

過栄養内湾（洞海湾）における栄養塩濃度の減少に伴う 低次生産過程の変化に関する研究

(Studies on the changes in the marine production process due to the decreasing nutrient concentrations in the hypertrophic bay (Dokai Bay, Japan))

学位論文内容の要旨

閉鎖性水域における内部生産を基点とする低次生産過程の解明は、その水域における環境特性を明らかにするだけでなく、水域毎に異なる赤潮や貧酸素水塊等の富栄養化現象を理解するために必要不可欠である。富栄養化の進行した東京湾や大阪湾では栄養塩濃度と低次生産過程の関係を評価した例はあるが、栄養塩類が過剰に存在する過栄養化した水域からの報告はない。研究対象とした洞海湾の水質は、事業場排水の負荷量削減により2001年には環境基準Ⅳ類型(TN, 1.0 mg l⁻¹ ; TP, 0.09 mg l⁻¹) を達成するまでに栄養塩濃度は減少したが、いまだに赤潮や貧酸素水塊等の富栄養化現象が夏季には発生している。本研究では、物質循環過程における低次生産の重要性を明らかにした後、1990年代と2000年代で粒子状物質の生化学的特性の変化を調べ、その特性を比較検討することで栄養塩濃度の減少による生産環境の変化が低次生産過程に与えた影響について包括的に評価した。

本論文は以下の構成からなる。はじめに湾内における物質循環過程に及ぼす低次生産過程の影響を明らかにするために粒子状物質の生化学的特徴を調べた。次に、洞海湾における低次生産過程の季節的变化を明らかにするために、季節毎に粒子状物質の採取を行いその生化学的特徴から、鉛直輸送過程の変化について明らかにした。その結果、粒子状物質の現存量は植物プランクトンの増殖が活発な夏季に最大となることが確認できたため、夏季の懸濁粒子のC:N:P比の変化について1990年代（環境基準達成前;1995-1998年）と2000年代（環境基準達成後;2006-2009年）で検討し、栄養塩濃度の低下に伴う低次生産過程の応答を評価した。また、栄養塩濃度の低下が富栄養化現象に与える影響について、夏季のDO濃度の観測結果から考察した。さらに、洞海湾内の粒子状有機物と堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を調べることで、湾内における粒子状物質の起源や空間分布、陸域の影響の詳細な解明を行った。

湾内における粒子状物質の由来や物質循環過程は空間的に大きく異なり、湾口から湾中央にかけては低次生産過程が寄与しているが湾奥は陸域の影響を受けていることが示唆された。次に、低次生産過程の季節的变化を見ると、植物プランクトンを主な起源とする粒子状物質の鉛直フラックスは、季節毎に変化する植物プランクトン量と

密度成層の強弱との相互関係でフラックスは決まることが判った。また、有機態炭素を指標として鉛直フラックスの季節変化を調べたところ、1) 現存量は多いが成層期のためフラックスは小さい(夏季)、2) 現存量は多くないが循環期のためフラックスは大きい(春季・秋季)、3) 現存量が少ないため循環期だがフラックスも小さい(冬季) 以上3パターンが確認され、現存量の多い夏季の重要性が確認された。そこで、夏季の懸濁粒子のC:N:P比の変化について1990年代(環境基準達成前:1995-1998年)と2000年代(環境基準達成後:2006-2009年)で検討した。その結果、洞海湾の中央から奥は、いまだに植物プランクトン量が多く過栄養状態であることが判った。また、栄養塩濃度の低下によるDIN/DIPの変化にともないPON/PPも変化していることが確認された。さらに1990年代は、海水中のDIP濃度が高かったため懸濁粒子に無機態リンの吸着が生じていた可能性が示唆された。次に、夏季のDO濃度の経年変化を調べた結果、 3 mg L^{-1} 以下の貧酸素水塊の規模は環境基準達成後も縮小していないことが確認され、その要因として海底堆積物による影響が大きいことが判った。さらに湾内の粒子状物質の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を調べたところ、懸濁粒子の $\delta^{13}\text{C}$ 平均値は-20.1‰であることから、その起源は海洋植物プランクトン由来と判断された。懸濁粒子の $\delta^{15}\text{N}$ (平均)は0.2 ~ 18.0 ‰(9.4 ‰)と調査地点や年度によって大きく異なっており、その要因として陸域から負荷される工場排水等の影響だけでなく、湾奥部に多量に存在する植物プランクトンによる無機態窒素の同位体効果が影響している可能性が示唆された。

以上より、洞海湾では全窒素および全リンの環境基準の達成による栄養塩濃度の低下は確認されたが、粒子状物質の質や量についての大幅な変化は見られなかったため、低次生産を主体とする物質循環についても変化が無かったと判断される。このような状態は、栄養塩が植物プランクトンの増殖を低下させる濃度まで減少していないことが要因と考えられた。また、環境基準を達成したものの栄養塩濃度は他の内湾と比べて依然として高く、夏季には赤潮や貧酸素水塊の形成が確認されることから、いまだ洞海湾は栄養塩が過剰に存在する過栄養状態にあることが判った。しかし、植物プランクトンは湾奥部の陸域から負荷される窒素を主に利用していることから判断すると、さらなる窒素負荷量の削減により赤潮の発生を効果的に抑制できる可能性が示唆された。鬼塚ほか(2004)は生態系モデルを用いた計算結果から、環境基準達成のために実施された窒素負荷量40%削減では湾奥部の赤潮や貧酸素水塊の発生を抑制できないことを指摘している。さらに、湾奥部の赤潮や貧酸素水塊発生を抑制するには95%以上の窒素負荷量削減が必要だと述べている。現状の調査結果が生態系モデルの計算結果とよく一致することから、洞海湾の環境改善のためには負荷量削減により、湾奥部の環境基準点D6での環境基準Ⅳ類型(全窒素, 1.0 mg L^{-1} ; 全リン, 0.09 mg L^{-1})の達成を目指すとともに、現場水域で浄化を行う生物的修復法(堤ほか, 1998; 門谷ほか, 1998)や海底堆積物の覆砂・浚渫除去など複数の対策を組み合わせる必要があるだろう。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 門 谷 茂

副 査 教 授 岸 道 郎

准教授 工 藤 勲

助 教 上 野 洋 路

教 授 山 田 真知子(福岡女子大学国際文理学部)

学 位 論 文 題 名

過栄養内湾（洞海湾）における栄養塩濃度の減少に伴う 低次生産過程の変化に関する研究

(Studies on the changes in the marine production process due to the decreasing nutrient concentrations in the hypertrophic bay (Dokai Bay, Japan))

本邦で最も富栄養化した海域として知られている北九州市の洞海湾では、富栄養化対策として環境基準Ⅳ類型が1997年に適用され、全窒素および全リンの排出量削減指導が実施された。全窒素と全リンの排出量の削減にともなう栄養塩濃度の低下は、植物プランクトンの増殖に影響を及ぼすため、内部生産される粒子状物質の質や量の変化が予想される。そこで、本研究では環境基準達成前の1990年代と環境基準達成後の2000年代で粒子状物質の生化学的特性の変化を詳細に比較し、低次生産過程にどのような応答があったかを明らかにすることを試みている。

はじめに、夏季の湾内における物質循環過程に及ぼす低次生産過程の影響を明らかにするために粒子状物質の生化学的特徴を概観している。湾内における沈降粒子束は湾口より湾奥の方が大きく、その値は東京湾など他の富栄養海域より全般的に高いことを見いだした。また、粒子状物質の親生物元素組成比(C:N:P)を見ると、湾口から湾奥の沈降粒子(湾口=68:10:1, 湾奥=71:10:1)と懸濁粒子の平均値(57:12:1)は近似していた。湾奥で得られた沈降粒子は、C/N(11~21)が懸濁粒子のC/N(4.6)やレッドフィールド比(6.6)に比べ高いため、陸域の影響を受けている。また、沈降粒子の有機態炭素フラックスに占める植物プランクトン由来の有機態炭素フラックスや、フィーカルペレット態有機態炭素フラックスの割合を見積もっており、湾口に行くに従いその割合が大きくなることを明らかにしている。これらの結果から、湾内における粒子状物質の由来や物質循環過程は空間的に大きく異なり、湾口から湾奥にかけては低次生産過程が寄与しているが湾奥は陸域の影響を受けていると結論づけた。

次に、洞海湾における低次生産過程の季節的变化を明らかにするために、季節毎に粒子状物質の採取を行いその生化学的特徴を調べ、鉛直輸送過程の変化

について考察している。その結果、水柱中に存在する懸濁粒子の主要な起源は植物プランクトンと推定し、セディメントトラップに捕集された粒子状物質に占める懸濁粒子由来の割合が約 35%であることを明らかにした。有機態炭素を指標として水柱中の現存量と沈降除去量を比較検討して、以下の 3 パターンが存在することを明瞭に示した。(1) 夏季には現存量は多いが成層期のためフラックスは小さい。(2) 春季・秋季には現存量は多くないが循環期のためフラックスは大きい。(3) 一方、冬季は循環期だが、現存量が少ないためフラックスも小さい。また、植物プランクトンを主な起源とする粒子状物質の鉛直フラックスは、季節毎に変化する植物プランクトン量と密度成層の強弱との相互関係でその大きさが決まると結論づけている。

栄養塩濃度の低下は植物プランクトンの増殖に強い影響を及ぼすため、内部生産される粒子状物質の生化学的特性は変化する。洞海湾では全窒素・全リンの排出量削減により栄養塩濃度が低下した。そこで、植物プランクトンの増殖が活発な夏季の懸濁粒子の C:N:P 比の変化について 1990 年代（環境基準達成前：1995～1998 年）と 2000 年代（達成後：2006～2009 年）を比較検討している。その結果、洞海湾の中央から奥部は、いまだに過栄養状態であることを明らかにした。栄養塩濃度の低下による DIN/DIP の変化にともない PON/PP も変化していることを確認している。また 1990 年代は海水中の DIP 濃度が高かったため懸濁粒子に無機態リンの吸着が生じていた可能性を指摘している。2000 年代の DIP 濃度は 1990 年代より低下しており、特に湾口部における濃度低下は著しく、植物プランクトンの増殖に影響を及ぼす可能性についても言及している。

栄養塩濃度の大幅な減少が、湾内の貧酸素水塊の形成に及ぼす影響について、夏季の DO 濃度の観測結果から考察を試みている。その結果、 3 mg L^{-1} 以下の貧酸素水塊の規模は環境基準達成後も縮小していないことが確認され、その要因として海底堆積物中に蓄積した有機物による影響が大きいと考察している。

さらに、湾内における粒子状物質の起源や空間分布、陸域の影響をより明らかにするために、粒子状有機物と堆積物を採取して $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を調べている。その結果、懸濁粒子の $\delta^{13}\text{C}$ 平均値は -20.1‰ であることから、その起源は植物プランクトン由来としている。懸濁粒子の $\delta^{15}\text{N}$ は $0.2\sim 18.0\text{‰}$ と調査地点や年度によって大きく異なっており、その要因として陸域から負荷される工場排水等の影響だけでなく、湾奥部に多量に存在する植物プランクトンによる無機態窒素吸収時の同位体分別効果が影響している可能性を示唆している。また、懸濁粒子と堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の水平分布の傾向は一致しているため、各調査地点において表層の懸濁粒子が堆積物に対する主要な供給源であると考察している。

以上の通り、申請者は過去に例のない、洞海湾のように過大な栄養塩が存在した海域における栄養塩濃度が極度に低下した際の、物質循環系の応答についての詳細な研究を成し遂げている。本研究は、栄養塩濃度の減少と低次生産過程の間にどのような関係があったか解析を試み、重要な科学的知見を得ており、今後の富栄養化内湾域における物質循環過程に関する研究の発展に大きな貢献をすることが期待される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者の研究者としての姿勢や大学院博士課程における研鑽などもあわせ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。