



SYMPOSIUM

全地球史解説

—地球多圏相互作用の解明に向けて—

縞縞におけるグローバルシグナルとローカルシグナル

—南極氷床コア解析を例に—

安成 哲三
やすなり てつぞう

..... 編集部

受理：1994年5月25日
筆者：筑波大学地球科学系

氷床コア、海洋底堆積物などの縞縞は、過去のどのような時空間スケールの環境・気候変動のシグナルであるのか。縞縞が作られる物理・化学過程のモデル化からこの問題に迫るひとつの新たな方法を、南極氷床コアを例に提示する。

1. はじめに

地球の古気候・古環境の復元および地球環境問題における南極ポストーク・コア（図1）のインパクトは非常に大きいものであった。約10万年周期の鋸型の変動と、気温（酸素同位体比）と炭酸ガス・メタンなどの温室効果ガスが同位相で変動しているという結果は、氷期論を大きく塗りかえ、最近の炭酸ガス増加にともなう「地球温暖化」問題へもさまざまな示唆と議論を呼び起こしている。

しかし、この氷床コアの解析結果も、いくつかの基本的な不確定性を抱えている。その中でも重要なのは、

- 1) 時間目盛り（年代）はどの程度正しいのか。
- 2) コアに見られる変動は、グローバルな気候・環境変動のシグナルか、それともローカルな変動のシグナルか。

という問題であろう。これらの結果如何では、これまでなされてきた古環境・古気候の議論を大きく変えるかも知れない。

ここでは、特にこの二つの問題に関連して、南極氷床コアの持つ意味を改めて考え、現在進めつつある日本の氷床ドーム計画へのひとつの指針としたい。

2. 年代決定における問題点

明りょうな年層（縞縞）を同定できない氷床コアにおける年代決定は難しい。ポストーク・コアで行われた年代決定は、推定した年間かん養量の変化の補正をした鉛直歪速度関数からおこなっている（Lorius *et al.*, 1985；成瀬, 1991）。年間かん養量の変化は大気中の水蒸気量の変化に比例するとして推定し、水蒸気量は気温（酸素同位体比）の変化による飽和水蒸気圧の変化で代表させ

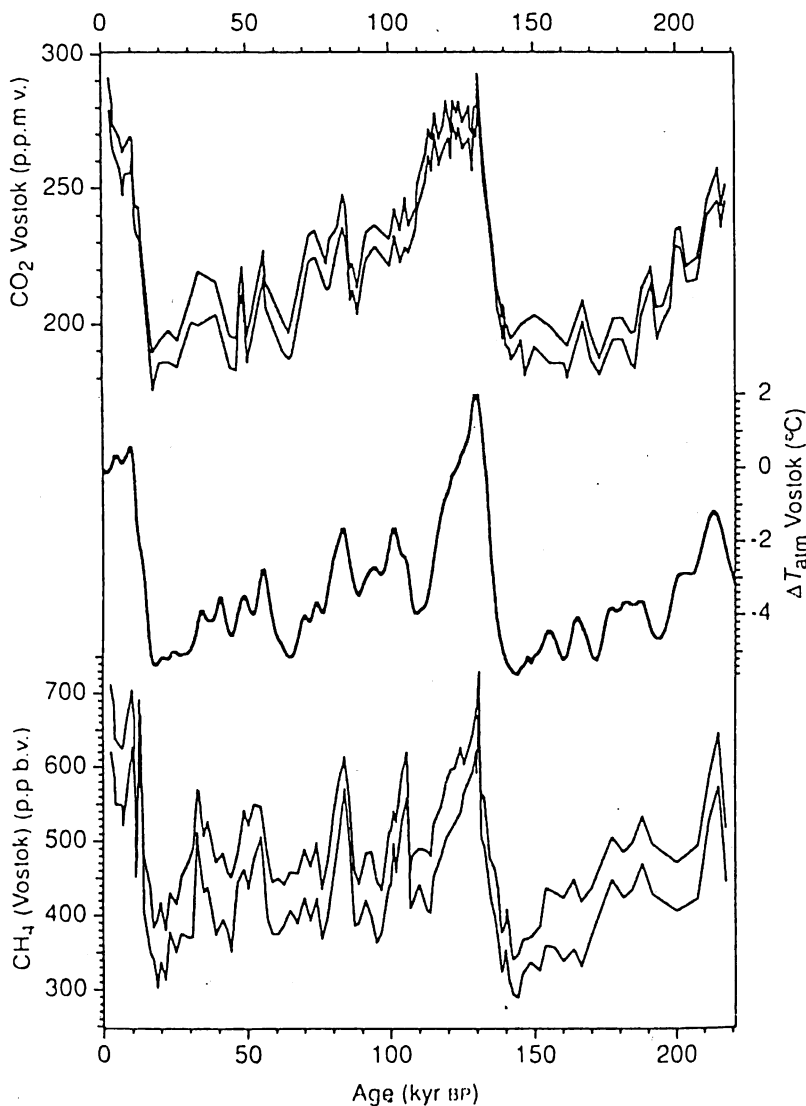


図1 ポストーク・コアから得られた炭酸ガス、気温、メタンの変動 (Jouzel et al., 1993).

て、式 (1) を用いている。

$$A(z) = A(0) \times \frac{\frac{\partial E_S(T_F)}{\partial T_F}}{\frac{\partial E_S(T_0)}{\partial T_0}} \quad (1)$$

ただし、 $T_F = T(\delta^{18}O)$

即ち、気温とかん養量のあいだに飽和水蒸気圧を媒介にした関係があるという前提でかん養量を推定したものである。堆積速度一定という仮定よりははるかにましなようであるが、(1) の式がどれほど気候学的な根拠を持っているか、というところ

ろが問題になるであろう。結局この方式では気温と降水量 (かん養量) は独立な変数ではなく、はじめから南極域の気候変動のあり方に、限定条件を置いていることになる。さらに、この式のもうひとつの仮定である酸素同位体比と気温の関係も、(季節的に) いつの、(大気中の) どの高度の気温との物理的関係かという不確定さも残る。成瀬 (1991) の議論にあるように、このような仮定のちがいによる年代決定の誤差は、深さ 2,000 m 程度になると、優に数万年のオーダーとなり、例えば CO_2 と気温のあいだの微妙なタイムラグを前提としたような氷期のメカニズムの議論は不可能となる。

3. 気温（酸素同位体比）変動のグローバル要素とローカル要素

ところで、図1に示されたような酸素同位体比の曲線は、グローバルな気温変動を示しているという前提で、さまざまな古環境・古気候の議論がなされている。海洋底コアやグリーンランド氷床からの同じ同位体比曲線が、第一次近似としては非常によく似たかたちをしていることは、この前提が決して間違いではないことを示しているといえる。しかし、よく対比してみると、微妙にあるいはかなり違う変動の様相も示している。データの解析精度のちがいで片付けることも可能であろうが、氷床コアは、海洋底コアにくらべ、その精度、時間分解能の高さを売りものとしているわけだから、精度を粗くして両半球の比較などをするならば、せっかくの氷床コア解析の意味がなくなろうというものである。ここでやはり、前節で議論した年代（時間目盛り）がひとつ問題となるが、年代決定が正しいとしても残る南北両半球のちがいは、当然両半球、あるいは南極と北極の気候変動の現れかたのちがいという、ローカルな要素の混入が問題となる。では、グローバルとローカルのシグナルの分離は、どのようにすれば可能であろうか。しかも、現実には時間目盛りもいいかげんな(?)状態で、こんなことは可能であろうか。

4. ミランコヴィッチ理論

この小論では、ここに挙げた二つの問題を、ある意味では一挙に解決するひとつのモデルを提出したい。それは、ミランコヴィッチ時計である。ただし、これは南極氷床にのみ適用可能な時計である。

ミランコヴィッチ説は、ここで詳しく説明する必要もないであろう。地球の公転軌道要素の永年変化（特に才差、自転軸の傾き、離心率の変化に対応した約2万年、4万年、10万年の周期が卓越している）が、地球への日射量の緯度と季節変化を引き起こし、ひいては氷期・間氷期スケールの

地球規模の気候変動を引き起こすという説である（ミランコヴィッチ（柏谷他訳）、1992）。ミランコヴィッチが最初に提出した時は、北半球高緯度の特に夏の日射量というローカルな日射量変動が氷期サイクルを引き起こすという、非常に線形論的な考えであり、いったんは廃れていったが、1970年代の海洋底コア解析により、上記の3つの周期がすべて認められるというところから、劇的に復活したのである。ただし、今度は、10万年周期という、日射量変動ではマイナーな周期が、気温変動に最も卓越し、変動のかたちも、図1で示されているような非対称なかたちをしていることから、気候システムにおけるミランコヴィッチ・サイクルの非線形応答というパラダイムが提出され、この枠内でさまざまな氷期論が提出されているのが現在の状況である（安成・柏谷、1993）。かつて地質学者のあいだで流行った、日射量のミランコヴィッチ曲線に気候変動のカーブをそのまま合わせようという線形的なミランコヴィッチ理論は、現在の非線形気候システム論では、色あせ、葬りさられた説であるといえる。

5. 夏の南極氷床上は、局所放射平衡に近い？

上記の古い意味でのミランコヴィッチ説は、氷床、海洋循環といった気候システムそのものの非線形性を考慮していないばかりか、大気循環における移流といった大気そのものの非線形性も無視していた。しかし、地表面状態が年中変化せず、大気も非常に静かなら、そこは局所放射平衡にかなり近い状態で、日射量変動と地表面温度（およびそれとほぼ平衡した地表面近くの気温）の変動のあいだには、線形的な相関が成り立つことになる。常に大気が循環し、風が吹いている地球上では、このようなところを見つけ出すことは、非常に難しいであろう。しかし、ひよっとすると、この条件に限りなく近い状態は、夏の南極氷床上の中心部に現れているのではなかろうか。即ち、この地域の夏には、プラネタリー波動の影響は、大陸周辺部に限られ、氷床上は夏でも基本的には極

渦が存在し、弱いながら沈降流が卓越し、風は弱く晴天を一日中太陽が照りつける。カタバ風変動に伴う顕著な変動もここでは極渦と沈降流の強弱としてのみ現れる (Yasunari and Kodama, 1993)。氷床ドーム計画の掘削地点ドーム F は、まさにそのようなところに位置している。

だとすると、そこでの酸素 (水素) 同位体比は、夏の気温を示し、しかも線形的なミランコヴィッチ理論が、そこでは局所的に (近似的に) 有効である可能性がある。実際、上田他 (1991) は、ドーム F 付近の夏の気温シグナルがそこでの積雪中の酸素同位体比の経年変化に強く影響しているという、上記の推論を示唆するような興味深い結果を示している。また、Jouzel *et al.* (1983) も、南極点において、同様の結果を示している。

6. 新しいミランコヴィッチ時計

もちろん、この地域の夏における大気トップでの日射量変動と地表面温度・気温 (あるいは酸素同位体比) 変動のあいだに明白な関係のあることが、まだ立証されているわけではない。地表気温には雲量や積雪表面の変化にともなうアルベド変化も、大きく関与している。しかし、氷床がすでに現在のようにあるという条件を置く限りにおいて、夏の局所的な日射量の永年変動が、南極氷床コアのみにローカルにある程度現れる可能性はあろう。特に、極域に大きな振幅で現れる地軸傾斜角による 4 万年周期変動の要素が、強く現れるであろう。むしろ、この日射量変動で同位体比の変動をスケーリングするというミランコヴィッチ時計による年代決定は、かん養量などに何の仮定も置かずにできる点で、すぐれていると思われる。この方法は、プラネタリー波動による熱の輸送が卓越するグリーンランドなどの北半球の氷床にははじめから適用できない。

結論的にいえば、南極氷床コアには、グローバルな氷期サイクルのシグナルと同時に、近似的な局所放射平衡によるローカルなミランコヴィッチ・シグナルが時計として隠されており、年代決定にも有効に使える可能性がある、ということである。

ドーム F での雪氷気象観測とコア解析による検証が待たれるところである。

7. 縞縞学の普遍化へ向けて

この小論では、南極氷床コアを例に、縞縞の持つ気候・環境変化のグローバルなシグナルと、ローカルなシグナルの分離の可能性を指摘した。この問題は、さらに長い時間スケールの縞縞 (海洋底コア、地層、さんごしょう等) でも、同様にあるはずである。古気候復元におけるこの問題については、すでに安成 (1987) において、若干の議論をしている。これまでの地質学のパラダイムでは、縞縞=グローバルシグナルと読み替えるのが普通であったようであるが、新生の縞縞学においては、(古) 気候システム論のもとづく、時間空間スケールの相関という、新たな切口が必要である。このような切口で、これまでの膨大な枚挙地質学のデータも、新たに見直す努力が必要であろう。

参考文献

- [1] 上田豊・神山孝吉・成田英器・佐藤和秀：南極氷床の異なった堆積環境における積雪の酸素同位体プロファイル。若濱五郎編「氷コア解析による氷河・氷床の動力学的特性と環境変動に関する総合的研究」, 73-80 (1991)。
- [2] Jouzel, J., Merlivat, L., Petit, J. R. and Lorius, C. : Climatic information over the last century deduced from a detailed isotope record in the south pole snow. *J. Geophys. Res.*, 88, C4, 2693-2703 (1983)。
- [3] Jouzel, J. *et al.* : Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, 364, 407-412 (1993)。
- [4] Lorius, C., Jouzel, J., Ritz, C., Mervilat, L., Barkov, N., Korotkevich, Y. S. and Kotlyakov, V. M. : A 150,000-year climatic record from Antarctic ice. *Nature*, 316, 591-596 (1985)。
- [5] 成瀬廉二：積雪量変化を考慮した氷床深層氷の年齢推定の試み。若濱五郎編「氷コア解析による氷河・氷床の動力学的特性と環境変動に関する総合的研究」, 241-246 (1991)。
- [6] 安成哲三：気候変動の時空間スケールに関する一考察。河村武編「気候変動の周期性と地域性」, 古今書院, 27-40 (1986)。
- [7] Yasunari, T. and Kodama, S. : Intraseasonal variability of katabatic wind over east Antarctica and planetary flow regime in the southern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 98, 13063-13070 (1993)。
- [8] 安成哲三・柏谷健二編：地球環境変動とミランコヴィッチ・サイクル。古今書院, 174 p. (1992)。