

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20310012

研究課題名(和文) 有明海の浮遊懸濁物質と一次生産の関係に関する研究

研究課題名(英文) Research on Suspended Materials and Primary Production in Ariake Bay

研究代表者：

石坂 丞二 (ISHIZAKA JOJI)

名古屋大学・地球水循環研究センター・教授

研究者番号：40304969

研究成果の概要(和文)：有明海の透明度は30年間にほぼ全海域で上昇し、平均的に約50%も上昇した。また透明度の上昇した海域では顕著な赤潮の発生数の増加が起きていた。透明度は表層の無機懸濁物とクロロフィルaとで定量的に表すことが出来、上記の透明度の上昇は10mg L⁻¹もの懸濁物の減少によると推測できた。また一次生産量は有光層深度に比例し、透明度の増加の割合はそのまま一次生産の増加の割合に相当すると推測された。これらのことは、透明度の上昇が、有明海での赤潮の増加の原因の一つであることを強く示唆している。

研究成果の概要(英文)：Transparency increased in the entire Ariake Bay with an average of 50% during the last 30 years. The area with increased transparency corresponded with the area of increased number of red tides. The transparency can be expressed quantitatively in terms of surface inorganic suspended matter and chlorophyll a. The increase of transparency seems to be caused by decrease of about 10 mg L⁻¹ of suspended matter. Primary production was linearly correlated with euphotic zone depth, and the ratio of increase of transparency should result increase of same ratio of primary production. These results indicate that the increase of transparency is one of the causes of increase of red tide in Ariake Bay.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：生物海洋学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：沿岸域、一次生産、懸濁物、有光層、潮汐、海色、リモートセンシング、有明海

1. 研究開始当初の背景

有明海では環境が悪化しており、赤潮や貧酸素水塊が頻繁に発生している(松岡, 2003)。この環境悪化の原因に関しては、周辺の干拓事業等との関係が議論されているが、依然としてははっきりとはしていない。有明海ではこの数十年ほどで透明度が増加していることが指摘されている(中田・野中, 2003)。一般的には富栄養化が進むと透明度は低くなることが知られているため、有明海では富栄養化と懸濁物質(有明海では浮泥と呼ばれる)

の関係が他の海域とは異なっていることが推測される(石坂, 2003)。また、最近底泥の細粒化も指摘されつつある。干拓事業やノリ養殖事業によって、潮流が遅くなり、底泥の巻き上げが少なくなることによって、これらの変化が起こっている可能性も指摘されている(田中ら, 2004)。

平成12年から13年にかけての冬季に起こった赤潮が3ヶ月間にわたって有明海全体におよんでいたことが、植物プランクトン総量の指標であるクロロフィルa濃度の衛星観

測によって示された(Ishizaka et al, 2005)。さらに特に梅雨明け時と、秋に多くの降雨があった後に、クロロフィル a 量が増加することも明らかとなり、このことは堤ら(2003)が既存の赤潮資料をまとめた研究と矛盾しない。また、これらの赤潮の規模は降水量と比例し、降水の後、数日から3週間程度で起こることも衛星観測から明らかとなった(Ishizaka and Morita, 2006)。

一方で、筑後川周辺の繫留系での時系列観測では、大潮時の濁度(懸濁物質)が高い時には植物プランクトンの指標となるクロロフィル a 濃度は増加しないのに対して、小潮時の濁度が低いときにクロロフィル a 濃度が増加することが指摘されている(田中ら, 2004)。また衛星を用いた北部有明海全体での懸濁物質とクロロフィル a の変動に関する研究でも、大潮時には海表面が明るく光を散乱する懸濁物質が多く、小潮時には海面が暗くクロロフィル a が多いことがわかってきている(Ishizaka and Morita, 2006)。

これらの事実は、もともと泥の海と呼ばれてきた有明海においては、無機懸濁物質が海中の光環境を制御して、植物プランクトンの発生を抑えていたものの、無機懸濁物質の減少によって、海中の光環境が変化し、一次生産が増加し、赤潮を形成する植物プランクトンの増殖が活発になっている可能性を示唆している(石坂, 2003)。しかしこれまで、透明度を決めている浮遊懸濁物質の組成はほとんど調べられておらず、さらに懸濁粒子と光環境、一次生産の関係についての定量的な評価もされていない。

2. 研究の目的

本研究では、河川水の流入と大潮・小潮周期によって、浮遊懸濁物質の組成がどう変動し、それによって透明度や海中の光環境がどう変動し、さらに一次生産とどう結びつき、赤潮の発生につながるのかを定量的に明らかとすることを目的とした。浮遊懸濁物質の挙動と赤潮発生過程について、定量的な評価を行うために、以下のことを明らかにする。(1)大潮・小潮周期とそのバックグラウンドとなる海水温や河川流量の季節的な変化に注目しながら、浮遊懸濁物質の組成(特に無機物と有機物の比)を把握する。(2)上記懸濁物質と光環境(透明度、水中分光放射特性、吸収係数スペクトル)の関係を定量的に明らかにする。(3)これまで有明海ではほとんど測定されていなかった一次生産の測定を行い、光環境の変動による一次生産の変動の把握を行う。(4)人工衛星データにより、有明海全体の一次生産量の推定を行なえるようにする。(5)これらの知見をもとに、浮遊懸濁物質、透明度の変化と一次生産変化の定量的な評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 海洋観測

海洋観測は長崎大学水産学部の練習船鶴洋丸を利用し、主に諫早湾口から三池港を中心に行った。それぞれで潮流が速く堆積物の巻き上がりが多いと考えられる大潮時と、潮流が遅く巻き上がりが少ないと考えられる小潮時について、満潮・干潮を含めて行った。

懸濁物質重量に関しては、あらかじめ、有機物質を燃焼したグラスファイバーフィルターを用いて、海水をろ過し、その重量を測定することによって、全懸濁物質重量(いわゆるSS)を測定した。さらにそのフィルターを加熱し、強熱減量(有機物)を求め、残留した無機物との割合を求めた。

光の吸収物質として大きな役割を果たす植物プランクトンについては、蛍光法によってクロロフィル a を測定した。また顕微鏡によって優占グループを明らかにするとともに、HPLCによる色素分析で分類を行い、さらに光適応の状態を調べた。

光環境としては、透明度や有光層深度の他に、水中分光放射計による下向き照度・上向き輝度の測定、懸濁物質や溶存物による光吸収係数の測定を行った。

一次生産推定は、 ^{13}C 法を利用した現場・疑似現場培養法による純一次生産の測定を行った。また高速反復蛍光光度計(FRRF法)によって、総一次生産量を推定し、さらに光合成活性を調べた。

4. 研究成果

(1) 光環境

まず、1975年から2005年までの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上昇と塩分の変動や近年の赤潮発生状況との関連について解析した(清本ら, 2008)。その結果、透明度の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た。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た。

季節的には、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。一方、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。しかし、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。これらの10~3月の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、海域の懸濁物濃度が低下したことが主な原因であると推察された。さらに4~9月の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。

次に、有明海の光環境がどのように懸濁物質によって決定されているかを調べるために、2006年と2007年に3回にわたって、有明海における光減衰係数と懸濁物質の関係を調べた(荒木ら、2009)。多くの調査では、光減衰係数は植物プランクトン色素よりも懸濁物質の吸収係数に強く依存しており、特に大潮時に植物プランクトン色素以外の懸濁物質が多いことが明らかになった。

この表層の懸濁物質を、強熱で減少する有機物と残渣の無機物、植物プランクトンであるクロロフィル a とに分けて、光消散係数、有光層と透明度の逆数で表される光消散の指標と比較した。その結果、無機物とクロロフィル a は独立であったが、有機物は無機物とクロロフィル a の両方と有意な相関を持ち、有機物が植物プランクトンやそれを起源とする物質と、海底の無機物と同様に変動する物質からなることが示唆された。また、3つの光消散の指標は、お互いに強い相関を持ち、透明度が有光層や光消散係数の指標となることが確認された。さらに、これらの光消散の指標は無機物とクロロフィル a を用いた重相関で表すことができ、両者が有明海の光消散に大きく影響していることが明らかとなった。

一方、これまでに取得した夏季の赤潮時の光吸収と上向き放射輝度のデータをまとめた。それによると、赤潮時には植物プランクトンの吸収が海の色を支配し、クロロフィル a の濃度によってそのスペクトルの形がほぼ推定できた(Sasaki et al., 2008)。このことも、特に無機の懸濁物質が減少することによって赤潮が増加する可能性を示唆した。

(2) 一次生産

一次生産はこれまで ^{13}C を加えた海水を一定時間培養し、粒子への ^{13}C の取り込み速度を測定するために、時間がかかり、多くのデータを取得することは困難だった。そのためもあり、有明海ではこれまで一次生産のデータに関しては、ほとんど取得されていない。

そこでここではまず、炭素法 (^{13}C 法) と蛍光法 (高速反復蛍光光度計: FRRF) を用いた一次生産測定手法を比較した (Tripathy et al., 2010)。その結果、短時間 (1時間) 培養での炭素法と蛍光法の瞬時値は、表面を除けばほぼ一致した。一方、24時間培養での炭素法と時間積算した蛍光法ではかなり差があり、これは主に潮汐による水の移動による影響と考えられた。蛍光法による昼間の1回の光-光合成の関係を利用することによって表面を除けば日光合成量の計算も可能で

あることが明らかとなった。これによって、長時間の培養法でデータを集めなくても FRRF 法によって、短期間に多くの一次生産データが取得できるようになった。

次に、有明海の一次生産をモデル化するために、衛星によって外洋域の1日の鉛直積算一次生産量を推定するために開発されたモデルである、鉛直基準化一次生産モデル (VGPM) (Behrenfeld and Falkowski, 1997, 以降 BF) を有明海の現場一次生産データで評価した (Tripathy et al., 投稿中)。VGPM での鉛直積算一次生産量は、現場のクロロフィル a と水温を利用して計算すると、有意に過大評価し (x1-3)、変動の52%しか説明できなかった。これは、有光層とそこでの単位クロロフィル a あたりの生産の最大値 ($P^{\text{B}}_{\text{opt}}$) が、BF で利用されているモデルで過大評価され、相関もよくなかったことによった。これらに現場値を与えることで、鉛直積算一次生産量の変動の84%が説明でき、過大評価も少なく (x1-1.5) になった。

このように、濁りの大きい有明海においても、基本的には VGPM の形で、特に有光層深度を正確に推定することが出来れば、一次生産も正確に推定することが出来ることが明らかとなった。そこで、半解析アルゴリズム (QAA) を用いて、現場のリモートセンシング反射率 (R_{rs}) から潜在的な光学特性 (全吸収と散乱) を求めることによって、有光層の推定値を向上した。一方、 $P^{\text{B}}_{\text{opt}}$ は一般に行なわれているように、水温やクロロフィル a では推定ができなかったが、現場の中間値を利用することでそれなりの精度が確保できた。またクロロフィル a は、標準のアルゴリズムではなく、濁った環境に適したアルゴリズムをこの海域に最適化して使うことによって推定値が向上した。QAA による有光層と、定数 (中間値) を使った $P^{\text{B}}_{\text{opt}}$ 、そして最適化したクロロフィル a アルゴリズムを使うことによって、モデル化した IPP は、変動の86%を説明し、過大評価もなくなった。

また、強光状態での植物プランクトンの光防御色素の形成による応答を評価するために、混合層や拡散係数と、光防御色素の割合、光合成系 II の光吸収断面と最大量子収率を比較した (Shibata et al., 2010; Shibata et al., 投稿中)。その結果、成層が強い場合と比較して、有光層と比較して混合層が深かったり、有光層内での拡散係数が大きい場合に、光防御色素の割合が増加しにくい傾向があった。また有光層内での拡散係数が小さいときには FRRF で推定される光吸収断面が小さく、最大量子収率は大きい傾向があり、光防御が有効に働いていた可能性が示唆された。これらのことは、一次生産の生理学的パラメータが、空中の光環境および水中の光消散過程や混合過程による、光環境の比較的短期間

の変化によって変化することを示しており、 P_{opt}^B の推定の難しさと関連している可能性を示唆している。

(3) 定量的解析

以上の結果を利用して、有明海における透明度と赤潮の増加に関して、以下のような定量的な推測が可能である。まず熊本沖では1975年から2004年にかけて30年間で約1.5 m、割合にすると約50%、最大165%もの透明度の増加が見られた。これは上述した重回帰分析によると、透明度の増加が主に無機懸濁物質で起こったとすれば、 10 mg L^{-1} もの多くの無機懸濁物質が減少した事となる。

また、この透明度の増加の割合は上述した一次生産モデルから考えると、クロロフィルaや光合成活性に変化が無ければ、鉛直積算一次生産でも同様な変化量となる。この変化は、特に長期的な有機物の生産量としては大きな変化となりうる。かりに栄養塩等の供給量が変わっていなかったとしても、植物プランクトンが利用できる光の増加による短期的な一次生産の増加は、現存量の変動を大きくし、赤潮を発生させる可能性が示唆された。

ここでの定量的な議論では、結果的なクロロフィルaの増加は考慮しておらず、その意味では、懸濁物の減少量も、一次生産の増加量もここで推定した値以上となる可能性もある。現状では、この透明度の増加を招いた無機懸濁物質の量の減少や、それによって起きた可能性のある一次生産の増加を検証することは困難である。今後、前者に関しては、例えば潮流の変化によって、本当にこの程度の無機懸濁物質の減少がありうるのか、後者においては一次生産の増加が赤潮の増加に本当につながるのか等、さらに確認していく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Shibata, T., S. C. Tripathy, J. Ishizaka, Phytoplankton Pigment Change as a Photoadaptive Response to Light Variation caused by Tidal Cycle in Ariake Bay, Japan, *Journal of Oceanography*, 査読有, 66(6), pp. 831-843, 2010.
- ② Tripathy, S. C., J. Ishizaka, T. Fujiki, T. Shibata, K. Okamura, T. Hosaka, T. Saino, Assessment of carbon- and -based primary productivity in Ariake Bay, southwestern Japan, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 査読有, 87(1), pp. 163-173, 2010.

- ③ Sasaki, H., A. Tanaka, M. Iwataki, Y. Touke, E. Siswanto, C.K. Tan, J. Ishizaka, Optical properties of the red tide in Isahaya Bay, southwestern Japan: Influence of chlorophyll a concentration, *Journal of Oceanography*, 査読有, 65(4), pp. 511-523, 2008.
- ④ 清本容子, 山田一來, 中田英昭, 石坂丞三, 田中勝久, 岡村和磨, 熊谷香, 梅田智樹, 木野世紀, 有明海における透明度の長期的上昇傾向及び赤潮との関連, 海の研究, 査読有, 17(5), pp. 337-356, 2008.

[学会発表] (計22件)

- ① Kobayashi, H., P. Jintasaeranee, V. Gunbua, T. Fukasawa, Y. Koibuchi, Y. Sakuno, M. Toratani, J. Ishizaka, Water-leaving radiance and optical properties of suspended solid measured in coastal waters, Workshop for ocean colour data collection, distribution and utilization for East Asian coastal waters and The 7th Korea-Japan Workshop on Ocean Color Remote Sensing, Hakodate Hokkaido, 2010.12.18
- ② Tagami, T., J. Ishizaka, A. Morimoto, H. Hinata, Variability of Surface Residual Current observed by HF radar in Ariake Bay, Workshop for ocean colour data collection, distribution and utilization for East Asian coastal waters and The 7th Korea-Japan Workshop on Ocean Color Remote Sensing, Hakodate Hokkaido, 2010.12.18 (poster)
- ③ Shibata, T., J. Ishizaka, S. C. Tripathy, E. Tsutsumi, T. Matsuno, Changes of phytoplankton pigment and photosynthetic efficiency as a photo-adaptive response to light variation caused by wind and tide in Ariake Bay, Japan, Workshop for ocean colour data collection, distribution and utilization for East Asian coastal waters and The 7th Korea-Japan Workshop on Ocean Color Remote Sensing, Hakodate Hokkaido, 2010.12.18 (poster)
- ④ Tripathy, S. C., J. Ishizaka, T. Shibata, E. Siswanto, Y. Mino, Evaluation of Vertically Generalized Production Model (VGPM) in Ariake Bay, Southwestern Japan, PICES 2010 Annual Meeting, Portland, Oregon, USA, 2010.10.28 (Poster)

- ⑤ Kobayashi, H., J. Ishizaka, P. Jintasaeranee, V. Gunbua, T. Fukasawa, Water-Leaving Radiance Measured Using with Covered Radiometers in Highly Turbid Waters, Ocean Optics XX, Anchorage, Alaska, USA, 2010.9.28 (Poster)
- ⑥ Tripathy, S. C., J. Ishizaka, T. Shibata, E. Siswanto, Y. Mino, Evaluation of Vertically Generalized Production Model (VGPM) in Ariake Bay, 2010年度日本海洋学会秋季大会, 北海道網走市, 2010.9.8 (Poster)
- ⑦ 柴田達矢, 石坂丞二, S. C. Tripathy, 堤英輔, 松野健, 才野敏郎, 冬季有明海における表層混合状態の変化への植物プランクトンの応答, 2010年度日本海洋学会春季大会, 東京都港区, 2010.3.27
- ⑧ Tagami, T., J. Ishizaka, T. Yanagi, H. Hinata, Influence of convergent and divergent currents to daily change of satellite chlorophyll a in Ariake Bay, 6th Korea-Japan Workshop for Ocean Color, Ansan, South Korea, 2009.12.10
- ⑨ 荒木正寛, 石坂丞二, 柴田達矢, 有明海における懸濁物粒子の形態による光減衰への影響について, 2009年度水産海洋学会研究発表大会, 長崎, 2009.11.19
- ⑩ 柴田達矢, 石坂丞二, S. C. Tripathy, 堤英輔, 松野健, 才野敏郎, 冬季の有明海における表層混合状態の変化への植物プランクトンの応答, 2009年度水産海洋学会研究発表大会, 長崎, 2009.11.19 (Poster)
- ⑪ 田上徹, 石坂丞二, 柳哲雄, 日向博文, 有明海における水平収束・発散と衛星クロロフィルaの時間変化の関係, 2009年度水産海洋学会研究発表大会, 長崎, 2009.11.19 (Poster)
- ⑫ 柴田達矢, 石坂丞二, S. C. Tripathy, 堤英輔, 松野健, 才野敏郎, 冬季の有明海における表層混合状態の変化への植物プランクトンの応答, 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009.9.27 (Poster)
- ⑬ 田上徹, 石坂丞二, 柳哲雄, 日向博文, 有明海における水平収束・発散と衛星クロロフィルaの時間変化の関係, 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009.9.27 (Poster)
- ⑭ 荒木正寛, 石坂丞二, 柴田達矢, 有明海における懸濁粒子の形態による光減衰への影響について, 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009.9.26
- ⑮ 柴田達也, 石坂丞二, S. C. Tripathy, 鈴木祥弘, 冬季有明海における成層状態の変化への微細藻類の色素応答, 2009年度日本海洋学会春季大会, 東京都文京区, 2009.4.8
- ⑯ 荒木正寛, 石坂丞二, 柴田達也, 有明海における透明度と懸濁粒子の関係について, 2009年度日本海洋学会春季大会, 東京都文京区, 2009.4.6-8 (Poster)
- ⑰ Tripathy, S. C., J. Ishizaka, T. Saino, T. Fujiki, K. Okamura, T. Shibata, Factors influencing carbon- and fluorescence-based primary productivity in Ariake Bay, southwestern Japan, PORSEC, Guangzhou, China, 2008.12.2-6.
- ⑱ Shibata, T., J. Ishizaka, S. C. Tripathy, Y. Suzuki, Photoacclimation of phytoplankton to the Changing Light Environment with tidal mixing in Ariake Bay of winter of 2007, 2008 Joint Symposium on Tidal Flat Issues, Nagasaki University and KORDI, Nagasaki, 2008.11.27-28. (Poster)
- ⑲ Kiyomoto, Y., H. Nakata, J. Ishizaka, Long-term increasing trend of transparency and its relationships to red tide outbreaks in Ariake Bay, Japan, 2008 Joint Symposium on Tidal Flat Issues, Nagasaki University and KORDI, Nagasaki, 2008.11.27-28. (Poster)
- ⑳ Tripathy, S. C., J. Ishizaka, T. Saino, T. Fujiki, K. Okamura, T. Shibata, Factors influencing carbon- and fluorescence-based primary productivity in Ariake Bay, 2008年度日本海洋学会秋季大会, 広島県呉市, 2008.9.24-28
- ㉑ 佐藤慎也, 石坂丞二, 二種の衛星で測定した有明海のクロロフィルa濃度の比較, 2008年度日本海洋学会秋季大会, 広島県呉市, 2008.9.24-28
- ㉒ 柴田達矢, 石坂丞二, 鈴木祥弘, 光合成色素の光吸収スペクトルに見られる2007年春と冬の有明海の微細藻類の光環境応答, 2008年度日本海洋学会秋季大会, 広島県呉市, 2008.9.24-28

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石坂 丞二 (ISHIZAKA JOJI)
名古屋大学・地球水循環研究センター・教授
研究者番号：40304969

(2) 研究分担者

清本 容子 (KIYOMOTO YOKO)
水産総合研究センター・西海区水産研究所・主任研究員
研究者番号：90371989

(3) 連携研究者

なし