

氷期サイクルの中期Pleistocene遷移とターミネーションのタイミング

著者	岡村 隆成
著者別名	OKAMURA Takanari
雑誌名	八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要
巻	8
ページ	21-37
発行年	2010-03-24
URL	http://id.nii.ac.jp/1078/00002320/

氷期サイクルの中期 Pleistocene 遷移とターミネーションのタイミング

岡村 隆成*

Middle Pleistocene transition and timing of terminations in glacial-interglacial cycles

Takanari OKAMURA*

Abstract

The low order model is applied to investigate the influence of orbital insolation forcing on the glacial-interglacial cycles in northern Hemisphere. This model consists of the mass balance of ice sheet, and is characterized by having the carrying capacity in precipitation rate term. From the analytical results, the multiple periods of orbital parameters appear in glacial cycle. It indicates that Pleistocene 100 kyr glacial cycles are sub-harmonics of precession, obliquity and eccentricity in orbital forcing. The middle Pleistocene transition (MPT) from the 41kyr world to the 100kyr world occurs under essentially the same orbital forcing. The intermediate periods can be appeared in epoch of MPT, and the appearance of these periods may be caused by increase of carrying capacity of ice sheet according to the global cooling and erosion. The zero-lag anti-phased relationship between the rate of change of ice volume and high latitude northern Hemisphere summer insolation is found in calculation results. A lot of oxygen isotope $\delta^{18}\text{O}$ records in both northern and southern Hemispheres support these analytical results.

Keywords: Pleistocene, orbital insolation forcing, glacial cycle, phase locking, termination.

1. はじめに

更新世の氷期-間氷期サイクルの変動や鮮新世-更新世のモンスーンの周期性を持つ地球の気候変動は、太陽からの入射熱のサイクル変動の影響を受けている。太陽からの入射熱は、自転軸の歳差運動 (20kyr 周期)、自転軸の傾斜角 (41kyr 周期) および公転軌道の離心率 (100kyr 周期) の要素からなる。Hays et al. (1976) は太陽からの入射熱の周期要素が氷床体積の変動周期に起因すると言う Milankovitch 仮説を深海堆積物の記録から明らかにした。この入射熱の変動に対する氷床体積の周期変動に関するモデルが提示されている (Imbrie and Imbrie, 1980; Pollard, 1982; Paillard, 1998)。これらはいずれも低次元微分方程式からなる非線形モデルである。太陽からの入射熱の緯度方向の勾配が氷床体積の変化に影響することが指摘されている (Young and Bradley, 1984; Raymo and Nisacioglu, 2003)。氷床体積の成長に緯度方向の太陽からの入射熱の傾斜がトロピカルから高緯度地域への水蒸気の輸送に寄与していると考えられている。さらに、氷床の体積量の変化率と夏季の太陽からの入射熱の変動がかつ時間遅れなしの直接的な関係にあることが述べられている (Roe, 2006)。約 1Myr 前に、氷期サイクルの周期が 40kyr から 100kyr に遷移

する、いわゆる、中期更新世遷移 (MPT) が起っている。この MPT の観測記録が多数示されており (Bassinot et al., 1994)、この遷移問題に対する種々の仮説が提示されている (Ruddiman et al., 1986; Clark and Pollard, 1997; Fang et al., 1999)。また、氷期サイクルの変動やモンスーンなどの気候変動の中で入射熱の要素の一つである歳差運動の 20kyr 周期の半分の周期やそれ以下の短周期が鮮新世-更新世の期間に北・南半球で観測されており (Hagelberg et al., 1994; Willis et al., 1999)、その発生要因が調べられている (Rutherford and D' Hondt, 2000)。

本研究の対象とする期間は鮮新世-更新世の過去約 3Myr である。低次元モデルを使って、氷期サイクルの MPT をモデルで導入する陸域の氷床体積容量の観点から考察する。また、気候変動の中で現れる短周期サイクルの出現の要因を太陽からの入射熱による位相同期の観点から調べる。次に、氷期サイクルのターミネーションのタイミングに対する入射熱の役割を調べる。本論で用いるモデルは、氷床の堆積と溶解のバランス式からなる。堆積の項に氷床の堆積容量の概念を導入し、溶解の項には入射熱変動を模擬した単純な周期関数形を導入する。モデル式によって得られる計算結果と氷床体積の指標である $\delta^{18}\text{O}$ などの観測記録を比較して、モデルの妥当性を検証する。

* 大学院工学研究科 機械・生物化学工学専攻 /
バイオ環境工学科・教授

2. 記録

海底堆積物中の酸素同位体 $\delta^{18}\text{O}$ の過去 5.3Myr の記録 LR04 (図1) は、海洋各地の 57 地点から採取されたデータがスタックされている (Lisiecki and Raymo, 2005)。この値の変化の状態は氷床体積量の変化の指標として取り扱われている。 $\delta^{18}\text{O}$ の数値が大きいほど氷床体積量が多いことに相当する。このような氷期振動サイクル変動は、堆積物記録と太陽からの入射熱の作用との関係から数多く調べられている (Imbrie et al., 1992; Rial, 2004; Ridgwell et al., 1999; Wunsch, 2004; Ashkenazy et al., 2005; Lisiecki and Laymo, 2007; Huybers, 2007; Meyers et al., 2008; Calov et al., 2009)。更新世のおよそ 1Myr 前後の MPT を境に、氷期サイクルはそれ以前 40kyr 周期であったものが、それ以降は 100kyr 周期に遷移している。しかしながら、100kyr 周期の離心率の変化はわずかであるにも拘らず、100kyr 周期が $\delta^{18}\text{O}$ の記録で顕著に現れることの疑問がある (Imbrie et al., 1993; Paillard, 1998)。更新世の氷期変動は、太陽からの入射熱の周期に対して時間遅れがあり、この要因として海流や CO_2 濃度の影響が述べられている (Hays et al., 1976; Shackleton, 2000; Ruddiman, 2006; Zeng, 2007)。

氷床のサイクル変動のみならず、鮮新世-更新世の期間でトロピカル近くのアフリカの気候変動はダストの海洋記録から、2.8Myr 以前は入射熱の 20kyr 周期を持ち、それ以降、氷期サイクルと同様、MPT を挟んで 40kyr から 100kyr サイクルに遷移している。この変動は、この地域の北緯 30° の太陽からの入射熱の周期要素に同期していることが示されており (deMenocal, 1995, 2004)、過去 12Myr 間、アジアのモンスーンに付いてレビューされている (Wang et al., 2005)。また、グローバルなモンスーンの進展を顕生代の 600Myr 間を通してレビューされている (Wang, 2009)。モンスーンのサイクル変動は、歳差運動の 20kyr と離心率の 100kyr と 400kyr がある。モンスーンの周期変動のデータの中で、

長周期のサイクルや短周期サイクルが鮮新世の時期でも認められる。鮮新世は継続的なエルニーニョ状態である (Molnar and Cane, 2007)。サマーモンスーンとウインターモンスーンとは、おおよそ逆位相の関係にあり、これらは、41kyr と 100kyr の周期を持っている。サマーモンスーンは北半球の夏季入射熱の変化と直接的な関係にある (Sun et al., 2006)。鮮新世も含めて前氷期時代は、更新世に比べて温暖であり、北半球や南半球の高緯度、そしてトロピカルの広い地域でサマーモンスーンが発生している。モンスーンが出現することで、山岳や河川はエロージョンを受けてウエザリングが起こり、カルサイト CaCO_3 が溶出して海洋に運搬される。そのため、大気中の二酸化炭素量は減少して、大気温度を下げる効果がある (Sigman and Boyle, 2000)。

3. モデル

3.1 モデル式

北半球での氷床体積 V は陸域での堆積速度 P と太陽からの入射熱による溶解速度 M の差によって変化するものと仮定すると、氷床体積 V の変化率は次式となる (Ashkenazy and Tziperman, 2004)。

$$\frac{dV}{dt} = P - M \quad (1)$$

降雪による堆積速度 P は氷床量が多いと小さく、少ないと大きいと仮定する (Paillard, 1998)。これは氷床が成長して、そのアルベド効果 (Yin et al., 2009) によって大気温度が低下し、その結果、海洋から大気への蒸発量が減少して堆積速度が低下する、いわゆる降雪量の蓄積に対する大気温度のフィードバック作用を表している。以上の仮定に基づいた海水が存在しない状態での堆積速度 P は次式で与えることができる。

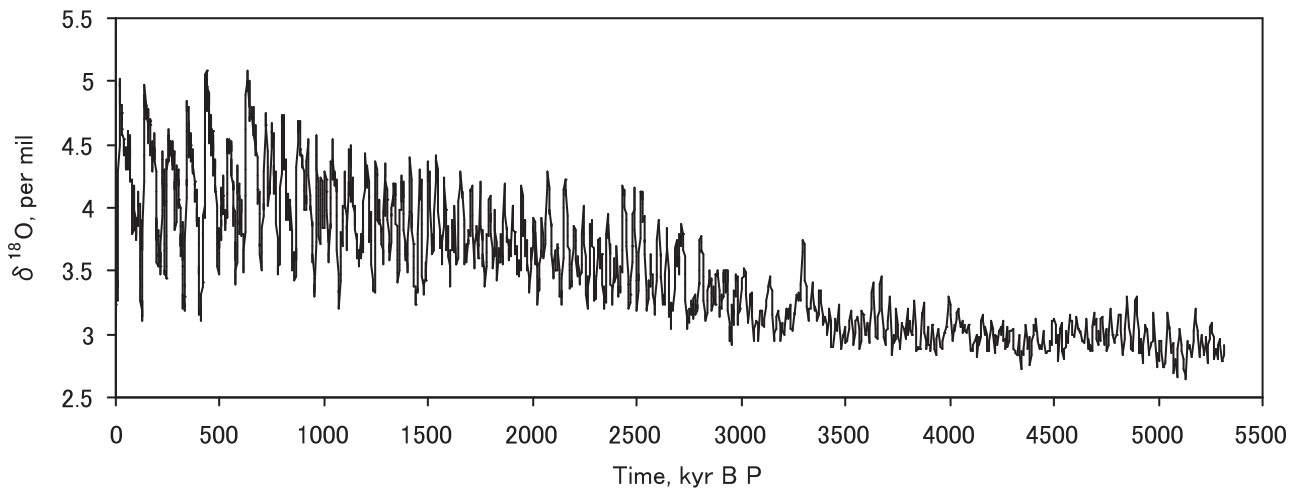


図1 過去 5.3 Myr の酸素同位体 $\delta^{18}\text{O}$ の変動 (LR04; Lisiecki and Raymo, 2005 による)

$$\begin{aligned}
 P &= k(R - V) \\
 k &= k_d ; \text{成長期} \\
 &= k_g ; \text{減衰期}
 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 R は氷床の堆積容量であり、この値は時間の関数として表わされるものとする。 k は氷床の速度定数であり、氷床の成長期で k_g とし、減衰期で k_d として、 $k_g > k_d$ の関係にある。氷期サイクルは、氷床体積の最大および最小のしきい値に到達することによって形成されているものとする。太陽からの放射による地球への北緯 65° 夏場の入射熱は次の式で与えられる。

$$M = k_g(S + s'I(t)) \quad (3)$$

S は入射熱変動の平均値であり、 s' は変動成分の割合、 $I(t)$ は単位変動である。 k_s は入射熱に対する氷床の溶解定数である。陸域の氷床がある最小量 V_{\min} まで低下すると、海水のアルベドフィードバックによる温暖化に向う結果から、海水が急激に溶解して氷床の堆積速度は、海水のない元の速度に戻ることになる (Ashkenazy and Tziperman, 2004)。以上から、氷床の堆積と溶解を組み合わせると、氷床の質量バランスは次のようになる。

$$\frac{dV}{dt} = k(R - V) - k_s(S + s'I(t)) \quad (4)$$

この式は、速度定数 k が常に一定であれば線形であるが、氷床体積 V がしきい値 V_{\max} と V_{\min} の間で変化するとき、右辺第 1 項の速度定数 k の値が氷床の成長期と減衰期で変わるので非線形である。

3.2 パラメータの選定

氷床体積に関する (4) 式のモデルは、 V_{\max} 、 V_{\min} 、 k_g 、 k_d 、 R 、 k_s 、 S および s' のパラメータを持つ。太陽からの入射熱に関わる平均値 S 、変動成分 s' の値は、La04 (Laskar, et.al,2004) を過去 1.5Ma の期間でランさせて求めた。その結果、 $S=496\text{W/m}^2$ 、 $s'/S=0.115$ の値を得た。中期更新世の最小氷床体積のしきい値は $V_{\min}=3 \times 10^6\text{km}^3$ とする。この値は現在の北半球の氷床体積に相当する。最大しきい値 V_{\max} は、約 2 万年前の氷床体積がおおよそ $50 \times 10^6\text{km}^3$ であることから (Mix et al., 2001)、この値を目安とする。以上から、モデル式のパラメータは、氷床の成長期での速度定数 k_g と減衰期での k_d 、それに太陽からの入射熱に関わる溶解定数 k_s 、そして氷床の堆積容量 R の 4 つがある。解析に当たって、これらのパラメータを設定する必要があるため、次の手順に従ってこれらのパラメータを求めた。まず、モデル式の入射熱の項で s' 値は S 値に比べて微小なのでこれを無視する。次に、氷床体積 V の成長期と減衰期でのしきい値 V_{\max} 、 V_{\min} を使うと、(4) 式から氷床体積の変化率 dV/dt に関する次の 4 式が得られる。これら 4

状態における dV/dt の値が分れば、パラメータ k_g 、 k_d 、 k_s および R の値を得ることができる。

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{dV}{dt} \right|_i &= k(R - V_{\max/\min}) - k_s S ; i = 1 - 4 \\
 k &= k_g ; i = 1, 2 \\
 &= k_d ; i = 3, 4 \\
 V_{\max/\min} &= V_{\max} ; i = 2, 3 \\
 &= V_{\min} ; i = 1, 4
 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 i の値 1 は成長期の開始点、2 はその終了点、3 は減衰期の開始点、4 はその終了点である。これらパラメータの値を求めるために、過去 5.3Myr の $\delta^{18}\text{O}$ の変化の記録 LR04 から、後期更新世の過去 700kyr の期間を調べた。この際、 $\delta^{18}\text{O}$ の最大値と最小値を氷床体積の最大しきい値 V_{\max} と最小しきい値 V_{\min} に対応させている。この記録のデータからは、減衰期の開始点と終了点での変化率 $d(\delta^{18}\text{O})/dt$ を区分して読み取るとは難しいので、この過程での平均変化率 $d(\delta^{18}\text{O})/dt$ を読み取っている。これらの値を使って得られた値 k_g 、 k_d 、 k_s および R と入射熱に関わる S 、 s' を表 1 に示す。これらパラメータの内、 k_g 、 k_d および k_s の値は、解析の対象期間である過去 3Myr で一定としている。氷床の堆積容量 R は、過去 700kyr の間で一定とする。ただし、それ以前の期間では時間経過に伴って変化するものとして、別に配慮している。

表 1 モデル計算で用いたパラメータ

Parameter	Unit	Value
k_g	1/kyr	0.025
k_d	1/kyr	0.014
k_s	$(\text{km}^3/\text{kyr})/(\text{W}/\text{m}^2)$	13.35×10^3
R	$\text{Sv} \cdot \text{kyr}$	10
S	W/m^2	496
s'/S	—	0.115

$$1 \text{ Sv} = 10^6 \text{m}^3/\text{s}$$

3.3 太陽からの入射熱

時間スケールは、暦年ではなく、モデル年を採用する。このモデル年は、太陽からの入射熱サイクル変動に対する氷期 - 間氷期サイクルの周期性などの特性を調べるためのパラメータ解析や感度解析を行う上で都合がよい。従って、 $I(t)$ は、天体運動から得られる太陽からの入射熱の変動ではなく、扱いやすい簡易的な周期関数を採用する。

歳差運動、傾斜角および離心率の周期要素を持つ入射熱変動が、氷床の成長、減衰にどの要素が主要因かを調

べるために、堆積物中の $\delta^{18}\text{O}$ 変化の周波数のスペクトル解析が行われている。ここでは、太陽からの入射熱の周波数成分の影響をより明確に把握するため、入射熱の変動は3つの軌道周期の主な周波数成分でのみ構成されるものとして (Berger,1988)、入射熱の0平均値を単純な周期関数で近似する。これを単位変動 $I(t)$ として、次の式で表わされる。

$$I(t) = \sum_{i=1}^n f_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (6)$$

ここで、 f_i は i の周波数成分の強度を示す定数であり、 ω_i は同様の周波数、 ϕ_i は時間遅れである。周期は、歳差運動の 19、22.4 および 23.7kyr、傾斜角の 41kyr および離心率の 95kyr の 5 成分とする。従って $n = 5$ である。時間遅れ ϕ_i は地球の軌道から計算される値であるが、ここでは、暦の実時間ではなくモデル時間を採用しているので、各成分で同じ値にならないように配慮した上で、適当な値を採用した。入射熱の変動成分を周期関数で近似して、氷床体積や CO_2 モデルの解析例が数例見られる (Huybers and Tziperman, 2008)。 $I(t)$ は単位変動量であるため、定数 f_i は次の基準に従う。

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad (7)$$

周波数成分強度の選定にあたっては、条件として歳差運動の3周期は同じ値を取るものと仮定した上で、離心率の強度は 0.04 (Lin and Wang, 2006) として、次の検討を行った。傾斜角の強度比率を変化させて、3Myr の期間での入射熱の平均周波数を求めた (図なし)。ケース 1 (入射熱全 5 要素; $f_{i,i=1 \sim 5}$) での平均周波数は、傾斜角の比率が小さくなるに従って、歳差運動の周波数である 0.047 1/kyr の値に漸近する。中間的な範囲の比率では、周波数の遷移が起こり、傾斜角の比率が高くなると周波数は低くなり、傾斜角の周波数 0.024 1/kyr に近い値を示す。ケース 2 (入射熱の歳差運動 22.4kyr 要素なしの 4 要素) での周波数は、傾斜角の比率の高い範

囲を除いてケース 1 でのそれよりも高い値を示している。赤の実線は過去 1.5Myr 間の入射熱の平均周波数であり、この値は、La04 の計算から 0.046 1/kyr の値が得られる。この実線とケース 1、2 の特性カーブとの交点での傾斜角の比率はそれぞれ 24% と 35% である。このときのケース 1 での周波数成分強度は、 $f_i = 0.24$ ($i = 1 \sim 4$)、 $f_5 = 0.04$ である。ケース 2 での周波数成分強度は、 $f_1 = f_3 = 0.29$ 、 $f_2 = 0$ 、 $f_4 = 0.38$ 、 $f_5 = 0.04$ である。ケース 1 の条件を用いて、3Myr 間の入射熱の単位変動 $I(t)$ の計算結果を図 2 に示す。 $I(t)$ の値は、期間全体を通して ± 1.0 の範囲で変動しており、およそ 100kyr と 400kyr の周期で繰り返している様子が見られる。この特性は、北緯 65° での 6 月における暦年の入射熱の変動の特徴をよく表している。一方、ケース 2 の周期変動では、ケース 1 で現れるおよそ 400kyr の特徴的な周期変動は現れない。このような周期特性の結果から、単位変動 $I(t)$ の強度 f_i としてケース 1 を選定した。

4. 結果と考察

4.1 氷床体積の周期と最大しきい値との関係

4.1.1 氷床体積の周期特性

氷期振動の計算を表 1 の条件でモデル式 (4) を用いて、積分計算の時間幅 10 年で行った。後期更新世の 100kyr 周期の氷期-間氷期サイクルを想定した氷床体積の変化の様子を調べた。この計算は、氷床の最大しきい値 $V_{\max} = 46 \times 10^6 \text{km}^3$ と最小しきい値 $V_{\min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ の値を用いて、1Myr の期間で行った。時間進行に伴う氷期振動の波形はそれぞれのサイクルで異なっており、それらの周期は一定ではなく、およそ 90kyr から 110kyr の範囲に分布している。氷床体積 V が時間進行と共に増加する成長期で、太陽からの入射熱の変動 $I(t)$ に対応した体積量の増減を繰り返すサブステージのサイクルも見られる。氷床体積はしきい値の最大体積量 V_{\max} に到達すると急激に減少する。体積量の増加の期間は氷期に、そして減衰の期間は間氷期に相当する。氷

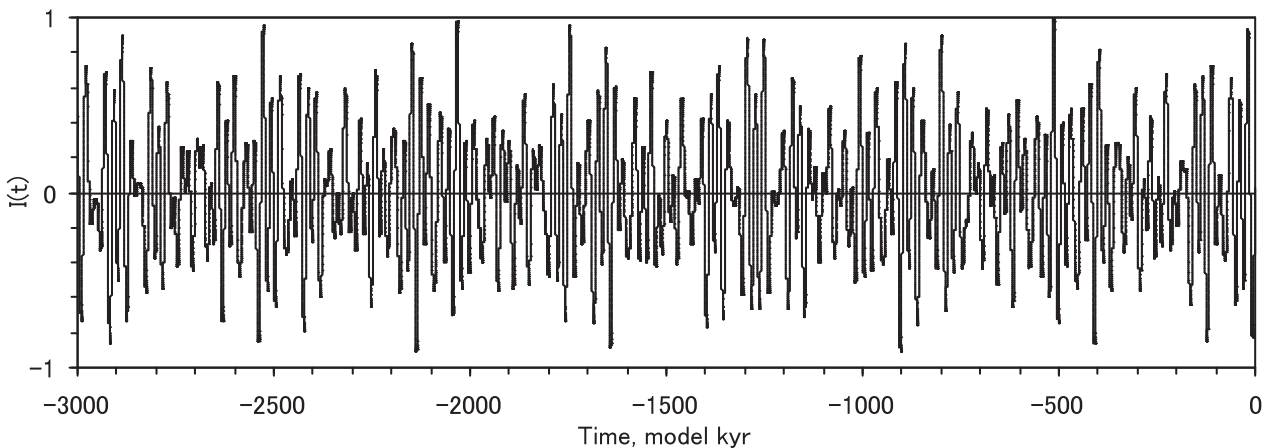


図2 太陽からの入射熱の変動成分 $I(t)$ の 3000kyr の時間経過での変化

期サイクル 20kyr と 40kyr 周期に相当する最大しきい値 V_{max} の条件での氷期サイクルの周期も、やはり一定ではなく、ある範囲に分布する。次に、太陽からの入射熱の変動が氷期サイクル周期の分布に与える影響を調べるために、入射熱の変動がない単位変動 $I(t) = 0$ の条件で行った計算の結果は、どの最大しきい値にも拘らず、同じ周期のサイクルを繰り返している。このことから、入射熱の周期的変動は、氷期サイクル周期の分布に大きく関与していることは明らかである。

次に、入射熱の3要素の周期成分の中でどの周波数が位相同期に作用しているのか、あるいは複数の周波数が存在する場合の作用を調べた。まず、最大しきい値 V_{max} を設定して、氷期サイクルの計算開始から氷床体積 $V(t)$ の振動波形に計10個サイクルの番号付けを順次行い、P1からP10とした。また、これら10サイクルの周期の平均値も求めた。この計算条件として、最小しきい値は一定として $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ とし、最大しきい値は $V_{max} = 3 \sim 53 \times 10^6 \text{km}^3$ の範囲とした。単位変動 $I(t)$ の周期要素が全ての周波数成分を持つ歳差運動3要素+傾斜角1要素+離心率1要素の計5要素の条件でランした。各要素の強度 f_i は、選定した表1の値を使用して、最大しきい値 V_{max} に対する氷期周期の特性を求めた。氷期サイクルの周期は、 V_{max} の増加と共に

長くなり、 V_{max} が $40 \times 10^6 \text{km}^3$ あたりを超えると、この周期は急激に立ち上がって長くなる。P1～P10個々の振動周期はあるバンド幅を持っており、これら個々の振動波形の周期は複雑な動きを呈している。振動周期はある V_{max} の範囲で同期しながら、 V_{max} の増加に伴って周期がステップ状に増加している。どの V_{max} に対しても P1～P10の周期は平均値を中心に、大小2分化されている。ただし、P1は、この特性から外れた変化を見せている。P1は計算の開始点にあり、計算条件が固定されている影響を受けており、P2の周期もその傾向を示している。P3以降の周期は先程述べた特性を示している。この V_{max} に対する氷床体積の周期変動の特徴は、太陽からの入射熱の3要素の周期成分が明確に現れていないことである。入射熱の複数周期に対する氷床体積の応答は、強い非線形性を発揮することが示唆される。そこで、入射熱の単位変動 $I(t)$ が、1要素の単純な場合の氷期周期サイクルを観察する。まず、歳差運動の周期 19kyr 単独の条件で同様の計算を行った。 V_{max} が $20 \times 10^6 \text{km}^3$ 近辺で、この単独周期と同じ 19kyr の周期で位相同期の様子が見られる。この周期を基本周期として整数倍の周期が明瞭に現われている。この現象は、入射熱の周期が単独あるいは複数に拘わらず、氷床体積が入射熱変動 $I(t)$ に応答して位相同期した結果である。この

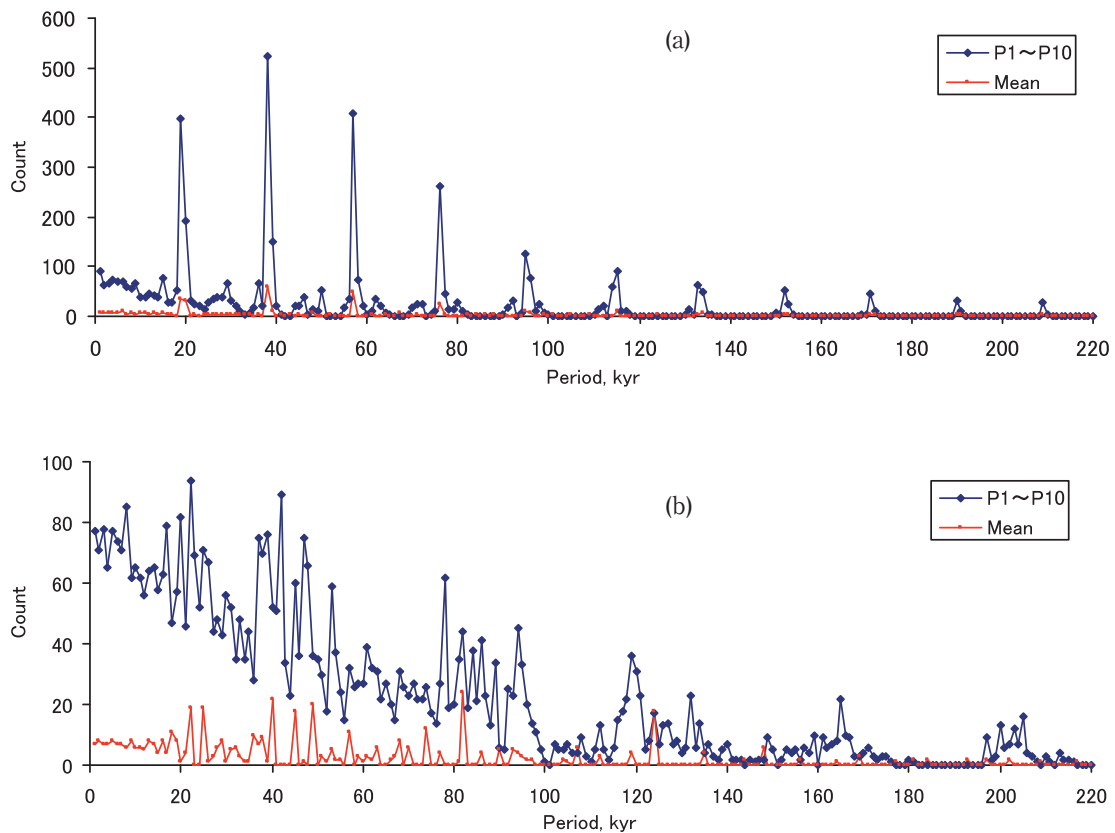


図3 氷期振動 P1～P10 周期のヒストグラム

- (a) 計算条件：軌道要素は歳差運動のみの 19kyr 単独周期；周波数成分強度 $f_1=1.0$, $f_i=0.0$ ($i=2 \sim 5$)、氷床体積の最大しきい値 $V_{max} = 3 \sim 53 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床体積の堆積容量 $R=10\text{Sv} \cdot \text{kyr}$
 (b) 計算条件：全ての軌道要素 19、22.4、23.7、41、95kyr 周期；周波数成分強度 $f_1 \sim 4=0.24$, $f_5=0.04$ 、氷床体積の最大しきい値 $V_{max} = 3 \sim 53 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床体積の堆積容量 $R=10\text{Sv} \cdot \text{kyr}$

ことから、入射熱変動は氷床体積の変動に対してペースメーカーの役割を果たしている。

次に、入射熱の周期変動要素の中で、特に離心率95kyr周期の氷床振動への影響を調べるために、この周期要素のみを除外した周期要素からなる入射熱変動I(t)を用いて同様の計算を行った。その結果、I(t)の離心率95kyr周期が存在しない条件でも、氷床の95kyr周期は明確に現れており、全入射熱の周期要素を持つ場合の周期特性とほとんど変わらない特性を示した。このことから、堆積物の $\delta^{18}O$ の記録などで現れる95kyr周期は、歳差運動の周期要素のサブハーモニックによって出現したと考えられる。

氷床体積の最大しきい値 V_{max} に対する氷期サイクル周期の位相同期の様子をより詳細に把握するために、氷床周期の度数分布を求めた(図3)。このときの周期の階級は1kyrである。入射熱が19kyr単独周期での度数分布(図3(a))では、P1~P10の周期は、この基本周期のサブハーモニックで鋭いピークを示している。ピーク値は $n \times 19\text{kyr}$ ($n=1, 2, 3, 4, 5, \dots$)に現れ、計算で得られた範囲で、 $n=14$ の266kyr周期まで見られる。 n 値が比較的小さいと、サブハーモニックのピーク値は基本周期のそれと同等の高いレベルにある。 n 値が5以上に増加するとピーク値は低くなるものの、そのピークは明瞭である。また、短い周期の範囲で、ピーク値は小さいが $(n+0.5)$ 倍の周期を持ち合わせている。平均周期のピーク値の出現は、P1~P10個別周期のそれと一致している。計算条件として採用した歳差運動の周期19kyrの他に、22.4、23.7kyr周期と傾斜角の41kyr周期に付いても、同様に、それぞれの単独周期で計算を行い、最大しきい値 V_{max} と氷期周期との関係および周期の度数分布を求めた。ここでは、これらの結果を示していないが、歳差運動要素19kyr周期の場合と全く同じように、基本周期とそのサブハーモニックで位相同期が起こり、度数分布はそれら周期で高いピーク値を示した。

一方、入射熱が全要素の場合の周期の度数分布(図3(b))は、極めて複雑な様相を呈しており、ピーク値は周期群として現れる。それらは、~20kyr、40~55kyr、80~95kyr、120~130kyr、~160kyr、~

200kyrの周期の範囲にある。I(t)が単独周期の場合には、入射熱の変動周期と氷期サイクルの周期の間には明確な対応関係があったが、この全要素周期を持つI(t)と氷期サイクルの周期との関係は一様ではない。また、入射熱の3要素の周期成分は、明確なピーク値を示さない。これは基本周期の応答が変調されていることが、その要因と考えられる。また、最も短い入射熱要素である19kyr周期よりも短い領域で多数のピーク値が現われていることも特徴的である。平均周期のピーク値は、P1~P10個別周期のそれと異なって出現するこの特性は、入射熱が単独周期の場合と大いに異なっている。

4.1.2 後期更新世の氷期サイクル

後期更新世の氷期サイクルの記録が多数報告されており、太陽からの入射熱周期に連動して現れる氷期サイクルの周期が提示されている。ここで、入射熱の各要素の周期と氷期サイクル周期との関係を詳細に調べる。まず、氷期サイクルの複合周期として、全入射熱要素のサブハーモニックを求める。その結果を表2に示す。ヒストグラム(図3(b))で、95kyrの氷期周期が卓越しているため、この周期に着目する。歳差運動の22.4kyr周期を除いて、その他の周期のサブハーモニック $19.0 \times 5 = 95\text{kyr}$ 、 $23.7 \times 4 = 94.8\text{kyr}$ 、そして、入射熱強度が弱い離心率の $95 \times 1 = 95\text{kyr}$ の3者の値は極めて近接している。これは、同じ歳差運動の要素でサブハーモニックの整数倍値が異なってもほぼ同じ氷期周期をもたらすケースである。次に、氷期周期120kyrに注目する。先ほどと同様、この周期は、入射熱要素の歳差運動のサブハーモニックである $19.0 \times 6 = 114\text{kyr}$ 、 $22.4 \times 5 = 112\text{kyr}$ 、 $23.7 \times 5 = 118.5\text{kyr}$ と傾斜角のサブハーモニックである $41.0 \times 3 = 123\text{kyr}$ が対応する。これらの平均値は116.9kyrである。後期更新世の氷期サイクルの記録で、100kyr周期として、95kyrと120kyrの2周期が多く見られる。この解析結果は、特徴的な周期特性を持つ記録を再現している。これら2周期の差は、入射熱サイクルのほぼ1周期分に相当し、氷床の減衰期への突入のタイミングに深く関係している(Ridgwell et al., 1999)。複合周期の140、180kyrはヒストグラムにほとんど現れないが、160、200kyr周期が出現しており、こ

表2 軌道要素のサブハーモニックによる氷期サイクルの複合周期

Subharmonic	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th
Orbital elements kyr										
Precession	19.0	38.0	57.0	76.0	95.0	114.0	133.0	152.0	171.0	190.0
	22.4	44.8	67.2	89.6	112.0	134.4	156.8	179.2	201.6	224.0
	23.7	47.4	71.1	94.8	118.5	142.2	165.9	189.6	213.3	237.0
Obliquity	41.0	82.0	123.0	164.0	205.0	246.0	287.0	328.0	369.0	410.0
Eccentricity	95.0	190.0	285.0	380.0	475.0	570.0	665.0	760.0	855.0	950.0

れら周期の記録が提示されている。氷期周期が長くなると、周期は最大しきい値 V_{max} の変化に対して敏感になるので、外乱の影響を受けやすい。例えば、氷床体積の増加と共に、ダスト量の増加による影響も含めて、氷床は 160kyr 以上の周期を取りにくいと言える。

4.1.3 中期更新世遷移

中期更新世に氷期サイクルの指標である $\delta^{18}O$ や海洋の栄養成分の指標である $\delta^{13}O$ の周期変動が、およそ 500kyr の期間に渡って 40kyr から 100kyr に遷移する、いわゆる MPT が、北・南半球、緯度、陸・海洋を問わず観測されている (Ruddiman and Shackleton, 1986; Park and Maasch, 1993; Raymo et al., 1997; Raymo et al., 2004; Winckler et al., 2005; Zheng et al., 2005; Hayward et al., 2006; Ravazzi et al., 2009)。0.9Myr の時期を中心にして寒冷化 (Wang et al., 2000; Sosdian and Rosenthal, 2009) が進み、海表面温度 (SST) は激しく低下しており、また氷床体積の成長と冬季モンスーンが強化されている (Schefuss et al., 2003; Li et al., 2008; Jin et al., 2009)。Fang et al., (1999) は、過去 0.8Ma の黄土堆積物の記録からチベット高原の隆起が寒冷化をもたらし、これが冬季モンスーンを強めて、さらに氷床体積の増加にも寄与する大規模な地球気候変動の要因

であり、この期間に氷床周期のシフトが起っていると指摘している。この MPT の問題に対して多くの仮説が提示されている (Clark and Pollard, 1997; Berger et al., 1999; Liu and Herbert, 2004; de Garidel-Thoron et al., 2005; Raymo et al., 2006; Clark et al., 2006; Hoenisch et al., 2009)。この氷期サイクルの遷移について、単純な低次元モデルや大気-海洋系モデルを使った解析も多く見られる (Birchfield and Ghil, 1993; Tuenter et al., 2005; Crowley and Hyde, 2008)。

図 3 (b) に示した氷期サイクル周期の解析結果をみると、40kyr と 100kyr 周期の間に、入射熱要素のサブハーモニックである 60kyr と 80kyr の複合周期が現れている。しかしながら、この遷移の期間を通して、なぜ氷床体積の指標の記録には、これら中間的な周期を飛び越して一挙に 40kyr から 100kyr 長周期に移行したのか疑問が残る。この低次モデルを使った計算で得られるサブハーモニックの 60kyr と 80kyr 周期は、この遷移期間の観測記録には存在しないのか？ これら隠れたサイクルの変動が議論されることは少ない。Ruddiman and Shackleton, (1986) は、北大西洋で過去 1.1Myr の期間の SST の記録で、54kyr 周期を観測している。Mix and Shackleton (1995) は南太平洋で 0 ~ 1.8Ma の期間の $\delta^{18}O$ の記録で、約 55kyr 周期を検出している。Heslop et

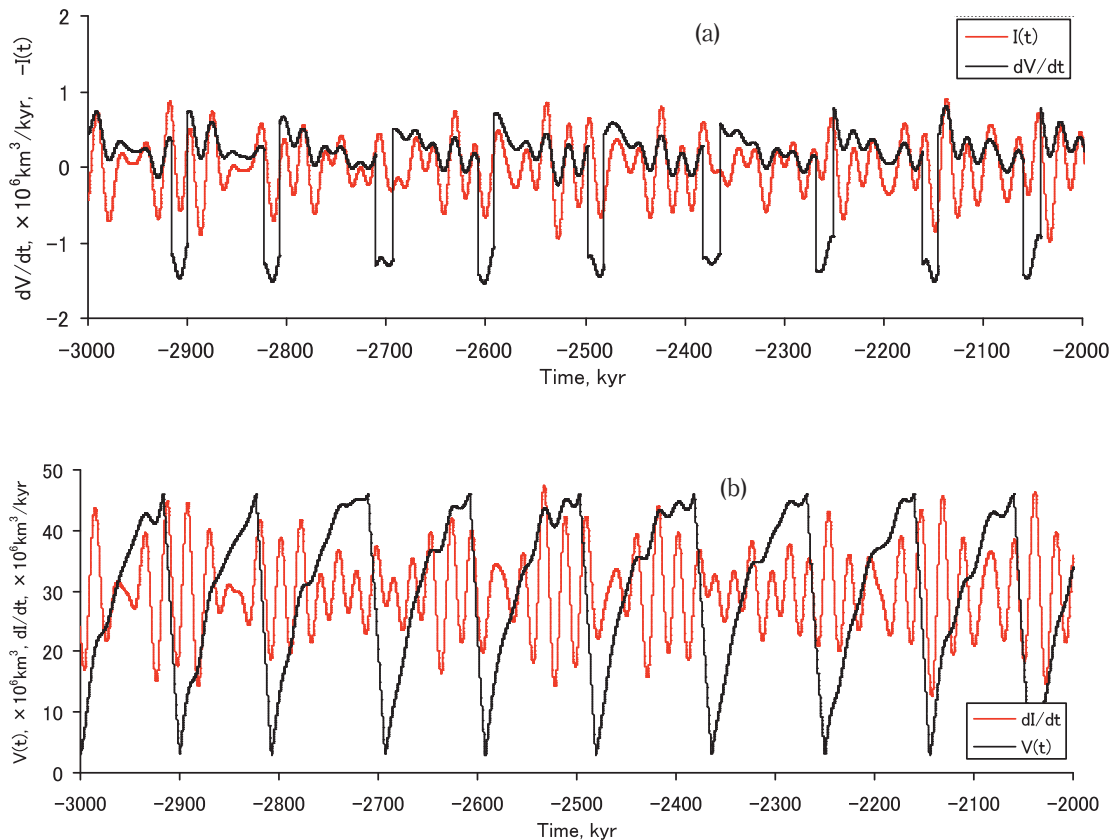


図4 氷床体積 $V(t)$ およびその微分形 dV/dt と入射熱 $I(t)$ とその微分形 dI/dt の時間軸上での変化
 計算条件：氷床体積の最大しきい値 $V_{max} = 46 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床体積の堆積容量 $R=10Sv \cdot \text{kyr}$ 、1000kyr 間の計算
 (a) 氷床体積の微分形 dV/dt と入射熱 $I(t)$ の変化； dV/dt の単位は任意
 (b) 氷床体積 $V(t)$ と入射熱の微分形 dI/dt の変化； dI/dt の単位は任意

al. (2002) は、過去 1.5Ma の間、ODP677 サイトの $\delta^{18}\text{O}$ のウエーブレット時間-周波数解析で、1.2-0.7Myr の期間に、おおよそ 40kyr から 100kyr 周期に遷移する様子を示している。Schefuss et al. (2004) は、MPT 中にトロピカルの SST が氷期サイクル変動と同期して 80kyr で変動していることを示している。Hyun et al. (2005) は、北大西洋で 475 ~ 945ka の期間、カルサイト CaCO_3 と全有機炭素 TOC の記録から 400kyr の長周期と入射熱の周期に対応する 90kyr と 40kyr の他に、約 60kyr 周期と多数の短周期を検出している。Latta et al. (2006) は、中米で過去 1.7Myr の期間、強磁性鉱物成分の測定で、1.5-0.9Myr の間に 39kyr から 123kyr 周期に遷移する中間的な周期の存在を示している。Huybers, (2007) は、過去 2Myr の各地域での $\delta^{18}\text{O}$ 記録のスペクトル解析で、おおよそ 1.3Myr から 0.7Ma の期間に 41kyr サイクルから 100kyr サイクルに遷移する間に、中間的なサイクルの移行を示している。Crundwell et al. (2008) は、南西太平洋の過去 1.2Myr 期間の SST の記録で、870 ~ 620kyr 間で不安定な 40 ~ 100kyr の周期があることを示している。Ma et al. (2009) は、赤道域の太平洋の過去 5 Myr 間の $\delta^{18}\text{O}$ と SST のマルチテーパー法による周波数解析の結果を示しており、この中で、入射熱の各要素の 19、23、41 および 100kyr 周期に留まらず、その他多くの周期が出現している。これらのサイクルは、時間進行に伴って連続的あるいは断続的であれ、階層的であり、 $\delta^{18}\text{O}$ と SST の双方に、~ 30、~ 60 および ~ 80kyr サイクルを見出すことができる。 $\delta^{18}\text{O}$ の記録で ~ 60 と ~ 80kyr の弱い周期が MPT の期間に集中的に出現する。おおよそ 1.2Myr 前に 100kyr サイクルの強度が著しく強くなり、0.75Myr 前あたりで 41kyr サイクルに替わって前記のサイクルが支配的となる (Ma et al., 2009)。SST の周期変動は、MPT 間でこの $\delta^{18}\text{O}$ の変動パターンと類似しており、さらに MPT に留まらず、過去 5 Myr 間で、上述の多数の周期が断続的に出現する。

Clark et al. (2006) は、LR04 の記録の周波数解析を行って、1.25Myr から 0.7Myr の MPT の期間で氷期サイクル周期が 40kyr から ~ 100kyr 周期に移行する間の様子を示している。その図から、この期間内で ~ 60、~ 80kyr 周期の存在を読み取ることができる。この事実から、60kyr と 80kyr 周期は遷移の期間と言う不安定な時期に、かつ短期間でのみ出現するので、 $\delta^{18}\text{O}$ の記録に明確に現れ難かったことが理解される。さらに、次のようにも述べている。66kyr から 200kyr 周期の間に 6 以上の周期要素が含まれている。このことは、100kyr よりも短い周期が存在することを示唆している。こうも述べている。周期は階層的であり、時間進行に伴ってある状態から他の状態にランダムに飛んでいる。すなわち、氷期サイクルは、時間経過に沿って連続的に変化することはなく、断続的に特定の周期にシフトしながら変化している。また、後期更新世の 100kyr ワールドで、 $\delta^{18}\text{O}$

に複数の特定周期が混在している様子も見出せる。さらに、入射熱の傾斜角 41kyr 周期は時間経過でほぼ安定して推移している中で、これに対応する $\delta^{18}\text{O}$ の周期は、時間経過で断続的な強弱があり、かつ並行した二つの周期が階層的に出現している。モデル解析のヒストグラムを見ると (図 3 (b))、40kyr 周期帯で強い複数の周期が出現しており、この解析結果は前述の $\delta^{18}\text{O}$ の記録の周期の出現状況と対応している。氷期サイクル以外にも、SST、乾湿そしてモンスーン、 $\delta^{13}\text{C}$ の周波数解析の結果も提示している。これらの結果は、データが採取された地域によって変動パターンは多少異なるものの、遷移の開始時期や遷移域での中間的な周波数の出現は、 $\delta^{18}\text{O}$ の記録と極めて類似している。時間経過に伴うこれら気候変動は、入射熱の周期変動に大きく影響されていることが分る。

ここで、Clark et al. (2006) の仮説に従うと、MPT 期間中の寒冷化による平均気温低下とエロージョンによる渓谷の空間拡大は、ここで提示しているモデルで氷床体積の堆積容量 R は、時間経過と共に増加することを意味する。そうすると、この R 値と直接的な関係にある最大しきい値 V_{max} が増加するので、氷期サイクルの周期は長くなる。このような氷床のダイナミックによって、MPT の期間に氷期サイクル周期の遷移がおこる。氷期周期は、MPT 以前で 40kyr であったものが、MPT の間に入射熱要素周期のサブハーモニックの 60kyr、そして 80kyr に遷移する。この周期の遷移は、連続的ではなく階層的である。MPT の間に SST は大きく変動しているため、これが氷期サイクルと同位相であることから (Ruddiman and Shackleton, 1986)、氷期変動はその影響を受けて不安定になることは理解できる (Crundwell et al., 2008)。MPT の期間での氷床の堆積容量は時間軸に沿って徐々に増加し、かつ不安定であることで特徴付けられる。そのために、この間の氷期サイクルの中間的な 60kyr と 80kyr 周期は短命であり、かつ安定した状態を維持できない。そのため、MPT の期間の様々な指標となる記録には、これら中間的な周期が現れにくい。氷期サイクルが最終的に 100kyr 周期に到達するときは、氷床体積がこの MPT の間に長周期に対応した最大しきい値まで増大したことを表している。ただし、MPT 以降でも 80kyr 周期は残っているように見える (Clark et al., 2006)。このことから、100kyr ワールドは 80kyr、95kyr、120kyr の複数の長周期が存在しており (Berger et al., 2005)、氷期サイクルの周期は、地域性に依存してこれら複数のサブハーモニックの周期群から出現する。後期更新世の気候変動の記録で、地域によって氷期サイクルの周期が少しずつ異なることは、このことを物語っている。

4.1.4 サブオービタルサイクル

次に、入射熱の歳差運動の周期要素 19kyr よりも短

い氷期サイクルについて触れる。この短周期のサイクルは、堆積物の記録から、氷期サイクルのみならず、モンスーンや海面温度あるいは海面上昇などにも見られ、鮮新世以前から北・南半球の緯度に関わらず出現している (Raymo et al., 1998; Willis et al., 1999; Draut et al., 2003; Oppo et al., 2003; Becker et al., 2005; Aziz et al., 2008; Mawson and Tucker, 2009)。Hangenberg et al. (1994) は、後期更新世の 3ヶ所の海洋で、10-12kyr の周期があることを示している。Richards (1998) は、更新世でのグリーンランドのアイスコアを使って、入射熱周期のハーモニックである 7.9kyr 周期を観測し、これが徐々に 15kyr 周期に減衰することを示すと共に、統計学的モデルを使って解析している。Yu and Ding (2003) は、アジアの過去 0.8Myr の間、入射熱要素の 100、41、23 そして 19kyr 周期の他に、短周期の 16kyr と 10kyr、そして、8kyr から 14kyr の範囲で多数の周期を観測している。また、0.8Myr から 2.6Myr 間にも類似の短周期サイクルも観測している。Rutherford and D' Hondt (2000) は、大西洋のトロピカル域で、0.6-1.5Myr の間、11.5kyr 周期を観測しており、約 1.5Myr 前にトロピカルのこの歳差運動要素の半周期のサイクルが高緯度域に伝播し始めたとしている。同様に、Weirauch et al. (2008) は、トロピカルに近い北西大西洋で、MPT (410-1350kyr) の間に、10-12kyr と 5kyr の第 2 と第 4 ハーモニックの周期を示している。過去 225kyr の間でも 5-6kyr 周期の短周期変動が見られる (Jimenez-Moreno et al., 2007)。また、MIS5a-5c で 7kyr 周期の海面振動がある (Potter et al. 2004)。モデル解析の結果から、5kyr と 10kyr の短周期変動は、植生のダイナミック応答によるとする仮説が示されている (Tuenter et al., 2007)。これら様々な記録に現れる短周期サイクルは、入射熱の変動に起因しており、特に、16kyr、10-12kyr、7-8kyr の短周期サイクルが共通して出現しているように見える。

ここで、氷期サイクル周期変動のヒストグラムの結果を見ると (図 3 (b))、20kyr 以下の短い周期範囲で約 10kyr のピークが現れている。この範囲を詳細に観察するために、階級 0.1kyr でデータを書き直した。これによると、19kyr の歳差運動要素の他に、16kyr、11kyr、7.5kyr、5-6kyr、4kyr、そして 3kyr の数多くのピークが現れる。これらの周期群は、記録に見られる周期群と著しく類似している。この解析値は、入射熱の変動に依存するものであり、これらの短周期サイクルは、コンビネーショントーンを用いて説明されている場合があるが、ここでは、単純な扱いとして、歳差運動要素のハーモニックであるとする。11kyr サイクルは歳差運動要素の半周期で第 2 ハーモニックであり (Weirauch et al., 2008)。7.5kyr は第 3、5-6kyr は第 4、4kyr は第 5、~ 3kyr は第 6 あるいは第 7 ハーモニックである。それ以降の短周期の識別は難しい。最大しきい値 V_{max} がおよそ $14 \sim 16 \times 10^6 \text{km}^3$ の範囲で、周期は 16kyr と 20kyr

のグループに 2 分されて、位相同期の状態にある。この範囲は、歳差運動の 19kyr 要素に対応しており、この 16kyr 周期は歳差運動要素の二分した片方と見なすことができる。また 22.4kyr と 23.7kyr 周期についても、同様の現象が見られる。22.4kyr 周期で V_{max} が $16.5 - 18.5 \times 10^6 \text{km}^3$ の範囲で、23.7kyr 周期で V_{max} が $18.5 - 20.5 \times 10^6 \text{km}^3$ の範囲で位相同期の状態にあり、周期は 2 分している。Berger et al. (2006) は、入射熱の変動からトロピカル緯度で歳差運動の半周期と 5.5kyr の短周期サイクルが発現することを示している。この解析モデルは、入射熱要素中の歳差運動の符号を変更するだけで、トロピカル域に限らず北と南半球双方で適用される。このモデルは非線形であり、そのため複数の周期を持つ入射熱の変動に対して、氷期サイクルは複雑に変調された周期群から構成されている。そのため、入射熱の周期変動と氷期の複合周期や短周期サイクルとは、直接的な関係を示すことはないが、これらは入射熱要素のサブハーモニックとハーモニックで現れるこれら周期を発現している。この両者の関係は、気候変動の多くの記録の中に見出すことができる。

4.2 氷床体積と入射熱の変動の時間遅れとターミネーション

4.2.1 時間遅れ

100kyr 周期に相当する最大しきい値 V_{max} の条件で、時間経過の中での氷床体積の変化率 dV/dt と入射熱の単位変動 $I(t)$ とは、氷床の成長および減衰過程双方において逆位相の関係にあることがうかがわれる (図 4 (a))。すなわち、単位変動 $I(t)$ のピーク時に dV/dt はボトムを、逆に $I(t)$ のボトム時に dV/dt はピーク値を取る。これら両者は、モデル式 (4) で右辺第 2 項 $I(t)$ にマイナスが付されていることから明らかなように、 dV/dt と $I(t)$ は逆位相の関係にある。これとは別に、氷床体積 $V(t)$ と入射熱の変化率 dI/dt との関係もあ

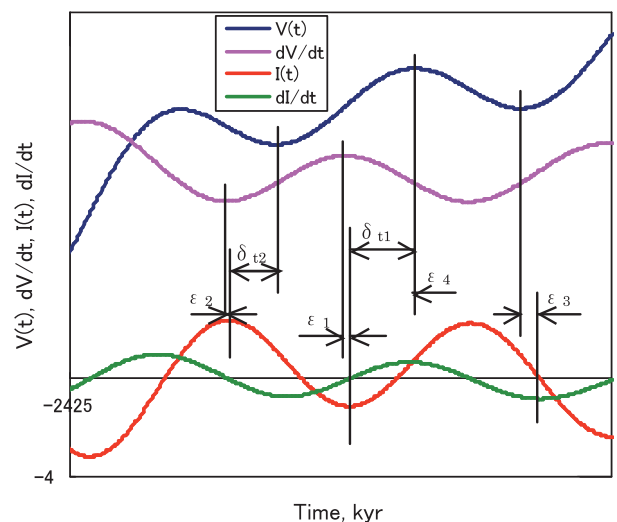


図 5 氷床体積 $V(t)$ 変動とその微分形 dV/dt および入射熱変動 $I(t)$ とその微分形 dI/dt を時間軸上で示した模式図

り、この両者の関係は同位相のように見える (Roe and Allen, 1999)。時間経過の中での単位変動 $I(t)$ と氷床体積 $V(t)$ の位相の関係を明確に把握するために、両者の変化の様子を時間軸上で詳しく調べる。氷床体積量 $V(t)$ とその変化率 dV/dt および入射熱の単位変動 $I(t)$ とその変化率 dI/dt の模式的な変化の様子を図5に示す。単位変動の変化に対する氷床体積の変動の時間差 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$ を次のように定義する。 ε_1 と ε_2 は、氷床体積の変化率 dV/dt と単位変動 $I(t)$ の関係に、そして ε_3 と ε_4 は、氷床体積 $V(t)$ と単位変動の変化率 dI/dt の関係に関連している。

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= t_{Imin} - t_{dVmax} \\ \varepsilon_2 &= t_{Imax} - t_{dVmin} \\ \varepsilon_3 &= t_{dImin} - t_{Vmin} \\ \varepsilon_4 &= t_{dImax} - t_{Vmax} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 t_{Imin} は最小 $I(t)$ での時間であり、 t_{Imax} は最大 $I(t)$ での時間である。両者は単位変動の変化率 $dI/dt=0$ の時間に一致する。 t_{dImin} は最小 dI/dt での時間であり、 t_{dImax} は最大 dI/dt での時間である。 t_{Vmin} は極小 $V(t)$ での、 t_{Vmax} は極大 $V(t)$ での時間である。 t_{dVmax} は最大 dV/dt での、 t_{dVmin} は最小 dV/dt での時間であり、両者は $V(t)$ の変曲点の時間に一致する。 dV/dt はモデル式 (4) から求められ、 dI/dt は単位変動の (6) 式を微分することによって得られる。次に、 δ_{t1} は、入射熱の低下が氷床体積 $V(t)$ の増加に作用するまでの時間遅れであり、 δ_{t2} は、入射熱の上昇が $V(t)$ の減少に作用するまでの時間遅れである。これらの時間遅れ δ_{t1} 、 δ_{t2} は次の通りである。

$$\begin{aligned} \delta_{t1} &= t_{Vmax} - t_{Imin} \\ \delta_{t2} &= t_{Vmin} - t_{Imax} \end{aligned} \quad (9)$$

時間差 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$ に関して、まず、氷床体積の変化率 dV/dt と単位変動 $I(t)$ との関係を見る (図4)。計算条件は、最大しきい値 $V_{max}=46 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min}=3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床の堆積容量 $R=10\text{Sv} \cdot \text{kyr}$ で、計算時間は 1Myr である。 $I(t)$ が極小値のとき、 dV/dt はほぼ極大値をとっており、 $I(t)$ の増加過程で dV/dt はマイナス値である。その途中の過程で dV/dt はプラスの値からマイナスの値に変化する。これは、モデル式 (4) の右辺第2項の入射熱の値が増加して第1項の氷床体積項の値よりも大きくなったためである。 $I(t)$ が更に増加して極大値に達すると dV/dt はほぼ極小値となる。 $I(t)$ が減少過程に入ると dV/dt はプラスの値となって、 $I(t)$ が減少する過程で dV/dt はマイナス値からプラスの値に変化する。 $I(t)$ が極小値に達すると、 dV/dt はほぼ極大値をとる。この解析結果から時間差 ε_1 、 ε_2 を求めると、双方とも、ほぼ $\pm 2\text{kyr}$ の狭い範

囲に分布し、 ε_1 の平均値は 1.0kyr であり、 ε_2 のそれはほぼ 0kyr である (図6 (a))。この結果は、氷床体積の変化率 dV/dt は、単位変動 $I(t)$ と逆位相であると言う上記の関係を支持している。即ち、 $I(t)$ の極大値を取る時間は、 $V(t)$ のマイナス勾配での変曲点の時間に対応している。同様に、 $I(t)$ の極小値を取る時間は、 $V(t)$ のプラス勾配での変曲点の時間に対応している。このような入射熱変動と氷期サイクル変動との関係は、モデル式からも分かるように、氷床体積 $V(t)$ の値が余り変化しない状態では、 dV/dt と $I(t)$ とは逆位相の状態にある。

次に、氷床堆積 $V(t)$ と単位変動の変化率 dI/dt との関係を見る。時間差 ε_3 は $1 \sim 4\text{kyr}$ の範囲にあり、平均値は 2.5kyr である。 ε_4 は $-3.5 \sim 0\text{kyr}$ の範囲にあり、その平均値は -1.7kyr である (図6 (b))。これらの値は、氷期サイクルの平均周期 21.7kyr から見ると十分に小さい値であり、氷床体積 $V(t)$ と単位変動の変化率 dI/dt は同位相の関係にあると言える。しかしながら、これら双方の分布範囲と平均値は、時間差 ε_1 と ε_2 の値に比べると多少大きい。この氷床体積と入射熱の関係を与えるモデルとして、Imbrie and Imbrie, 1980; Bryson and Goodman, 1985; Paillard, 1998; Ashkenazy and Tziperman, 2004 がある。Roe (2006) は、次のように述べて観測記録からもこれら両者の関係を明らかにしている。SPECMAP と HW04 の記録は、氷床体積の変化率と北半球高緯度の夏季入射熱との間に直接的で

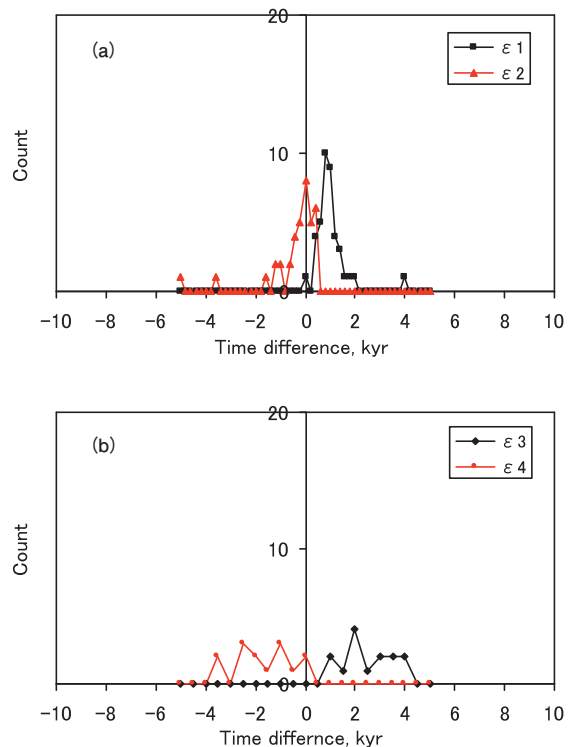


図6 入射熱の変化と氷床体積の変動に関する時間差のヒストグラム
 計算条件：氷床体積の最大しきい値 $V_{max} = 46 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床体積の堆積容量 $R=10\text{Sv} \cdot \text{kyr}$ 、 1000kyr 間の計算
 (a) 時間差 ε_1 、 ε_2 、(b) 時間差 ε_3 、 ε_4

時間遅れのない逆位相の関係にあることを支持している。また、氷床体積と入射熱の変化率との関係においても、観測記録が示されており (de Menocal et al., 2000; Raymo and Nisancioglu, 2003)、氷期サイクルの変動は、入射熱の変化率に依存するモデルが提示されている (Young and Bradley, 1984; Loutre et al., 2004; Berger et al., 2005; Davis and Brewer, 2009)。入射熱の変化率は、低緯度から高緯度への水分蒸気の輸送に寄与しているとしている。モンスーンの周期変動についても同様の記録が示されている (Rousseau et al., 2009)。これら氷床体積と入射熱との関係を表す表現は異なっているが、これら二者は全く同じ内容である。なぜなら、単位変動 $I(t)$ は周期関数であるので、 $I(t)$ の微分形と積分形とは、逆位相の関係にあるためである。氷床体積の変動の記録と入射熱の変動との関係が、どちらのモデルとも対応していることから、上記の二つのモデルのコンセプトは、十分に受け入れることができる。

上述の氷床体積 $V(t)$ と単位変動 $I(t)$ との関係から、 $I(t)$ が極大値のときに $V(t)$ は減少過程で変曲点であり、 $I(t)$ が極小値のときに $V(t)$ は増加過程で変曲点である。 $V(t)$ が変化する過程でその変曲点を定めることは、モデル計算では容易であるが、観測記録からそれを読み取ることは難しい。そこで、氷床体積 $V(t)$ と単位変動 $I(t)$ との関係を表わす指標の一つである時間遅れについて、上記と同じ 100kyr 周期の氷期サイクルの条件で調べた。その結果、時間遅れ δ_{t1} は、5 ~ 14kyr の範囲で分布し、その平均値は 8.4kyr であり、 δ_{t2} は 1 ~ 6kyr の範囲で分布して、平均値は 3.4kyr である。氷床体積の指標となる記録は、入射熱の周期的な変動に対して、時間遅れを示している (Imbrie et al. 1992, 1993; Shackleton, 2000; Ruddiman, 2003; Dreyfus et al., 2007)。また、海面高さの変化 (Gallipet et al., 1994) や海洋の大循環の応答 (Lisiecki et al., 2008) も調べられている。

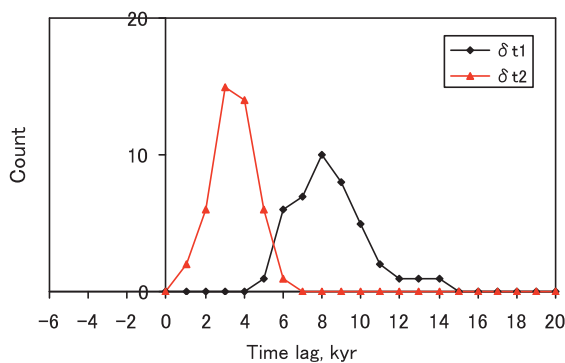


図7 入射熱の変化に対する氷床体積の変動の時間遅れのヒストグラム
計算条件：氷床体積の最大しきい値 $V_{max} = 46 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床体積の堆積容量 $R=10\text{Sv} \cdot \text{kyr}$ 、3000kyr 間の計算

4.2.2 氷床のターミネーションのタイミング

氷期 - 間氷期サイクルのターミネーションが入射熱変動のどのタイミングで起こるかを調べる。入射熱変動に対する 100kyr 周期相当の氷期サイクルの氷床体積の変動のモデル計算結果の一例を図8に示す。時間スケールでの氷床体積の変化の状態を時間帯によって二つに分類する。一つは、細いオレンジのラインであり、氷床体積が極大値を取る時間からこの極大値と同じ値になる時間までの時間帯にある。もう一つは、太い赤いラインであり、時間経過に伴う次の氷床体積の極大値までの時間帯にある。そしてこれらの変化が繰り返されている。一方、入射熱の変動の中で、薄いブルーは氷床体積のオレンジのラインと対応しており、濃いブルーは赤のラインと対応している。この図から分かるように、氷期サイクルのターミネーションは氷床体積の赤いラインの時間帯でのみ発生しており、オレンジのラインの時間帯では発生しない。すなわち、ターミネーションが発生する時間は不連続的である。薄いブルーのラインの時間帯は、ターミネーション発生に対して不感帯であり、そのため氷期周期は階層的である。氷床体積の周期変動は強い非線形性がある。そのため、100kyr 周期の氷期 1 サイクル中に、入射熱のサイクル数は 4 あるいは 5 である。このように氷床サイクルの変動は入射熱のサイクル変動と連動しているため、出現する氷期サイクルの周期は、おおよそ入射熱の 1 サイクル分違っている。入射熱の濃いブルーは、低い入射熱域に集中する特徴がある。このモデル計算の結果では、ターミネーションのタイミングは入射熱の最小域で発生しており、他の氷期サイクルの計算結果も同様の傾向を示している。このことから、氷床の減衰過程開始のタイミングは、低い入射熱の期間に氷床体積が増加して、それ以前のサブステージのピーク値よりも大きくなり、その値が最大しきい値 V_{max} に達したときである。すなわち、低い入射熱が、ターミネーション開始のトリガーとなっている。サブステージのピーク以降の過程の期間を図中薄いブルーのラインで示す。この開始点

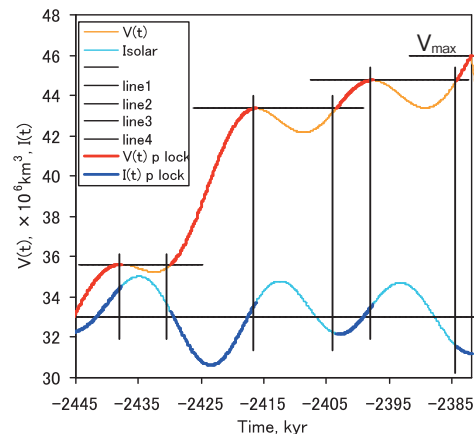


図8 氷床体積の変動におけるターミネーションのタイミング；入射熱のスケールは任意
計算条件：氷床体積の最大しきい値 $V_{max} = 46 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床体積の堆積容量 $R=10\text{Sv} \cdot \text{kyr}$

は、高い入射熱の時期にあり、かつ入射熱の変化率 dI/dt はプラスの値を取る。

氷期周期が 100kyr に対応する最大しきい値 $V_{max} = 46 \times 10^6 \text{km}^3$ の条件で、減衰過程の開始点と成長過程の開始点を入射熱の単位変動 $I(t)$ の時間スケール上にプロットする (図 9)。ほとんどの氷期サイクルの減衰過程開始のタイミングは、単位変動 $I(t) < 0$ の条件で起こっている。この発生のタイミングは氷床体積の変化率 $dV/dt > 0$ の条件と対応している。 $I(t) > 0$ で発生している数点は、 $I(t)$ が 0 に近い期間であり、かつ入射熱が最小域の期間に対応している。また、このタイミングでの入射熱の変化率 dI/dt の値はプラスのケースが多く見られる。一方、氷床の成長過程の開始のタイミングは、入射熱の変化率 dI/dt がマイナスの場合が多い。減衰過程での氷床体積の変化率 dV/dt は成長過程でのそれに比べて数倍大きな値を持っているために、氷床体積は急激に減少する。氷期サイクルの減衰過程の計算された平均時間は 17kyr 程度 (入射熱サイクルの 3/4 程度) であり、氷期サイクルによって余りバラツキがない。そのため、減衰過程の終了、すなわち成長過程開始のタイミングは、減衰過程開始のタイミングに従属的である。

後期更新世での 100kyr 氷期サイクルのターミネーションのタイミングの記録と入射熱の変動との関係が調べられている (Raymo, 1997; Marra et al., 2008)。これらは、入射熱の変動値が低い時期に、氷床は減衰過程に突入し、ターミネーションは入射熱の変動値が高い時期に対応していることを示している。海面高さの変化も入射熱の変動のタイミングと連動しており、入射熱の変動値が低い時期に海面上昇が開始している (Gallup et al., 2002)。これら氷床のターミネーションのタイミングと入射熱変動との関係に関する仮説が示されている (Schulz and Zeebe, 2006)。上述の解析結果 (図 9) は、ここで示したこれらターミネーションのタイミングをよく言い表している。

5. 結論

過去約 3Myr の鮮新世-更新世の期間を対象として、氷床の堆積と溶解のバランス式からなる低次モデルを用いて、氷期サイクルの周期特性を調べた。これらには、氷期周期が 40kyr から 100kyr に遷移する MPT や入射熱の周期要素よりも短いサブサイクルの発生、そして、氷期サイクルと入射熱変動の位相関係および、氷期サイクルのターミネーションのタイミングに対する入射熱変動の役割など課題がある。モデルの解析結果と氷床体積の指標である $\delta^{18}\text{O}$ の記録などとの比較を通して、これら課題に対する考察を行った。以下にそのまとめを述べる。

1. 後期更新世の氷床の 100kyr 周期は、95kyr と 120kyr 周期が観測されている。これら 95kyr 周期は、歳差運動の周期要素 19kyr の 5 倍と 23.7kyr の 4 倍のサブハーモニックおよび離心率 95kyr の複合周期であり、もう一方の 120kyr 周期は、歳差運動の周期要素 19kyr の 6 倍、22.4kyr の 5 倍と 23.7 の 5 倍および傾斜角の 41kyr の 3 倍のサブハーモニックからなる複合周期と見なすことができる
2. モデルに導入した氷床体積の堆積容量 R は、MPT 期間中の寒冷化による平均気温低下とエロージョンによる渓谷の空間拡大によって時間経過と共に増加する。この R 値と直接的な関係にある最大しきい値 V_{max} も増加するので、氷期サイクルの周期は長くなって遷移がおこる。氷期周期は、MPT 以前で 40kyr であったものが、入射熱要素周期のサブハーモニックの 60kyr、80kyr、そして 100kyr に遷移する。この周期の遷移は、連続的ではなく階層的である。
3. 氷床やモンスーンなどの様々な記録に現れる歳差運動の周期要素よりも短い 16kyr、10-12kyr、そして 7-8kyr 周期が共通して見られる。この内、16kyr 周期は、歳差運動要素 19kyr 周期の位相同期で二分した片方の周期であり、それよりも短い周期は、歳

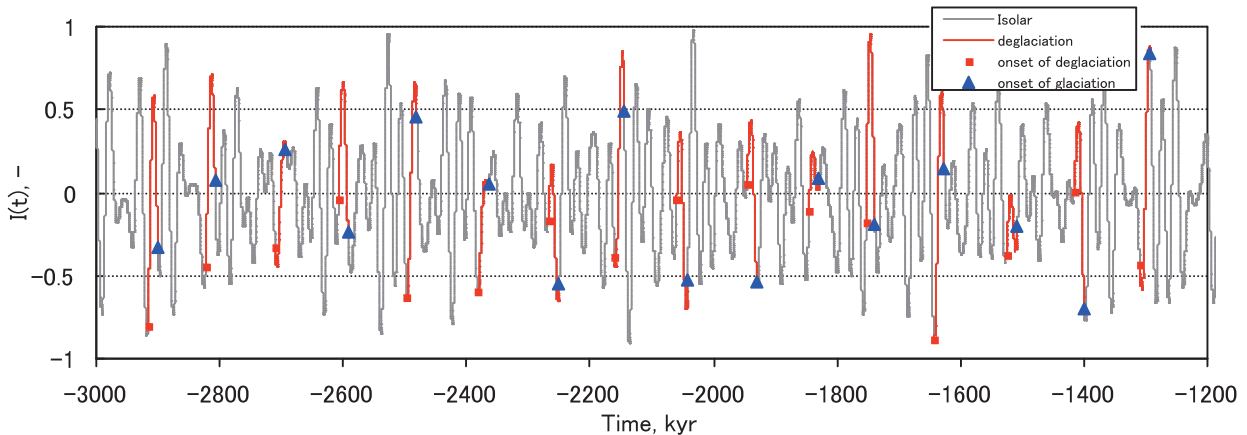


図 9 氷期サイクルの減衰期開始点 (■) と成長期開始点 (▲) を入射熱の時間軸上の変化過程にプロット；赤いラインは氷床サイクルの減衰過程を示す
計算条件：氷床体積の最大しきい値 $V_{max} = 46 \times 10^6 \text{km}^3$ 、最小しきい値 $V_{min} = 3 \times 10^6 \text{km}^3$ 、氷床体積の堆積容量 $R=10\text{Sv} \cdot \text{kyr}$ 、1800kyr 間の計算

差運動要素のハーモニックで現れると見なすことができる。

4. 100 kyr 周期の氷期サイクルの氷床体積の変化率 dV/dt と太陽からの入射熱 $I(t)$ とは、逆位相の関係にある。また、氷床体積 $V(t)$ と太陽からの入射熱の変化率 dI/dt とは同位相の関係にあり、この両者の関係は同じ内容を違った表現で表している。後期 Pleistocene の 100 kyr 氷期サイクルの記録は、氷床体積の代替指標である $\delta^{18}O$ の変化率と太陽からの入射熱とは逆位相の関係にあることを示している。
5. 太陽からの入射熱の変動に対する氷床体積の変動の時間遅れ δ_{11} の平均値は 8.4 kyr であり、 δ_{12} の平均値は 3.4 kyr である。そしてこれらの値の全体平均値は 5.9 kyr である。一方、100 kyr 氷期サイクルの氷床体積量の変動の太陽からの入射熱の変動に対する時間遅れは、およそ 5 kyr 程度であり、両者の値は、同レベルにある。
6. 氷期サイクルのターミネーションのタイミングは、氷床体積 $V(t)$ の変動の中で不感帯が存在するために、氷期サイクルの周期は階層的である。100 kyr 周期の氷期サイクル中に太陽からの入射熱のサイクルは 4 から 5 程度あるので、出現する氷期サイクルの周期はおおよそ太陽からの入射熱変動のおおよそ 1 サイクル分程度異なっている。後期更新世での氷床周期はおおよそ 95 kyr と 120kyr の 2 周期存在する記録が多く見られる。これらの周期の差は、解析で得られた太陽からの入射熱変動の 1 サイクル分に相当しており、解析結果と類似性がある。
7. 100 kyr 周期の氷期サイクルの成長過程から減衰過程に移行する、いわゆる間氷期開始のタイミングは、太陽からの入射熱が低い時期に発生する。この期間では氷床の体積量は増加するので、その値が最大しきい値 V_{max} に到達したときが、間氷期の開始点である。すなわち、太陽からの入射熱の低い時期が氷床のターミネーションのトリガーである。間氷期の減衰過程は、入射熱が高い期間を通過して、終了する。100 kyr 周期の氷期サイクルの $\delta^{18}O$ の記録から、ターミネーションのタイミングは、太陽からの入射熱が低いこと、そしてその変化率 dI/dt が正の値の範囲にある。解析結果は、後期更新世のターミネーションのタイミングと同じ特性を有している。
8. 上記項目で示した後期更新世の氷床の 100kyr 周期はサブハーモニックからなる複合周期であること、MPT の期間に中間的な周期が階層的に出現すること、歳差運動要素 19kyr 周期よりも短い氷床などの周期が要素周期のハーモニックで現れること、氷床体積の変化率と太陽からの入射熱との位相関係および時間遅れ、そしてターミネーションのタイミングなどを示した。太陽からの入射熱変動に対応した

氷床体積の周期変動に関するこれらの解析結果は、過去約 3Myr の氷床体積やその他多様な周期変動の観測記録で示される特性をよく捕らえており、さらにこれら変動現象のメカニズムを理解する助けとなっている。このようなことから、ここで用いた氷床体積に関わるモデルは妥当である。

参考文献

- Y. Ashkenazy, E. Tziperman, Are the 41kyr glacial oscillations a linear response to Milankovitch forcing?, *Quaternary Science Review*, 23, 1879-1890, 2004
- Y. Ashkenazy, D. R. Baker, H. Gildor, Simple stochastic models for glacial dynamics, *Journal of Geophysical Research*, 10, C02005, 1-15, 2005
- H. A. Aziz, F. J. Hilgen, G. M. van Luijk, A. Sluijs, M. J. Kraus, J. M. Pares, P. D. Gingerich, Astronomical climate control on paleosol stacking patterns in the upper Paleocene-lower Eocene Willwood Formation, Bighorn Basin, Wyoming, *Geology*, 36, 7, 531-534, 2008
- F. C. Bassinot, L. Beaufort, E. Vincent, L. D. Labeyrie, F. Rostek, P. J. Mueller, X. Quidelleur, Y. Lancelot, Coarse fraction fluctuations in pelagic carbonate sediments from the tropical Indian Ocean: A 1500-Kyr record of carbonate dissolution, *Paleoceanography*, 9 (4) , 579-600, 1994
- J. Becker, L. J. Lourens, F. J. Hilgen, E. van der Laan, T. J. Kouwenhoven, G. J. Reichert, Late Pliocene climate variability on Milankovitch to millennial time scales: a high-resolution study of MIS100 from the Mediterranean, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 228, 338-360, 2005
- A. Berger, Milankovitch theory and climate, *Reviews of Geophysics*, 26, 4, 624-657, 1988
- A. Berger, X. S. Li, M. Loutre, Modeling northern hemisphere ice volume over the last 3 Ma, *Quaternary Science Reviews*, 18, 1, 1-11, 1999
- A. Berger, J. L. Melice, M. F. Loutre, On the origin of the 100-kyr cycles in the astronomical forcing, *Paleoceanography*, 20, PA4019, 2005
- A. Berger, M. F. Loutre, J. L. Melice, Equatorial insolation: from precession harmonics to eccentricity frequencies, *Climate of the Past*, 2, 131-136, 2006
- G. E. Birchfield, M. Ghil, Climate evolution in the Pliocene and Pleistocene from marine-sediment

- records and simulation: Internal variability versus orbital forcing, *J. Geophys. Res.* 98 (D6) , 10385-10399, 1993
- R. A. Bryson, B. M. Goodman, Milankovitch and global ice volume simulation, *Theor. Appl. Climatol.* 37, 22-28, 1986
- R. Calov, A. Ganopolski, C. Kubatzki, M. Claussen, Mechanisms and time scales of glacial inception simulated with an Earth system model of intermediate complexity, *Clim. Past*, 5, 245-258, 2009
- P. U. Clark, D. Pollard, Origin of the middle Pleistocene transition by ice sheet erosion of regolith, *Paleoceanography*, 13, 1, 1997
- P.U. Clark, D. Archer, D. Pollard, J.D. Blum, J.A. Rial, V. Brovkin, A.C. Mix, N.G. Pisias, M. Roy, The middle Pleistocene transition: characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric pCO₂, *Quaternary Science Reviews*, 25, 3150-3184, 2006
- T. J. Crowley, W. T. Hyde, Transient nature of late Pleistocene climate variability, *Nature*, 456, 226-230, 2008
- M. Crundwell, G. Scott, T. Naish, L. Carter, Glacial-interglacial ocean climate variability from planktonic foraminifera during the Mid-Pleistocene transition in the temperate Southwest Pacific, ODP Site 1123, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 260, 1-2, 202-229, 2007
- M. Crundwell, G. Scott, T. Naish, L. Carter, Carter Glacial-interglacial ocean climate variability from planktonic foraminifera during the Mid-Pleistocene transition in the temperate Southwest Pacific, ODP Site 1123, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 260, 1-2, 202-229, 2008
- B. A. S. Davis, S. Brewer, Orbital forcing and role of the latitudinal insolation/temperature, *Climate Dynamics*, 32, 2-3, 143-165, 2009
- T. de Garidel-Thoron, Y. Rosenthal, F. Bassinot, L. Beaufort, Stable sea surface temperatures in the western Pacific warm pool over the past 1.75 million years, *Nature*, 433, 294-298, 2005
- P. B. deMenocal, Plio-Pleistocene African climate, *Science*, 270, 53-59, 1995
- P. B. deMenocal et al., Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing, *Quaternary Science Reviews*, 19, 347-361, 2000
- P. B. deMenocal, African climate change and faunal evolution during the Pliocene-Pleistocene, *Earth and Planetary Science Letters*, 220, 3-24, 2004
- G. B. Dreyfus et al., Anomalous flow below 2700 m in the EPICA Dome C ice core detecting using $\delta^{18}\text{O}$ of atmospheric oxygen measurements, *Clim. Past*, 3, 341-353, 2007
- A. E. Draut, M. E. Raymo, J. F. McManus, D. W. Oppo, Climate stability during the Pliocene warm period, *Paleoceanography*, 18.4, 1078, 2-1-2-12, 2003
- R. Ehrlich, Solar resonant diffusion waves as a driver of terrestrial climate change, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 7, 759-766, 2007
- X. Fang, J. Li, R. Van der Voo, Rock magnetic and grain size evidence for intensified Asian atmospheric circulation since 800,000 years B.P. related to Tibetan uplift, *Earth and Planetary Science Letters*, 165, 1, 129-144, 1999
- C. D. Gallup, R. L. Edwards, R. G. Johnson, The timing of high sea levels over the past 200,000 years, *Science*, 263, 5148, 796-800, 1994
- C. D. Gallup, H. Cheng, F. W. Taylor, R. L. Edwards, Direct determination of the timing of sea level change during termination II , *Science*, 295, 5553, 310-313, 2002
- I. Gorodetskaya, M. A. Cane, L. B. Tremblay, A. Kaplan, The effects of sea-ice and land-snow concentrations on planetary albedo from the Earth radiation budget experiment, *Atmosphere-Ocean*, 44, 2, 195-205, 2006
- T. K. Hagelberg, G. Bond, P. deMenocal, Milankovitch band forcing of sub-Milankovitch climate variability during the Pleistocene, *Paleoceanography*, 9, 4, 545-558, 1994
- J. W. Hays, J. Imbrie, N. J. Shackleton, Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages, *Science*, 194, 4270, 1121-1132, 1976
- B. W. Hayward, S. Kawagata, H. R. Grenfell, A. W. Droxler, M. Shearer, Mid-Pleistocene extinction of bathyal benthic foraminifera in the Caribbean Sea, *Micropaleontology*, 52, 3, 245-266, 2006
- D. Heslop, M. J. Dekkers, C. G. Langereis, Timing and structure of the mid-Pleistocene transition: records from the loess deposits of northern China, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 185, 133-143, 2002
- B. Hoenisch, N. G. Hemming, D. Archer, M. Siddall, J. F. McManus, Atmospheric carbon dioxide concentration across the mid-Pleistocene transition, *Science*, 324, 5934, 1551-1554, 2009
- P. Huybers, Glacial variability over the last two million

- years: an extended depth-derived agemodel , continuous obliquity pacing, and the Pleistocene progression, *26*, 37-55, 2007
- P. Huybers, Glacial variability over the last two million years: an extended depth-derived agemodel , continuous obliquity pacing, and the Pleistocene progression, *Quaternary Science Reviews*, *26*, 37-55, 2007
- S. Hyun, N. Ahagon, H. Yoon, Milankovitch cycles and paleoceanographic evolution within sediments from ODP Sites 980 and 983 of the North Atlantic Ocean, *Geosciences Journal*, *9*, 3, 235-242, 2005
- J. Imbrie, J. Z. Imbrie, Modeling the climatic response to orbital variations, *Science*, *207*, 4434, 943-953, 1980
- J. Imbrie et al., On the structure and origin of major glaciation cycles I. Linear responses to Milankovitch forcing, *Paleoceanography*, *7* (6) , 701-738, 1992
- J. Imbrie et al., On the structure and origin of major glaciation cycles. II : The 100,000-year cycle, *8* (6) , 699-735, 1993
- G. Jimenez-Moreno, R. S. Anderson, P. J. Fawcett, Orbital- and millennial-scale vegetation and climate changes of the past 225 ka from Bear Lake, Utah-Idaho (USA) , *Quaternary Science Reviews*, *26*, 1713-1724, 2007
- Z. Jin, M. J. Bickle, H. J. Chapman, J. Yu, S. Wang, S. Chen, Early to mid-Pleistocene ostracod $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in the central Tibetan Plateau, *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, *280*, 3-4, 406-414, 2009
- J. Laskar, P. Robutel, F. Joutel, M. Gastineau, A. Correia, B. Lestrade, A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth, *Astronomy and Astrophysics*, *428*, 261-285, 2004
- D. K. Latta, D. J. Anastasio, L. A. Hinnov, M. Elrick, K. P. Kodama, Magnetic record of Milankovitch rhythms in lithologically noncyclic marine carbonates, *Geology*, *34*, 1, 29-32, 2006
- Z. S. Lin, S. G. Wang, EMD analysis of solar insolation, *Meteorology and Atmospheric Physics*, *93*, 1-2, 123-128, 2006
- L. E. Lisiecki, M. E. Raymo, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography*, *20*, PA1003, 2005
- L. E. Lisiecki, M. E. Raymo, Plio-Pleistocene climate evolution: trends and transitions in glacial cycle dynamics, *Quaternary Science Reviews*, *26*, 56-69, 2007
- L. E. Lisiecki, M. E. Raymo, W. B. Curry, Atlantic overturning responses to Late Pleistocene climate forcings, *Nature*, *456*, 85-88, 2008
- Z. Liu, T. D. Herbert, High-latitude influence on the eastern equatorial Pacific climate in the early Pleistocene epoch, *Nature*, *427*, 720-723, 2004
- M. F. Loutre, D. Paillard, F. Vimeux, E. Cortijo, Does mean annual insolation have the potential to change the climate?, *Earth and Planetary Science Letters*, *221*, 1-4, 1-14, 2004
- W. T. Ma, J. Tian, Q. Y. Li, Astronomically modulated late Pliocene equatorial Pacific climate transition and Northern Hemisphere ice sheet expansion, *Chinese Science Bulletin*, doi: 10.1007/s11434-009-0310-4, 2009
- F. Marra, F. Florindo, E. Boschi, History of glacial terminations from the Tiber River, Rome: Insights into glacial forcing mechanisms, *Palaeoceanography*, *23*, PA2205, 2008
- M. Mawson, M. Tucker, High-frequency (Milankovitch and millennial-scale) in slope-apron carbonates: Zechstein (Upper Permian) , North-east England, *Sedimentology*, *56*, 6, 1905-1936, 2009
- S. R. Meyers, B. B. Sageman, M. Pagani, Resolving Milankovitch: consideration of signal and noise, *American Journal of Science*, *308*, 770-786, 2008
- A. C. Mix, J. Le, N. J. Shackleton, Benthic foraminiferal stable isotope stratigraphy of Site 846: 0-1.8 Ma, *Proc. Of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, *138*, 839-854, 1995
- A. C. Mix, E. Bird, R. Schneider, Environmental process of the ice age: land, ocean, glaciers (EPILOG) , *Quaternary Science Reviews*, *20*, 4, 627-657, 2001
- P. Molnar, M. A. Cane, Early Pliocene (pre-ice age) El Nino-like global climate: Which El Nino?, *Geosphere*, *3*, 5, 337-365, 2007
- D. W. Oppo, B. K. Linsley, Y. Rosenthal, S. Dannenmann, L. Beaufort, *Geochem. Geophys. Geosyst.* *4*, 1, 1003, 2003
- D. Paillard, The timing of Pleistocene glaciations from a simple multiple-state climate model, *Nature*, *391*, 22378-381, 1998
- J. Park, K. A. Maasch, Plio-Pleistocene time evolution of the 100-kyr cycle in marine paleoclimate records, *J. Geophys. Res.*, *98* (B1) , 447-461, 1993
- D. Pollard, A simple ice sheet model yields realistic 100 kyr glacial cycles. *Nature*, *296*, 334-338, 1982
- E. K. Potter, T. M. Esat, G. Schellmann, U. Radtke, K. Lambeck, M. T. McCulloch, Suborbital-period sea-level oscillations during marine isotope substages

- 5a and 5c, *Earth and Planetary Science Letters* 225, 191-204, 2004
- M. E. Raymo, The timing of major climate terminations, *Paleoceanography*, 12, 4, 577-585, 1997
- M.E. Raymo, K. Ganley, S. Carter, D.W. Oppo, J. McManus, Millennial-scale climate instability during the early Pleistocene epoch, *Nature*, 392, 699-702, 1998
- M. E. Raymo, K. Nisancioglu, The 41 kyr world: Milankovitch's other unsolved mystery, *Paleoceanography*, 18,1,11-1-6, 2003
- M. E. Raymo et al., Stability of North Atlantic water masses in face of pronounced climate variability during the Pleistocene, *Paleoceanography*, 19, Pa2008, 2004
- M. E. Raymo, L. E. Lisiecki, K. H. Nisancioglu, Pliocene-Pleistocene ice volume, Antarctic climate, and the Global $\delta^{18}\text{O}$ record, *Science*, 313, 492-495, 2006
- J.A. Rial, Abrupt climate change: chaos and order at orbital and millennial scales, *Global and Planetary Change*, 41, 95-109, 2004
- G. R. Richards, Orbital forcing and endogenous nonlinearity in the Pleistocene: the Greenland ice core, *Climatic Change*, 38, 2, 235-246, 1998
- G. R. Richards, Orbital forcing and endogenous nonlinearity in the Pleistocene: the Greenland ice core, *Climatic Change*, 38, 2, 235-246, 1998
- A. Ridgwell, A. J. Watson, M. E. Raymo, Is the spectral signature of the 100 kyr glacial cycle consistent with a Milankovitch origin?, *Paleoceanography*, 14, 4, 437-440, 1999
- G. H. Roe, M. R. Allen, A comparison of competing explanations for the 100,000-yr ice age cycle, *Geophysical Research Letters*, 26, 15, 2259-2262, 1999
- G. H. Roe, In defense of Milankovitch, *Geophysical Research Letters*, 33, L24703, 1-5, 2006
- D. D. Rousseau, N. Wu, Y. Pei, F. Li, Three exceptionally strong East-Asia summer monsoon events during glacial times in the past 470 kyr, *Clim. Past*, 5, 157-169, 2009
- W. F. Ruddiman, N. J. Shackleton, A. McIntyre, North Atlantic sea-surface temperatures for the last 1.1 million years, *Geological Society, Special Publications*, 21, 155-173, 1986
- W. F. Ruddiman, Orbital insolation, ice volume, and greenhouse gases, *Quaternary Science Reviews*, 22, 1597-1629, 2003
- W. F. Ruddiman, Ice-driven CO_2 feedback on ice volume, *Climate of the Past*, 2, 43-55, 2006
- S. Rutherford, S. D' Hondt, Early onset and tropical forcing of 100,000-year Pleistocene glacial cycles, *Nature*, 408, 72-75, 2000
- E. Schefuss, S. Schouten, J. H. F. Jansen, J. S. Sinninghe Damste, African vegetation controlled by tropical sea surface temperatures in the mid-Pleistocene period, *Nature*, 422,418-421, 2003
- K.G. Schulz, R.E. Zeebe, Pleistocene glacial terminations triggered by synchronous changes in Southern and Northern Hemisphere insolation: The insolation canon hypothesis, *Earth and Planetary Science Letters*, 249, 326-336, 2006
- N. J. Shackleton, The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity, *Science*, 289, 1897-1902, 2000
- D. M. Sigman and E. A. Boyle, Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide, *Nature*, 407, 859-869, 2000
- S. Sosdian, Y. Rosenthal, Deep-sea temperature and ice volume changes across the Pliocene-Pleistocene climate transitions, *Science*, 325, 5938, 306-310, 2009
- J. Sun, X. Huang, Half-precessional cycles recorded in Chinese loess: response to low-latitude insolation forcing during the last interglaciation, *Quaternary Science Reviews*, 25, 9-10, 1065-1072, 2005
- Y. Sun, S. C. Clemens, Z. An, Z. Yu, Astronomical timescale and paleoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau, *Quaternary Science Reviews*, 25, 1-2, 33-48, 2006
- E. Tuenter, S. L. Weber, F. J. Hilgen, L. J. Lourens, A. Ganopolski, Simulation of climate phase lag in response to precession and obliquity forcing and the role of vegetation, *Climate Dynamics*, 24, 203, 279-295, 2005
- E. Tuenter, S. L. Weber, F. J. Hilgen, L. J. Lourens, Simulating sub-Milankovitch climate variations associated with vegetation dynamics, *Climate of the Past*, 3, 169-180, 2007
- R. Wang, A. Abelmann, B. Li, Q. Zhao, Abrupt variations of the radiolarian fauna at Mid-Pleistocene climate transition in the South China Sea, *Chinese Science Bulletin*, 45, 10, 952-955, 2000
- P. Wang et al., Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues, *Quaternary Science Reviews*, 24, 595-627, 2005
- P. Wang, Global monsoon in a geological perspective, *Chinese Science Bulletin*, 54,7, 1113-1136, 2009

- D. Weirauch, K. Billups, P. Martin, Evolution of millennial-scale climate variability during the mid-Pleistocene, *Paleoceanography*, 23, PA3216, 2008
- K. J. Willis, A. Kleczkowski, S. J. Crowhurst, 124,000-year periodicity in terrestrial vegetation change during the late Pliocene epoch, *Nature*, 397, 685-688, 1999
- C. Wunsch, Quantative estimate of the Milankovitch-forced contribution to observed Quaternary climate change, *Quaternary Science Reviews*, 23, 1001-1012, 2004
- Q. Yin, A. Berger, M. Crucifix, Individual and combined effects of ice sheets and precession on MIS-13 climate. *Clim. Past Discuss.*, 5, 557-593, 2009
- M. A. Young, R. S. Bradley, Insolation gradients and paleoclimatic record, NATO ASI Series, A. L. Berger et al. (eds.) , *Milankovitch and Climate, Part 2*, 707-713, 1984
- Z. Yu, Z. Ding, Nonlinear coupling between 100 ka periodicity of the paleoclimate records in loess and periodicities of precession and semiprecession, *Science in China, D*, 46, 10, 1077-1087, 2003
- N. Zeng, Quasi-100ky glacial-interglacial cycles triggered by subglacial burial carbon release, *Clim. Past Discuss.*, 2, 371-397, 2007