

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：18001

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26550013

研究課題名(和文)南極アイスコアの硫黄同位体比を用いた気候フィードバック機構の解明

研究課題名(英文)Climate analysis using sulfur stable isotope ratio from Antarctic snow and ice core

研究代表者

植村 立 (UEMURA, Ryu)

琉球大学・理学部・准教授

研究者番号：00580143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：硫酸エアロゾルは、直接・間接効果を通して気候変動に影響を与える物質である。これまでの研究では、氷期サイクルにおける硫酸エアロゾルの変動は小さいことが示されている。しかし、硫酸エアロゾルには複数の起源があるために、起源ごとの変動は未解明である。本研究では、南極の硫酸エアロゾルの起源推定を行うために、南極氷床の表面雪とアイスコアの硫黄安定同位体比の分析を行った。現在の表面雪の分析結果から、輸送過程による同位体効果は小さく、海洋生物起源活動が主な起源であることが明らかになった。アイスコアの分析では、硫黄同位体比は、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。

研究成果の概要(英文)：Sulfate aerosols affect Earth's radiative forcing through direct and indirect effects. Ice core data suggest minor changes in sulfate aerosols over the glacial cycles. However, the variations of source contributions of sulfate aerosols remain unclear. In this project, to estimate the changes in source contributions of sulfate aerosols in Antarctica, we analyzed sulfur isotopic ratios of surface snow and ice core. Sulfur isotope ratio of present-day surface snow over East Antarctica shows that the effects of the transport process are small, and major source of present-day sulfate aerosol is marine biogenic activity. The ice core data show that the sulfur isotopic ratio increased from the last glacial period to Holocene.

研究分野：地球化学、古気候学、分析化学

キーワード：硫酸エアロゾル アイスコア 硫黄同位体比 氷期サイクル 南極 フィードバック 温暖化 海洋生物活動

1. 研究開始当初の背景

エアロゾルが気候変動に与える影響は複雑であり、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の報告においても不確実性が最も大きい要素と指摘されている。なかでも、硫酸エアロゾルは、生物活動を通して温暖化を抑制する負のフィードバックをもつとする仮説が提唱されるなど生物圏と気候の関わりという点からも注目を集めている。

長期的な変動としては、南極アイスコアの解析によると、最終氷期から現在の間氷期(完新世)にかけては約 8 の気温上昇があったと見積もられている(Uemura et al., 2012)。この気温上昇期においては、硫酸イオンのフラックスは氷期サイクルを通じてほぼ一定であり、気温変動との相関がないことから、フィードバック機構は氷期サイクルでは機能していないと考えられていた(e.g., Wolff et al., 2006)。しかし、硫酸エアロゾルには発生源複数あるので、フィードバック機構を理解するためには、気温変動に対してどの起源がどのように応答したのか?を知る必要がある。この点で、起源ごとに異なる値を持つ硫黄の安定同位体比(^{34}S)は有用である。しかし、南極アイスコアに関する研究は、1例のみ(Alexander et al., 2003)であり、その測定データ数が極めて少ないことや、氷床上での輸送過程における ^{34}S の分別の可能性があることから、明確な結論には至っておらず、未解明な点が多い。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究では、硫酸エアロゾルによる気候フィードバック機構を解明するために、南極の ^{34}S をこれまでにはない時間・空間分解能で測定することを目的とした。具体的には、以下の3点に分けられる。(1)南極の低濃度硫酸試料に適した分析手法の改良。(2)現在の硫酸エアロゾル起源と輸送過程における同位体分別の有無を明らかにするために、東南極の積雪サンプルを測定し、東南極の空間分布(沿岸から内陸まで)を求める。(3)最終氷期から完新世初期にかけての南極ドームふじアイスコアの ^{34}S を分析する。

3. 研究の方法

以下の3つに分けて研究を実施した。

(1)硫黄同位体比測定法の改良:南極氷床における雪・氷床コアに特化した高感度の硫黄同位体測定法の開発・改良を行った。具体的には、蒸発乾固を中心とする前処理処理作業の改良とクリーンブースの増設等を行った。

(2)南極氷床上の同位体分布の解明:沿岸から内陸にかけて第54次南極観測隊が採取した表層積雪サンプルの硫黄同位体比を12試料、琉球大学の安定同位体比質量分析計

で分析した。この分析は上記(1)で開発した手法を用いた。349-910 mLの融解試料を全量蒸発乾固し、約 $0.3 \mu\text{molS}$ の硫酸バリウムを得た。これを燃焼させ二酸化硫黄に変換し、連続フロー式安定同位体比分析計で硫黄安定同位体比を測定した。また、表面雪サンプルの主要陽イオン・陰イオン濃度は、イオンクロマトグラフを用いて国立極地研究所において測定した。

(3)アイスコアの測定による気候変動プロセスの解明:最終氷期から完新世前半にかけての温暖化期に注目して、南極ドームふじ氷床コアの硫酸イオンの硫黄同位体比を、高い時間分解能で測定し、起源・輸送プロセスの解析を行った。具体的には、6.0から24.6 kyr BP(千年前)について35試料を採取し、測定した。アイスコア試料は、2年度に分けて極地研の低温室において、前処理作業(切断、表面汚染除去、融解)を行った。融解したサンプルの硫黄安定同位体比は、琉球大学の安定同位体比質量分析計で分析した。この分析は(1)で開発した手法を用いた。主要陽イオン・陰イオン濃度は、イオンクロマトグラフを用いて国立極地研究所において測定した。

4. 研究成果

(1)硫黄同位体比測定法の改良:前処理処理作業を一部自動化し、クリーンブースを増設することで、複数試料を同時に処理するシステムを構築した。試料量が $0.2-0.3 \mu\text{mol S}$ で ^{34}S の測定精度は $\pm 0.2\text{‰}$ であった。この手法により、ルーチン的に低濃度試料の硫黄同位体比分析を行えるようになった。

(2)南極氷床上の同位体分布の解明:南極

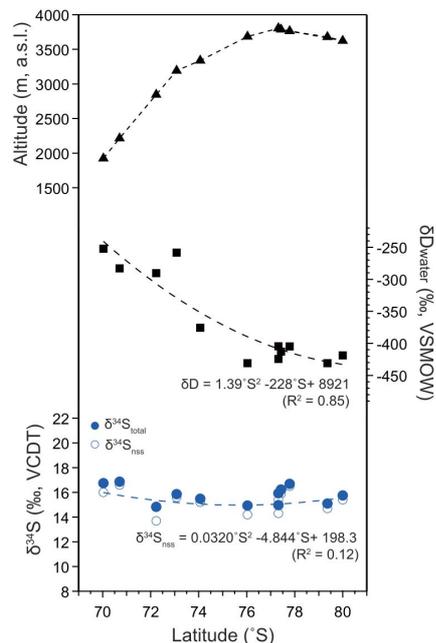


図1 南極表面雪の硫黄同位体比分布 (Uemura et al., 2016)

氷床上で、第 54 次南極観測隊が採取した表層積雪サンプルの硫黄同位体比を測定した。この結果は、沿岸から内陸にかけての硫黄同位体比の分布を明らかにした初めてのデータであり、国際誌に論文として公表した(5. 主な発表論文等欄〔雑誌論文〕)。この結果から以下の 2 点が示唆された。これまでの研究では、沿岸から内陸への輸送の際に硫黄同位体比が変化する可能性が指摘されていた(Alexander et al., 2003)。しかし、これまでの研究では東南極氷床での表層積雪の観測データは離散的な 4 地点程しかなかった。本研究で明らかになった沿岸から内陸にかけての硫黄同位体比データは、緯度や標高による効果は無かった(図 1)。このことは、輸送過程での同位体分別による変質の効果が小さいことを示唆している。したがって、南極内陸においても、硫黄同位体比は起源における値を反映していると考えられ、アイスコアの硫黄同位体比の変動も主として起源変動として解釈できることを示唆している。この結果は、水の水素・酸素安定同位体比が内陸にかけて低くなる観測(5. 主な発表論文等欄〔雑誌論文〕)や堆積後の変質によって大きく変化している硝酸の窒素同位体比(5. 主な発表論文等欄〔雑誌論文〕)と対照的である。

観測された ^{34}S 値は 15‰前後の高い値を維持しており、海洋生物活動に由来する硫黄が主要な起源($84 \pm 16\%$ の寄与)であることを示した。また、本研究の結果は、東南極の広範囲において ^{34}S 値が一定範囲 ($15.7 \pm 1.1\%$)であることを示した。この結果は、西南極で観測されている非常に低い ^{34}S 値 ($6.2 \pm 1.6\%$)とは対照的である。硫黄同位体比が低い値をとる起源としては火山起源か成層圏起源の 2 つの可能性がある。現在の大気シミュレーションによると、火山活動は西南極地域だけに特異的に影響を与える可能性がある。したがって、この硫黄同位体比データは火山活動の寄与が西南極で大きいことを示唆している。

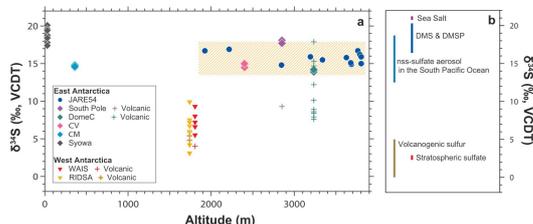


図 2 南極表面雪の硫黄同位体比分布(a)と起源別の同位体比(b) (Uemura et al., 2016より)

(3) アイスコアの測定による気候変動プロセスの解明：質量分析計の故障などにより計画よりも時間を要したが、35 試料の測定を終えた。ドームふじコアの完新世の ^{34}S 値は、現在の東南極表面積雪の値(上記(2)の成

果：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 ^{34}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った。また、ドームふじコアの ^{34}S 値は、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。この分析結果を基にして、起源別の寄与率変動を定量的に分離する手法を考案し学会発表を行った。今後、国際誌に成果公表を行う計画である(5. 主な発表論文等欄〔学会発表〕)。また、この硫黄同位体比変動の解析に必要な、ドームふじアイスコアの気温と水蒸気起源海水温の復元(5. 主な発表論文等欄〔雑誌論文〕)及び硫酸塩組成の解析(5. 主な発表論文等欄〔雑誌論文〕)も行った。

< 引用文献 >

Wolff, E. W., et al., *Nature*, 440(7083) 491 – 496 (2006)

Alexander, B., M. H. Thiemens, J. Farquhar, A. J. Kaufman, J. Savarino, and R. J. Delmas, *J. Geophys. Res.*, 108(D24), 4786, doi:10.1029/2003JD003513 (2003)

Ryu Uemura, Valérie Masson-Delmotte, Jean Jouzel, Amaelle Landais, Hideaki Motoyama, Barbara Stenni, Ranges of moisture-source temperature estimated from Antarctic ice cores stable isotope records over glacial–interglacial cycles, *Climate of the Past*, 8,1109–1125 (2012)

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 5 件)

Ryu Uemura, Hideaki Motoyama, Valérie Masson-Delmotte, Jean Jouzel, Kenji Kawamura, Kumiko Goto-Azuma, Shuji Fujita, Takayuki Kuramoto, Motohiro Hirabayashi, Takayuki Miyake, Hiroshi Ohno, Koji Fujita, Ayako Abe-Ouchi, Yoshinori Iizuka, Shinichiro Horikawa, Makoto Igarashi, Keisuke Suzuki, Toshitaka Suzuki & Yoshiyuki Fujii, Asynchrony between Antarctic temperature and CO_2 associated with obliquity over the past 720,000 years, *Nature Communications*, 9, Article number: 961 (2018) (査読有) doi: 10.1038/s41467-018-03328-3

Kazushi Noro, Shohei Hattori, Ryu Uemura, Kotaro Fukui, Motohiro Hirabayashi, Kenji Kawamura, Hideaki Motoyama, Norimichi Takenaka and Naohiro Yoshida, Spatial variation of isotopic compositions of snowpack nitrate related to post-depositional processes in eastern Dronning Maud Land, East Antarctica,

Geochemical Journal, 52 (2), e7-e14 (2018) (査読有)
doi: 10.2343/geochemj.2.0519

A. Touzeau, A. Landais, B. Stenni, R. Uemura, K. Fukui, S. Fujita, S. Guilbaud, A. Ekaykin, M. Casado, E. Barkan, B. Luz, O. Magand, G. Teste, E. Le Meur, M. Baroni, J. Savarino, I. Bourgeois, and C. Risi, Acquisition of isotopic composition for surface snow in East Antarctica and the links to climatic parameters, *The Cryosphere*, 10, 837-852 (2016) (査読有)
doi: 10.5194/tc-10-837-2016

Ryu Uemura, Kosuke Masaka, Kotaro Fukui, Yoshinori Iizuka, Motohiro Hirabayashi and Hideaki Motoyama, Sulfur isotopic composition of surface snow along a latitudinal transect in East Antarctica, *Geophysical Research Letters*, 43, 5878- 885 (2016) (査読有)
doi: 10.1002/2016GL069482

Ikumi Oyabu, Yoshinori Iizuka, Ryu Uemura, Takayuki Miyake, Motohiro Hirabayashi, Hideaki Motoyama, Toshimitsu Sakurai, Toshitaka Suzuki, Takeo Hondoh, Chemical compositions of sulfate and chloride salts over the last termination reconstructed from the Dome Fuji ice core, inland Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, 119 (24), 14045-14058 (2014) (査読有)
doi: 10.1002/2014JD022030

〔学会発表〕(計 9 件)

植村立, 眞坂昂佑, 松本理誠, 植村美希, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 本山秀明, 最終退氷期におけるドームふじアイスコア中の硫黄同位体分析：硫酸エアロゾルの起源推定, 日本地球惑星科学連合 連合大会 (2018)

服部祥平, 植村立, 野呂和嗣, 福井幸太郎, 平林幹啓, 竹中規訓, Savarino Joel, 川村賢二, 本山秀明, 吉田尚弘, The triple isotopic composition of oxygen for sulfate and nitrate in surface snow in a latitudinal transect in East Antarctica, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2017 年大会 (2017)

植村立, 眞坂昂佑, 松本理誠, 植村美希, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 本山秀明, 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, 地球化学年会(2016)

植村立, 眞坂昂佑, 福井幸太郎, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 本山秀明, 硫黄同位体比分析による東南極表面雪の硫酸エアロゾルの起源推定, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2016 (2016)

植村立, DF コアの硫酸イオンの硫黄同位体比と水の水素・酸素同位体解析, ドームふじアイスコア研究集会(2016)

眞坂昂佑, 植村立, 福井幸太郎, 飯塚芳徳, 松本理誠, 植村美希, 平林幹啓, 本山秀明, 東南極表面積雪と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変動メカニズムの解析, 第 5 回同位体環境学シンポジウム, 総合地球環境学研究所 (2015)

眞坂昂佑, 植村立, 福井幸太郎, 飯塚芳徳, 松本理誠, 植村美希, 平林幹啓, 本山秀明, 南極表層積雪と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変動メカニズムの解析, 日本地球化学会 年会 (2015)

飯塚芳徳, 保科優, 植村立, 大野浩, 平林幹啓, 福井幸太郎, 鈴木利孝, 本山秀明, 南極氷床表面雪における海塩の硫酸塩化反応, 雪氷研究大会 (2014)

眞坂昂佑, 植村立, 宮城正宙, 松本理誠, スズ箔への直接蒸発乾固による天水中の硫黄同位体比測定法の検討, 日本地球化学会 年会 (2014)

〔図書〕(計 2 件)

河村公隆編「低温環境の科学辞典」朝倉書店, 2016 年(総ページ数 p432: 項目分担(さまざまな過去の気温推定法 p.287)

公益社団法人日本雪氷学会編「新版 雪氷辞典」古今書院 2014 年(総ページ数 p.305, 担当: 項目執筆 p.128)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植村立 (UEMURA, Ryu)
琉球大学・理学部・准教授
研究者番号: 00580143

(2) 研究分担者

本山秀明 (MOTOYAMA, Hideaki)
情報・システム研究機構・国立極地研究所・教授
研究者番号: 20210099

(3) 連携研究者

平林幹啓 (HIRABAYASHI, Motohiro)
情報・システム研究機構・国立極地研究所・特任助手
研究者番号: 20399356

飯塚芳徳 (IIZUKA, Yoshinori)
北海道大学・低温科学研究所・助教
研究者番号: 40370043