

平成30年6月29日現在

機関番号：64303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26550091

研究課題名(和文)代謝プロセスに着目した生態系における一般炭素・窒素安定同位体動態機構モデルの構築

研究課題名(英文)A theoretical model for Carbon/Nitrogen Stable isotope dynamics in ecosystems based on intracellular metabolic process

研究代表者

石井 励一郎 (ISHII, REIICHIRO)

総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・准教授

研究者番号：40390710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：細胞内TCAサイクルのエネルギー代謝での炭素、窒素の安定同位体比の動態を調べるため各素過程での同位体効果と基質供給量との関係をモデル化し、これらをつないだ定性的な代謝動態モデルを構築した。餌の量が多いほど、代謝速度が速いほどC・Nとも同位体効果が大きくなり、成長速度が大きい場合には同位体効果が小さくなること、また餌のC/N比が自らに比して高い場合にはCの、低い場合はNの同位体比が高くなる傾向も再現できた。必須アミノ酸では炭素鎖の代謝頻度が低く抑えられれば、可欠アミノ酸に比べてCの同位体比が低くなることも示唆された。生態系間で共通するC・N同位体濃縮比をもたらすメカニズムの解明の一助となる。

研究成果の概要(英文)：A set of theoretical model was developed to investigate how the stable isotope ratios of carbon and nitrogen change during the intracellular energy metabolism by organizing the models for the major elementary processes on the metabolic map of animals. This model could reproduce the following qualitative observed relations between external condition and the isotope ratios: d13C of animal cells become higher if 1) it is fed more, 2) its metabolism rate is high. If the C/N ratio of the prey is higher/lower the values of d13C/d15N become higher. It also suggests that the difference in metabolism rate of essential amino acid and non-essential amino acid will result in difference in d13C. Although these are still qualitative results, they will shed the light on the mechanisms of generating similar stable isotope enrichment pattern through food chains in various ecosystems.

研究分野：理論生態学

キーワード：炭素/窒素同位体比 生食連鎖 代謝動態モデル

1. 研究開始当初の背景

申請者らはこれまで、太平洋親潮域・暖水塊、アラスカ湾、南極、バイカル湖、琵琶湖、モンゴル草原を対象として、多様な生態系の食物網が持つ、炭素・窒素同位体比($\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$)について、その食物連鎖を構成する生物の炭素・窒素同位体比データの再解析を行い、 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ上の以下の2つの特性を示した：1) いずれの生態系の主要な食物連鎖においても直線性がみられ、2) その直線の傾き ($\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$) は異なる生態系でも互いに大きな差異が見られない。これらの現象をもたらすメカニズムと条件についての検討はなされていなかった。申請者らはこのような「環境条件に左右されずこのような一般性を与える」十分条件として生食連鎖における $\delta^{15}\text{N}/\delta^{13}\text{C}$ に大きな差がなく、概ね一定であるのは、生態系、生物種によらず動物に共通する物質/エネルギー代謝の生理的条件によって、炭素・窒素の同位体効果が拘束されているからである」とする仮説を提示していた(Wada, Ishii et al. 2013)。なぜなら、炭素と窒素の同位体効果が起こりうる生体内の代謝は、それぞれ、脱炭酸、脱アミノ反応が主であり、これらが起こる反応は定性的な経路としては動物種間で共通しているからである。

2. 研究の目的

上記の仮説について、以下のような生理学的な代謝プロセスをモデル化し、これを用いてその妥当性と、生態系レベルで観測される現象についての説明能力と適用範囲を検証することを目的とする。具体的には、体細胞内の主要な代謝経路マップのなかで炭素窒素の同位体効果が起こる部位を特定し、必須/可欠アミノ酸、糖、脂肪のそれぞれの分子が、体内に取り込まれ、あるいは体内での再利用により代謝と生合成を経てつくられるタンパク質内にそれぞれの同位体が蓄積するプロセスを、数理モデルを用いて素過程から演繹的に検討する。この手法では各

素過程のインプットとアウトプットの定量的な評価が可能であるため、炭素/窒素同位体濃縮比が、観測されている関係に近づく場合と、これからズレる場合の条件を実証研究から得られているデータの分析環境要因のデータベース化と再解析を行い検討する(第1の目的)。さらにこのモデルを用いて、上記の“一般性”をもたらすメカニズムと“これからズレをもたらす動物の生育環境条件やその変動要因”を分離して考える事ができるかを、相互比較が可能な複数(時点)の生態系を選びだし、生態系の持続性と関連付けた新たな環境指標の提案をする(第2の目的)。

3. 研究の方法

生態系内の同位体濃縮についての反応速度論に基づいた生理的要因と外的環境要因を含む一般的なメカニズムを想定した2つのスケールからなるモデルを構築する。1つは、多くの動物に共通する細胞内代謝マップ内における主なC・Nの同位体効果の起こる部位の特定と、各素過程での通常の同位体分別係数をとりいれた細胞内代謝スケールであり、もう1つは、この細胞代謝モデルを核とし、これへの物質のインプット、蓄積、アウトプットおよび代謝活性に影響を与ええる外部環境条件を含むスケールである。節足動物、魚類、哺乳類など複数の生物分類群について、各素過程における同位体分別係数などについての既往の知見を用いて、C・Nの同位体効果に関連する代謝素過程を連結し、そこに十分な数の分子数を代謝経路内で反応させる定量的な動的数値モデル(Individual Based-model)を開発し、このモデルを用いた擬似的な個体内代謝系での同位体の動態モデルを開発し、フラックスとしての同位体比の変化についての検討を定量的に同位体比の動態の再現を試みる。とくに細胞内代謝では、ミトコンドリアを中心とするアミノ酸、糖、脂質の代謝プロセスにおいて、炭素、窒

素の同位体効果が起こると考えられる重要な素過程を、また外部環境としては動物の採餌、成長、排泄などの生命活動によって引き起こされる両元素の同位体濃縮がおこる部位、タイミングと、代謝活性に影響する温度を取り入れる。複数の栄養段階についてのC・Nの同位体比のデータが最も揃っている西部北太平洋域の動物プランクトンを中心とする食物連鎖をモデルの骨格づくりのためのケーススタディーとして用い、その後他の生態系への適用と展開をはかる。

4. 研究成果

西部北太平洋域2地点の動物プランクトン群集の栄養動態と時空間分布の変動解析から、海域によって、基礎生産を行う植物プランクトンの窒素固定の有無が、動物プランクトンのN同位体比に大きく影響することが示唆されたが、南極海、アラスカ湾、親潮水塊、黒潮系暖水塊の4海域における生物の同位体比データを合わせ、食物連鎖全体が持つ $\Delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ について統計的な比較を行った結果、海域間に有意な差が無く、C・Nマップ上では各海域の食物連鎖は同様の勾配をもつとみなせることが示唆された。これは、共通のアミノ酸代謝や脱炭酸を中心とするエネルギー代謝によって決定されることにより、統一的な規則性が低次から高次まで維持されているとする、申請者らの仮説を強く支持するものであった。

ミトコンドリア内部TCAサイクルでの糖、脂肪、アミノ酸を基質とするエネルギー代謝での炭素、窒素の同位体効果について、とくに炭素鎖の切断時、アミノ基の切断時にC、Nの同位体効果が起こるものとし各素過程での同位体効果と、基質の供給量の間を数理モデルとして表した。これらをつないだ動的数値モデル(Individual Based-model)の骨格を定性的なプロトタイプとして開発し

た。これにより、細胞のC・Nに関して、採餌過程における餌の量が多い、排泄が多い、代謝速度が速いほど同位体効果が大きくなり、成長速度が大きい場合には同位体効果が小さくなることは定性的に再現できた。餌のC/N比が自らのC/N比より高い場合にはCの同位体比が、低い場合はNの同位体比が高くなる傾向も再現できた。またアミノ酸代謝について、動物種ごとに異なる必須アミノ酸の炭素骨格が成長の制限要因となるものとし、これを選択的に保存する(代謝しにくくする)ようなプロセスを仮定すると、炭素骨格を再合成されやすい可欠アミノ酸に比べてCの同位体比が低くなることが示唆された。この細胞代謝モデルを定量的なものにするための各パラメーターの設定について、動物の採餌、成長、排泄などの生命活動、および動物の移動によって引き起こされる両元素の同位体濃縮がおこる部位、タイミング、規模をについて、文献および研究協力者からの情報を収集をはかったが、それぞれのデータが得られた実験条件の不均質性が多く、生態系間の $\Delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ の比較による議論を行える条件は整わなかった。今後もこの定量化への挑戦は継続する。

一方、生態系間の当初提示していた仮説：「 $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ は生態系間で大きく変化しない」について、当初考慮していなかった以下の水域生態系の特性について考察を開始した。すなわち、水域生態系では一般に栄養段階が体サイズに大きく依存すること、また死亡率も体サイズに大きく依存し低下することから、栄養段階と種の関係は、既往の多くの生態学研究が提示してきたより、はるかにダイナミックである点である。従来は、種ごとに採られたサンプルの同位体比から種の栄養段階が推定されていたが、個体の成長と死亡により変動する種個体群のどのような特性を代表しうるのは、まだ明確な評価がなされていない。この点について、既往

の文献からサンプルのサイズ・種両方の属性についてのおこなった。分析された同一サンプルセットの内、種内で十分な体サイズ、及び年齢の分散があるケースは少なかったが、季節、地域などを網羅し多くサンプリングされている普通種のデータをまとめて規格化した上で分析を行っている。体サイズと死亡率の関係については、既存の関係式を当てはめることで、バイオマスベースでの代表的な種ごとの栄養段階を計算するモデルを開発した。本件についても論文準備中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

1 和田 英太郎、野口 真希、石井 励一郎、「炭素・窒素安定同位体比から見える自然界の食物連鎖 - その普遍性と持続性」、*経済学論叢*、65 巻、495-517、2014

[学会発表](計4件)

石井 励一郎 野口 真希 和田 英太郎、「代謝モデルを用いた安定同位体動態の考察」、日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会、2014/4/28-5/2、横浜

WADA EITARO, NOGUCHI MAKI & ISHII REIICHIRO, "Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along food chains in marine Environments", The 7th International Symposium on Isotopomers (ISI2014), 2014/6/1-6/4, 東京

野口 真希 石井 励一郎 和田 英太郎、「西部北太平洋亜寒帯及び亜熱帯海域における低次生態系の動態解析」、日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会、2014/4/28-5/2、横浜

Aita, M.N., M. Kitamura, T. Kobari, R. Ishii and C. Yoshikawa, "Stable isotope analysis of food-web system in subarctic to subtropical region of western north Pacific.", 2016 Ocean Sciences Meeting, 2016/2/21-2/26, New Orleans, LA, USA

石井 励一郎、小川 奈々子、兵藤 不二夫、野口 真希、和田 英太郎、「新食物連鎖解析法」の提案と栄養段階に沿った炭素・窒素同位体効果に関する考察」、第5回 同位体環境学シンポジウム、2015/12/25、総合地球環境学研究所、京都

野口(相田) 真希、石井 励一郎、和田 英太郎、「西部北太平洋亜寒帯及び亜熱帯海域における低次生態系の動態解析」、日本地球惑星科学連合、JpGU Meeting 2015、2015/5/27、幕張メッセ、千葉

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 励一郎 (ISHII, Reiichiro)
総合地球環境学研究所・研究基盤交際センター・准教授
研究者番号：40390710

(2) 研究分担者

相田 真希 (AITA, Maki)
海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・技術主任
研究者番号：90463091

(3)研究協力者

和田英太郎 (WADA, Eitaro)