

学位論文題名

Study on the Marine Nitrogen Cycle in the Western and Central Equatorial Pacific and the Sea of Okhotsk using the Nitrogen Isotopic Ratio

(窒素同位体比を用いた西部・中央部赤道太平洋と
オホーツク海における窒素循環の研究)

学位論文内容の要旨

窒素は海洋生物に必要な不可欠な栄養塩であるため、海洋生物生産メカニズムについて議論する上で窒素循環の理解は極めて重要であると考えられる。海洋において窒素は、生物地球化学的な内部の循環とこの循環への外部からの窒素の流入出(陸起源窒素の供給や窒素固定、脱窒、水平移流)によってその分布が規定されている。これまで生物地球化学的な内部の循環に関する研究はたくさん行われてきたが、外部との窒素の流入出に関する研究は海水循環を考慮する必要があることと外部との窒素の流入出が局所的に起こるためにまだ十分明らかになっていない。しかし、海域スケールの窒素循環の理解には、生物地球化学的な内部の循環だけではなくこの循環への外部からの窒素の流入出も考慮する必要があると考えられる。本論文では、この外部との窒素の流入出も考慮するためにそのトレーサーである窒素同位体比と $\delta^{15}\text{N}$ を用いて西部・中央部赤道太平洋とオホーツク海の窒素循環メカニズムについて議論した。また、生物地球化学的な内部の循環とこの循環への外部からの窒素の流入出の両方を考慮した包括的かつ定量的な考察を目的として、赤道海域では窒素同位体を含む窒素収支モデルを構築し、オホーツク海では窒素同位体を含む海洋生態系モデルを構築した。

中央部赤道太平洋の硝酸の窒素同位体比は、通常の海域で見られる表層へ向かって高くなる分布を示した。これは植物プランクトンが同位体分別を起こしながら ^{14}N からなる軽い硝酸を選択的に取り込むためである。このような海域では硝酸の窒素同位体比とその濃度の対数の関係は直線関係を示すはずである。しかし中央部赤道太平洋ではサイトごとに異なる東西方向に規則正しく並行にずれた直線関係を示した。このような分布はこれまで報告された例はなく、この海域特有の分布であると考えられる。この特徴的な分布について考察するため、窒素同位体を含む窒素収支モデルを構築してこの海域の硝酸供給ルートについて考察した。その結果、「表層水への硝酸供給ルートが通常の海域でみられる亜表層からの鉛直方向の供給よりも東赤道海流による東部赤道太平洋からの水平方向の供給の方が主である」ことが明らかになった。一方、西部赤道太平洋の”fresh pool”と呼ばれる塩分の低い水塊中の硝酸の窒素同位体比は表層にもかかわらず低い値を示した。これは低い窒素同位体比をもつ陸起源窒素の付加を意味し、この結果から「fresh poolの硝酸は陸や窒素固定を由来とした窒素が起源である」ことが明らかになった。このfresh poolが表層を覆っている海域の沈降粒子の窒素同位体比は硝酸の窒素同位体比と同じく低い窒素同位体比を示し、その季節変化はTRITONブイによって観測された塩分の変動と非常によく一致した。こ

のことから「西部赤道太平洋の沈降粒子の窒素同位体比は fresh pool の移動に伴う硝酸の起源の変化をトレースしていた」ことが明らかになった。

オホーツク海の硝酸の窒素同位体比も、植物プランクトンによる硝酸同化時の同位体分別にともない表層へ向かって高くなる分布を示した。この分別係数は、北太平洋の観測点の係数やこれまでに報告された係数よりもかなり小さい値を示した。分別係数が小さい原因は低い窒素同位体比をもつ陸起源窒素の付加であると考えられ、この結果から「オホーツク海では大気やアムール川から陸起源窒素が供給されている」ことが明らかになった。一方、非常に古い海水である Deryugin 海盆直上の底層水では硝酸濃度の減少と窒素同位体比の上昇が見られた。このことから「Deryugin 海盆直上の底層水では脱窒が起こっている」ことが明らかになった。また、 N^* の分布も調べることで硝酸の窒素同位体比からはほとんど同位体分別がおこらないため判別できない「堆積物中の脱窒が北西部大陸棚の海底で起こっている」ことも明らかになった。

最後に、赤道域で構築した窒素収支モデルよりも生物地球化学的な内部の循環をより正確に扱った窒素同位体を含む海洋生態系モデルを今回初めて構築した。本論文では、窒素同位体を含む生態系モデルを用いた研究の第一段階として、生物地球化学的な循環のみでおおよそ表現可能なオホーツク海サハリン東岸沖の表層へ適用し、オホーツク海で得られた沈降粒子の窒素同位体比の季節変化について考察した。その結果、モデルは沈降粒子の窒素同位体比の季節変化を再現し、「オホーツク海の沈降粒子の窒素同位体比が冬に高い値を示す要因は、これまでの研究で示唆されてきた沈降粒子中の動物プランクトンの占める割合が増加するためだけではなく、今回新たに硝化による窒素同位体比の上昇も主な要因の1つである」ことを示唆できた。

本論文では窒素同位体比と N^* を用いることで、陸起源窒素の供給や窒素固定、脱窒、水平移流などによる外部からの窒素の流入出をトレースすることができた。また、窒素同位体を含む窒素収支モデルを用いることで、観測で得られた窒素同位体比を生物地球化学的な内部の循環とこの循環への水平移流による窒素の流入出の両方を考慮して考察を行うことができた。さらに、窒素同位体を含む生態系モデルを用いることで、生物地球化学的な内部の循環に関して定量的かつ詳細な考察を行うことができた。これらの結果から、本論文で構築した窒素同位体を含む生態系モデルに陸起源窒素の供給や窒素固定、脱窒などの過程を今後新たに導入することで生物地球化学的な内部の循環とこの循環への外部からの窒素の流入出の両方を考慮した考察がさまざまな海域で可能になることが示唆された。

学位論文審査の要旨

主査 助教授 中塚 武
副査 教授 南川 雅男
副査 教授 吉川 久幸
副査 助教授 山中 康裕
副査 プログラムディレクター

和田 英太郎 (地球環境フロンティア
研究センター)

学位論文題名

Study on the Marine Nitrogen Cycle in the Western and Central Equatorial Pacific and the Sea of Okhotsk using the Nitrogen Isotopic Ratio

(窒素同位体比を用いた西部・中央部赤道太平洋と
オホーツク海における窒素循環の研究)

海洋において窒素は、全ての生物の成長に不可欠な栄養塩であり、その循環を理解することは、海洋の生物生産力の変動や地球規模での炭素循環など、地球環境の将来を予測する上で極めて重要である。海洋における窒素循環は、次の2つの要素、即ち、内部循環と外部循環からなる。内部循環とは、植物プランクトンによる硝酸塩やアンモニウム塩の取り込みと有機化、動物プランクトンや魚などによる有機態窒素の食物連鎖を通じた変換、バクテリアによる有機態窒素の分解、アンモニウム塩の硝化など、海洋生態系の内部で回っている窒素の循環である。一方で海洋には、通常生物が利用できない莫大な量の窒素が窒素ガスの形で溶け込んでおり、藍藻などの一部の生物が窒素固定という方法で、これを窒素の内部循環に組み込む役割を果たしており、逆に、生物に利用可能な窒素の一部は、脱窒（硝酸呼吸）という方法で、内部循環から窒素ガスの形で外部に排除されていく。また海洋生物に利用される窒素の一部は、大気や河川を介して外部、即ち陸面から供給されたり、大規模な海流によって、隣接する他海域から運び込まれたりしている。

これまで海洋学では、窒素の内部循環について数多くの研究がなされてきたが、その外部とのやり取り、即ち陸起源窒素の流入や窒素固定、脱窒、海流による窒素の他海域との出入りなどについては、多くの研究がなされてこなかった。その原因は海洋における窒素の外部とのやり取りが、空間的に極めて不均質に起こるため、培養実験などのミクروسケールの生

物地球化学的手法では解明できない現象だったからである。筆者は、この海洋における窒素の外部循環の問題に、硝酸塩等の窒素同位体比と N^* という新しい化学トレーサーを用いて、正面から取り組んでいることに、まず大きな意義がある。

海洋の主要栄養塩である硝酸塩の窒素同位体比は、窒素の外部とのやり取りで極めて大きく変動するため、その同位体比の広域分布から、海域スケールでの窒素の外部循環の情報を抽出することが可能である。その値は、しかし窒素の内部循環でも変動するため、これまで十分な解析が行われてこなかったが、本論文では硝酸塩の濃度分布の情報を、適切な海洋循環モデルを用いて同位体比分布の解析に組み込むことで、硝酸塩の窒素同位体比から窒素の外部循環の情報のみを抽出することに成功している。一方、海洋における硝酸塩とリン酸塩の濃度差に着目したトレーサーである N^* は、窒素の内部循環では変化せず、もっぱら外部循環の影響を受けて変動するため、本論文ではこの N^* を窒素同位体比と組み合わせて、さまざまな解析を効果的に行っている。

本論文では、まず西部・中央部赤道太平洋において、表層水中の硝酸塩の窒素同位体比の東西分布を世界で初めて詳細に明らかにし、その分布が、東赤道太平洋域で湧昇した硝酸塩の大規模な西方輸送でもたらされていることや、東南アジア域からの陸起源窒素の流入や窒素固定などの影響を受けていること、また、硝酸塩の窒素同位体比に記録された窒素の外部循環の時空間変動の情報が、沈降粒子の形で堆積物に輸送され、古海洋学的に解析可能であることなどを、海洋循環モデルの解析およびセジメントトラップ実験などを通じて、明らかにしている。更に、オホーツク海では、硝酸塩の窒素同位体比と N^* の分布の解析から、北西部大陸棚の堆積物中で活発な脱窒が生じており、その情報が低 N^* 水という形でオホーツク海の中層を通過して北太平洋中層水まで広く及んでいること、オホーツク海表層には大気エアロゾルおよびアムール川からもたらされた陸起源窒素が広く分布していること、オホーツク海中央部の深海盆では水柱中での脱窒が起きていること等々を、初めて明らかにした。最後に、オホーツク海西部において、表層生態系モデルに窒素同位体比を詳細に組み込み、セジメントトラップで観測された沈降粒子の窒素同位体比の季節変動を再現して、窒素同位体比の測定から植物プランクトンの栄養塩の選択性が解明できることや、冬季における表層水中での硝化過程の重要性などを、初めて示唆した。

筆者は、一連の研究の中で、海洋での現場観測、実験室での窒素同位体比の分析、海洋循環・生態系のモデリング、という異質な 3 種類の仕事を一人でこなし、それらを統合することに成功した世界で初めての研究者であり、本申請論文は、窒素同位体比を海洋循環・生態系モデルに組み込んで、実際に観測・分析される窒素同位体比のデータを多角的に解析していくという新しい研究分野を開いたという意味で意義深く、今後の大きな発展が期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、これまでの研究論文の発表状況なども合わせて、申請者が、博士（地球環境科学）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。