occurrence frequency of red tide is decreasing with age and its scale is approaching to a stable situation. The analysis of the DO concentration shows that the secular variations of anoxic water mass are stable in Isahaya Bay. The multiple linear regression analysis shows that the primary factor controlling the DO concentration is water temperature and a strong negative correlation is seen between the both. The second factor is the density difference between the water surface and the bottom layer. A negative correlation is also seen between the DO concentration and the density difference.

研究分野：沿岸海域環境学

キーワード：沿岸海域 水質環境 赤潮 貧酸素水塊

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

沿岸海域に流出した河川水は海水よりも密度が小さいため、海水の上に載った状態で流動する。これは密度成層流動と呼ばれ、沿岸海域の物質輸送プロセスを支配する特徴の一つである。一般に、河川水には大量の土砂と栄養塩が含まれており、沿岸海域における河川水の流動特性と栄養塩の供給・輸送・消費プロセスを明らかにすることは、植物プランクトンや藻類の消長機構、いわゆる一次生産システムの解明において必要不可欠である。また、一次生産システムは物質循環システムの根幹をなすもので、高次生態系の物質循環システムを構築する上で本質的な役割を果たす。

有明海は、日本一大きな干満差を持つ閉鎖性内湾で、筑後川を初めとして7本の一級河川が流れ込んでいる。この大きな潮流と大量な河川水の流入によって、有明海では広大な干潟が発達し、多様な生態系が維持されてきた。また、諫早湾は有明海西部に位置する内湾であり、諫早市の浸水対策と農地開発を目的に諫早湾干拓事業が進められた。1997年には潮受け堤防の建設によって諫早湾奥部が閉め切られた。その結果、約15km²の干潟を含む35.5km²の浅海域が消失した。その後、2000年12月から2001年2月にかけて有明海奥部全域にわたって海苔の色落ちが発生し、諫早湾干拓事業との関係が問われた。現在でも、「有明海では潮受け堤防建設の影響により赤潮や貧酸素水塊の発生頻度とその規模が増加している」と言われている。しかしながら、未だにその事実関係は明らかにされていない。

2. 研究の目的

有明海における一次生産システムを解明することは、有明海の環境再生および安定した水産資源確保において重要であるばかりでなく、多くの閉鎖性海域における環境を保全する上で喫緊の課題である。本研究プロジェクトの目的は、「有明海における河川水の流動特性と栄養塩の供給・輸送・消費プロセスを定量的に明らかにするとともに、有明海における一次生産システムを解明すること」にある。

本研究プロジェクトでは、3次元流動モデルを用いることにより筑後川を初めとして7つの1級河川からの淡水流動特性を解析し、諫早湾内における塩分成層構造を明らかにするとともに、九州農政局による観測結果と比較することにより解析結果の妥当性を明らかにした。また、九州農政局が2002年から諫早湾内で測定してきた長期多点同時水質鉛直観測データを総合的に解析することで、諫早湾内の水質環境が経年的にどのように変化しているかについて調べ、有明海における河川水の流動プロセス、栄養塩の供給・輸送・消費プロセスおよび一次生産システムを明らかにした。

具体的には、課題①平成24年九州北部豪雨期における有明海の淡水流動特性の解明、課題②諫早湾内における大規模赤潮の形成プロセスの解明、課題③諫早湾内における大規模塩淡成層の形成と河川からの出水量の関係、課題④潮受け堤防建設後の諫早湾内における赤潮および貧酸素水塊の経年変化に取り組んだ。

3. 研究の方法

課題①：2012年7月11日深夜から14日にかけて熊本県阿蘇地方を中心に降り始めた前線性豪雨は、九州北部地方に甚大な土砂災害を引き起こした。このときの筑後川の1時間流量は年平均1時間流量 $3.4 \times 10^5 \text{m}^3$ の18倍にも達した。この時期を対象に、3次元流動モデルを用いて有明海全域における流動シミュレーションを行った。河川からの流入流量として、筑後川、矢部川、菊池川、白川、緑川、嘉瀬川、六角川の流量データを水門水質データベースからダウンロードして与えた。また、諫早湾内に流入する河川水と風応力との関係を明らかにした。

課題②：2015年8月下旬から9月上旬にかけて、諫早湾内において最大級の大規模赤潮が発生した。9月4日の10時～14時にかけて、諫早湾内の25地点において表層水を採取を行い、大規模赤潮発生時における塩分、クロロフィルa(Chl.a)、全窒素(TN)、全リン(TP)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、リン酸態リン(PO₄-P)の空間分布を調べた。

課題③：諫早湾内において大規模塩分成層が形成されるか否かは、河川、特に筑後川からの出水量の違いに依存する。ハイドログラフのピーク流量とピーク時間を変化させることにより、7河川からの出水量と諫早湾内に形成される大規模塩分成層との関係を定量的に明らかにした。筑後川のピーク流量とピーク時間に対する残り6河川のピーク流量とピーク時間の関係は、水門水質データベースからダウンロードしたデータを解析することにより定量化した。解析では、3次元流動モデルを用いて有明海全域における流動シミュレーションを行った。

課題④：九州農政局は、2002年7月から諫早湾内の3地点で、2003年10月からは6地点において、毎正時に鉛直方向0.5mの間隔で同時連続水質観測を行ってきた。観測項目は水温、塩分、濁度、クロロフィルa(Chl.a)、溶存酸素(DO)、pHである。これらの水質データの内、Chl.a濃度とDO濃度を解析した。解析期間は2002年7月～2017年8月までとした。Chl.a濃度として各観測地点で測得された毎正時の最大値を用いた。底層DO濃度として毎正時に海底から0.1mと0.5mの高さで測得された値を平均して用いた。本研究では、Chl.aの値が40μg/L以上を赤潮、底層DOの値が4mg/L以下を貧酸素水と定義した。Chl.aの月平均値、月最大値、

赤潮発生頻度および底層 DO の月平均値, 月最小値, 貧酸素水塊発生頻度についてまとめた. 重回帰分析では, 底層 DO 濃度に対して (1)式を仮定して解析を行った.

$$DO = a \cdot T + b \cdot \Delta\sigma + c \cdot Chl.a_{bottom} + f \quad (1)$$

ここで, 係数 a,b,c は各項目の偏回帰係数である. T は底層の水温, $\Delta\sigma$ は表層と底層における密度の差, $Chl.a_{bottom}$ は底層の Chl.a 濃度, f は回帰定数を表す. 底層のデータには毎正時の海底から 0.1m と 0.5m の高さの平均値を, 表層のデータには海表から 0.1m と 0.5m の深さの平均を用いた.

4. 研究成果

課題①: 平成 24 年 7 月九州北部豪雨期を対象として, 有明海の 3 次元流動シミュレーションを行い, 諫早湾内で形成された大規模塩分成層構造を再現した(図-1 参照). 無風状態, 北東風 10m/s, 南西風 10m/s の 3 つの風況条件を仮想的に設定し, 筑後川起源水と菊池川起源水の風応答特性を調べた. 得られた結果は, 以下の通りである.

- 1) 潮汐運動のみでも河川起源水は諫早湾内へ輸送され, 大規模塩分成層を形成する.
- 2) 滞留時間と存在割合を記述する経験式を導入し, それに基づいて代表滞留時間スケールを評価した.
- 3) 滞留時間と存在割合の関係を, 風況に依らず普遍的に表すことを可能にした.
- 4) 筑後川起源水の諫早湾への流入は, 北東風の連吹によって促進されるとともに湾外への流出も強化される. このため, 湾内での滞留時間は無風時に比べて短くなる. 一方, 南西風が連吹する場合は, 諫早湾内への流入が抑制されるとともに滞留時間は短くなる.
- 5) 北東風の連吹は, 菊池川起源水の有明海奥部への輸送を抑制し, 諫早湾内への流入量を減少させる. 一方, 南西風の連吹は, 菊池川起源水を有明海奥部に輸送するとともに, 潮汐運動によって諫早湾内への流入が促進される.

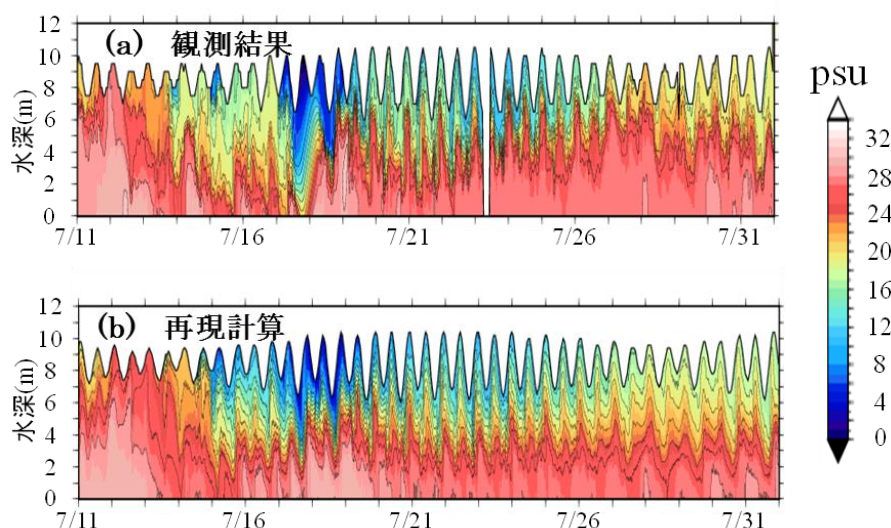


図-1 諫早湾内で形成される大規模塩分成層構造. 観測結果と解析結果の比較からシミュレーション結果の妥当性が認められる.

課題②: 2015 年 8 月下旬から 9 月上旬にかけて, 諫早湾内において最大級の大規模赤潮が発生した. このとき, 諫早湾全域にわたって表層水採取を行うとともに, 九州農政局が計測した水質データを解析することによって, 大規模赤潮発生時の水質特性とその形成プロセスを調べた. 得られた結果は, 以下の通りである.

- 1) 諫早湾内における大規模赤潮発生領域において, TN, TP はそれぞれ 1.00mg/l, 0.10mg/l 以上の大きな値を示しており, TN と TP は主に測物プランクトン由来の有機態窒素と有機態リンによって構成されていることがわかった.
- 2) 赤潮発生領域において DIN は枯渇するまで消費されたが (図-2 参照), PO_4-P は比較的大きな値で残留しており, 諫早湾赤潮発生の制限因子は溶存態窒素であることが確認された.
- 3) 有明海に流出した河川水は, 活発な一次生産を行いながら輸送され, 諫早湾内に流入することで大規模赤潮を引き起こすという赤潮増殖・輸送プロセスが明らかとなった.
- 4) 諫早湾内における赤潮は塩分 21~28PSU の範囲において大規模化しやすいことが示された.

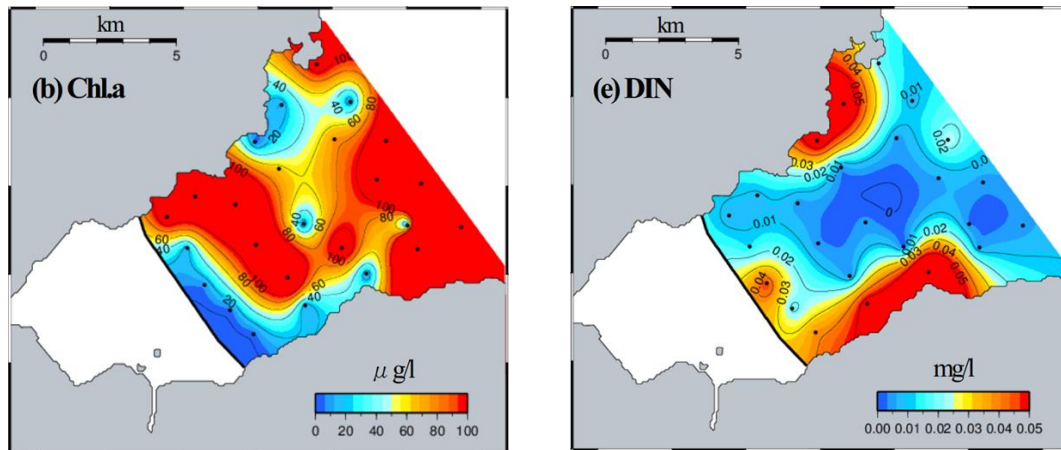


図-2 諫早湾内で大規模赤潮が発生した時の赤潮と無機態窒素の空間分布

課題③：閉鎖性海域における大規模塩分成層の形成は、赤潮の発生および貧酸素水塊の形成に大きく関係している。諫早湾内において大規模塩分成層が形成する領域を、筑後川のハイドログラフのピーク流量とピーク時間を種々変化させることにより定量的に示した。得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 筑後川起源水の総流出量が同じ場合において、出水時間が短い場合の方が長い場合よりも、諫早湾内において大規模塩分成層が形成されやすい。これは、出水時間が短い場合、潮汐による鉛直混合を受ける時間が短いためと考えられる。
- 2) シミュレーションに基づいて諫早湾内で観測される大規模密度成層の形成領域を定量的に示した。得られた大規模塩分成層の形成領域の境界線は、九州農政局の観測データから得られた結果と良く一致した。(図-3参照)
- 3) 大規模塩分成層が形成されるか否かは、筑後川起源水の総流量のみに依存するのではなく、その時のピーク流量あるいは出水時間をパラメータとして決定される。

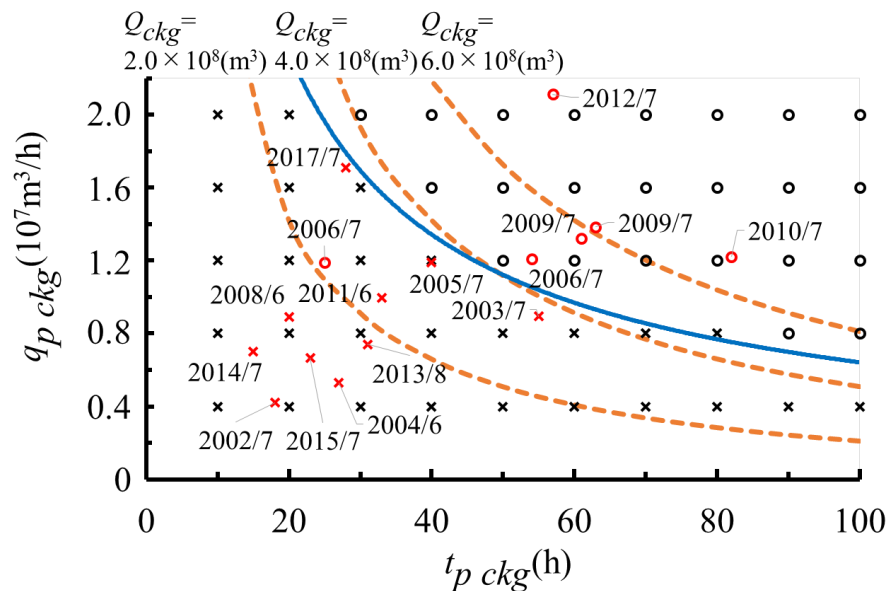


図-3 諫早湾内における大規模塩分成層の形成領域（縦軸が筑後川からのピーク流量、横軸がピーク時間。黒い○と×は、解析によって得られた大規模塩分成層が形成される場合と形成されない場合を示す。赤い○と×は九州農政局のデータ解析から得られた大規模塩分成層が形成される場合と形成されない場合を示す。青い実線の左領域が大規模塩分成層が形成されない領域、右領域が形成される領域を示す。）

課題④：九州農政局が 2002 年から諫早湾内で測定してきた長期多点同時水質鉛直観測データを総合的に解析することで、諫早湾内の水質環境が経年的にどのように変化しているかについて調べた。得られた結果は、以下の通りである。

- 1) 諫早湾内の全地点において赤潮の発生回数は年々減少する傾向が認められた。一般的に、赤潮の発生回数が多くなる時期は夏季であるが、近年では、潮受け堤防付近で冬季赤潮の発生が顕在化している。これは珪藻のスケルトネマ属が大量発生した結果であると報告されており、その理由として調整池からの淡水排水の影響が考えられる。
- 2) 一般に、底層 DO 濃度は夏季には低くなる。これは、バクテリアによる有機物分解活性が水温の上昇とともに高まることに加えて、密度成層化によって表層から低層への酸素供給が抑制されるためである。諫早湾内では、ほぼ全域にわたって夏季の底層 DO 濃度の最小値は $4\mu\text{g}$ 以下となり、貧酸素状態に達する。夏季における底層 DO 濃度の変化を見ると、平均水深の浅い海域における最大値は、平均水深の深い海域での DO 濃度より高い値をとる。これは、平均水深が浅いため、海表面から供給された酸素によって DO 濃度が高くなることに加え、強い鉛直混合によって表層からの酸素が底層に輸送されやすいためである。一方、平均水深の浅い海域における DO 濃度の最小値は、平均水深の深い海域の DO 濃度より低い値をとる。これも同じく、平均水深が浅いところでは、海底表面からの酸素消費によって生じる水柱内の DO 濃度の低下が大きくなるためである。
- 3) 底層 DO 濃度の支配因子式(1)を仮定して、諫早湾中央部(B3 地点)と諫早湾奥部(S1 地点)において重回帰分析を行った。B3, S1 地点共に重相関係数が 0.9 以上であり、再現性が高いと判断された。偏回帰係数 a は負の値を取ることから、水温の上昇により底層 DO 濃度は低下することが明らかとなった。これは、水温の上昇がバクテリアによる有機分解を活性化したためである。B3 地点では偏回帰係数が -0.704, S1 地点では -0.866 となり、底層 DO 濃度に与える水温の影響は非常に大きいことが示された。偏回帰係数 b が負の値を取ったことから、密度成層が強くなると底層 DO 濃度は低下することが示された。これは、密度成層の強化は表層からの酸素供給を抑制し、底層 DO 濃度を低下させるためである。B3 地点では偏回帰係数が -0.372, S1 地点では -0.093 となり、B3 地点の方が密度成層の影響が大きいことがわかる。これは、S1 地点では水深が浅く、海底表面と水表面から発生する乱流による鉛直輸送が B3 地点よりも卓越するためと考えられる。偏回帰係数 c の値は非常に小さかったことから、海底付近の Chl. a 濃度が底層付近の DO 濃度に与える影響は十分小さいことが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- 1) 神崎真人・李洪源・杉原裕司・松永信博・千葉賢：大規模塩分成層状況下にある諫早湾の表層水の風応答特性，土木学会論文集 B2(海岸工学), 72, I_1219-I_1224, 2016.
- 2) 李洪源・松下康平・神崎真人・杉原裕司・松永信博：諫早湾における大規模赤潮の形成プロセス，土木学会論文集 B2(海岸工学), 72, I_1243-I_124, 2016.
- 3) Amen, T., Eljamal O., Khalil, A., Matsunaga, N.: Biochemical methane potential enhancement of domestic sludge digestion by adding pristine iron nanoparticles and iron nanoparticles coated zeolite composition, J. Environ. Chem. Eng., 5, 5002-5013, 2017.
- 4) Eljamal O., Khalil, A., Matsunaga, N.: Experimental and Modeling Column Study of Phosphorus Removal by Permeable Reactive Materials, Int. J. Environ. & Agr. Res., 3, 62-70, 2017.

その他 3 編

6. 研究組織

(1) 研究分担者(平成 29 年度)

研究分担者氏名：李 洪源

ローマ字氏名：Li Kougen

所属研究機関名：山口大学

部局名：創成科学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：10599236