

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21221002

研究課題名(和文) 氷床コアの総合解析による様々な時間スケールの地球環境変動の解明

研究課題名(英文) Study on the global environmental change with the various time scales by the various analysis of ice cores

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 164,600,000円、(間接経費) 49,380,000円

研究成果の概要(和文)：南極氷床から採取したドームふじ氷床アイスコアの解析から正確な年代軸を持つ地球環境変動を明らかにし、地球環境史研究の基準となる気候・環境変動記録を提供することを目的として研究を進めた。過去72万年間をカバーする3035m長のアイスコアを解析して、精密年代をつけた化学成分や水同位体のデータセットについては、ほぼ完成した。

大規模な気候変動のメカニズムについて研究を進めた。例えば硫酸塩エアロゾルが氷期-間氷期の気温変動に大きく寄与していたことを示した。また氷期の硫酸イオンの起源として、従来考えられていた海洋生物起源のものだけでなく、ダスト起源のものが多かった可能性が高いことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：An ice core was drilled to a depth of 3035 m at the Dome Fuji station in Antarctica. Ice cores contain records of global environmental changes dating back to 720,000 years into the past. The age of the ice core was estimated with high accuracy, and a global standard record of climate and environmental changes was soon published. Further, a study of the mechanism of global environmental changes was developed. Results indicate that sulfate aerosol contributed to temperature change during the glacial-interglacial period. In addition, we clarified that the origin of the sulfate was not only the sea biological activity but also dust.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：環境変動 氷床コア 氷期-間氷期 エアロゾル ダスト 精密年代決定 時間スケール 気温変動

1. 研究開始当初の背景

様々な時間スケールで地球規模の気候や環境が変動してきた。例えば過去 100 万年以降から 10 万年周期の氷期-間氷期サイクルで大きく気候変動している。この氷期には、数千年スケールの温暖化イベントが何度もあったが、南極と北極で温暖化と寒冷化のタイミングが同期しない。このように様々な時間スケールを持つ過去の気候変動システムを明らかにすることで、現在の地球温暖化に代表される気候・環境変動が、将来どうなるかの予測の精度をあげることに寄与する。

2. 研究の目的

南極ドームふじから採取した深さ 3035m の氷床コアは過去 72 万年までの地球規模の気候・環境変動を保存している。この氷床コアの年代を高精度に決定し、他の氷床コアや海底コアなど、地球環境史研究の基準となる気候・環境変動記録を提供する。さらに時間スケールの違いに注目して研究を進め、地球環境変動システムのメカニズム及びその変遷を明らかにする。研究終了後、速やかにデータを公開し、地球環境変動研究に貢献する。

3. 研究の方法

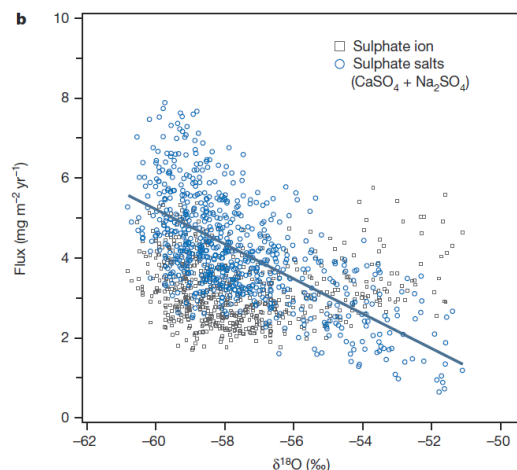
南極ドームふじから採取した深さ 3035m の氷床コアを詳細に分析するとともに、コアの年代を含有気体の窒素と酸素の量比から高精度に決定する。これらから過去 72 万年までの気候・環境変動の時間スケールに注目して研究を進め、地球環境変動システムの変遷を明らかにする。気候・環境要素が積雪に取り込まれて氷床に保存される過程や、現在の物質循環についても研究を進める。

4. 研究成果

(1)南極ドームふじから 2007 年までに採取した 2 本目の深さ 3035m の氷床コアの化学分析を詳細に行った。過去 30 万年から 72 万年をカバーする 2400m 以深については 10cm 間隔で連続分析を実施した。これは約 100 年の時間分解能に相当する。データ要素は水同位体 (D , ^{18}O , d -excess) 主要イオン (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , MSA^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 濃度、固体微粒子 (ダスト) 濃度、pH と電気伝導度である。これより新しい (浅い) 氷床コアデータは 1997 年までに採取された 1 本目の深さ 2503m の氷床コアの基本解析データセットを使った。このデータセットには一部エラーと思われるデータがあったので、再測定を行い、異常だと判断したデータを削除してまとめた。データの要素はおおむね 50 年平均の酸素同位体比、200 年に 1 データの主要イオン (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , MSA^-) 濃度と固体微粒子 (ダスト) 濃度である。これらによって過去 72 万年間をカバーするデータセットがほぼ完成した。現在、データの最終チェックを行い、データセットの確定版が間もなく出来上がる。コア年代につ

いては、氷床コア含有気体の窒素と酸素の量比 (O_2/N_2) の 2000 年間隔のデータが完成したので、これに氷河流動モデルを用いてミランコビッチ・サイクルに基づく新たな年代決定を行っている。この O_2/N_2 を用いて深度-年代を計算する手法を過去 34 万年について開発した。現在 3035m の氷床コアの年代決定に応用するべく研究を進めている。現在、過去 72 万年間に及ぶ地球環境変動についての研究成果をまとめて、投稿論文を複数準備している段階にある。これら詳細なデータセットに関しては氷床コア研究コミュニティで内部公開している。

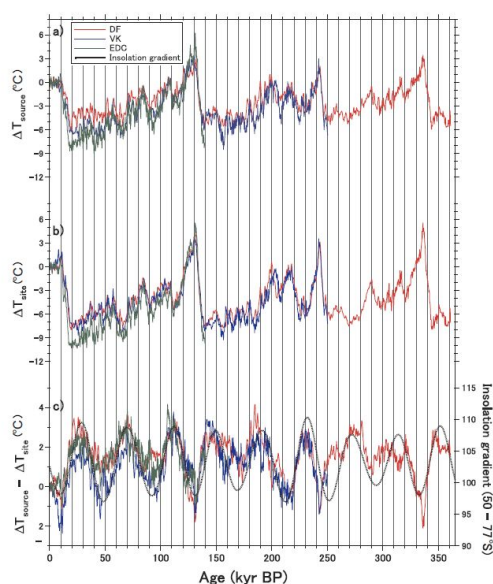
(2)氷床コアに保存されている水溶性エアロゾル (大気中に浮遊する微粒子) を微粒子 1 粒ごとに観察する手法を世界に先駆けて開発し、この手法を用いて、南極で採取されたドームふじ氷床コアに含まれる硫酸塩エアロゾルを測定した。その結果、過去 30 万年間の氷期-間氷期サイクルにおいて、硫酸塩フラックスと気温の指標 (酸素同位体比) の間に逆相関 (気温が低い氷期に硫酸塩フラックスが大きい) がみられた。この事実は、硫酸塩フラックスが大きい時代は、エアロゾルの間接効果が気温低下をもたらしていることを示唆する。南極で約 8 の変化と考えられている最終氷期最盛期 (約 2 万年前) から現在の間氷期 (現在 ~ 約 1 万年前の温暖期) への気温変動のうち、硫酸塩エアロゾルの間接効果による寄与は最大で 5 と見積られ、硫酸塩エアロゾルが氷期-間氷期の気温変動に寄与したことを解明した。将来の地球温暖化予測において、最も大きな不確定要因になっているエアロゾルの影響評価を、高精度でモデルに取り込むことができるようになる期待される。この研究成果を国際科学ジャーナル「Nature」に発表した (Iizuka *et al.* 2012)。



図：気温が下がると (横軸左へ) 硫酸塩フラックスが増大し雲粒核として雲を形成し、さらに気温を下げる働きをすることが分かった。(Iizuka *et al.* 2012)

(3)南極ドームふじ氷床コアにおいて、急激な気温変動の代表的な年代である最終退氷期において、不揮発性の海塩・硫酸エアロゾル粒子を抽出し、X線分析装置で元素組成を分析した。急激な気温変化を詳細に追跡するために300年分解能という高時間分解能での解読をした。その結果、最終退氷期の水溶性エアロゾルの主成分は塩化ナトリウム、硫酸ナトリウム、硫酸カルシウムであることが分かった。また、寒冷期はこれらの3成分が共存しているのに対して、温暖期は硫酸ナトリウムが主成分であることが確認された。現在研究結果を論文投稿中である。

(4)南極氷床には過去の気温や温室効果ガス変動など、過去数10万年にわたる貴重な気候変動の記録を保存している。とくに、氷の水素・酸素安定同位体比 ($D, ^{18}O$)からは、過去の気温を反映する指標として広く利用されている。また、水素と酸素の安定同位体比を組み合わせた指標である deuterium excess (d-excess) を用いることで降雪をもたらした水蒸気が発生した海域の環境を復元することも可能である。氷床コアから気温変動復元を高精度化するために、同位体モデルを用いた気温復元実験について詳細な検討を行った。とくに、水分子の「水素」と「酸素」安定同位体比を両方とも解析に組み入れることで、水蒸気起源海域の水温復元の妥当性に注目して解析した。その結果、過去の研究結果とは異なり、水蒸気起源水温変動が有意に大きい推定値を得た。しかし、気温の復元結果は過去の研究とは大きくは異ならなかった。この手法に基づいてドームふじ氷床



図：南極氷床内陸部の深層掘削3地点で復元した水蒸気起源の気温偏差（上図）、掘削地点の気温偏差（中図）、その差と北半球高緯度の太陽日射強度（下図）は、非常に良い相関をしている（Uemura *et al.* 2012）

コアを含む3つの深層コアの水の水素・酸素安定同位体比を同位体モデルによって解析した。その研究から過去36万年間の掘削地点の気温と水蒸気起源の温度を定量的に復元し、論文発表した（Uemura *et al.* 2012）。

さらに、本研究では、第二期ドームふじプロジェクトで新たに掘削された深度（2400mから3034m）の $D, ^{18}O$ 、および d-excess について測定と解析を進めた。これらを用いて第二期ドームふじコアの南極地上気温 (T_{site}) および水蒸気起源温度 (T_{source}) を復元した。これまでの復元手法と基本的に同じモデル計算を用いたが、さらに不確定要素についての誤差評価を行った。おおよそ45万年前（MIS12）の前後で、氷期・間氷期サイクルが強化した Mid-Brunhes イベントの安定同位体比 ($D, ^{18}O$) データと T_{site} の違いや、ドームふじコアの T_{site} と他の深層コア（Vostok, EDC）における類似性と相違点などに注目して研究をまとめ、論文発表の準備を進めている。

(5)ドームふじ深層コアの海塩性ナトリウムイオン（海塩エアロゾルの指標）、非海塩性カルシウムイオン（ダストの指標）、非海塩性硫酸イオン（海洋生物活動の指標）のフラックス変動の復元を行った。非海塩性硫酸イオンは、オービタルスケールの変動を示すものの、海塩性ナトリウムや非海塩性カルシウムとは異なり、気温と単純な逆相関の関係を示していなかった。氷期の寒冷期に、陸域のダスト起源の非海塩性硫酸イオンが増えた可能性が示唆された。また、氷期の硫酸イオンの起源として、従来考えられていた海洋生物起源のものだけでなく、ダスト起源のものが多かった可能性が高いことを示した。この仮定が正しければ、ヨーロッパの研究グループが提唱していた「南極海の海洋一次生産は80万年間を通じて一定だった」という説に反し、「南極海の一次生産は間氷期に高く氷期に低かった」という結論になる。

(6)極地氷に含まれる水溶性不純物は、氷の物理化学特性に大きな影響を与える。また、不純物の構造および分布は、氷や含有物の形成過程に関する重要な情報源となる。本研究では、顕微ラマン分光法を用いて、東南極で掘削されたドームふじ氷床コア内部にカリウムミョウバンおよび硫酸ナトリウム微粒子が存在することを初めて明らかにし、論文発表した（Ohno *et al.* 2013）。これらの水溶性塩の共晶温度は、それぞれ -0.4 および -8.0 であった。アルミニウム含有塩の生成過程は不明であるが、その分布は氷床深度に大きく依存しており、過去の何らかの気候変動を反映している可能性がある。

(7)氷床コアの解釈において、水安定同位体比 ($D, ^{18}O$) は気温の指標として用いられる。そのため南極内陸では、降雪の同位体

比には季節変化がみられるが、積雪にはこの季節変化は保存されていない。この要因は、積雪の同位体比拡散、風による大気からの水蒸気取り込みによる同位体分別のため、積雪の水安定同位体比が堆積後に変化するためであると指摘され、様々なモデル、室内実験が行われている。表層積雪は鉛直方向に大きな温度勾配があり、水蒸気が積雪内で移動し、それに伴い雪結晶の粒形が変形することが指摘されている。この水蒸気移動による水蒸気の昇華凝結によって、水安定同位体比も変化していると考えられる。そこで積雪の堆積速度に着目し、水蒸気移動による積雪の水安定同位体比の積雪堆積後の変化を示すことを目的として研究を進めた。ドームふじの表面層には季節シグナルはみられず、数年周期の変動がみられた。この数年周期について、その形成要因を水蒸気凝結、積雪堆積速度の関係から考察を行った。雪温勾配から算出した積雪内の水蒸気移動量、積雪試料から求めた積雪堆積速度から、積雪層が水蒸気の凝結する深さに滞在する時間を簡単なモデルで計算を行った。その結果、不均一で小さな積雪堆積速度が、水蒸気によって同位体比に影響を与える深さを通過させる時間を変化させるため、水安定同位体比の数年周期のシグナルが形成されたと示唆された。これらの研究成果を論文発表した(Hoshina *et al.* 2014)。

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 58 件)

Hoshina, Y., K. Fujita, F. Nakazawa, Y. Iizuka, T. Miyake, M. Hirabayashi, T. Kuramoto, S. Fujita, H. Motoyama: Effect of accumulation rate on water stable isotopes of near-surface snow in inland Antarctica, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 274–283, 2014. doi:10.1002/2013JD02077 (査読有)。

Ohno, H., Y. Iizuka, S. Horikawa, T. Sakurai, T. Hondoh, H. Motoyama: Potassium alum and aluminum sulfate micro-inclusions in polar ice from Dome Fuji, East Antarctica. *Polar Science*, **8(1)**, 1-9, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2013.11.003> (査読有)

Suzuki, K., T. Yamanouchi, K. Kawamura, H. Motoyama: The spatial and seasonal distributions of air-transport origins to the Antarctic based on 5-day backward trajectory analysis, *Polar Science*, **7**, 205-213, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2013.08.001> (査読有)

Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi, and H. Blatter: Insolation-driven 100,000-year

glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, *Nature*, **500(7461)**, 190–193, 2013. doi:10.1038/nature12374. (査読有)

Iizuka, Y., R. Uemura, H. Motoyama, T. Suzuki, T. Miyake, M. Hirabayashi, T. Hondoh: Sulphate-climate coupling over the past 300,000 years in inland Antarctica, *Nature*, **490**, 81-84, 2012. doi:10.1038/nature11359 (査読有)

Uemura, R., V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, A. Landais, H. Motoyama, B. Stenni: Ranges of moisture source temperature estimated from Antarctic ice cores stable isotope records over glacial-interglacial cycles, *Climate of the Past*, **8 (3)**, 1109-1125, 2012. doi:10.5194/cp-8-1109-2012 (査読有)

本山秀明: 氷床コアに記録された気候・環境変動. *エアロゾル研究*, **25(3)**, 247-255, 2010. <http://dx.doi.org/10.11203/jar.25.247> (査読有)

[学会発表](計 108 件)

Motoyama, H., Dome Fuji Ice Core Project members: Amplitude and correlation of environmental signals in solid precipitation, surface snow and deep ice core at Dome Fuji, Antarctica - Characteristics of climate and environmental signals with the various time scales -. 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, 9-13 December, 2013.

Kawamura, K. S. Aoki, T. Nakazawa, the Dome Fuji Ice Core Project Members: Climatic forcing and glacial cycles over the last 700,000 years viewed from Antarctica. International CAWSES-II Symposium, Nagoya, 18-22 November, 2013.

東久美子: グリーンランド NEEM 氷床コアから見た過去 13 万年の気候・環境変動. 日本雪氷学会総会、幕張メッセ国際会議場、千葉市、2013 年 5 月 23 日

Motoyama, H., Dome Fuji Ice Core Project members: Characteristics of climate and environmental signals with the various time scales from past 720,000 years in Dome Fuji ice core, Antarctica. European Geosciences Union General Assembly 2013, Vienna, Austria, 7-12 April, 2013.

[図書](計 1 件)

藤井理行・本山秀明(編著) *アイスコアー地球環境のタイムカプセル*. 極地研ライブラリー、成山堂書店、268 ページ、2011. (執筆者: 藤井理行、本山秀明、東久美子、飯塚芳徳、伊村智、植村立、川村賢二、神田啓史、河野美香、藤田秀二、堀内一穂、三澤啓司、望月優子)

〔産業財産権〕
出願状況（計0件）
取得状況（計0件）

〔その他〕
ホームページ等
<http://polaris.nipr.ac.jp/~icc/NC/htdocs/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

東 久美子 (Azuma, Kumiko)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：80202620

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

植村 立 (Uemura, Ryu)
琉球大学・理学部・准教授
研究者番号：00580143
（平成22年度から研究分担者）

鈴木 香寿恵 (Suzuki, Kazue)
統計数理研究所・特任研究員
研究者番号：20455190
（平成24年度のみ、他年度は連携研究者）

大野 浩 (Ohno, Hiroshi)
北見工業大学・社会環境工学科・助教
研究者番号：80634625
（平成25年度。平成24年度は連携研究者）

(3) 連携研究者

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

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

三宅 隆之 (Miyake, Takayuki)
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
研究者番号：90390715

平林 幹啓 (Hirabayashi, Motohiro)
国立極地研究所・研究教育系・特任研究員
研究者番号：20399356

倉元 隆之 (Kuramoto, Takayuki)
信州大学・山岳科学総合研究所・研究員
研究者番号：30511513