

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23310020

研究課題名(和文) 海域特性を示す食物連鎖の同位体効果に基づいた海洋生態系モデルの構築

研究課題名(英文) Observation based study of stable isotope effect in the food chain for different oceanic regions

研究代表者

相田 真希 (AITA, Maki)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・技術主任

研究者番号：90463091

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円

研究成果の概要(和文)：生物の安定同位体比は、捕食者自身の代謝系の駆動様式や行動変化、食物網が存在する地域性によって決定される。本研究では北太平洋亜寒帯海域(K2)及び亜熱帯海域(S1)において、動物プランクトン及び海水試料を季節・鉛直層別に採集し検証した。動物プランクトンを含めS1の ^{15}N が全体的に低くなっていることから、窒素固定系が中深層の食物連鎖まで大きく影響していることが示唆された。更に食物連鎖全体が持つ ^{13}C 、 ^{15}N の傾度を統計的に解析を行った結果、生態系や生物種によらず傾度に大きな差が見られない事が分かった。即ち、中間代謝過程を通し統一的な規則性が食物連鎖内で維持されている事が強く示唆された。

研究成果の概要(英文)：Carbon and nitrogen isotope ratios of biota are controlled by two factors, a metabolic system and a life style of predator and a regional variability of environmental parameters on food-web system. To evaluate the environmental factors on the basic food-web in marine ecosystem, we studied the seasonal variation of nitrogen and carbon isotope ratios of zooplankton and ambient water in the subarctic site of K2 and the subtropical one of S1 in the western North Pacific. The ^{15}N values of zooplankton and nitrate ions in the water at the S1 site tended to be lower than those at the K2 site, indicating that the basic food-web is affected by nitrogen fixation. We further compared the trophic fractionation of carbon and nitrogen isotopes (^{13}C , ^{15}N). It is observed that a simple relationship exists in the $^{15}\text{N}/^{13}\text{C}$ regardless of species and ecosystems. This contention suggests a unified regularity is maintained in the lower to higher trophic level in the marine ecosystem.

研究分野：同位体海洋生態学

キーワード：海洋生態系 安定同位体比 食物連鎖 環境動態モデル 物質循環

1. 研究開始当初の背景

陸域・水域に関わらず、地球上の多くの生態系における食物網の出発点は一次生産者（高等植物や藻類など）である。一次生産者の生産量、その時空間分布について、衛星による推定とモニタリングの精度が飛躍的に上昇している。また、モデルを用いた研究でも、同様に全球スケールで一次生産量の見積と温暖化などに伴う影響予測が行えるようになってきた。一方で、生態系の構造・機能という面から見た場合、自然界で行われている食物連鎖（植物 植食性動物 肉食性動物 高次動物）における、生態系全般に渡る連鎖過程に生じる複雑なプロセスの実体について、エネルギーのレベルや生物種のレベルではある程度理解されているが、一歩踏み込んだ代謝系のレベルや分子のレベルでは、その実体を把握するに至っていない。このことが、現在の生態系モデルと観測の間に大きなギャップを生じさせている。近年、生態系の食物連鎖構造を知る手段として、安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ ）を用いた研究が広く使われてきている。同位体比の濃縮係数の差異から食物網の構造や生物間の相互作用や代謝系の動態を知ることが出来る(Wada, 2009)。栄養段階（TL）が1段階上がるごとに $\Delta\delta^{15}\text{N}/\text{TL}$ は3.3‰ (Minagawa and Wada, 1984)、 $\Delta\delta^{13}\text{C}/\text{TL}$ は約1.05‰ (Fry and Sherr, 1984)高くなる事が示されているが、 $\delta^{13}\text{C}/\text{TL}$ はバラつきが大きく、充分検討されていない。この背景として、 $\delta^{13}\text{C}$ については測定する部位によって $\delta^{13}\text{C}$ 値が大きく異なること、光合成系の一次生産者の $\delta^{13}\text{C}$ は成長速度に伴い大きく揺らぐため、不明瞭な部分が多いことが挙げられる。

2. 研究の目的

生物の安定同位体比は、捕食者自身の代謝系の駆動様式や行動変化に起因するものと、食物網が存在する地域性に起因するものの2つの要因によって決定される。また、生体内の同位体分布は、酵素反応とその複合系である代謝サイクルの速度論的な同位体効果と、生体内の代謝過程で起こる様々な同位体分岐反応によって決定される。本課題では、代表者らが見出した異なる生態系間で $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ の傾きに共通性があるという新たな知見 (Aita et al., 2011) を出発点として、栄養塩や水温などの海洋環境の違いによって低次生態系にどのような違いがあるのかを見るために、北西部北太平洋亜寒帯域及び亜熱帯域において、動物プランクトン及び海水試料を季節及び鉛直層別に採集を行い比較検証する。本課題の成果から、食物網（食物連鎖）と物質循環を含めた海洋生態系モデルの構築を含め、窒素・炭素安定同位体比の変動によって検証できる基盤技術、それを用いた方法論の進展と新しい視座を提起することも意図した。

3. 研究の方法

$\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ 比が一次生産者の生息する環境条件と生体内の代謝過程で決定され、高次のTLまで引き継がれるという事実と作業仮説の検証を行うため、(1)北西部北太平洋亜寒帯域・亜熱帯域における季節を通した年間観測の実施、(2)窒素安定同位体比を導入した海洋低次生態系モデルの構築、を行った。

(1)では、水温、塩分、栄養塩環境など水塊構造や、生息する生態系構造が大きく異なる2つの海域：亜寒帯循環域K2 (47N, 160E)及び、亜熱帯循環域S1 (30N, 145E)において2010年2月から2011年7月まで季節（秋季～夏季）に渡って定点観測を実施した。多段開閉式ネットIONESSを用いて、0-50, 50-100, 100-150, 150-200, 200-300, 300-500, 500-750, 750-1000mの計8層において曳行、昼夜の動物プランクトンおよび魚類の採集を行った。採集した動物プランクトン及び魚類サンプルは、群集構造解析、高次分類群組成解析、バルクバイオマス測定、炭素・窒素全量測定、窒素・炭素安定同位体比測定を行った。また、生物試料の他に海水の採水をあわせて実施した。尚、海水の硝酸イオン中($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)の窒素安定同位体比について脱窒菌法 (Casciotti et al., 2002; Sigman et al., 2001)を用いて東京農工大学、カリフォルニア大学デービス校にて測定した。

(2)では、海洋低次生態系モデルに窒素安定同位体比を組み込み、特に硝化反応過程の検証を実施した。

4. 研究成果

(1)本研究では特にメソ動物プランクトン群集を中心に群集構造と動態の季節的な違いについて、同位体比を使って動物プランクトン群集の栄養動態が時空間的にどのように変動するのか解析と検証を行った(図1)。表層と中深層の群集構造の比較から、

表層動物プランクトン群集には海域間で異なる基礎生産者を起点とする食物網構造があること、中深層動物プランクトン群集でも表層の食物網構造の影響を引きずっていること、また中深層動物プランクトン群集では肉食化傾向が強くなること、が示唆された。

硝酸塩濃度と海水中の硝酸イオン中の窒素同位体比について、S1では水深50m以浅の硝酸塩が極めて低濃度であった脱窒菌法では測定できなかったものの、K2では典型的な季節パターンがみられた。一方で、S1では季節的な変化が明確には見られなかった。また、硝酸塩濃度に対しての $^{15}\text{NO}_3^-$ の値はK2と比べ低いことが分かる(図2)。この理由として、窒素固定の影響を受けた海水(例えば、S1より南側の海域では窒素固定が起こっている、e.g. Shiozaki et al., 2009; 2010)によって、動物プランクトンを含めて全体的に ^{15}N が低くなっていると考えられた。更にS1

などの貧栄養海域では、表面海水のレジデンスタイム（水の滞留時間）や降水、窒素固定が複雑に影響していることが推察された。

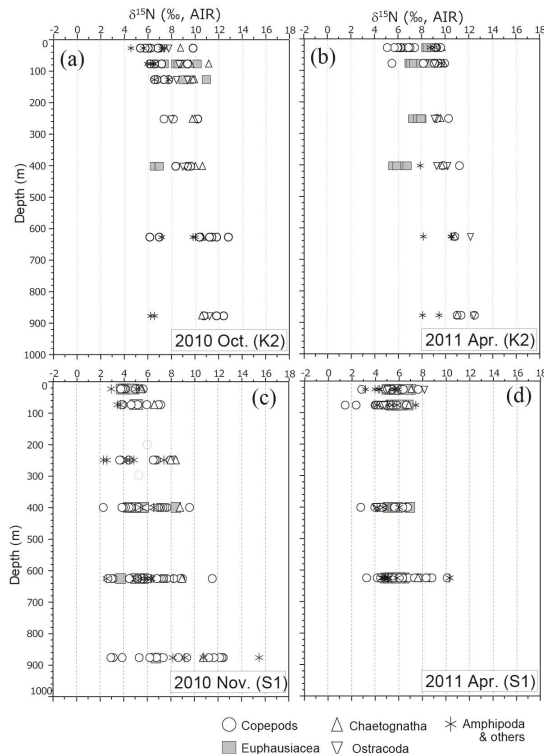


図1 秋季（2010年10~11月）及び春季（2011年4月）におけるK2（上段）及びS1（下段）の動物プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ の鉛直プロファイル

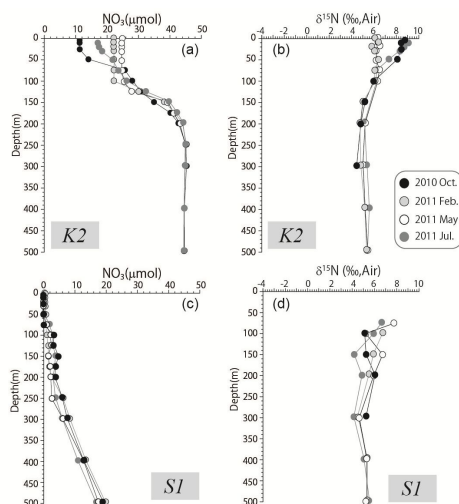


図2 硝酸塩濃度及び硝酸イオン中の $\delta^{15}\text{N}$ の季節変化と鉛直プロファイル。K2（上段）S1（下段）。

動物プランクトンと共に採集されたマイクロネクトンの同位体比において、 $\delta^{13}\text{C}$ ではK2とS1の間に大きな差が見られないものの、S1の中深層の $\delta^{15}\text{N}$ 値がK2と比べ低かった。これらの魚類は主にオニハダカ属（Cyclothone）であったが、同深度の動物プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ 値も低いことから、上層の窒素固定系などの影響が中深層の食物連鎖にも影響していることが示唆された。

本研究では更に、K2及びS1の結果に、南極海、アラスカ湾、親潮水塊、黒潮系暖水塊の4海域で得られた測定結果を合わせ、食物連鎖全体が持つ $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ について統計的な比較を行った。その結果、海域間に有意な差が無く、一定の共通式で表せる事が分かった（図3）。すなわち、我々がこれまで調べた限られた食物連鎖の範囲では、生態系や栄養塩環境（干潟などの富栄養化した環境や、極度に窒素が欠乏した環境を除く）、また生物種によらず $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ に大きな差が見られない＝傾度に類似性があることが分かった。この背景として、自然界の食物連鎖中の摂餌プロセスの同位体分別（ $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ ）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ことが強く示唆された。

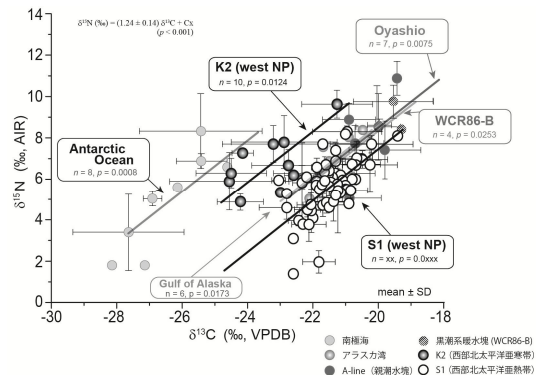


図3 異なる6海域における食物連鎖について共分散解析(ANCOVA)を用いた $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の比較

（2）海洋低次生態系モデルを用いた研究では、海洋で生成する N_2O の生成プロセスを定量的に調べるために、海洋低次生態系- N_2O アイソトプマーモデルの開発と改良を実施した。SP値(Site Preference：分子内の同位体比の差を見る指標)の感度実験の結果から、K2の N_2O の生成は、ほぼ硝化反応でのみ行われていることが確認された。また、 N_2O 生成はアンモニア酸化細菌(AOB)単独で行われているのではなく、アンモニア酸化古細菌(AOA)とAOBの両者により生成していること、特にAOAの寄与が高いことが定量的に示唆された。

今後の研究展望として、本研究で得られた“ $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C} = \text{一定}$ ”と、数値モデルによる空間的な同位体比マップを組み合わせる事によって、一次生産者や食物網内の生物の同位体比がある程度推定が可能となると考えている。

<引用文献>

Aita, M.N., K. Tadokoro, N.O. Ogawa et al. (2011) Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments. *Featured Article in the J. Plankton Res.*, 33, 1629-1642.

Casciotti, K.L., D.M. Sigman, M. Galanter Hastings et al. (2002) Measurement of the oxygen isotopic composition of nitrate in seawater and freshwater using the denitrifier method. *Anal. Chem.*, 74, 4905-4912.

Fry, B. and E.B. Sherr (1984) ^{13}C enrichments as indicators of carbon flow in marine and fresh water ecosystems. *Contribution in Marine Science*, 27, 13-47.

Minagawa, M. and E. Wada (1984) Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between ^{15}N and animal age. *Geochim Cosmochim Acta.*, 48, 1135-1140.

Shiozaki, T., K. Furuya, T. Kodama et al. (2010) New estimation of N-2 fixation in the western and central Pacific Ocean and its marginal seas. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 24, doi:10.1029/2009gb003620.

塩崎拓平、武田重信、古谷研 (2009) 熱帯・亜熱帯貧栄養海域における新生産の評価、*海の研究*, 18, 213-242.

Sigman, D.M., K.L. Casciotti, M. Andreani et al. (2001) A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater. *Anal. Chem.*, 73, 4145-4153.

Wada, E. (2009) Stable isotope fingerprint, *Jpn. J. Ecol.*, 59, 259-268.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

Yoshikawa, C., H. Abe, M.N. Aita, F. Breider, K. Kusunuki, N.O. Ogawa, H. Suga, N. Ohkouchi, S.O. Danialache, M. Wakita, M.C. Honda, S. Toyoda and N. Yoshida (2015) Insights into the production of nitrous oxide in the western North Pacific using a marine ecosystem isotopomer model. *J. Oceanogr.*, (Submitted). 【査読有】

Wada, E., R. Ishii, M.N. Aita, N.O. Ogawa, F. Hyodo, A. Kohzu and Y. Yamada (2013) Possible ideas on carbon and nitrogen trophic fractionation of food chains: A new aspect of

food-chain stable isotope analysis in Lake Biwa, Lake Baikal and Mongolian grasslands. *Ecol. Res.*, DOI: 10.1007/s11284-012-1024-7. 【査読有】

和田英太郎、野口真希、石井励一郎 (2013) 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*, vol.65, No.3, 309-331. 【査読無】

Wada, E., K. Oki, S. Yoshikawa, P.L. Parker, C.V. Baalen, G.I. Matsumoto, M.N. Aita and T. Saino (2012) Carbon and nitrogen isotope ratios of aquatic algae, with emphasis on cyanobacteria and marine phytoplankton. *Plankton & Benthos Res.*, 7 (3), 135-145. 【査読有】

[学会発表] (計32件)

1. 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*、幕張メッセ、千葉県千葉市、2015年5月27日。

2. 和田英太郎、野口真希：A-lineの観測(2009年)が起点となった「新食物連鎖解析法」とその次世代モニタリングシステム構築への提言、2015年度日本海洋学会、シンポジウム S8 A-line モニタリングから海洋モニタリングの可能性を探る、東京海洋大学、東京都港区、2015年3月25日。

3. Kobari, T., R. Nakamura, M. Kitamura, M.N. Aita, M.C. Honda: Roles of mesozooplankton community on mesopelagic biogeochemical cycles in the north western Pacific Ocean. *ASLO 2015 Aquatic Sciences Meeting*, Granada, Spain, Feb. 22-27, 2015.

4. 野口(相田)真希、喜多村稔、小針統、和田英太郎：窒素・炭素安定同位体比を用いた西部北太平洋域の海洋低次生態系食物網の解析、2014年度日本海洋学会秋季大会、長崎大学、長崎県長崎市、2014年9月14日～16日。

5. 小針統、野口(相田)真希、中村理絵、喜多村稔：安定同位体比を使った動物プランクトン群集の食物網構造比較、2014年度日本海洋学会秋季大会、長崎大学、長崎県長崎市、2014年9月16日。

6. Aita, M.N., M. Kitamura, T. Kobari, R. Ishii, E. Wada: Nitrogen and carbon stable isotopic studies of food chains at lower trophic levels in the western north Pacific. *2014 Ocean Sciences Meeting*, Honolulu, HI, U.S.A., Feb. 23-28, 2014.
7. Aita Noguchi M., R. Ishii, E. Wada: Relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments. *APN International mini-workshop on the western Pacific marine biogeochemical environment variability*, Miyoshi Memorial Auditorium, JAMSTEC Yokohama Inst. for Earth Sciences, Kanazawa-ku, Yokohama city, Kanagawa, Japan, Feb. 3-4, 2014.
8. 吉川知里、阿部瞳、野口真希：アイソトポマーを導入した海洋生態系モデルによる西部北太平洋における溶存一酸化二窒素のメカニズムの解明、日本地球惑星科学連合、*JpGU Meeting 2013*、幕張メッセ、千葉県千葉市、2013年5月19日。
9. Kobari T., M. Kitamura, M.C. Honda: Seasonal change in abundance, stage composition and depth distribution of *Neocalanus* copepods in the Western Subarctic Gyre., *PICES 2012 Annual Meeting, North Pacific Marine Science Organization*, International Conference Center, Hiroshima city, Hiroshima, Japan, Oct. 10-21, 2012.
10. 喜多村稔：西部北太平洋の生態系/物質循環南北比較研究：動物プランクトン、*2012年度日本海洋学会春季大会*、筑波大学、茨城県つくば市、2012年3月29日。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.jamstec.go.jp/res/ress/macky/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

相田 真希 (AITA, Maki)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
観測研究開発センター・技術主任

研究者番号：90463091

(2)研究分担者

喜多村 稔 (KITAMURA, Minoru)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
観測研究開発センター・技術研究員

研究者番号：00392952

小針 統 (KOBARI, Toru)

鹿児島大学・水産学部・准教授

研究者番号：60336328

(3)連携研究者

吉川 知里 (YOSHIKAWA, Chisato)

独立行政法人海洋研究開発機構・生物地球
化学研究分野・技術研究員

研究者番号：40435839

(4)研究協力者

和田 英太郎 (WADA, Eitaro)

独立行政法人海洋研究開発機構・
JAMSTEC フェロー

研究者番号：40013578