

# 各種安定同位体を用いた流域窒素負荷の診断

Use of multiple stable isotopes in diagnosing the nitrogen loading in watersheds

永田 俊\*

Toshi NAGATA\*

東京大学大気海洋研究所

Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

## 摘 要

反応性窒素の生成量の増加に伴い、水域(湖沼、河川、沿岸海洋)に対する窒素負荷が全球規模で増大しつつある。流域スケールにおける総合的な窒素管理を効果的・効率的に実施するためには、窒素負荷の経路のきめ細かな査定と、流域内部での窒素循環に関する詳細な理解が不可欠である。筆者らは、流域における複雑な窒素循環を査定するために、各種安定同位体比を用いた新たな環境評価システムを構築することを目指して研究を進めている。琵琶湖集水域や熱帯域における調査の結果、硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体比から、河川に負荷される窒素の起源(大気由来か排水由来か)や、河川内部での窒素循環過程(脱窒が活発に起きているかどうか)に関する有益な情報が得られることが明らかになった。また、河畔植物を、安定同位体比の「記録者」として用いることで、新たな河川環境監視手法が開拓できる可能性が示された。今後、安定同位体比の変動モデルの改良と、観測・実験データに基づく検証を進めることで、安定同位体法を「定性的な診断」から「定量的な評価」の段階へと発展させていく必要がある。

キーワード：安定同位体、河川、河畔植物、硝酸イオン、窒素負荷、流域

Key words : stable isotope, river, riparian plant, nitrate, nitrogen loading, watershed

## 1. はじめに

食糧生産(施肥・窒素固定作物の栽培)とエネルギー消費(化石燃料の燃焼)の拡大に伴う、大量の反応性窒素の環境中への排出は、大気・水圏における種々の化学過程の擾乱や、陸域および水域の生態系への影響を通して、地球規模における深刻な環境問題を引き起こしている<sup>1)</sup>。一方、個々の流域をみると、窒素負荷の規模や経路は、それぞれの流域のもつ気候、水文、地質、植生、土地利用、産業などの諸特性の違いに応じて大きく異なり、その波及効果の現れ方やメカニズムは、きわめて複雑な様相を呈している。したがって、窒素汚染の諸問題に適切に対処するためには、他の多くの環境問題の場合と同様に、グローバルな状況を踏まえつつ、ローカルな(流域スケールでの)対策を講じることが必要である。関連する問題は階層的かつ多岐に及ぶが、効果的な窒素負荷の制御を、総合的な流域管理の枠組みの中で実施するためには、きめこまやかな負荷状況の査定と、窒素循環過程の詳細な把握を、個々の流域の特性をふまえて実施することが、基本的に重要

な課題になる。このような要請に応えるために、従来から、各種水質指標や生物指標を用いた流域環境評価が実施されてきたが、変化する状況への対応や、複雑な流域システムの把握といった面において、手詰まりになってきているというのが現状である。以上の背景をふまえ、筆者らは、流域生態系の構成要素の各種安定同位体比を指標とする、新しい流域環境評価システムの構築を目指した研究を進めている<sup>2)</sup>。本稿では、窒素負荷のグローバルな状況を俯瞰し、続いて、流域スケールにおける窒素管理の方法論とその問題点を概括したのち、新たな流域診断ツールとしての、各種安定同位体比の利用に関する研究の一端を紹介したい。

## 2. 窒素負荷のグローバルな状況

Galloway ら<sup>3)</sup>によれば、人為的な反応性窒素(硝酸、アンモニア、NO<sub>x</sub> など生物的ないしは光化学的に反応性の高い窒素)の世界における排出量は、1860年には年間15 Tg(窒素換算、1 Tg=10<sup>12</sup>g)であったのが、1990年代前半には、その約10倍の年間

受付：2009年12月20日、受理：2010年3月5日

\* 〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5, e-mail: nagata@aori.u-tokyo.ac.jp

表1 人為的な反応性窒素の負荷が引き起こす悪影響(窒素カスケード)の例(Gallowayら<sup>1)</sup>をもとに作成).

窒素を受容する圏	過程	悪影響
大気圏	対流圏におけるオゾンとエアロゾルの生成	呼吸器疾患、癌、心臓疾患 森林衰退、農作物の減収
	一酸化二窒素の発生による成層圏オゾン層の破壊と温室効果	紫外線照射の増大、気候変動
陸圏	森林と草原の生産性増大	生物多様性の喪失、森林による窒素保持能力の低下(窒素飽和)
水圏	湖沼や河川の酸性化	群集構造の変化、生物多様性の喪失
	湖沼、河川、沿岸海洋の富栄養化	低酸素・無酸素水塊の形成、有害藻類の大発生、生物多様性の喪失
	地下水や河川水の硝酸イオン濃度の上昇	メトヘモグロビン症

156 Tg に達したという。内訳は、ハーバー・ボッシュ法による合成窒素肥料の生産(年間 100 Tg)が全体の約 3 分の 2 を占め、残りが、窒素固定作物の栽培(年間 31.5 Tg)と、化石燃料の燃焼(年間 14.5 Tg)である。さらに、この反応性窒素の排出量は、2050 年には、年間 267 Tg にまで増大し、自然状態における生物的窒素固定と雷によって生成される反応性窒素の合計(年間 224 Tg)を大きく上回ると予測されている。

農耕地へ施肥された反応性窒素も、化石燃料の燃焼に伴い大気中に排出された反応性窒素も、直接的あるいは複雑な循環経路を経たのちに、そのかなりの部分が最終的には水域へと流入することから、全球規模において、水域生態系(河川、湖沼、海洋)は、高まりつつある「窒素負荷圧」のもとに曝されている状況にあるといえよう。地域別にみると、アジア諸国は、大気から陸への反応性窒素の沈着量や、河川から沿岸海洋への窒素排出量等からみて、水域生態系に対する窒素負荷量が世界で最も高い地域のひとつである。

ところで、窒素は生物の最も基本的な構成元素のひとつであり、たんぱく質、核酸、クロロフィルといった高分子の生合成のうえで不可欠な「原材料」である。陸域においても水域においても、生態系における一次生産は、しばしば窒素の供給不足(材料不足)による制限を受けている。したがって、上述のような人間活動の増大とともに、生態系に対する窒素の供給量が増大すると、生産性、群集組成、物質循環、生物多様性といった生態系の諸特性は大きく変化する。人為的な窒素の負荷は、生物生産の増大を通して生態系サービスの向上(たとえば水産資源の増産)に貢献する場合もあるため、必ずしも窒素負荷=悪影響であるとは限らない。しかし、負荷の程度があるレベルを超え、「窒素過多」の状態になると、人間にとって憂慮すべき事態(悪影響)が様々な側面において現われる。Gallowayら<sup>1)</sup>は、窒素が複雑な形態変化を繰り返しながら、激しい環境悪化を波及的に引き起こす様子を「窒素カスケード」と名付け、窒素負荷がいまや深刻な地球環境問

題であるということ強調している(表1)。水域生態系の富栄養化は、このような、人為的な窒素負荷が引き起こす悪影響の一例であり、その帰結として、有害藻類の大発生や、低酸素・無酸素水塊(デッドゾーン)の大規模な出現といった深刻な事態が出来るのである。

### 3. 流域スケールでの窒素管理

水域生態系の健全性や、良好な水質を維持するためには、流域スケールにおいて、窒素負荷のレベルを適正に管理することが求められる。そのためには、流域への窒素負荷量を精確に評価するとともに、発生源や流達経路を特定し、また、脱窒による反応性窒素の除去など、窒素の内部循環過程を十分に理解する必要がある。このような観点から、流域スケールでの窒素収支を求める試みが、これまでに多くなされており、その結果をもとに、湖沼や河川の汚濁・富栄養化モデルの構築が進められてきた。これらのデータやモデルは、流域環境管理のうえで有効に活用されているものの、多くの場合、面源(農地、市街地など)や大気に由来する窒素負荷量の推定や、窒素の流達経路の特定といった面において、大きな不確実性が残されているというのが現状である。特に、原単位の精度向上や、降雨イベント時の負荷量の精確な把握に関しては、克服すべき問題が多い。また、我が国を含む、アジア諸国の流域では、一般に、生態系の内部での窒素循環過程に関する知見が乏しく、土壌や河川を通過する間に起こる窒素代謝(同化、硝化、脱窒)を組み込んだ窒素の流達過程のモデル化はまだ十分になされていない。これについては、トレーサー添加法による窒素代謝の解析など、実験的手法を用いた研究<sup>4)</sup>の今後の進展が期待される。

### 4. 硝酸イオンの安定同位体比を用いた窒素負荷の診断

流域における窒素負荷の状況を診断するうえで、

安定同位体は有効なツールになる<sup>2)</sup>。ここでは、硝酸イオンの窒素・酸素同位体比を中心に、流域窒素診断における安定同位体アプローチの適用例を紹介する。

硝酸イオンは、河川や湖沼における窒素の主要な存在形態であり、その挙動に関わるデータは、流域環境評価の様々な局面において有益な情報を与えてくれる。化学式から明らかなように、硝酸イオン( $\text{NO}_3^-$ )は、窒素原子と酸素原子から構成されており、窒素安定同位体比、酸素安定同位体比という2種類の安定同位体的な特徴(signature)を有する。なお、環境試料の安定同位体比は、標準物質の安定同位体比に対する千分率(単位は‰)で表し、窒素の場合は $\delta^{15}\text{N}$ 、酸素の場合は $\delta^{18}\text{O}$ というように表記する(デルタ表記法)。標準物質としては、窒素については大気窒素ガス、酸素については標準海水を用いる。

図1にはKendallら<sup>5)</sup>がまとめた、硝酸イオンの $\delta^{15}\text{N}-\delta^{18}\text{O}$ ダイアグラムを示す。このダイアグラムからわかるように、硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体比には、硝酸イオンの起源や反応履歴を示す情報が「刻印」されている。ここでは、重要なポイントとして、以下の3点を指摘する。

- ① 下水や畜産排水の処理場に由来する硝酸イオンは、窒素の安定同位体比が高い( $\delta^{15}\text{N} = +10 \sim +20\text{‰}$ )。処理場では、アンモニアの揮発や脱窒に伴って、軽い窒素( $^{14}\text{N}$ )が、選択的に大気中に放出されていく一方で、処理槽内に重い窒素( $^{15}\text{N}$ )が「濃縮」する。その結果、 $\delta^{15}\text{N}$ 値の高い硝酸イオンが水系に排出されるのである。
- ② 大気に由来する硝酸イオンは、酸素の安定同位体比が高い( $\delta^{18}\text{O} = +60 \sim +90\text{‰}$ )という特徴をもつ。原因は、 $\text{NO}_x$ とオゾン( $\text{O}_3$ )の間の酸素交換反応にある。大気中において、 $\text{O}_3$ は非常に高い $\delta^{18}\text{O}$ 値(90~122‰)を示すため、この同位体シグナルが、最終的に硝酸イオンの $\delta^{18}\text{O}$ にまで「伝わる」のである。
- ③ 水域生態系における主要な硝酸イオンの代謝過程、すなわち、取り込み、同化、脱窒といった様々な生化学反応に伴い、同位体分別が起こる。このうち、脱窒においては、窒素と酸素の両方について、しばしば大きな同位体分別が伴うため、ある水系の中で、脱窒が活発に進行している様子が、 $\delta^{15}\text{N}-\delta^{18}\text{O}$ ダイアグラム上で直線的に並んだプロットとして識別される場合がある。図1のダイアグラムでは、このことが、矢印で表現されている。

## 5. 硝酸イオンの安定同位体比の流下変化：琵琶湖流入河川の事例

河川における硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体

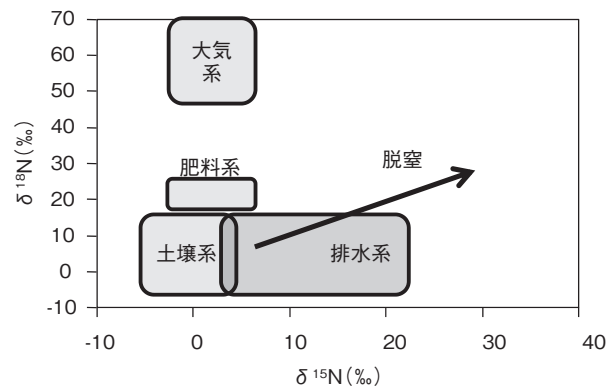


図1 起源による硝酸イオンの安定同位体比の違い、および脱窒による窒素・酸素安定同位体比の上昇(→)を表すダイアグラム(Kendallら<sup>5)</sup>を一部改変)。

比の流下変化のパターンをみてみよう。図2には琵琶湖に流入する主要河川のひとつである野洲川と安曇川の最上流部から河口(琵琶湖への流入地点)までの硝酸イオンの濃度と安定同位体比の流下変化を示す<sup>6),7)</sup>。野洲川では、硝酸イオンの濃度は、上流から下流にむけて上昇傾向を示すが、これとともに、 $\delta^{15}\text{N}$ も著しく上昇している。これは、野洲川の中・下流域における窒素の負荷が主に排水系(農業排水を含む)であることを示している。これに対して、安曇川の流程では、濃度の上昇も野洲川ほどの傾向はみられなかった。これは、安曇川では、中・下流に集中した農耕地や住宅地がないため、 $\delta^{15}\text{N}$ の高い硝酸イオンが流入しないためであると推察できる。

$\delta^{18}\text{O}$ は、野洲川でも安曇川でも最上流部分で高く、中流域で急激に低下する傾向がみられた。このことから、上流域では、降水由来の硝酸イオンが直接、すなわち生物に利用されないまま河川に隣接する斜面の表面水として供給されている可能性が考えられた。中流域では、河川そのものの規模が増大する過程でこの影響が次第に薄れていく、すなわち、野洲川では流入する人為的な $\text{NO}_3^-$ 、安曇川では河川内や近傍での有機物の分解・無機化(硝化)によって供給される $\text{NO}_3^-$ に移り変わっていくものと推察された。

なお、野洲川の40km地点で大きく $\text{NO}_3^-$ 濃度も $\delta^{15}\text{N}$ も減少し、また $\delta^{18}\text{O}$ が増加しているのは、支流ないしは伏流水の流入の影響であると推察できる。

図3には、野洲川の上流から中流域において、空間的により高密度な分布調査を行った結果を示す。調査日は異なるが、図2で示した同位体分布と同様に、上流域から中流域にむけて $\delta^{15}\text{N}$ が上昇し、 $\delta^{18}\text{O}$ が低下するという傾向が明らかにみられる。このように、調査の空間解像度を高くすることで、小河川や用水路を含めた、複雑な流域における窒素の負荷状況をきめ細かく診断できる。

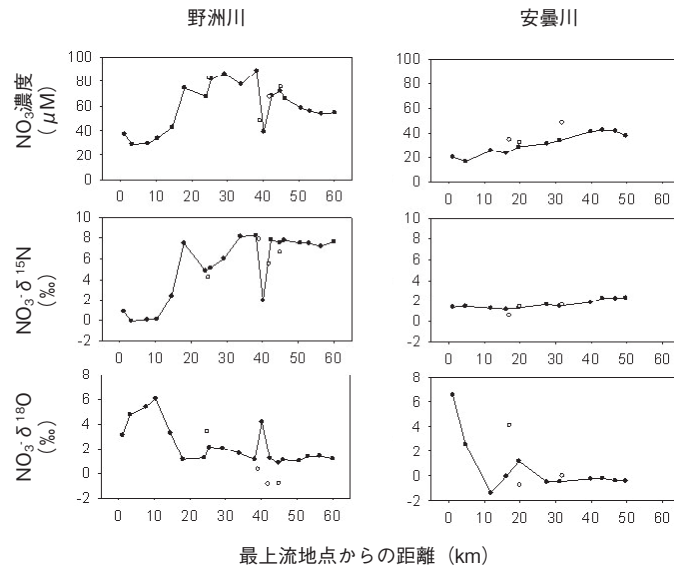


図2 野洲川(2004年5月)および安曇川(2004年9月)の全流域における硝酸イオン濃度と窒素・酸素安定同位体比の流下変化(Ohteら<sup>7)</sup>を一部改変). 白抜き丸印は支流を表す.

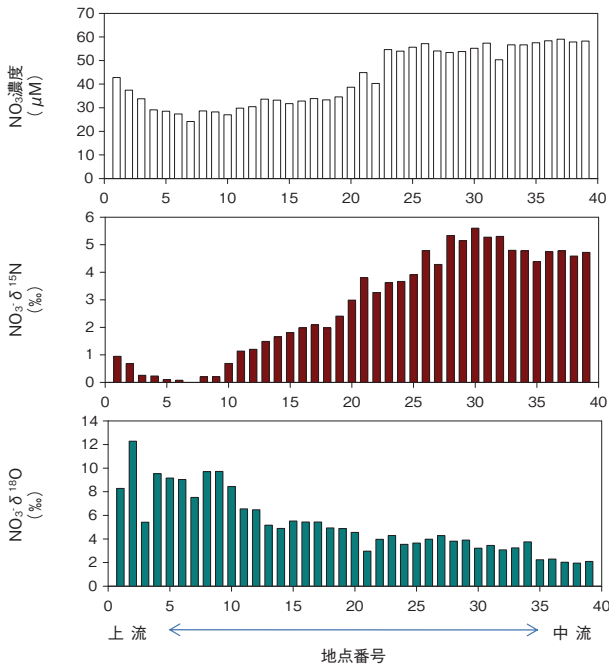


図3 野洲川の最上流から中流にかけての39地点における硝酸イオン濃度と窒素・酸素安定同位体比の流下変化(永田ら, 未発表). 調査は2006年5月に実施された.

## 6. 硝酸イオンの安定同位体比の流下変化：クラ川(タイ国)の事例

琵琶湖流入河川の例では、硝酸イオンの安定同位体比が、窒素の起源を示す指標として有効であることを指摘した。しかし、河川によっては、安定同位体比の変動が、河川内部における活発な窒素循環の影響を受ける場合がある。図4には熱帯域(タイ国)の河川(クラ川)における硝酸イオンの濃度と窒素・酸素安定同位体比の流下変化のデータを示す<sup>8)</sup>。こ

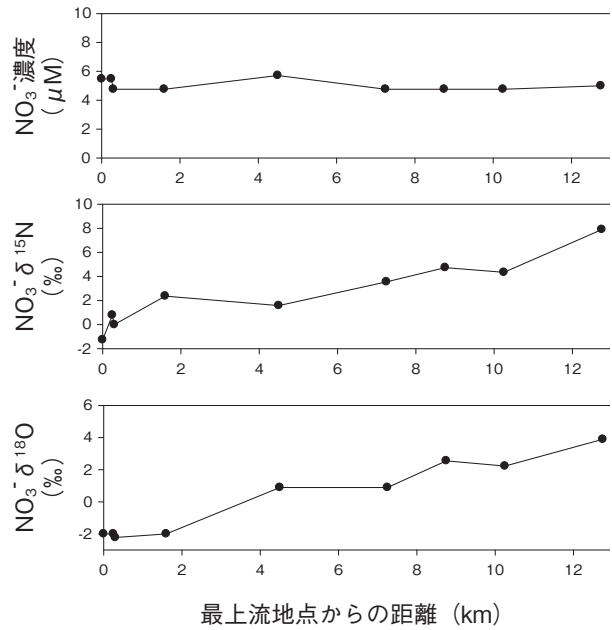


図4 クラ川(タイ国)の淡水区間における硝酸イオン濃度と窒素・酸素安定同位体比の流下変化(Miyajimaら<sup>8)</sup>のデータをもとに作図).

の河川においては、前節において安曇川の例でみられたように、硝酸イオンの濃度がほとんど変化しない。しかし、硝酸イオンの同位体比の変動をみると、 $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{18}\text{O}$ のいずれもが、流下とともに顕著に増大しているのがわかる。外部からの負荷と内部循環の効果を考慮し、河川水中の硝酸イオン安定同位体比の変動を説明するモデルを構築し、対象区間で得られたデータに関してあてはめを行った結果、観測された同位体比の変動は、流下軸に沿っての脱窒に伴う同位体効果(4節参照)によって最もよく説明されることが明らかになった。つまり、硝酸イオンの

同位体比は、河川へ負荷される窒素の起源だけでなく、河川内部での窒素循環過程についての情報も与えてくれるのである。

## 7. 河畔植物を利用したバイオモニタリングと過去環境の復元

排水系窒素の指標である「高い $\delta^{15}\text{N}$ 」というシグナルは、河畔植物の窒素安定同位体比に反映するだろうか。Kohzuら<sup>9)</sup>は、琵琶湖流入32河川の河畔において採取した、草本5種(*Phragmites japonica* [ツルヨシ]、*Phragmites australis* [ヨシ]、*Persicaria thunberg*、*Juncus effusus*、*Oenarthe javanica*)と木本1種(*Salix* spp. [ヤナギ])について、植物の葉の $\delta^{15}\text{N}$ 値と、河川水中の硝酸イオンの $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を調べた。その結果、両者の関係が、植物の種類によって大きく異なることが明らかになった。これは、植物によって、利用している窒素化合物が異なることや、根の発達する場所が異なるためと推察された。調査した6種のうちで、ツルヨシの $\delta^{15}\text{N}$ と、河川水の硝酸イオンの $\delta^{15}\text{N}$ の間に最も強い正の相関があった。したがって、河畔に生息するツルヨシの $\delta^{15}\text{N}$ は、排水系窒素負荷の強度を表す指標として利用することができそうである(バイオモニタリング法)。また、植物標本の同位体比を測定することで、その標本が作製された時点での河川環境を推定するなど、河川の窒素汚染状況の過去復元にも役立つ可能性がある。ただし、このような手法の適用にあたっては、河畔における脱窒や、動物による窒素の供給が、河畔植物の窒素安定同位体比に及ぼす影響も十分に考慮する必要がある。

## 8. おわりに

グローバルな窒素負荷圧が高まる中で、流域スケールにおける総合的な窒素管理を効率的・効果的に実現するためには、それぞれの流域に固有の自然的・人為的な条件をふまえたうえで、複雑な窒素循環システムの仕組みと変動を的確にとらえることが必要である。本稿では、流域窒素管理における、安定同位体法の適用に関する最近の研究例を紹介した。水文学、地球化学、生態学といった個別分野では、安定同位体を用いた物質循環や生態系の研究はすでに広く行われており、技術的、理論的、応用的な側面において、順調な発展を遂げているといえよう。しかし、安定同位体手法を、分野横断的に適用し、流域環境評価の新たなツールとして用いるという試みは、まだ端緒についたばかりであり、検討課題は多く残されている。安定同位体指標のメリット・デメリットに関する議論は永田<sup>2)</sup>をご参照いただくとして、ここでは、窒素負荷の診断方法としての安定同位体法の今後の展望を述べたい。

本稿では、硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体比から、河川に負荷される窒素の起源(大気由来か排水由来か)や、河川内部での窒素循環過程(脱窒が活発に起きているかどうか)に関わる情報が得られることを示した。また、河畔植物を安定同位体比の「記録者」として用いることで、新たな河川環境監視の手法が開拓できる可能性を指摘した。紹介した研究例では、安定同位体比の変動が、負荷源や循環を表す定性的な指標として「診断的」に用いられた。今後は、安定同位体比の変動モデルの改良と精緻化を図るとともに、観測・実験データに基づく検証を進めることで、安定同位体法を「定性的な診断」から「定量的な評価」の手法へと発展させていくことが重要な課題となるであろう。そのためには、流域における物質収支や、生態系の窒素代謝に関するプロセス研究との連携のもとに、流域における安定同位体の分布や変動に関する充実したデータベースとそれを解析するうえでの概念枠組みを整備する必要がある。一方、同位体分析そのものを精緻化し、流域における窒素化合物の起源や生成・消滅プロセスに関するより詳細な情報を得る、という方向性も、その発展が大いに期待される。例としては、化合物別(たとえば、タンパク質を構成する20種類のアミノ酸)あるいは化合物内(たとえば、一酸化二窒素に含まれる2つの窒素原子)の窒素安定同位体比の測定や、硝酸イオンの $^{17}\text{O}$ アノマリ<sup>10)</sup>の測定などが挙げられる<sup>10)</sup>。安定同位体比は、自然の中に書き込まれた、物質循環の詳細な記録である。その語彙と文法を知り、丁寧に読み解くことは、大規模な人為擾乱の中で自然が発している様々なメッセージを、より深く理解することに繋がるのである。

## (注)

酸素には、 $^{16}\text{O}$ と $^{18}\text{O}$ の他に、 $^{17}\text{O}$ という安定同位体も存在する。一般に、化学反応に伴う同位体分別の程度は質量に依存する。したがって、 $^{18}\text{O} : ^{16}\text{O}$ 比についてみられる同位体分別のほうが、 $^{17}\text{O} : ^{16}\text{O}$ 比の同位体分別よりも、その度合いが大きくなるのが普通である。ところが、大気中でのオゾン生成反応など、ある種の反応においては、 $^{17}\text{O} : ^{16}\text{O}$ 比も $^{18}\text{O} : ^{16}\text{O}$ 比も同じ程度の同位体分別を示すことが知られている。これを質量非依存型同位体分別という。質量非依存型同位体分別が起こると、 $^{17}\text{O} : ^{16}\text{O}$ 比の変化と、 $^{18}\text{O} : ^{16}\text{O}$ 比の変化の関係が、質量依存的な同位体分別から期待される関係とは一致なくなる。この「ずれ」のことを $^{17}\text{O}$ アノマリ( $\Delta^{17}\text{O}$ )と呼び、次式で定義することができる： $\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$ 。大気由来の硝酸イオンの酸素は、質量非依存型同位体分別の影響を強く受けている。それに対して、下水処理場や土壌における生化学的な硝酸イオンの生成反応においては、同位体分別は常に

質量に依存する。このことから、 $^{17}\text{O}$  アノマリは、流域に負荷される大気由来窒素の有効な指標として利用できる可能性がある。

## 謝 辞

本研究は、科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST)および、河川環境管理財団からの支援を受けて行われた。本研究の推進にあたって、以下の諸氏の多大なるご助力を得たことを感謝したい(敬称略)：大手信人、由水千景、高津文人、陀安一郎、木庭啓介、吉田尚弘、竹門康弘、大河内直彦、宮島利宏、奥田昇、生駒優佳、和田英太郎、Carol Kendall。

## 引用文献

- Galloway, J. N., J. D. Aber, J. W. Erisman, S. P. Seitzinger, R. W. Howarth, E. B. Cowling and B. J. Cosby (2003) The nitrogen cascade. *Bio. Science*, 53, 341-356.
- 永田 俊(2008)流域環境評価と安定同位体指標. 永田俊・宮島利宏(編), 流域環境評価と安定同位体－水循環から生態系まで. 京都大学学術出版会, 395-412.
- Galloway, J. N., F. J. Dentener, D. G. Capone, E. W. Boyer, R. W. Howarth, S. P. Seitzinger, G. P. Asner, C. C. Cleveland, P. A. Green, E. A. Holland, D. M. Karl, A. F. Michaels, J. H. Porter, A. R. Townsend and C. J. Vorosmarty (2004) Nitrogen cycles: past, present and future. *Biogeochemistry*, 70, 153-226.
- Mullholland, P. J., A. M. Helton, G. C. Poole, R. O. Hall Jr., S. K. Hamilton, G. J. Peterson, J. L. Tank, L. R. Ashkenas, L. W. Cooper, C. N. Dahm, W. K. Dodds, S. E. G. Findlay, S. V. Gregory, N. B. Grimm, S. L. Johnson, W. H. McDowell, J. L. Meyer, H. M. Valett, J. R. Webster, C. P. Arango, J. J. Beaulieu, M. J. Bernot, A. J. Burgin, C. L. Crenshaw, L. T. Johnson, B. R. Niederlehner, J. M. O' Brien, J. D. Potter, R. W. Sheibley, D. J. Sobota, and S. M. Thomas (2008) Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading. *Nature*, 452, 202-206
- Kendall, C., E. M. Elliot and S. D. Wankel (2007) Tracing anthropogenic inputs of nitrogen to ecosystems. In: R. Michener and K. Lajtha, eds., *Stable isotopes in ecology and environmental science*. 2nd ed., Blackwell Scientific, Oxford, 375-449.
- 大手信人(2008)大気降水物としての窒素が水源域に与える負荷. 永田俊・宮島利宏(編), 流域環境評価と安定同位体－水循環から生態系まで. 京都大学学術出版会, 59-69.
- Ohte, N., I. Tayasu, A. Kohzu, C. Yoshimizu, K. Osaka, A. Makabe, K. Koba, N. Yoshida and T. Nagata (in press) Spatial distribution of nitrate sources of rivers in the Lake Biwa watershed, Japan: Controlling factors revealed by nitrogen and oxygen isotope values. *Water Resources Research*.
- Miyajima, T., C. Yoshimizu, Y. Tsuboi, Y. Tanaka, I. Tayasu, T. Nagata and I. Koike (2009) Longitudinal distribution of nitrate  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in two contrasting tropical rivers: implications for instream nitrogen cycling. *Biogeochemistry*, 95, 243-260.
- Kohzu, A., T. Miyajima, I. Tayasu, C. Yoshimizu, F. Hyodo, K. Matsui, T. Nakano, E. Wada, N. Fujita and T. Nagata (2008) Use of stable isotope signatures of riparian macrophytes as an indicator of anthropogenic N inputs to river ecosystems. *Environmental Science and Technology*, 42, 7837-7841
- 木庭啓介(2008)アイソトポマー・分子内同位体分布. 永田俊・宮島利宏(編), 流域環境評価と安定同位体－水循環から生態系まで. 京都大学学術出版会, 388-393.



永田 俊

Toshi NAGATA

京都大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。名古屋大学助手、東京大学助教授、京都大学教授を経て2008年より東京大学教授。専門は水圏微生物生態学、海洋生物地球化学。JST/CREST「各種安定同位体を用いた流域生態系の健全性・持続可能性指標の構築」、環境省地球環境研究総合推進費「温暖化が大型淡水湖の循環と生態系に及ぼす影響評価に関する研究」の研究代表者。編・共著書に『流域環境評価と安定同位体』(京都大学学術出版会)、*Microbial Ecology of the Oceans*, 2nd ed., (Wiley-Liss), 『生物の多様性ってなんだろう?』(京都大学学術出版会)、『海と生命』(東海大学出版会)など。