

氏名	さとうひろのぶ 佐藤博信		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成18年3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻		
学位論文題目	内湾における海水交換が物質循環及び溶存酸素の応答に与える影響に関する研究		
指導教員	東北大学教授 澤本 正樹		
論文審査委員	主査 東北大学教授	澤本 正樹 東北大学教授	真野 明
	東北大学教授	田中 仁 東北大学助教授	風間 聡
			(環境科学研究科)

論文内容要旨

第1章 序論

内湾は、静穏であるために、港湾、養殖漁場などとして利活用されることの多い空間である。したがって、内湾を津波や高潮などから守るために、湾口部に防波堤などが建設されることがあり、そのことが、湾内外の海水交換量を小さくしている。

そのため、河川からの栄養塩類の流入にともなう富栄養化、植物プランクトンの異常発生による赤潮、有機物の分解にともなう溶存酸素(DO)の消費による貧酸素化が問題となっている。

本研究の対象水域でもある、三陸リアス海岸に位置する大船渡湾においては、宮沢らは津波対策として湾口部に津波防波堤が建設により、人為的に湾内外の海水交換が阻害され、その結果、貧酸素化にともない養殖可能水深が浅くなり、筏1台あたりの生産量が減少したことを報告している。

しかし、湾口防波堤を取り去ることは、防災の観点から非現実的であるため、湾口防波堤を撤去することなく、何らかの手法で海水交換を促進させ、水質を改善させることが必要である。よって、多くの研究者の間で海水交換型防波堤の開発が進められている。また、負圧を利用し、湾内底部の海水を湾外へ排出する負圧利用型海水交換装置の考案がなされている。

海水交換を促進させるための装置を効果的に活用するためには、第一段階として、潮汐流や密度貫入などの自然の海水交換が、どのように水質に影響を与えるのかの基礎的現象理解、また、どの程度の海水交換量で内湾の水質がどのように変化するかの現象理解が必要である。

以上の問題提起を受け、本論文では、きわめて閉鎖性の高い水域である大船渡湾(岩手県大船渡市)をフィールドとし、年間を通しての大船渡湾内外の水質および密度構造と海水交換に関する基礎的現象の把握を

行なった。また、人為的海水交換による水質浄化の可能性に関して、物質循環モデルにより解析を試みた。

第2章 大船渡湾における海水密度変動による海水交換と流況変動に関する検討

2003年夏季において、大船渡湾内の水質構造を把握するために、現地観測を行った。その結果、8月下旬には、Chl.a 極大層が湾内中層に存在することが確認できた。しかし、9月中旬においては、Chl.a 極大層が消滅した。この2時期の湾外の密度をみると、8月下旬より9月中旬の方が密度が 0.5kg/m^3 程度高く、湾内中層の密度と等しいことがわかった。したがって、密度貫入により中層で海水交換が発生し、Chl.a 極大層が消滅したと考えられる。

9月上旬の密度上昇の理由を明らかにするため、三陸沖 10km の σ_t 実測値と、塩分値を年間の塩分平均値である 33.62PSU と一定として、水温のみを実測値を用いて新たに σ_t を計算したもの（これを便宜上、 $\sigma_{t,33.62}$ とする）の相関をとったところ、相関係数は 0.99 であり、回帰式は $\sigma_t = 0.98\sigma_{t,33.62} + 0.40$ であった。この回帰式を用いて、NOAA/AVHRR より作成した SST 図より、三陸沖の密度分布図を作成した。

密度分布図より、9月は親潮第一分枝とみられる水塊が三陸沿岸に接岸していることが確認できた。この水塊の密度は9月中旬の湾内中層の密度と一致し、Chl.a 極大層の消滅に影響を与えたことを示唆していることが確認できた。

また、8月下旬と9月中旬の、Chl.a 極大層に位置する海水の DIN ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) および DIP ($\text{PO}_4\text{-P}$) 濃度を分析し、Michaelis-Menten 式を用いて、栄養塩類による Chl.a 増殖制限項を算出したところ、9月の方が高いことを確認した。これは、海水交換による底層栄養塩類の巻き上がりの影響と考えられ、条件が許せば Chl.a 層が再び発達する可能性もある。

したがって、親潮第一分枝の密度が湾内底層部と同等以上に大きい場合、海水交換による栄養塩類の巻き上がりが植物プランクトンの生産に正の影響を与えることが考えられる。

第3章 大船渡湾内の水温および DO 濃度変動に与える沿岸境界流としての津軽暖流の影響

本章では、大船渡湾外の流況が湾内水温と DO 濃度に与える影響を見るために、現地観測および NOAA/AVHRR の熱赤外面像を用いて検討を行った。

実測は、2004年5月28日～10月22日まで、湾中央部、湾口部内側の2点で表層（水面-1m）、中層（水深12m）、底層（海底+2m）、湾口部外側の1点で水面-10mの深さで水温、塩分を10分間隔で計測した。あわせて、湾内11点、湾外1点にて、約月1度、鉛直方向に水温、塩分、濁度を観測した。

観測の結果、大船渡湾では湾外水が湾内の同一密度層を選択して流入する密度貫入の発生が確認できた。

また、湾外水温は湾内中層水温と等しく、湾内中層程度で密度貫入が活発なことが確認できた。

8月には、湾口部内側底層において密度貫入によるものとみられる DO の急上昇が確認できたが、再び DO は消費され、貧酸素水塊消滅には大きな影響は与えていなかった。これは、成層期は湾外水より湾内底層の方が密度は高く、湾外水が流入しづらいためである。

続いて貧酸素水塊消滅期をみると、10月に湾内底層水温と湾外水温が同一になったときに、DO の大きな急上昇が確認された。このとき、津軽暖流は9月と比較して弱く、湾外水温も低くなっているのが確認できた。これらのことから、津軽暖流の盛衰状況によっては、貧酸素水塊消滅時期が変化する可能性があることが考えられる。

第4章 大船渡湾における密度貫入が中層 Chl.a 濃度に及ぼす影響

本章では、第2章でも確認された、中層における Chl.a 濃度の時系列変化に関する検討を試みた。

2004年7月下旬～同年8月下旬まで、湾中央部中層（17m）に Chl.a 計を設置し、10分間隔で時系列データを取得した。その結果、8月中旬に、Chl.a の急激な低下が確認できた。この理由を明らかにするために、海水交換を考慮した湾内の簡易物質循環モデルを構築した。その結果、海水交換をしない場合は Chl.a の急変が再現できなかったが、海水交換を考慮した場合は Chl.a の急変現象が再現できた。

一方、親潮は豊富な栄養塩類を含むため、親潮が接岸していると思われる台風通過直後の栄養塩類を境界条件として与え、解析を試みた。その結果、密度貫入が発生した際に、湾内外の Chl.a 濃度の交換が発生し、一度は濃度が下がるが、湾外から密度貫入により栄養塩類が流入する。よって、貫入により Chl.a 濃度が減少した際に、栄養塩類による Chl.a 増殖制限項は逆に大きく増加している。したがって、貫入が発生しても再び Chl.a は増加する。ゆえに、特に、植物プランクトンの発生によって栄養塩類が使い果たされた海域においては、密度貫入は新たな栄養塩類の供給源となりうると考えられる。

第5章 大船渡湾における湾水制御効果の検討

4章までで、密度貫入による自然の海水交換は、夏季においては底層の溶存酸素を回復させる効果がないことが明らかになった。したがって、人為的な海水交換を発生させることが必要である。

大船渡湾においては、下げ潮時に人為的に湾内底層の貧酸素水塊を湾外に排出する、負圧利用型海水交換装置が試験的に設置されている。本章では、大船渡湾で湾水制御効果について物質循環モデルを用いて数値シミュレーションを行い、海水浄化に適した揚水量に関して検討した。

その結果、底層水の最適交換量は $1.5\text{m}^3/\text{s}$ 以上が理想である。また、揚水量を $1.5\text{m}^3/\text{s}$ 以上にした場合、上層部の暖かい水が降りてきて、高密度水塊の消滅時期が早くなる傾向がある。その結果、密度貫入が底層でも起き、突発的な DO の回復も見られた。したがって、負圧利用型海水交換装置の設置により、貧酸素水塊をダイレクトに排出する機能のほかに、底層の高密度の水塊密度を低下させる働きがあると考えられる。

第6章 結論および今後の展望

第6章はまとめである。

- (1) 大船渡湾において、成層期に湾外水は湾内の同一密度層を選択して進入する、密度成層による海水交換が発生していることが実測によって示された。
- (2) 衛星画像を用いた観測の結果、成層期に、三陸沖の流況変化による親潮の接岸を確認した。また、湾外の密度は親潮の影響によって変化したことを確認した。そのため、貫入深さが変化し、水質構造に影響を与えたことが確認された。
- (3) 年間を通した三陸沖の流況パターンを衛星によって把握した。その結果、成層後期においては、親潮の接岸が底層の貧酸素水塊の消滅に影響を与えていることが示された。ゆえに、親潮と津軽暖流の盛衰状況によっては、貧酸素水塊の消滅時期が前後することが考えられる。ゆえに、流況分布と定置水温観測を組み合わせることによって、貧酸素水塊消滅時期の予測が可能である。
- (4) 成層期において、中層においても植物プランクトンは存在していることが実測により確認された。このときに、密度貫入により急激に減少することが示された。また、湾外の栄養塩類濃度は流況によって変化することが示された。このため、場合によっては植物プランクトンが増殖する可能性もある。
- (5) 貧酸素水塊対策として、負圧利用型海水交換装置の設置を想定して、数値シミュレーションを行なった。その結果、海水交換率を上げると、DO が上昇することを確認した。また、揚水量を上げると水温の高い中層水が底層まで降りてくる。このため、湾内底層の密度が湾外水の密度と等しくなり、底層で密度貫入が発生し、DO の回復が発生することがわかった。ゆえに、負圧利用型海水交換装置により、底層の貧酸素水塊を排出する以外にも、湾内底層の水塊の密度を低下させる働きを持つと結論付けることができた。

論文審査の結果の要旨

静穏度の高い内湾は養殖漁業が行われたり、港湾・漁港としての利用が盛んであり、その水質は沿岸環境の面から重視されている。その水質構造は、日照等の通常の形成機構に加えて、湾に流れ込む河川からの栄養塩負荷、外海との海水交換が重要な役割を果たしている。本研究は大船渡湾を例として、現地での水質実測とそのモデル化を通じ、水質決定機構を調べるとともに、人為的な海水交換装置の機能評価を定量的に行ったものであり、全6章よりなっている。

第1章は序論であり、研究の背景を述べるとともに、既往の研究を調べ、本研究の位置付けを明らかにしている。

第2章では、湾外流況変動における密度(水温)変動が、内湾のクロロフィル a(Chl.a)の分布構造に与える影響に関して、現地観測および衛星データ (NOAA/AVHRR)からの流況観察とを対比させながら考察を行っている。その結果、外海水は内湾の等密度の深さに陥入し、Chl.aの分布に影響を与えていることを明らかにしている。これは有用な知見である。

第3章では、前章と同じく、年間を通じた湾内外水の水質観測および衛星データからの流況観察によって、貧酸素水塊の消滅機構を論じている。これにより津軽暖流と親潮の盛衰状況によって、貧酸素水塊の消滅時期が変動することを明らかにしている。これは重要な成果である。

第4章では、Chl.aの変動に海水交換が影響を与えていることを、海水交換を考慮に入れたChl.a生産モデルを用いて明らかにしている。これは新しい成果である。

第5章では、物質循環モデルにより、人為的な海水交換による貧酸素水塊消滅に関する検討を行っている。その結果、底層から湾外に揚水することによって湾内の密度構造が変化し、底層の海水交換が活発になり、貧酸素水塊の消滅に寄与していることを示している。さらに揚水量によってこの効果がどの程度になるかを定量的に示している。これは重要な成果である。

第6章は結論と今後の展望である。

以上要するに、本論文は内湾における水質構造を、通常の水質決定機構に湾外水との交換を加えて議論し、沿岸水域の水質環境評価法を示したものであり、沿岸環境のいくつかの問題の解決に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。