

氏 名	かけひ 寛 茂 穂
学位(専攻分野)	博 士 (農 学)
学 位 記 番 号	論 農 博 第 2619 号
学位授与の日付	平 成 18 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	富栄養化した内湾における流動構造と栄養塩動態の季節変動

論文調査委員	(主 査) 教 授 藤 原 建 紀	教 授 中 原 紘 之	教 授 河 地 利 彦
--------	----------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

富栄養化した内湾では、海域の高 COD 化や、貧酸素水塊・赤潮の発生が問題となっており、これらの水質問題を改善することが急務となっている。富栄養化した内湾の水質の改善・予測・管理を行うためには、富栄養化物質である窒素・リンの挙動、収支および現存量や、これらの季節変化を明らかにすることが不可欠である。本研究は、貧酸素水塊が毎年夏季に発生し多大な漁業被害が起きている、富栄養化した内湾の一つである伊勢湾を対象海域として、栄養塩の季節変動機構について解析し、数値モデル化したものである。

以下に成果の概要を示す。

1. 栄養塩の生成・消滅（非保存的变化）をレッドフィールド比（RF 比）に従う成分（RF 比成分）とそれからの偏差成分（RF 比偏差成分）に分離し、それぞれの速度の季節変動を明らかにした。前者は光合成・分解、後者は脱窒・吸着・溶出等による変化と解釈される。海水中の有機物の主要な成分である植物プランクトン態有機物が分解される際には、RF 比に従った酸素の減少と栄養塩の生成が起こる。分解による酸素の減少速度を見積もるために、実測された酸素のデータをもとに酸素消費速度を算出した。酸素消費速度と RF 比から、化学量論的に RF 比成分を見積もった。栄養塩の非保存的变化のうち、RF 比成分からの偏差を RF 比偏差成分とした。湾中央部の海底直上では、主として分解（RF 比成分）で栄養塩が生成されており、貧酸素水塊の形成が栄養塩の蓄積に重要であることが明らかになった。また、RF 比偏差成分も寄与しており、その季節変動は、窒素とリンで異なった。

2. 実測データにもとづいた酸素消費速度、RF 比成分および RF 比偏差成分による栄養塩の変化速度を組み込んだ 3 次元の流動・低次生態系モデルを開発した。これは、栄養塩が RF 比成分・RF 比偏差成分のみならず、物理過程（移流・拡散）によっても変化するためである。さらに、栄養塩の蓄積に重要な貧酸素水塊の形成には、混合強度の場所的な違いに由来する海峡水の進入深度の季節変化が寄与しているからでもある。モデルは、海面熱フラックス、河川流入および開境界条件として外海域の季節変動を与えて駆動し、酸素と栄養塩の実測データをもとに調整した。本モデルは、酸素と栄養塩の季節変動を高い精度で再現した。

3. 実測データをよく再現するモデルを用いて、窒素・リンの形態別の現存量と収支の季節変動を定量化した。栄養塩の変動には、物理過程（保存的变化）よりも生物・化学過程（非保存的变化）の寄与が大きかった。特に RF 比成分による栄養塩の増減が卓越した。上層では、光合成によって栄養塩が消費され、下層では分解によって栄養塩が生成されていた。光合成は、夏季には亜表層で、秋季には海面付近で極大となった。亜表層クロロフィル極大の形成には、エスチュアリー循環流による栄養塩の湧昇が重要であり、秋季ブルームは、夏季に下層に蓄積した栄養塩が冷却に伴う鉛直混合で上層にもたらされることにより発生していた。年平均では、上層での光合成に用いられる栄養塩の 50% が下層からの移流・拡散によって供給されていた。上層の栄養塩の多くが光合成によって有機物に転換されるため、エスチュアリー循環流によって湾外に流出する栄養塩は少ない。また、光合成で生成された有機物は、一部は湾外に流出するものの、多くが下層に移動し、その多くが下層水中あるいは海底で分解される。分解の過程で酸素が消費されて栄養塩が生成するため、下層には貧酸素水塊が形

成され、栄養塩が高濃度に蓄積する。この栄養塩は再び上層に供給され光合成によって有機化され、再度下層に移動し分解される。海底では、有機物が堆積し、その速度は海底での分解速度を上回っていた。窒素は通年で脱窒され、その量は夏季に大きく、約80 tN d⁻¹であり、海底での分解による窒素生成量に匹敵していた。一方、リンは夏季に溶出し、秋～春季に吸着されていた。

4. 湾内では光合成と分解によって窒素・リンが形態変化しながら上層と下層を循環するとともに一部が堆積してゆく。この機構によって湾内では有機物の生成が維持されて高 COD 状態が持続するとともに、窒素・リンの湾内の滞留時間が長くなるため、富栄養化状態が持続する。また、海底に堆積する有機物量は海底での分解量を上回る。覆土によって海底の酸素消費を抑制することは一般的に考えられているが、新たに堆積した有機物が分解されるため、貧酸素水塊の形成を抑制する効果は長期的には維持されない。通年では RF 比偏差成分である脱窒や吸着によって窒素やリンは除去され、富栄養化が緩和されている。ただし、夏季には、溶出したリンが分解で生成したリンに加わるため、夏季の下層でのリンの蓄積に拍車がかけられている。

以上のように、栄養塩の季節変動機構が明らかとなり、これに関わるプロセスの大きさが定量化された。これにより、内湾が高 COD 化および富栄養化する機構が解明された。

論文審査の結果の要旨

富栄養化した内湾では、高 COD 化や、貧酸素化・赤潮の発生などの水質問題が報告されており、これら水質問題の改善が急務となっている。内湾海域の水質の改善や管理を行う上では、富栄養化の原因物質である栄養塩の挙動を明らかにすることが不可欠である。本論文では、富栄養化した内湾である伊勢湾を対象にして、実測データに基づいた3次元流動・低次生態系モデルを開発し、栄養塩の季節変動機構を解明した。評価すべき点は以下の通りである。

- (1) 実測データに基づいて有機物の分解に伴う酸素消費量、栄養塩生成量、および脱窒・溶出・吸着などの底泥との交換による栄養塩変化量を定量化した。栄養塩の生成・消滅（非保存的变化）をレッドフィールド比（RF 比）に従う成分（RF 比成分）とそれからの偏差成分（RF 比偏差成分）に分離し、それぞれの速度の季節変動を明らかにした。湾内底層では、分解（RF 比成分）による栄養塩の生成のみならず、RF 比偏差成分によっても栄養塩が変化しており、窒素は脱窒により水中から除去され、リンは夏季には溶出し、秋季～春季には吸着されていることを示した。
- (2) 実測データにもとづいた3次元の流動・低次生態系モデルを開発した。モデルには、実測データに基づいて、混合強度の場所的な違いに由来する海峡水の進入深度の季節変化、および酸素消費速度、RF 比成分および RF 比偏差成分による栄養塩の変化速度が組み込まれ、実測データに基づいて調整された。これにより、本モデルは酸素と栄養塩の季節変動を高い精度で再現した。
- (3) 実測データをよく再現するモデルを用いて、窒素・リンの形態別の現存量と収支の季節変動を定量化した。栄養塩の物理過程（移流・拡散）および生物・化学過程（RF 比成分・RF 比偏差成分）による変化をプロセスごとに定量化し、栄養塩の季節変動には RF 比成分の寄与が大きいことを示した。分解によって下層に蓄積された栄養塩は、移流・拡散によって上層へ輸送され、光合成によって有機化されたのちに再び沈降して分解されるため、湾外への流出は少ない。また、底泥では脱窒による窒素の除去や溶出・吸着によるリンの変化量が、底泥における RF 比成分による栄養塩変化量に匹敵することを明らかにした。

以上のように本論文は、閉鎖性内湾における栄養塩濃度の季節変動の実態およびその変動機構を明らかにし、またこれに基づいて現地での栄養塩濃度の季節変動を高い精度で再現する3次元の流動・低次生態系モデルを開発したものである。これにより閉鎖性内湾における窒素・リンの保存的および非保存的な変化速度およびそれらの収支を定量化し、内湾における物質循環・一次生産機構を解明したものであり、海洋環境学、海洋物理学、海洋化学、水産海洋学に寄与するところが多い。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成18年9月19日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。