

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 各種安定同位体比に基づく流域生態系の健全性／持続可能性指標の構築

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者：永田 俊（東京大学 海洋研究所 教授）

主たる共同研究者：

陀安 一郎（京都大学 生態学研究センター 准教授）

大河内 直彦（(独)海洋研究開発機構 地球内部変動研究センター グループリーダー）

竹門 康弘（京都大学 防災研究所 准教授）

大手 信人（東京大学 大学院農学生命科学研究科 准教授）

木庭 啓介（東京農工大学 大学院共生科学技術研究院 特任准教授）

吉田 尚弘（東京工業大学 大学院総合理工学研究科 教授）

宮島 利宏（東京大学 海洋研究所 助教）

奥田 昇（京都大学 生態学研究センター 准教授）

Jamsran Tsogtbaatar（モンゴル科学アカデミー地球生態学研究所 Director）

3. 研究内容及び成果：

本研究では、環境中に存在する元素の安定同位体比に水や物質の起源や生態系の状態に関する情報が記録されていることに着目して、流域圏の様々な構成要素がもつ各種安定同位体比を最先端の精密分析技術を適用して体系的に調べ、得られた知見を総合化することによって、流域環境の評価や流域管理の目標像の形成に資する新しい指標群を構築することを目的とする。研究は、次の4つのサブグループ、①総括グループ：研究プロジェクト全体の運用と総括ならびに質量分析システムの構築と琵琶湖水系や海外拠点での調査研究、②水循環・技術支援グループ：同位体分析技術の開発、③物質循環グループ：有機物、栄養物質、気体の各種安定同位体比の調査および流域物質循環系に係わる指標の構築、④生態系グループ：流域生態系の構成要素に対する各種安定同位体比の測定に基づき、生態・物質循環系の健全性と持続可能性を評価する指標の構築、を構成して進められた。以下に、主な研究内容と成果の概要をサブグループ別にまとめる。

①総括グループ

最新鋭のハイスループット型質量分析装置を導入し、脱窒菌法により試料水中の硝酸イオンを一酸化二窒素(N_2O)に還元して微量試料で60試料／日の処理を可能にする高速・高精度の窒素・炭素安定同位体比オンライン自動測定システムを新に構築した。

- 琵琶湖流入 32 河川流域を対象に硝酸イオン濃度と窒素・酸素安定同位体比の季節的挙動と土地利用の関係を調べ、濃度と $\delta^{15}N$ は農地や宅地が卓越する流域で高く、森林が卓越する流域で低いこと、 $\delta^{18}O$ は森林が卓越する流域で高い傾向が見られること、濃度は水文条件の季節性に影響されて大きく変化するが、同位体比は安定して起源の特性を示すことなど、 NO_3^- の窒素・酸素の安定同位体比同時測定が、流域の土地利用や水循環と窒素循環の関係を解明するうえで有用なアプローチであることが示された。
- 琵琶湖流域で得られた各種の安定同位体指標の異なる気候帯にたいする適用可能性を検証する目的で、モンゴル国のウランバートル市周辺、マレーシアのサバ州およびタイ・マレー半島部の河川の水質汚濁実態調査と安定同位体比の測定を実施し、汚濁の実態解明と汚濁源の特定に有用であることが確認された(具体的成果は以下に項目ごとに記述)。

- 琵琶湖における溶存酸素の鉛直分布・季節変動の成因が、溶存酸素安定同位体比から査定できることを明らかにした。また、モンゴル・ウランバートル近郊河川における溶存酸素、溶存無機炭素、溶存メタンの 48 時間昼夜観測ならびに各安定同位体比の測定に基づき、それぞれの昼夜変動の成因を特定できることを示した。

②水循環・技術開発グループ

- 微量の水試料を固体高分子膜上で電気分解し、それによって生成された酸素ガスを同位体質量分析計によって $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を測定するという新たな前処理装置を開発した。
- アミノ酸の窒素同位体比を分析する新たな手法を開発し、動物の絶対的な栄養段階をグルタミン酸とフェニルアラニンの2つのアミノ酸の窒素同位体比から計算できる推定法を確立した。
- 元素分析計／同位体質量分析計システム(EA/IRMS)を用いることにより、従来よりも2桁以上少ない超微量の試料で窒素・炭素安定同位体比を精密に測定することに成功した(特許出願中)。これにより、従来、測定がほぼ不可能であった微量物質の測定を可能にした。
- 植物色素の安定同位体比の測定技術を開発する過程で、クロロフィル d という色素が琵琶湖の堆積物をはじめとして地球上に広く分布することを発見した(Science 誌掲載)。

③物質循環グループ

- 隅田川河口域を例に、懸濁性有機物(POM)に特有のクロロフィル a を抽出してその $\delta^{13}\text{C}$ を測定することにより、現地性 POM の $\delta^{13}\text{C}$ の変動を実時間的に追跡した。これと従来の混合モデルとを組み合わせることによって POM の起源推定に関する新たなモデルを提案した。
- 炭素安定同位体比を指標として用いることにより、琵琶湖に蓄積する溶存有機物の湖内起源(二次汚濁性)成分と河川起源(一次汚濁性)成分とを分離推定することを可能にした。
- マングローブ河口域における水中二酸化炭素放出量の評価について、全溶存無機炭素(DIC)濃度や二酸化炭素分圧($p\text{CO}_2$)からでは正確に求めることができない場合でも、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ を指標として利用することにより、妥当な推定が可能であることを明らかにした。
- タイの Khura 川と Trang 川の上流部から汽水域を対象に、硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体比を指標として栄養塩の内部循環プロセスについて調べ、下流の汽水域にかかる区域や汽水区域で NO_3^- の消費・再生産サイクルがとりわけ活発であることが示された。
- アマモの $\delta^{13}\text{C}$ 同位体分別によって、その増殖速度の推定が可能であることを明らかにした。
- 琵琶湖を対象として、 NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の変動パターンが、湖沼表層における植物プランクトンによる NO_3^- の消費過程や、深層における硝化による NO_3^- の再生産過程を特徴付けるための有効な指標として利用できることが示された。
- 琵琶湖と河川(野洲川、モンゴルの汚濁河川)を対象にして、温室効果気体である一酸化二窒素の生成・消滅過程が、各態の窒素化合物の窒素安定同位体比、一酸化二窒素のアイソトプマー、一酸化二窒素、硝酸、溶存酸素、水の酸素安定同位体比を用いることによって、従来の方法とは比較にならない精度で明らかされた。

④生態系グループ

- 河床に堆積した粒状有機物の起源(河道内生産か河道外からの流入か)と河床形態等に応じた堆積特性が炭素・窒素安定同位体比を用いることにより追跡できることを示した。また、ダムがある河川とない河川における懸濁性有機物、河床付着層、底生動物群等の炭素・窒素安定同位体比などの分析により、ダム貯水池下流の有機物の由来と流程変化を明らかにできることを示した。
- 琵琶湖の河川流入部と沿岸域において、懸濁性有機物の起源(底生藻類、植物プランクトン、流入陸生有機物)とその時空間動態が、炭素・窒素安定同位体比と混合モデルを用いて推定され、流域の人為的要因との関係などが整理された後、底生藻類食者のカワニナ類と懸濁物濾過食者のタテボシガイの炭素・窒素安定同

位体比を用いて解析された食物網構造と既往の生物多様性指標との関連性が明らかにされた。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

原著論文(国内誌9件、国際誌53件・投稿中7件)、学会発表(招待講演:国内5件、国際8件、口頭発表:国内96件、国際44件、ポスター発表:国内61件、国際44件)、国内出版1件と、**Science**誌はじめ有力国際誌を含めて論文発表は極めて活発に行われるとともに、流域環境評価への安定同位体利用としては世界で初めての専門書を出版した。また、国際原子力機関が出版予定の“河川管理への同位体利用に関する国際マニュアル”に執筆を依頼されたのは、本研究成果が国際的に高い評価を受けているひとつの証左である。有機物の同位体比の超微量測定技術の開発で特許出願を1件行っている。以下に、研究全体を通しての評価をまとめる。

- 1) 研究の初期の段階で、硝酸イオンの窒素・酸素および有機物の炭素・窒素の安定同位体比を高速かつ高精度で分析できる装置の開発に成功した。また、アミノ酸の分子別窒素同位体比を測定する新たな手法が開発された。まず、これら世界最新鋭の分析測定技術の開発が、流域環境評価に必要な多量サンプルの測定を可能にした点で高く評価できる。
- 2) 琵琶湖流域を研究の中心としながら、そこでの成果を国内外の湖沼や河川に応用して、水域生態系における窒素・炭素・酸素循環の起源や動態を追跡するのに各安定同位体比が極めて有用な指標であることを世界に先駆けて広範に提示している。特に、温室効果気体である一酸化二窒素の生成・消滅過程とその定量化、アミノ酸を利用した栄養段階決定法の開発、クロロフィルdの発見などは、世界最先端の成果と高く評価される。
- 3) 本研究プロジェクトでは、総括グループとサブグループの有機的連携のもとに行われ、国内に分析ネットワークが形成されるとともに、新進気鋭の若手研究者を集めて組織化されている。これは、この分野の今後の継続・発展に繋がるものと期待される。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究は、各種の安定同位体比が流域における水・物質循環系と生態系の新たな診断指標として有用なことを世界的にも初めての広範な事例を通して示したフロンティア研究として、大きな意義がある。言い換えれば、水環境に関する新たな科学的知見が得られているいっぽう、安定同位体比の水環境診断への利用可能性を示めず段階の成果も多い。窒素、炭素、酸素循環の起源と動態を追跡できるという、他の手法にない特長を備えていることから、安定同位体比指標を用いた水環境診断に対する需要は、国内的にも国際的にも極めて高いと考えられる。この手法の普及、実用化へ向けては、 $\delta^{17}O$ の測定精度の向上、特性が異なる水域への事例研究の拡充、水・物質循環モデルや生態系モデルとの結合など、今後の研究の更なる継続・深化・発展が期待される。また、普及に当たっては、大量の試料を分析処理できる測定センターの設置などの実用体制の整備が必要となろう。

4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

- 1) 受賞歴: ①第53回日本生態学会大会・ポスター賞(物質循環分野); 田中義幸他、②第54回日本生態学会大会・ポスター賞(優秀賞); 眞壁明子他、③日本陸水学会第72回水戸大会・最優秀ポスター賞; 高津文人他、④日本陸水学会第72回水戸大会・優秀ポスター賞; 由水千景他
- 2) 国際原子力機関が出版予定の“河川管理への同位体利用に関する国際マニュアル”への招待執筆
- 3) 書籍出版: 永田俊、宮島利宏編著(2008.2); 流域環境評価と安定同位体—水循環から同位体まで、京都大

学学术出版会

以上