

1B01

オルドビス紀末の大量絶滅を引き起こした環境変動： 硫黄・炭素同位体比組成からの制約

○丸岡照幸¹、上松佐知子¹、指田勝男¹、Niza Mat²

(¹ 筑波大学・生命環境系、² Geological Survey of Malaysia)

顕生代における大量絶滅のうち特に絶滅率の大きな5つのイベントは“ビッグファイブ”と呼ばれている。これらビッグファイブのうちで最初に起こったのがオルドビス紀末の大量絶滅である。このイベントは海水準の低下で特徴づけられており、大陸氷床の形成に関連していると考えられている。生物多様性の低下は海水準の低下時期（氷床発達期）と上昇時期（氷床減退期）の2回で起きたことが示されている。この海水準の下降・上昇と炭酸塩鉱物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ の上昇・下降のタイミングがよく一致していることも示されている。炭酸塩の $\delta^{18}\text{O}$ は温度の指標と考えることができ、 $\delta^{18}\text{O}$ の正方向の変位は温度低下を意味する。一方、このような $\delta^{18}\text{O}$ 正方向の変位に $\delta^{13}\text{C}$ の正方向の変位が伴われる理由は明らかではない。しかし、顕生代における大小様々な絶滅イベントは、いくつかの例外を除くと $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ の正方向の変位を伴っており(Stanley, 2010: PNAS 107, 19185–19189)、これらの変位の原因を理解することは生物多様性低下の本質を理解することに繋がると考えている。このような変位の例外には、大規模火山活動などの大異変が関与するとされ、ビッグファイブに数えあげられるペルム紀末、トリアス紀末の大量絶滅などを挙げることができる。これらのイベントにはともに $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ の負方向の変位が見いだされている。 $\delta^{18}\text{O}$ から考えるとこのようなイベントは温暖化の結果引き起こされたものであり、オルドビス紀末のイベントやその他大多数の $\delta^{13}\text{C}$ の正異常を伴うイベントとは原因が異なることが容易に推察できる。実際にオルドビス紀末には大量絶滅を起こしえるような大規模火山活動は知られていない。オルドビス紀末における温度低下に伴われる $\delta^{13}\text{C}$ 上昇の原因を理解し、それをもとにこのときにどのような環境変化が起きたのか、それらの引き金となった事象は何なのかを理解することを目的として研究を行っている。炭素同位体からの情報だけでは理解できることが限られるので、同じ試料の硫黄同位体比測定も行って議論を進める。

マレーシア・ランカウイ諸島・ラングン島に露出するオルドビス系—シルル系泥岩・砂岩を採取し、それに含まれる有機炭素・硫化物硫黄の濃度、同位体比組成を得た。これまでの研究と同じように $\delta^{13}\text{C}$ の正方向の変位を見出した。それと同期して $\delta^{34}\text{S}$ の正方向の変位を見出した。これらと炭素・硫黄濃度組成、C/S比などの情報を組み合わせて、オルドビス紀末の海洋環境について議論する。

Sulfur and carbon isotope study for understanding environmental perturbations at the late Ordovician mass extinction event

*T. Maruoka¹, S. Agematsu¹, K. Sashida¹, N. Mat² (¹ University of Tsukuba, ² Geological Survey of Malaysia)

熱水性鉄・マンガン堆積物の Mo 同位体比：太古代・原生代前期 Mo 循環への示唆

○後藤孝介¹、James R. Hein²、下田玄¹、青木翔吾³、石川晃^{3,4}
鈴木勝彦⁴(¹産総研、²USGS、³東大、⁴海洋研究開発機構)

モリブデン (Mo) やクロム (Cr) 等、環境の酸化還元状態に応答する重金属元素の安定同位体比を用いた研究により、少なくとも 30 億年前には大気中に酸素が蓄積していた可能性が指摘されている (Crowe et al., 2013 *Nature*; Planavsky et al., 2014 *Nat. Geosci.*). すなわち、従来の定説より約 5 億年以上も前に、酸素を発生させる過程が地球表層で機能していた可能性を示しており、生命進化を理解する上で重要な制約となる。

太古代・原生代前期における鉄マンガン堆積物の Mo 同位体比 ($\delta^{98/95}\text{Mo}$) は、現世海水 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ よりも有意に軽く、Fe/Mn 比と負の相関を示す (Canfield et al., 2013 *PNAS*; Planavsky et al., 2014). この $\delta^{98/95}\text{Mo}$ のトレンドは、鉄やマンガン酸化物への吸着反応に起因すると解釈されており、約 30 億年前より酸化的な海洋環境が広がっていたことを示す重要な証拠とされている。しかし、現世海水起源の鉄マンガン酸化物の均一な $\delta^{98/95}\text{Mo}$ と調和的ではない (Siebert et al., 2003 *EPSL*). そのため、吸着反応以外の過程も太古代・原生代前期の鉄マンガン堆積物 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 変動に影響した可能性がある。

太古代・原生代前期における鉄マンガン堆積物の形成には、多くの場合で、海底熱水が直接的・間接的に関与していたことが知られている (Klein et al., 2005 *Am. Mineral.*). しかし、熱水由来の Mo が、鉄やマンガン酸化物の $\delta^{98/95}\text{Mo}$ にどのような影響を与えるかは、ほとんど検証されていない。そこで本研究では、熱水に伴う鉄やマンガン酸化物の $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 変動を明らかにすることを目的に、現世海底の異なる 5 地点より採取された熱水性の鉄およびマンガン酸化物の Mo 同位体分析を行った。その結果、多くの試料が、海水起源の鉄マンガン酸化物と同程度の値を示し、海水に溶存する Mo の吸着反応で説明できることが分かった。しかし、海水起源の鉄マンガン酸化物よりも、 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ が大きく変動することを確認した。このことは、熱水由来の Mo が、酸化物中の $\delta^{98/95}\text{Mo}$ に少なからず影響することを示唆する。太古代や原生代前期の海水 Mo 濃度は、現世よりも有意に低い (e.g., Scott et al., 2008 *Nature*). 従って、太古代・原生代前期における鉄マンガン堆積物では、海水 Mo による“緩衝作用”が働かず、熱水由来の Mo により、 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ が大きく変動した可能性がある。発表では、得られた知見に基づき、太古代・原生代前期の Mo 循環について議論する。

Molybdenum isotopes in marine hydrothermal iron/manganese deposits: Implications for the Archean and Paleoproterozoic Mo cycle.

*K.T. Goto¹, J.R. Hein², G. Shimoda¹, S. Aoki³, A. Ishikawa^{3,4}, K. Suzuki⁴ (¹GSI, ²USGS, ³Univ. of Tokyo, ⁴JAMSTEC)

1B03

(Keynote)

海洋堆積物の重元素の同位体組成が語る表層環境変動

○黒田潤一郎^{1,2}、鈴木勝彦²、大河内直彦²

(¹ 東京大学大気海洋研究所、² 海洋研究開発機構)

海洋堆積物中に保存される多様な元素の同位体組成は、その元素の海洋中の挙動や含まれる鉱物相によって、さまざまな現象の指標となる。私たちの研究グループは、これまで鉛やオスミウムなどの同位体組成を用いて、地質学的時間スケールでの海洋における諸現象の理解に活用してきた。

1. 大規模噴火の痕跡

オスミウム同位体記録が最も得意とする分野は、マントルや地球外からの物質供給のトースである。海洋のオスミウムは、大雑把に放射性起源同位体に富む大陸地殻起源のものと、放射性起源同位体に枯渇するマントル起源および地球外物質起源のオスミウムの3つの供給源を持ち、そのバランスで同位体比が変化する。大規模な火山活動や天体衝突が起これば、海水のオスミウム同位体比が急激に低下することが予想される。ただし、天体衝突の場合はイベントの後にオスミウム同位体比が数万年程度で元の値に戻るのに対し、火山噴火の場合は、マントルからのオスミウム供給が続く限り影響が出続ける。私たちの研究グループは、上部三畳系～下部ジュラ系の遠洋性堆積物（犬山チャート）中のオスミウム同位体比を測定したところ、三畳紀の後期ノール期～レート期にかけて、中央大西洋火成岩岩石区の噴火に由来すると思われるオスミウム同位体比の低下が認められた(Kuroda *et al.*, 2010)。これは、三畳紀末期の大量絶滅層準よりやや古く、この大規模噴火と大量絶滅が同時であったとする従来の見解とは一線を画す結果となった。一方、白亜紀の海洋無酸素事変 OAE では、これまで様々な場所でオスミウムや鉛同位体組成が分析され、いくつかの巨大火成岩岩石区の噴火と OAE がほぼ同時期に起こったことが示唆されている(Kuroda *et al.*, 2007, 2011; Turgeon & Creaser, 2008; Tejada *et al.*, 2009; Du Vivier *et al.*, 2014, 2015)。本講演では、最近の動向を紹介したい。

2. 大西洋と地中海の海水交換の歴史

隣接する海域間で堆積物のオスミウム同位体比を比較することで、その海域間の海水の交換の歴史について検討することができる。地中海は非常に複雑な地殻変動と環境変動の歴史を持つ。その中でも、とりわけユニークな現象が中新世末（～6 Ma）に起こる。それは、わずか 70 万年間に厚い蒸発岩が地中海に広く堆積するもので、メッシニアン塩分危機と呼ばれる。このイベントで沈殿した塩は、全海洋の塩のおよそ 6%に相当すると見積もられる。この時、大西洋と地中海の海水交換が途絶えたと言われるが、その全容はほとんど未解明である。地中海と大西洋の海底コア試料のオスミウム同位体比を測定した結果、メッシニアン塩分危機において地中海のオスミウム同位体比が大西洋のそれと比較して極端に低くなっていた(Kuroda *et al.*, 2016)。このことは、メッシニアン

塩分危機で大西洋と地中海との海水の交換が著しく低下したことを示唆する。同位体比の低いオスミウムは、流域の超苦鉄質岩がその起源ではないかと疑われる。簡単なボックスモデルの計算では、大西洋からの海水供給は、メッシニアン塩分危機の前に比べて1/30程度まで低下していたことになる。この結果は、先行研究のストロンチウム同位体組成の結果とも整合的だ。しかし、塩分危機の前にはオスミウムとストロンチウム同位体比の間に大きな違いが認められる。それは、東地中海フローレンスライズの掘削コアのオスミウム同位体比である。ここでは、メッシニアン塩分危機が始まるはるか前から低いオスミウム同位体比となっていた。これは一体何を示すのか？いくつかの可能性を挙げて、その謎に迫りたい。

3. 気候システムの変動

海洋堆積物中の粘土鉱物などのケイ酸塩成分のネオジムや鉛同位体比は、その供給源について重要な情報を与える。2009年にIODP第320次航海で掘削回収された東部北太平洋のU1334コアには、赤道太平洋で堆積した始新世-漸新世境界層が含まれていた。始新世-漸新世境界には、世界各地で底生有孔虫の酸素同位体組成に2回の明瞭なシフトが認められ、南極の寒冷化と、それに伴う新生代最初の大規模南極氷床の成長と発達を示すと考えられる。このU1334コアの始新世-漸新世境界層周辺のケイ酸塩鉱物相のネオジム同位体比を測定した結果、非常に明瞭な変化が認められた。それは、始新世後期にはアジア由来の塵（放射性起源核種に枯渇するネオジム同位体組成）が供給されていたのが、始新世-漸新世境界付近で中南米が主な塵の供給源（放射性起源核種に富むネオジム同位体組成）となるという変化であった(Hyeong *et al.* in press)。現在の太平洋では、低緯度収束帯よりも北側で主に偏西風によるアジア由来の塵が広く供給され、低緯度収束帯とその南側で貿易風による中南米由来の塵の供給が認められる。この原理を応用すると、始新世後期の東太平洋では、低緯度収束帯がU1334サイトよりも南に（ほぼ赤道付近）位置していたのが、始新世-漸新世境界付近でITCZが1°N以北に移動したことが示唆される。このITCZの北方移動は、1回目の酸素同位体比のシフトと同時期に起こっている。これが意味することは何か。私たちは、南極氷床の誕生と南極海の寒冷化のテレコネクションが鍵ではないかと考える。

【参考文献】 Du Vivier, A.D.C. *et al.* (2014) *Earth Planet. Sci. Lett.* 389, 23–33. Du Vivier A.D.S. *et al.* (2015) *Earth Planet. Sci. Lett.* 428, 204–216. Kuroda, J., *et al.* (2011) *Earth Planet. Sci. Lett.* 307, 126–134. Kuroda, J., *et al.* (2010) *Geology* 38, 1095–1098. Kuroda, J., *et al.* (2011) *Earth Planet. Sci. Lett.* 256, 211–223. Kuroda, J., *et al.* (2016) *Paleoceanogr.* 31, 148–166. Turgeon, S.C. & Creaser, R.A. (2008) *Nature* 454, 323–326. Tejada M.L.G. *et al.* (2009) *Geology* 37, 855–858.

Radiogenic isotopic records for decoding the Earth's surface environments in the geological past
*J. Kuroda^{1,2}, K. Suzuki² and N. Ohkouchi² (¹Atmosphere and Ocean Research Institute, Univ. Tokyo, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

有孔虫安定同位体組成のバラツキを活かす：海洋環境指標としての信頼性評価とアーカイブ試料の活用

○石村豊穂¹・長谷川四郎²・池原研³

(¹茨城高専, ²東北大, ³産総研・地質情報)

生物源炭酸塩、特に石灰質有孔虫は海洋に広域に生息し、殻の炭素酸素安定同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) は、過去 60 年以上にわたり世界中で環境解析に多用されてきた。一方、近年開発した微量炭酸塩の安定同位体組成分析技術 (Ishimura et al., 2004, 2008.) を活用して有孔虫の同位体組成の全貌解明を進める中で、これまでの環境解析で「ノイズ」と考えられていた「同位体比のバラツキ」が、環境指標としての有用性を検討する尺度として活用できることを見いだした (Ishimura et al., 2012.)。この尺度の一般化と応用研究への活用が期待できる中で、その汎用化に向けては高密度・広範囲の海洋試料の検討が必要であり、研究に必要な試料の収集には困難が予想された。そこでこれまで海洋から得られた膨大な環境試料に着目した。産総研/地質調査所では日本近海で得られた高密度・広範囲の貴重な堆積物試料が採取されており、「バラツキ尺度」を検討する上で、他に代えがたい有用な試料群として活用することができる。本研究の目的は、底生有孔虫の個体別同位体比分散 (バラツキ) という新しい尺度を活用して海洋底層環境指標の高精度化を試みることにある。

十勝沖・日高沖の複数地点から得られた試料を分析した結果、①これまで他地域で明らかにしてきた結果と同様に *Uvigerina* 属の酸素同位体比は地域によらず環境指標としての信頼性が高いことがわかった。また、②新たに分析した底生有孔虫種のうち、*Nonionellina labradorica* や *Bolivina spissa*, *Islandiella norcrossi*, *Globocassidulina.sp.* は、同位体値のバラツキが小さく、その値も同位体平衡値に近いことを確認し、環境指標として信頼性が高い種であると認定した。また、*B. spissa* は形態の特徴から 3 タイプに分類できることを見出したが、それぞれ酸素同位体値に大きな差はなかった。一方、③ *E. batialis* は、 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ 値が他種よりも 1~2‰ 低く、個体間のばらつきも大きいことがわかった。また同種は殻が厚く汚染度合いを判断しにくいため、環境指標としての信頼性は低いと評価した。さらに、④安定同位体組成のバラツキを活用した堆積物の再堆積評価 (=環境試料としての信頼性評価) が可能であることもわかった。

今後のさらなる検討によって、バラツキ指標を活かした環境指標の高度化をめざす。

Stable carbon and oxygen isotopic dispersions of individual foraminifera: new proxy to estimate the sea environmental condition precisely.

* ¹ISHIMURA, T., ²HASEGAWA S., ³IKEHARA, K.. (¹National Institute of Technology, Ibaraki College, ²Tohoku Univ., ³Geological Survey of Japan, AIST)

東シナ海における浮遊性有孔虫の Ba/Ca 比に基づく古塩分推定の可能性

○小平智弘¹, 堀川恵司¹, 張勁¹, 村山雅史²

(¹ 富山大, ² 高知大)

沿岸海域において、表層の溶存態バリウムは主に河川から供給されるため塩分との間に相関関係を示すことがある (Coffey et al., 1997). また、海水中の溶存態バリウムは浮遊性有孔虫に取り込まれ、種や二次的環境要因 (水温や pH) に関わらず、海水に対して一定の分配係数 (0.149 ± 0.05) で殻中に記録されることが飼育実験から明らかにされている (Lea and Spero, 1994; Hönisch et al., 2011). そのため、近年、浮遊性有孔虫の Ba/Ca 比が新しい過去の塩分プロキシとして期待されている. ただし、この浮遊性有孔虫の Ba/Ca 比 - 古塩分プロキシは、対象とする沿岸海域で、海水の Ba/Ca 比と塩分との間に相関関係が成り立ち、その関係式が構築されていることが前提となる. 本研究では、東シナ海における浮遊性有孔虫の Ba/Ca 比 - 古塩分プロキシの確立に向けて、東シナ海で海水の Ba/Ca 比と塩分の関係式の構築を試みた. また、表層堆積物を用いて、東シナ海の浮遊性有孔虫の Ba/Ca 比が表層の塩分を記録しているか評価した.

本研究では、KH-13-4 次航海 (夏季)、KS-15-6 次航海 (夏季)、KH-15-3 (秋季) 次航海で、黄海および東シナ海の海水試料および表層堆積物試料を採取した. 海水試料は採取後すぐに $0.2 \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過し、ICP-Q-MS (HP4500) で Ba/Ca 比を分析した. 表層堆積物試料は、表層に生息する浮遊性有孔虫 (*Gruber* s.s., *Gruber* s.l., *G.sacculifer*) について、殻の Ba/Ca 比を SF-ICP-MS (Element2) で分析した.

黄海および東シナ海における表層のバリウム濃度は、塩分とよく類似した水平分布を示し、黄海および北部東シナ海にバリウム濃度の高い海水が確認された. 表層 ($\leq 100 \text{ m}$) のバリウム濃度と塩分には明瞭な相関関係が見られたが、黄海と東シナ海で異なる傾きを持ち、異なる淡水の影響が示唆される. 本研究では、東シナ海において表層海水の Ba/Ca 比と塩分の関係式を構築した ($\text{Ba/Ca}_{(\text{sw})} = 50.34 - 1.358 \times \text{Salinity}$, $r^2 = 0.9$).

表層堆積物試料では、*Gruber* s.s. と *Gruber* s.l. の Ba/Ca 比に夏季の表層塩分と対応する傾向が確認された. また、それぞれの浮遊性有孔虫について石灰化時の海水の Ba/Ca 比を塩分から換算し、Ba/Ca 比の分配係数を計算すると、*Gruber* s.s. からは飼育実験に基づく結果よりも高い、反対に *G.sacculifer* では低い分配係数が示された. このことから、堆積物試料では、飼育実験とは異なる Ba/Ca 比の分配係数を持つ可能性が示唆される. そのため、東シナ海では種ごとの分配係数を求めることで、浮遊性有孔虫殻の Ba/Ca 比から過去の塩分を高い精度で推定することが可能になると考えられる.

Planktic foraminiferal Ba/Ca as paleo-salinity proxy in the East China Sea

*T. Kodaira¹, K. Horikawa¹, J. Zhang¹, M. Murayama² (¹University of Toyama, ²Kochi University)

1B06

(Keynote)

海洋酸性化がサンゴ石灰化に与える影響～父島・喜界島から得られたハマサンゴのホウ素同位体分析

○窪田薫¹、横山祐典²、石川剛志³、鈴木淳⁴、石井雅男⁵

(¹ 名古屋大学宇宙地球環境研究所、² 東京大学大気海洋研究所、³ 海洋研究開発機構高知コア研究所、⁴ 産業技術総合研究所、⁵ 気象庁気象研究所)

人間活動に伴い大気へと放出された二酸化炭素の約 3 分の 1 は海洋表層水によって吸収されたと考えられている。その結果、海水 pH は例にない速さで低下しており（海洋酸性化）、産業革命以降、すでに 0.1 低下したと考えられている。海水 pH の低下は炭酸塩飽和度を低下させるため、海洋に生息する、炭酸塩骨格を形成する様々な生物（サンゴ・貝・有孔虫・円石藻・棘皮動物など）の石灰化を阻害すると考えられている。中でも、造礁サンゴの石灰化は海洋酸性化に脆弱であることが指摘されている。これまで、海洋酸性化が造礁サンゴに与える影響の評価は一般に飼育実験を通じて行われてきており、野外において影響を評価した研究はほとんどない。環境変化に対してサンゴそしてサンゴ礁生態系がどのように適応するか、或いは影響を被るかをより良く理解するためにも野外観測は必要不可欠である。

そこで本研究では、北西太平洋に位置する小笠原諸島・父島と喜界島で得られた塊状ハマサンゴの炭酸塩骨格に対して、表面電離型質量分析器およびマルチコレクター型質量分析器を用いて過去 100 年間のホウ素同位体比 ($\delta^{11}\text{B}$) の分析を行った。測定結果は、1960 年以降のホウ素同位体比が顕著に低下していること、すなわち石灰化流体（炭酸塩骨格の素になる母液）の pH が低下していることを示唆していた。さらに、ハマサンゴに対する室内飼育実験の予想よりも早く石灰化流体の pH が低下していること（感度が高い）も分かった。サンゴは石灰化流体の pH の上方調整機構（up-regulation）を備えており、海洋酸性化に対する耐性を持つと考えられている。しかしながら、本研究の測定結果は、アラゴナイト飽和度が予想よりも早く低下しており、今後も下がり続ける可能性があることを示唆している（2050 年頃に海水の pH が 8.0 程度になった時には石灰化流体の pH は 8.3 程度まで下がる可能性がある）。従って、温暖化に代表される種々の環境ストレスに既に晒されている造礁サンゴに対して、海洋酸性化はさらなるストレスを既に与えている可能性が高いと考えられる。

Effect of ocean acidification on coral calcification – Boron isotope measurements of massive *Porites* corals collected from Chichijima and Kikajima.

*K. Kubota¹, Y. Yokoyama², T. Ishikawa³, A. Suzuki⁴ and M. Ishii⁵ (¹Inst. for Space-Earth Environmental Res., Nagoya Univ., ²Atmos. and Ocean Res. Inst., The Univ. of Tokyo, ³Kochi Core Center, Japan Agency for Marine-Earth Sci. and Technol., ⁴National Inst. of Advanced Industrial Sci. and Technol., ⁵Meteorological Res. Inst.)

特定有機化合物 C-14 と大気生成 Be-10 により明らかになった過去の世界最大のロス海棚氷崩壊イベント

○横山祐典¹、John B Anderson²、宮入陽介¹、山根雅子¹、菅寿美³、Lauren Simkins²、大河内直彦³

(¹ 東京大学大気海洋研、² ライス大学、³ 海洋研究開発機構)

ロス海は世界最大の棚氷を有しているとともに、海底に着底した西南極氷床の主な流出経路である。西南極氷床は、全てが融解すると全球的な海水準を 5m 以上上昇させる可能性があり、現在進行中の温暖化によりその安定性が危惧されている。人工衛星を使った研究などでは、海洋の水温上昇に伴って、氷床が海底に着底した最前面である接地線が溶けて後退している（つまり氷床量の減少が起きている）ことが確認されているが、観測期間が数十年と短いことから、長期のデータについての知見の収集が望まれている。かつて氷期には、ロス海を南極氷床が覆っていたことが、海底地形や陸上の限られた地点の宇宙線生成核種を使った暴露年代を用いて議論されてきているが、海洋の水温変化や気温との関係、年代決定や棚氷との関連性について、詳細は明らかになっていない。その理由は、研究地域が遠くて厳しい海域であるという事実のほか、得られる試料に正しい年代を示すプランクトンの殻が残されていないという点が挙げられる。このため、先行研究では堆積物中の全有機炭素を使った放射性炭素年代測定を行ってきた。その結果、南極氷床のロス海の周辺では、氷期が終焉した直後から融解がスタートし、比較的ゆっくりと 10,000 年ほどかけてとけたと考えられてきた。

本研究では、ロス海の海底地形／地質調査を行うとともに、新しく特定有機化合物をつかった C-14 年代測定を行った。過去の氷床縁辺変遷に関する正確な年代を得るとともに、これまでその挙動が明らかになっていなかった、棚氷の位置の特定を、大気上層で生成された宇宙線生成核種である Be-10 を使って復元した。C-14 は東京大学大気海洋研究所に導入されたシングルステージ加速器質量分析装置 (AMS) を用いて、Be-10 は同じく東京大学の 5MeV の AMS により測定された [Yokoyama et al., 2016 PNAS]。

その結果、ロス棚氷の崩壊が大規模かつ急激な崩壊がおよそ 5,000 年前というこれまでよりも 10,000 年もより現在に近い時期であったことが明らかになった。この時期は、中緯度・低緯度から報告された全球的な 3-5m の海水準上昇の時期と一致し [Yokoyama et al., 2012 GRL, Yokoyama et al., 2016 QI]、ロス海周辺の宇宙線暴露年代による陸域のデータとも整合的なため、ロス棚氷の大規模崩壊とロス海の氷床の融解が密接にリンクしていたことが明らかになった。さらにこれまで謎であった西南極氷床コアの同位体による温度復元結果の場所による相違点について、統合的な説明を加えることができた [Yokoyama et al., 2016 PNAS]。

Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene revealed from compound specific C-14 and meteoric Be-10

*Y. Yokoyama¹, J.B. Anderson², Y. Miyairi¹, M. Yamane¹, H. Suga³, L. Simkins² and N. Ohkouchi³ (¹AORI, UTokyo, ²Rice Univ., ³JAMSTEC)

石筍は鍾乳洞周辺の気温、降水量等を連続的に記録しているとされ、陸域の古気候復元試料として注目されている(e.g. MacDermott, 2004; Fairchild *et al.*, 2004)。特に、石筍の酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)を用いた研究は、世界中で活発に行われている(e.g. Wang *et al.*, 2001)。近年、石筍の ^{14}C は、年代測定のツールとしてよりも、IntCal 曲線(大気の ^{14}C 変動)と比較することにより、過去の水循環を知るための有効なプロキシとしての可能性が指摘されている。石筍中の ^{14}C は、石灰岩母岩に由来する ^{14}C -free (Dead)炭素の混入によって希釈されており、この Dead 炭素の寄与率(Dead Carbon Fraction: DCF)は、気温の変化、降水量、滴下水の水系、洞内の換気状態、土壤大気の pCO_2 などの影響を受けて変化する(e.g. Griffiths *et al.*, 2012; Noronha *et al.*, 2014)。石灰岩母岩の溶解システムとして、1) 開放系(DCF=0%): 水に溶存する炭素と土壤 CO_2 が絶えず反応し、溶存炭素と土壤由来炭素との間で同位体平衡が成り立っている、2) 閉鎖系(DCF=50%): 石灰岩母岩の水への溶解が土壤 CO_2 とは切り離された状態で生じている、の2つの場合があり(Hendy, 1971)、実際の滴下水、石筍の DCF はその時の石灰岩母岩の溶解システムの情報を反映し、0~50%の値を示す。

中国の Hulu Cave 石筍 H82 の DCF は Southon *et al.* (2012)により $5.4 \pm 0.7\%$ と報告されている。この Hulu Cave 石筍は、DCF 補正した ^{14}C 値が IntCal データにほぼ一致することから、気候変動によって DCF は変化せず、大気 ^{14}C を示す値として有効として、すでに IntCal13 にコンパイルされている。一方、バハマの Bahama 石筍 GB89-24-1 の DCF は $22.7 \pm 5.9\%$ とかなり大きい DCF が報告されている(Hoffmann *et al.*, 2010)。この Bahama 石筍の ^{14}C 変動は、IntCal 曲線からずれることがわかっている。さらにまた、中国の Heshang Cave 石筍 HS4 の DCF は $10.3 \pm 1.5\%$ であり、温暖・湿潤期には DCF が大きくなることが報告されている(Noronha *et al.*, 2014)。Noronha *et al.* (2014)は、DCF の変動が $\delta^{18}\text{O}$ から求めた過去の降水量の変化と一致することから、温暖・湿潤期は降水量が増加し、土壤湿潤度が増加(saturated)したために、石灰岩母岩の溶解システムがより閉鎖系となり、石筍の DCF が増加したと結論づけている。

我々は、静岡県の大井岩洞内の滴下水の ^{14}C を測定し、滴下地点によって、滴下速度、 Mg/Ca 比、 ^{14}C 濃度が異なること、大井岩洞の滴下水は、水の通り道を持ち、降雨に反応する性質をもっていること、滴下水中の ^{14}C は降水量と相関しており、降水量が多いと、滴下水中の ^{14}C が高く(DCF が小さく)なる傾向があることを明らかにした(Minami *et al.*, 2015)。また、滴下水の分析を行った地点で得られた石筍(成長中のものを切断、7 cm 長)の ^{14}C を分析した結果、最表面部の DCF は $11.5 \pm 0.3\%$ と、滴下水の DCF とほぼ同じであり、上述の Heshang Cave 石筍に近い値であることがわかった。これまでの石筍の DCF 報告例から、大きい DCF をもつ石筍は、成長期間中の DCF が一定ではなく、気候によって DCF が変化した可能性がある。実際に、大井岩洞石筍の DCF は変動しており、温暖期に DCF が小さくなる傾向が見られた(Noronha *et al.* (2014)とは逆の傾向、滴下水とは同じ傾向)。本発表においては、この大井岩洞石筍の DCF 変化について、 $\delta^{18}\text{O}$ 値、 Mg/Ca 比、 Sr/Ca 比、 Cd/Ca 比、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値の結果と比較しながら議論し、石筍の DCF 変化が降水量のプロキシとなり得るかについて考察する。

Possibility of the precipitation reconstruction using DCF change of speleothem. ○M. Minami¹, T. Kato², M. Tokumaru³, K. Horikawa⁴, T. Nakamura¹ (¹ISEE, Nagoya Univ., ²Grad. Sch. of Environ., Nagoya Univ., ³Sch. of Sci., Nagoya Univ., ⁴Faculty of Sci., Toyama Univ.)

1B09

ドームふじアイスコア中の硫黄同位体分析による硫酸エアロゾルの起源推定

○植村立¹、眞坂昂佑¹、松本理誠¹、植村美希¹、飯塚芳徳²、
平林幹啓³、本山秀明³

(¹ 琉球大理、² 北大低温研、³ 国立極地研)

硫酸エアロゾルは、直接・間接効果によって気候変動に影響を与える物質である。その硫黄安定同位体比 ($\delta^{34}\text{S}$) は、起源ごとに特有の値を持つとともに、酸化過程による分別によって変動することも知られている。したがって、アイスコアの $\delta^{34}\text{S}$ 値から、過去数万年スケールの硫酸エアロゾルの変動メカニズムや起源推定が行える可能性がある。唯一の先行研究では、現在の間氷期（完新世）における $\delta^{34}\text{S}$ 値が現在の表面積雪の観測値 (Patris *et al.*, 2000) よりも 3-6‰低く、内陸への輸送・酸化過程における同位体分別の可能性が指摘されていた (Alexander *et al.*, 2003)。そこで、輸送過程における分別効果を検証するために、東南極の沿岸から内陸にかけて表面積雪の $\delta^{34}\text{S}$ 測定を行った。得られた東南極の $\delta^{34}\text{S}$ 値は、広範囲にわたって均一な値 (15.7 ± 2.2 ‰) を示した。これは、現在の南極においては、輸送効果が小さく、 $\delta^{34}\text{S}$ 値は主として起源の値を反映していることを示唆している (Uemura *et al.*, 2016)。本研究では、最終氷期から完新世にかけての氷床コアの $\delta^{34}\text{S}$ を測定し、硫酸エアロゾルの変動メカニズムの解析を行った。

ドームふじ基地で採取されたアイスコア (DF1) から 35 試料の $\delta^{34}\text{S}$ を測定した。アイスコア試料は、溶液を濃縮後、 BaSO_4 としてスズ箔カップ内に直接蒸発乾固し、元素分析計-安定同位体比質量分析計 (EA-IRMS) を用いて $\delta^{34}\text{S}$ を測定した。

DF1 コアの完新世の $\delta^{34}\text{S}$ 値は、現在の東南極表面積雪の値 (Uemura *et al.*, 2016) と誤差範囲で一致していた。これは、完新世に低い $\delta^{34}\text{S}$ 値が観測されている Dome C コア (Alexander *et al.*, 2003) とは異なる傾向である。また、DF1 コアの $\delta^{34}\text{S}_{\text{nss}}$ は、最終氷期から完新世にかけての温暖化に対応して、高くなる傾向を示した。この氷期と間氷期の変動幅は先行研究とおおよそ整合的であった。Termination I においては、複雑な数千年スケールの変動パターンがあった。

参考文献: Alexander, B., *et al.*, (2003), *J Geophys Res-Atmos*, 108(D24), 4786; Patris, N., R. J. Delmas, and J. Jouzel (2000), *J Geophys Res-Atmos*, 105(D6), 7071; Uemura, R., K. Masaka, K. Fukui, Y. Iizuka, M. Hirabayashi, and H. Motoyama (2016), *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5878, doi:10.1002/2016GL069482.

Sulfur isotope measurement of sulfate aerosols in an Antarctic ice core

*Uemura, R.¹, K. Masaka¹, R. Matsumoto¹, M. Uemura¹, Y. Iizuka², M. Hirabayashi³ and H. Motoyama³ (¹Univ. of the Ryukyus, ²Hokkaido Univ. ³Nat. Inst. of Polar Research)

北極海カナダ海盆西部域に流入する陸源碎屑粒子の
Sr-Nd 同位体比と化学組成の年変化竹内晟也¹、○浅原良浩¹、原田尚美²、小野寺丈尚太郎²、長島佳菜²
(¹名古屋大・院環境、²JAMSTEC)

北極海のチュクチ海陸棚からカナダ海盆の海域は、北太平洋側から北極海への陸源物質の流入口であるベーリング海峡の北に位置し、北極海全体の物質循環を把握する上で重要な海域の1つである。近年、海氷減少に伴う北極海の栄養塩分布や生物生産の変化、海洋生態系の変化が報告されている。これらの変化を議論する上で、周辺大陸などからの陸源物質の流入の定量的評価は重要であるが、この海域の物質循環の詳細に関しては不明な点が多い。近年のカナダ海盆西部域のセディメントトラップの観測では、沈降粒子の60~80%がアルミノ珪酸塩碎屑粒子 (lithogenic material: LM) であること、夏季および極夜が始まる11月頃に沈降粒子フラックスが高いことが明らかになっている (Watanabe et al., 2014)。しかし、この沈降粒子の起源や年変化の要因の詳細は未解明である。本研究では、この沈降粒子中のLMに注目し、Sr、Nd 同位体比と希土類元素を含む微量元素の組成を指標として、LMの起源とその起源物質のフラックスの推定、および年変化の要因について検討した。

試料は、カナダ海盆西部域 St. NAP (75°N 162°W、水深 1975 m) のセディメントトラップにて、2010 年 10 月~2011 年 9 月に水深 180 m および 1300 m で約 2 週間ずつ採取された沈降粒子である。この試料 10~100 mg に対し、酢酸、塩化ヒドロキシルアミン、炭酸ナトリウム、過酸化水素を用いて自生成分や生物起源成分を除去し、残渣を LM 成分とした。LM 成分に HF 分解、化学分離などの前処理を施した後、TIMS で Sr、Nd 同位体比、ICP-MS で希土類元素 (REE) を含む微量元素の濃度の測定を行った。

St. NAP 沈降粒子中の LM の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比、 ϵ_{Nd} 値および REE 存在度パターン (e.g. Sm/Nd, Dy/Yb) は、水深 180 m、1300 m の試料ともにカナダ北部のマッケンジー川起源物質 (MK) の値に類似していることから、この LM には MK が大きく寄与していることが明らかとなった。さらに、ベーリング海堆積物の主要構成成分であるアラスカのユーコン川起源物質 (YUK)、北東シベリア起源物質 (NES) の寄与も確認された。LM 中の V/Ga、Co/Ga などの微量元素組成もこの 3 成分の混合を強く支持するものであった。

水深 180 m における年変化は、沈降粒子フラックスの小さい冬季 (2010 年 12 月~2011 年 3 月) に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高く ϵ_{Nd} 値が低いが、フラックスの大きい 2010 年 11 月および夏季 (2011 年 4 月~8 月) には $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が低く ϵ_{Nd} 値が高かった。この変動要因を明らかにするため、Sm/Nd 比と ϵ_{Nd} 値の関係から見積った LM 各成分の寄与率と LM フラックスから、LM 各成分のフラックスを計算した。その結果、MK は年中 2~20 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ とほぼ一定であるのに対し、YUK と NES は冬季にはそれぞれ 1~4 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 、0~5 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ と小さいが、11 月および夏季にはそれぞれ 5~32 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 、2~18 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ と大幅に増加していたことが明らかとなった。この YUK と NES のフラックスの増加は、チュクチ海陸棚域に堆積している YUK と NES 起源の碎屑物が、ブラインや storm-mixing、海洋渦などにより再懸濁され、カナダ海盆西部に流出したことを反映している可能性がある。一方、水深 1300m では、LM フラックスは年変動しているにも関わらず、各成分の寄与率は年間を通してほぼ一定 (MK 30~40%、YUK 10~30%、NES 40~60%) である。カナダ海盆の深部 (水深 1300m) に流入する陸源物質の混合・均質化は表層 (水深 180m) に比べより進んでいると考えられる。

Seasonal variation in Sr and Nd isotope ratios and chemical compositions of terrigenous matter flowing into the western part of the Canada Basin of the Arctic Ocean

S. Takeuchi¹, *Y. Asahara¹, N. Harada², J. Onodera², K. Nagashima² (¹Nagoya Univ., ²JAMSTEC)