

令和元年6月9日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247086

研究課題名(和文) NADWの初期発達史：太平洋流入仮説の提唱から検証まで

研究課題名(英文) Early history of NADW: proposal and verification of Pacific inflow hypothesis

研究代表者

長谷川 卓 (Hasegawa, Takashi)

金沢大学・自然システム学系・教授

研究者番号：50272943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：世界各地の8つの始新世の深海掘削コアを用いて遠洋性バライト及び炭酸塩付随硫酸(CAS)を抽出し、その硫黄同位体比($d_{34}S$)を測定した。遠洋性バライトは極めてまれで、当時のNADWをトレースする素材にはならなかった。50Maの $d_{34}S$ 急上昇イベントはバライトとCASのどちらにも検出されなかった。海水の $d_{34}S$ は51-41Maの期間に漸進的に上昇した。バライトとCASの両方を検出した試料における両者の比較からCASが過去の海水の $d_{34}S$ プロキシとして機能することが解った。世界海水の $d_{34}S$ は51-47Maには均質だが、45-40Maは南北傾斜を見せる。北極海アウトフロー水が影響した可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

始新世の海水の $d_{34}S$ 組成は従来赤道域の試料のみから評価されてきたが、初めて中高緯度域の試料を分析し、世界中が同様な変動をすることを実データで明らかにした。層序学的マーカーと目されていた約50Maの $d_{34}S$ の急激な変化が、実際は約10myrの期間を要する漸進的な変化で、層序学的有用性に問題がある事を提示した。また45-40Maの間には約1.5‰の明瞭な $d_{34}S$ の南北傾斜があり、当時の海水にグラジエントがあったことが解った。「硫黄は海水中で普遍的存在だから、同位体比もほぼ均一」という考えが成り立たず、むしろ古海洋学的議論のためのツールとなり得ることが解った。今後研究展開が大きく変わると期待される。

研究成果の概要(英文)：Pelagic barite and carbonate-associated sulfate were extracted and their sulfur isotope values are studied from deep sea cores from various 8 deep sea core sites of the world. Expected dramatic shift as short as 1 myr discussed for sea water sulfate across 50 Ma was not observed both in the barite and CAS media. Sulfur isotope value of sea water gradually increased through 51-41 Ma. The samples that yielded both barite and CAS indicated CAS had a potential for proxy of $d_{34}S$ of paleo-sea water. Global sea water was homogeneous in terms of $d_{34}S$ through 51-47 Ma, however, north-south gradient was apparent through 45-40 Ma. Arctic Outflow water is possible candidate to explain this gradient.

研究分野：古環境学

キーワード：硫黄同位体比 炭酸塩 バライト 深海掘削 始新世

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

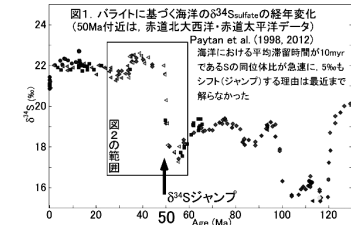
1. 研究開始当初の背景

(1) 始新世という時代の重要性

「温室地球の寒すぎる極域」というパラドクスは、現在でも気候モデルでは未解決な武器な問題として残っている。過去の温室期を AGCM などのモデルで再現すると、極域は実際の証拠(化石や化学プロキシ等)より寒冷になってしまう。温暖化が進んだ後の地球の両極は、モデル予測よりも遥かに高温かもしれないのだ。過去の温室期研究の重要性はここにある。「温室期」といえば白亜紀のイメージだが、IPCC 第五次報告では過去の温暖化極相として始新世だけが議論されている。2009 年以降 EECO (初期始新世温暖化極大) 後の地球寒冷化に関する研究が多数公表され(以下詳述)、知識量が飛躍的に増し、「パレオ」分野から地球環境変動の議論に貢献する土台が整いつつあった。

(2) 硫黄同位体比ジャンプの謎

海洋に溶存する SO_4^{2-} の平均滞留時間は約 10myr である。その膨大な量にも関わらず約 50Ma に $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ が約 5‰ も正シフトしたことが先行研究で示されていた(Paytan et al., 1998)。長年原因不明で「謎のジャンプ」だったが、IODP 北極海掘削(ACEX)で、黄鉄鉱を高濃度で含む 50-45Ma の堆積物が発見され(Ogawa et al., 2009, EPSL)、この謎を解く重要なヒントが提供された。当時の北極海と外海の接続はウラル大陸海と北部北大西洋のみで、後者はグリーンランドスキャンジナビアの分裂と連動して水深が深まりつつあった。黄鉄鉱を沈積した後の、 ^{34}S が濃集した海水が、北極海からこのゲートウェイを通じて北大西洋にあふれ出したのではないかとという仮説を立てる背景となった。



(3) 始新世における NADW (北大西洋深層水) の前駆的発達の前兆

NADW は緯度方向の熱輸送で本質的に重要な役割を担い、その強弱は気候を根本的に左右する。Hohbein et al. (2012) は NADW の沈込み開始が 50-49Ma であることを明らかにし、従来見解(35Ma)より大幅に古くなった。当時のパナマ・ゲートウェイ(南北アメリカ大陸を分ける海水の通過経路)は中層水を通過させるほど深かった可能性があり、古海洋学者は「初期 NADW はどのように動いたのか」の再検討を始めた。太平洋流入説を含め NADW 初期発達史の議論が活発になることが予測された。南太平洋高緯度域は深層水ソースを供給するほど寒冷でなかったため(Hollis et al., 2012)、50Ma 以降の主要な深層水は現在と同様ウェッデル海で形成される南洋起源深層水(Robinson et al., 2010)と初期 NADW だけであり、世界の海底環境そして地球表層環境は両者の「陣地争い」に翻弄されていた可能性が出てきた。

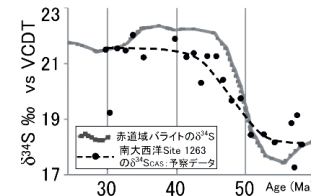


図2. 予察データ: 南大西洋表層水を反映するCASの $\delta^{34}\text{S}$ 値。北大西洋・太平洋の中層水を反映するパライトの $\delta^{34}\text{S}$ データと乖離する区間(50-34Ma)がある。CAS分析手法は確立済。

2. 研究の目的

「NADW は形成当初、南大西洋ではなく、太平洋赤道域に流入していた」という作業仮説を立て、EECO~始新世末までの環境諸現象の包括的説明を試みることを目的とした。そのための不可欠のデータとして、海洋の硫黄同位体比を用いることとした。過去の海水に含まれる硫酸イオンの硫黄同位体比を分析する材料として、遠洋性のパライト(重晶石)と、炭酸塩の結晶格子に取り込まれる炭酸塩付随硫酸(CAS)がある。これらの両方を世界の多数のサイトの深海コアから解析することで、この目的を達成しようとした。

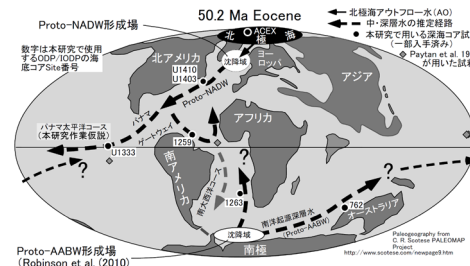


図3. 北極海アウトフロー(AO)を取込んで発達するNADWの移動経路(北太平洋コース)を仮説として提案する。CAE時には一時的に太平洋流入が止まり、現在と同様の南大西洋コースを移動した可能性がある(本研究での検証の対象)。本研究で、その流入経路を検証するため、●で示した掘削試料を「年代断面(age transect)」の方法で研究する。

予察研究では、ODP Site 1263 の CAS の $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ ($\delta^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$: 表層水の $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ を反映)を求め、パライトの $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ 曲線($\delta^{34}\text{S}_{\text{barite}}$: 酸素極小帯付近の海水の $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ を反映)と比較(図 2)。正シフトはパライトより漸移的で、50-34Ma に明瞭な乖離があった。均質と思われる膨大な海水 SO_4^{2-} リザーバに硫黄同位体比勾配が存在していた。黄鉄鉱除去のため常に外洋より高めに $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ が保たれていた北極海から AO が流出して NADW に包含され、北大西洋=>赤道太平洋と移動したと仮定すればこれらを統一的に説明できる(図 3: 北大西洋・太平洋赤道の酸素極小帯はソースに近いから $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ が高く、混合を経てから到達する Site 1263 の表層はそれより低い値となる)。北極海の黄鉄鉱埋積量から推定される $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfate}}$ シフト幅は 3‰ (Ogawa et al. 2009)で、本予察研究と一致していた。

3. 研究の方法

(1) 試料

赤道太平洋の IODP Exp. 320/321 で採取された Sites U1331, U1332, U1333, 南西オーストラリア沖インド洋南東部の同 Exp. 369 の Sites U1513, U1514 (Holes A,C) および U1516, 北大西洋の同 Exp. 342 の Site U1410 (Hole A), 南極海の ODP Leg 113 Site 690 (Hole B), そして北大西洋西部の同 Leg 171 Site 1049 (Holes A,B) の合計 5 海域, 9 サイトの深海コアを用いた。これらのコアのうち、赤道太平洋のものは北海道大学の沢田健博士から供給されたものである。また赤道太平洋, 南西オーストラリア沖, および北大西洋の試料は、乗船研究の際に間隙水を搾り取った後に残った残渣(Squeezed cake と俗称される)である。従って、間隙水の地球化学的特徴と直接比較することができ、堆積後の続成作用の有無を考察する上で重要であった。

これらの年代については、各研究航海の Initial Report 等で総括されているが、使用している年代モデルが異なるため、直接対比しにくい状況にあった。そこで全てを Geologic Time

Scale 2012 (Gradstein et al., 2012)を用いて補正を行った上で、年代軸を設定した。

(2) 分析手法

分析用の CAS およびバライトの抽出に関しては、長谷川は海外の研究協力者である Adina Paytan 博士を訪問し、分析手法の指導を受け、さらにそれを自分の研究室で再構築した。研究室での分析手法の構築は、長谷川研究室のポスドクの外山浩太郎、大学院生の長谷部桂一朗、および中瀬千遥が中心になって進めた。また抽出したバライトおよび処理前の試料から抽出した浮遊性有孔虫殻の一部は、電子顕微鏡で観察を行い、前者に関しては遠洋性バライトであることの確認を行い、後者については続成によって生じた方解石がどの程度の量存在するかを評価するための目安とした。分析についての詳細は紙面の関係上割愛する。

4. 研究成果

本研究を進めるにあたり、CAS とバライトを用いて硫黄同位体比を分析するのであるが、それぞれに本質的な問題があった。まず、バライトについてである。遠洋性バライトは、生物生産性の高い場所で、有機物分解の際に形成されると推定されている。従って過去の研究では生物生産性が高かったと思われる場所で堆積した堆積物から抽出されてきた。本研究では生産性が高かったと思われる赤道太平洋の試料からは約半分の試料からバライトを回収することができたが、他のサイトでバライトを回収できたのは、非常に限られた層準であり、想定した通りの研究を進めることができなかった。遠洋性バライトは、想定していたよりも遥かにレアな物質であり、深海掘削試料を用いて遠洋性バライトの $\delta^{34}\text{S}_{\text{barite}}$ の連続層序を構築することは、特別に条件が良くない限り不可能であることが判った。従ってこれを用いて NADW をトレースするという当初の目標は達成できなかった。

また CAS についてであるが、CAS は炭酸塩試料が得られれば、大部分の試料から抽出が可能であった。しかし炭酸塩試料には以前から酸素同位体比分析に関連して続成・再結晶の問題が指摘されてきた。堆積後に再結晶が生じる際に間隙水中の硫酸イオンを CAS として取り込んでしまう可能性がある。これが生じると、堆積物中の酸化還元の状態により、間隙水中の硫酸イオンは海水のそれよりも ^{34}S を豊富に持つことがある。これに関する詳細な考察を行わない限り、CAS は古海洋の議論に応用できないと判断された。

そこで、本研究では、時系列的に連続しており、かつ間隙水のデータが詳細に得られている U1514 の試料を用いて $\delta^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$ を測定し、どのような条件があれば CAS が初生的な過去の表層海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値を保持しているのかを検討した。このことは当初の研究目的からは逸れるが、解決しなければ CAS を用いた古環境解読はできない、いわゆるボトルネックとなる課題であり、避けては通ることができなかった。

赤道太平洋では回収できた試料では、CAS と遠洋性バライトの両方を 1 つの試料から回収することができた試料が 12 試料あり、これに基づいて Paytan et al. (1998) などが示した約 50Ma の急激な海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値のシフトの信憑性について考察することができた。世界各地で得た試料の分析結果も、赤道太平洋で確認した結果を支持する結果となった。

(1) CAS の $\delta^{34}\text{S}$ 値に見られる続成の影響

海底に堆積した堆積物中では一般的に海底からの深度が増加するに従い、遊離酸素が有機物分解に消費されて漸進的に失われていき、遊離酸素が枯渇すると電子受容体として硝酸イオン、酸化マンガン、酸化鉄等を用いる (図 4)。しかしそれらの存在量は多くなく、間隙水中に豊富に含まれる硫酸イオンを用いる硫酸還元がある深度から主要な有機物の嫌氣的分解のメカニズムとなっていく。硫酸還元のプロセスでは大きな同位体分別が知られており、硫化物 (図 4 では硫化水素) のには選択的に ^{32}S が取り込まれ (約 20‰ の同位体分別効果がある)、残された周囲の硫酸イオンは相対的に ^{34}S に富むようになっていく。硫酸還元下では重炭酸イオンが生産され、アルカリ度が上昇し、炭酸カルシウムを形成しやすい化学環境となる。ここで硫酸イオンが炭酸カルシウム中に CAS として取り込まれれば、初生的な間隙水の $\delta^{34}\text{S}$ 値よりも ^{34}S に富んだ値 (より正側にシフトした $\delta^{34}\text{S}$) を持つ CAS が、オリジナルな炭酸塩 (海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値を持つ) の上に付加することになる。本研究では U1514 の試料を用いて、間隙水中の鉄、マンガンイオン等の化

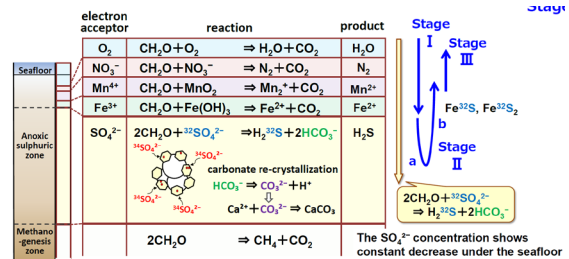


図 4. 堆積物中での電子受容体の変化と反応

成がある深度から主要な有機物の嫌氣的分解のメカニズムとなっていく。硫酸還元のプロセスでは大きな同位体分別が知られており、硫化物 (図 4 では硫化水素) のには選択的に ^{32}S が取り込まれ (約 20‰ の同位体分別効果がある)、残された周囲の硫酸イオンは相対的に ^{34}S に富むようになっていく。硫酸還元下では重炭酸イオンが生産され、アルカリ度が上昇し、炭酸カルシウムを形成しやすい化学環境となる。ここで硫酸イオンが炭酸カルシウム中に CAS として取り込まれれば、初生的な間隙水の $\delta^{34}\text{S}$ 値よりも ^{34}S に富んだ値 (より正側にシフトした $\delta^{34}\text{S}$) を持つ CAS が、オリジナルな炭酸塩 (海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値を持つ) の上に付加することになる。本研究では U1514 の試料を用いて、間隙水中の鉄、マンガンイオン等の化

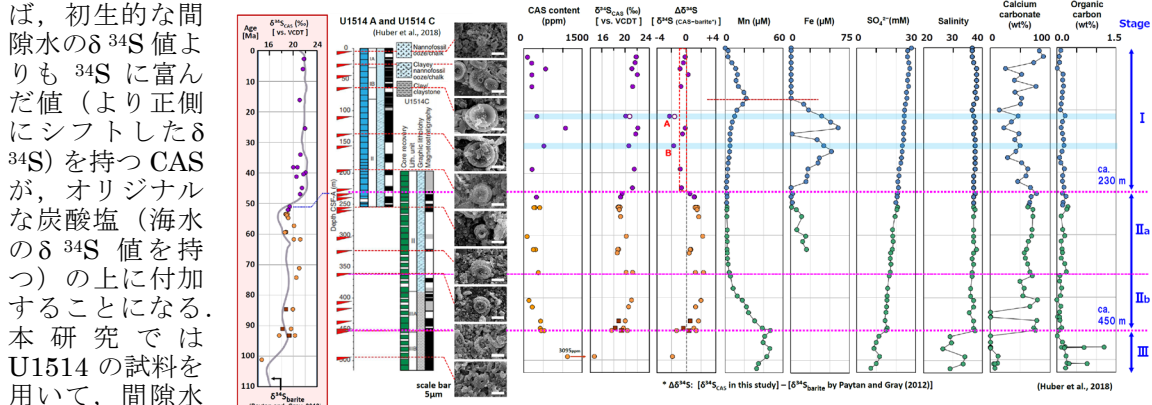


図 5. U1514 堆積物の間隙水内のイオン含有量変化及び CAS 含有量、CAS 同位体比、CAS と海水組成の $\delta^{34}\text{S}$ 値差推定

学組成の深度変化(Huber et al., 2018)と、 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$ を比較した。その結果を次の図5に示す。

ここでは、まずマンガンの還元および鉄の還元によって生じたそれらイオンのピーク（それぞれ約80mおよび130m）が見えている。230mまでの範囲において硫酸イオンはわずかではあるが一方的に減少してきており、僅かではあるが硫酸還元が進行していることを示している。一方で $\delta^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$ は殆ど変動をしていない。予測される変動は、最も左に示した図中の灰色の実線で示したPaytan et al. (1998)の「過去の海水の硫黄同位体比変動」であるが、ほぼこれと一致する。従って鉄還元のプロセスまでは、僅かな再結晶があったとしても殆ど $\delta^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$ には表れていないことが明らかである。一方で、Paytan et al. (1998)の「過去の海水の硫黄同位体比変動」との差を取ると（図5中、右から7番目）、230mよりも深くなると、 $\Delta\delta^{34}\text{S}_{\text{CAS}}$ 値が正側に分布する（約2‰程度、予測される海水の値よりも高い値を取る）。この区間では硫酸還元が主要な有機物分解プロセスとなり、間隙水中に ^{34}S に富む硫酸が蓄積してくる結果を反映しているものと考えられる。

以上の結果から、CASを過去の海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値のプロキシとして用いる場合、深海コアの間隙水情報を確認し、硫酸還元帯に達していない（鉄還元帯よりも浅い範囲）範囲であれば（SEM写真で再結晶の程度も確認したうえで）十分にその機能を果たすことがわかった。この研究結果は、研究技術の記述を主体とした論文として現在公表準備中である。

(2) 遠洋性バライトおよび共産する炭酸塩付随硫酸(CAS)の硫黄同位体比

過去の海水に含まれていた硫酸イオンの硫黄同位体比に関する従来の研究では、堆積後に同位体比の上書きリスクがない遠洋性バライトを用いた研究が主流であった。しかし上述の通り、遠洋性バライトは連続層序で得ることが難しく、さらに抽出に至るまでのプロセスに時間を要することから、古海洋研究の対象としては取り扱いが困難である。一方で、CASは最近、バライトの代替としての可能性が示されている。Rennie et al. (2018)は浮遊性有孔虫を種ごとに分けて、その硫黄同位体比測定をマルチコレクターICPMSを用いた微量分析法で成し遂げ、その層序変動を示した。しかしこの手法もやはり非常に労力を要する方法であり、種ごとの生態効果の補正などに関して問題を孕んでいる。上述(1)の研究で、硫酸還元環境下に至らない堆積物から得たものであれば、CASは過去の海水の硫黄同位体比をほぼ上書きなしに保存することが解ってきたが、本研究(2)ではこれを、遠洋性バライトとCASを共に（同じ試料から）連続抽出できる試料を用い、その差を比較し、同様な変動曲線を得られることを確認することによって確かめることを試みた。バルク炭酸塩のCASが過去の海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値のプロキシとなり得るかどうかを別の側面から確かめた。またこれをPaytan et al. (1998)およびRennie et al. (2018)のデータと比較し、従来「リファレンス曲線」として用いられてきたPaytan et al. (1998)の赤道大西洋の遠洋性バライトのデータに問題がある事を指摘した。なお、この研究結果は外山浩太郎が筆頭著者として、共同研究者Adina Paytan博士と共に、長谷川が責任著者として現在Chemical Geologyに投稿中である。以下にその概要を説明する。

赤道太平洋のU1331およびU1333に含まれる51.7-31.2Maの約20myrの時間を代表する区間から得た炭酸塩含有量10%-90%の試料から遠洋性バライトとCASの抽出を試み、すべての26試料からCASを、また約半数の12試料から遠洋性バライトの抽出に成功した。それらの硫黄同位体比を時代プロットした図が、図6である。比較対象として他海域で同様な分析を行った結果(Turchyn et al., 2009)もプロットしてある。

CASの結果(図6A)は、南半球インド洋(Site 757)や南大西洋(Site 1265)の結果ともよく一致しており、CASが過去の海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値のプロキシとしてよく機能していることが解る。一部の値は他海域のデータよりも負側にプロットされている。上述の通り、続成・再結晶を受けるとCASの硫黄同位体比は正側にシフトするため、本研究試

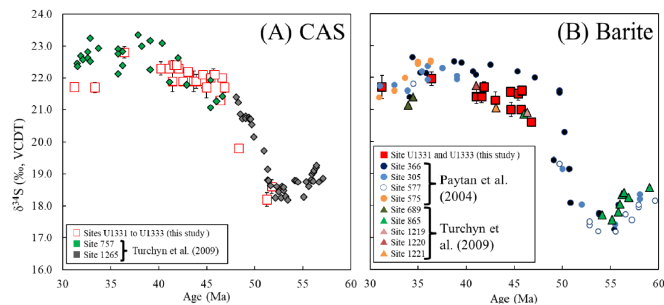


図6. U1331, U1333から得たA)CASとB)遠洋性バライトの硫黄同位体比

料の続成による影響ではないと考えられる。最も可能性が高いのは、Turchyn et al. (2009)の試料にわずかな続成の影響があったことである。

遠洋性バライトの分析結果は、図6Bに示す通りCASの結果とほぼ同様となったが、CASと比較すると約0.8‰だけCASの値が系統的に高いことがわかった。これは遠洋性バライトあるいはCASとして硫酸イオンが固定される際の同位体分別のわずかな差を反映しているものと考えられる。経時変動パターンはCASとほぼ同様で、特に47Maから36Maまでの漸進的上昇がみられる。Paytan et al. (1998)が示したODP Site 366のデータよりもこの範囲では明らかに低い値であり、51Maから36Maまでの期間に漸進的に $\delta^{34}\text{S}$ 値が増加していることを示している。このことはCASからも同様に示されており、かつRennie et al. (2018)の浮遊性有孔虫のCASを用いた結果とも一致する。これらが当時の海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値の変動を正しく記録しているといえる。従来リファレンスとして用いられてきたSite 366のデータは、年代論に問題があるか、形成時に何らかの影響を受けて当時の海水の $\delta^{34}\text{S}$ 値を正確に反映していない可能性が高いことが明らかになった。

(3) 世界各地の始新世CASの硫黄同位体比経年変動

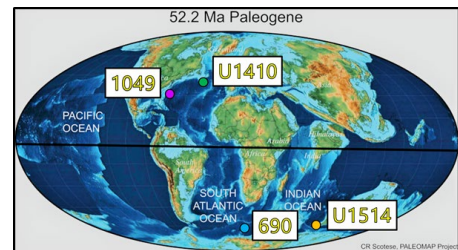


図7. 北大西洋北部・中部、南極海、およびインド洋南縁のCAS経年変動の比較に用いた試料の位置

赤道太平洋に加えて、図7に示した各地で掘削された始新世の深海試料を取り寄せて、硫黄同位体比の経年変動を調査した。残念ながら、これらの試料からは一部の例外を除いてバライトを抽出することができなかった。一方で、未だかつて分析されてこなかった始新世のCASの分析値を北大西洋中緯度域、アフリカ沖南極海、南インド洋南縁部という海域から初めて報告する。これらのデータは基本的には赤道太平洋で得た試料とほぼ同様の傾向を示した(図8)。

これら4サイトの結果、以下の事項が注目される：

- ①50Ma付近の $\delta^{34}\text{S}$ 値の上昇は急激ではなく漸進的で、7-10myrを要するイベントであった。これは赤道太平洋も含めて世界的に一致する傾向であり、唯一の例外はかつてリファレンスとして用いられた赤道大西洋のバライトから得たデータ(Paytan et al., 1998)である。
 - ②51-47Maの間では、サイト間の $\delta^{34}\text{S}$ 値の偏差が非常に小さく、データの信憑性が高い。
 - ③46Maになると、サイト間偏差はやや大きくなる。
 - ④45Ma付近でU1410の試料のみが $\delta^{34}\text{S}$ 値を $\sim 1.5\%$ 増加させ、その後5myr間安定している。
 - ⑤南半球高緯度の2サイトは45Maより若い時代では一貫して他のサイトよりも低い値をとる。
- 以上のことから、始新世の海水は、51Ma-47Maの、 $\delta^{34}\text{S}$ 値が上昇しつつあった期間は世界的に均質だったといえる。一方、その後の46Ma以降はやや不均質になったのかもしれない。45-40Maの間でU1410の値が最も高く、南半球高緯度の値が最も低い。すなわちこの期間、大西洋・インド洋南縁の海水では大きな $\delta^{34}\text{S}$ 値の傾き(グラジエント)ができていたと考えられる。その原因の一つとして考えられるのが、本研究が申請時の仮説で提示した北極海アウトフロー水である。グラジエント成立の時期は約45Maであり、北極海で短期間に大量の黄鉄鉱が堆積した(Ogawa et al., 2009)と時期的にも一致する。

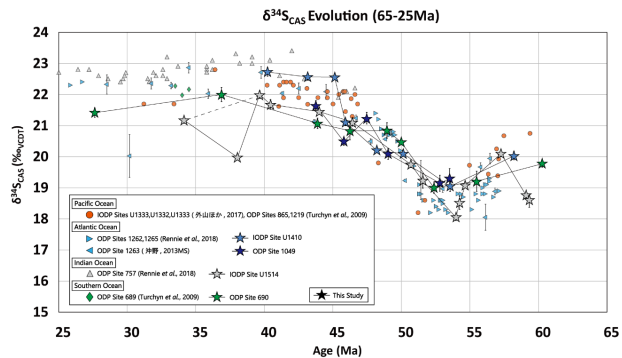


図8. 北大西洋北部・中部、南極海、およびインド洋南縁のCAS経年変動。赤道太平洋など他海域のデータも同時に示した。

<引用文献>

- ①Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M., 2012. The Geologic Time Scale 2012. Elsevier, pp. 1176.
- ②Hohbein, M. W., Sexton, P. F. and Cartwright, J. A., 2012. Onset of North Atlantic Deep Water production coincident with inception of the Cenozoic global cooling trend. *Geology*, 40-3, 255-258.
- ③Hollis et al., 2012. Early Paleogene temperature history of the Southwest Pacific Ocean: Reconciling proxies and models. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 349/350, 53-56.
- ④Huber, B. T., Hobbs, R. W., Bogus, K. A. and Expedition 369 Scientists, 2018. International Ocean Discovery Program Expedition 369 Preliminary Report, <https://doi.org/10.4379/iodp.pr.369.2018>.
- ⑤Ogawa, Y., Takahashi, K., Yamanaka, T., Onodera, J., 2009. Significance of euxinic condition in the middle Eocene paleo-Arctic basin: a geochemical study on the IODP Arctic coring expedition 302 sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 285, 190-197.
- ⑥Paytan, A., Kastner, M., Campbell, D., Thiemens, M.H., 1998. Sulfur isotopic composition of Cenozoic seawater sulfate. *Science* 282, 1459-1462.
- ⑦Paytan, A., Kastner, M., Campbell, D., Thiemens, M.H., 2004. Seawater sulfur isotope fluctuations in the cretaceous. *Science* 304, 1663-1665.
- ⑧Paytan, A., Gray, E.T., 2012. Sulfur isotope stratigraphy. In Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M. (Eds.), *The Geologic Timescale 2012 (Vol. 1)* (pp. 167-180). Boston, USA: Elsevier.
- ⑨Rennie, V.C.F., Paris, G., Sessions, A.L., Abramovich, S., Turchyn, A.V., Adkins, J.F., 2018. Cenozoic record of $\delta^{34}\text{S}$ in foraminiferal calcite implies an early Eocene shift to deep-ocean sulfide burial. *Nature geoscience* 11, 761-765.
- ⑩Robinson, S. A., Murphy, D/ P., Vance, D and Thomas, D. J., 2010. Formation of "Southern Component Water" in the Late Cretaceous: Evidence from Nd-isotopes. *Geology*, 38, 871-874.
- ⑪Turchyn, A.V., Schrag, D.P., Coccioni, R., Montanari, A., 2009. Stable isotope analysis of the Cretaceous sulfur cycle. *Earth Planet. Sci. Lett.* 285, 115-123. Turchyn et al. (2009)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ①Hobbs, R.W., Huber, B.T., Bogus, K.A., and the Expedition 369 Scientists, (2019). Australia Cretaceous Climate and Tectonics. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, vol. 369, <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.369.2019>.
- ②Huber, B.T., Hobbs, R.W., Bogus, K.A. and the Expedition 369 Scientists (2018). Australia Cretaceous Climate and Tectonics Tectonic, paleoclimate, and paleoceanographic history of high-latitude southern margins of Australia during the Cretaceous. *International Ocean Discovery Program Expedition 369 Preliminary Report*, <https://doi.org/10.14379/iodp.pr.369.2018>.
- ③Batenburg, S. J., Friedrich, O., Moriya, K., Voigt, S., Cournède, C., Moebius, I., Blum, P., Bornemann, A., Fiebig, J., Hasegawa, T., Hull, P. M., Norris, R. D., Röhl, U., Sexton, P. F., Westerhold, T., Wilson P. A. and the IODP Expedition 342 Scientists. Late Maastrichtian carbon isotope stratigraphy and cyclostratigraphy of the Newfoundland Margin (Site U1403, IODP Leg 342). *Newsletters on Stratigraphy*, 51/2 (2018), 245-260. DOI: 10.1127/nos/2017/0398
- ④Khim, Boo-Keun, Horikawa, K., Asahara, Y., Kim, Ji-Eun, Ikehara, M. (2018), Detrital Sr-Nd isotopes, sediment provenances and depositional processes in the Laxmi Basin of the Arabian Sea during the last 800 ka, *Geological Magazine*, <https://doi.org/10.1017/S0016756818000596>
- ⑤Kozaka, Y., Horikawa, K., Asahara, Y., Amakawa, H. and Okazaki, Y. (2018), Late Miocene-mid-Pliocene tectonically induced formatin of the semi-closed Japan Sea, inferred from seater Nd isotopes. *Geology*, doi: <https://doi.org/10.1130/G45033.1>
- ⑥Jenkins, R.G., Hasegawa, T., Haggart, J. W., Goto, A. S., Iwase, Y. and Nakase, C. (2017). Cool eastern rim of the North Pacific during Late Cretaceous time; A seep-carbonate paleothermometry from the Nanaimo Group, British Columbia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 487, 407-415.

<https://doi.org/10.1016/j.palaco.2017.09.027>.

- ⑦Friedrich, O., Batenburg, S. J., Moriya, K., Voigt, S., Cournède, C., Möbius, I., Blum, P., Bornemann, A., Fiebig, J., Hasegawa, T., Hull, P. M., Norris, R. D., Röhl, U., Westerhold, T., Wilson, P. A., and IODP Expedition 342 Scientists, 2016, Maastrichtian carbon isotope stratigraphy and cyclostratigraphy of the Newfoundland Margin (Site U1403, IODP Leg 342): *Climate of the Past, Discussion*, v. 2016, p. 1-21. 10.5194/cp-2016-51.

[学会発表] (計12件)

- ①加藤禎理, 長谷川卓, 後藤晶子, Crampton, J. (2018) 白亜紀セノマニアン/チューロニアン期境界の南太平洋高緯度域における環境変動. 古生物学会 2018 年会, 仙台, 2018 年 6 月 23 日.
- ②内藤 陸・高木悠花・守屋和佳. 2018. 始新世の温暖化イベント時における光共生性浮遊性有孔虫の動態. 日本古生物学会第 167 回例会. 松山. 2018 年 2 月.
- ③長谷川卓, 外山浩太郎, O' Connor, L. K., Huber, B. T., Hobbs, R. W., Bogus, K. A., IODP Exp. 369 乗船研究者 (2018) 南テチス海高緯度域における白亜紀セノマニアン/チューロニアン境界の OAE2: 国際深海科学掘削計画 (IODP) 第 369 次航海の予察成果. 古生物学会 2018 年会, 仙台, 2018 年 6 月 23 日.
- ④吉川亞理紗, 長谷川卓, 後藤晶子, 岩瀬優也, 守屋和佳, Haggart, J. (2018) カナダ太平洋沿岸に分布する上部カンパニアン-マーストリヒチアン階に関する有機地球化学的特徴. 古生物学会 2018 年会, 仙台, 2018 年 6 月 23 日.
- ⑤Hasegawa, T., Muta, S., Goto, A. S., Crampton, J., Response to Cretaceous Cenomanian/Turonian OAE2 in southern high latitude, Pacific. International Symposium "Permian-Triassic Climatic & Environmental Extremes and Biotic Response (IGCP 630)", June 14-16, 2017, Tohoku University, Sendai, Japan.
- ⑥長谷川卓, Jenkins, R. G., Haggart, W. J., 後藤(桜井)晶子, 岩瀬優也, 中瀬千遥. 白亜紀最寒期のメタン冷湧水炭酸塩岩の新発見: 北東太平洋における寒冷中層水の証拠. 日本古生物学会 2017 年会, 2017 年 6 月 11 日, 北九州市立自然史・歴史博物館, 北九州市.
- ⑦長谷川卓, 牟田 宗一郎, 後藤(桜井) 晶子, ジェームス・クランプトン, 白亜紀セノマニアン/チューロニアン境界の OAE2 に対する南半球高緯度の反応. 日本地球惑星連合大会 2017 年会, 2017 年 5 月 24 日, メッセ, 千葉市.
- ⑧中瀬千遥, 長谷川卓, 後藤(桜井)晶子, 外山浩太郎, 沖野遼, 始新世初期における海洋硫酸硫黄同位体比急変イベント. 日本地球惑星連合大会 2017 年会, 2017 年 5 月 23 日, 幕張メッセ, 千葉市.
- ⑨内藤 陸・守屋和佳. 2017. 始新世の温暖化イベント時における光共生性浮遊性有孔虫の動態. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会. 幕張. 2017 年 5 月.
- ⑩Hasegawa, T. and Kobiyama, Y., Syndepositional formation of calcareous nodules on muddy sea floor: elucidating depositional history by C, O, S isotope characterization. Goldschmidt Conference 2016, June 27, 2016, Yokohama, Japan.
- ⑪Hasegawa, T. and Kobiyama, Y., Syndepositional formation of calcareous nodules on muddy sea floor: elucidating depositional history by C, O, S isotope characterization. Japan Geoscience Union Meeting 2016, May 22, 2016, Chiba, Japan.
- ⑫守屋和佳. 2016. 過去 2 億年間でもっとも温暖であった時代・白亜紀の海水温と海洋循環. 地球環境史学会 2016 年年会トピックセッション「温室地球時代の地球システム」. 早稲田. 2016 年 11 月.

[その他]

ホームページ等 http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/Paleo_Lab/achievement.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

- ①研究分担者氏名: 木元 克典
ローマ字氏名: **Katsunori Kimoto**
所属研究機関名: 国立研究開発法人海洋研究開発機構
部局名: 地球環境観測研究開発センター
職名: 主任技術研究員
研究者番号 (8 桁): 40359162
- ②研究分担者氏名: 堀川 恵司
ローマ字氏名: **Keiji Horikawa**
所属研究機関名: 富山大学
部局名: 大学院理工学研究部 (理学)
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 40467858
- ③研究分担者氏名: 山本 正伸
ローマ字氏名: **Masanobu Yamamoto**
所属研究機関名: 北海道大学
部局名: 地球環境科学研究院
職名: 准教授

- 研究者番号 (8 桁): 60332475
- ④研究分担者氏名: 守屋 和佳
ローマ字氏名: **Kazuyoshi Moriya**
所属研究機関名: 早稲田大学
部局名: 教育・総合科学学術院
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 60447662
- ⑤研究分担者氏名: 岡 顕
ローマ字氏名: **Akira Oka**
所属研究機関名: 東京大学
部局名: 大気海洋研究所
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 70396943
- (2) 研究協力者
- ①研究協力者氏名: 後藤 (桜井) 晶子
ローマ字氏名: **Akiko S. Goto**
- ②研究協力者氏名: 外山浩太郎
ローマ字氏名: **Kotaro Toyama**

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。