数百年～数千年スケールの急激な気候変動

—Dansgaard-Oeschger Cycle に対する地球システムの応答—

多 田 隆 治*

Millennial-scale Large and Abrupt Climatic Changes

—Global system dynamics in response to Dansgaard-Oeschger Cycles—

Ryuji TADA*

Abstract

Since the ice core records from central Greenland revealed the presence and significance of millennial-scale large and abrupt climatic changes, widely known as Dansgaard-Oeschger [D-O] Cycles, it becomes the major objective of paleoclimatological researches to clarify their extent, nature, propagation mechanism, and driving force. Although the ultimate driving force is not yet understood, results of recent studies suggest 1) D-O Cycles are global phenomena, 2) they involve complicated interactions and feedback processes among the subsystems including atmosphere, cryosphere, hydrosphere, and biosphere, and 3) they seem to have initiated from changes in atmospheric circulation.

Catastrophic surges of Laurentide Ice Sheet called Heinrich Events are closely associated with D-O Cycles. Although Heinrich Events are likely to have been caused by free oscillations of ice sheet growth and decay, they were probably not a cause of D-O Cycles but the events seem to have been phase-locked by D-O Cycles. Results of numerical modelling suggest the presence of multi-modes for global deepwater circulation. Switching among the modes is most likely caused by slight variation in hydrological cycles which change the fresh water balance between Atlantic and Pacific.

Key words : Abrupt climatic changes, Dansgaard-Oeschger Cycles

キーワード : 急激な気候変動, ダンスガード・オシュンガー・サイクル

I. 序 論

1970～1980年代は、古気候学においてミランコビッチ・サイクルが一世を風靡した時代だった。多くの古気候学者は、ミランコビッチ・サイクルに対する気候システム応答のメカニズムを解明すれば、過去数十万年間の気候変動に関する主要な問題は解決できるだろうと感じていた。数百年～

数千年スケールでの気候変動の存在を無視していた訳ではなかったが、ミランコビッチ・サイクルに応答した氷期-間氷期の変動に比べればずっと小さな規模の変動だろうとたかをくくっていた。

1980年代に入って、最終氷期から後氷期への転換期に起こった Younger Dryas と呼ばれる突然かつ急激な一時的寒冷化現象が一部の研究者達に注目され始めた。また、最終氷期のグリーンラン

* 東京大学大学院理学系研究科

* Deological Institute, Graduate School of Science, University of Tokyo

ドにおいて、突然かつ急激な気候変動が数百～数千年に一度の割合で繰り返し生じたことが、氷床コアの分析、特に氷の酸素同位体比の分析結果から明らかにされ始めた (Dansgaard *et al.*, 1984; Oeschger *et al.*, 1984)。グリーンランド氷床の酸素同位体比変動に特徴的に示されるこの突然かつ急激な気候変動の繰り返しは、その後 Dansgaard-Oeschger (D-O) Cycle と呼ばれる様になる。しかし、当時は氷床記録の信憑性や変動の広域性に疑問が残り、広く一般に認識されるには至らなかった。

この認識を一変させたのが、1990年代に入りグリーンランド氷床の頂上部で相次いで行なわれた氷床掘削計画 GRIP および GISP2 の成果である。これら2つのプロジェクトの成果は1992年から1993年にかけて相次いで公表され、最終氷期における突然かつ急激な気候変動の繰り返しが実在するものであり、少なくともグリーンランド全域にわたる広域的な変動であったことを広く認識させた (Johnsen *et al.*, 1992; Taylor *et al.*, 1993)。また、この変動の頻度は数百年～数千年に一度であるが、僅か数年～数十年で完了するほど急激な変化を伴うことの認識も広められた (GRIP Members, 1993)。

一方、Broecker によるコンベアベルト概念の提唱以来 (Broecker and Denton, 1989)、第四紀地球表層システムの変動を考える際に北大西洋深層水 (NADW=North Atlantic Deep Water) 形成量の変動が鍵となるとする考え方が定着し、北大西洋高緯度海域の古海洋研究に拍車をかけた。その後の一連の北大西洋遠洋堆積物の解析は、最終氷期極相期や Younger Dryas 期における NADW の挙動を明らかにすると共に、最終氷期に北大西洋高緯度海域の広い範囲にわたって氷山によって運ばれた粗粒碎屑物 (IRD=Ice-Rafted Debris) が繰り返し堆積した、いわゆる Heinrich Event (Heinrich, 1988) の存在を明らかにした。Heinrich Event は大陸氷床の大規模な崩壊により引き起こされ、後述する様に D-O Cycle と深いかわりを持つと考えられている。

この様に、D-O Cycle に関連した現象が北大西

洋やその周辺域から相次いで報告されるにつれて、D-O Cycle の痕跡をグリーンランドや北大西洋周辺域以外で見出し、その変動様式を明らかにすることを通じて、この現象が地球規模のものであることを示し、その変動メカニズムを解明しようとする動きが最近活発化している。

本総説においては、D-O Cycle に代表される数百年～数千年スケールの突然かつ急激な気候変動とそれに伴う地球表層システムの挙動について、現在、何がどこまで解ってきているかをレビューし、今後解決すべき問題点の抽出を試みる。

II. Dansgaard-Oeschger Cycle とは？

D-O Cycle とは、最終氷期に堆積したグリーンランド大陸氷床に記録された数百年～数千年スケールで繰り返す突然かつ急激な気候変動で、氷の酸素同位体比の変動として最も典型的に認識される (図1)。グリーンランドでは積雪速度が比較的速いため、過去5万年近くまで遡って氷床コア中に年層を識別することができる (Mayewski *et al.*, 1994)。その年層を用いた解析によると、この変動は僅か数十年以内に起こる急激な温暖化、徐々に寒冷化しつつ数百年～数千年間継続する温暖期、数百年以内に起こる急激な寒冷化、数百年～数千年間継続する寒冷期の繰り返しであり、その振幅は酸素同位体比にして5‰、単純に気温に換算すると7℃に及ぶ (図1)。酸素同位体比と連動して氷に含まれるダスト量や水素同位体比も急激に変動し (Taylor *et al.*, 1993)、特に温暖期のダスト量は寒冷期の数分の1以下に減少する。

D-O Cycle を特徴づける酸素同位体比の変動は、連続的、漸移的ではなく、むしろ幾つかのモードの間をジャンプしている様に見える。実際、GRIP 氷床コアにおける20ないし50年毎の酸素同位体比平均値の頻度分布は、最終氷期には-41.5および-38‰付近の2つのモード間を振動していたのに対し、後氷期には-35‰付近の単一のモードに留まっていたことを示している (GRIP Members, 1993)。こうした酸素同位体比の変化は、気温の変化だけでなく、積雪のもととなる水蒸気の供給源の変化を反映する可能性があ

図 1 グリーンランド GRIP 氷床コアにおける過去 20 万年間の水の酸素同位体比の変動。Dansgaard *et al.* (1993) に基づく。

Fig. 1 Continuous $\delta^{18}\text{O}$ record of the GRIP ice core during the last 200 ka. (based on Dansgaard *et al.*, 1993)

る (Kapsner *et al.*, 1995)。

積雪速度と気温の間に明確な正相関があることは以前から知られており、大気中に存在し得る水蒸気量が気温により決まるため、積雪速度も気温の影響を強く受け、気温が高い程速度が増大すると解釈されていた。この考えに基づけば、気温が 1°C 上昇するごとに積雪速度も 4~10 % 上昇する。図 2 は、過去 2 万年余りについて、GISP2 氷床コアにおける積雪速度と推定気温（酸素同位体比が主に気温によって変化したと仮定して求めた）との関係を示した図である (Kapsner *et al.*, 1995)。全データセットについて両者の関係を調べると、図中の直線に示される様な明確な正の相関が得られ、その勾配は理論的に予測される上限値に近い。ところが後氷期、Younger Dryas 期、最終氷期極相期など単一の気候状態ごとにまとめると、気

温 1°C あたりの積雪量の上昇は 1% 程度に過ぎず、同一の気候状態では積雪速度は気温にあまり敏感でないことを示す。このことから Kapsner *et al.* (1995) は、図 2 に示される関係が気温変化というよりはむしろ低気圧の移動経路の変化に伴う水蒸気の供給源の変化を反映していると解釈した。

こうした一連の証拠は、D-O Cycle が僅か数年~数十年という人間の一生と比較しても短い期間での急激な変動を伴っていたことを示すと共に、それが北半球極域における大気循環モードの急激なジャンプにより引き起こされた可能性を示唆している。

III. D-O Cycle と Heinrich Event

GRIP 氷床コアの解析により、最終氷期のグリーンランドにおける D-O Cycle の存在とその急激

図 2 グリーンランド GISPII 氷床コアにおける過去 18,000 年間の積雪速度（対数値）と気温（逆数）の間の関係。
全データについての回帰には明瞭な負の相関が見られるが、各気候モード毎に相関をとると、積雪速度は、気温にほとんど依存しない。Kapsner *et al.* (1995) による。

Fig. 2 Linear regression of the natural logarithm of accumulation b against inverse absolute temperature for each of the major climate events and for the entire data set of GISP II ice core during the last 18 ka. (after Kapsner *et al.*, 1995)

な変動が明らかにされるにつれ、この現象が地球表層システムのどのような変動を反映しているのか、という疑問が沸き起こってきた。そしてまず、北大西洋周辺地域の地質記録に目が向けられた。

GRIP 氷床コアの掘削と相前後して、ピストンコアの解析から、最終氷期の北大西洋高緯度海域遠洋堆積物中に 7 千年～1 万数千年毎に繰り返す IRD (Ice-Rafted Debris) 層の存在が明らかにされた (Heinrich, 1988)。こうした IRD 層は北大西洋高緯度海域の広範囲に追跡可能で、大陸氷床の崩壊によって大量の氷山が流出して同海域を覆ったことを示すと解釈された。その氷山流出事件は Heinrich Event と名付けられ、新しい方から順番に H1, H2, …と番号がふられた (Broecker *et al.*, 1992)。その後の IRD の礫種に関する詳しい研究により、それらが主としてハドソン海峡を通して供給され、ローレンタイド氷床の北部セクターの崩壊によるものであることが明らかにされた (Bond and Lotti, 1995; Gwiazda *et al.*, 1996)。

ただし H3 については、供給源が異なる可能性が指摘されている (Grousset *et al.*, 1993; Gwiazda *et al.*, 1996)。また、Heinrich Event の持続時間は 50 年から 1,250 年、恐らくは数百年程度と見積もられている (Francois and Bacon, 1994; Dowdeswell *et al.*, 1995)。

Bond *et al.* (1993) は、北大西洋高緯度海域より得られた堆積物コア試料について *N. pachyderma* の巻き方 (左巻/右巻比が水温の指標とされる) およびその酸素同位体比を高時間解像度で解析し、それらが D-O Cycle と頻度、タイミング共に良く似た変動をしていることを示した (図 3)。これら 2 つのパラメータは、表層水温の変動を反映していると考えられ、北大西洋の表層水温が D-O Cycle と連動していることを示している。彼らは更に、D-O Cycle が幾つか集まって温度変化の振幅が徐々に弱まる鋸歯状の変動パターン (Bond Cycle) を形成し、各 Bond Cycle が Heinrich Event によって終了していると主張

図 3 北大西洋 VEMA 22-81 コアにおける *Neogloboquadrina pachyderma* の左巻の割合と GRIP 氷床コアの酸素同位体比の変動の対比。

図にはまた、Heinrich Event の位置も示されている。(Bond *et al.*, 1993 に基づく)

Fig. 3 The correlation of the *Neogloboquadrina pachyderma* sinistral coiling ratio at VEMA 23-81 with $\delta^{18}\text{O}$ record from GRIP ice core.

The horizons of Heinrich events are also shown. (after Bond *et al.*, 1993)

した。即ち、Heinrich Event は寒冷化が極まった時に起こり、その直後には D-O Cycle のうちで最も昇温が著しく、持続期間も長い温暖期が来ている。これは、Heinrich Event が D-O Cycle と密接に関係していることを意味する。

では、Heinrich Event を引き起こしたローレンタイド氷床北部セクターの崩壊は、そもそもの様な原因で起こったのだろうか？ MacAyeal (1993 a, b) は、ローレンタイド氷床北部セクターの崩壊の繰り返しを氷床の自由振動で説明する binge/purge モデルを提唱している。このモデルとは、「氷床は降雪によって高さ方向に成長し、次第にその厚さを増していく。その時の気温が十分低ければ、氷床基底温度は氷の融点以下となり、氷床基底に存在するティルが氷結してしまうために氷床は流れにくい。しかし、氷床の基底にはその下の地面から常に地熱が供給されている。そのため、氷床表面から下に向かって温度勾配が生じ、氷床が厚くなるにつれて氷床基底面の温度が次第に上昇する。そして、氷床の厚さがある限界を超えると氷床基底面温度が氷の融点を越えてティル

が軟化し、基盤岩との摩擦が低下して氷床が一気に滑って崩壊する。崩壊後の氷床はその厚さが薄くなるため氷床基底面温度は氷の融点より低くなり、氷床の流動は止まって降雪により再び氷床の厚さは次第に増し始める」と言うものである。MacAyeal (1993 a, b) によれば、このモデルに基づく氷床崩壊の周期は、地殻熱流量、氷の熱伝導度と熱拡散度、海拔 0m 気温などで決まり、ローレンタイド氷床北部セクターについて計算すると 7,000 年前後になると言う。この値は、Heinrich Event の周期と概ね一致している。

その後、北大西洋堆積物中の礫種のより高時間解像度な解析から、氷床の崩壊がローレンタイド氷床北部セクターに限ったものでなく、アイスランドやローレンタイド氷床東部セクター、スカンジナビア氷床からの氷山の流出も伴っていたこと、それらは Heinrich Event に伴っていただけではなく、より高周期の D-O Cycle に同調していたことが明らかにされた (図 4: Bond and Lotti, 1995; Fronval *et al.*, 1995)。

Bond and Lotti (1995) は更に、D-O Cycle

図 4 VEMA 23-81 における D-O Cycle に同調した IRD 起源と考えられる岩片粒子の堆積。
図はまた、*N. pachyderma* の左巻比に示される表層水温の低下が、明らかに IRD の堆積に先立っていることを示している。(Bond and Lotti, 1995 による)

Fig. 4 Comparizon of $\delta^{18}\text{O}$ record of GRIP with lithic concentrations and *N. pachyderma* left coiling ratio, a proxy for surface water temperatures, in VEMA 23-81. (after Bond and Lotti, 1995)

に対応した表層水温の低下は明らかに IRD の堆積に先行していること、Heinrich Event の原因となったローレンタイド氷床北部セクターの崩壊（碎屑性炭酸塩岩片）がアイスランドやローレンタイド氷床東部セクターの崩壊（玄武岩質ガラスやセントローレンス起源の赤鉄鉱にコーティングされた粒子）にやや遅れて起こっていることを指摘した。これらの事実は、D-O Cycle に代表される北半球高緯度域での気候変動が、Heinrich Event やその他の氷床崩壊イベントの引金になった可能性を示す。もし、Heinrich Event を引き起こしたローレンタイド氷床北部セクターの崩壊が MacAyeal (1993 a, b) の言うように氷床の自由振動によったなら、D-O Cycle はなんらかの過

程を通して Heinrich Event の位相をロックし、逆に Heinrich Event は D-O Cycle の振幅を変調していたことになる。

互いに離れた地域の氷床崩壊イベントの位相をロックする機構としては、氷床崩壊に伴う海水準の上昇が有効であろう。D-O Cycle に同調して消長を繰り返す小規模氷床の崩壊が海水準を数 m 程度押し上げることにより、基本的には自由振動しているローレンタイド氷床北部セクターが崩壊間際の状態にある場合には、崩壊を誘発して Heinrich Event の位相をロックしたと考えることはできないだろうか？ また、もし、ローレンタイド氷床が Heinrich Event を引き起こした氷床崩壊により、その厚さを半分減少させたとし

たら (MacAyeal, 1993 a, b), それは, 北半球における大気大循環にも影響を及ぼしただろう。それが, D-O Cycle の振幅変調の原因なのではないだろうか?

IV. D-O Cycle に同調する NADW の挙動

既に述べた様に, 北大西洋高緯度域は NADW が形成される海域にあたり, 地球表層システムにとっての key point である。その海域に繰り返し大量の氷山が流出したとなれば, 当然 NADW の形成にも影響が出ることが予想される。Keigwin and Jones (1994) および Oppo and Lehman (1995) は, 北大西洋中緯度域の複数のピストンコアについてその炭酸塩含有量および底生有孔虫の炭素同位体比を調べ, それらが *N. pachyderma* の巻き方の変化に示される表層水温変動に同調して変動することを示した。彼女等の結果は, 表層水温の上昇に伴って炭酸塩含有量および炭素同位体比の増加が起きていること, 即ち, これらの地点で NADW が強まったことを示唆している (ただし彼女等の図を詳しく見ると, 温度変化がやや先行している)。北大西洋表層水の温度が D-O Cycle に伴って変化したことを考え合わせて, この結果は D-O Cycle に連動して極前線が北へシフトし, 北大西洋高緯度域への熱輸送が強まって NADW が強化されたことを意味するものと考えられた (例えば, Broecker *et al.*, 1990)。ただし, その後古海洋データが集積されるにつれ, NADW が強化されたというよりは形成される海域が高緯度側にシフトすると共に, より深層まで沈み込む深層水が形成されたことを意味すると考えられる様になっている (例えば, Lehman and Keigwin, 1992; Rahmstorf, 1994)。いずれにせよ, D-O Cycle は大コンベアベルトの挙動と同調していた可能性が強い。

では, NADW の挙動変化が D-O Cycle を引き起こしたのだろうか? それとも, NADW の挙動変化は D-O Cycle の結果として生じたのだろうか? Broecker らは前者の立場に立ち, 大西洋-太平洋間での塩分収支の自由振動が大コンベアベルトの動作の on, off を通じて D-O Cycle を引

き起こしたとする塩分振動子モデルを提唱している (Broecker *et al.*, 1990; Birchfield and Broecker, 1990)。現在の大西洋は, 大気を通して $0.35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$ の淡水を失っている。これにより塩分が大西洋に次第に蓄積されることになるが, それは, NADW により塩分の高い深層水が大西洋から太平洋やインド洋に流出することによりバランスされている。今仮に北大西洋に氷床からの融水が流出して表層水の塩分が低下し, NADW の形成が停止したとする (スイッチ off)。すると北大西洋表層水に塩分が次第に蓄積される。また, NADW 形成の停止により, 北大西洋高緯度域への暖かい表層水の流入も抑制されることになり, 氷床の融解も抑制される。そして, 塩分の増加と気温の低下によりやがて北大西洋表層水の比重が十分に重くなって, ついには NADW の形成が再開される (スイッチ on)。NADW の形成再開により, 大西洋に蓄積されていた塩分は太平洋やインド洋へと流出し, 大西洋表層水の塩分は次第に減少する。NADW の形成はまた, 暖かい表層水の高緯度への流入を促進し, 氷床の融解を引き起こす。大気を通じての淡水の喪失による塩分の蓄積と NADW による塩分の流出が釣り合った所でうまくバランスすれば現在の様な安定した循環が確立するが, 氷床の融解による北大西洋表層水への淡水の供給は, 釣り合い点を越えて更に北大西洋表層水の塩分を低下させ, その結果 NADW の形成は停止する。これが, Broecker らの塩分振動子モデルの概要である。上の説明からも明らかな様に, このモデルでは北大西洋へ融水を送り出す氷床の存在が不可欠となる。その後, Weaver and Hughes (1994) は海洋大循環モデルを用いて, 海洋大循環には3つの異なるモードがあり, 各海洋表層への淡水の供給にある程度以上の揺らぎを与えてやると, 海洋大循環が異なるモード間で数百年から数千年スケールの自由振動を示すことを示した (図5)。即ち, 海洋循環モードの自由振動には, 必ずしも氷床は存在しなくても良いと言うのである。

しかし, この様な海洋大循環モデルによるシミュレーションの結果は, 必ずしも海洋循環の自由振

図 5 数値実験により得られた、大西洋の3つの循環モード（図左）と各海洋への淡水の供給量に大きな揺らぎ（標準偏差で 48 mm/month）を与えた場合に生ずる熱輸送量の自由振動（図右）。左の図における線は等流量線を表わし、単位は Sverdrup (10^6 m/sec) である。実線は時計周り、点線は反時計周りを表わす。（Weaver and Hughes, 1994 に基づく）

Fig. 5 The Atlantic meridional overturning streamfunction in Sv for the three equilibria (left) and free oscillation behaviour of global ocean poleward heat transport in case of strong (standard deviation=48 mm/month) stochastic hydrological forcing. (after Weaver and Hughes, 1994)

動による NADW の挙動変化が D-O Cycle を引き起こしたことを証明するものではない。Stocker and Wright (1991) や Rahmstorf (1995) は、大西洋-太平洋間でのごく少量の淡水の分配（ ~ 0.6 Sv）の変化によって海洋大循環モードのジャンプが起こることを示した。これは、例えばグローバルな大気循環の変化に伴う水循環の変化が、海洋大循環モードのジャンプを引き起こす可能性を示している。海洋大循環モードの変化が D-O Cycle の原因であるか結果であるかが明らかになるまでには、まだしばらく時間がかかりそう

である。

V. D-O Cycle に同調した変動の広がり

D-O Cycle に同調した地球表層システム変動が北大西洋高緯度域に広く認められ、NADW の生産量あるいは循環モードの変化を伴うことが明らかにされるにつれ、こうした変動がどのくらい広域にわたるもので、どのような過程により伝播したのか、といった点に研究の焦点が移ってきた。しかし、報告された事例の中には、D-O Cycle との対応関係が十分に明確とは言えなかったり、変動

図 6 サンタバーバラ海盆 (ODP Site 893) に見られた、D-O Cycle に同調した生物擾乱の程度 (底層水の溶存酸素量の指標) の変動. (Behl and Kennett, 1996 による)

Fig. 6 Comparison of Site 893 bioturbation index and benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ records with $\delta^{18}\text{O}$ time series from GISP II. (after Behl and Kennett, 1996)

の同時性の検証が不十分であるものも少なくない。そうした中、Phillips *et al.* (1994) は、カリフォルニア州南東部のシャールズ湖において、33.6~26.1 ka の間に 6 回の湖の拡大縮小サイクルを見出した。この 6 回の湖水位低下期 (乾燥期) は、GRIP 氷床コアにおいて認められた 3~8 番の温暖期に対応している。同じ様な乾湿サイクルは、フロリダ半島のテュレーン湖から得られた花粉記録にも認められる (Grimm, *et al.*, 1993; Watt and Hansen, 1994)。ただし、この乾湿サイクルは D-O Cycle というよりも Heinrich Event に対応しており、その時期にフロリダ半島は湿潤化した。Watt and Hansen (1994) は、Heinrich Event に伴う寒冷化によって、ローレンタイド氷

床の融解によりミシシッピー川からメキシコ湾に流出する淡水量が減少した結果、メキシコ湾が温暖状態に保たれたことが原因であると解釈した。

カリフォルニア沖においても、D-O Cycle に同調した変動が最近報告された (Kennett and Ingram, 1995; Behl and Kennett, 1996)。Behl and Kennett (1996) は、サンタバーバラ海盆から回収された堆積速度の速いコアについて平行葉理保存度の解析を行ない、底層水の溶存酸素量が D-O Cycle に伴って大きく変動したことを示した (図 6)。そこでは、底層水中の溶存酸素量低下の時期が D-O Cycle の温暖期に対応している。彼らはこの原因を中層水の起源の変化に求め、温暖期には低緯度域から、寒冷期には高緯度域から中

図 7 日本海堆積物 ODP Site 797 および KT 94-15-PC5 に見られる明暗縞と D-O Cycle の対応関係。(Tada *et al.*, submitted に基づく)

Fig. 7 Comparison between gray scale of the Japan Sea sediments from ODP Site 797 and KT 94-15-PC5 with $\delta^{18}\text{O}$ record of GRIP ice core. (after Tada *et al.*, submitted)

層水が来たと考えた。実際、氷期に北太平洋高緯度海域で中層水が形成された可能性が、最近指摘されている (Keigwin *et al.*, 1992)。しかし、底層水溶存酸素量の変化が、沿岸湧昇強度の変化とそれに伴う溶存酸素極小帯の上限水深の変化により生じた可能性も捨て切れないだろう。この点については、1996 年夏に行なわれた ODP167 次カリフォルニア沖掘削で採取されたコア試料を用いて筆者らが行なっている国際共同研究によって、いずれ明らかにされるだろう。

D-O Cycle に同調した変動は、日本海からも見つかっている。Tada *et al.* (1995, submitted), 多田 (1997 a, b) は、日本海堆積物に見られる明暗の縞が D-O Cycle に対応しており、暗色縞が D-O Cycle の温暖期に対比されることを示した (図 7)。そして、こうした暗色縞をなす層の堆積

が、東シナ海沿岸水の流入に伴って起こった生物生産の増加と密度成層構造の強化の結果堆積し、東シナ海沿岸水の流入はアジア大陸内陸部の湿潤化に伴う黄河や揚子江の流出量の増加により起こったと推論した。このことは、D-O Cycle の温暖期にアジア大陸内陸部が湿潤化したことを意味している。同様な推論は、Porter and An (1995) による中国内陸部の黄土層序における石英の粒度の変化の研究からも支持される。

von Rad *et al.* (1995) は、インド洋パキスタン沖の大陸棚斜面から得られたコアの平行葉理保存度、有機炭素量、炭酸塩炭素量などを調べ、それらが D-O Cycle に同調して変動しているらしいことを報告している。彼らの研究によれば、D-O Cycle の温暖期には有機物含有量が高く平行葉理が良く保存される傾向があり、それは沿岸湧昇

の活発化に伴う生物生産の増加に起因すると解釈される。もし、この対応関係が正しければ、D-O Cycleの温暖期にアジアモンスーンが強化されたことになり、日本海の結果とも調和的である。

では、D-O Cycleに同調した変動は、南半球にまで達しているのだろうか？ Bender *et al.* (1994) は、グリーンランドのGISP2と南極のVostok氷床コアの記録を、氷床にトラップされた大気酸素同位体比の変動パターンを使って対比し、GISP2の水素同位体比とVostokの水素同位体比の変動パターンを比較した。氷の酸素同位体比、水素同位体比は共に気温を反映することが知られている。比較の結果、GISP2に認められる比較的長い(>2,000 yrs) 9つの温暖期のうち、8つがVostokにおいても認められ、その振幅は温度に換算して2℃に及ぶことが示された。また、彼らはVostokにおける水素同位体比の変動、特に寒冷期から温暖期への変動は、グリーンランドで見られるほど急激ではないことを指摘し、北半球における変動がフィルターをかけられつつ南半球に伝達されたことを暗示すると考えた。しかし、対比における年代誤差を考慮すると、両者の位相の一致あるいはずれの議論はできないとも記述している。一方、Lowell *et al.* (1995) は、南半球における山岳氷河の前進後退の記録をチリおよびニュージーランドについてレビューし、これら山岳氷河の前進がHeinrich Eventと良く一致することを示した。これらの事実は、D-O Cycleのうち少なくとも振幅が大きく持続期間が長いものは南半球にまでその信号が到達しており、位相の大きなずれも存在しないことを示している。

この様に、D-O Cycleに同調した表層システムの変動は北半球の広い範囲にわたって見出されつつあり、南半球にも少なくともその一部が見出されている。従って、D-O Cycleを引き起こした地球表層システムの変動が少なくとも半球的な現象であることは疑いなく、全球的現象である可能性も高い。

VI. D-O Cycleに連動した大気組成の変化

グリーンランドの氷床コアの記録はまた、大気

図8 GRIP氷床コアの気泡のメタン濃度変化と氷床の酸素同位体比の比較。(Chappellaz *et al.*, 1993による)

Fig. 8 Variation in CH₄ concentration of the trapped air in GRIP ice core in comparison with $\delta^{18}\text{O}$ record. (after Chappellaz *et al.*, 1993)

組成がD-O Cycleに同調して変化したことを示している。Chappellaz *et al.* (1993) はGRIP氷床コアの気泡中のメタン濃度を調べ、D-O Cycleに連動して大きく変動したことを見出した(図8)。メタン濃度は温暖期には上昇し、寒冷期には低下している。彼らは、メタン濃度変動の原因を低緯度域の湿地面積の変化に求めた。そして、メタン濃度の変化と氷床の酸素同位体比の変動との位相のずれはないか、あるいは前者が100~200年程度先行している可能性があるかと報告した。もし、これが事実であれば、D-O Cycleの発信源は低緯度地域にある可能性が高くなる。

一方、Stauffer *et al.* (1984) は、氷床コア中

の気泡の分析から D-O Cycle に連動した二酸化炭素濃度の変化を報告している。この変動は、振幅が 20~30 ppm に及ぶもので、温暖期に二酸化炭素濃度が高くなる傾向がある。しかし、これが真の変動であるかについては、懐疑的な意見もある。即ち、グリーンランド氷床中には石灰質なダスト粒子が多く含まれるため、気泡にトラップされた大気がそれと反応してその二酸化炭素濃度が低下したと言うのである。

メタンや二酸化炭素は温室効果ガスとして知られる。しかし、ここで明らかにされた程度のメタン濃度の変動では、数分の 1℃ 程度の気温上昇を引き起こせるに過ぎない。

VII. 間氷期に D-O Cycle は存在したか？

GRIP 氷床コアの記録はまた、間氷期における気候の安定性に関する議論を引き起こした。GRIP の年代尺度で今から 11 万 5 千年~14 万年前の区間は最終間氷期極相期 (Eemian) に対応すると考えられているが、その時期の酸素同位体比は、極めて安定だった後氷期とは対照的に、7% を超す振幅で数百年~数千年毎に繰り返す突然かつ急激な変動で特徴づけられている (図 1)。そして、その期間の酸素同位体比の頻度分布は、後氷期と同じ -35% のモードを挟んで、-37 および -32% 付近のより寒いモードとより暑いモードの間を繰り返していたことを示している (GRIP Members, 1993)。これが事実ならば、間氷期の気候が常に安定していたとは限らないことになる。そこで、果たして氷床の酸素同位体比に示される後氷期の安定な気候が特殊なのか、近い将来に急激な気候変動が起こらないか、と言った現在の気候システムの安定性に対する議論を呼び起こすこととなった。

GRIP 氷床コアの記録の信憑性については、その 28 km 西方の地点で掘削された GISP2 氷床コアの記録との比較により検証することができる。比較の結果、両者の記録は GRIP 年代で 10 万 5 千年前までは良く一致したが、それ以前での食い違いが明らかとなり、GRIP における Eemian の記録の信憑性について疑問が投げかけられた

(Taylor *et al.*, 1993; Groote *et al.*, 1993)。10 万 5 千年以前の部分の記録は氷床の基底近くから得られているため、記録の食い違いは氷床の流動に伴う基盤付近での褶曲や断層運動に起因すると考えられている。その後の氷床コアの詳細な観察から、GISP2 の方が基盤付近での記録の乱れが著しいこと、GRIP の方は約 12 万 5 千年前まではほとんど乱れが認められないが、それ以前の部分では乱れが認められることなどが次第に明らかにされつつある (Thorsteinsson *et al.*, 1995)。従って、GRIP における Eemian の記録のうち少なくとも MIS5e3 とされる層準までは記録は乱されていないが、最も変動が著しい MIS5e5 については、それが真の変動を示すかどうか疑問である。

この問題を明らかにするため、北大西洋高緯度域を中心に古気候記録の検討が行なわれた。Cortijo *et al.* (1994) はノルウェー海の堆積記録を調べ、Eemian 前半には後氷期よりも暖かい気候が広がっていたことを見出したが、突然かつ急激な変動は見出せなかった。McManus *et al.* (1994) も北大西洋高緯度海域の堆積記録の検討を基に、同様の結論を出している。一方、Field *et al.*, (1994) および Thouveny *et al.* (1994) は、各々ドイツおよびフランスの湖の堆積記録を調べ、主に花粉組成を基に、Eemian の気候が不安定であったことを示した。しかし、彼らの記録においても Eemian 前半の気候は暖かくて安定しており、後半において少なくとも 2 回の寒冷な期間があったことを示しているのみである。これらの結果は、GRIP の記録が 12 万 5 千年前迄は正しいことを支持しているが、12 万 5 千年~14 万年にかけて GRIP 氷床コアに認められる最も急激かつ頻繁な変動については、むしろその存在を支持しない。

では、北半球から大陸氷床がほとんど消えた間氷期極相期には、D-O Cycle に象徴される突然かつ急激な気候変動は発生しないと考えて良いのだろうか？確かに、GRIP 氷床コアの酸素同位体比は、後氷期には極めて安定している。しかし、後氷期においても数百年から数千年スケールの乾燥-湿潤サイクルで特徴づけられる気候変動が中・低

緯度熱帯域に存在したことが、次第に明らかになりつつある（例えば、Lamb *et al.*, 1995）。もし、この変動の原因が D-O Cycle を引き起こしたものと同一であるとすれば、D-O Cycle の引金となった大気循環変動は氷期-間氷期にかかわらず中・低緯度域に存在し、北半球における大規模氷床の存在がその信号を高緯度域に伝達するための必要条件になっていたことを意味することになる。

VIII. D-O Cycle に伴う地球表層システムの変動

以上に述べて来た様に、D-O Cycle に同調した変動はグローバルな広がりを持ち、大気組成、大気循環の変動をはじめ、氷床の崩壊、海洋大循環様式の変動、更には海水準の変動などと同調していたらしい。では D-O Cycle とは、地球表層システムのどの部分のどの様な変動がきっかけとなり、それがどの様に伝播していったものなのだろうか？ この間に対する明確な答は、未だ得られていない。しかし、上にあげた幾つかの証拠は、大気循環様式の変動が一連の変動のきっかけになっている可能性を暗示している。

即ち、北大西洋表層水温の低下は Heinrich Event を引き起こした氷床崩壊に先立っており、氷床の崩壊による氷山の流出は表層水温や塩分の低下の原因と言うよりは結果である。また、D-O Cycle は水蒸気の供給源やダスト量変動、メタン濃度変動を伴っており、大気循環様式の変動やそれに伴う乾燥-湿潤パターンの変動との直接関係を暗示している。そこで、例えば大気循環様式の変化が乾燥-湿潤地域の分布パターンを変化させ、それがグリーンランドへの水蒸気やダストの供給様式を変化させると共に、大西洋-太平洋間での淡水の分配量の変化を引き起こしたとしたらどうだろうか。淡水分配量の変化は、北半球氷床が存在することにより増幅され、氷期においてその変動の振幅が増す (Ditlevsen *et al.*, 1996)。そのため、氷期には変動の振幅が数居値を超え、Rahmstorf (1995) のモデル計算に示される様に大西洋-太平洋間での淡水の分配量の変化を通じて海洋大循環モードをジャンプさせたのではない

だろうか。海洋大循環モードの変化は、北大西洋高緯度域への熱輸送効率の変化を通じて北半球高緯度域の気候にフィードバックされる。高緯度域の気候変化は、気温変化や降雪量の変化などを通じて小型氷床の消長や氷山流出量を変化させ、海水準変動を通じてローレントイド氷床の成長・崩壊の自由振動の位相をロックする。一方、ローレントイド氷床崩壊に伴う地形変化は大気循環変化にフィードバックされ、D-O Cycle の振幅変動 (Bond Cycle) を引き起こす。また、氷床の崩壊は、流出した氷山の融解を通して海洋循環様式の変動にもフィードバックされたのだろう。このシナリオを検証するためには、今後、中・低緯度域の最終氷期から後氷期にわたる記録を詳しく調べる必要がある。

もし、上に述べたように大気循環の変動が D-O Cycle のきっかけだとすれば、その変動を引き起こした究極原因は何なのだろうか？ その可能性の一つとして、太陽活動の変動があげられる。太陽活動が気候変動を引き起こす可能性については、数多くの議論がなされ続けている（例えば、Haigh, 1996）。その多くは、十分に説得力があるとは言えないが、その中で Labitzke and Loon (1993) は、準二年変動 [QBO] の影響を取り除いた後の世界各地の平均気温と太陽活動の間に明確な相関を見出している。また、今世紀に入ってから地球温暖化の一部は太陽活動の活発化によるとの議論もなされている (Reid, 1987)。即ち、太陽活動の変動が気候に及ぼす影響は、従来考えられていた以上に大きい可能性がある。更に、太陽活動にはおよそ 2,300 年の顕著な周期があると言われているが (Damon and Sonett, 1991)、これは、グリーンランド氷床の酸素同位体比を周期解析して得られた卓越周期 2,550 年 (Dansgaard *et al.*, 1984) と近い値である。これらのことは、D-O Cycle の究極原因の候補の一つとして、太陽活動の変動を検討する必要性を示している。

IX. ま と め

D-O Cycle に象徴される突然かつ急激な気候変

動は、数百年から数千年に一度の割合で起こる現象であるが、その変動は数年～数十年で完了するほど著しく速い。D-O Cycle がグローバルな現象であり、地球表層システムを構成する様々なサブシステム間の相互作用を伴っていることが次第に明らかになってきた。また、この変動は単に気温の変動のみでなく、乾燥-湿潤度の変動、海水準の変動などを伴っていたと考えられ、変動の現われ方は地域により大きく異なっていた可能性が高い。D-O Cycle が間氷期に北半球高緯度域で起こっていた可能性は少なくなったが、その原動力となった気候変動が低緯度域で継続していた可能性は残る。

人類が、地球表層システムに対して人為的ストレスを継続的にかけ続けている現在、地球表層システムの挙動モードが、突然別のモードにジャンプする可能性が囁かれている。そのメカニズムを明らかにし、対策を講じる上でも、D-O Cycle のメカニズムと、それにより生じる変動様式の詳細を知ることが、極めて重要な課題と言えるだろう。

謝 辞

地質調査所の川幡穂高博士には、この総説を書く機会を与えて頂き、また、同調査所の池原 研博士には、貴重なコメントを頂いた。ここに感謝いたします。

文 献

- Behl, R.J. and Kennett, J.P. (1996): Brief interstadial events in the Santa Barbara basin, NE Pacific, during the past 60 kyr. *Nature*, **379**, 243-246.
- Bender, M., Sowers, T., Dickson, M., Orchard, J., Grootes, P., Mayewski, P.A. and Meese, D.A. (1994): Climate correlations between Greenland and Antarctica during the past 100,000 years. *Nature*, **372**, 663-666.
- Birchfield, G.E. and Broecker, W.S. (1990): A salt oscillator in the glacial Atlantic? 2. A "scale analysis" model. *Paleoceanography*, **5**, 835-843.
- Bond, G. and Lotti, R. (1995): Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, **267**, 1005-1010.
- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J. and Bonani, G. (1993): Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, **365**, 143-147.
- Broecker, W.S. and Denton, G.H. (1989): The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 2465-2501.
- Broecker, W.S., Bond, G., Klas, M., Bonani, G. and Wolfli, W. (1990): A salt oscillator in the glacial Atlantic? 1. The concept. *Paleoceanography*, **5**, 469-477.
- Broecker, W.S., Bond, G., MacManus, J., Klas, M. and Clark, E. (1992): Origin of the Northern Atlantic's Heinrich events. *Climatic Dynamics*, **6**, 265-273.
- Chappellaz, J., Blunier, T., Raynaud, D., Barnola, J.M., Schwander, J. and Stauffer, B. (1993): Synchronous changes in atmospheric CH₄ and Greenland climate between 40 and 8 kyr BP. *Nature*, **366**, 443-445.
- Cortijo, E., Duplessy, J.C., Labeyrie, L., Leclaire, H., Duprat, J. and van Weering, T.C.E. (1994): Eemian cooling in the Norwegian Sea and North Atlantic ocean preceding continental ice-sheet growth. *Nature*, **372**, 446-449.
- Damon, P.E. and Sonett, C.P. (1991): Solar and terrestrial components of the atmospheric ¹⁴C variation spectrum. In Sonett, C.P., Giampapa, M.S. and Matthews, M.S. eds: *The sun in time*. The University of Arizona Press, Tucson, 360-388.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Hammer, C.U. and Oeschger, H. (1984): North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. In Hansen, J.E. and Takahashi, T. eds: *Climate processes and climate sensitivity*. Amer. Geophys. Union, Washington, D.C., 288-298.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jouzel, J. and Bond, G. (1993): Evidence for general instability of past climate from 250-kyr ice core record. *Nature*, **364**, 218-220.
- Ditlevsen, P.D., Svensmark, H. and Johnsen, S. (1996): Contrasting atmospheric and climate dynamics of the last-glacial and Holocene periods. *Nature*, **379**, 810-812.
- Dowdeswell, J.A., Maslin, M.A., Andrews, J.T. and McCave, I.N. (1995): Iceberg production, debris rafting, and the extent and thickness of Heinrich layers (H-1, H-2) in North Atlantic sediments. *Geology*, **23**, 301-304.
- Field, M.H., Huntley, B. and Muller, H. (1994):

- Eemian climate fluctuations observed in a European pollen record. *Nature*, **371**, 779-783.
- Francois, R. and Bacon, M.P. (1994): Heinrich events in the North Atlantic: Radiochemical evidence. *Deep-Sea Res.*, **41**, 315-334.
- Fronval, T., Jansen, E., Bloemendal, J. and Johnsen, S. (1995): Oceanic evidence for coherent fluctuations in Fennoscandian and Laurentide ice sheets on millennium time-scales. *Nature*, **374**, 443-446.
- Grimm, E.C., Jacobson, G.L.J., Watts, W.A., Hansen, B.C.S. and Maasch, K.A. (1993): A 50,000-year record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich events. *Science*, **261**, 198-200.
- GRIP Members (1993): Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **346**, 203-207.
- Grootes, P.M., Stuiver, M., White, J.W.C., Johnsen, S. and Jouzel, J. (1993): Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, **366**, 552-554.
- Grousset, F.E., Labeyrie, L., Sinko, J.A., Cremer, M., Bond, G., Duprat, J., Cortijo, E. and Huon, S. (1993): Patterns of ice-rafted debris in the glacial North Atlantic (40-55 N). *Paleoceanography*, **8**, 175-192.
- Gwiazda, R.H., Hemming, S.R. and Broecker, W.S. (1996): Tracking the sources of icebergs with lead isotopes: The provenance of ice-rafted debris in Heinrich layer 2. *Paleoceanography*, **11**, 77-93.
- Haigh, J.D. (1996): The impact of solar variability on climate. *Science*, **272**, 981-984.
- Heinrich, H. (1988): Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quat. Res.*, **29**, 143-152.
- Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dansgaard, W., Fuhrer, K., Gundestrup, N., Hammer, C.U., Iversen, P., Jouzel, J., Stauffer, B. and Steffensen, J.P. (1992): Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, **359**, 311-313.
- Kapsner, W.R., Alley, R.B., Shuman, C.A., Anandakrishnan, S. and Grootes, P.M. (1995): Dominant influence of atmospheric circulation on snow accumulation in Greenland over the past 18,000 years. *Nature*, **373**, 52-54.
- Keigwin, L.D. and Jones, G.A. (1994): Western North Atlantic evidence for millennial-scale changes in ocean circulation and climate. *J. Geophys. Res.*, **99**, 12397-12410.
- Keigwin, L.D., Jones, G.A. and Froelich, P.N. (1992): A 15,000 year paleoenvironmental record from Meiji Seamount, far northwestern Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **111**, 425-440.
- Kennett, J.P. and Ingram, B.L. (1995): A 20,000-year record of ocean circulation and climate change from the Santa Barbara basin. *Nature*, **377**, 510-514.
- Labitzke, K. and van Loon, H. (1993): A probable connection between solar and atmospheric decadal variability. In Pap, J.M., Frohlich, C., Hudson, H.S., Solanki, S.K. eds: *The sun as a variable star*. Cambridge University Press, 330-338.
- Lamb, H.F., Gasse, F., Benkaddour, A., El Hamouti, N., van der Kaars, S., Perkins, W.T., Pearce, N.J. and Roberts, C.N. (1995): Relation between centry-scale Holocene arid intervals in tropical and temperate zones. *Nature*, **373**, 134-137.
- Lehman, S.J. and Keigwin, L.D. (1992): Sudden changes in North Atlantic circulation during the last deglaciation. *Nature*, **356**, 757-762.
- Lowell, T.V., Heusser, C.J., Andersen, B.G., Moreno, P.I., Hauser, A., Heusser, L.E., Schluchter, C., Marchant, D.R. and Denton, G.H. (1995): Interhemispheric correlation of late Pleistocene glacial events. *Science*, **269**, 1541-1549.
- MacAyeal, D.R. (1993a): A low order model of the Heinrich events cycle. *Paleoceanography*, **8**, 767-775.
- MacAyeal, D.R. (1993b): Binge/purge oscillations of the Laurentide Ice Sheet as a cause of the North Atlantic Heinrich events. *Paleoceanography*, **8**, 775-784.
- Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Whitlow, S., Twickler, M.S., Morrison, M.C., Bloomfield, P., Bond, G.C., Alley, R.B., Gow, A.J., Groots, P.M., Meese, D.A., Ram, M., Taylor, K.C. and Wumkes, W. (1994): Changes in atmospheric circulation and ocean ice cover over the North Atlantic during the last 41,000 years. *Science*, **263**, 1747-1751.
- McManus, J.F., Bond, G.C., Broecker, W.S., Johnsen, S., Labeyrie, L. and Higgins, S. (1994): High-resolution climate records from the North Atlantic during the last interglacial. *Nature*, **371**, 326-329.
- Oeschger, H., Beer, J., Siegenthaler, U., Stauffer, B., Dansgaard, W. and Langway, C.C. (1984): Late glacial history from ice cores. In Hansen, J.E. and Takahashi, T. eds: *Climate processes and climate sensitivity*. Amer. Geophys. Union, Washington, D.C., 299-306.
- Oppo, D.W. and Lehman, S.J. (1995): Suborbital timescale variability of North Atlantic Deep Water during the past 200,000 years.

- Paleoceanography*, **10**, 901-910.
- Phillips, F.M., Campbell, A.R., Smith, G.I. and Bischoff, J.L. (1994): Interstadial climatic cycles: A link between western North America and Greenland? *Geology*, **22**, 1115-1118.
- Porter, S.C. and An, Z. (1995): Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, **375**, 305-308.
- Rahmstorf, S. (1994): Rapid climate transitions in a coupled ocean-atmosphere model. *Nature*, **372**, 82-85.
- Rahmstorf, S. (1995): Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature*, **378**, 145-149.
- Reid, G.C. (1987): Influence of solar variability on global sea surface temperatures. *Nature*, **329**, 142-144.
- Stauffer, B., Hofer, H., Oeschger, H., Schwander, J. and Siegenthaler, U. (1984): Atmospheric CO₂ concentration during the last glaciation. *Ann. Glaciology*, **5**, 160-164.
- Stocker, T.F. and Wright, D.G. (1991): Rapid transitions of the ocean's deep circulation induced by changes in surface water fluxes. *Nature*, **351**, 729-732.
- 多田隆治 (1977 a): ダンスガード・サイクル. 科学, **67**, 559-605.
- 多田隆治 (1977 b): 最終氷期以後の日本海および周辺域の環境変遷. 第四紀研究, **36**, 287-300.
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I. (1995): Possible Dansgaard-Oeschger Oscillation signal recorded in the Japan Sea sediments. In Tsunogai, S., Iseki, K., Koike, I., Oba, T. et al. eds.: *Global fluxes of carbon and its related substances in the coastal Sea-ocean-atmosphere system*. M & J International, 577-601.
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I. (submitted): Land-ocean linkage in association with Dansgaard-Oeschger cycles recorded in the late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*.
- Taylor, K.C., Lamorey, G.W., Doyle, G.A., Alley, R.B., Grootes, P.M., Mayewski, P.A., White, J.W.C. and Barlow, L.K. (1993): The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change. *Nature*, **361**, 432-436.
- Thorsteinsson, T., Kipfstuhl, J., Eicken, H., Johnsen, S.J. and Fuhrer, K. (1995): Crystal size variations in Eemian-age ice from the GRIP ice core, Central Greenland. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **131**, 381-394.
- Thouveny, N., de Beaulieu, J., Bonifay, E., Creer, K.M., Guiot, J., Icole, M., Johnsen, S., Jouzel, J., Reille, M., Williams, T. and Williamson, D. (1994): Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism. *Nature*, **371**, 503-506.
- von Rad, U., Schulz, H. and S.9.S. Party (1995): Sampling the oxygen minimum zone off Pakistan: Glacial-interglacial variations of anoxia and productivity (preliminary results, sonne 90 cruise). *Mar. Geol.*, **125**, 7-19.
- Watt, W.A. and Hansen, B.C.S. (1994): Pre-Holocene and Holocene pollen records of vegetation history from the Florida peninsula and their climatic implications. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **109**, 163-176.
- Weaver, A.J. and Hughes, T.M.C. (1994): Rapid interglacial climate fluctuations driven by North Atlantic ocean circulation. *Nature*, **367**, 447-450.

(1997年12月15日受付, 1998年2月16日受理)