



Title	南極のアイスコアから復元する過去の気候変動
Author(s)	川村, 賢二
Citation	低温科学, 76, 145-152
Issue Date	2018-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.76.145
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70331
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_Lowtemsci76_P145-152.pdf



南極のアイスコアから復元する過去の気候変動

川村 賢二¹⁾

南極氷床は地球最大の淡水リザーバであり、南大洋は最大の熱リザーバかつ CO₂ リザーバである。これらの巨大リザーバは、相互作用しながら一体となって全球環境を変化させる。南極環境システムの変動メカニズムを理解するためには、現在の直接観測に加え、過去の変動を紐解く必要がある。南極氷床を掘削して得られるアイスコアはそのためのツールとして不可欠である。ここでは、新学術領域研究「南極の海と氷床」の全体像と、アイスコアによる長期の気候変動研究について紹介する。

Past climatic variations reconstructed from Antarctic ice cores

Kenji Kawamura¹

The Antarctic ice sheet is the largest reservoir of freshwater, and the Southern Ocean is the largest reservoir of heat and CO₂. These gigantic reservoirs interact each other and change the global environment. In order to understand the mechanism of variations of the Antarctic environmental system, it is necessary to unravel its past fluctuations in addition to direct observations. Ice cores obtained from the Antarctic ice sheet is indispensable as a tool for the purpose. Here we will introduce the new research project "Antarctic Ocean and Ice Sheet", and studies on long-term climate variations through the analyses of ice cores.

キーワード：アイスコア, 古気候変動, 大気組成, 温室効果ガス

Ice core, Paleoclimate change, Atmospheric composition, Greenhouse gas

1. はじめに

本稿では、筆者が代表を務める新学術領域研究「熱-水-物質の巨大リザーバ：全球環境を駆動する南大洋・南極氷床」の全体に関わるイントロダクションに続き、過去の気候変動を復元して理解するためのアイスコア研究に関する解説を述べる。

1.1 熱-水-物質の巨大リザーバ

南極氷床は地球の淡水の約 70% (氷の約 90%) を有し、

海水準で約 60 m に相当する最大の淡水リザーバである。一方、北半球に現存するグリーンランド氷床の量は、海水準に換算して約 7 m である。化石珊瑚や海底コアの解析などをもとにした過去の環境の復元結果から、南極氷床は約 3400 万年前にでき始め、その頃の大気中の CO₂ 濃度は現在の数倍高く、地球表層は現在よりも 5℃ 程度温暖だったと考えられている。約 300 万年前の海水準は現在より 6-40 m 高かったが (様々な研究による推定値に大きな幅がある)、CO₂ 濃度は現在と同程度の 400 ppm かそれ以下であった。さらに、過去 100 万年の氷期-間氷期変動において、約 40 万年前の間氷期 (温暖期) には海水準が現在より 6-13 m、約 12 万年前の最終間氷期には 5-9 m 高かったが、CO₂ 濃度は現在よりだいぶ低い 280-300 ppm 程度だった [最近のレビューは Dutton et al. (2015) とその引用文献を参照]。間氷期におけるグリーンランド氷床からの海水準上昇への寄与は最大でも 7 m であり、最終間氷期では 2-3 m と推定されていることから、これらの温暖な時代の南極氷床は海水準換算で数 m 以上に相当する分が縮小していたことになる。

連絡先

川村 賢二

国立極地研究所 気水圏研究グループ

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3

Tel. 042-512-0686

e-mail : kawamura@nipr.ac.jp

1) 国立極地研究所 気水圏研究グループ

Polar Meteorology and Glaciology Group, National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

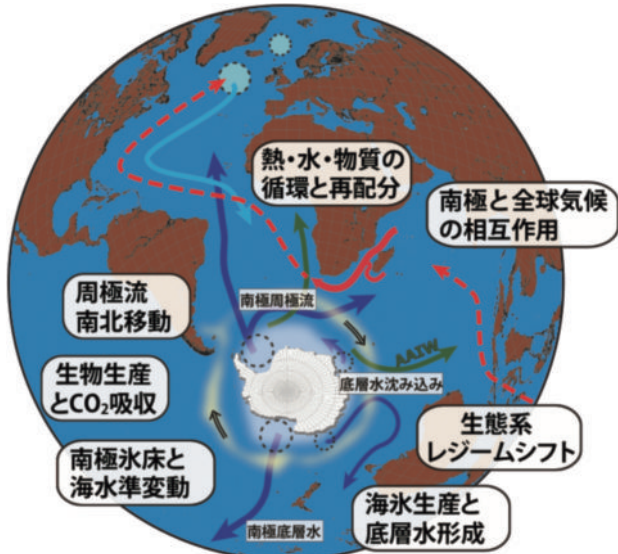


図1：全球気候変動を駆動する南大洋・南極氷床の概念図。

南大洋は南極大陸の周辺から南半球中緯度にかけて広がる海で、太平洋、大西洋、インド洋とつながっている。南極大陸の縁辺部の海水が活発に生産される領域において、南極底層水という最も重い水が生成される。大気から取り込んだ（負の）熱を全海洋の深海に送り込む役割を果たし、その体積は全海水の30-40%を占めることから、南大洋は巨大な熱のリザーバであるといえる。その量や温度の変動は地球の熱の分配に影響し、海洋大循環や全球気候を左右する。過去に南極の温度が気候の不安定性に影響していたことが、アイスコアと気候モデルとの連携研究から示唆されている（Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017）。また南大洋は炭素の深海への最大の出入口でもあり、氷期・間氷期サイクルのCO₂変動に南大洋が重要な役割を果たしていたことが、アイスコアや海底堆積物コア（以下海底コア）のデータから示唆されている。このように、熱・水・物質の巨大リザーバである南極氷床と南大洋は、全球の気候や海水準を決定づける最重要コンポーネンツである（図1）。

近年、北極域では環境変動が顕在化し、グリーンランド氷床や海水域の縮小が広く認識されている。一方、南極氷床は比較的安定していると考えられてきたが、最近西南極の氷床縮小が相次いで報告され関心が高まっている。しかし、南極氷床の融解や成長のプロセスや、それらの変動の時間スケールなどの詳細は明らかではない。大気の直接観測や南極氷床に閉じ込められている過去の空気の分析から、産業革命の頃に始まった人為起源のCO₂増加は、現在も加速し続けていることが分かっている。CO₂の増加傾向は将来も続くであろうことから、その南極氷床への影響がいずれ顕著に現れることは自明と

思われる。しかし、気温や海水温、温室効果による加熱などの外的要因の変化への応答には長い時間がかかるため、南極氷床の変化傾向やその速度、海洋への影響などを把握し予測することは難しい。IPCC 第5次評価報告書は、「20世紀後半の温暖化が人為起源である可能性は極めて高い」と結論した一方、南大洋と南極氷床に関しては、観測誤差やその気候モデルによる再現との差が大きいことを挙げ、理解の遅れを指摘した。近年に観測された現象を見ても、西南極の温暖化や南大洋深層水の昇温が観測されている一方で、表層水温や東南極の気温には有意な温暖化は検出されず、海水は最近数十年では増加傾向にあるなど、南極の環境変動には理解されていない部分が多い。東南極には、降雪の増加のために氷床が厚みを増している地域もあるなど、地域性が強く複雑な側面もある。南極氷床や底層水には一度超えてしまうと容易に後戻りがきかない「ティッピング・ポイント（Tipping point）」が存在し、そこに近づいている可能性も指摘されているが、実態はよく分かっていない。

1.2 南極環境システム解明のための学際研究

北半球氷床の氷期・間氷期変動は、大気-北米氷床-固体地球の相互作用で生じたことが、気候・氷床モデルとアイスコアデータの連携から明らかにされた（Abe-Ouchi et al., 2013）。これに対して、南極氷床の変動においては、棚氷（大陸の氷床が海に張り出したもの）の下へ暖水が入り込むことにより底面から融解し、その影響が大陸氷床の流出におよぶプロセスが鍵であり、氷床-海洋相互作用が重要である（Tamura et al., 2012; 本巻の草原を参照）。しかし、温暖化には積雪増加により氷床を成長させる効果があるため、氷床全体の質量収支の推定には地域ごとのプロセスを定量化する必要がある。ところが、東南極には表面質量収支が100 mm/年（水当量）以下の領域が広大にあるため、その変化を検出して氷床全体の質量収支に結びつけることは容易でない（本巻の福田を参照）。

南極氷床の縮小（融解）がもたらす淡水の増加は、海水の低塩・低密度化を招き、南極底層水の生成を弱化させ、海洋大循環を変化させる可能性がある。表層に供給される淡水が海洋の成層構造を強化することで亜表層の水温が上昇し、さらに氷床を縮小させるといったフィードバックも考えられる。また、気体の溶解度の温度依存性のため、CO₂増加による海洋酸性化は極域で最大となると同時に、莫大な生産量を持つ南大洋生態系への影響を通じて、全球炭素収支を変化させる可能性もある。

このように、巨大リザーバである南極氷床や南大洋の

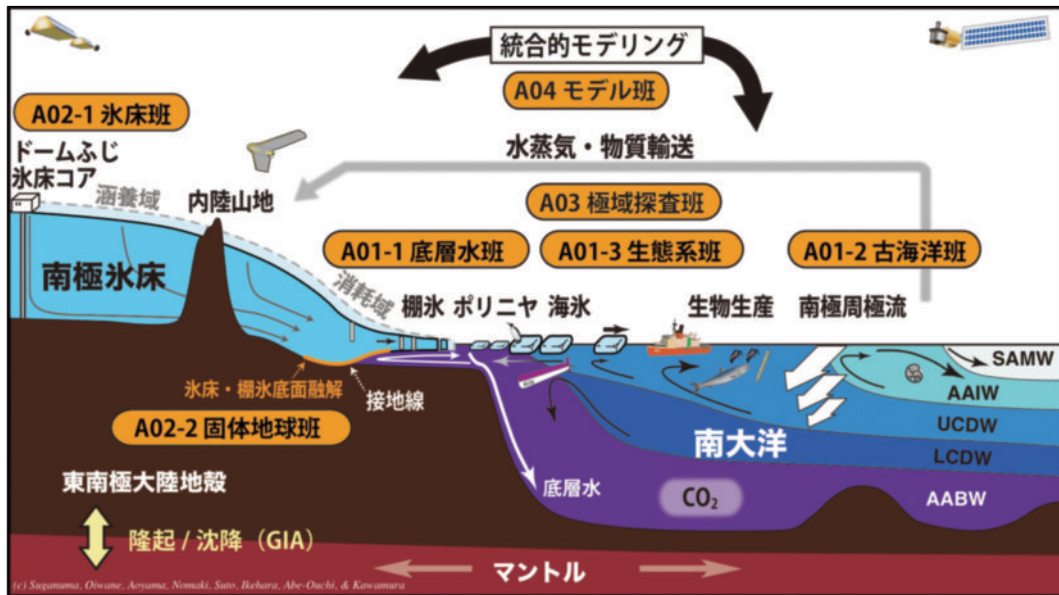


図2：南極環境システムの研究対象の概念図。新学術「南極の海と氷床」を構成する計画研究班も記す。

変化は全球環境変化の駆動力となりうるが、観測が困難なために理解やモデル化が難しい。その傾向は特に広大な東南極で顕著である。これに対して、底層水生成域の発見 (Ohshima et al., 2013) や、過去数十年にわたる海洋酸性化や氷床質量収支に関わる観測データの蓄積、数十万年にわたる海洋環境や大気環境・気候の復元、過去数百万年の氷床高度復元など、日本の観測や研究がリードしている面もある。

2017年度より発足した新学術領域「熱・水・物質の巨大リザーバ：全球環境変動を駆動する南大洋・南極氷床」(略称：南極の海と氷床) は、異なる時間・空間スケールの様々な相互作用の理解と予測のため、現在起こっている現象の解明と、過去の変動や全球気候との関係の解明を観測系の両輪とし、それらとモデリングを統合的に進める (図2)。東南極を主なターゲットとした観測と、地域スケールから南極全体、全球までを対象としたモデル研究を融合させ、底層水や周極流、生態系、氷床、固体地球の実態と変動の素過程、およびそれらの相互作用を明らかにする。

計画研究 A01-1 (底層水班) は、底層水の状態・変動とそれに伴う物質循環過程を明らかにする (本巻の勝又, 大島, 青木, 草原, 川合を参照)。A01-2 (古海洋班) は数百万年間にわたる海洋循環と海水の変動を復元し、全球変動との相互作用を解明する (本巻の池原, 関, 佐藤他を参照)。A01-3 (生態系班) は海水域の生態系構造とその動態、海水変動が海洋生態系と物質循環に及ぼす影響を明らかにする (本巻の茂木他, 須藤他を参照)。

A02-1 (氷床班) はアイスコア分析と現場観測により

南極氷床と気候の過去から現在に至る変動を把握し、モデルと連携してメカニズムや相互作用を理解する (本巻の杉山, 飯塚を参照)。A02-2 (固体地球班) は精密観測から固体地球応答 (GIA) モデルを高精度化し、氷床質量収支の変動を明らかにする (本巻の福田, 奥野, 三浦を参照)。

A03 (探査班) は、無人探査技術により氷の下への海底地形や海水特性、空中からの高精細表面形状の計測を可能にし、未探査領域のデータを取得する (本巻の巻・吉田, 藤井・野木を参照)。

A04 (モデル班) は、大気・海洋・氷床にかかる多階層のモデリングを駆使し、精密な現場観測データを統合した解析を行う。南極と全球の気候変動の長期スケールを含む相互作用を理解し、変動メカニズムの解明と「ティッピング・ポイント」の把握を目指す (本巻の齋藤・グレーベ, 岡を参照) (図3)。

公募研究では以下の研究を募集する。「大気の物理とモデリング」では南極大気の大気素過程や大循環、領域モデル、全球高解像度モデル研究、「各種の衛星観測」では計画研究に含まれない人工衛星リモートセンシング、「新しい観測・分析手法を用いた研究」ではバイオリギングや比較的安価な無人機による観測、古環境指標 (プロキシ) の開発と高精度化など、「取得データの解析とモデリング」では計画研究と異なる観点でのデータ解析やモデリング研究など。

本新学術領域では、これらの計画研究と公募研究が連携し、氷床-海洋相互作用や、過去の南大洋と南極気候・氷床変動の復元、生物動態などの変動を解明することで、

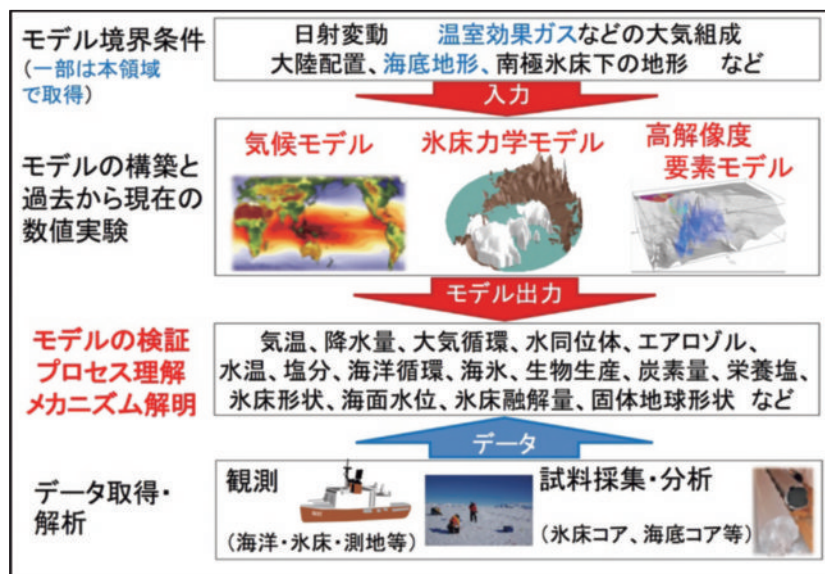


図3：データとモデルの連携の概念図。

南大洋と南極氷床をひとつのシステムとして理解し、それらが種々の相互作用を通じて全球環境変動に果たす役割とメカニズムに迫ることを目指している。多階層の数値モデルによるシミュレーションと現場観測データとの融合、分野横断による現場観測や、無人探査技術の工学的発展など、学際的側面の意義も大きい。気候の将来予測や社会影響などへの波及効果も期待される。

2. アイスコアによる古環境の復元

本稿は包括的なレビューではなく、気体を中心として古環境の指標となる主な測定成分を紹介し、他分野との連携研究についての課題について記す。以下にアイスコアや古環境に関する日本語の書籍を紹介するので、参照していただきたい。

- ・藤井理行, 本山秀明編著 (2011)「極地研ライブラリー アイスコア ～地球環境のタイムカプセル～」(成山堂)
- ・日本気象学会地球環境問題委員会編 (2014)「地球温暖化——そのメカニズムと不確実性」(朝倉書店)
- ・中澤高清, 青木周司, 森本真司 (2015)「地球環境システム——温室効果気体と地球温暖化——」(共立出版)
- ・河村公隆 他編 (2016)「低温環境の科学事典」(朝倉書店)

2.1 アイスコア

南極氷床の上では、降り積もった雪が融解することなく堆積し、圧密という過程を経て氷に変化する。圧密の初期（表面から 10–20 m 程度）には雪粒の再配置による

充填が支配的であり、その後は雪粒どうしの結合（焼結）により圧密が進む。その過程で密度が $300\text{--}500\text{ kg/m}^3$ から約 830 kg/m^3 まで増大する。この雪の層はフィルンと呼ばれ、その厚さは温度と堆積量によって決まり、50–100 m 程度である。

アイスコアの各深度における氷の年代は、過去に氷床の表面に雪として積もった時点をゼロとして、現在までの経過時間として定義される。一方で、気泡はフィルンの底部付近において空隙が大気から隔絶されることで形成される。この深度まで表面に降った雪が到達するまでに数百年から数千年かかるため、同深度の氷と空気の間には年代差が生じることになる。この年代差は、温度や堆積量を入力としてフィルンの圧密速度を推定する数値モデルによって求められるが、その誤差は最大で 20% に達すると考えられており、その高精度化が課題になっている。

2.2 アイスコアの古環境指標

氷床を掘削して得られるアイスコアは、過去の大気やエアロゾルなどを閉じ込めた「タイムカプセル」と言われる。氷を切削または融解し、気泡に閉じ込められた空気を取り出して分析すれば、過去の大気組成が分かり、氷そのものの分析からは気温や海水温、ダスト、火山などの情報が得られる。表 1 に、気体を中心とした主なアイスコアの測定成分と、それらに含まれる環境情報を示した。

氷そのものの解析からは、水の蒸発や凝結に伴う酸素・水素同位体比の分別の温度依存性を利用し、過去の温度が求まる。各種のイオンや元素、ダストの分析から

表 1: アイスコアから得られる主な環境情報.

アイスコアの測定成分	含まれる環境情報
H ₂ O 同位体 (酸素, 水素)	気温, 水蒸気源の表面海水温
硫酸イオン	火山噴火
ダスト	遠隔地の乾燥度, 大気循環強度
CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 濃度	温室効果ガス濃度
CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 同位体	温室効果ガスの放出源・吸収源
N ₂ , Ar 同位体	氷床表面の温度変化
N ₂ , Ar, Kr, Xe 同位体	フィルンの厚さ
O ₂ 同位体	アジアモンスーンなどの水循環
O ₂ /N ₂ , O ₂ 同位体	アイスコアの年代
CH ₄ 濃度, O ₂ 同位体, ¹⁰ Be	アイスコア間や他の古環境試料との年代対比
Kr, Xe 濃度	海水の温度
Kr/Ar, Xe/Ar	氷床表面融解
空気含有量	氷床高度, 氷化密度

は, それらの供給源の環境変動が復元できる. 気体成分のうち, 温室効果ガスである CO₂ と CH₄, N₂O の濃度 (例えば Lüthi et al., 2008; Loulergue et al., 2008) はほぼ直接的に復元が可能であるが, 試料量のごくわずかなため高度な計測技術を必要とする.

厳密には過去の大気がそのまま氷床に保存されるわけではなく, フィルンにおいてわずかに変質を受けるため, その考慮が不可欠である. フィルンの空隙は狭く曲がりくねっているため, 対流による空気の混合は表面付近に限られている. そのため, 気体の移動は主に分子拡散が担っている. 分子拡散のもとでは, 全ての気体は重力と温度勾配によって鉛直方向に分離し, その度合いは気体ごとに異なっている. その結果, 質量の大きい分子ほど重力分離によってフィルンの下部に濃縮し, 温度分離により低温側に濃縮する. その濃縮度は 0.001% のオーダーに過ぎないが測定可能であり, その定量化には窒素 (N₂) やアルゴン (Ar) といった不活性な気体を用いられる. これらの気体は, 大気中の同位体比が長期間一定で化学反応も起こさないため, フィルン内での物理的な分別を読み解くのに有用である (Kawamura et al., 2006, 2013; Buizert et al., 2012).

2.3 アイスコア解析とモデリングとの連携

南極環境システムを理解するためには分野間の連携が不可欠である. ここでは, 長期スケールの気候変動について, 筆者らによるドームふじアイスコアと MIROC 全球気候モデルの連携による研究成果を交えて紹介する.

2.3.1 氷期サイクル

地球の自転軸の傾きの角度や方向は, 他の惑星や月の引力の影響により, 約 23,000 年, 約 41,000 年, 約 100,000 年の 3 つの周期で変動している. それにより日射の緯度分布や季節性が変化する. 気候に影響を及ぼすそれらの「地球軌道要素」の周期的変動, またはその結果としての日射量変動をミランコビッチ・サイクルと呼ぶ. また, 北半球高緯度の夏期日射量の変動によって氷期-間氷期の氷床変動が駆動されるとする説をミランコビッチ理論と呼ぶ. 1970 年代以降に広く受け入れられたが, 2000 年台前半に, この理論は誤りであるとし, 氷期サイクルの根本要因を CO₂ 変動に求める研究などが相次いだ. 筆者らは, ドームふじアイスコアの O₂/N₂ と南極の日射量とに高い相関関係があることを利用して, 高精度 (数十万年間で 2000 年程度の誤差) で年代決定を行い, 過去 4 回の氷期終焉 (退氷期) のタイミングがミランコビッチ理論と整合的であることを示した (Kawamura et al., 2007). その後, 初めて氷期サイクルのシミュレーションに成功し, ミランコビッチ理論は基本的に正しいことを示した (Abe-Ouchi et al., 2013). この研究では, 南極ボストークアイスコアの CO₂ データにドームふじコアの正確な年代を移行して, 気候-氷床モデルに入力データとして与えた. また, 氷期サイクルにおける全球の気候変動が, 北半球の日射量と氷床変動だけで説明できるわけではなく, 南極の気候変動と高い相関を持った CO₂ 変動が, 氷期・間氷期変動の振幅を 2 倍程度に増幅していたことも明らかになった. 南極の気候変動も北半球と似たタイミングで起こり, 南極氷床もそれに伴って変動していたと考えられるが, その正確なタイミングや量, 速度, 北半球から南極氷床へのシグナルの伝達機構についてはよく分かっていない部分が多く, 今後解明すべき重要課題となっている (本巻の三浦, 奥野を参照).

2.3.2 突然の気候変動とバイポーラーシーソー

氷期には, 南北の半球間で変動が逆になるような気候変動 (バイポーラーシーソー) が何度も起こったことが知られており, 特に北大西洋の周辺では, 数十年間で 10℃ 以上といった急激な気候変動を伴っていた. そのような気候の不安定性は大西洋子午面循環 (表層で北向きに流れ, 高緯度で沈み込んで深層で南向きに流れる, 赤道をまたがる大西洋の循環) が変化し, 低緯度から輸送される熱量が変化するために起こると考えられている. その根本要因としては, 北半球の大陸氷床 (今は存在しない北米やユーラシアの氷床) から氷山や融解水が海洋

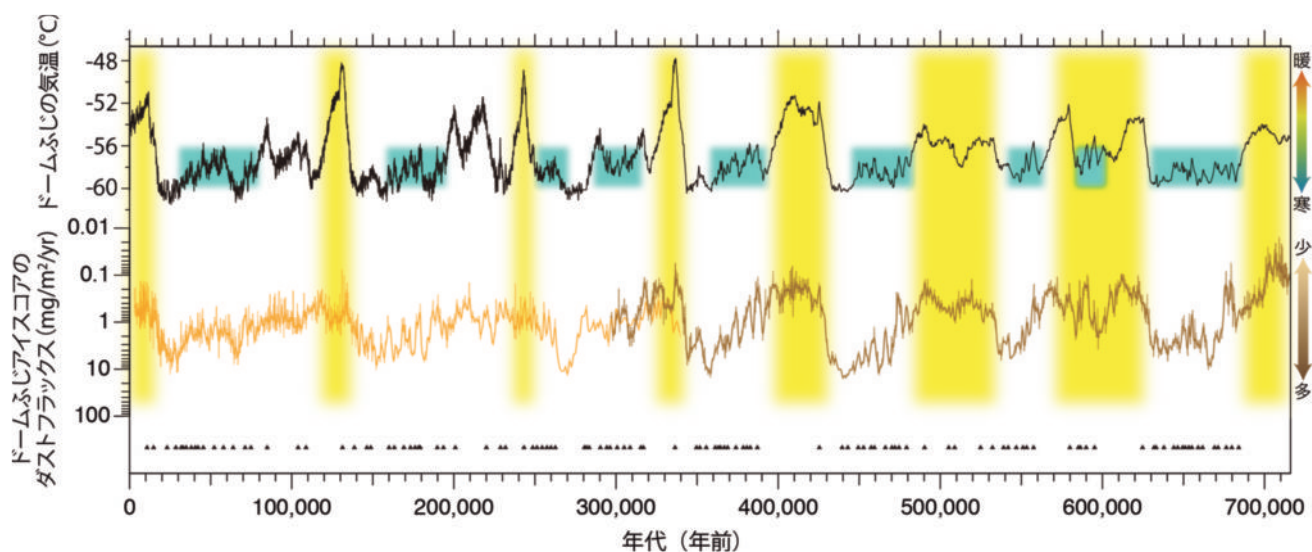


図4：南極ドームふじアイスコアから得られた過去72万年間における気温とダストフラックス変動。パイボラーシーソーを含む気温極大のタイミング（最下段の黒三角）とその頻発期（青色），および間氷期（黄色）を示す。

にもたらされることであるとする考えが主流であるが、古環境データにはそれと矛盾する面もあり、よく分かっていない重要問題である。最終氷期以前に同様の現象が一貫して起こっていたのかも定かではなかった。

ドームふじコアの気温の指標とダスト（塵）降下量を解析した結果により、南極の気温が氷期の中間的な値を取るときに全球気候が不安定になり、その傾向が72万年間で一貫して続いていたことが明らかになった（Dome Fuji Ice Core Project Members, 2017）（図4）。その上で、気候モデルで北大西洋に淡水を500年間供給する実験を行い、どのような背景要因で気候が不安定になるかを調べた。その結果、淡水供給（外部強制力）に対する大西洋子午面循環の応答と全球気候への影響が、氷期の中間で強まることを見いだした（図5上段）。これはドームふじコアの解析結果と整合的な結果であり、MIROC気候モデルの振る舞いが基本的に正しいことを示唆している。さらに、氷期を形成する条件として重要な、(1) 北半球氷床の拡大と(2) 大気中CO₂濃度低下の効果を分離して評価するために、どちらか一方のみを変化させた（現実には起こらなかった仮想的な条件での）感度実験を行った。その結果、気候不安定性の背景要因として重要なのはCO₂低下に起因する南大洋の寒冷化と底層水の供給増大であり、北半球氷床の存在そのものではないことが明らかになった（図5中・下段）。

3. 今後の課題

南極域の複雑な相互作用を紐解くには、アイスコアの最先端研究の推進と異分野とのさらなる連携が不可欠で

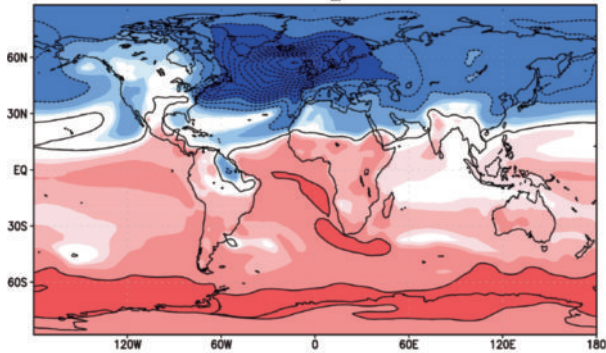
ある。以下にアイスコア研究として取り組むべき主要な課題を挙げる。いずれも日本の研究コミュニティが世界をリードして取り組むべき課題と言える。

(1) ドームふじアイスコアの年代決定の精度は世界的に類を見ないほど高いが、現状では高精度が保証されているのは第1期コアの34万年間にとどまるうえ、分析データの質が良くない年代範囲もある（Fujita et al., 2015）。最新の分析技術によって、-50℃で保管されている氷試料を分析し、正確な年代決定を第2期コアの72万年間に拡張し、さらに高精度化することが重要である。

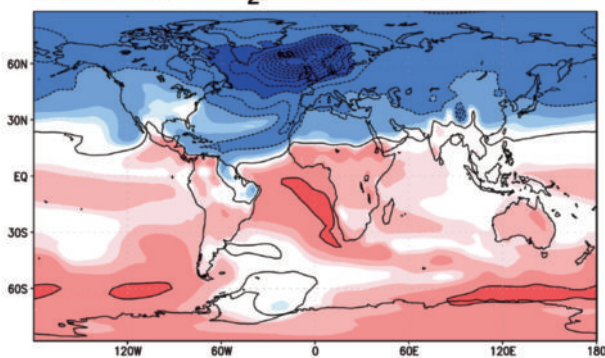
(2) 新たな環境指標の開発と分析を推進し、正確な年代を与えることも重要である。気候・氷床モデルと連携して南極環境システムや全球変動との相互作用の理解を進めるためには、放射強制力の元となるCO₂濃度の正確なデータがまず不可欠である。そのためには、分析技術の高度化と分析の推進に加え、アイスコアの気体の年代を正確に推定する必要がある。そのため、上述した氷の年代に加えて、氷と空気年代差の情報が必要だが、それには過去のフィルムの厚さや涵養量の正確な推定が必要であり、長年の課題となっている（Parrenin et al., 2013）。これについては、希ガスや窒素分子の同位体のわずかな分別から、フィルム内で対流や分子拡散がおよぼ深さを推定できると期待される（Kawamura et al., 2013）。

新たな環境指標としては、例えば最近、氷の酸素および水素同位体比を両方用いて、72万年間にわたる南極内陸と水蒸気起源域（南大洋中緯度）の表面温度が初めて同時に推定された（Uemura et al., 2018）。また筆者らは、

氷期の中間状態 (CO₂ と北半球氷床)



氷期中間の CO₂, 北半球大陸氷床なし



間氷期の CO₂, 北半球の大陸氷床あり

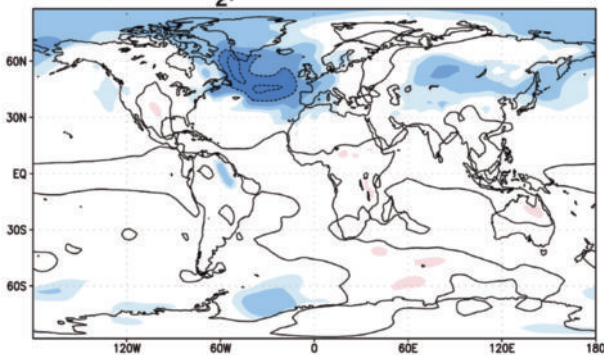


図5：大気海洋結合大循環モデル MIROC によるシミュレーション。(上)氷期の中間的な CO₂ 濃度と氷床形状を与え、北大西洋北部に淡水を 500 年間加え続けた後の温度偏差。(中, 下)大気中二酸化炭素濃度または北半球氷床のみを氷期の中間状態に設定した感度実験結果。気候の不安定性増大にとって CO₂ と南大洋の役割が大きいことが分かった。

クリプトン (Kr) やキセノン (Xe) の大気中の濃度から、最終退氷期を対象として、海洋全体の温度を求める手法を確立した (Bereiter et al., 2018)。これを過去の間氷期などにも適用することが課題である。また、過去の海水変動をアイスコアから復元することも極めて重要である

(本巻の飯塚を参照)。

(3) 海底コアは世界中の海から得られ、古環境情報の記録媒体として極めて有用であるが、アイスコアとは独立に年代決定が行われ、その誤差が大きいことが問題となっている (数十万年間で 1 万年の誤差を持つことも珍しくなく、誤差の推定すら難しい)。古環境変動のメカニズムを解明する上では、世界中の海底コアの年代をドームふじコアと精密に対比・統合し、ドームふじアイスコアの年代を適用することが極めて重要となる。そのための一つのツールとして、大気中の CH₄ 濃度が挙げられる。CH₄ 濃度の変動は主に北半球の気候変動を反映するため、南極のアイスコアと北半球の海底コアとの対比に有用である。ただし、その測定は連続かつ高時間分解能であることが求められる。また、海底コアの古地磁気強度をドームふじアイスコアの宇宙線生成核種のデータと対比させる手法も、年代統合の有力手段として確立されつつある (Horiuchi et al., 2016)。

(4) 沿岸付近や内陸の複数のアイスコアの年代解析から、過去数千年の涵養量の変遷を推定し、近年の温暖化の影響を長い時間スケールの上で精査することは、南極氷床の質量収支を検討する上で非常に重要である。

4. おわりに

南極環境システムの理解のためには、時空間のスケールが大きいシミュレーションや、世界中の古環境データを年代統合した上でモデルと連携した解析・解釈が必要となる。そのためには、現在の直接観測から氷床・海洋・大気の相互作用にかかる現場観測データを取得・解析し、それらの知見をプロセスモデルの開発・改良や大規模気候-氷床モデルの調整に活かしたうえで、数値実験を長期に渡って展開する必要がある。そういった観測とモデルの融合から、過去-現在-将来を通じた南極氷床・海洋・物質循環の応答特性を定量的に解明する展望がひらける。

アイスコアが対象にできる長期スケールの古環境変動の中で、南極氷床の縮小メカニズムの解明にとって特に重要な時代は、現在より海水準が高く南極氷床が縮小していた最終間氷期と 40 万年前の間氷期、またそれらの移行期である。完新世 (現在の間氷期) が始まって 1 万年が経過した現在と比べて、CO₂ 濃度が工業化前と同程度だった過去の間氷期に、なぜ南極氷床が縮小したのだろうか。あるいは、過去の間氷期が地球の「ノーマルな」

状態で、完新世こそ特別な時代なのだろうか。人為起源の地球環境問題に関する研究の重要性はもとより、このような興味が尽きない謎に迫っていくことができる。

参考文献

- Abe-Ouchi, A., F. Saito, K. Kawamura, M. E. Raymo, J. Okuno, K. Takahashi and H. Blatter (2013) Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. *Nature*, **500**, 190–193.
- Bereiter, B., S. Shackleton, D. Baggenstos, K. Kawamura and J. Severinghaus (2018) Mean global ocean temperatures during the last glacial transition. *Nature*, **553**, 39–44.
- Buizert, C., P. Martinerie, V. V. Petrenko, J. P. Severinghaus, C. M. Trudinger, E. Witrant, J. L. Rosen, A. J. Orsi, M. Rubino, D. M. Etheridge, L. P. Steele, C. Hogan, J. C. Laube, W. T. Sturges, V. A. Levchenko, A. M. Smith, I. Levin, T. J. Conway, E. J. Dlugokencky, P. M. Lang, K. Kawamura, T. M. Jenk, J. W. C. White, T. Sowers, J. Schwander and T. Blunier (2012) Gas transport in firn: multiple-tracer characterisation and model intercomparison for NEEM, Northern Greenland. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 4259–4277.
- Dome Fuji Ice Core Project Members (2017) State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling. *Science Advances*, **3**(2), doi:10.1126/sciadv.1600446.
- Dutton, A., A. E. Carlson, A. J. Long, G. A. Milne, P. U. Clark, R. Deconto, B. P. Horton, S. Rahmstorf and M. E. Raymo (2015) Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*, **349**, doi:10.1126/science.aaa4019.
- Fujita, S., F. Parrenin, M. Severi, H. Motoyama and E. W. Wolff (2015) Volcanic synchronization of Dome Fuji and Dome C Antarctic deep ice cores over the past 216 kyr. *Clim. Past*, **11**, 1395–1416.
- Horiuchi, K., K. Kamata, S. Maejima, S. Sasaki, N. Sasaki, T. Yamazaki, S. Fujita, H. Motoyama and H. Matsuzaki (2016) Multiple ^{10}Be records revealing the history of cosmic-ray variations across the Iceland Basin excursion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **440**, 105–114.
- Kawamura, K., J. P. Severinghaus, S. Ishidoya, S. Sugawara, G. Hashida, H. Motoyama, Y. Fujii, S. Aoki and T. Nakazawa (2006) Convective mixing of air in firn at four polar sites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 672–682.
- 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, H. Nakata, H. Motoyama, S. Fujita, K. Goto-Azuma, Y. Fujii and O. Watanabe (2007) Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, **448**, 912–916.
- Kawamura, K., J. P. Severinghaus, M. R. Albert, Z. R. Courville, M. A. Fahnestock, T. Scambos, E. Shields and C. A. Shuman (2013) Kinetic fractionation of gases by deep air convection in polar firn. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 11141–11155.
- Loulergue, L., A. Schilt, R. Spahni, V. Masson-Delmotte, T. Blunier, B. Lemieux, J. M. Barnola, D. Raynaud, T. F. Stocker and J. Chappellaz (2008) Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH_4 over the past 800,000 years. *Nature*, **453**, 383–386.
- Lüthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura and T. F. Stocker (2008) High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, **453**, 379–382.
- Ohshima, K. I., Y. Fukamachi, G. D. Williams, S. Nishishi, F. Roquet, Y. Kitade, T. Tamura, D. Hirano, L. Herraiz-Borreguero, I. Field, M. Hindell, S. Aoki and M. Wakatsuchi (2013) Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley Polynya. *Nat. Geosci.*, **6**, 235–240.
- Tamura, T., G. D. Williams, A. D. Fraser and K. I. Ohshima (2012) Potential regime shift in decreased sea ice production after the Mertz Glacier calving. *Nat. Commun.*, **3**, 826, doi:10.1038/ncomms1820.
- 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 (2018) Asynchrony between Antarctic temperature and CO_2 associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nat. Commun.*, in press.