

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：64303

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K19367

研究課題名(和文)生物-地質カップリングを基にした、生態系ストイキオメトリー概念の構築

研究課題名(英文)Construction of ecosystem stoichiometry concept based on bio-geological coupling

研究代表者

陀安 一郎(TAYASU, Ichiro)

総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・教授

研究者番号：80353449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：河川生態系において、炭素(^{13}C)、窒素(^{15}N)、ストロンチウム($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)同位体比という今まで用いられてきた同位体に加えて、今までほとんど研究の対象となっていなかった複数の地質由来元素の河川生物群集における動態をマグネシウム(^{26}Mg)、亜鉛(^{66}Zn)、カルシウム($^{44}/^{40}\text{Ca}$)、ストロンチウム($^{88}/^{86}\text{Sr}$)同位体比といった非伝統的同位体を用いて研究した。これらの研究手法は、分析の前処理および分析手法にまだまだ難しい点があり、汎用的に生態系の研究に用いるのが難しい段階ではあるが、生態系のストイキオメトリーを研究する上ではベースとなる研究結果を提示できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川生態系は、その集水域を流下する水により涵養されるため、流れる物質は地質により影響を受ける。さらに、河川に生息する生物の食う-食われる関係(食物網)によっても個別の生物は影響を受けるとともに、あらゆる河川が人間の影響を受けている状況においては人間の影響も無視し得ない。本研究では、河川に生息する生物が自然環境(地質要因)および流域負荷(人為要因)により構成する元素がどのように変化するか、それをいろいろ異なる元素の同位体比を用いて明らかにした。この研究によって明らかになったことは、たくさんの元素の中の一部であるが、今後の研究に有効な研究手法を開発することができた。

研究成果の概要(英文)：We studied the dynamics of several geologically derived elements on stream organisms using non-traditional isotopes such as magnesium (^{26}Mg), zinc (^{66}Zn), calcium ($^{44}/^{40}\text{Ca}$), and strontium ($^{88}/^{86}\text{Sr}$) isotope ratios in rivers. In addition, we measured carbon (^{13}C), nitrogen (^{15}N), and strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) isotope ratios, which are commonly used in isotope studies of riverine ecology. These research methods are still developing as a field riverine field ecology because there are still some difficulties in the pretreatment and analytical techniques. However finally, we presented the relationships of these isotope ratios in living organisms (invertebrates, fishes, organic matter, and so on). As a result, we showed results that can be used as a base for ecosystem stoichiometry studies.

研究分野：同位体生態学・同位体環境学

キーワード：安定同位体 生態系ストイキオメトリー 非伝統的同位体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は、地質に由来する元素が生物にどのように取り込まれるか、それが地質によってどのように異なるかという、生物 - 地質カップリングをベースに考察したものである。有機元素については、炭素 / 窒素 / リンの存在比率によって生物の挙動がどう変わるかということ、「生態化学量論 (Ecological stoichiometry)」というが、これを生態系レベルで考えると、全ての元素レベルで化学量論を検討できる「生態系ストイキオメトリー (Ecosystem stoichiometry)」と発展させられるのではないかと考えた。特に、本研究を行う上では、まず今まで考えられていなかった幅広い元素に着目すること、特に地質由来の元素を検討することとした。さらに、動態を理解するために、その元素の安定同位体比を測定することを中心に計画を立てた。従来から用いられている生元素の安定同位体比と比較することによって、軽元素と重元素の安定同位体比と合わせた研究についてのブレイクスルーを目指した。

2. 研究の目的

本研究においては、生物 - 地質カップリングをわかりやすく理解するために、河川生態系を扱うこととする。河川においては、集水域の地質から溶出した元素が生物体に取り込まれる可能性があるために、必須元素と非必須元素の比較ができるなど、研究手法として有効である。特に、本研究の調査地である琵琶湖集水域においては、母岩に石灰岩を有する河川と有しない河川(非石灰岩河川)があるために、これらに対比するとともに、河川上流と下流を比較することによって人間活動による栄養塩の付加も同時に比較することができ、軽元素と重元素の比較も行うことができる。

本研究で扱う同位体は、いわゆる「非伝統的同位体 (Non-traditional isotopes)」という分類にあたり、地球化学の分野でも分析が日進月歩の分野であるため、野外試料の分析に関する検討も同時に行うことが重要である。

3. 研究の方法

調査地は、まず琵琶湖集水域において母岩に石灰岩河川として板名古川・丹生川・芹川、非石灰岩河川として野洲川・大戸川支流(不動寺)・安曇川を設定した。生物群集の研究であるため、季節性を検討する必要性も考慮されたため、水生昆虫の成長も考え5月と11月という季節の違いも検討することとした。

さらに、このうち野洲川・安曇川という大河川については、他の研究で用いてきた上流地点および下流地点を1点ずつ選び、比較を行った。これらによって、以前から研究が行われてきた炭素・窒素の安定同位体比を用いた生物群集の研究と比較を行うことができる。

それぞれのサンプリングについては、河川の無脊椎動物をハンドソーティングで得るとともに、魚類、付着藻類、リター、POMを採取した。無脊椎動物については胃内容物を排出させたのちに乾燥した。試料の炭素 ($\delta^{13}\text{C}$) 窒素 ($\delta^{15}\text{N}$) 同位体比については乾燥試料を用い、試料のマグネシウム ($\delta^{26}\text{Mg}$) 亜鉛 ($\delta^{66}\text{Zn}$) カルシウム ($\delta^{44/40}\text{Ca}$) ストロニウム ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{88/86}\text{Sr}$) 同位体比については、酸分解を行った後の試料を用いた。分析は、元素分析計を接続した安定同位体比質量分析計 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) 表面電離型質量分析計 ($\delta^{44/40}\text{Ca}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{88/86}\text{Sr}$) マルチコレクターICP質量分析計 ($\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{66}\text{Zn}$) により分析した。

4. 研究成果

まず、本研究で扱う非伝統的同位体として、Mg、Zn、Ca、Sr ($\delta^{88}\text{Sr}$) をターゲットとし、本研究で利用可能なように技術開発を行った。Mg 安定同位体比の測定については元素分離法の確立、MC-ICP-MS を用いた測定法の開発を行い、環境標準試料を用いた評価を行った。元素分離では回収率が 95% 以下になるとカラム内部で同位体分別が起きて、測定値が変わることが分かった。そのため全試料について回収率を確認する作業が重要である。同位体比の測定法としては標準試料-未知試料-標準試料の挟み込み法を採択しているが、試料 / 標準の濃度比が 1.0 ~ 1.2 の範囲では安定することが分かった。

Zn の同位体比の測定については陰イオン交換樹脂を用いた分離精製法の検討を行った。MC-ICP-MS を用いた測定法については銅添加法を試した。この方法はダブルスパイク法より操作が簡単で、十分な精度が得られる利点がある。その結果、亜鉛と銅の濃度比は測定値に大きな影響を与えないことが確認された。また、試料 / 標準の濃度比によって測定値が変わらないことも確認され、標準物質を用いた評価でも非常に安定した結果を得た。

Ca 安定同位体比の分析法については陽イオン交換樹脂を用いた元素分離法を確立した。表面電離型質量分析装置を用いた測定法については ^{42}Ca と ^{43}Ca を用いたダブルスパイク添加法の検討を行った。タングステンフィラメントは安定した測定ができるが、 ^{39}K のブランクが高く高

精度分析には使えないことが分かった。その代わり高純度レニウムフィラメントでは信号の安定性はタングステンよりやや悪いが ^{39}K のブランク信号は出なかったので今回の測定にはレニウムフィラメントを採用することになった。

これらの手法を用いて、各元素に関する実際の生態系試料の分析を行った。まず、石灰岩河川と非石灰岩河川において Mg と Ca の濃度および $\delta^{26}\text{Mg}$ 値を比較したところ、明瞭な違いがあった。この結果は、母岩がこれらの値を決めていることを示している。 $\delta^{26}\text{Mg}$ 値においては、石灰岩河川では $-1.96\text{‰} \sim -1.22\text{‰}$ であったのに対し、非石灰岩河川では $-0.95\text{‰} \sim -0.60\text{‰}$ の値を持っていた。また、琵琶湖集水域における 3 つの石灰岩河川に生息する水生生物の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値は、3 つの非石灰岩河川に生息する水生生物の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値よりも低く、石灰岩からの影響が水生生物に見られることがわかった。しかしながら、摂食機能群別の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値はそれぞれ異なっており、餌源の違いが影響を与える可能性が示唆された。一方、ハゼ科魚類の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値は、河川水中の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値に近似しており、Mg が直接河川水から得られた可能性が見られた。現在、魚類の移動研究には、耳石のストロンチウム同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) がよく使われている。しかし、この指標だけでは河川を分けられない場合もあり、その場合に $\delta^{26}\text{Mg}$ 値を用いた研究を行う意義があることがわかった (Nitzsche et al. 2019)。

続いて、必須元素である Mg の安定同位体 ($\delta^{26}\text{Mg}$) と Zn の安定同位体 ($\delta^{66}\text{Zn}$) を河川生態学の新たなツールとして活用する可能性を検討した。本研究では、琵琶湖流域の 2 つの河川の上流と下流において、河川生物とその潜在的な金属源の $\delta^{26}\text{Mg}$ と $\delta^{66}\text{Zn}$ を測定した。その結果、生物の $\delta^{26}\text{Mg}$ と $\delta^{66}\text{Zn}$ の値は、互いに関連性がなく、 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の値とも関連性がないことから、元素の供給源や同位体分別を支配する要因は、元素や分類群によって異なることがわかった。濾過摂食を行うトビケラの幼虫や小型のハゼでは、 $\delta^{26}\text{Mg}$ 値が低く、水から Mg の取り込みが行われていた。また、リター食性ガガンボや藻類食性のカゲロウの幼虫の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値が高いことから、餌から Mg を取り込む際に Mg の同位体分別が行われていることが示唆された。カワゲラの幼虫の $\delta^{26}\text{Mg}$ 値はカゲロウの幼虫を潜在的な餌ということを反映していたが、ヘビトンボの幼虫に見られた高い $\delta^{26}\text{Mg}$ 値は、成長に伴い ^{26}Mg が濃縮されたためと説明できる。トビケラとカゲロウの幼虫の $\delta^{66}\text{Zn}$ 値は、Zn が水と餌由来の Zn の混合物であることを示しているが、ガガンボの幼虫の高い $\delta^{66}\text{Zn}$ 値は、植物リターから Zn を摂取する際の Zn 同位体分別を示唆している。カワゲラとヘビトンボのニフの $\delta^{66}\text{Zn}$ 値は、しばしば獲物であるトビケラの幼虫の値と同じ範囲であったが、トンボのニフと小さなハゼは、餌の Zn 源に比べて $\delta^{66}\text{Zn}$ 値が低かった (Nitzsche et al. 2020)。

主要栄養元素であるカルシウム ($\delta^{44/40}\text{Ca}$) と非必須元素のストロンチウム ($\delta^{88/86}\text{Sr}$) の安定同位体比が、陸上脊椎動物や海産魚類の新しい栄養段階指標となる可能性が示されている。本研究では、大型無脊椎動物を主体とする河川食物網において、その生理的な違いにもかかわらず、脊椎動物と同様の Ca および Sr 同位体分別の傾向が存在するかどうかを検証した。琵琶湖集水域の上流と下流で、河川大型無脊椎動物、小型ハゼ類とその潜在的な金属源 (河川水、礫面付着物、陸上植物リター) の $\delta^{44}\text{Ca}$ 、 $\delta^{88}\text{Sr}$ 値、および $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を決定した。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ から、カワゲラ幼虫、甲殻類、ハゼ類は主に水生 Sr 源に依存していることが明らかになった。ガガンボ、トビケラ、カゲロウ、ヘビトンボ、トンボの幼虫の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ が高いことから、植物リターを介した陸上からの寄与が大きいことが示唆された。 $\delta^{44}\text{Ca}$ と $\delta^{88}\text{Sr}$ の正の相関は、同様の Ca と Sr の供給源が存在し、Sr は必須ではないが Ca と Sr の安定同位体比が同様の同位体分別傾向を示すことを示唆した。また、 $\delta^{44}\text{Ca}$ と $\delta^{88}\text{Sr}$ は Sr/Ca 比と正の相関、 $\delta^{15}\text{N}$ と負の相関を示し、Ca と Sr の安定同位体比に栄養段階効果があることが示唆された。また、大型の流下有機物食のトビケラ幼虫における ^{44}Ca と ^{88}Sr の濃縮は、これらの栄養段階効果の例外であった。海産魚類と陸産脊椎動物の栄養段階効果である ^{44}Ca と ^{88}Sr の減少は、大型無脊椎動物を主体とする河川食物網においても、その生態は異なるものの存在することが確認され、細胞レベルあるいは分子レベルで Ca と Sr 同位体分別のメカニズムがこれらの分類群間で共通なものであるかもしれないと考えられる (Nitzsche et al. 2022)。

これら一連の研究により、河川生態系において、炭素 ($\delta^{13}\text{C}$)、窒素 ($\delta^{15}\text{N}$)、ストロンチウム ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 同位体比という今まで用いられてきた同位体に加えて、今までほとんど研究の対象となっていなかった複数の地質由来の元素の動態をマグネシウム ($\delta^{26}\text{Mg}$)、亜鉛 ($\delta^{66}\text{Zn}$)、カルシウム ($\delta^{44/40}\text{Ca}$)、ストロンチウム ($\delta^{88/86}\text{Sr}$) 同位体比といった非伝統的同位体を用いて研究する端緒についたといえる。これらの研究手法は、分析の前処理および分析手法にまだまだ難しい点があり、汎用的に生態系の研究に用いるのが難しい段階ではあるが、生態系のストイキオメトリーを研究する上ではベースとなる研究結果を提示できた。これらの研究をもとにして、今後の研究が発展することを期待している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nitzsche Kai Nils, Wakaki Shigeyuki, Yamashita Katsuyuki, Shin Ki Cheol, Kato Yoshikazu, Kamauchi Hiromitsu, Tayasu Ichiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Calcium and strontium stable isotopes reveal similar behaviors of essential Ca and nonessential Sr in stream food webs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ecosphere	6. 最初と最後の頁 e3921
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ecs2.3921	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nitzsche Kai Nils, Shin Ki Cheol, Kato Yoshikazu, Kamauchi Hiromitsu, Takano Shotaro, Tayasu Ichiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Magnesium and zinc stable isotopes as a new tool to understand Mg and Zn sources in stream food webs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecosphere	6. 最初と最後の頁 e03197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ecs2.3197	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 陀安一郎	4. 巻 33
2. 論文標題 同位体環境学と同位体地図を用いた研究の展開	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 海洋化学研究	6. 最初と最後の頁 27-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nitzsche Kai Nils, Kato Yoshikazu, Shin Ki-Cheol, Tayasu Ichiro	4. 巻 688
2. 論文標題 Magnesium isotopes reveal bedrock impacts on stream organisms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 243-252
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scitotenv.2019.06.209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 陀安一郎, SHIN Ki-Cheol
2. 発表標題 多元素同位体手法による環境トレーサビリティー手法の活用
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陀安一郎, 藤吉麗, 藪崎志穂, 申ギチヨル, 中野孝教, 谷口真人
2. 発表標題 環境トレーサビリティーを実現する多元素同位体手法
3. 学会等名 JpGU Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kai Nils Nitzsche, Yoshikazu Kato, Ki-Cheol Shin, Hiromitsu Kamauchi, Ichiro Tayasu
2. 発表標題 Magnesium and zinc stable isotopes in stream ecology
3. 学会等名 JpGU meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kai Nils Nitzsche, Katsuyuki Yamashita, Shigeyuki Wakaki, Ki-Cheol Shin, Yoshikazu Kato, Hiromitsu Kamauchi, Ichiro Tayasu
2. 発表標題 Analysis of Ca isotope ratios ($^{44}/^{40}\text{Ca}$) in stream food webs: methodological requirements and first results
3. 学会等名 9th Symposium on Environmental Isotope Study
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Sakurai, Takao Nakagiri, Kosuke Tanaka, Haruhiko Horino, Ki-Cheol Shin, Ichiro Tayasu, Shiho Yabusaki
2. 発表標題 Investigation on possibility of the identification of air pollutant sources using ratios of stable lead and strontium isotopes
3. 学会等名 JpGU meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nitzsche K.N., Kato Y., Shin K.-C. and Tayasu I.
2. 発表標題 Mg isotopes reveal bedrock impacts on stream organism.
3. 学会等名 8th Symposium on Environmental Isotope Study
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamashita K., Wakaki S., Inoue M., Nitzsche K.N. and Shin K.-C.
2. 発表標題 Method for Ca isotope analysis using TIMS.
3. 学会等名 8th Symposium on Environmental Isotope Study
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nitzsche K.N., Kato Y., Shin K.-C., Kamauchi H. and Tayasu I
2. 発表標題 Non-traditional isotopes in stream ecology.
3. 学会等名 The 66th Annual Meeting of the Ecological Society of Japan
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	申 基チヨル (SHIN Ki-Cheol) (50569283)	総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・准教授 (64303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------