

学 位 論 文 要 旨

氏 名 石谷 哲寛

題 目 有明海奥部における貧酸素水塊の形成機構に関する研究
(Studies on the formation mechanism of hypoxic water in the interior parts of the Ariake Sea)

本研究では、近年、夏季に有明海奥部で大規模に形成され、この海域の生態系や漁業に悪影響を及ぼしている貧酸素水塊について、現地観測データ及び2層ボックスモデルにより、その発生状況及び形成メカニズムについて検討した。また、貧酸素水塊の発生防止策についての基礎データを収集するために、海底付近の攪拌・混合能力を高めるための種々のブロック模型を試作し、その水理特性について検証した。本研究の主な成果は、以下のように要約される。

- (1) 現地観測の結果より、有明海奥部の貧酸素水塊は、夏季小潮時を中心に、底質の含泥率やCODの高い西岸域において頻発していた。しかし、観測年により貧酸素水塊の分布や規模に違いが見られた。有明海奥部西岸域の底層DOの時間的変動は、基本的には流速に大きく左右されており、流速の遅い小潮期に低下、流速の早い大潮期に増加する傾向を示した。しかし、小潮期でも、台風や強風による海水の攪拌、混合が起こった場合は、DO飽和度は増加し、逆に、大潮期でも底泥の巻き上げにより底層に高濁度層が形成された場合や、沖合から貧酸素水の流入があった場合は、DO飽和度は低下した。
- (2) 貧酸素水塊の発生時、海域は密度の成層構造が発達し、密度躍層が形成されていた。この密度躍層の上層では、植物プランクトンが増殖し、DOは過飽和状態となっていたが、密度躍層下のDOは急減し貧酸素状態であった。対象海域における密度成層は、降水量の増加に伴う淡水流入量の増大により発達することが明らかになった。酸素消費実験の結果、底層中における酸素消費は、底質による酸素消費よりも底層水による酸素消費が占める割合が大きく、その割合は平均で63.2~79.2%であった。このことから、植物プランクトンの死骸の沈降などによる底層の懸濁態有機物量の増加は、底層のDO消費量の増加をもたらすと推察された。
- (3) 2層ボックスモデルを用いた解析の結果、密度躍層の発達する夏季には、鉛直拡散係数 K_z と底層の生化学的DO消費速度 R の底層DOの時間変動に及ぼす影響度は大きいことが明らかになった。 K_z は常に底層の貧酸素化を解消する方向に作用し、逆に R は常に底層の貧酸素化を進める方向に作用したが、感度解析の結果、底層の貧酸素化に最も強く影響する要因は R であることが明らかになった。
- (4) 模型ブロックを用いた水路実験により、ブロックが流れに及ぼす影響を実験的に検討した結果、ブロックの設置により、海底付近の攪拌・混合作用が大きく促進されることが明らかになった。また、染料トレーサ法を用いたブロック周辺の流れの可視化により、攪拌・混合作用の促進には、今回用いたブロックの中では、凹面形状の三角形ブロックが最も効果的であった。

学 位 論 文 要 旨

氏 名	Tetsuhiro Ishitani
題 目	Studies on the formation mechanism of hypoxic water in the interior parts of the Ariake Sea (有明海奥部における貧酸素水塊の形成機構に関する研究)

In this study, the occurrence condition and formation mechanism of hypoxia in the interior parts of the Ariake Sea during summer, which has bad influences on the ecosystem and fishery, were investigated by the various field observations and a two-layer box model. Moreover, blocks for increasing the power of stirring and mixing of bottom water near seabed were made and the effects of blocks on the velocity profiles and turbulent properties were investigated experimentally. The results obtained by this study are summarized as follows:

(1). Hypoxia occurred frequently in the western interior parts of the Ariake Sea (WIAS), where bottom sediment contained high mud content and COD, during neap tides in summer. The difference was seen in distribution and the scale of hypoxia every year. The temporal variation of bottom DO concentration in WIAS was greatly basically controlled at current velocity near seabed. However, when stirring and mixing of seawater were enhanced by typhoon and strong wind, DO concentration increased even the periods of neap tides. Conversely, when high turbidity layer was formed near seabed by resuspension of bottom sediment and hypoxia flowed from offshore to WIAS, DO concentration decreased even the periods of spring tides.

(2). The density stratification was developed and density pycnocline was formed at hypoxia events. Supersaturated DO occurred above the density pycnocline, but DO concentration decreased rapidly below the pycnocline. The density stratification in WIAS was enhanced with increasing of rainfall. From the results for oxygen consumption tests using bottom water and bottom sediment, we found that DO consumption rate of bottom water contributed largely to DO consumption in the seawater column below the density pycnocline. Thus, we considered that increase in DO consumption near sea bottom was caused by increasing of the suspended organic matter in bottom water.

(3). From the analytical results using a two-layer box model, we found that vertical diffusion coefficient (K_z) and biochemical oxygen consumption rate (R) contributed greatly to the temporal variation of DO concentration in lower layer box during summer. K_z always canceled oxygen depression in bottom layer, and R always enhanced hypoxia. As a result for sensitivity analysis, R was the most important factor which controls the occurrence of hypoxic water in the bottom layer.

(4). The effects of blocks on the velocity properties were investigated experimentally. As a result, it was clarified that the power of stirring and mixing was enhanced by installation of block on channel bed. From the results of the visualization of flow pattern around each of three kinds of blocks using a dye-tracer method, the concave triangular block was considered to be better than the other blocks in order to stir and mix efficiently the water near channel bed under certain experimental conditions.

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏名	石谷 哲寛
審査委員	主査 鹿児島大学 教授 梶井 和朗
	副査 鹿児島大学 准教授 中川 啓
	副査 琉球大学 教授 吉永 安俊
	副査 琉球大学 教授 酒井 一人
	副査 佐賀大学 准教授 近藤 文義
審査協力者	佐賀大学 理事 瀬口 昌洋
題目	有明海奥部における貧酸素水塊の形成機構に関する研究 (Studies on the formation mechanism of hypoxic water in the interior parts of the Ariake Sea)
<p>有明海の奥部や東部の沿岸域は、わが国最大の海苔やアサリなど二枚貝類の絶好の養殖漁場として活用され、高い漁業生産高を誇ってきた。しかし、近年、有明海奥部を中心に底層で大規模な貧酸素水塊（溶存酸素飽和度40%以下）の発生が顕著となり、この海域の生態系や漁業に悪影響を及ぼしている。しかし、有明海奥部における貧酸素水塊の形成機構は、現在のところ十分に究明されていない。</p> <p>本研究では、有明海奥部における貧酸素水塊の発生状況を明らかにし、さらにその形成機構を解明するために、現地観測や水質分析などのデータ及び奥部に設定した2層ボックスモデルによる解析結果に基づいて、貧酸素水塊の発生状況や形成機構などについて検討、考察した。その結果、以下の研究成果が得られた。</p> <p>有明海奥部の貧酸素水塊は、夏季小潮期を中心に、底質の含泥率や化学的酸素要求量の高い西岸域において頻発した。しかし、観測年により貧酸素水塊の分布や規模に大きな差異が見られた。有明海奥部の西岸域底層における溶存酸素（DO）濃度の時間的変動は、基本的には流速に大きく左右され、流速の遅い小潮期に低下、流速の早い大潮期に増加する傾向を示した。また、有明海奥部の貧酸素水</p>	

塊発生時には、海面下4~5m付近に密度の成層構造が発達し、密度躍層が形成された。密度躍層の上層では、植物プランクトンの増殖に伴い、DO濃度は過飽和状態に、逆にその下層では、貧酸素化した。この海域における密度成層は、集水域の降水量の増加に伴う淡水流入量の増大により発達することが明らかとなった。酸素消費実験の結果、底質よりも底層水によるDO消費量の占める割合が大きく、そのDO消費量は底層のDO消費量の60~80%を占めた。このことから、植物プランクトンの死骸の沈降や底質から巻き上げられたデトリタスなどによる底層水中の懸濁態有機物量の増加が、底層のDO消費量の増加をもたらすと推察された。

2層ボックスモデルによる過去33年間の浅海定線データ解析の結果、各月ごとの表層と底層間の密度成層強度 (P) や両層間の鉛直拡散係数 (K_z) 及び底層の生化学的DO消費速度 (R) の平均値、さらにはそれらの年間の変動傾向が把握された。すなわち、夏季では7月を中心に、 P は大きく上昇し、逆に K_z は大きく減少した。また、 R は夏季に大きく増大した。一方、2層ボックスモデルを用いた各物理的及び生化学的パラメータの底層DO濃度に対する感度分析の結果、特に密度躍層の発達する夏季では、 K_z と底層の生化学的DO消費速度 (R) の底層DO濃度に及ぼす影響度が大きかった。すなわち、 K_z の増大は、常に底層の貧酸素化を解消する方向に、逆に R の増大は、常に底層の貧酸素化を促す方向に作用するが、底層の貧酸素化に最も強く影響するパラメータは R であった。

以上の検討結果から、有明海奥部の貧酸素水塊は、潮流による攪拌作用の低下する小潮期に、降雨により淡水流入量が増加した場合、密度躍層が発達し、表層から底層へのDO補給能力が低下するために、表層から底層へのDO補給量よりも底層での懸濁態有機物の分解に伴うDO消費量が増大することにより、貧酸素水塊の発生することが明らかとなった。

また、有明海奥部の貧酸素水塊の発生防止策を探るために、潮汐発生用の実験水路底面に種々の形状の湧昇流発生ブロック (模型) を設置し、そのブロック周辺の流れ特性を実験的に検討した。その結果、凹面形状の三角形ブロックの設置が海底付近の攪拌・混合作用を大きく促進し、密度躍層の解消さらには貧酸素水塊の発生防止に有効であると推察された。

以上の研究成果は、現在、深刻化しつつある有明海奥部での貧酸素水塊の形成機構を科学的に究明したものとして高く評価される。よって、本研究は、博士 (農学) の学位を与えるに十分な内容を有するものと認められる。

最終試験結果の要旨	
学位申請者 氏名	石谷 哲寛
審査委員	主査 鹿児島大学 教授 初井 和朗
	副査 鹿児島大学 准教授 中川 啓
	副査 琉球大学 教授 吉永 安俊
	副査 琉球大学 教授 酒井 一人
	副査 佐賀大学 准教授 近藤 文義
審査協力者	佐賀大学 理事 瀬口 昌洋
実施年月日	平成 22年 7月 26日
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) <input checked="" type="radio"/> 口答・筆答	
<p>主査及び副査は、平成22年7月26日の公開審査会において学位申請者に対して学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のように質疑がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士（農学）の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに見識を有すると認めた。</p>	

学位申請者 氏 名	石谷 哲寛
<p>[質問 1] DO 飽和度と DO 濃度の違いは？</p> <p>[回答 1] DO 濃度は水中に溶存している酸素量, DO 飽和度は水中に溶存している酸素量を, 測定時の水温, 塩分における飽和溶存酸素量に対する割合で表したものです.</p> <p>[質問 2] 貧酸素水塊の閾値を 40%としているが, この値が変わると結論にも影響するか？</p> <p>[回答 2] 貧酸素水塊の生物などへの影響について論ずるのであれば, 当然結果は変わると考えられます. しかし, 本研究は貧酸素水塊の形成という現象そのものについて論じているため, 貧酸素水塊の定義が変わると, 貧酸素水塊の発生域や発生頻度などは若干変わりますが, 本研究の結論が大きく変わることはないと考えます.</p> <p>[質問 3] p.20 の Fig.2-14 の COD 分布図は, どれほどの期間, そのような状態であると見なせるのか？</p> <p>[回答 3] 環境省による 2002 年と 2005 年の底質の観測結果を比較すると, COD に関しては, 有明海奥部では全体的に低下しており, 場所によっては半分程度の値になっています. しかし, 東岸域に比べて西岸域の方が COD の値が高いという全般的傾向は変わっていません.</p> <p>[質問 4] DO 飽和度が最も低い海域が調査地区になっているが, この海域の DO 飽和度が低いことは調査の結果分かったのか, それとも既に低いことが分かっていた調査地区に選んだのか？</p> <p>[回答 4] 水産庁や沿岸の各県などによって, 以前から有明海奥部の DO の現地観測は行われており, それらの観測結果から, 有明海奥部でも特に西岸域において底層の貧酸素水塊が頻発していたため, 貧酸素水塊形成機構の解明の視点から今回の研究の調査区域を選定しました.</p> <p>[質問 5] 貧酸素水塊の形成時間率とは？</p> <p>[回答 5] 観測が行われていた夏季の期間のうち, 底層付近が貧酸素水塊の状態になっていた時間の割合を表します.</p> <p>[質問 6] 攪拌・混合により表層から酸素が供給され底層の DO が上昇すること, それと同時に, 底質の巻き上げが起こり, 底層の有機物量が増加して酸素消費が増大し, 底層が貧酸素化すること, これらの両方の影響の度合いは？</p> <p>[回答 6] 基本的には, 波浪などによる攪拌・混合の増大は, 底層への酸素供給を増加させ, 底層の貧酸素化を解消するように作用すると考えられます. しかし, 台風の接近などで, 底質の巻き上げを伴うような激しい攪拌・混合が起こった場合, 巻き上げられた底質により底層付近の有機物量が通常時よりも高くなるため, これらの好氣的分解により底層付近の DO が急激かつ一時的に低下することがあります.</p> <p>[質問 7] 海水の鉛直混合が促進されるメカニズムとは, 水理的にはどのようなものか？また, 密度成層が増すと海水の鉛直混合が抑制されると説明されているが, これはどのようなメカニズムか？</p> <p>[回答 7] 潮汐に伴う流れによる鉛直混合は, 乱流拡散によって起こります. 流速が早くなる大潮期は, 乱れも大きくなるため, 鉛直混合も起こりやすくなります. しかし, 密度成層が発達すると, 鉛直混合に必要なエネルギーが増大するため, 小潮期の流速低下などによりさらに成層が発達し, 混合が起こりにくくなると考えられます.</p> <p>[質問 8] 鉛直拡散係数 K_z の値のオーダーの妥当性は？</p> <p>[回答 8] 既往の観測により得られたデータと比較しても, 妥当な値であると考えられます.</p> <p>[質問 9] Fig.2-23 において, DO 飽和度と塩分の高い部分との連動について, DO 飽和度の低下は沖合からの低酸素水塊の流入と説明されているが, その理由が分かりません. 塩分と低酸素水塊の間に関係があるのか？</p> <p>[回答 9] 過去の観測結果によると, 底層における塩分と DO 飽和度との間には, 負の相関性が見られます. それは, 塩分の低く, DO 飽和度の高い表層と塩分の高く, DO 飽和度の低い底層の混合を反映したのですが, その相関係数はあまり高くありません. Fig.2-23 に示される 2005 年 8 月 4 日～7 日の場合</p>	

は、沖合の水深の深い海域（海底水道）から塩分の高い海水が流入し、その流入してくる海水の DO 飽和度が沿岸付近に比べて低かったために、DO 飽和度が低下したと考えられます。

〔質問 10〕 2 層ボックスの境界の密度成層の平均的な深さ 4m を導き出した結果はどれか？また、このモデルの妥当性は？

〔回答 10〕 密度成層の平均的な深さは、現地観測の結果（例えば、Fig.2-29, 2-30）や、既往の研究の結果などから決定しました。モデルの妥当性については、モデルにより算出された値は現地観測により得られた値と比較的近いことから、ほぼ妥当であると考えられます。

〔質問 11〕 式(3.6)の蒸発係数 κ の値の根拠は？また、単位の sm^{-1} とは？

〔回答 11〕 κ の値は文献値より求めました。学位論文の本文中に参考文献を追加しました。その単位は $\text{mmd}^{-1}\text{hPa}^{-1}\text{sm}^{-1}$ です。

〔質問 12〕 モデル解析で、R が結果に最も影響するということが、R の推定する誤差が大きいと結果の誤差も大きいということか？

〔回答 12〕 R の C_{∞} に対する影響度は、R の C_{∞} に対する感度と R の絶対値の変動幅によって決まります。したがって、R の絶対値が小さい場合には、R の誤差が大きくても、影響度は小さく、一方、R の絶対値が大きい場合には、R の誤差が大きくなるに伴って、影響度も大きくなると推察されます。

〔質問 13〕 パワースペクトルをとることによって、Fig.4-14, 4-15 では明らかにできなかった新たな考察が何か加えられるのか？

〔回答 13〕 パワースペクトルによって、どのスケールの渦がどの程度発生しているのかを定量的に把握することができます。これにより、各ブロックの形状毎の水理特性の差異を検証できると考えられます。

〔質問 14〕 ブロックのスケールによっては、底質の巻き上げで貧酸素化を促進することもありえるのか？

〔回答 14〕 今回の実験で使用したブロックは、高さを水深の 4 分の 1 に設定しています。このスケールであれば、形状の違いによる攪拌・混合作用の効果の差異が認められ、どのブロックも密度躍層を破壊し、表底層間の混合を促進することが確認されました。しかし、今回の実験では、ブロックのスケールと底質の巻き上げに関する検討を行っていないため、ブロックのスケールに伴う底質の巻き上げと貧酸素化との関係については、明らかではありません。

〔質問 15〕 湧昇流発生ブロックの力学的安定性（滑動、転倒、沈下）については？

〔回答 15〕 現段階では模型を用いた水路実験しか行っていないので、今後の課題となりますが、例えばブロックを杭やアンカーを用いて海底に固定したり、また軽量の材質でブロックを製作したりすることによって、ご指摘のような問題は解決できると考えています。

〔質問 16〕 水路での模型実験は 2 次元流れが前提であるが、現地は有明海奥部での反時計回りの環流による影響なども考えられる。模型実験と現地との乖離については？

〔回答 16〕 今回の模型実験は、潮汐の干満差の大きな有明海奥部西岸域における貧酸素水塊発生防止対策を前提にしたものです。したがって、この海域では、潮汐に伴い湾軸（ほぼ南北）方向の潮流が卓越しているため、模型実験では 2 次元の流れ場を作り、ブロックの基本的な水理特性の解明を行ないました。現地の流れは、厳密には環流などを含む 3 次元的な流れですが、特に時空間的スケールの大きな還流の流速は、潮汐の干満に伴って発生する周期的な潮流速に比べて十分に小さいため、今回の実験においては無視できます。したがって、少なくとも還流による模型実験と現地との乖離は、ほとんど無いと考えています。

〔質問 17〕 これまでの研究と比較して新規に明らかになった点は？

〔回答 17〕 現地観測データにより、貧酸素水塊の発生時間率と底質との関係、密度躍層の発達と降雨の関係などが明らかになりました。また、ボックスモデル解析により、貧酸素水塊発生に及ぼす物理的及び生化学的要因の影響度が定量的に評価されました。さらに、水路実験により、貧酸素水塊発生防止対策として、ブロックによる攪拌・混合作用の促進の有効性が明らかになりました。