

氷が語る 70 万年の地球環境変動

—南極ドームふじ氷床コアによる気候・環境変動復元—

三宅 隆之

滋賀県立大学環境科学部

miyake.t@office.usp.ac.jp

はじめに

南極およびグリーンランドの氷床には、雪とともに堆積した海洋、陸域、生物起源物質、さらに太陽活動に伴う宇宙線生成物質が、連続かつ低温状態で保存されている。氷床内陸部では、堆積した雪は融解せず年々堆積し氷化が進行し、その過程で空気も気泡として氷床に取り込まれる。また氷自身も、水分子の安定同位体比は、降雪が水蒸気として凝結した際の温度を反映していることが知られている。このように氷床は気候・環境の変化が連続して保存されている場であり、ボーリングにより柱状に取り出した氷床コアの解析から、地球規模の環境変動史を解読することが可能である（藤井, 2005）。

氷床コアは、南極およびグリーンランドの氷床を掘削（ボーリング）して得られる、直径約 10 cm の円柱状の氷の試料であり、地球の環境や気候、太陽活動の記録を保存している代替記録物（プロキシ）の一種である。このようなプロキシとして氷床コアの他に、海底・湖底の堆積物、鍾乳洞の石筍、サンゴ、樹木年輪、黄土層などが挙げられる。地球温暖化が顕在している現在、将来の温暖化が進む地球環境の予測の手がかりとなるために、これらのプロキシを用いた古気候研究の必要性がクローズアップされている（IPCC, 2007）。プロキシとしての氷床コアの優れた点は、堆積物コア等と比較して高時間分解能であること、低温であるため保存状態が良いこと、気温変動と大気の組成が同一の試料から得られる点である。そのため地球規模の環境変動である、温暖化効果ガスである大気中の CO_2 や CH_4 と気候変動との関係や、大気中の陸域・海洋起源成分の変化などからの環境変動について情報が得られる氷床コアからの情報は重要である。本講演では、南極内陸部のドームふじ基地で掘削された氷床コアの解析結果を中心に、氷床コアから分かる過去の気候・環境変動について報告する。

南極ドームふじ基地における氷床コア掘削

氷床コアは、南極およびグリーンランド氷床の多くの地点で掘削が行われてきた。南極氷床は、鏡餅のような形をしており、氷床の自重で塑性変形し、海洋に流れ出る。Fig. 1a に南極氷床の断面の模式図を示す。氷床の周辺部では、氷床の流動により積雪とともに堆積した気候・環境情報も攪乱を受け、その解釈が困難になる。そのため気候・環境シグナルの復元・解読には、このような水平流動の影響のある氷床周辺部の斜面ではなく、積雪が水平方向に流動しない氷床の頂上部で行う。

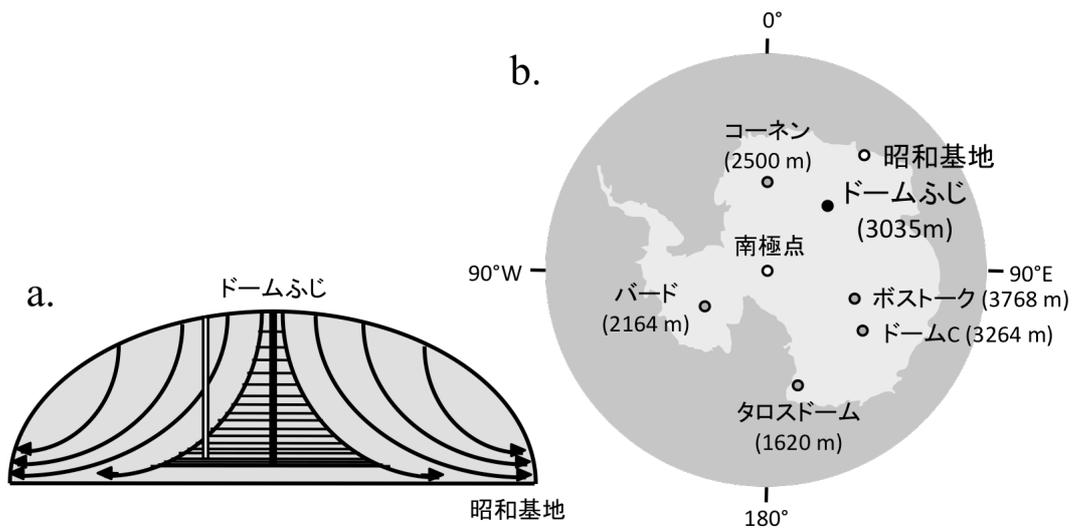


Fig. 1 a. 南極氷床の断面の模式図。ドームふじ基地は氷床頂部，昭和基地は氷床縁辺部に当たる。
 b. 南極における南極点，昭和基地と代表的な氷床コア掘削地点とその深度。

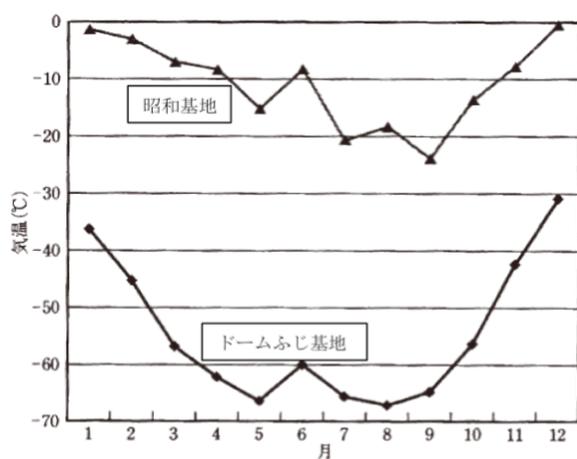


Fig. 2 1997年における昭和基地およびドームふじ基地で観測された各月ごとの平均気温 (佐野 (2010) より，国立極地研究所広報委員会 (1997-1998) を基に作成)。

ドームふじは，南極氷床で2番目に高い標高をもつ頂上（ドーム）に位置する。Fig. 1bにドームふじ基地および南極氷床の代表的な氷床コア掘削地点とその深度を示す。ドームふじにおける氷床の厚さは約3030mと考えられ，年間平均表面質量収支（年間積雪量に相当）が $27.3 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ (Kameda *et al.*, 2008) と小さく，過去数十万年の気候・環境の復元研究には理想的な場所と言える。ドームふじ基地 (77°22'S, 39°42'E) は，沿岸部の昭和基地から内陸に約1000 km 離れており，標高は3810 m，年平均気温は約-54 °Cという過酷な地である。Fig. 2に1997年1年間の月別平均気温の変化を，ドームふじ基地と昭和基地と並んで示す。沿岸にある昭和基地では冬季でも月平均気温は-20 °Cをやや下回る程度だが，内陸部にあるドームふじ基地では，-70 °C近くまで低下しているのが分かる。この極寒の地に1990年代前半から，氷床コア掘削を目的として日本南極地域観測隊によって基地（当時は観測拠点）が作られた。次いで氷床コア掘削が進められ，1996年12月に2503 mまでの掘削に成功した（藤井ら，1999）。これにより過去約34万年前まで遡ることができる，気候・環境変動の情報を含む氷床コアを得ることができた。さらにこれに引き続く第二期の掘削計画として，氷床下の岩盤までの掘削を目指し，ドームふじ基地で新たに掘削が行われた。その結果，2007年1月にほぼ岩盤に達する3035 mまでの掘削に成功した（Motoyama, 2007）。第二期掘削での氷床コア最深部の氷の年代は約72万年前と考えられている（Motoyama, 2007）。南極氷床コアのうち，ドームふじ氷床コアは，ドーム

C コアの約 80 万年に次いで世界で 2 番目に古い氷床コアである。

氷床コアは、地上から下ろしたドリルによって掘り出される。ドームふじのような氷床内陸部で 1000 m を超える掘削（深層掘削という）には、一般に超硬合金の刃を取り付けたメカニカルドリルを用い、氷の圧力による掘削口の収縮を防ぐため、氷の密度に近い液体を入れながら行う。ドームふじ基地で行われた氷床コア掘削で使用したドリルは、全長 10 m を超え、1 回の掘削で最大 4 m 弱の氷床コアを得ることができる。低温下で安定した掘削を行うために様々な工夫が施されており、現段階で、世界で最も優れた氷床コアドリルの一つである。現在、より古い氷床コアによる気候・環境情報の復元を目指し、南極氷床で国際的な調査・研究が進められている。

氷床コアから得られる気候・環境変動情報

極地の氷床には、地球上の様々な環境を起源とする様々な物質が、微粒子（エアロゾル）また気体として、大気循環により輸送される。極地の氷床上で冷却された空気は下降し、氷床斜面に沿って海に向かって下降する（カタバ風）。カタバ風による流れを補填するように、上空では内陸側に向かう風系がある。また極域上空の成層圏下部には、年間を通じて極渦と呼ばれる低気圧性の循環場があり、冬期に強くなる。この極渦のため、成層圏側には低緯度側から極域に向かう空気の流れがある（藤井, 2011a）。このように、極域には低緯度側からの大気循環による物質循環が存在する。

Table 1 氷床コアから得られる気候・環境情報（藤井（2011a）を加筆・改訂）。

気候・環境要素 分析項目	気温	温室効果	砂漠・乾燥地	火山活動	海洋波浪	海洋生物活動	森林火災	植生	雷	化石燃料燃焼	太陽活動	地球磁場	成層圏物質	超新星爆発	代表的な分析法
$\delta^{18}\text{O}$, δD	◎														同位体比質量分析法
CO_2 , CH_4 , N_2O		◎		○				○							GC
固体微粒子			◎	○											光散乱法, 電氣的検知帯法
火山灰				◎											電子顕微鏡
pH (H^+)				○	○	○				○			○		pH 電極法
Na^+			○		◎										IC
NH_4^+							◎		○						IC
Ca^{2+}			◎		○										IC
Al			◎												ICP-MS
Cl^-				○	◎										IC
NO_3^-							○		○	◎			○	◎	IC
SO_4^{2-}				◎	○	◎	○			◎			○		IC
すす (ブラックカーボン)							◎			◎					レーザー白熱法
有機酸							○	◎		○					IC
花粉								◎							顕微鏡
宇宙線生成核種 (^{10}Be , ^{36}Cl 等)											◎	○	◎		AMS

Table 1 に氷床コアの分析から得られる主な気候・環境情報についてまとめた。この表から、過去の気候・環境について、基本的な気温などの情報から、陸域および海洋環境の情報、火山活動や森林火災、人為活動による化石燃料燃焼や、太陽活動までの情報まで、幅広い情報が得られることが分かる。この中で気温の指標として幅広く使用されている $\delta^{18}\text{O}$ および δD は、氷床コアの氷 (H_2O) 分子の同位体比である。また CO_2 , CH_4 , N_2O は大気中の気体成分が氷床上の積雪が自重で氷化していく過程で、取り込まれたものである。そのほか、固体微粒子や火山灰、イオン成分、金属成分、花粉等は、氷床コアに一種の「不純物」として含まれるものになる。これらの分析には、様々な分析手法が駆使される。氷床コアの化学分析の場合、一般的には ppb~ppt レベルの分析となり、クリーンルーム等のクリーンテクニックが必要となる。また多項目にわたる分析を行うため、それぞれの分析に使用可能な試料量も限られたものになる。氷床コア自体は、掘削時に様々な形で汚染（コンタミネーション）を受けるため、化学分析の際には適切な汚染除去・低減の前処理を行った上で、高精度な分析を行うことで、はじめて正確な物質質量、ひいては過去の気候・環境情報を得ることができる（三宅ら, 2009）。

近年では、従来の化学成分濃度だけでなくダスト成分の同位体比分析による起源解析 (Delmonte *et al.*, 2008) や、微生物分析といった生物分析、さらには微隕石（地球外物質）の分析 (Misawa *et al.*, 2010) についても、精力的に進められている。このように、氷床コア研究は、物理、化学、生物学的な様々な分析手法を駆使し、学際的に進められており (本山, 2010)、それを一方で支えているのが革新される分析手法である。

ドームふじ氷床コアによる過去の気候・環境変動

Fig. 3 にドームふじおよび南極の代表的な氷床コアであるドーム C とボストークの氷床コアによる過去約 34 万年間の水の安定同位体比とダスト濃度変動を示す。

氷床コアにおいて、水の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) は気温の指標とされている (植村, 2007)。値が大きいと温暖、小さいと寒冷になる。ドームふじ氷床コアにおいて、これらを基に計算された現在との気温差 ΔT_{site} も合わせて示す。水の安定同位体比と ΔT_{site} は約 10 万年ごとに温暖な間氷期 (Interglacial) と寒冷な氷期 (Glacial) を繰り返していることが分かる。現在は温暖な間氷期に当たり、間氷期は 1 万年前後、氷期は 10 万年前後の期間がある。これを見ると、間氷期から氷期への移行期 (inception) は比較的穏やかに進行するが、氷期から間氷期への移行期 (termination) は急激に進行することが分かる。また氷期の間も、定常状態ではなく、気温の上下を繰り返しながら、全体として徐々に寒冷化していき、氷期の中でもその末期で最も寒冷化している。また水の安定同位体比はドームふじ、ドーム C、ボストークの中でその変動は非常に類似している。このことから、水の安定同位体比で表される気温の変化は、それぞれの氷床コアの掘削地点だけでなく、南極氷床全体に共通していることが分かる。実際、これらの変動はグローバルな気候変動を代表していることが明らかになっている。このように、南極氷床コア、特に過去数十万年前まで遡ることができる深層コアは、グローバルな気候変動研究の基準コアとしての役割を持っている。さらに、現在と同じ間氷期は、過去 34 万年間で 3 回あったが、いずれも現在よりも気温が高かったことが推測される。このことは、温暖化ガスの増加により現在よりも温暖化が進んだ将来の気候を推測する際に、非常に大きな手がかりを与えるものと考えられており、氷床コア研究の

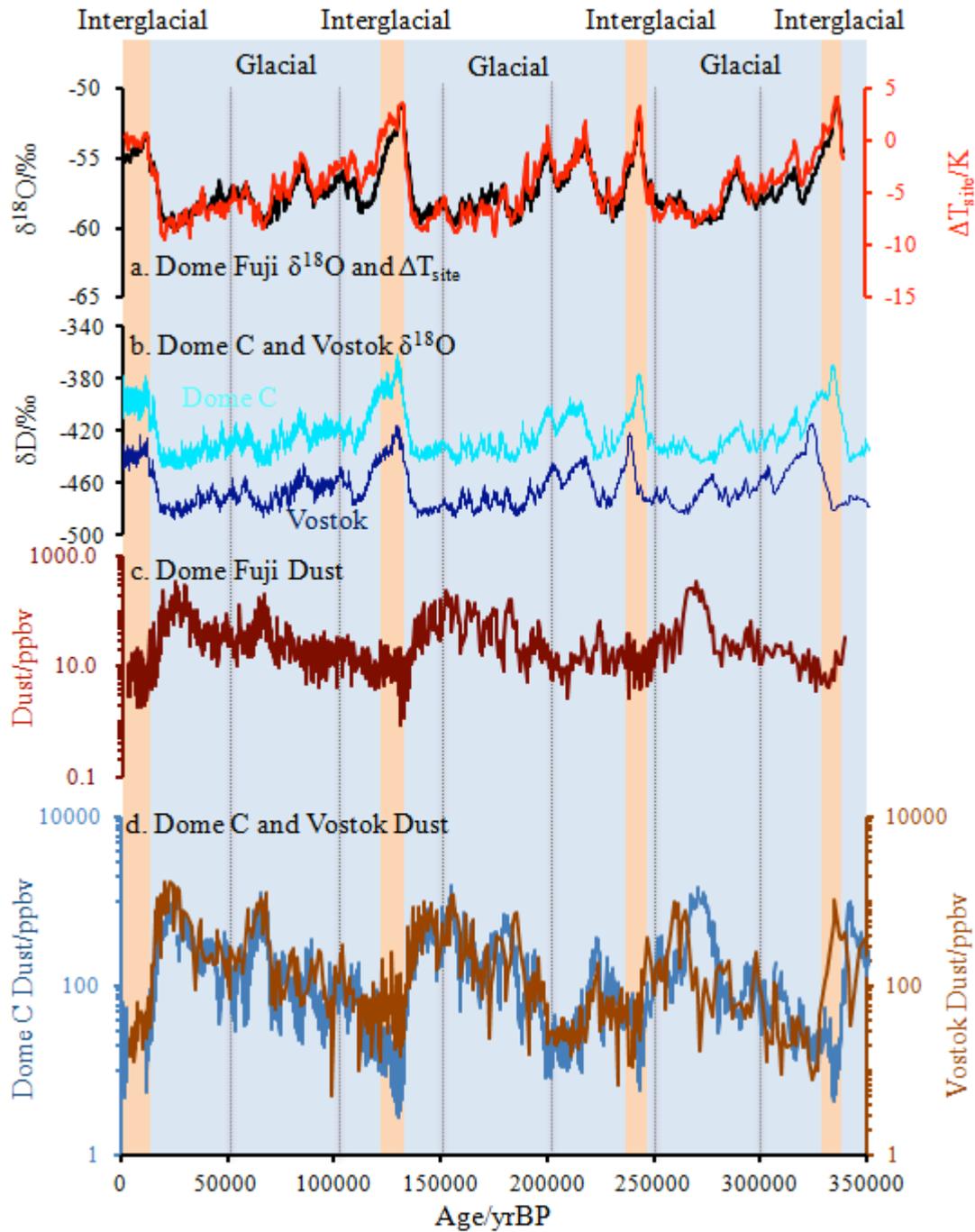


Fig. 3 ドームふじおよび南極の代表的な氷床コア（ドーム C およびボストーク）による過去約 34 万年間の気候・環境変動。ピンクハッチは間氷期，青色ハッチは氷期を示す。 a. ドームふじ氷床コアによる $\delta^{18}\text{O}$ （水の酸素安定同位体比）および ΔT_{site} （現在との気温差）(Kawamura *et al.*, 2007) b. ドーム C およびボストーク氷床コアによる δD （水の水素安定同位体比）(Lambert *et al.*, 2008; Petit *et al.*, 1999), c. ドームふじ氷床コアによるダスト（固体微粒子）濃度 (Fujii *et al.*, 2003), d. ドーム C およびボストーク氷床コアのダスト濃度 (Lambert *et al.*, 2008; Petit *et al.*, 1999), 年代は各コアごとに異なる。

最近のトピックの一つでもある。

このような氷期-間氷期サイクルという大きな気候変動のメカニズムは、種々提案されている。そのうちの1つは、ドームふじ氷床コアのCO₂を含む気体分析を中心とする結果から、北半球高緯度の夏季日射量の変動が氷期-間氷期サイクルのトリガーであるという結果が示されている (Kawamura *et al.*, 2007)。

また、Fig. 3にはドームふじ、ドームC、ボストークのダスト(固体微粒子)濃度の変動についても示した。ダストは、主に土壌を起源とする μm レベルの固体の微粒子であり、陸域起源の物質の直接的な指標として使用されている。ダストを含む大気中エアロゾルは、太陽放射の反射・吸収により、大気の放射強制力を変える働きがある (IPCC, 2007)。また海洋に沈着することで鉄などの微量栄養塩供給源でもある。このような背景から、気候・環境変動研究の分野では、ダストは特に近年注目されている。その変動を見ると、寒冷な氷期末期に特に高濃度なピークを形成し、温暖な間氷期には低濃度となることを繰り返している。氷期の中の寒冷な時期でも、ダスト濃度の高い時も見られるが、それぞれの氷期のうちで氷期末期にダスト濃度が最大となることは変わらない。氷期末期と間氷期の差は非常に顕著であり、数十倍にもおよぶ。

またこのような氷期-間氷期サイクルスケールでのダストの変動は、水の安定同位体比と同様、ドームふじ、ドームC、ボストークと異なる南極氷床コアどうしで非常に類似していることも特徴である。ドームCの氷床コアのダスト変動と、赤道域の海底堆積物コアの比較から、両者は非常に類似した変動を示していることが報告されており (Winkler *et al.*, 2008)、これらのダスト変動も地球規模の変動を示していることが推察される。

Fig. 4にドームふじ氷床コアにおける $\delta^{18}\text{O}$ とダストフラックスの5000年平均値の相関を示した。これを見ると、 $\delta^{18}\text{O}$ の値の大きい温暖な時期は両者の相関は低いものの、寒冷期、特に氷期末期の最寒冷期に、両者の相関が高いことが分かる。

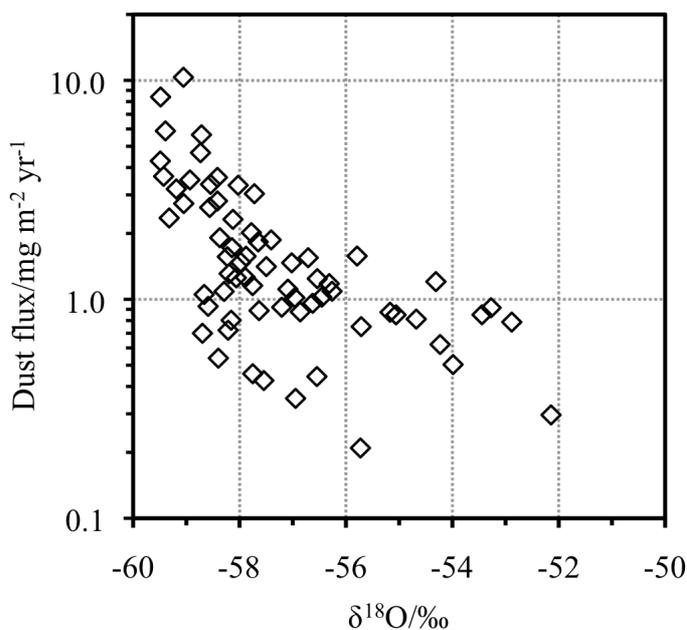


Fig. 4 ドームふじ氷床コアにおける過去 34 万年間の $\delta^{18}\text{O}$ とダストフラックスの 5000 年平均値の相関。

このことは、気候が寒冷化するにつれ、ダストフラックスと南極の気温の相関が高くなることを示しており、南極氷床上のダストの起源であるより低緯度側の気候と南極の気候が結びついていることを示している。同様の結果を、ドームCから報告されている (Lambert *et al.*, 2008)。

南極氷床コア中のダスト変動は、(1) ダスト発源地域の変動、(2) 降水量など水循環の変化、(3) ダストを運ぶ大気循環強度の変化、が原因と考えられている (Lambert *et al.*, 2008)。ドームC、ボストークの氷床コア中ダストの Sr, Nd の同位体比分析から、

氷期の南極氷床のダストの主な起源は南アメリカのパタゴニアとされている (Delmonte *et al.*, 2008)。現在のパタゴニア沖には広大な大陸棚が存在し、氷期には海水準の低下により露出していたと考えられる。氷期末期のダストフラックスの増加について、Lambert *et al.* (2008) は、氷期末期にダスト発生源の強化と、水循環の低下による上部対流圏での大気中エアロゾルの寿命が延びたためと説明している。一方藤井 (2011b) は、海水準変動に伴う大陸棚露出面積の拡大とダストフラックスの関係から、氷期サイクルにおける相対風速を復元し、最終氷期末期は相対的な風速が大きかったことを述べている。いずれにしても、氷期末期は現在よりも寒冷かつ乾燥し、風が強い気候であったことが推測される。

また主に海塩起源と考えられ海洋起源物質の指標とされる Na^+ も、ダストほどではないものの、やはり間氷期に比較して氷期末期に高濃度となり、また異なる氷床コアどうしが類似した変動を示すことが分かっている (Watanabe *et al.*, 2003 ほか)。これについては、大気中の Na^+ の生成機構も含め、議論が続いている (Fischer *et al.*, 2007)。

おわりに

今回取り上げたトピックは、氷床コア研究分野の一部である。前述したように、温暖化が進む将来の気候変動の予測のために、氷床コア研究等を通して過去の地球環境変動を知ることは、人類生存戦略としても重要になる。また分析技術の革新と相まって、気候変動とそれに伴う微生物・植物の変動、太陽・宇宙線活動が気候変動への寄与、さらには氷床下に存在する微生物相の探索など、幅広い分野での進展が見られている。今後、氷床コア研究を通じ過去の気候・環境変動が明らかになり、温暖化の将来予測もより詳しく正確なものになるとともに、南極氷床の姿と地球環境に及ぼす影響もより詳細に明らかになるだろう。

最後に、ドームふじ氷床コア研究のホームページの URL を示す。興味のある方は、ご参照いただきたい。

ドームふじ氷床コア研究 HP: <http://polaris.nipr.ac.jp/~icc/NC/htdocs/>

謝辞

一連のドームふじ計画を通じ、現場での設営、掘削および解析と国内での分析等、また計画に携わった全ての方々に深謝します。

参考文献

Delmonte, B., P. S. Andersson, M. Hansson, H. Schöberg, J. R. Petit, I. Basile-Doelsch, V. Maggi (2008): Aeolian dust in East Antarctica (EPICA-Dome C and Vostok): Provenance during glacial ages over the last 800 kyr, *Geophysical Research Letters*, **35**, L07703, doi:10.1029/2008GL033382.

Fischer, H., M.-L. Siggaard-Andersen, U. Ruth, R. Röthlisberger, E. Wolff (2007): Glacial/interglacial changes in mineral dust and sea-salt records in polar ice cores: Sources, transport, and deposition, *Reviews of Geophysics*, **45**, RG1002, doi:10.1029/2005RG000192.

藤井理行 (2005) : 極域アイスコアに記録された地球環境変動, *地学雑誌*, **114**(3), 445-459.

藤井理行 (2011a) : アイスコアに記録される気候・環境要素, 藤井理行・本山秀明編, アイスコ

- ア地球環境のタイムカプセル, 成山堂書店, pp.18-29.
- 藤井理行 (2011b): 氷期サイクルのダスト変動に基づく風速の復元, 藤井理行・本山秀明編, アイスコア地球環境のタイムカプセル, 成山堂書店, pp.140-152.
- 藤井理行, 東信彦, 田中洋一, 高橋昭好, 新堀邦夫, 中山芳樹, 本山秀明, 片桐一夫, 藤田秀二, 宮原盛厚, 亀田貴雄, 斎藤隆志, 斎藤健, 庄司仁, 白岩孝行, 成田英器, 神山考吉, 古川晶雄, 前野英生, 榎本浩之, 成瀬廉二, 横山宏太郎, 本堂武夫, 上田豊, 川田邦夫, 渡辺興亜 (1999): 南極ドームふじ観測拠点における氷床深層コア掘削, *南極資料*, **43**(1), 162-210.
- Fujii, Y., M. Kohno, S. Matoba, H. Motoyama, O. Watanabe (2003): A 320 k-year record of microparticles in the Dome Fuji, Antarctica ice core measured by laser scattering method, *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue*, **57**, 46-62.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kameda, T., H. Motoyama, S. Fujita, S. Takahashi (2008): Temporal and spatial variability of surface mass balance at Dome Fuji, East Antarctica, by the stake method from 1995 to 2006, *Journal of Glaciology*, **54**(184), 107-116.
- Kawamura, K., F. Parrenin, L. Lisiecki, R. Uemura, F. Vimeux, J. P. Severinghaus, M. A. Hutterli, T. Nakazawa, S. Aoki, J. Jouzel, M. E. Raymo, K. Matsumoto, J. Nakata, H. Motoyama, S. Fujita, K. Goto-Azuma, Y. Fujii, O. Watanabe (2007): Northern Hemisphere forcing of climate cycles in Antarctica over the past 360,000 years, *Nature*, **448**, 912-916.
- Lambert, F., B. Delmonte, J. R. Petit, M. Bigler, P. R. Kaufmann, M. A. Hutterli, T. F. Stocker, U. Ruth, J. P. Steffensen, V. Maggi (2008): Dust-climate coupling over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core, *Nature*, **452**, 616-619.
- Misawa, K., M. Kohno, T. Tomiyama, T. Noguchi, T. Nakamura, K. Nagao, T. Mikouchi, K. Nishiizumi (2010): Two extraterrestrial dust horizons found in the Dome Fuji ice core, East Antarctica, *Earth and Planetary Science Letters*, **289**, 287-297.
- 三宅隆之, 平林幹啓, 植村立, 東久美子, 本山秀明 (2009): 極域氷床深層コアの化学成分分析用試料の汚染除去前処理方法の検討, *南極資料*, **53**(3), 259-282.
- Motoyama, H. (2007): The second deep ice core project at Dome Fuji, Antarctica, *Scientific Drilling*, No.5, 41-43.
- 本山秀明 (2010): 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.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Brkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delage, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard (1999): Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, **399**, 429-436.
- 佐野清文 (2010): 南極内陸部の気候と逆転層, 遠藤邦彦・山川修治・藁谷哲也編, 極圏・雪氷圏と地球環境, 二宮書店, pp.220-230.

- 植村立 (2007) : 水の安定同位体比による古気温推定の研究-極域氷床コアからの数千年スケールの気候変動の復元-, *第四紀研究*, **46**(2), 147-164.
- Watanabe, O., K. Kamiyama, H. Motoyama, Y. Fujii, M. Igarashi, T. Furukawa, K. Goto-Azuma, T. Saito, S. Kanamori, N. Kanamori, N. Yoshida, R. Uemura (2003): General tendencies of stable isotopes and major chemical constituents of the Dome Fuji deep ice core, *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue*, **57**, 1-24.
- Winkler, G., R. F. Anderson, M. Q. Fleisher, D. McGee, N. Mahowald (2008): Covariant glacial-interglacial dust fluxes in the Equatorial Pacific and Antarctica, *Science*, **320**, 93-96.