

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26241011

研究課題名(和文)南極氷床コア高解像度大気組成分析に基づく退氷期における気候・海洋・氷床変動の解明

研究課題名(英文)Variations of climate, ocean and ice sheet over deglaciations from high resolution gas analyses of Antarctic ice cores

研究代表者

川村 賢二(Kawamura, Kenji)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：90431478

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)：南極ドームふじ氷床コアを解析し、氷期から間氷期へ移り変わる「退氷期」や、数千年周期の全球規模の気候変動に着目し、気候変動の周期性や大気組成の変遷、温室効果気体、年代決定のもととなる酸素/窒素比等の復元を実施した。特に、ドームふじ氷床コアの酸素同位体(気温の指標)とダストフラックス(南極上空に漂う固体微粒子の指標)を過去72万年間にわたって詳細に解析し、気候の不安定性が気候の平均状態に依存することを発見した。また、正確な年代における大気中二酸化炭素濃度を気候・氷床モデルに入力したところ、異なる退氷期における夏期日射量と地軸傾斜角、温室効果ガスの役割が異なっていたことを示唆する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：From the analyses of the Dome Fuji ice core, Antarctica, we reconstructed the variations of climatic periodicities, atmospheric composition, greenhouse gases, oxygen/nitrogen ratios, with special focus on deglaciation and global climate variations. In particular, we analyzed oxygen isotopic ratios and dust fluxes of the Dome Fuji ice core over the past 720,000 years and found that climatic instability is largest in middle glacial state. By feeding atmospheric carbon dioxide concentration on an accurate time scale from the Dome Fuji core into a climate-ice sheet model, we suggest that roles of northern hemisphere summer insolation, tilt of Earth's rotation axis and greenhouse gases are different for different deglaciations.

研究分野：古気候学、アイスコア気体解析

キーワード：氷床コア 氷期-間氷期 気候変動 環境変動 退氷期 古気候・古環境 海水準

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

極域において掘削された柱状の氷(氷床コア)は、直接観測が始まる前の大気組成を復元できる唯一の媒体である。我々はこれまで、第1期ドームふじコア(2503m、34万年)および第2期ドームふじコア(3035m、72万年)の酸素/窒素比(O_2/N_2)に基づく高精度年代決定により、地球軌道要素と南極や北半球における環境変動との時間関係を正確に捉える基礎を固めるとともに、放射強制力としての CO_2 データの年代を高精度化して長期氷床シミュレーションに成功し、10万年周期の氷期サイクルの基本要因が北半球の夏期日射量変動であることを突き止めたしかし、氷期サイクルのもう一つの問題である「40万年周期問題」(約43万年前の退氷期が最大級であるのに日射強制力が最も弱いというパラドックス)の解明は、今後の課題として残されている。

過去に起こった大規模気候変動を理解するためには、放射強制力(CO_2 、エアロゾル等)や気候・氷床の応答を詳細に復元し、正確な年代情報を付加することが大前提となる。また、そのようなデータを利用して気候・氷床モデルの総合性能を評価することは、気候や海面の将来予測精度を高めることにつながる。しかし、IPCC第5次評価報告書が指摘した通り、最終退氷期(約13.5万年前)でさえ、気候・氷床変動のタイミングや規模、強制力との位相など、基本的な情報も得られていない。ましてや、約43万年前の退氷期における気候強制力や気候データの年代制約は非常に弱い。

退氷期における地球システム変動の様相(変化のタイミングや速度、サブ要素間の相互作用)は、それに続く間氷期の温度や氷床量にも影響するはずである。ところが従来の研究では、間氷期の検討にその時の日射や CO_2 しか考慮せず、退氷期からの気候-氷床-固体地球間の相互作用や履歴の効果という視点が欠落している。また、最終退氷期と重なった急激な気候変動や、バイポーラーシーソーという南北間の相互作用が確認されており、その退氷期の氷床変化との関連性・必然性が活発に議論されている。そのため、複数の退氷期における古環境の詳細復元が求められている。

2. 研究の目的

本研究期間では過去3つ(約2万年、13.5万年、43万年前)の退氷期に着目し、大気環境を復元・比較し、退氷期から間氷期に至る地球軌道要素と CO_2 、南極および各地の気候シグナルの時間関係を明らかにする。その結果を氷床モデルの長期積分や全球気候モデルのスナップショット実験への入力あるいは比較データとして使用し、退氷期と続く間氷期の気候・氷床決定要因とプロ

セスの理解を目指す。具体的な目的を以下に示す。

(1) 新たな大気成分復元のための技術開発と、新規および既存手法による退氷期の変動理解のためのデータ取得を推進する。

(2) ドームふじコアの年代を、広域シグナルを用いて他の古環境指標に移行して共通年代を確立し、退氷期の環境変動を議論する。

(3) ドームふじコアの環境情報を、日射量や CO_2 、気温変動などの時間関係に着目して解析するとともに、将来予測に用いられるMIROC-IcIESモデルへデータを提供し、退氷期の数値実験や解析を行う。

3. 研究の方法

測定技術の改良を図り、それを基に南極ドームふじ基地で掘削された氷床コアを分析し、過去3つの退氷期について種々の分析を実施する。次に、北半球高緯度を含む古環境指標とドームふじコアとに共通なシグナルを対比することにより、他の環境指標に我々の年代軸を与える。さらに、正確な年代での軌道要素や CO_2 を入力し、全球気候モデル(MIROC)のスナップショット実験や気候・氷床モデル(MIROC-IcIES)の長期間積分を新たに実施し、気温や海水温、海水準、氷山流出イベントなどの古環境データと比較することにより、退氷期における軌道要素と CO_2 の役割を評価する。

4. 研究成果

(1) ドームふじ氷床コアの酸素同位体(気温の指標)とダストフラックス(南極上空に漂う固体微粒子の指標)を過去72万年間にわたって詳細に解析し(図1)、南北半球間のシーソー現象を伴う気候の不安定性(気候変動の起こりやすさ)が気候の平均状態に依存することを発見した。気候の変動周期は南極の気温が氷期の中間的な値をとるときに最も短くなる(図2)。この結果を解釈・理解するため、気候モデル(MIROC)による数値シミュレーションを行った。間氷期、氷期の中間状態、氷期の最寒期の3つの気候状態をモデルで再現した上で、北大西洋北部に淡水を流入する実験を行い、海洋深層循環や全球気候の反応を調べたところ、氷期の中間状態で気候が最も変わりやすいという、氷床コアの解析結果を整合的な結果が得られた。気候モデルの感度実験の結果、気候の不安定生を増す背景要因として CO_2 の低下による南大洋を含む全球の寒冷化が最も重要であることが示唆された。この成果はScience Advances誌に掲載された。

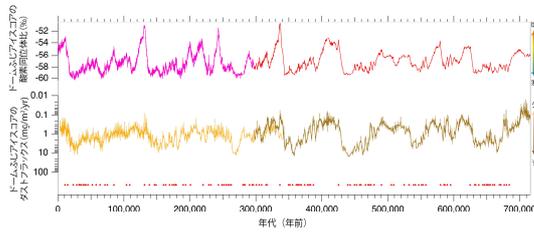


図1：南極ドームふじアイスコアから得られた過去72万年間にわたる酸素同位体比（気温の指標）およびダストフラックス（大気中に漂う微粒子の指標）。最下段に描かれている印（三角）は、本研究で抽出された南極の温暖化ピークの位置を示す。

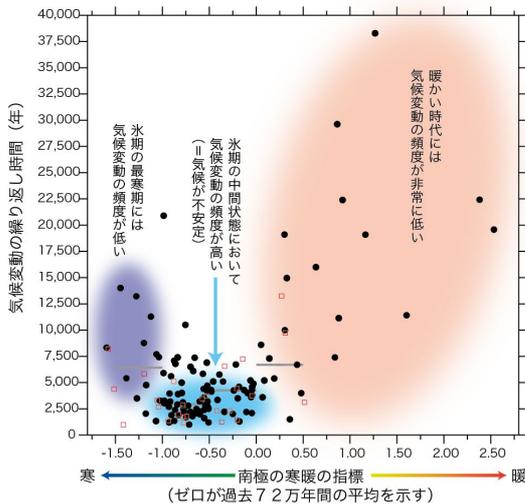


図2：気候変動の繰り返し時間（頻度）と南極の気温との関係。間氷期のような暖かい時代や、氷期の最寒期のような寒い時代には頻度が低い、氷期の中間的な寒さの時代に気候変動が頻繁に起こっており、気候が不安定であったことが示唆された。

(2) クリプトンおよびキセノンの大気中濃度を復元するための基礎研究として、氷床上で起こる表面融解がそれらの希ガス濃度に与える影響を評価した。クリプトンおよびキセノンを、アルゴンとの比として測定する技術を開発し、表面融解が起こると融解水に希ガスが多く溶け込むために比が極端に高くなることを証明した。この成果は Journal of Glaciology に掲載された。また、一つのコアサンプルからクリプトン/窒素やキセノン/窒素の比を高精度で測定する技術を開発し、ドームふじコアや WAIS Divide コア等を分析し、最終退氷期におけるそれらの比を復元した。その結果から、最終退氷期における全球平均の海水温が現在より 2.5~3 低かったことを見出した。（出版準備中）

(3) 大気中メタン濃度の高分解能での復元のため、連続融解分析手法を確立し、ドームふじコアの一部について連続解析を行

った。完新世の北半球で最大の気候変動であった約 8200 年前の寒冷化イベントを対象に分析し、ドームふじコアの気体の封じ込めプロセスによる年代分布の広がりやフィルムの圧密モデルによる予測と一致したとともに、雪の不均一性に起因した空気年代の層序の逆転を反映した短周期の変動が見られた。また、完新世のドームふじコア試料を約 50 年の時間分解能で分析し、グリーンランド NEEM コアの分析結果と比較することで、メタン濃度の南北差を詳細に復元した。南北差の長期トレンドは、完新世の初期から中期にかけて上昇し、その後低下するような変動を示した。（投稿準備中）

(4) ドームふじコアと欧州が掘削したドームC コアの年代対比を火山起源のシグナルを用いて行い、22 万年前以降で約 1400 個の年代対比点によるコア年代の相互変換や、石筍の放射性年代との対比が可能になった。その結果、ドームふじコアの従来の O_2/N_2 に基づく年代が特に 9 万年前付近で大きな誤差を持っていることが示唆され、データの新たな取得と年代軸の改善の必要性が新たに見出された。この成果は Climate of the Past 誌に掲載された。

(5) 上記の課題を解決するため、ドームふじコアの O_2/N_2 を高精度で分析する手法を確立し、約 6 万年前から 17 万年前にかけての分析を実施した。その結果と掘削地点の過去の夏期日射量の対比から、ドームふじコアの年代をより高精度に構築することに成功し、約 9 万年前の誤差も大幅に減少した。この分析結果から、-50 で約 20 年間保存されたドームふじコアの中心付近には O_2/N_2 が元の値のまま保存されていることも明らかとなった。この年代決定方法については、欧州のドームC コアでは最新の分析結果をもってしても成功していない。このことから、ドームふじコアの掘削から保管、分析の質が極めて高く、放射性年代と独立した長期の高精度年代軸として唯一であることが示された。（投稿準備中）

(6) ドームふじコアの O_2/N_2 によるタイムマーカーから、コアの深度 - 年代の関係をベイズ法を用いて連続的に計算する手法を開発し、2500m (34 万年前) までの年代決定を行った。この成果は Nonlinear Processes in Geophysics 誌に掲載された。

(7) ドームC コア等の大気中 CO_2 変動の時間軸をドームふじコアの年代軸に置いた上で、気候-氷床モデルに軌道要素変動とともに入力し、ターミネーション 1、2、5 を含む過去 50 万年以上の長期氷床シミュレーションを実施した。その結果、ターミネーション 1 と 2 においては、気候歳差による（主に北半球高緯度の夏期日射量として

与えられる)強制力が氷期から間氷期への移行において根本的に重要であったが、約40万年前のターミネーション5は夏期日射量の上昇量が極めて小さいため、その強制力だけではモデル中での退氷が起こらないことが明らかになった。ターミネーション5においては地軸の傾きと大気中CO₂の強制力が重要であることが示唆された。(投稿準備中)

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28件)

Dome Fuji Ice Core Project Members: Kawamura, K., Abe-Ouchi, A., Motoyama, H., Ageta, Y., Aoki, S., Azuma, N., Fujii, Y., Fujita, K., Fujita, S., Fukui, K., Furukawa, T., Furusaki, A., Goto-Azuma, K., Greve, R., Hirabayashi, M., Hondoh, T., Hori, A., Horikawa, S., Horiuchi, K., Igarashi, M., Izuka, Y., Kameda, T., Kanda, H., Kohno, M., Kuramoto, T., Matsushi, Y., Miyahara, M., Miyake, T., Miyamoto, A., Nagashima, Y., Nakayama, Y., Nakazawa, T., Nakazawa, F., Nishio, F., Obinata, I., Ohgaito, R., Oka, A., Okuno, J., Okuyama, J., Oyabu, I., Parrenin, F., Pattyn, F., Saito, F., Saito, T., Saito, T., Sakurai, T., Sasa, K., Seddik, H., Shibata, Y., Shinbori, K., Suzuki, K., Suzuki, T., Takahashi, A., Takahashi, K., Takahashi, S., Takata, M., Tanaka, Y., Uemura, R., Watanabe, G., Watanabe, O., Yamasaki, T., Yokoyama, K., Yoshimori, M. and Yoshimoto, T.: State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling, *Science Advances*, 3(2), e1600446, doi:10.1126/sciadv.1600446, 2017, 査読あり.

Parrenin, F., Fujita, S., Abe-Ouchi, A., Kawamura, K., Masson-Delmotte, V., Motoyama, H., Saito, F., Severi, M., Stenni, B., Uemura, R., Wolff, E.W., Climate dependent contrast in surface mass balance in East Antarctica over the past 216 ka, *Journal of Glaciology*, 62, 1037-1048, DOI: 10.1017/jog.2016.85, 2016, 査読あり.

Past Interglacials Working Group of PAGES (アルファベット順で K. Kawamura 及び A. Abe-Ouchi を含む), Interglacials of the last 800,000 years, *Reviews of Geophysics*, 54 (1), 162-219, DOI: 10.1002/2015RG000482, 2016, 査読あり.

Nakano, S., Suzuki, K., Kawamura, K., Parrenin, F., Higuchi, T., A sequential

Bayesian approach for the estimation of the age-depth relationship of the Dome Fuji ice core, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 23 (1), 31-44, DOI: 10.5194/npg-23-31-2016, 2016, 査読あり.

Horiuchi, K., Kamata, K., Maejima, S., Sasaki, S., Sasaki, N., Yamazaki, T., Fujita, S., Motoyama, H. and Matsuzaki, H.: Multiple ¹⁰Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 440, 105-114, doi:10.1016/j.epsl.2016.01.034, 2016, 査読あり.

Svensson, A., Fujita, S., Bigler, M., Braun, M., Dallmayr, R., Gkinis, V., Goto-Azuma, K., Hirabayashi, M., Kawamura, K., Kipfstuhl, S., Kjær, H.A., Popp, T., Simonsen, M., Steffensen, J.P., Vallelonga, P., Vinther, B.M., On the occurrence of annual layers in Dome Fuji ice core early Holocene ice, *Climate of the Past*, 11, 1127-1137, DOI: 10.5194/cp-11-1127-2015, 2015, 査読あり.

Orsi, A.J., Kawamura, K., Fegyveresi, J.M., Headly, M.A., Alley, R.B., Severinghaus, J.P., Differentiating bubble-free layers from Melt layers in ice cores using noble gases, *Journal of Glaciology*, 61, 585-594, DOI: 10.3189/2015JoG14J237, 2015, 査読あり.

Fujita, S., Parrenin, F., Severi, M., Motoyama, H. and Wolff, E. W.: Volcanic synchronization of Dome Fuji and Dome C Antarctic deep ice cores over the past 216 kyr, *Clim. Past*, 11(10), 1395-1416, doi:10.5194/cp-11-1395-2015, 2015, 査読あり.

Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kageyama, M., Braconnot, P., Harrison, S.P., Lambeck, K., Otto-Bliesner, B.L., Peltier, W.R., Tarasov, L., Peterschmitt, J.-Y., Takahashi, K., Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments (2015) Geoscientific Model Development, 8 (11), pp. 3621-3637, DOI: 10.5194/gmd-8-3621-2015, 2015, 査読あり.

Sigl, M., J. R. McConnell, M. Toohey, M. Curran, S. B. Das, R. Edwards, E. Isaksson, K. Kawamura, S. Kipfstuhl, K. Krüger, L. Layman, O. J. Maselli, Y. Motizuki, H. Motoyama, D. R. Pasteris, and M. Severi, Insights from antarctica on volcanic forcing during the common era, *Nature Climate Change*, 4, 693-697, 2014, 査読あり.

〔学会発表〕（計43件）
（招待講演）Kenji Kawamura, Ikumi Oyabu, Shuji Aoki and Takakiyo Nakazawa, Updates on O₂/N₂ dating of the Dome Fuji ice core, and some analyses on Terminations, *Second QUIGS Workshop "Glacial Terminations: Timing & Shape"*, Montreal, Oct. 18-20, 2016.

（招待講演）A. Abe-Ouchi, Keynote talk, *The RSES Ice-Climate research Symposium & Workshop "Ice and Climate: Challenges and priorities"*, Canberra, Australia, 15 November 2016.

（招待講演）A. Abe-Ouchi, "Ice sheets and timing of terminations over Glacial-Interglacial cycles.", *2nd QUIGS workshop "Glacial terminations: Timing and Shape"*, Montreal, Canada, October 18-20, 2016.

大藪幾美, 川村賢二, 北村享太郎, 青木周司, 中澤高浩, 南極ドームふじ氷床コアの O₂/N₂ による年代精度向上, 雪氷研究大会, 名古屋大学(名古屋), 2016年10月1日.

大藪幾美, 川村賢二, 東久美子, 北村享太郎, 青木周司, 中澤高浩, Edward J. Brook, Thomas Blunier, グリーンランド NEEM 氷床コアと南極 Dome Fuji 氷床コアから復元された完新世のメタン濃度南, 雪氷研究大会, 名古屋大学(名古屋), 2016年9月30日.

（招待講演）Abe-Ouchi A, Ohgaito R, Takahashi K, Yoshimori M, Kawamura K, Oka A, Chan WL, Sherriff-Tadano S, "Glacial climate states and abrupt climate change in MIROC AOGCM", *European Geosciences Union General Assembly*, Vienna, Austria, 21 April 2016.

（招待講演）川村賢二、堀内賞受賞記念講演：極域氷床コア及びフィルン空気を基にした過去の気候組成・気候の復元と変動メカニズムの研究、日本気象学会秋季大会、京都テルサ（京都）、2015年10月29日.

〔図書〕（計4件）

河村公隆、大島慶一郎、小達恒夫、川村賢二、佐崎元、杉山慎、関宰、高橋晃周、西岡純、原登志彦、福井学、藤吉康志、三寺史夫、宮崎雄三、本山秀明、渡部直樹（編集）、*低温暖環境の科学事典*、朝倉書店、432ページ、2016年.

日本気象学会地球環境問題委員会編（川村賢二、阿部彩子、齋藤冬樹を著者に含

む）、*地球温暖化—そのメカニズムと不確実性—*、朝倉書店、168ページ、2014年.

日本雪氷学会編（川村賢二、本山秀明、藤田秀二、東久美子を著者に含む）、*新版雪氷辞典*、古今書院、315ページ、2014年.

国立環境研究所地球環境研究センター編著（川村賢二を査読者に、阿部彩子を著者に含む）、*地球温暖化の事典*、丸善出版、452ページ、2014年.

〔その他〕

ホームページ等

ドームふじアイスコアコンソーシアム

<http://polaris.nipr.ac.jp/~icc/NC/htdocs/>

リサーチマップ（川村賢二）

<http://researchmap.jp/read0210571/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 賢二 (KAWAMURA, Kenji)

国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：90431478

(2) 研究分担者

阿部 彩子 (ABE, Ayako)

東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：30272537

堀内 一穂 (HORIUCHI, Kazuho)

弘前大学・理工学研究科・助教
研究者番号：00344614

藤田 秀二 (FUJITA, Shuji)

国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：30250476

本山 秀明 (MOTOYAMA, Hideaki)

国立極地研究所・研究教育系・教授
研究者番号：20210099

(3) 連携研究者

東 久美子 (AZUMA, Kumiko)

国立極地研究所・研究教育系・教授
研究者番号：80202620

平林 幹啓 (HIRABAYASHI, Motohiro)

国立極地研究所・研究教育系・特任助手
研究者番号：20399356

青木 周司 (AOKI, Shuji)

東北大学・理学研究科・教授
研究者番号：00183129

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

齋藤 冬樹 (SAITO, Fuyuki)
海洋研究開発機構・研究員
研究者番号：60396942

鈴木 香寿恵 (SUZUKI, Kazue)
統計数理研究所・データ同化研究開発
センター・研究員
研究者番号：20455190

中野 慎也 (NAKANO, Shinya)
統計数理研究所・准教授
研究者番号：40378576

(4)研究協力者

大藪 幾美 (OYABU, Ikumi)
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
研究者番号：20758396

Jeffrey P. Severinghaus
米国カリフォルニア大学サンディエゴ
校・スクリップス海洋研究所・教授

Maureen Raymo
コロンビア大学・ラモント・ドーティ
ー地球科学研究所・教授

Lorraine Lisiecki
カリフォルニア大学サンタバーバラ
校・准教授

Frederic Parrenin
フランス氷河環境地球物理研究所・研
究員

Edward J. Brook
米国オレゴン州立大学・教授

Rachael Rhodes
米国オレゴン州立大学・研究員