

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26400462

研究課題名(和文) 南極ドームふじ氷床コア中金属成分が示すエアロゾル気候変動

研究課題名(英文) Aerosol climate change indicated by metal components in Antarctic Dome Fuji ice core

研究代表者

鈴木 利孝 (Suzuki, Toshitaka)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：90202134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：IPCC第5次報告書では、エアロゾルは地球エネルギー収支の見積もりにおいて、依然として最も大きな不確実性をもたらしめていることが指摘されている。南極氷床中に保存されているエアロゾルは、古気候や古環境を復元する良い指標となる。しかし、その大部分を占める不溶性粒状物を含む全濃度についての研究は例が少なく、特に金属組成変動に関する議論は不十分である。本研究では、過去72万年にわたる気候変動の優れたアーカイブである南極ドームふじ氷床コア中の金属全濃度(粒子態濃度+溶存態濃度)を定量し、鉱物および海塩エアロゾルの濃度、フラックスおよび金属組成と気候変動との関係について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動研究においてエアロゾルの寄与は極めて重要であることが認識されているにもかかわらず、これまでの氷コア解析においては粒子態金属成分の測定はほとんど行われていない。コア中粒子を全分解することにより粒子態および溶存態金属成分濃度を得ることは国際的にも希な取り組みであり、本研究の学術的特色である。また、氷コアから過去のエアロゾルフラックス変動を復元し、気温やCO₂濃度との関係を説明した研究例は少なく、本研究で得られる結果は、エアロゾルによる気候変動シミュレーションの入力データや海洋のCO₂吸収ポンプの検証データとなり、気候・環境変動の将来予測に貢献するという社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Aerosols reserved in the Antarctic ice sheet provide a good indicator of paleoclimate and paleoenvironment. However, studies on total concentrations, including insoluble particulates that make up the aerosols, are rare. In this study, the total (particulate+dissolved) concentration of metals in the Antarctic Dome Fuji ice core, which is an excellent archive of climate change over the past 720000 years, is quantified, and the concentration and flux of mineral and seasalt aerosol and the relationship between metal composition and climate change are clarified.

研究分野：極域雪氷学

キーワード：南極 アイスコア 金属成分 エアロゾル 気候変動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IPCC 第 5 次報告書では、エアロゾルは地球エネルギー収支の見積もりにおいて、依然として最も大きな不確実性をもたらしめていることが指摘されている。南極氷床中に保存されているエアロゾルは、古気候や古環境を復元する良い指標となる。しかし、その大部分を占める不溶性粒子物を含む全濃度についての研究は例が少なく、特に金属組成変動に関する議論は不十分である。

2. 研究の目的

本研究では約 72 万年間の気候記録を保持すると推定されているドームふじ氷床コア中の金属成分を全分解分析により測定し、鉱物および海塩エアロゾルの濃度、フラックスおよび金属組成と気候変動との関係について明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

試料は日本南極地域観測隊により南極ドームふじ基地(南緯 77°19'、東経 39°42'、標高 3810m)において深度 3035.22m まで得られているドームふじ深層氷コア (DF コア; Kawamura et al., 2017) を用いた。コア全層から分取した氷片をテフロン容器中で融解、蒸発乾固し、マイクロ波酸分解により残渣を全分解した。得られた溶液中の Na、Al、Mn、Fe 等を ICP 質量分析法により測定した (Sato et al., 2013; Suzuki and Sensui, 1991)。

4. 研究成果

測定された濃度は氷コア中に含まれる金属成分全濃度 (粒子態濃度+溶存態濃度) である。図 1 に DF コアから復元された Al と Na の全濃度 (t-Al, t-Na) および $\delta^{18}\text{O}$ の時間変動を示す。DF コア中の t-Al 濃度の変動幅は $0.53\sim 282 \mu\text{g kg}^{-1}$ 、t-Na 濃度の変動幅は $11.6\sim 296 \mu\text{g kg}^{-1}$ であり、最大値と最小値の比はそれぞれ約 530 と約 26 であった。t-Al 濃度のピークは氷期最寒期に観察され、間氷期に低い値を示した。これはボストーク (De Angelis et al., 1987) やドーム C (Gaspari et al., 2006) の氷床コアから得られた地殻起源の金属濃度の変動と一致している。最終氷期最寒期 (Last Glacial Maximum; LGM) には大陸の乾燥域の拡大やダストストームの頻度の増加、大気の子午面循環が活性化していたことが知られている (CLIMAP Project Members, 1976)。また、これまでの研究によって得られている多くの証拠は、氷期における大気環境が現在の環境よりも風送ダストが多かったことを示している (Reader et al., 1999; Irino and Tada, 2002)。t-Na 濃度の変動幅は t-Al 濃度のそれよりも小さく、氷期サイクルに伴う氷床への Na 供給は Al ほど変動が大きく無いことを示している。これは Al の供給源である大陸に比べて Na の主な供給源である海洋の方がドームふじに近いとみられる。このように、Al の供給源はほとんどが地殻であるのに対し、Na は地殻と海洋の両方から供給される。MIS10~12 付近を境にして t-Al、t-Na とともに時間にずれはあるが振幅強度が変化していることが明らかとなった。MIS11 付近を境にした $\delta^{18}\text{O}$ 変動の強度変化は Mid-Brunhes Event (MBE) として知られており、これらの金属濃度はこの気候変動の変化に応答していると考えられる。

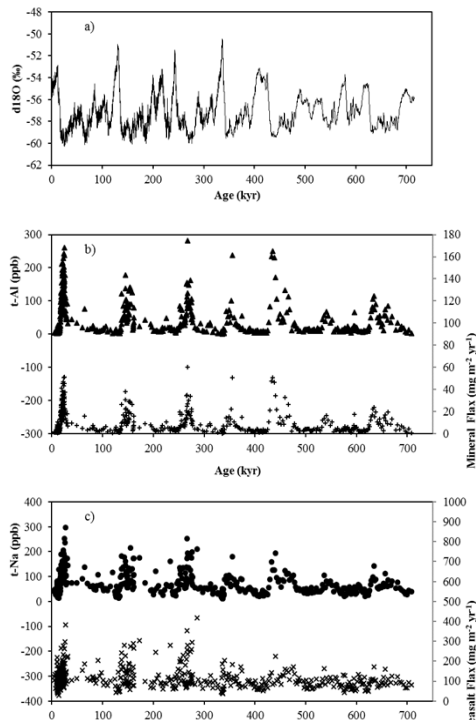


図 1 ドームふじ氷床コアにおける過去 72 万年の a) $\delta^{18}\text{O}$ 、b) t-Al、鉱物フラックス、c) t-Na、海塩フラックスの時間変動

表 1 氷期-間氷期サイクルの氷期最寒期および間氷期のドームふじにおける鉱物及び海塩フラックス

MIS	Climatic division	Mineral flux $\pm 1\sigma$ $\text{mg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$	Seasalt flux $\pm 1\sigma$ $\text{mg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$
1	IG1	3.46 ± 2.09	95.4 ± 39.0
2	GM1	21.2 ± 11.2	133 ± 52
5e	IG2	2.49 ± 1.38	76.0 ± 33.3
6b	GM2	15.1 ± 8.7	143 ± 56
7c	IG3	3.83 ± 1.04	97.6 ± 31.0
8d	GM3	20.5 ± 11.8	156 ± 88
9e	IG4	2.29 ± 1.66	88.8 ± 54.4
10	GM4	11.7 ± 3.3	112 ± 22
11	IG5	2.33 ± 0.87	75.7 ± 19.6
12	GM5	24.5 ± 17.4	114 ± 43
13	IG6	3.50 ± 0.95	82.5 ± 17.8
14	GM6	6.69 ± 4.61	97.1 ± 23.1
15	IG7	4.07 ± 2.81	80.5 ± 26.2
16	GM7	11.1 ± 5.8	98.2 ± 24.9
17	IG8	2.09 ± 1.60	76.9 ± 13.1
All periods			
	IG _{mean}	3.33 ± 2.06	88.1 ± 35.3
	GM _{mean}	17.9 ± 11.4	128 ± 54
	IG _{mean} /GM _{mean}	5.4	1.4
After MBE			
	IG _{mean}	3.15 ± 1.92	91.4 ± 40.3
	GM _{mean}	19.9 ± 11.0	137 ± 58
	IG _{mean} /GM _{mean}	6.3	1.5
Before MBE			
	IG _{mean}	3.76 ± 2.28	80.8 ± 22.5
	GM _{mean}	12.3 ± 10.7	101 ± 29
	IG _{mean} /GM _{mean}	3.3	1.2

氷期最寒期 (GM) および間氷期 (IG) のドームふじにおける鉱物及び海塩フラックスの平均値を表 1、時間変動を図 1 に示す。表には全期間の平均値と MBE 前後における IG および GM の平均値も示した。なお、ここでは IG5 と GM5 の境界を MBE とした。ドームふじにおける鉱物フラックスの平均値は GM で $17.9 \pm 11.4 \text{ mg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ を示し、IG における $3.33 \pm 2.06 \text{ mg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ よりも 1 桁大きい値となった。これらの結果は氷期最寒期における鉱物エアロゾルの増大や輸送の強化を示している。鉱物フラックスの $\text{GM}_{\text{mean}}/\text{IG}_{\text{mean}}$ は全期間平均で 5.4 であった。Gaspari et al. (2006) はドーム C 氷コアにおける酸可溶 Fe のフラックスの LGM/HOL 比を 36 と報告している。また、Fischer et al. (2007) はボストーク氷コアにおける微粒子の LGM/HOL 比を ~ 15 と報告している。本研究で得られた値は、異なる手法によるものであるが過去の研究で報告された値よりも小さかった。本研究の結果は、粒状物の全分解分析によって得られた結果であり、氷期最寒期と間氷期の鉱物エアロゾル輸送の違いについて議論するために非常に重要だと考えられる。その証拠として、深海堆積物コアから復元された鉱物フラックスの LGM/HOL 比は 3~4 であり (Iriano and Tada, 2003)、本研究の結果と同程度である点が挙げられる。海塩フラックスの平均値は IG で $88.1 \pm 35.3 \text{ mg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、GM で $128 \pm 54 \text{ mg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であり、IG と GM で顕著な差を示さず、 $\text{GM}_{\text{mean}}/\text{IG}_{\text{mean}}$ は全期間平均で 1.5 であった。これらの結果は、ドームふじにおける海塩フラックスは鉱物フラックスほど氷期-間氷期変動を示さないことを示している。本研究の結果は、気候変動に伴うドームふじの鉱物フラックスの変化は海塩フラックスの変化に比べて著しく大きかったことを示唆している。

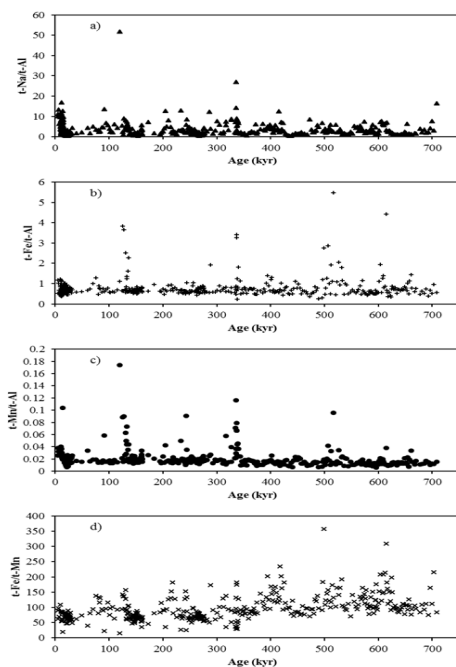


図 2 ドームふじ氷床コアにおける過去 72 万年の a) t-Na/t-Al, b) t-Fe/t-Al, c) t-Mn/t-Al および d) t-Fe/t-Mn の時間変動

t-Na、t-Fe、t-Mn の t-Al 比および t-Fe/t-Mn 比の時間変動を図 2 に示す。t-Na/t-Al 比が間氷期に高い値を示すのは海塩粒子による影響が大きいと考えられるが、海水中にほとんど存在しない t-Fe と t-Mn も間氷期に対 t-Al 比が高い値を示した (図 2a, b, c)。ボストークや Dome C の氷床コア記録からは間氷期には一部の金属元素が濃縮を示すことが知られている (Gabielli et al., 2005)。ただし、Gabielli et al. (2005)によれば、Mn の濃縮係数は氷期-間氷期で大きく変動しないグループとされているが、本研究では氷期-間氷期で大きな変化が見られた。これは、Gabielli et al. (2005)では酸可用成分を測定しているのに対し、本研究では粒状物を全分解測定しているためだと考えられ、氷床コア中金属の全分解測定の有用性を示す結果である。

<引用文献>

- ① Kawamura, K. and Dome Fuji Ice Core Project Members (2017). State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modelling, *Science Advances*, **3**, e1600446, DOI: 10.1126/sciadv.1600446, 2017.
- ② Fischer, H., Fundel, F., Ruth, U., Twarloh, B., Wegner, A., UdiSti, R., Becagli, S., Castellano, E., Morganti, A., Severi, M., Wolff, E., Littot, G., Rothlisberger, R., Mulvaney, R., Hutterli, M. A., Kaufmann, P., Federer, U., Lambert, F., Bigler, M., Hansson, M., Jonsell, U., de Angelis, M., Boutron, C., Siggaard-Andersen, M. L., Steffensen, J. P., Barbante, C., Gaspari, V., Gabnelli, P. and Wagenbach, D. (2007). Reconstruction of millennial changes in dust emission, transport and regional sea ice coverage using the deep EPICA ice cores from the Atlantic and Indian Ocean sector of Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, **260**(1), 340-354.
- ③ Gabielli, P., Planchon, Frédéric, A. M., Hongd, S., Leed, K. H., Hurd, S. D., Barbante, C., Ferraria, C. P., Petita, J. R., Lipenkov, V. Y., Cescon, P. and Boutron, C. F. (2005a). Trace elements in Vostok Antarctic ice during the last four climatic cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, **234**(1), 249-259.
- ④ Gaspari, V., Barbante, C., Cozzi, G., Cescon, P., Boutron, C. F., Gabielli, P., Capodaglio, G., Ferrari, C., Petit, J. R., & Delmonte, B. (2006). Atmospheric iron fluxes over the last deglaciation: Climatic implications. *Geophysical Research Letters*, **33**(3), L03704.
- ⑤ Iriano, T. and Tada, R. (2003). High-resolution reconstruction of variation in aeolian dust (Kosa) deposition at ODP site 797, the Japan Sea, during the last 200 ka. *Global and Planetary Change*, **35**, 143-156.
- ⑥ Reader, M. C., Fung, I., & McFarlane, N. (1999). The mineral dust aerosol cycle during

the Last Glacial Maximum. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **104**, 9381-9398.

- ⑦ Sato, H., Suzuki, T., Hirabayashi, M., Iizuka, Y., Motoyama, H. and Fujii, Y. (2013). Mineral and Sea-Salt Aerosol Fluxes over the Last 340 kyr Reconstructed from the Total Concentration of Al and Na in the Dome Fuji Ice Core. *Atmospheric and Climate Sciences*, **3**, 186.
- ⑧ Suzuki, T. and Sensui, M. (1991). Application of the microwave acid digestion method to the decomposition of rock samples. *Analytica Chimica Acta*, **245**, 43-48.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① Uemura, R., H. Motoyama, V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, K. Kawamura, K. Goto-Azuma, S. Fujita, T. Kuramoto, M. Hirabayashi, T. Miyake, H. Ohno, K. Fujita, A. Abe-Ouchi, Y. Iizuka, S. Horikawa, M. Igarashi, K. Suzuki, T. Suzuki and Y. Fujii. Asynchrony between Antarctic temperature and CO₂ associated with obliquity over the past 720,000 years, *Nature Communications*, 査読有, **9**, Article number: 961, DOI:10.1038/s41467-018-03328-3, 2018.
- ② Kawamura, K. and Dome Fuji Ice Core Project Members. State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science Advances*, 査読有, **3**, e1600446, DOI: 10.1126/sciadv.1600446, 2017.
- ③ Iizuka, Y., H. Ohno, R. Uemura, T. Suzuki, I. Oyabu, Y. Hoshina, K. Fukui, M. Hirabayashi and H. Motoyama. Spatial distributions of soluble salts in surface snow of East Antarctica, *Tellus B*, 査読有, **68**, 29285, DOI:10.3402/tellusb.v68.29285, 2016.
- ④ Ohno, H., Y. Iizuka, A. Hori, A. Miyamoto, M. Hirabayashi, T. Miyake, T. Kuramoto, S. Fujita, T. Segawa, R. Uemura, T. Sakurai, T. Suzuki and H. Motoyama. Physicochemical properties of bottom ice from Dome Fuji, inland East Antarctica, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 査読有, **121**, 1230–1250, DOI:10.1002/2015JF003777, 2016.
- ⑤ Oyabu, I., Y. Iizuka, R. Uemura, T. Miyake, M. Hirabayashi, H. Motoyama, T. Sakurai, T. Suzuki and T. 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*, 査読有, **119**, 14045-14058, DOI:10.1002/2014JD022030, 2014.

〔学会発表〕(計7件)

- ① 米倉綾香, 鈴木利孝, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 本山秀明, 川村賢二. 南極ドームふじ深層氷コア中のAl/Dust比の経年変動, 2018年度雪氷研究大会, 北海道科学大学, 札幌, 2018.
- ② Uemura, R., H. Motoyama, V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, K. Kawamura, K. Goto-Azuma, S. Fujita, T. Kuramoto, M. Hirabayashi, T. Miyake, H. Ohno, K. Fujita, A. Abe-Ouchi, Y. Iizuka, S. Horikawa, M. Igarashi, K. Suzuki, T. Suzuki, Y. Fujii. 720,000-year records of Antarctic and oceanic temperatures related to solar forcing and CO₂, JpGU2018, Makuhari, 2018.
- ③ 米倉綾香, 鈴木利孝, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 川村賢二, 本山秀明. 南極ドームふじ深層氷コア中の金属成分と微粒子濃度の関係, 2017年度雪氷研究大会, クロステン十日町, 十日町, 2017.
- ④ 鈴木利孝, 米倉綾香, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 本山秀明. 南極ドームふじコア中の金属成分, 2016年度雪氷研究大会, 名古屋大学, 名古屋, 2016.
- ⑤ 熊谷康平, 鈴木利孝, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 本山秀明. 南極ドームふじ底面氷の金属成分組成, 2015年度雪氷研究大会, 信州大学, 松本, 2015.
- ⑥ 鈴木利孝, 関口絢子, 飯塚芳徳, 平林幹啓, 保科優, 大野浩, 福井幸太郎, 本山秀明. 南極氷床表面における海・陸起源金属成分の分布-全濃度と溶存態濃度の解析-, 2014年度雪氷研究大会, 八戸工業大学, 八戸, 2014.
- ⑦ Goto-Azuma, K., M. Hirabayashi, H. Motoyama, T. Miyake, T. Kuramoto, R. Uemura, K. Kawamura, M. Igarashi, Y. Iizuka, T. Sakurai, S. Horikawa, K. Suzuki, T. Suzuki, K. Fujita, Y. Fujii. Ionic records from Dome Fuji, East Antarctica over the past 700 kyr and their implications, The Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 2014 Open Science Conference, Auckland, 2014.

〔その他〕

ホームページ等

<http://sci.kj.yamagata-u.ac.jp/~icecore/>