

砕屑物のストロンチウム・ネオジム・鉛同位体比分析による南極氷床の融解解析

堀川 恵 司*

1. はじめに

大気中の二酸化炭素 (CO₂) 濃度は、産業革命前 (1800 年頃) の 280 ppm から、化石燃料の大量消費によって現在ではその約 1.5 倍にあたる 430 ppm を超える水準に達している。この急激な濃度上昇に伴い、全球の平均気温は産業革命前と比べ約 1.4°C 上昇した。現状のまま化石燃料の使用が続けば、2100 年までに全球平均気温は 4°C 程度上昇すると予測されている (IPCC, 2023)。IPCC (気候変動に関する政府間パネル) などが用いる気候モデルは、このような温暖化が、夏の酷暑や豪雨災害といった異常気象を頻発化させることを示唆している。しかし、モデルによる予測は本質的に不確実性を含むため、その信頼性を高めるには、過去に実際に起きた事象との比較検証が不可欠である。そこで重要な役割を果たすのが、過去の地質時代の環境状態を調べる古気候研究である。中でも、全球平均気温が現在より 1-2°C 高かった最終間氷期 (約 13 万年~11.5 万年前) や 3-4°C 高かった 300-500 万年前の鮮新世は、将来の温暖化地球の類似時代 (アナログ) とみなされ (Clark et al., 2024)、この時代の地層に残された堆積物を化学的に分析することで、温暖化が進行した環境下で実際にどのような現象が起こったのか、調べられている。

鮮新世の地質記録を解析することで、気候モデルでは捉えきれない具体的な気候変動の様相が明らかになりつつある。例えば、日本上空の偏西風は、現在よりも北へ移動し、その勢力も弱かったことが分かっている (Abell et al., 2021)。また、

現在乾燥化している北米南西部では、鮮新世中期に、冬の降水量増加と、夏の北米モンスーンの強化によって、今よりもはるかに湿潤であった。このような気候変化は、カリフォルニア沖の水温が著しく高かったことに起因しており、現代のカリフォルニア沖で「海洋熱波」が発生した際に観測される北米モンスーンの強化と類似したメカニズムが原因になっていたと考えられている。このような地質記録データは、将来の 3-4°C 規模の温暖化によって、北米南西部が、長期的な「メガ干ばつ」と、海洋熱波が引き起こす「鮮新世型」のモンスーン性の豪雨が共存する、より不安定な気候へと移行する可能性を示唆している (Bhattacharya et al., 2022)。

一方、極域に目を向けると、鮮新世には、アラスカ山岳氷河がその規模を大幅に縮小させていた (Horikawa et al., 2015)。しかし、全球的な海水準の上昇に最も大きく寄与する南極氷床が、当時の程度融解していたかについては、いまだコンセンサスが得られていない。将来、約 4°C の温暖化によって、南極氷床がどの程度融解しうるのかを明らかにすることは、地球科学における喫緊の課題であり、この問いに答えるために、世界中で活発な研究が進められている。そこで、本稿では、この課題に取り組むアプローチの一つとして、南極大陸縁辺域で採取された堆積物コアを対象とした、砕屑物のストロンチウム・ネオジム・鉛同位体比分析に焦点を当てる。これらの化学分析から、過去の南極氷床の融解を解析した研究事例を紹介し、この分野における今後の展望を論じる。

*富山大学学術研究部理学系教授

2. 碎屑物の同位体比指標

海底堆積物に含まれる碎屑物の供給源を南極大陸の基盤岩まで遡る「起源解析」は、過去の氷床の存在範囲や流動パターンを空間的に推察しうる極めて有効な手法である。このような解析には、ストロンチウム、ネオジム、鉛同位体比、ジルコン U-Pb 年代や角閃石 Ar-Ar 年代といった鉱物の年代測定など、多様な指標が利用される (Licht and Hemming, 2017)。本稿では、これらの中から、特に 63 μm 以下の細粒碎屑物の分析で多用されるストロンチウム、ネオジム、鉛同位体比に焦点を絞り、第 2 章でこれらの指標の概要を、第 3 章で具体的な適用事例を紹介する。

2.1. ストロンチウム同位体比

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比で表されるストロンチウム同位体比は、地質体ごとに特徴的な値を示すため、碎屑物の供給源を特定する上で極めて有効な指標 (トレーサー) となっている。この地域的な $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の多様性が生まれる原理は、主に ^{87}Sr の生成過程と、ストロンチウム (Sr)・ルビジウム (Rb) の化学的挙動に起因する (Faure and Mensing, 2005; 加々美ほか., 2008)。

ストロンチウムには、4 つの安定同位体 (^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr) があり、このうち ^{87}Sr は、 ^{87}Rb のベータ崩壊によっても生成される (半減期 488 億年)。この放射壊変は温度や圧力に影響されず一定の速度で進むため、岩石形成後の時間に比例して ^{87}Sr が蓄積していく。この原理は、Rb-Sr 年代測定法をはじめ、ジルコン U-Pb 年代法や角閃石 Ar-Ar 年代など、他の放射年代測定法にも共通するものである。

また、Sr と Rb の地球化学的な挙動にも大きな違いがある。アルカリ土類金属であるストロンチウム (Sr^{2+}) は、同じアルカリ土類金属でかつイオン半径が近い Ca^{2+} と類似した化学的性質を示すため (Sr^{2+} : 1.13 Å, Ca^{2+} : 1.00 Å)、角閃石や斜長石など Ca に富む鉱物に取り込まれやすい。そのため、玄武岩や斑れい岩などでストロンチウ

ム濃度が高くなる。一方、アルカリ金属であるルビジウムは、同様にイオン半径が近い K^+ (Rb^+ : 1.49 Å, K^+ : 1.38 Å) と類似した挙動を示し、カリ長石や雲母類などカリウムに富む鉱物に濃集する。その結果、花崗岩などの珪長質岩でルビジウム濃度が高くなる傾向がある。このような元素分配の違いにより、鉱物がマグマから晶出する際には、鉱物種ごとに Rb/Sr 比の違いが生じる。晶出後、閉鎖系となった鉱物内部では ^{87}Rb の放射壊変が進行し、時間の経過と共に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が増加する。この増加率は初期の Rb/Sr 比に比例するため、同じ時代に形成された鉱物でも、Rb に富み Sr に乏しい鉱物 (カリ長石や雲母など) ほど、経時的に高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を示すことになる。この関係は鉱物の集合体である岩石全体にも適用され、 SiO_2 濃度 (重量 %) が高い珪長質岩ほど Rb/Sr 比が高く、形成年代の古い岩石ほど $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が顕著に高くなる (図 1)。

以上をまとめると、ある基盤岩が示す $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は、1) 岩石の形成年代、2) 岩石・鉱物種に依存する初期 Rb/Sr 比、そして岩石形成時の起源物質 (マントル等) が持つ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比 (初期値)、という三つの要因の組み合わせによって規定される。これらの要因の違いが、地質体ごとに特有の同位体比を生み出し、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が碎屑物の起源解析において強力なトレーサーとして機能する根拠になっている。

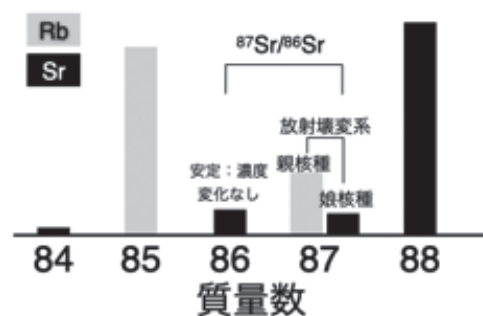


図 1. Rb と Sr 同位体の存在度の概念図と、 ^{87}Rb と ^{87}Sr の放射壊変系、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比の関係

2.2. ネオジウム同位体比

ネオジウム (Nd) は、7つの安定同位体 (^{142}Nd , ^{143}Nd , ^{144}Nd , ^{145}Nd , ^{146}Nd , ^{148}Nd , ^{150}Nd) を持ち、このうち ^{143}Nd は ^{147}Sm (サマリウム) のアルファ崩壊によっても生成される (半減期 1060 億年)。ネオジウムとサマリウムはいずれも希土類元素 (ランタノイド元素) に属する。ランタノイド元素は、原子番号が大きくなるにつれ、核電荷の増加により最外殻電子が強く核に引き付けられ、イオン半径が小さくなる「ランタニド収縮」と呼ばれる性質を示す。このため、ネオジウムよりも原子番号の大きいサマリウムはイオン半径が小さく、マントル物質が部分融解する際に液相 (メルト) よりも、固相 (残留マントル) に分配されやすい。逆にネオジウムは液相に濃集しやすい。この地球化学的性質により、地球の主要なリザーバーであるマントルと大陸地殻の間には、Sm/Nd 比に系統的な差が生じる。マントルから分化して形成されたマグマ (およびそれが固結した大陸地殻) は、起源マントルよりも低い Sm/Nd 比を持つものに対して、マグマ分離後に残留したマントル (及びそれに由来する玄武岩) は高い Sm/Nd 比を持つ (Faure and Mensing, 2005)。ただし、サマリウムとネオジウムは化学的性質が非常に似ているため、この元素分別は限定的であり、岩石や鉱物における Sm/Nd 比の変動範囲は、Rb/Sr に比べてはるかに小さい (Sm/Nd 比 : 0.1-0.5, Rb/Sr 比 : 0.005-3) (Faure and Mensing, 2005; 加々美ほか., 2008)。

岩石や鉱物が形成された後、閉鎖系においては、 ^{147}Sm の放射壊変により ^{143}Nd が生成されるため、壊変の影響を受けない ^{144}Nd との同位体比 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比) は時間と共に増加する。この増加率は初期の Sm/Nd 比に比例するため、高い Sm/Nd 比を持つマントルは、低い Sm/Nd 比を持つ大陸地殻よりも速いペースで $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比が増加する。その結果、地球史を通じて進化した現在のマントル由来物質 (玄武岩など) は、大陸地殻物質 (花崗岩など) に比べて高い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を示す傾向がある。

以上をまとめると、ある基盤岩が示す $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比は、その形成年代と Sm/Nd 比、そして岩石形成時の起源物質 (マントル等) の $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比 (初期値) という三つの要因に依存して変化する。これは、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比と同様の原理である。ただし、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の変動幅は非常に小さく、通常は小数点以下第3位以降 (0.5105~0.5130) の差にとどまる。そこで、試料間の微小な同位体比の差異を明確にするために、ネオジウム同位体比は一般に、 ϵ_{Nd} 値 (イプシロン・ネオジウム値) として表される。これは、コンドライト隕石から推定された地球全体の始原的な同位体組成 (Chondritic Uniform Reservoir (CHUR), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比=0.512638) (Jacobsen and Wasserburg, 1980) を基準として、試料の値がそこから一万分のいくつずれているかを示すものである。本稿においても、以降のネオジウム同位体比は ϵ_{Nd} 値で表記する。

2.3. 鉛同位体比

鉛同位体システムについては、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比や $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比と比較して、その既定要因がより複雑であり、一般化が難しい (Hemming and McLennan, 2001)。しかし、測定誤差を考慮しても、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比が広範囲な値を示すこと、さらに複数の独立した同位体系を持つことから、起源解析に極めて有用な指標である。

鉛 (Pb) は、4つの安定同位体 (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb) を持ち、このうち ^{204}Pb は放射壊変によって生成されない非放射性起源の同位体である。一方、 ^{206}Pb と ^{207}Pb はそれぞれ ^{238}U (半減期 44.68 億年) と ^{235}U (半減期 7.04 億年)、 ^{208}Pb は ^{232}Th (半減期 140.1 億年) の放射壊変によって生成される。したがって、ある地質体 (鉱物や岩石) の現在の鉛同位体組成は、1) その地質体が形成された際の、起源物質の鉛同位体組成 (初期値) と、2) 形成後に内部のウランとトリウム放射壊変によって生成・蓄積された放射起源鉛の量の和で

表される。地球全体の初期値としては、45.4 億年前のキャニオン・ディアブロ隕石の同位体比が一般的に用いられている (Tatsumoto et al., 1973)。閉鎖系における放射壊変起源の鉛の蓄積量は、経過時間と、親核種である (U, Th) と娘核種である (Pb) の濃度比 (例えば, $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ (μ), $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (κ)) に依存する (図 2)。

ウラン、トリウム、鉛は、いずれもマントルに比べて地殻に濃集しやすい元素であるが、その濃集の度合いは異なる。特にウラン (U) は鉛 (Pb) よりも強く地殻へ分配される性質を持つ。このため、マントルから地殻が分化するような過程では、両者の U/Pb 比に系統的な差が生じ、地殻リザーバーは高い μ 値 ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 比) を、一方の残留マントルリザーバーは低い μ 値を持つようになる。高い U/Pb 比を持つリザーバーは、時間の経過と共に、低い U/Pb 比を持つリザーバーに比べて、より高い $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比および $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比を示すようになる。その結果、もとは均質であったリザーバーも、地殻形成などの分化イベントを経て、同位体組成が時間と共に分岐していく。さらに、地殻内部でも U/Pb 比や Th/U 比は変動するため

(Huston and Champion, 2023)、鉛同位体比は地殻形成だけでなく、地殻内部の様々な地質学的プロセスをも鋭敏に反映する (図 2)。

以上のように、鉛同位体比は、その地域の地質学的歴史 (年代, 岩石種, U/Pb, Th/Pb, テクトニクス) を強く反映して特有の値を示す。また、近年の分析技術の進歩によって、従来は測定が困難であった ^{204}Pb の精密な分析が可能となり、 ^{204}Pb を基準とした同位体比プロット ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) が広く用いられるようになった。その結果、鉛同位体比は、碎屑物の供給源解析における強力なツールになっている。

3. 碎屑物の Sr-Nd-Pb 同位体比分析による南極氷床の融解履歴の評価

3.1. 最終間氷期におけるウィルクス氷底盆地の氷床融解：ネオジム同位体比の利用

将来の温暖化による海水準変動を予測する上で、過去の温暖期における氷床の応答を把握することは極めて重要である。特に、最終間氷期は、現在よりも全球平均気温が 1-2°C 程度高く、将来の温暖化を想定する上で最も重要な類似時代とみなさ

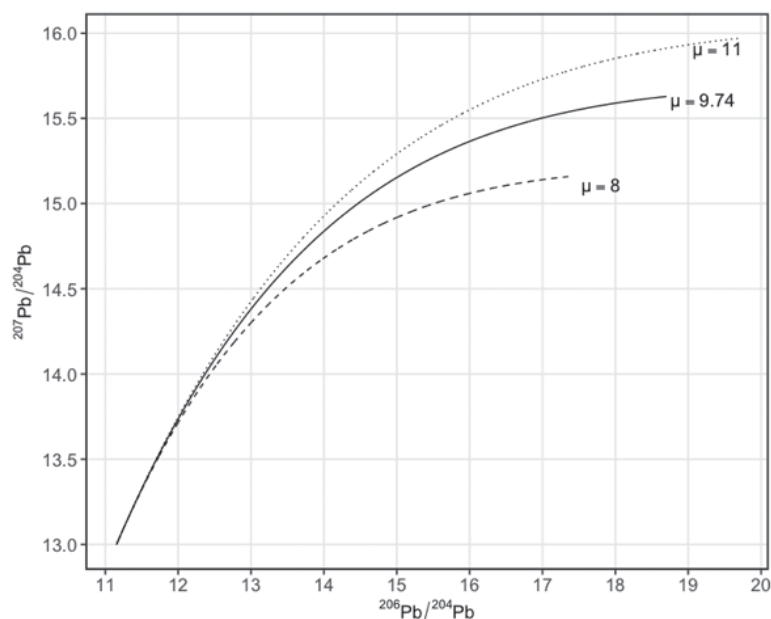


図 2. Stacey and Kramers (1975) の 2 段階成長モデルをもとに描画した鉛同位体の進化曲線。37 億年前に形成された鉛リザーバーを初期値とし、異なる $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ (μ) 値 (8, 9.74, 11) を持つ場合の $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ と $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比の変化を示す。

れている。この時代の海水準は、現在よりも最大で6~9m高かったとされる一方で、顕著な上昇はなかったとする研究もあり、その規模についてはいまだにコンセンサスは得られていない(Dumitru et al., 2023)。また、赤道域の隆起サンゴ礁などから推定される海水準データだけでは、その上昇に寄与した氷床の融解域を特定することは困難である。したがって、融解域・規模・時期の特定を可能にするためには、南極氷床の近傍で採取された海底堆積物試料の分析が不可欠とされている。

Iizuka et al. (2023) では、東南極で最大の海洋性氷床を保持するウィルクス氷底盆地に着目し、その沖合で採取された海底堆積物(GC1407 コア)の碎屑物(陸源性堆積物粒子)の起源を特定することにより、ウィルクス氷底盆地の融解状態を解析した。その際、碎屑物の供給源を特定するために、ネオジム同位体比を用いている。上述したように、ネオジム同位体比は、岩石の地質学的年代と岩石種を強く反映し、地質体ごとに特徴的な値を示す。そのため、南極基盤岩に見られる地域ごとの明瞭な同位体比の差異を利用することで、碎屑物の供給源を特定し、氷床の分布域や後退範囲を推定できる(図3, 4)。

ウィルクス氷底盆地周辺では、氷床縁の沿岸部

(アデリー海岸など)は、原生代以前の古い地質で構成されており、その ϵ_{Nd} 値は-19以下と非常に低い。一方、現在、厚い氷床に覆われている内陸部には、ペルム紀から白亜紀にかけて形成されたフェラー巨大火成岩岩石区が分布しており、その ϵ_{Nd} 値は-4~-7と相対的に高い。したがって、海底堆積物中の ϵ_{Nd} 値が上昇した場合、それはウィルクス氷底盆地の氷床が融解・後退し、内陸の基盤岩が露出・侵食され、そこから削剥された碎屑物が沖合へ運搬されて、GC1407 コア地点に到達したことを意味する。平均300年間隔という高い時間解像度でネオジム同位体比を分析した結果、最終間氷期の初期(約12.9万~12.6万年前)と後期(約12.2万~11.8万年前)の2度にわたり、堆積物の ϵ_{Nd} 値に明瞭な上昇ピークが見られた。これは、ウィルクス氷底盆地の氷床が融解して氷床縁が内陸に後退し、その結果、露出・侵食された内陸部の基盤岩碎屑物が、底層流を介して、GC1407 コアまで運ばれたことを示す直接的な証拠である。このネオジム同位体比から得られた結論は、氷床融解水の流入を示す指標であるベリリウム同位体比($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比)が最終間氷期後期に上昇していることから、強く支持される。さらに、ウィルクス氷底盆地内陸に位置するタロースドーム氷床コアの酸素同位体比の記録は、最終間

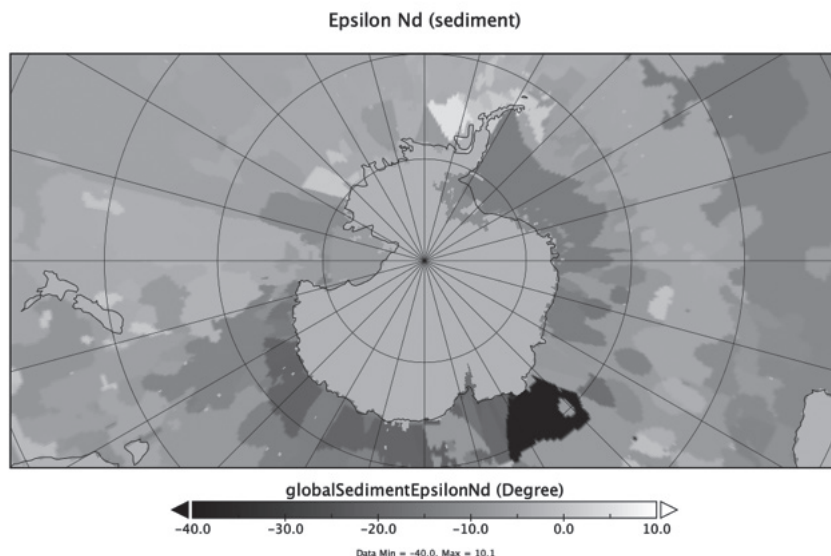


図3. 南極周辺域の堆積物のネオジム同位体比の分布 (Robinson et al., 2021)

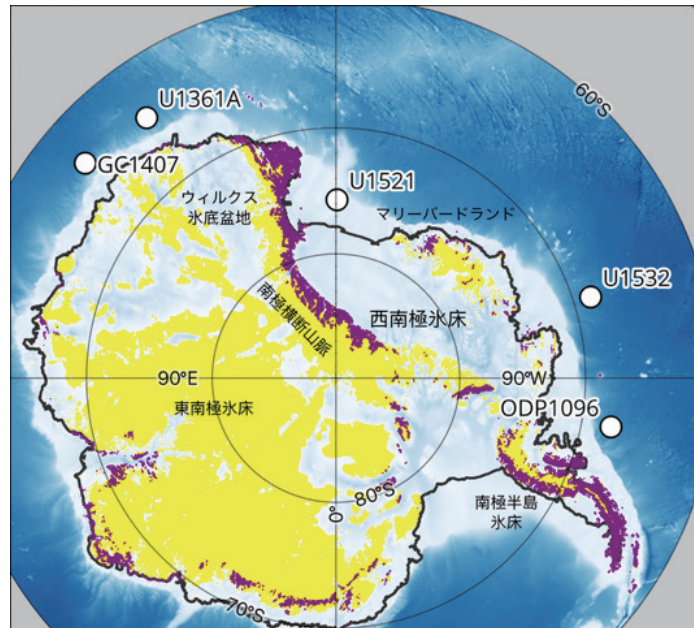


図4. 碎屑物の同位体比分析が行われた海底堆積物コアの採取地点。南極大陸上の濃淡は基盤岩の標高を示す。西南極は基盤岩の大部分が海面下にあるため、海洋熱で融解しやすい海洋性氷床が広く分布している。

氷期後期に氷床表面の標高が111~283 m 低下したことを示唆しており、海洋堆積物の同位体データと整合的である。これらの結果は、ウィルクス氷底盆地が最終間氷期中に少なくとも2回、全球の海水準を約0.4-0.8 m 程度上昇させる規模の氷床融解を経験したことを強く示している。この結論は、GC1407 コアよりもウィルクス氷底盆地に近い海域で採取された別の海底堆積物コア(U1361 A)のネオジム同位体比データとも一致しており(Wilson et al., 2018)、氷床融解の指標としてのネオジム同位体比の有用性と堅牢性を裏付けている。

3.2. 最終間氷期の西南極氷床の融解：ストロンチウム、ネオジム、鉛同位体比の利用

前述のとおり、最終間氷期には全球の海水準が6~9 m 高かった可能性が示されている。この大幅な海水準上昇の要因として、グリーンランド氷床の部分的な融解(海水準換算で2.5 m 未満)、海洋の熱膨張、そして山岳氷河の融解(合わせて1.5 m 未満)が挙げられるが、これらを全て足し合わせても6~9 m という上昇量を説明すること

はできない。この差分を埋める融解源を特定することが、古気候学における課題の一つとなっているが、その最も有力な候補として、基盤が海面下に位置し、海洋の熱に対して融解しやすい海洋性氷床、すなわち西南極氷床や東南極のウィルクス氷底盆地などが挙げられている。氷床モデルは、最終間氷期に南大洋が温暖化することで、西南極氷床が崩壊した可能性を示唆しているものの(Golledge et al., 2021)、これを直接裏付ける地質学的証拠はかなり乏しい。

過去の氷床融解を調べる有効な手法の一つは、本稿の主題でもある、氷河によって削り出された碎屑物(堆積物粒子)の供給源を同位体比に基づいて特定する「起源解析」である。しかし、西南極域では、西南極氷床と隣接する南極半島氷床の碎屑物を明確に識別することが困難であり、これが解析上の障壁となっていた。Carlson et al. (2021)の研究は、この問題を克服するために、碎屑物の3種の放射起源同位体比(Sr-Nd-Pb)を組み合わせることで解析した点に新規性がある。彼らは、従来のSr-Nd同位体比だけでは識別が困難であった西南極氷床と南極半島氷床の碎屑物を、鉛同位

体比を導入することで、より明確に区分できると主張した。確かに鉛同位体比によって識別精度は向上しているものの、論文に示されている同位体比プロットには、依然として両供給源の同位体組成の領域に重なりが残っており、完全な分離には至っていない。そのため、結果の解釈には一定の慎重さが求められる。

彼らは、この Sr-Nd-Pb 同位体手法をベリングスハウゼン海の海底堆積物コア (ODP サイト 1096) に適用し、完新世や最終氷期などの層準には西南極氷床由来の碎屑物が含まれるのに対し、最終間氷期 (MIS 5e) 層では、西南極氷床由来の碎屑物が完全に欠如し、南極半島氷床由来の碎屑物のみが検出されたと報告した (図 4)。そして、これを「最終間氷期中に海洋性の西南極氷床がほぼ完全に消失した」ことを示す証拠として結論付けている。この結論は画期的であるが、前述の通り供給源の同位体組成が完全に分離できていないという手法上の限界を内包しており、結論の確実性に疑問が残る。彼らの研究は、西南極氷床崩壊という重要な可能性を提示した一方で、その検証の確度を高めるためには、より精緻な供給源データの整備が必要であることを同時に浮き彫りにしている。つまり、西南極縁辺域全体を網羅する高空間解像度の同位体比データベース、言い換えれば、個々の氷河流域単位での詳細な「地球化学マップ」の構築が、西南極氷床の融解史をより確実性の高いものとして復元するための鍵になる。

3.3. 中期中新世の東西南極氷床の動態：ネオジウム同位体比の利用

約 1700 万年前頃の前期中新世には、地質記録から全球の海水準が約 40~60 m も変動していたことが示唆されている。従来の考えでは、この規模の海水準変動を説明するには、温暖期に東南極氷床がほぼ完全に消失し、その後再び発達する必要があるとされてきた。しかし、このシナリオは氷床モデルによるシミュレーション結果と矛盾しており、この大規模な海水準変動の原因は長らく

不明であった。Marschalek et al. (2021) らは、この矛盾を解決する仮説として、「すでに前期中新世に巨大な西南極氷床が存在し、それが消失と発達を繰り返していたとすれば、東南極氷床が完全に消失しなくても 40~60 m の海水準変動を説明できる」と考えた。著者らはこの仮説を検証するため、南極ロス海沖で掘削された海底堆積物コア (IODP サイト U1521) の碎屑物を対象に、ネオジウム同位体比を用いた起源解析および氷床の流動解析を行った (図 4)。

東南極と西南極の基盤岩は形成史が大きく異なるため、それぞれ異なる ϵ_{Nd} 値を持つ (図 3)。東南極の南極横断山脈は古い大陸地殻に由来するため低い ϵ_{Nd} 値を示すのに対し、ロス海に隣接する西南極のマリーバードランドはマントル由来の若い火山岩を多く含み、高い ϵ_{Nd} 値を示す。この明瞭なコントラストにより、碎屑物の ϵ_{Nd} 値を測定することで、コアサイトに運搬された碎屑物の起源が東南極由来か西南極由来かを高精度に判別できる。特に、ネオジウム同位体比はストロンチウム同位体比に比べて、風化作用や堆積中の粒径による分別 (ソーティング) の影響を受けにくく、長距離を経ても、起源岩石の同位体情報が失われにくいという利点がある。

彼らは、前期中新世に相当する地層 (Sequence 2, 約 17.72 万~17.40 万年前) に着目し、Sequence 2 の碎屑物はその上下の地層と比べて一貫して高い ϵ_{Nd} 値 (-7.2~ -5.9) と比較的低い Sr 同位体比を持つことを明らかにした。この傾向は、碎屑物が西南極のマリーバードランドに分布する新生代火山岩類に由来することを示している。一方、その他の層準で見られる低い ϵ_{Nd} 値は、東南極の南極横断山脈に由来する特徴と一致している。さらに著者らは、ネオジウム同位体データに加え、ジルコン U-Pb 年代や角閃石 Ar-Ar 年代などのデータを組み合わせることで、約 17.72 万年前 (Sequence 2 区間) には、西南極氷床がロス海の大陸棚の大部分を覆うほど拡大し、その碎屑物がコア地点まで運搬されていたと結論づけている。この研究は、

ネオジム同位体比を碎屑物のトレーサーとして用いることで、前期中新世にすでに大規模な海洋性の西南極氷床が存在したことを初めて証明しており、同時に当時の海水準変動が東南極氷床の完全融解を伴わずに生じ得たことを明らかにしている。この研究からも明らかのように、ネオジム同位体比は、時代や地域を問わず適用できる汎用性の高いツールであり、南極氷床の動態を理解する上で不可欠であることを裏付けている。

3.4. 鮮新世の西南極氷床の全融解：ストロンチウム、ネオジム、鉛同位体比の利用

最後に、筆者らが進めている研究について述べる。筆者は、2019年に実施された西南極アムンゼン沖での国際深海科学掘削計画 (IODP) 379次航海に参加し、良質な鮮新世の堆積物試料 (U1532 コア) の採取に成功した (図4)。鮮新世は、最終間氷期と同様に、将来の温暖化地球の類似時代とされており、当時の南極氷床の融解状況の正確な把握が求められている。南極氷床の中でも、西南極氷床は、東南極氷床に比べて温暖化に対する応答性が高く、現在最も急速に融解が進行している。そのため全球平均気温が2-3℃高い場合でも、それ以上に温暖であった鮮新世を模した気候場においても、西南極氷床の完全融解が氷床モデルで示されている (DeConto and Pollard, 2016)。しかし、このモデル予測を裏付ける地質学的証拠は乏しく、実際に西南極氷床の融解がいつ、どの程度の規模で起こったのかが不明であったため、その脆弱性を正確に評価することは困難であった。このような状況の中、筆者らは堆積物コアのネオジムと鉛同位体比を分析し、330-460万年前の鮮新世温暖期に西南極氷床が14回融解し、そのうち少なくとも5回は西南極氷床が内陸まで後退する全融解 (3メートルの海水準上昇に相当) であったことを初めて突き止めた (Horikawa et al., in review)。この研究の最大の成果は、碎屑物の起源解析の精度を飛躍的に向上させた点にある。つまり、西南極域の広範囲をカバーする Sr-Nd-Pb

同位体比マップを新たに作成した上で、起源解析に鉛同位体比を組み込んだことが、西南極氷床の融解履歴の高精度復元および全融解の実証に決定的な役割を果たした。

4. これから

上述した研究事例が示すように、碎屑物の同位体比を用いた起源解析は、過去の南極氷床の変動、特に温暖期における氷床の応答を解明する上で極めて有効な手法である。海底堆積物に含まれる碎屑物の供給源を南極大陸の基盤岩まで遡ることで、過去の氷床の存在範囲や流動パターンを空間的に復元できる点で、現時点において他に代替手段のない手法と言える。しかし、この手法の精度は、供給源となる氷床下の基盤岩の地質 (後背地) の同位体組成がどれだけ網羅的に解明されているかに大きく依存する。現実には、南極大陸の大部分が厚い氷床に覆われており、基盤岩の露出は限られるため、氷床下の地質情報の欠如が、起源解析における最大の制約となっている。

このような根本的な制約を克服するため、これまでの研究では「地球化学マップ」の構築が進められてきた。これは、沿岸部に露出する基盤岩や、氷床末端部・陸棚域で採取された氷河堆積物や表層堆積物などを分析し、各氷河流域ごとの同位体組成を特定するというものである。構築された南極の「地球化学マップ」は、沖合で得られる堆積物コアの解釈に利用され、特定の同位体組成を持つ碎屑物が発見された場合に、それがどの氷床域に由来するのか、すなわちどの氷床域が融解・後退したのかを推定する際の基盤データとなっている。

碎屑物の起源解析は、南極氷床の過去の変動史を解明するための不可欠な研究ツールとして確立されつつあるが、今後の研究では、「地球化学マップ」の高精度化とマルチプロキシ化が一層求められている。具体的には、既存のマップの空間解像度をさらに向上させるとともに、異なる地球化学的・年代学的指標を統合したデータベースの構築

が不可欠である。このようなデータベースが拡充整備されれば、Sr-Nd-Pb 同位体比に加え、ジルコン U-Pb 年代や角閃石 Ar-Ar 年代などの鉱物年代情報を組み合わせることで、過去の温暖期における南極氷床の融解規模や範囲の推定精度を飛躍的に高めることが可能となる。

謝辞

本稿の基となる講演を行う機会をくださった京都大学化学研究所の宗林由樹教授並びに公益財団法人海洋化学研究所の皆様へ感謝いたします。

文献

- Abell J. T., Winckler G., Anderson R. F. and Herbert T. D. (2021) Poleward and weakened westerlies during Pliocene warmth. *Nature* **589**, 70–75.
- Bhattacharya T., Feng R., Tierney J. E., Rubbelke C., Burls N., Knapp S. and Fu M. (2022) Expansion and Intensification of the North American Monsoon During the Pliocene. *AGU Advances* **3**, e2022AV000757.
- Carlson A. E., Beard B. L., Hatfield R. G. and Laffin M. (2021) Absence of West Antarctic-sourced silt at ODP Site 1096 in the Bellingshausen Sea during the last interglaciation: Support for West Antarctic ice-sheet deglaciation. *Quat. Sci. Rev.* **261**, 106939.
- Clark P. U., Shakun J. D., Rosenthal Y., Köhler P. and Bartlein P. J. (2024) Global and regional temperature change over the past 4.5 million years. *Science* **383**, 884–890.
- DeConto R. M. and Pollard D. (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* **531**, 591–597.
- Dumitru O. A., Dyer B., Austermann J., Sandstrom M. R., Goldstein S. L., D’Andrea W. J., Cashman M., Creel R., Bolge L. and Raymo M. E. (2023) Last interglacial global mean sea level from high-precision U-series ages of Bahamian fossil coral reefs. *Quaternary Science Reviews* **318**, 108287.
- Faure G. and Mensing T. M. (2005) *Principles and applications.*, John Wiley & Sons, Inc.
- Golledge N. R., Clark P. U., He F., Dutton A., Turney C. S. M., Fogwill C. J., Naish T. R., Levy R. H., McKay R. M., Lowry D. P., Bertler N. A. N., Dunbar G. B. and Carlson A. E. (2021) Retreat of the Antarctic Ice Sheet During the Last Interglaciation and Implications for Future Change. *Geophysical Research Letters* **48**, e2021GL094513.
- Hemming S. R. and McLennan S. M. (2001) Pb isotope compositions of modern deep sea turbidites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **184**, 489–503.
- Horikawa K., Martin E. E., Basak C., Onodera J., Seki O., Sakamoto T., Ikehara M., Sakai S. and Kawamura K. (2015) Pliocene cooling enhanced by flow of low-salinity Bering Sea water to the Arctic Ocean. *Nat Commun* **6**, 7587.
- Huston D. L. and Champion D. C. (2023) Applications of Lead Isotopes to Ore Geology, Metallogenesis and Exploration. In *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration* (eds. D. Huston and J. Gutzmer). Springer International Publishing, Cham. pp. 155–187.
- Iizuka M., Seki O., Wilson D. J., Sukanuma Y., Horikawa K., Van De Flierdt T., Ikehara M., Itaki T., Irino T., Yamamoto M., Hirabayashi M., Matsuzaki H. and Sugisaki S. (2023) Multiple episodes of ice loss from the Wilkes Subglacial Basin during the Last Interglacial. *Nat Commun* **14**, 2129.
- IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis*

- Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)], IPCC.*
- Jacobsen S. B. and Wasserburg G. J. (1980) Sm-Nd isotopic evolution of chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **50**, 139–155.
- Licht K. J. and Hemming S. R. (2017) Analysis of Antarctic glacial sediment provenance through geochemical and petrologic applications. *Quat. Sci. Rev.* **164**, 1–24.
- Marschalek J. W., Zurli L., Talarico F., van de Flierdt T., Vermeesch P., Carter A., Beny F., Bout-Roumazelles V., Sangiorgi F., Hemming S. R., Pérez L. F., Colleoni F., Prebble J. G., van Peer T. E., Perotti M., Shevenell A. E., Browne I., Kulhanek D. K., Levy R., Harwood D., Sullivan N. B., Meyers S. R., Griffith E. M., Hillenbrand C.-D., Gasson E., Siegert M. J., Keisling B., Licht K. J., Kuhn G., Dodd J. P., Boshuis C., De Santis L., McKay R. M., IODP Expedition 374, Ash J., Beny François, Browne I. M., Cortese G., De Santis Laura, Dodd Justin P., Esper O. M., Gales J. A., Harwood D. M., Ishino S., Keisling B. A., Kim Sookwan, Kim Sunghan, Kulhanek Denise K., Laberg J. S., Leckie R. M., McKay Robert M., Müller J., Patterson M. O., Romans B. W., Romero O. E., Sangiorgi Francesca, Seki O., Shevenell Amelia E., Singh S. M., Cordeiro de Sousa I. M., Sugisaki S. T., van de Flierdt Tina, van Peer Tim E., Xiao W. and Xiong Z. (2021) A large West Antarctic Ice Sheet explains early Neogene sea-level amplitude. *Nature* **600**, 450–455.
- Robinson S., Ivanovic R., van de Flierdt T., Blanchet C. L., Tachikawa K., Martin E. E., Cook C. P., Williams T., Gregoire L., Plancherel Y., Jeandel C. and Arsouze T. (2021) Global continental and marine detrital ϵNd : An updated compilation for use in understanding marine Nd cycling. *Chemical Geology* **567**, 120119.
- Stacey J. S. and Kramers J. D. (1975) Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters* **26**, 207–221.
- Tatsumoto M., Knight R. J. and Allegre C. J. (1973) Time Differences in the Formation of Meteorites as Determined from the Ratio of Lead-207 to Lead-206. *Science* **180**, 1279–1283.
- Wilson D. J., Bertram R. A., Needham E. F., van de Flierdt T., Welsh K. J., McKay R. M., Mazumder A., Riesselman C. R., Jimenez-Espejo F. J. and Escutia C. (2018) Ice loss from the East Antarctic Ice Sheet during late Pleistocene interglacials. *Nature* **561**, 383–386.
- 加々美寛雄, 周藤賢治 and 永尾隆志 (2008) 同位体岩石学., 共立出版.