

## 過去 72 万年間の気候の不安定性を 南極ドームふじアイスコアの解析と気候シミュレーションにより解明

国立極地研究所(所長:白石 和行)の川村賢二准教授及び 本山 秀明 教授、東京大学大気海洋研究所(所長:津田 敦)の阿部 彩子 教授を中心とする 31 機関 64 名からなる研究グループは、南極ドームふじで掘削されたアイスコアを使った過去 72 万年分の気温とダストの解析から、氷期のうち中間的な気温を示す時期(以下、氷期の中間状態。注 1)に、気候の不安定性(変動しやすさ)が高くなることを見いだしました。さらに、その一番の原因が温室効果の低下による全球の寒冷化であることを、大気海洋結合大循環モデルによる気候シミュレーションから解き明かしました。これまで、最終氷期(約 10 万年前～2 万年前)における気候の不安定性については研究が進んでいましたが、複数の氷期を含む長期の傾向やメカニズムが明らかになったのは初めてのことです。また、現在まで 1 万年以上続いている間氷期(温暖期)が将来にわたって安定である保証はなく、現存するグリーンランド氷床の融解によって気候の不安定性がもたらされる可能性も示唆されました。この成果は「Science Advances」誌にオンライン掲載されました。

なお、本研究で使用されたドームふじアイスコアは、南極地域観測事業で 2001 年～07 年に実施された「第 2 期ドームふじ観測計画」により 2003 年～07 年に掘削されました。気候モデルによる数値実験には、海洋研究開発機構の「地球シミュレータ」が利用されました。

## <研究の背景>

気候変動の起こりやすさ(気候の不安定性)は、地球の自然環境や人間社会に大きな影響を与えます。そのため、不安定性が過去どのような時期に高まっていたのかを知り、その原因を解明して気候モデルで再現することは、今後、地球温暖化によって不安定性が増すのかどうかといった問題にも重要です。過去を見ると、南極とグリーンランドの多数のアイスコアの研究から、最終氷期(約 10 万年前～2 万年前)には南極で数千年スケールの気温変動が 25 回以上も起きたことや、それらが北半球の急激な温暖化や寒冷化と関係していたことが分かっています(文献 1)。そのような気候変動の原因は、何らかのきっかけで大西洋の深層循環が変化したことで、低緯度から南北に運ばれる熱の量が変わったことだと考えられています(文献 2)。

しかし、最終氷期より古い時代についてはデータが少ない上にアイスコアの時間分解能が低いため、気候の不安定性と平均状態の関係や、不安定性を誘発する原因についての理解が進んでいませんでした。

## <研究の内容>

本研究では、日本が 2003 年～07 年に掘削した「第 2 期ドームふじアイスコア」(図 1)を解析し、過去 72 万年間の南極の気温とダスト(大気に漂う固体微粒子)の変動を詳細に復元し(図 2)、欧州が掘削した「ドーム C アイスコア」(図 1 左に地図)のデータと合わせることで、信頼性の高い古気候データを得ることに成功しました。ドームふじアイスコアの大きな利点は、記録されている最も古い氷期(約 60 万年前)を含む氷の層がドーム C アイスコアの 2～3 倍も厚く、そのために気温の復元がこれまでより遥かに詳細に行えたことです。また、2 つのコアの掘削地点は遠く(約 2000 km)離れているため、両者に共通する気温とダストの変動から、南極から中低緯度までの広範囲に及ぶ気候変動をこれまでになく正確に推定することができました。

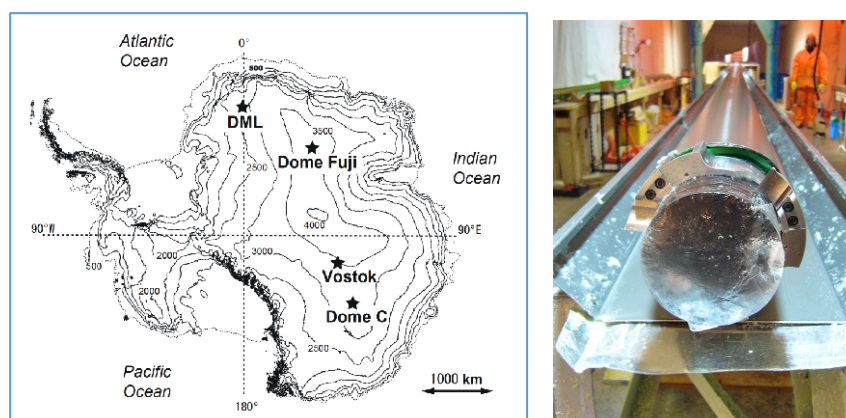


図 1：(左) 東南極の主な掘削地点。  
(右) ドームふじ基地で掘削されたアイスコア。

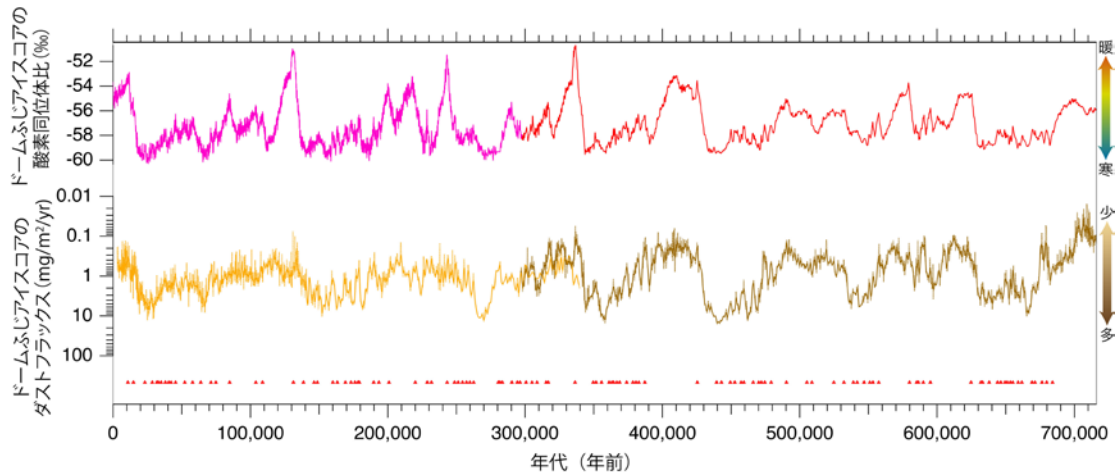


図 2：(南極ドームふじアイスコアから得られた過去 72 万年間にわたる酸素同位体比（気温の指標）およびダストフラックス（大気中に漂う微粒子の指標）。最下段に描かれている印（三角）は、本研究で抽出された南極の温暖化ピークの位置を示す。

これらのデータを調べたところ、過去 72 万年のうち、氷期の間状態において気候変動が頻繁に起こっていたことが判明しました(図 3)。

なぜ、現在のような間氷期(温暖期)でも、氷期の最寒期でもなく、氷期の間状態が最も不安定なのでしょう。研究チームは、地球温暖化予測にも使用された気候モデル(MIROC)の中で、間氷期/氷期の間状態/氷期の最寒期に相当する 3 種類の気候状態を再現し、それぞれに対して同量の淡水を北大西洋北部に加えるシミュレーション実験を行いました。それぞれの気候が敏感であるかどうかを調べるため、淡水流入に対する深層循環の反応や、その結果として起こる気温の変化を観察しました。実験の結果、氷期の間状態において淡水流入に対する反応が最も大きい、すなわち気候が不安定であることが判明しました(図 4 A-C)。これはアイスコアのデータの解析結果と整合しています。さらに、間氷期においても、淡水流入の量が多ければ気候が大きく変わりうることを示唆されました。

また、気候の不安定性が氷期の間状態に高まる要因は、大気中の二酸化炭素濃度が低下したことで南極を含む地球全体が寒冷化し、深層循環が弱まりやすくなったことが重要であると示唆されました(図 4 D、E)。これまでは、気候の不安定性の要因は、北半球の大陸氷床の存在とその不安

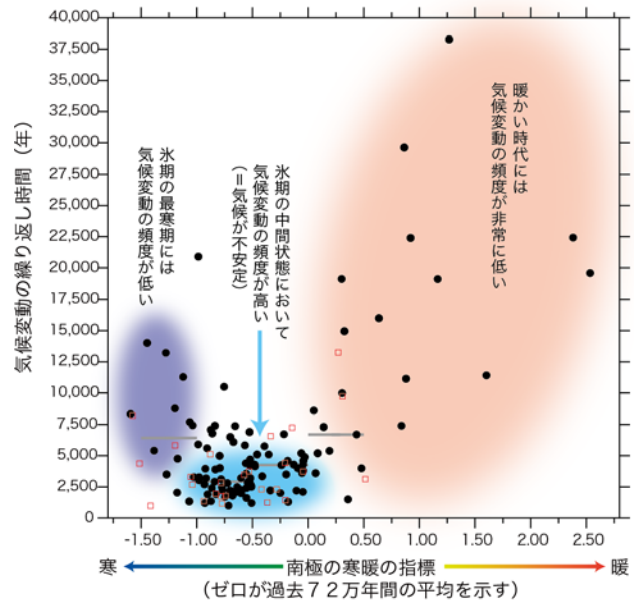


図 3：南極アイスコアの解析から得られた、過去 72 万年間における気候変動の繰り返し時間（頻度）と南極の気温との関係（黒丸）。グリーンランドのアイスコアによる最終氷期の結果も示す（赤四角）。間氷期のような暖かい時代や、氷期の最寒期のような寒い時代には頻度が低いが、氷期の間状態の寒さの時代に気候変動が頻繁に起こっており、気候が不安定であったことが示された。

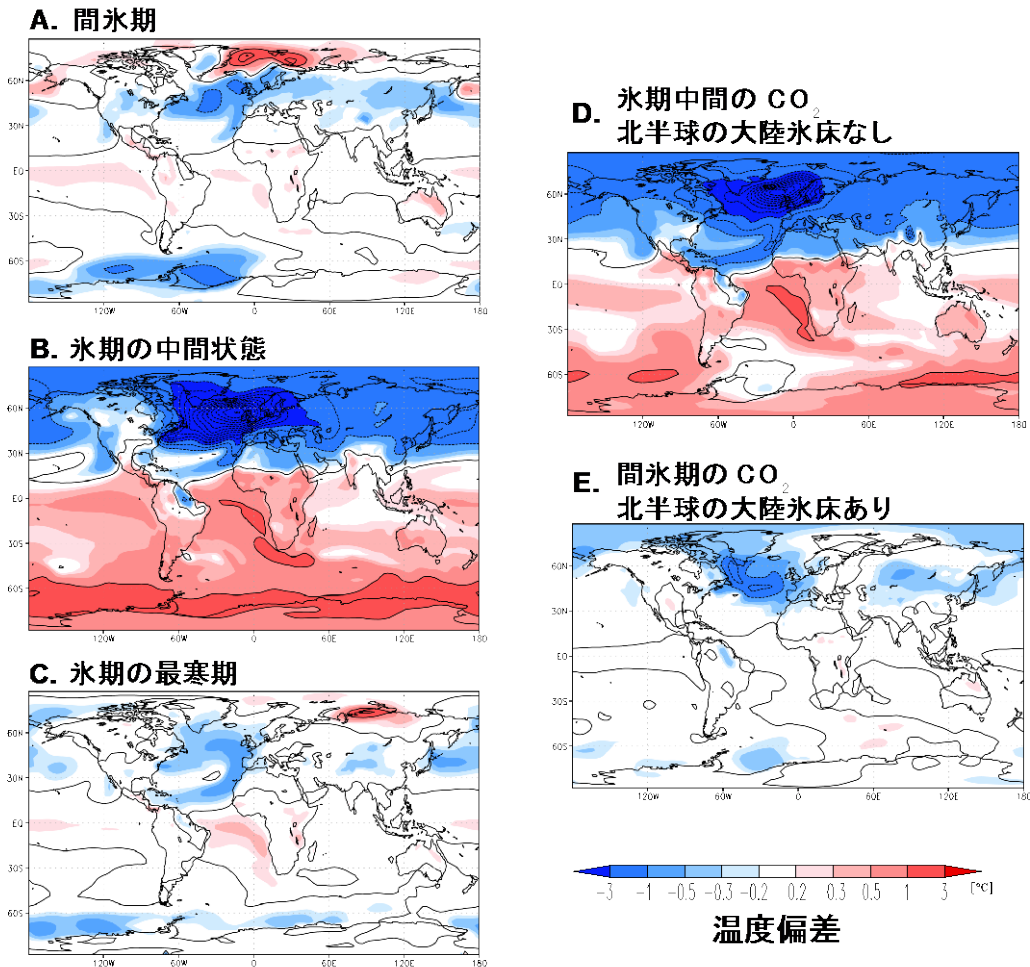


図 4：大気海洋結合大循環モデル（MIROC）による気候シミュレーションの結果。（A-C）まず3つの異なる気候状態を再現した（間氷期、氷期中間状態、氷期最寒期のそれぞれに相当する大気中二酸化炭素濃度と氷床形状を与えた）。その後、北大西洋北部に淡水を 500 年間加え続けた後の初期状態からの温度偏差を示す。氷期中間状態の時に反応が大きく、北半球が寒冷化し、南半球は逆に温暖化することが分かる。（D、E）現実には存在しなかった条件下での感度実験の結果。間氷期の条件から、大気中二酸化炭素濃度または北半球氷床のみを氷期中間状態と同じにした。その結果、気候の不安定性が増大する要因として大気中二酸化炭素の役割が大きいことが分かった。

定性にあると考えられていましたが、今回の実験により、二酸化炭素が気候の平均状態だけでなく長期的な気候の安定性を決定する重要な要素であることが分かったのです。

#### <今後の展望>

南極のアイスコアから過去の気候データを得て、気候シミュレーションと組み合わせて理解することは、現在の直接観測では知ることのできない地球システム全体の外的要因に対する反応を調べるために極めて有効な手段です。今回得られた第 2 期ドームふじアイスコアは 72 万年の記録を有していますが、南極氷床の深部にさらに古い氷が存在することは確実です。これは、本研究の結果、ドームふじコアの掘削地点では氷の底部が地熱により融解し、非常に古い氷はその地点では失われていることが分かりましたが、南極には、より地熱の影響を受けにくい地域があるためです。

現在、氷期－間氷期のサイクルは約 10 万年周期ですが、100 万年前より昔には、基本周期が 4

万年であったことが知られています。その変化の原因やメカニズムの解明には、当時の大気中の二酸化炭素濃度や南極の気温変動の周期やタイミングといったデータが必要です。そのため、南極で最古のアイスコアを掘削しようという機運が国際的に高まっています(文献 3)。また、データを生かして気候変動の原因やメカニズムを解明し、将来に結びつけるためには、気候モデルの開発や古気候シミュレーションが必要です。

将来の気候は安定だと言えるでしょうか。本研究では、比較的安定である間氷期においても、北大西洋北部に流入する淡水量を増やすと気候が大きく変わることが示唆されました。つまり、今後グリーンランド氷床の融解が増えることで気候の安定性が変化するかもしれません。最近、MIROCを含む複数のモデルによる将来予測の研究で、温室効果ガス濃度が高くなるほど気候が不安定化するリスクが高まることが示されました(文献 4)。こうした予測の信頼性を高めるためには、過去のシミュレーションを通じて気候システムの変動メカニズムをより深く理解することが欠かせません。今後、より精緻な古気候シミュレーションやその結果の分析を進める上では、「地球シミュレータ」等のスーパーコンピューターによる多くの数値実験が極めて重要です。

人為起源の排出によって、大気中の温室効果ガス濃度は過去 100 万年スケールで類を見ないレベルに達しており、氷床や海洋といった、莫大な体積を有し、かつ、長い時間スケールで変化する気候要素が変動することは確実です。地球環境が現在と大きく異なっていた過去について、アイスコアの掘削・分析などによる気候変動の復元と、古気候モデルによる数値実験とを連携させ、メカニズムを検証しつつ地球システムを理解することが、今後ますます重要になると考えられます。

<注>

注 1 氷期の中間状態

氷期の最寒期より暖かい、氷期中の中間的な温度をとる状態のこと。

<発表論文>

掲載誌: Science Advances

タイトル:

State dependence of climatic instability over the past 720,000 years from Antarctic ice cores and climate modeling

著者:

ドームふじアイスコアプロジェクト:

川村賢二<sup>1,2,3\*</sup>、阿部彩子<sup>4,5\*</sup>、本山秀明<sup>1,2\*</sup>、上田豊<sup>6</sup>、青木周司<sup>7</sup>、東信彦<sup>8</sup>、藤井理行<sup>1,2</sup>、藤田耕史<sup>6</sup>、藤田秀二<sup>1,2</sup>、福井幸太郎<sup>1†</sup>、古川晶雄<sup>1,2</sup>、古崎睦<sup>9</sup>、東久美子<sup>1,2</sup>、Ralf Greve<sup>10</sup>、平林幹啓<sup>1</sup>、本堂武夫<sup>10</sup>、堀彰<sup>11</sup>、堀川信一郎<sup>10‡</sup>、堀内一穂<sup>12</sup>、五十嵐誠<sup>1</sup>、飯塚芳徳<sup>10</sup>、亀田貴雄<sup>11</sup>、神田啓史<sup>1,2</sup>、河野美香<sup>1§</sup>、倉元隆之<sup>1</sup>、松四雄騎<sup>13||</sup>、宮原盛厚<sup>14</sup>、三宅隆之<sup>1</sup>、宮本淳<sup>10</sup>、長島泰夫<sup>15</sup>、中山芳樹<sup>16</sup>、中澤高清<sup>7</sup>、中澤文男<sup>1,2</sup>、西尾文彦<sup>17</sup>、大日方一夫<sup>18</sup>、

大垣内るみ<sup>5</sup>、岡頭<sup>4</sup>、奥野淳一<sup>1,2</sup>、奥山純一<sup>10¶</sup>、大藪幾美<sup>1</sup>、Frédéric Parrenin<sup>19</sup>、  
Frank Pattyn<sup>20</sup>、齋藤冬樹<sup>5</sup>、齊藤隆志<sup>21</sup>、斎藤健<sup>10</sup>、櫻井俊光<sup>1#</sup>、笹公和<sup>15</sup>、  
Hakime Seddik<sup>10</sup>、柴田康行<sup>22</sup>、新堀邦夫<sup>10</sup>、鈴木啓助<sup>23</sup>、鈴木利孝<sup>24</sup>、高橋昭好<sup>14</sup>、  
高橋邦生<sup>5\*</sup>、高橋修平<sup>11</sup>、高田守昌<sup>8</sup>、田中洋一<sup>25</sup>、植村立<sup>1,26</sup>、渡辺原太<sup>27</sup>、渡辺興亜<sup>28</sup>、  
山崎哲秀<sup>14</sup>、横山宏太郎<sup>29</sup>、吉森正和<sup>30</sup>、吉本隆安<sup>31</sup>

\* 責任著者:川村賢二、阿部彩子、本山秀明

- 1 国立極地研究所
- 2 総合研究大学院大学 極域科学専攻
- 3 国立研究開発法人海洋研究開発機構 生物地球化学研究分野
- 4 東京大学 大気海洋研究所
- 5 国立研究開発法人海洋研究開発機構  
統合的気候変動予測研究分野／気候変動リスク情報創生プロジェクトチーム
- 6 名古屋大学・大学院環境学研究科
- 7 東北大学大学院理学研究科 大気海洋変動観測研究センター
- 8 長岡技術科学大学 機械系
- 9 旭川工業高等専門学校
- 10 北海道大学低温科学研究所
- 11 北見工業大学 社会環境工学科
- 12 弘前大学大学院 理工学研究科
- 13 東京大学総合研究博物館タンデム加速器研究施設
- 14 株式会社地球工学研究所
- 15 筑波大学 AMS グループ
- 16 株式会社 3D 地科学研究所
- 17 千葉大学 環境リモートセンシングセンター
- 18 大日方クリニック
- 19 Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, IGE, France
- 20 Université Libre de Bruxelles, Belgium
- 21 京都大学防災研究所
- 22 国立環境研究所
- 23 信州大学理学部
- 24 山形大学学術研究院
- 25 株式会社ジオシステムズ
- 26 琉球大学 理学部 海洋自然科学科 化学系
- 27 株式会社地研コンサルタンツ
- 28 総合研究大学院大学

- 29 中央農業研究センター 北陸研究拠点  
30 北海道大学 大学院地球環境科学研究院  
31 アイオーケイ株式会社、九州オリンピック工業株式会社

† 現在、立山砂防カルデラ博物館

‡ 現在、名古屋大学 大学院環境学研究科附属地震火山研究センター

§ 現在、Department of Geochemistry, Geoscience Center, University of Göttingen, Germany.

|| 現在、京都大学防災研究所

¶ 現在、株式会社IHI

# 現在、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所

※ 現在、アドバンスソフト株式会社

#### <文献>

文献 1: EPICA community members: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica, *Nature*, 444(7), 195–198, doi:10.1038/nature05301, 2006.

文献 2: Stocker, T. and Johnsen, S.: A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw, *Paleoceanogr.*, 18(4), doi:10.1029/2003PA000920, 2003.

文献 3: Fischer, H., Severinghaus, J., Brook, E., Wolff, E., Albert, M., Alemany, O., Arthern, R., Bentley, C., Blankenship, D., Chappellaz, J., Creyts, T., Dahl-Jensen, D., Dinn, M., Frezzotti, M., Fujita, S., Gallée, H., Hindmarsh, R., Hudspeth, D., Jugie, G., Kawamura, K., Lipenkov, V., Miller, H., Mulvaney, R., Parrenin, F., Pattyn, F., Ritz, C., Schwander, J., Steinhage, D., Ommen, T. V. and Wilhelms, F.: Where to find 1.5 million yr old ice for the IPICS “Oldest-Ice” ice core, *Clim. Past*, 9(6), 2489–2505, doi:10.5194/cp-9-2489-2013, 2013.

文献 4: Bakker, P., Schmittner, A., Lenaerts, J. T. M., Abe-Ouchi, A., Bi, D., van den Broeke, M. R., Chan, W. L., Hu, A., Beadling, R. L., Marsland, S. J., Mernild, S. H., Saenko, O. A., Swingedouw, D., Sullivan, A. and Yin, J.: Fate of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Strong decline under continued warming and Greenland melting, *Geophys Res Lett*, 43(23), 12,252–12,260, doi:10.1002/2016GL070457, 2016.

#### <研究サポート>

本研究は、JSPS 及び文部科学省の科研費(14GS0202、15101001、16201005、18340135、19201003、21221002、21671001、22101005、25241005、26241011)、環境省の環境研究総合推進費(S-10)の助成を受けて実施されました。また、数値計算は国立環境研究所のスーパーコン

コンピューター(NEC SX-8R/128M16)と、海洋研究開発機構の「地球シミュレータ」を用いて実施されました。