

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：27410

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：H22～H24

課題番号：22310012

研究課題名（和文） 有明海奥部浅海域における貧酸素水の発生メカニズム

研究課題名（英文） Mechanisms of occurrence of hypoxic water in the inner parts of Ariake Bay

研究代表者

堤 裕昭 (HIROAKI TSUTSUMI)

熊本県立大学・環境共生学部・環境資源学科 教授

研究者番号：50197737

研究成果の概要（和文）：

有明海奥部では、近年、中央部および東側の海域で海底堆積物表層の泥分の増加および赤潮プランクトン由来の有機物の堆積による有機物含量の増加が起きていた。これらの事実は、同海域における潮流の減速および海水の鉛直混合力の減少を示し、梅雨期や秋雨期に河川水の一時的な流入量の増加に対して、形成される塩分成層の強度が強まることを示唆している。海域への栄養塩流入量が増加しなくても、成層強度の強化による赤潮の頻発、海底における汚泥堆積、夏季における貧酸素水発生が起きるメカニズムが解明された。

研究成果の概要（英文）：

Recently, the contents of mud and organic matter produced by the red tide plankton have recently increased in the surface layer of the sediment in the central and eastern areas of the inner part of Ariake Bay. These facts indicate the decrease of tidal current and vertical mixing potentials of the water in these areas, and suggest that the stratification of the water tends to be enforced following the increase of river water input in the long rainy season in mid June to mid July and the short one in autumn. The results of this study shows the mechanisms of frequent occurrence of red tide, progress of organic enrichment of the sediment, and the occurrence of a large scale of hypoxic water in the inner part of Ariake Bay without increase of nutrient loading.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2011 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：貧酸素水、赤潮、有明海、富栄養化

## 1. 研究開始当初の背景

豊饒の海と呼ばれ、生物生産性の高い内湾閉鎖性海域の代表例である有明海奥部海域では、1990年代後半より秋季に大規模な赤潮が発生するようになった。2000年代には夏季の底層における貧酸素水の発生域が奥部海域から隣接する諫早湾のほぼ全域に及ぶようになり、溶存酸素濃度も年々低下し続け、無酸素化した状態も発生した。貧酸素水の発生域では海底に嫌氣的な有機汚泥が堆積し、底生生物が死滅して、海底における食物連鎖は崩壊する。現在、有明海奥部および諫早湾では、底生生物の生物量が周年きわめて乏しい場所が多く見られ、かつての高い生物生産性を誇る「豊饒の海」が、一変している。そのため、タイラギ、ガザミ、クルマエビなどの底生生物の水産資源も壊滅的な打撃を受けて、沿岸漁業が成立しない事態に至っている。

沿岸閉鎖性海域における貧酸素水の発生メカニズムとしては、海域の富栄養化の進行に伴う大規模な赤潮の発生により、海底へ大量の有機物が沈降・堆積し、夏季に底層水の溶存酸素を消費して発生する例が、世界各地で数多く見られてきた。しかしながら、有明海では、1990年代後半より秋季に発生する赤潮が大規模化しているにもかかわらず、過去40年間の陸域からの栄養塩負荷量に増加傾向が認められない。したがって、これらの現象の発生メカニズムの解明と、解消に向けた有効な対策を見出すことが、有明海の生態系を保全する上で、急務の課題となっている。

## 2. 研究の目的

有明海奥部および諫早湾で夏季に発生する貧酸素水の発生域の拡大と貧酸素化の激化に関して、海底からの酸素消費速度を増加させているのは、海底に沈降・堆積した有機物量の増加にあることは疑う余地がない。実際、同海域の海底堆積物中の有機物含量は今なお

増加傾向にある。この海底への有機物負荷源に関しては、流入する河川水の水質に大きな長期的変動がないこと、陸域から同海域への栄養塩流入量に増加傾向は認められないものの、1998年以降、秋季にも長期間にわたって塩分成層が形成され、その塩分の低下した表層で赤潮が発生し、赤潮プランクトンによって生産された大量の有機物が海底へ沈降していることから、赤潮プランクトンによって生産された有機物に由来することが示唆される。また、そのことが、夏季における貧酸素水の発生を誘発していることが示唆される。

そこで、本研究においては、有明海奥部海域における赤潮頻発化・大規模化に始まり広範囲の海域における夏季の貧酸素水の発生に至る一連の現象に関して、海域へ流入する河川水の水質に大きな長期的変動を経ないまま、つまり海域への栄養塩負荷量や有機汚濁物質の流入量の増加を伴わないまま、どのようにして発生するのか、そのメカニズムの詳細を解明することをめざす。

## 3. 研究の方法

本研究では、2010年4月～2012年12月に、有明海奥部の中央を縦断する方向に10地点 (Stn S1～H) を設置し (約3 km 間隔) (図1)、冬季を除き、毎月、水質および海底環境の調査、ならびに底生生物群集の定量調査を実施し、海水構造、海底堆積物の物理化学

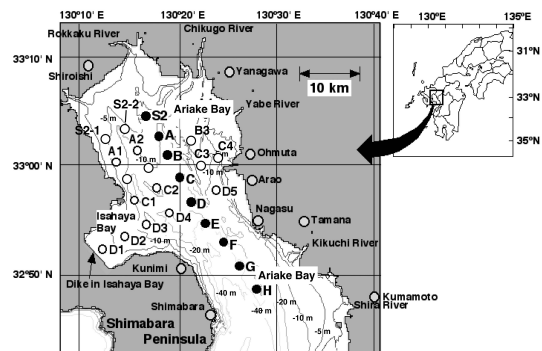


図1 有明海奥部海域における水質・海底環境・底生生物群集の定期調査地点 (●) ならびに同分布調査地点 (○)。

的特性、および底生生物群集の豊富さの季節変化を把握した。また、貧酸素水がもっとも発達する夏季を対象として、2010年8月4日～6日および2011年9月7日に、この海域に16調査地点を加えて格子状に配置し、Stn E～Hの4地点を除く22地点において、それぞれ同様な調査を実施し、貧酸素水の発生状況、その他の水質、海底堆積物の物理化学的特性および底生生物群集の分布を調べた。

#### 4. 研究成果

##### 有明海奥部海域の海底環境の特徴

有明海奥部海域における植物プランクトンの増殖は結果として大量の有機物を生産し、その有機物の海底への沈降・堆積により、海底への大量の有機物負荷源、堆積物の嫌気化ならびに貧酸素水の発生源として作用すると考えられる。そこで、有明海奥部海域における海底環境の現状を調査し、海底堆積物の泥分の分布を示し、クラスター分析により堆積物の粒度組成を類型化した(図2)。堆積物の泥分率は有明海を横断するStn B3-Stn B-Stn B2-Stn B1を結ぶ線上ならびに諫早湾口を横断するStn B1-Stn C1-Dtn D3を結ぶ線上より湾奥側で急激に変化した。これらの線上より湾奥側の地点(全15地点)には泥分約60～80%の砂質泥底が広がり、湾中央側の地点(全7地点)には泥分30%未満の泥質砂底または砂底が広がっていた。各調査地点間の堆積物の粒度組成の類似性を解析し、クラスター分析を行うと、泥分による類型化パターンとほぼ一致する2つのグループ(A, B)に分けられた。

これらの調査結果は、有明海奥部海域では「有明海を横断するStn B3-Stn B-Stn B2-Stn B1を結ぶ線上ならびに諫早湾口を横断するStn B1-Stn C1-Dtn D3を結ぶ線上」を境界として、その湾奥側と湾中央側で海底堆積物の物理化学的環境条件が明瞭に異なっていたこと

を示している。この境界は、流入する河川水の影響を受けて表層塩分の低下により有明海奥部を横断するフロントが形成される場所ともほぼ一致していた。水中に懸濁する泥の堆積過程はStoke'sの法則に従う。堆積している泥の粒子径(10 μm程度)より、上述の海水のフロントより湾奥側の泥底が広がる海域は、泥の粒子の沈降が可能な潮流がきわめて弱い海域であることを示している。

2010年8月4日～6日の調査結果を用いて、海底堆積物表層の物理化学的特性ならびに海底直上水のD0について、各要因間の相関関係を

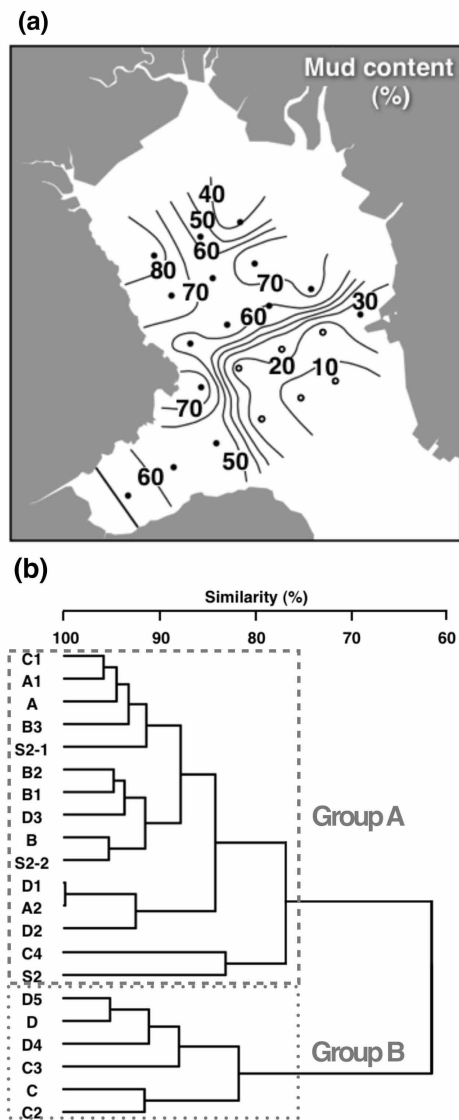


図2 有明海奥部海域における(a)堆積物表層の泥分分布と(b)堆積物の粒度組成のクラスター分析結果。2010年8月4日～5日

解析した(表1). その結果, 海底堆積物のMC (泥分), TOC (有機物含量), AVS, Chl.-a の間に有意な相関関係が認められた. このことは, グループAの湾奥側の地点では, 泥の粒子とともに植物プランクトン由来の有機物粒子が海底に堆積し, 夏季にはその分解促進に伴って底質が嫌気化したことを示している.

海底直上水のDOに関しては, これらの要因との有意な関係は認められなかった. 海底堆積物表層の有機物含量の増加ならびにその有機物の分解促進は, 海底直上水中の溶存酸素の消費量を増加させる要因となると考えられるが, 底層水は潮汐にともなって移流するので, とくに潮位変動大きい有明海ではその効果が大きく, 堆積物の各要因との直接的な関係が見いだせなかったと考えられる.

表 1 有明海奥部海域における堆積物表層の物理化学的特性 (MC: 泥分率, TOC: 有機物含量, AVS: 酸揮発性硫化物含量, Chl.-a: クロロフィル a 含量) および海底直上水の DO の相関関係. 調査日: 2010年8月4日~5日

	MC	TOC	AVS	Chl.a
TOC	0.950**			
AVS	0.593*	0.665*		
Chl.a	0.647*	0.655*	0.262	
DO	-0.230	-0.160	0.480	-0.198

\*: p<0.05, \*\* p<0.001

図3には, 2012年夏季の貧酸素水発生時のDOの鉛直プロファイルを示す. Stn S2およびStn Aの海底直上水では最低値が 0.78~1.05 mg/Lまで低下した貧酸素水が発生するとともに, その貧酸素水塊はさらに砂底が広がる湾中央部のStn Eにまで達していた. このような砂質の海底は水中に懸濁する泥粒子の堆積ができない潮流が存在し, ある程度の海水交換率が予測される一方で, 貧酸素水を発生させるような酸素消費が発生するために必要な有機物は堆積物中に含まれていないし, 底質も嫌気化していなかった. にもかかわらず, 貧酸素水が広がっていることは, 湾奥部の底層で

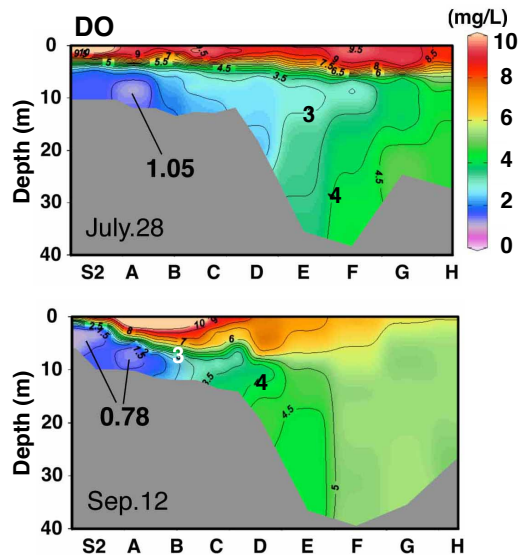


図3 有明海奥部海域における2012年夏季の貧酸素水発生時のDOの鉛直プロファイル.

発生した貧酸素水が移流してきたことを実証している. このように, 湾奥部で発生した貧酸素水は, その移流によって, さらに広範囲の海域に影響を及ぼすことを示している.

#### 過去約20年間の有明海奥部海域における海底堆積物の分布パターンの変化から推測する海水構造および海底環境の変遷

図4には1989年以降の佐賀県有明水産振興センターが有明海奥部で実施した海底堆積物の分布調査の結果と, 本研究の2010年および2011年の結果を比較する. 本研究の調査結果では, 有明海奥部を横断するStn B3-Stn B-Stn B2-Stn B1を結ぶ線上ならびに諫早湾口を横断するStn B1-Stn C1-Dtn D3を結ぶ線を境界として, 湾奥側には泥質砂底が, 湾中央側には泥質砂底または砂底が分布していた. ところが, 1989年には, その境界が有明海奥部を縦断し, 西側に泥底または砂質泥底が, 東側には泥質砂底または砂底が広く分布していた. 2000年, 2005年には泥質の海底が東側に徐々に拡大し, 砂質の海底が縮小して行った. 本研究の調査時には, 1989年当時砂質の海底であった奥部西側の海域に, 砂質の場所を見出すのは難しい状況となっていた.

この湾奥部における泥質の海底の拡大より、1989年時点の有明海奥部の海水構造や海底環境は現在と大きく異なることが推測される。奥部西側に砂質の海底が広がることは、筑後川、矢部川などの河川から土砂が流入するが、泥分は沈降して海底に堆積していないか、もしくは堆積後水中に再懸濁したことを示し、いずれにしても潮流が速くなければ実現しないことである。現在、泥質の海底が分布していることは、河川からの土砂の流入量に大きな変化がないことを前提として、1990年代以降に潮流が大幅に減少したことを示している。

堆積物の泥分が急激に変化する境界が有明海奥部を縦断することは、河川水の流入による表層塩分の低下に伴う密度成層形成域のフロントもこの境界線上付近に位置し、奥部海域の西側に成層域が分布し、東側は潮流が速く、海水が鉛直混合をしていたことを示している。有明海最奥部海域への河川からの栄養塩負荷量は、河川流量の大きさから湾最奥部東側に河口がある筑後川からの負荷量が圧倒

的に大きい。その栄養塩は、貧栄養の海水との鉛直混合によって濃度が希釈され、植物プランクトンの増殖は抑制されることが推測される。また、密度成層域は奥部西側の海域に限定され、その表層への栄養塩流入量も河川の規模が小さいので、植物プランクトンの増殖も限定的なものとなることが推測される。

以上のようなメカニズムで有明海最奥部海域における植物プランクトンの増殖が制御されれば、海底への有機物負荷量も制限され、しかも東側の海域では海水の鉛直混合によって海底へのD0供給量も増加し、貧酸素水が発生しない状態となることが推測される。実際、有明海奥部で大規模な赤潮が頻発するようになったのは1990年代後半からであり、大規模な貧酸素水が発生するようになったのも2000年代に入ってからである。

したがって、本研究の調査結果は、有明海奥部海域における潮流が東側海域で1990年代になって減少し、流入する河川水の鉛直混合が弱くなって密度成層が発達しやすくなると

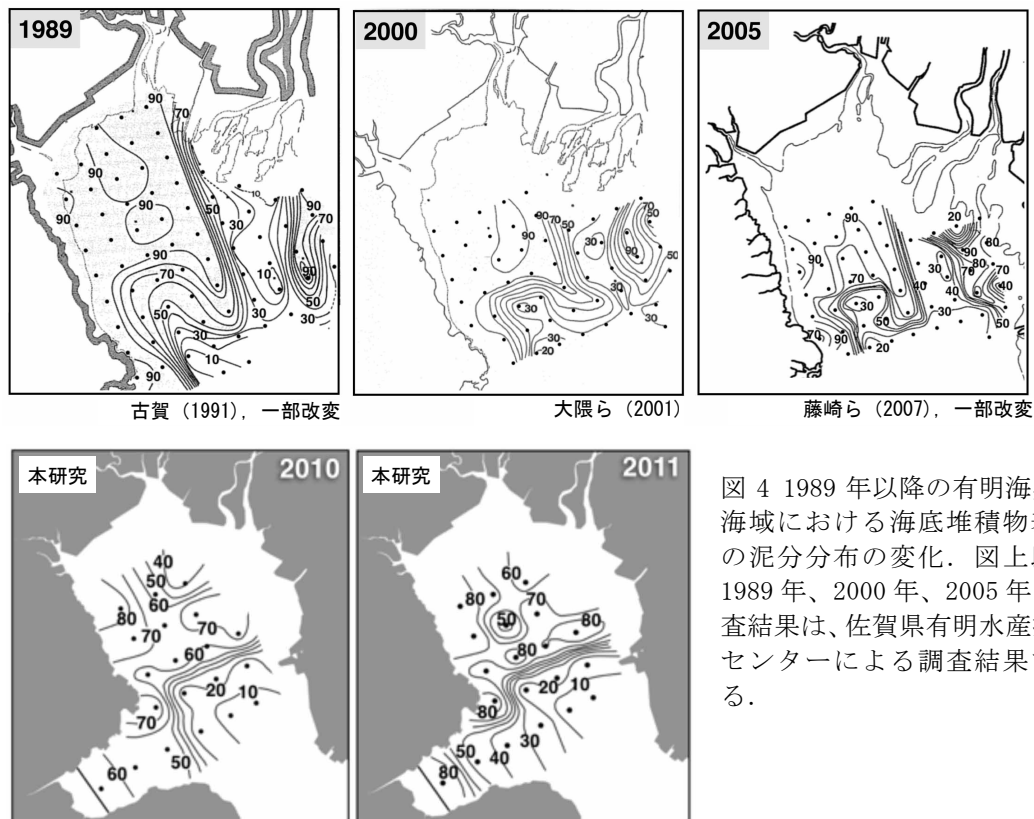


図4 1989年以降の有明海奥部海域における海底堆積物表層の泥分分布の変化。図上段、1989年、2000年、2005年の調査結果は、佐賀県有明水産振興センターによる調査結果である。

いう海水構造の変化が、大規模な赤潮の頻発、海底堆積物の嫌気化、奥部海域の広範囲における貧酸素水の発生という一連の現象がおきる原因となったことを強く示唆している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 堤 裕昭、有明海奥部で赤潮が発生し貧酸素化が進む理由. 科学、査読無、81巻、2011、450-457.
- ② 堤 裕昭、有明海奥部における大規模な赤潮の発生とその発生メカニズムと原因. 沿岸海洋研究、査読有、49巻、2012、165-174

〔学会発表〕(計11件)

- ① 村崎公美・堤 裕昭. 夏季の有明海奥部海域における赤潮維持構造の解明、2010年度日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会、東京大学大気海洋研究所(柏市)、2010年10月
- ② 堤 裕昭. 諫早湾の潮受け堤防が諫早湾および有明海の海底環境と底生生物に与える影響. 日本海洋学会海洋環境問題委員会 公開シンポジウム「諫早湾開門調査について考える」佐賀大学(佐賀市)、2011年5月
- ③ 堤 裕昭・大倉さちえ・村崎公美・堤 彩・高松篤志・小森田智大・柴沼成一郎・高橋徹・小松利光・門谷 茂. 有明海奥部海域における夏季の海水構造の特徴. 2011年度日本海洋学会秋季大会、九州大学(福岡市)、2011年9月
- ④ 小森田智大・村崎公美・梅原 亮・門谷 茂・堤 裕昭. 有明海奥部海域における夏季の海水構造の特徴 2: 躍層下で再生産された栄養塩による赤潮の維持機構. 2011年度日本海洋学会秋季大会、九州大学(福岡市)、2011年9月
- ⑤ 松田 香織・郷 秋雄・中口 和光・大塚 攻・門谷 茂・小森田 智大・堤 裕昭. 有明海奥部における成層の発生とその海水構造の特徴. 2011年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会、高知大学(高知市)、2011年9月
- ⑥ 折田 亮・堤 裕昭. 有明海奥部における底生生物群集の特徴. 2011年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会、高知大学(高知市)、2011年9月
- ⑦ 堤 裕昭・小森田智大・折田 亮・柴沼成一郎・門谷 茂・高橋 徹・小松利光. 有明海奥部海域の海底堆積物および底生生物群集の分布の特徴から推測される近年の海水構造の変化、2012年度日本海洋学会

秋季大会、清水市、2012年9月

- ⑧ 堤 裕昭・高松篤志・永田紗矢香・村崎公美・小森田智大・柴沼成一郎・門谷 茂. 有明海最奥部における泥底の拡大と底生生物群集の変遷が示すこと. 2012年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会、船橋市、2012年10月
- ⑨ 折田 亮・堤 裕昭. 梅雨期に卓越する密度成層が沿岸閉鎖性海域のベントス群集へ与える影響. 2012年度日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会、船橋市、2012年10月
- ⑩ Ryo Orita, Masami Murasaki, Tomohiro Komorita, Hiroaki Tsutsumi: Influence of well-developed stratification during the rainy season on the bottom environment and the macro-benthic community structure. The First Asian Marine Biology Symposium, Phuket, Thailand, 2012年12月
- ⑪ Hiroaki Tsutsumi, Tomohiro Komorita, Tohru Takahashi, Akira Umehara, Ryo Orita, Shigeru Montani: Occurrence of red tides and hypoxic water in an enclosed coastal sea, Ariake Bay, without progressing of eutrophication. The First Asian Marine Biology Symposium, Phuket, Thailand, 2012年12月

〔図書〕(計1件)

- ① 堤 裕昭, 他、かもがわ出版、諫早湾の真実 第1章 有明海異変概説、2010、1-29

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堤 裕昭 (HIROAKI TSUTSUMI)  
熊本県立大学・環境共生学部・教授  
研究者番号: 50197737

### (2) 研究分担者

門谷 茂 (SHIGERU MONTANI)  
北海道大学・水産環境科学院・教授  
研究者番号: 30136288

### (3) 研究分担者

高橋 徹 (TOHRU TAKAHASHI)  
熊本保健科学大学・保健科学部・教授  
研究者番号: 70369122

### (4) 研究分担者

小森田智大 (TOMOHIRO KOMORITA)  
熊本県立大学・環境共生学部・助教  
研究者番号: 10554470