

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22248022

研究課題名(和文) 貧酸素化が進行する閉鎖性内湾の環境修復：大村湾をシミュレーターとした検証実験

研究課題名(英文) Field experiments on the restoration of hypoxic environment in enclosed bays: practice in Omura Bay as a simulator.

研究代表者

中田 英昭 (NAKATA, Hideaki)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・教授

研究者番号：60114584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円、(間接経費) 10,350,000円

研究成果の概要(和文)：夏季に底層水の貧酸素化が恒常的に進行する大村湾をシミュレーター(模擬実験場)として、貧酸素化の進行に伴う栄養環境、赤潮プランクトンの変化や、海底微生物群集の酸素消費活性、生態系のエネルギーフロー等の現状を把握するとともに、海底からの散気(空気の供給)と海藻や底棲動物等の生物機能を活用した栄養塩・有機物の除去を組み合わせた実海域規模の貧酸素環境修復実験に取り組んだ。その成果にもとづき、大村湾の漁業生産を支える生態系の持続性や自律性を回復させる方策について総合的に取りまとめた。それを受けて、本研究で提示した技術の実用化に向けた試験が、26年度から長崎県で実施されることとなった。

研究成果の概要(英文)：Environmental restoration experiments using aeration combined with coastal bioremediation have been conducted in Omura Bay, an enclosed bay being suffering from hypoxia formation in the bottom water every summer, as a model area. Monitoring of nutrients, red-tide outbreaks, and microbial activities related to oxygen consumption has been made in parallel with the monitoring of hypoxia formation in the bottom water. The effectiveness of the restoration was synthetically evaluated and a practical plan for restoring sustainability and autonomous regulation of the Omura Bay ecosystem was newly proposed. Following our proposal, Nagasaki Prefecture will start practical field experiments in Omura Bay from the fiscal year 2014 as a part of the Action Plan for Environmental Conservation and Regional Promotion of Omura Bay.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：水産学・水産学一般

キーワード：水圏環境 環境保全 環境修復

## 1. 研究開始当初の背景

地形的に閉鎖性が強く海水交換が小さい内湾では、陸域から流入する栄養負荷の増大、干潟等の減少による浄化力の低下によって海域の富栄養化が急速に進み、成層が発達する夏季には底層水の貧酸素化が深刻な問題となっている。底層水の貧酸素化は、海底付近に生息する生物に悪影響を及ぼすだけでなく、底泥から溶出する栄養塩が新たな栄養負荷源となるため、内湾の環境悪化を加速させる契機となる。しかしながら、貧酸素化と海域の栄養環境や生態系との結びつきについては不明の点が多い。局所的な貧酸素化等のイベントに対して脆弱でない、物質収支のバランスのとれた持続性の高い生態系を取り戻すことが内湾環境修復の目標であり、そのためには貧酸素化に伴う内湾の環境や生態系の変化を総合的に診断し、それを踏まえて環境修復に向けた具体的方策の検討を進めることが重要な課題と考えられる。

長崎県大村湾は、地形的な閉鎖度が高い内湾として知られ、流入負荷は大都市圏の内湾に比べて小さいにもかかわらず、1970年代から夏季になると広範囲で底層水の貧酸素化が進行することが報告されている。その状況は下水道整備など流入負荷対策が強化された現在でもほとんど改善されていない。その一方で底棲魚介類の漁獲量は減少し続け、1993年以降はそれ以前の水準の半分近くに落ち込んでいる。さらに、2007年と2008年には、湾奥部で青潮が発生し重要水産物の一つであるマナマコの漁獲量が激減するなど浅海域の生物にも影響を与えた。そのため最近、青潮対策をはじめ環境保全・修復をめざす湾岸の自治体等の取り組みが強化され、そうした取り組みの科学的な基盤を確立することが社会的に強く要請されている。

## 2. 研究の目的

夏季に底層水の貧酸素化が恒常的に進行する大村湾をシミュレーター（模擬実験場）

に見立てて、貧酸素化の進行に伴う栄養環境や生物群集（植物プランクトンや微生物など）の動態、生態系の低次から高次栄養段階へのエネルギーフローの現状を把握するとともに、実海域規模で散気と生物機能を組み合わせた貧酸素環境の修復実験を行い、貧酸素状態の改善に伴う栄養環境、生物群集および生態系の変化過程を明らかにする。さらに、修復効果の検討結果を総合し、生物による浄化機能を高めることによって貧酸素状態の改善が継続的・自律的に進み、低次生産から高次生産（水産物）にうまくつながるバランスの良いエネルギーフローの場が維持されるように大村湾の環境と生態系を回復させるための科学的な基盤を確立する。

## 3. 研究の方法

大村湾における陸起源の栄養負荷等の実態をGISにより供給形態別に精査するとともに、貧酸素化の進行過程とそれに伴う栄養環境の変化や植物プランクトン、微生物等の群集動態のモニタリングを、夏季を中心に継続的に実施した。また、低次栄養段階から高次に至る各種生物の採集と炭素・窒素の安定同位体の測定を行い、生態系のエネルギーフローの現状を把握した。その上で、貧酸素化が頻繁に起こる湾中央部の海底を横断する形で散気管（全長7km）を埋設し、そこに陸上に配置したコンプレッサー（2台の交互運転）から継続的に空気を供給する散気実験を平成23年度から開始した。また、それと並行して、二枚貝（マガキ）養殖や底棲動物（マナマコ）の摂餌機能を利用した有機物の取り込み、海藻類の栄養吸収機能を利用した栄養塩類の取り込み等の、副次的な環境修復システムの効果についても各種の実験を行った。以上のモニタリング並びに各種実験の結果を総合することによって、大村湾の漁業生産を支える生態系の持続性や自律性を回復させるための方策について取りまとめた。本研究の全体的な構想を図1に示す。

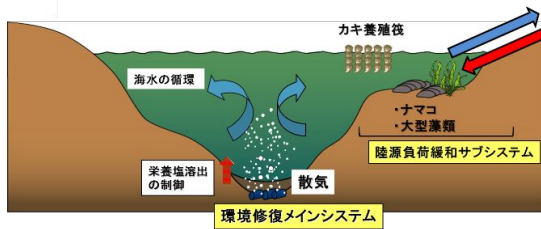


図1 貧酸素化が進行する内湾における環境修復システムの大村湾への適用（概念図）

#### 4. 研究成果

大村湾における貧酸素化の進行には、成層の発達に加えて、湾外から流入して湾口部で湾内水と混合した「混合水」の密度変化や、それに伴う混合水の湾内への流入深度の変化が大きな影響を及ぼす。この混合水は湾の西側の深みに沿って流入する傾向が強く、風が弱く湾内水が停滞する傾向が強まると湾中央部の深みを中心に貧酸素化が急速に進行する。漁獲量や漁獲物組成の経年的な変動に関する解析結果等から、上記のような貧酸素化の進行・拡大が底棲系の魚類を減少させ、大村湾の生態系のバランスを崩す主要因となっていることが確認された（中田）。

貧酸素化は基本的にはこれまでに陸域から負荷された栄養塩類や有機物の蓄積に起因するものと考えられる。一方、底層で貧酸素化が恒常的に進行するようになると、堆積物からの溶出に伴う栄養塩負荷が増加することが知られている。本研究で、陸域起源と堆積物由来の栄養塩負荷をそれぞれ定量化することによって流入負荷量の経年的な変化の実態を明らかにした。その結果、堆積物中の有機物含量の増加や貧酸素水塊の発生強度の増加に伴って、堆積物由来の窒素負荷量が、1970年代から2000年代の間に約90%増加したことが分かった。（梅澤）

本研究の実施期間における植物プランクトンの種組成等の動態、とくに有害な赤潮の発生等で問題となることの多い鞭毛藻類の出現状況と貧酸素水塊形成との関連性について検討した結果、鞭毛藻類の増殖が認めら

れた頻度が最も高いのは、貧酸素水塊が恒常的に形成される湾中央部であり、それに次いで湾奥部で高く、貧酸素水塊がほとんど形成されない湾口部では増殖の頻度は明らかに低かった。このことは鞭毛藻類の増殖に、成層期における珪藻類の減少（沈降）に加えて、貧酸素化の進行に伴い底泥からリン酸塩を主体とする栄養塩が溶出することが関与していることを示している（松岡）。

貧酸素水塊の形成・維持に堆積物の酸素消費過程の果たす役割が大きいこと、とくに硫酸還元菌による嫌気微生物過程がその駆動力として重要であることが分かった。さらに、成層構造が比較的安定した状態が長期間持続した年ほど海底下の硫酸還元菌の活動が進行し、大量に蓄積された硫化物イオンが水柱に溶出することによって大規模な無酸素化を引き起こす可能性があることが示唆された（和田）。

大村湾の魚類を含む高次栄養段階の生態系のエネルギーフローについては、これまでほとんど知見が得られていなかった。魚類等の安定同位体比解析の結果、大村湾の魚類の多くがカタクチイワシを餌料として利用している可能性が高く、植物プランクトンを起点として、動物プランクトン、カタクチイワシ、大型魚類（漁獲対象魚類）へとつながるエネルギーフローが大村湾の生態系の基盤となっていることが分かった（笠井・杉本）。

一方、大村湾底層水の貧酸素状態の修復のためのメインシステムとして湾中央部で行った散気実験の結果、気泡の上昇に伴って誘起される上昇流によって底層の水塊が上層に運ばれ、潮流等の作用で周辺に広がっている様子が確認された。この上昇流は貧酸素化した底層水と酸素が豊富な上層水の混合を促し、貧酸素の改善に一定の効果をあげるものと期待される（中田・山口）。

また、陸起源負荷の影響を緩和するためのサブシステムの一つとして、二枚貝（カキ）

養殖場で実施した散気実験の結果、散気地点では夏季の上層の高水温や底層の貧酸素の状態が改善されることが確認された。また、植物プランクトンについても、珪藻類が増加しそれが渦鞭毛藻類の増加を抑える傾向が認められ、散気によって誘起された上昇流が有害な赤潮の発生を抑制する効果を持つことが示唆された（笠井・山口・中田）。

さらに底棲動物の代表としてマナマコを取り上げ、その浄化能力の基礎となる摂餌生態とくに水温の変化に対する応答特性を明らかにした。大まかな試算結果ではあるが、マナマコを増産することができれば、貧酸素化の原因となる海底の有機物量の減少に一定の効果があるものと考えられる（中田）。一方、海藻類の浄化能力に関する実験結果から、アナアオサは栄養塩の取り込み能力がきわめて高いことが分かった。海岸に大量に集積したアナアオサは環境被害をもたらすことが知られているが、陸域からの栄養負荷の影響を緩和する環境修復材料として最も適した海藻種であることから、今後、その環境修復機能を実海域で活用していくための技術や回収したアナアオサの利用方法等について、さらに検討が必要である（梅澤）。

2010年度まで2年間にわたって海洋政策研究財団と長崎県が共同で実施した「大村湾の健康診断」の結果、大村湾の現状は「陸域からの栄養負荷が増加する一方で埋め立てや護岸工事等によりもともと少ない浅場がさらに減少し、浄化能力が低下してきている。そのことも相まって湾中央部では底層水の貧酸素化が進行し、漁獲量が減少したため水産物として栄養負荷を湾外に取り出す能力も低下している」と報告されている。そして、湾の健康を回復するための処方箋として、酸欠状態になりやすい体質を改善しながら浅場の生物による浄化機能を高め、湾全体の新陳代謝を良くすることによって栄養の望ま

しいバランスを確保することと、それによりプランクトンから魚介類の生産まで物質循環のパイプがうまくつながった自律性の高いシステムを作り上げていくことが提案されている（海洋政策研究財団：平成22年度「海の健康診断」を活用した大村湾の環境評価に関する調査研究報告書、2011年）。

本研究は、上記の処方箋を実現していくための基盤となる環境修復実験として位置付けることができる。まだ解析・検討が十分とはいえない点も残されているが、内湾の漁業生産を支える生態系の持続性や自律性の回復に寄与する環境修復システム構築のための総合的な取り組みについて、今後の研究の方向性を示すことができたのではないかと考えている。

研究代表者の中田は、長崎県の第3期大村湾環境保全・活性化行動計画（2014～2018年度）を検討するために設置された大村湾懇話会で、本研究の成果も含めて「大村湾の現状と課題」に関する報告を行った。それを受けて、長崎県は上記の行動計画における重点施策の一つとして貧酸素水塊対策に取り組むことを決定し、本研究で設置した散気実験施設の譲渡を受けて2014年度から技術の実用化に向けた試験を開始することになった。このように大学で実施した基盤的研究が環境行政の現場に受け継がれ事業化された点は、本研究の特筆すべき成果の一つといえる。

#### 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 8 件)

豊島香苗・梅澤有・中田英昭：大村湾の環境修復に向けた陸起源窒素の取り込みに適した海藻の選択．長崎大学水産学部研究報告，95，41 - 51，2014（査読あり）

Mizuta, D.D., A. Kasai, K. Ishii, H. Yamaguchi and H. Nakata : Effects of artificial upwelling on the reared oyster *Crassostrea gigas* in Omura Bay, Japan.

Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr. 78, 13 - 27, 2014 ( 査読あり )

須崎寛和・三宅陽一・中田英昭：大村湾における貧酸素水塊消滅期の海況変化．沿岸海洋研究, 51, 79 - 89, 2013 ( 査読あり )

塩川麻保・山口聖・梅澤有：有明海西岸域への地下水由来の栄養塩供給量の評価．沿岸海洋研究, 50(2), 85-95, 2013( 査読あり )

Wada M., S Suzuki, T. Nara, Y. Umezawa, M. Shimanaga, K. Matsuoka and H. Nakata: Microbial community respiration and structure of dead zone sediments of Omura Bay, Japan. Journal of Oceanography 68(6), 857-867, 2012 ( 査読あり )

和田実：貧酸素水塊の形成に関わる微生物過程．日本水産学会誌、78、276、2012 ( 査読なし )

中田英昭：貧酸素化が進行する内湾の環境修復：大村湾における実証実験．Ship & Ocean Newsletter、260号、6 - 7、2011 ( 査読なし )

平野慶二・日向野純也・中田英昭ほか4名：諫早湾のアサリ養殖場における夏季大量へい死対策 - 底層溶存酸素の改善試験．水産工学, 47, 53 - 62, 2010 ( 査読あり )

[学会発表](計 23 件)

上田遼・嶋永元裕・森郁晃・山喜邦次・中田英昭・和田実：大村湾中央部におけるメオベントス群集の動態解明．2014年度日本海洋学会春季大会、2014年3月28日、東京海洋大学(東京都港区)

森郁晃・山喜邦次・上田遼・近藤竜二・梅澤有・松岡數充・須崎寛和・中田英昭・和田実：大村湾の貧酸素水塊形成に関与する微生物呼吸活性の動態．2014年度日本海洋学会春季大会、2014年3月28日、東京海洋大学(東京都港区)

松岡數充：大村湾の環境とそこに生きる生物．平成25年度日本海洋学会青い海助成事業、大村湾の持続的な利用可能性に関する市民集会(招待講演)、2014年2月15日、諫早市立たらみ図書館(諫早市)

森郁晃・和田実・梅澤有・松岡數充・須崎寛和・中田英昭：大村湾の貧酸素水塊形成期における堆積物酸素消費ポテンシャルと細菌群集構造の動態．SME2013 第29回日本微生物生態学会、2013年11月23-24日、鹿児島

島大学(鹿児島市)

Mizuta, D.D., A. Kasai, K. Ishii, H. Yamaguchi and H. Nakata: Effects of artificial upwelling on environment and reared oyster *Crassostrea gigas* conditions in Seihi Bay, Japan. 2013 International Symposium on Connectivity of Hills, Humans and Oceans, 26-28 November 2013, Kyoto University, Kyoto, Japan

Mori, F., M. Wada, Y. Umezawa, K. Matsuoka, H. Suzuki and H. Nakata: Seasonal Variation in microbial community respiration of dead zone sediments of Omura Bay, Japan. 9<sup>th</sup> East China Sea Conference, 1 October 2013, National Taiwan Ocean University, Taiwan

Nakata, H.: A new approach to nutrient management for conservation and sustainable utilization of the coastal ecosystem. 9<sup>th</sup> East China Sea Conference (Invited), 30 September 2013, National Taiwan Ocean University, Taiwan

森永綾・松岡數充：渦鞭毛藻シスト群集に反映された大村湾の富栄養化．日本古生物学会2013年会、2013年6月29日、熊本大学(熊本市)

森郁晃・和田実・梅澤有・松岡數充・中田英昭：大村湾の貧酸素水塊形成時期における堆積物の酸素消費ポテンシャルの動態．日本水産学会九州支部大会、2013年1月26日、九州大学(福岡市)

井手浩美・中田英昭：漁業生態系として見た大村湾の特性およびその経年変化．日本水産学会九州支部大会、2013年1月26日、九州大学(福岡市)

Mori, F., M. Wada, Y. Umezawa, K. Matsuoka, and H. Nakata: Seasonal Variation in microbial community respiration of dead zone sediments of Omura Bay, Japan. International Symposium on Biodiversity in Changing Coastal Waters of Tropical and Subtropical Asia, 4 December 2012, Amakusa, Kumamoto, Japan

Mizuta, D.D., K. Zenimoto, A. Kasai, H. Yamaguchi and H. Nakata: Effect of aeration system on the condition of farmed oysters. 日本水産学会近畿支部後期例会、2012年12月1日、大阪市立大学(大阪市)

中田英昭・山口仁士：内湾環境の診断と修復．日本マリンエンジニアリング学会海洋環境研究委員会(招待講演)、2012年11月29日、長崎大学(長崎市)

Morinaga, A. and K. Matsuoka: Eutrophication suggested by the heterotrophic signal of dinoflagellate cyst assemblages: case of Omura Bay, West Japan. North Pacific Marine Science Organization (PICES), 12-21 October 2012, Hiroshima, Japan

日野出賢二郎・松岡數充: メソコスム実験による底質からの栄養塩溶出とそれが植物プランクトン群集に与える影響. 日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 2012年10月5-8日, 東邦大学(習志野市)

豊嶋香苗・梅澤有・武田重信・小橋川千晶・田村圭・河本和明: 大気降下物が内湾海域の沈降粒子束に与える影響の評価. 日本海洋学会秋季大会, 2012年9月14日, 東海大学(清水市)

Wada, M., K. Matsuoka, H. Nakata ほか 4名: Microbial community respiration and structure of dead zone sediments of Omura Bay, Japan. The 8<sup>th</sup> International Workshop on the Oceanography and Fisheries Sciences of the East China Sea. 25 November 2011, The University of the Ryukyus, Naha, Japan

Ohtake, Y., M. Wada: Dynamics of respiratory-active bacterioplankton in hypoxia as revealed by flow cytometry. The 8<sup>th</sup> International Workshop on the Oceanography and Fisheries Sciences of the East China Sea, 25 November 2011, The University of the Ryukyus, Naha, Japan

Chung, S., H. Nakata: The change in environment and fish community structure in an enclosed bay of western Japan over the last five decades. North Pacific Marine Science Organization (PICES), 20 October 2011, Khabarovsk, Russia

牟田直樹・梅澤有・松岡數充: 大村湾における栄養塩溶出の時空間変動の解明. 日本海洋学会秋季大会, 2011年9月28日, 九州大学(福岡市)

②①塩川麻保・山口聖・梅澤有: 有明海西岸域への地下水由来の栄養塩供給量の評価. 日本海洋学会, 2011年9月27日, 九州大学(福岡市)

②②松岡數充・皿井千裕・川見壽枝: 有殻渦鞭毛 *Protooperidinium oblongum* complex のシストと遊泳細胞の対応関係. 日本ベントス

学会・日本プランクトン学会合同大会, 2011年9月17日, 高知大学(高知市)

②③ Takano, Y., Y. Umezawa and M. Wada: Impacts of extra-cellular organic matter derived from red tide forming algae (*Chattonella marina* and *C. antiquia*) on bacterial population. 日本微生物生態学会, 2010年11月25日, 筑波大学(つくば市)

〔図書〕(計 2 件)

Matsuoka, K. and J. M. Head: Biological and Geological Perspectives of Dinoflagellates. Geological Society, 317-342, 2013

松岡數充: 新編大村市史第1巻自然・原始・古代編. 大村市史編さん委員会, 45-62, 2013

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中田 英昭 (NAKATA HIDEAKI)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・教授  
研究者番号: 60114584

### (2) 研究分担者

松岡 數充 (MATSUOKA KAZUMI)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・教授  
研究者番号: 00047416

梅澤 有 (UMEZAWA YU)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・准教授  
研究者番号: 50442538

和田 実 (WADA MINORU)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・准教授  
研究者番号: 70292860

笠井 亮秀 (KASAI AKIHIDE)

京都大学・フィールド科学教育研究センター・准教授  
研究者番号: 80263127

### (3) 連携研究者

山口 仁士 (YAMAGUCHI HITOSHI)

長崎大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 10359143

杉本 亮 (SUGIMOTO RYOU)

福井県立大学・海洋生物資源学部・助教  
研究者番号: 00533316