

306 (氷床コア; Dansgaard-Oeschger イベント; 南北シーソー)

## 4. 氷床コアから見た南北気候のつながり

川村 賢二\*・青木 周司\*\*・中澤 高清\*\*

### 1. はじめに

極域氷床は地球上の淡水の約70%を保持しており、その変動は、大気循環や水循環、海水準、海洋循環、海水などの変動を通じて、極域はもちろん全球気候にも多大な影響をもたらす。その氷床を掘削して得られる柱状の氷(氷床コア)は、過去の気温やエアロゾル降下量、火山噴火、温室効果ガス濃度、太陽活動を含む様々な環境情報を抽出できる優れたタイムカプセルである。

1980年代に南極ポストーク氷床コアから過去16万年間の気温とCO<sub>2</sub>濃度が報告され、氷期-間氷期サイク

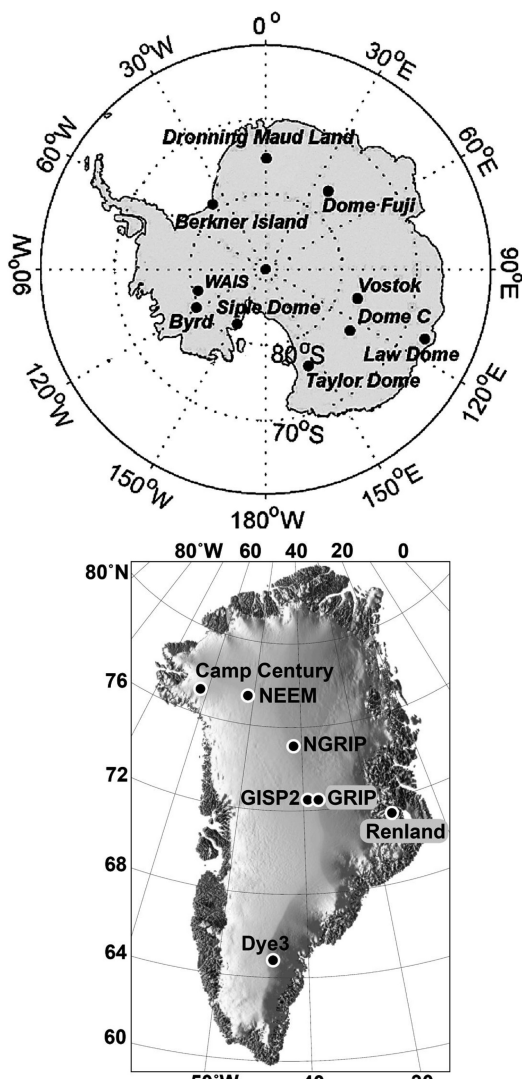
ルにおける気温と温室効果ガスの調和的変動が発見されてから約四半世紀が経った。その間、南極とグリーンランドにおいて様々な深層氷床コアの掘削が行われ、氷期における急激な気候変動や南北の気候変動間のリンクなど、気候学的に重要な知見が蓄積されてきた。

第1図に主な極域氷床の掘削点を示す。1960年代にアメリカがグリーンランドのCamp Centuryと南極のByrdで氷床掘削を行った。それ以降、グリーンランドでは時代順にDye 3 (1981年)、GRIP (1992年)、GISP2 (1992年)、North GRIP (NGRIP, 2003年)、NEEM (2010年)において岩盤付近まで達する掘削が行われてきた。南極ではVostok (1998年)、Dome C (2004年)、DML (2006年)、ドームふじ (2007年)、WAIS (2011年)において深層掘削が行われてきた(カッコ内は氷床底部に到達した年)。

\* (連絡責任著者) 国立極地研究所/総合研究大学院大学極域科学専攻. kawamura@nipr.ac.jp

\*\* 東北大学大学院理学研究科.

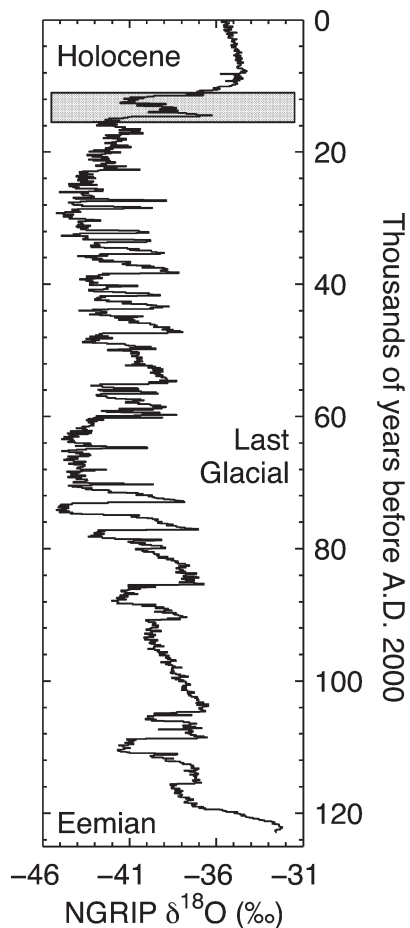
© 2013 日本気象学会



第1図 極域氷床の主な掘削点。(南極の図は Taylor 2007より, グリーンランドの図は <http://neem.dk> より引用)

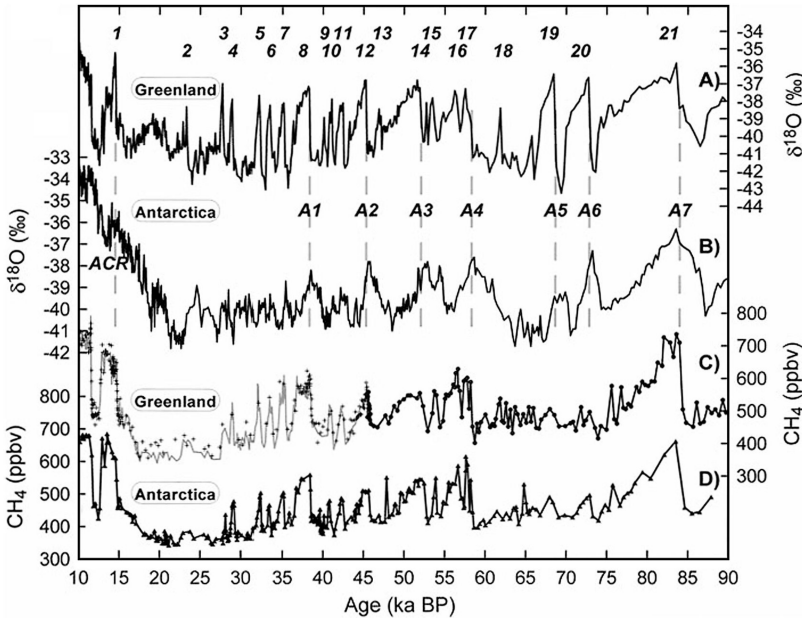
我が国は、南極ドームふじ氷床コア掘削やグリーンランドの国際プロジェクト参加 (NGRIPおよびNEEM) を通じて、氷床コアを用いた気候研究に貢献してきた。本稿では、そうした氷床コア研究から得られてきた知見のうち、特に南北の気候変動間のつながりと、極域が全球気候に与えた影響について紹介したい。

2. 北極圏の急激な気候変動と南北シーズン  
GRIPとGISP2コアが30 km離れた2地点で掘削さ

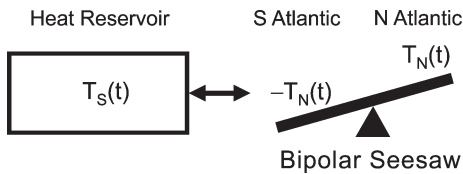


第2図 グリーンランド NGRIP コアを分析して得られた過去12万年間にわたる酸素同位体比の変動 (気温の指標)。縦軸が年代 (1000年単位で、下方ほど古い)、横軸が気温の指標となる水の酸素同位体比 (右方が温暖)。Holoceneは完新世, Last Glacialは最終氷期, Eemianは最終間氷期。グレーの部分は最終退氷期に起きた急激な変動を示す。最終氷期から完新世の温度変化幅は約 $20^{\circ}\text{C}$ 、最終氷期の急激な変動は $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 程度の振幅。(NGRIP 2004; 図は Steffensen *et al.* 2008より引用)

れ、詳細な解析結果が付き合わされた (Dansgaard *et al.* 1993; Grootes *et al.* 1993)。その後の NGRIP コア (NGRIP 2004) も合わせたデータから、最終氷期には急激かつ大きな気温変動が20回以上も起きたことが判明している (第2図)。さらに、中低緯度の海底コアや石筍試料の分析結果から、グリーンランドに見



第3図 同一の時間軸に置かれたグリーンランドと南極の気候変動，および年代合わせに用いられたCH<sub>4</sub>濃度。横軸は西暦1950年から遡った年代で、1000年単位の目盛り (ka は kiloyears, BP は Before Present)。右向きに古くなる (実際の時間は左向きに進む)。A) グリーンランド GISP2氷床コアの酸素同位体比。上の番号はD/Oの通し番号。B) 南極 Byrd 氷床コアの酸素同位体比。ACR および A1から A7は、大きなD/Oと対応づけられる南極のイベントを表す。C) とD) はそれぞれ、グリーンランドおよび南極の氷床コアから得たCH<sub>4</sub>濃度変動 (年代合わせに使用された)。(Blunier and Brook 2001)



第4図 Thermal bipolar seesawの概念図。左側のボックスは南大洋を模した熱のリザーバーで、右側のシーソーは大西洋の表層温度の南北間の振動モードを表す。シーソーの右側が北大西洋の表層温度の偏差、左側が南大洋の表層温度の偏差を表す。(Stocker and Johnsen 2003)

られる温度変動とリンクした気候変動 (温度や降水量変動) が全球規模で見られることも明らかにされてきた (Blunier *et al.* 1998; Bond *et al.* 1993; Rahmstorf 2002; Wang *et al.* 2001)。

このグリーンランドの変動は、2人のパイオニアの名を取って Dansgaard-Oeschger イベント (D/O)

と呼ばれる。D/O は氷期の中でも比較的温暖な「亜間氷期」と寒冷な「亜氷期」とがセットになっており、それぞれの状態は比較的安定しているが、亜氷期から亜間氷期への移行は早く、数十年以内に10°Cを超えるような急激なものであった。また、大きめのD/Oの後に小さめのD/Oが続くような規則性が認められる。この大きな周期の中の寒冷期に対応して、北米氷床から北大西洋への氷山流出イベントがあり、それに伴って表層塩分が低下したことが、海底堆積物の解析から明らかにされている (Bond *et al.* 1993)。

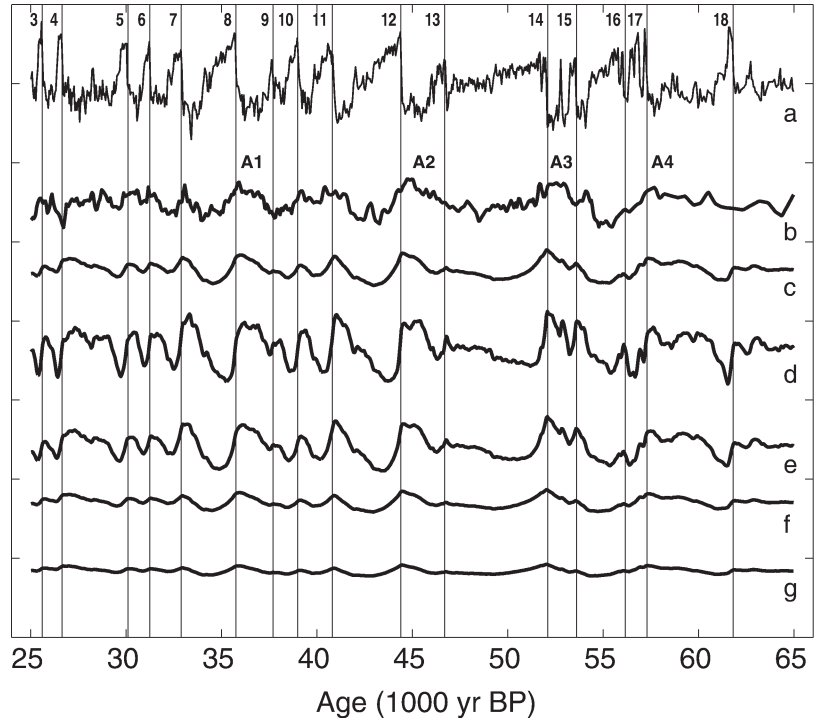
D/O サイクルの原因は、大陸氷床からの氷山や融解水によって北大西洋北部の塩分が変化することだと考えられている。淡水の供給により表層塩分が低下する

と深層水が形成されにくくなり、熱塩循環 (いわゆる海洋のベルトコンベア) が弱体化して暖流が北上できずに北部北大西洋とその周辺は寒冷化する。氷山流出が止まると塩分が高くなり、熱塩循環が再強化されることで温暖になる (Broecker 1997)。1990年代から気候モデルを用いた再現実験も始まり (Manabe and Stouffer 1995)、一定の成功を収めてきた。モデルの中での熱塩循環の淡水供給に対する応答感度はモデル間で異なっていることが指摘されているなど、課題も多い。問題の原因解明と高解像度のモデリングを通じて、過去の現象の理解と将来への示唆が可能になると考えられる。これは現在気候の研究からはアプローチし難い重要なトピックの一つである (Jansen *et al.* 2007)。

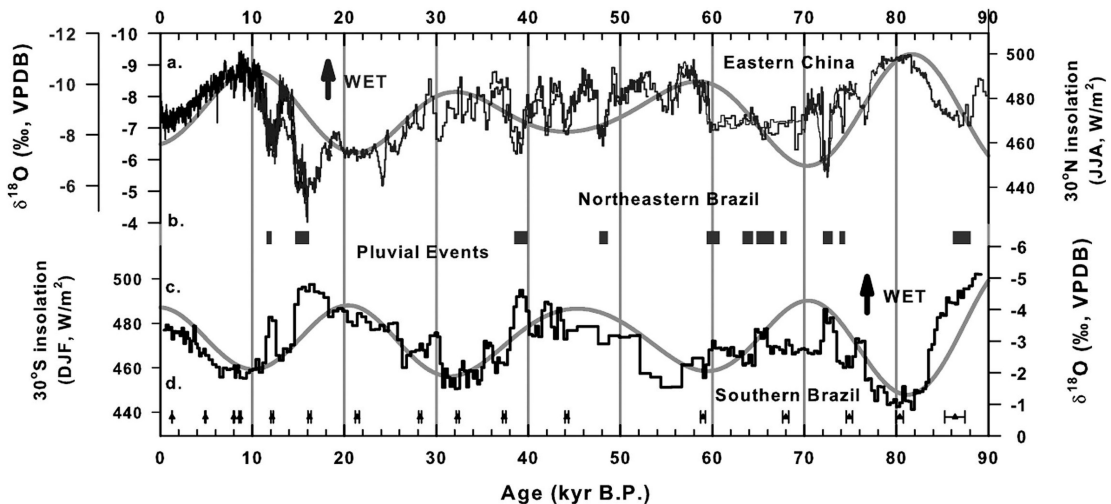
D/Oの原因が熱塩循環の変化による北向き熱フラックスの変化だとすれば、北半球と逆の気候変動が南半球で見られるはずである。この概念は、南北間でシーソーのように温度が変化するイメージから

bipolar seesaw と呼ばれる。その検証のため、グリーンランドと南極の氷床コアの年代を正確に合わせて変動のパターンとタイミングが調べられた (第3図) (Blunier *et al.* 1998; Blunier and Brook 2001; EPICA 2006)。これらの比較から、全ての D/O に対応する南極のイベントが確認されたが、そのタイミングがずれていることが分かった。南極の変動はグリーンランドに比べて周期的には早く、かつ緩慢であるように見えるが、ピーク的位置は合っているようである。単純なシーソーではないことは明らかである (第3図)。

この謎を解く概念として、bipolar seesaw を改良した、Thermal bipolar seesaw が提唱された



第5図 氷床コアデータと Thermal bipolar seesaw モデルの結果。縦軸は無次元で温度を意味し、見やすいように上下にずらして描いた。a は入力したグリーンランド氷床コアデータ、b は南極氷床コアデータ、c は時定数1120年でのモデル結果 (南極)、d, e, f, g はそれぞれ時定数を200年、500年、2000年、4000年とした場合の結果。(Stocker and Johnsen 2003)



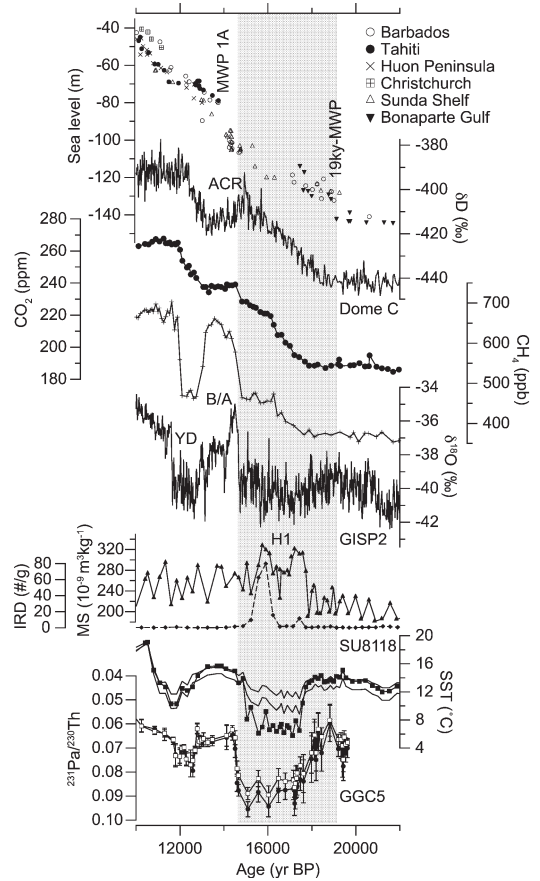
第6図 中国東部 (上段) とブラジル南部 (下段) における石筍試料の酸素同位体比 (降水量の指標)。いずれのグラフも、上方が湿潤を表す。それぞれのデータに重ねて描かれているグレーの線は、北緯30度および南緯30度における夏期日射量。それらの間 (上下の中央) に多数描かれている四角 (バー) は、ブラジル北部における湿潤イベント (Pluvial Events) の時期を表す。(Wang *et al.* 2007)

(Stocker and Johnsen 2003). 第4図はその概念図を示しており, 南北の北大西洋の表層温度が単純なシーソーのように逆の符号で変化し, その南側に南大洋を模した巨大な熱リザーバーを接続してある. 南大洋の温度は次式で表される.

$$\frac{dT_S(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [-T_N(t) - T_S(t)]$$

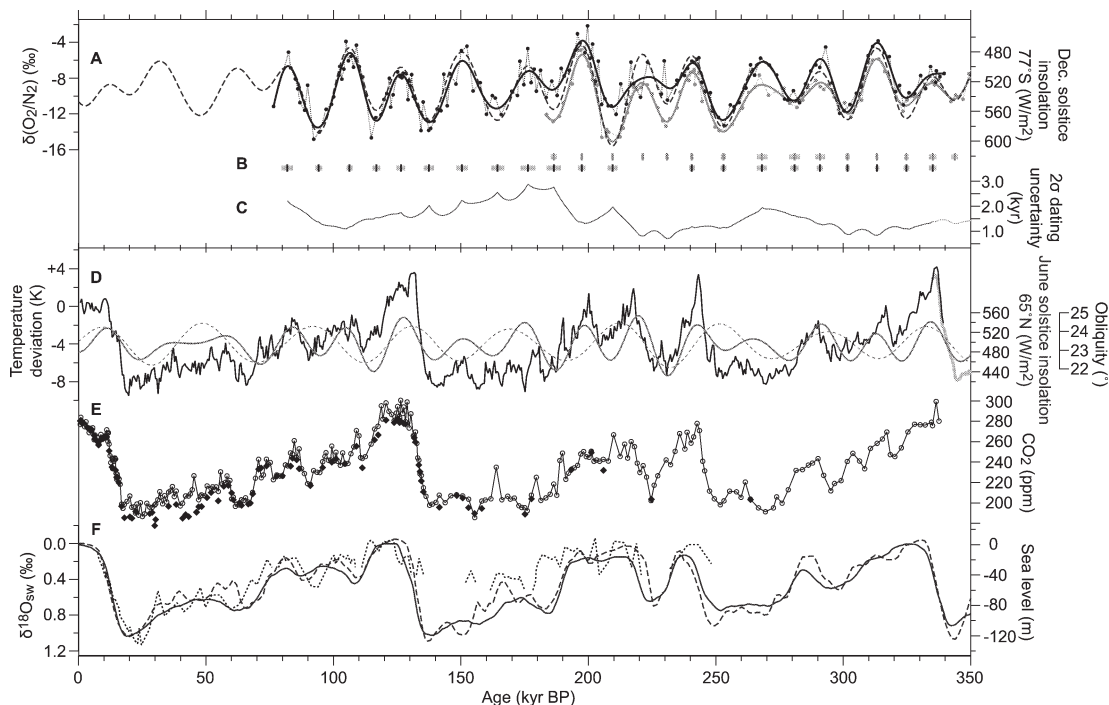
$T_S(t)$ ,  $T_N(t)$ はそれぞれ南大洋と北大西洋の温度,  $t$ は時間,  $\tau$ は南大洋の温度変動に関する時定数を表す. ここで, 北大西洋の温度変動はグリーンランドの水床コアに, 南大洋の温度変動は南極の水床コアに記録されているとする. このモデルにグリーンランドの水床コアから得た温度変動データを入力して, モデル中の南大洋の温度変動 ( $T_S(t)$ ) を見積もった結果が第5図である. 時定数を約1100年に設定した場合の結果は, 南極の水床コアから得られた温度変動データとそっくりな変動を示したことで, この仮説の妥当性が支持された. 淡水供給との関連は以下ようになる. 北大西洋に氷山や融水を起源とする淡水が供給されている間には, グリーンランドは寒冷なままであり, 南極はその間に徐々に温暖化し, 海面は上昇する. 淡水供給が止まると熱塩循環が強化され, グリーンランドが急に温暖化するとともに南極は寒冷化を開始し, 海面は低下を始める. 第3図を使った議論で, 正確には単純なずれではなく, グリーンランドと南極の温度変動のタイミングがずれているがピークが近いことを述べた. 上記の微分方程式において, グリーンランドの変動の符号を逆にして積分すると南極の温度パターンが得られるが, グリーンランドの温暖化が急激なことと合わせて考えれば, 温度が極大を取るタイミングが両極で一致していることも理解できる.

北大西洋の中緯度においては, 北大西洋の速い変化に対応する海洋生物群集の急激な変化が確認された (Barker *et al.* 2009). また, 海水準は南極の温度変動と同期した数千年スケールの変動を示した. これらは Thermal bipolar seesaw と極めて整合的であったため, この概念はさらに支持されることとなった. しかし, 細かい点では説明出来ない現象も残されている. その一つは, グリーンランド氷床コアに記録されている環境変化があまりにも急であるという事実である. これに関して, 温度が変化するより先に, 大気循環のパターンが数年以内に变化していたと解釈できるデータが得られている (Steffensen *et al.* 2008).



第7図 最終退氷期における各種の変動. 上から海水準, 南極の気温指標, CO<sub>2</sub>濃度, メタン濃度, グリーンランドの温度指標, 北大西洋の氷山流出を示す指標, 表面海水温, 熱塩循環強度の指標. 各データの詳細は, 川村 (2009) を参照のこと.

また, 南北のシーソーは極域に限らず, 中低緯度の降水量変動にも見られる. 第6図は中国とブラジルの洞窟で採取された石筍試料の過去9万年間の酸素同位体比 (降水量の指標) を示す (Wang *et al.* 2007). この図から, 数万年スケールと数千年の時間スケールにおいて, 中国とブラジルの湿潤度が逆相関を示すことが分かる. このうち, 数万年スケールの変動は夏期日射量, 数千年スケールの変動は北大西洋の淡水流入への気候応答として, ITCZ (InterTropical Convergence Zone) が南北移動した結果であると解釈され, 気候モデルによる再現実験も進行している. このように, 北半球の大陸氷床の変動は, 熱塩循環や大気循環の変動を通じて全球の降水システムにも大きな影響を



第8図 正確に年代付けされた南極氷床コアのデータと海面変動指標との比較。A) 年代決定に用いたドームふじコア (黒の丸印と実線) とポストークコア (グレーの丸印と実線) の  $O_2/N_2$  データおよびデジタルローパスフィルタによって平滑化した曲線、南緯77°の夏至日射量 (破線), B) A の平滑化曲線が極値をとる年代とその誤差 (これらを日射量曲線の極値に合わせることでコア年代を補正した), C) コア年代の誤差 ( $2\sigma$ ), D) ドームふじ (黒の実線) とポストーク (グレーの太線, 34~36万年のみ描画) の気温偏差, 北緯65°の夏至日射量 (濃いグレーの細線), 地軸傾斜角 (破線), E) ドームふじコアによる  $CO_2$  濃度 (白丸は融解法, ひし形は切削法), F) 化石珊瑚や海底コアによる海面変動の復元結果 (これらは独自の年代を使用している)。 (Kawamura *et al.* 2007)

与えていたのである。

### 3. 氷期-間氷期の移行における南北シーソー

南北シーソーは、最終氷期だけでなく氷期から間氷期への移行期 (ターミネーション I) にも見られる。第7図にターミネーション I における海水準と様々な気候指標を示す (川村 2009)。グレーで塗った期間には、長期に及ぶ氷山の大量流出の証拠があり、それに伴って熱塩循環が弱体化し、グリーンランドは寒冷な状態を保持し、南極は温暖化したことが見て取れる。また、海洋に貯蔵されていた  $CO_2$  が (おそらく南大洋を通して) 大気へ放出されたことも分かる。約15,000年前、氷山の流出が一時的に止まった際に熱塩循環が強化され、グリーンランドの気温は急激かつ大幅に上昇した。

このような南北シーソーを手がかりに、10万年周期

の氷期-間氷期サイクルの原因を追究する試みが進行している。10万年周期の氷期-間氷期サイクルは、公転軌道の離心率変動による直接的な気候強制力によって説明することが出来ないため、長年のあいだ謎とされている。仮説は多くあるが、有力なものを大きく分類すると、氷床変動を北半球の夏の日射に求めるものと (ミランコビッチ理論)、南極の温暖化に伴って放出される  $CO_2$  に求めるものがある。ドームふじ氷床コアに正確な年代を与えたうえで北半球の夏期日射量変動と比較した結果を第8図に示す (Kawamura *et al.* 2007)。この比較には年代決定精度が鍵となるが、我々が開発した酸素濃度を元にした手法では、30年以上さかのぼっても年代誤差が2000年以内に抑えられる。この結果から、南極の気候変動は全体的に北半球の夏の日射量変動とよく似たパターンを示すことが分かった。

特に過去4回のターミネーションに注目すると、いずれのターミネーションにおいても、北半球の夏期日射量の増大期に南極の温暖化が起こり、寒冷化も北半球の日射量に同期している。したがって、現時点での南極氷床コアのデータはミランコビッチ理論を支持している。我々がこの論文を出版してから、南極の数万年スケールの変動をあくまでも南極の日射に求めたり、南極氷床コアの気温指標そのものの信頼性に関して問題提起したりする論文が出版されたが (Huybers and Denton 2008; Laepple *et al.* 2011)、それらの著者はターミネーション時に南北気候間のリンクがあったことを見落としているようである。一方、ターミネーションにおける南極の温暖化と海面上昇の開始のタイミングが整合的であるという、我々の主張を支持する結果も出されており (Cheng *et al.* 2009)、今後もし引き続き論争が行われるトピックであろう。

今後、氷期-間氷期サイクルを用いた気候研究を大きく進めるためには、まず70万年間をカバーする第2期ドームふじ氷床コアを正確に年代付けし、過去7回のターミネーションのタイミングを統計的に検証する必要がある。また、現在と同様に軌道の離心率が小さかった40万年前の間氷期の持続期間を明らかにし、完新世や将来の気候とどのような類似性を持つのかを明らかにする必要がある。氷床コアによる氷期-間氷期サイクルのメカニズム研究は、北半球の大陸氷床の外部強制力に対する応答や、氷床、温室効果ガス、海洋循環、大気循環などによるグローバルな気候変動への影響を評価する上で欠かせないものであり、大気・海洋・氷床結合モデルによる数値シミュレーションと連携しながらさらに進めていく必要がある。

#### 参 考 文 献

- Barker, S. *et al.* 2009: Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. *Nature*, **457**, 1097-1102.
- Blunier, T. and E. J. Brook, 2001: Timing of millennial-scale climate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. *Science*, **291**, 109-112.
- Blunier, T. *et al.*, 1998: Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature*, **394**, 739-743.
- Bond, G., W. Broecker, S. Johnsen, J. McManus, L. Labeyrie, J. Jouzel and G. Bonani, 1993: Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, **365**, 143-147.
- Broecker, W. S., 1997: Thermohaline circulation, the Achilles heel of our climate system: Will man-made CO<sub>2</sub> upset the current balance? *Science*, **278**, 1582-1588.
- Cheng, H., R. L. Edwards, W. S. Broecker, G. H. Denton, X. Kong, Y. Wang, R. Zhang and X. Wang, 2009: Ice age terminations. *Science*, **326**, 248-252.
- Dansgaard, W. *et al.*, 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218-220.
- EPICA, 2006: One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, **444**, 195-198.
- Grootes, P. M., M. Stuiver, J. W. C. White, S. J. Johnsen and J. Jouzel, 1993: Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, **366**, 552-554.
- Huybers, P. and G. Denton, 2008: Antarctic temperature at orbital timescales controlled by local summer duration. *Nature Geosci.*, **1**, 787-792.
- Jansen, E. *et al.*, 2007: Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to IPCC AR4* [Solomon, S. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, 433-497.
- 川村賢二, 2009: 氷床コアから探る第四紀後期の地球システム変動. 第四紀研究, **48**, 109-129.
- Kawamura, K. *et al.*, 2007: Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, **448**, 912-916.
- Laepple, T., M. Werner and G. Lohmann, 2011: Synchronicity of Antarctic temperatures and local solar insolation on orbital timescales. *Nature*, **471**, 91-94.
- Manabe, S. and R. J. Stouffer, 1995: Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean. *Nature*, **378**, 165-167.
- NGRIP, 2004: High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, **431**, 147-151.
- Rahmstorf, S., 2002: Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature*, **419**, 207-214.
- Steffensen, J. P. *et al.*, 2008: High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years. *Science*, **321**, 680-684.
- Stocker, T. F. and S. J. Johnsen, 2003: A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography*, **18**, 1087, doi:10.1029/2003PA000920.
- Taylor, K., 2007: Ice cores | History of research, Greenland and Antarctica. In: *Encyclopedia of Quaternary*

- Science [Elias, S. A. (ed.)], Elsevier, Oxford, 1284–1288.
- Wang, Y. J., H. Cheng, R. L. Edwards, Z. S. An, J. Y. Wu, C.-C. Shen and J. A. Dorale, 2001: A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345–2348.
- Wang, X., A. S. Auler, R. L. Edwards, H. Cheng, E. Ito, Y. Wang, X. Kong and M. Solheid, 2007: Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90,000 years. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L23701, doi:10.1029/2007GL031149.
-