

# 氷期—間氷期サイクルに対する Milankovitch フォーシングの役割

岡村 隆成\*

## Role of Milankovitch Forcing in Glacial-Interglacial Oscillations

Takanari OKAMURA\*

### Abstract

The Quaternary climate of the last 2 million years is dominated by repetitive glacial-interglacial oscillations. The characteristics of glacial oscillations changed 1 Myr ago, at the mid Pleistocene. These cycles are characterized by a 100 kyr period during the past 1 Myr, and by a 40 kyr period before that. It is widely accepted that variations in Earth's orbit (Milankovitch insolation forcing) affect glacial oscillations. Orbital changes occur due to changes in precession, obliquity, and eccentricity. A better and more detailed understanding of glacial process is needed. To clarify the role of Milankovitch forcing, we adopted quasi-Milankovitch forcing which consisted of only significant frequency components of orbital forcing. This quasi-Milankovitch forcing was applied to a simple model of ice sheet volume. We conjecture that Milankovitch forcing is main driving force of glacial-interglacial oscillations.

**Key words:** Quaternary, Milankovitch forcing, orbital change, glacial oscillation, insolation

### 1. はじめに

第四紀は、現在から過去約 200 万年前までの期間を指しており、氷期と間氷期を繰り返している。この氷期振動は、過去 100 万年ほど前までは 10 万年周期で、それ以前では 4 万年周期であり、地球軌道の変動が大きな役割を果たしていると考えられている<sup>1)</sup>。この変動は Milankovitch フォーシングと呼ばれており、自転軸の歳差運動（気候的歳差と呼ぶ）、自転軸の傾斜角（赤道傾角と呼ぶ）および公転軌道の離心率（離心率と呼ぶ）の変化によって太陽から地球への放射熱量が変動する。この変動の周期は、おおよそ気候的歳差で 2 万年、赤道傾角で 40 万年、そして離心率で 10 万年であり、地球が受ける入射熱はこれらの周期で変動する<sup>2)</sup>。氷期—間氷期サイクルの周期と Milankovitch フォーシングの周期との関係や氷期サイクルの遷移など、理解がまだ充分でない以下の問題がある<sup>3)</sup>。

- (1) 海底の堆積物などの調査から氷期—間氷期の主な振動周期は 2 万年と 4.1 万年および 10 万年であるが、太陽から地球への放射入力熱の周波数帯の中で 10 万年周期は顕著な周期ではないこと（10 万年問題）
- (2) 最も大規模な氷期から間氷期への移行が地球の軌道変化の最小期に起っていること（ステージ 11 問題）
- (3) 地球の大きな軌道変動がないにも拘らず、おおよそ 80 万年前に氷期サイクルが 4.1 万年の振動周

期から 10 万年の周期に変化していること（周期遷移問題）

これらの問題に対して、堆積物記録と Milankovitch フォーシングの作用との関係<sup>4)~8)</sup> や二酸化炭素の大気—海洋系循環との関係<sup>9)~13)</sup> などの面から数多くの研究が発表されている。約 40 万年前のステージ 11 の間氷期は、太陽からの入射熱変動の最小期であり、現在、間氷期にあって、やはりステージ 11 と同様に入射熱変動の最小期に当たっている。将来、気候変動がどのように推移するかの手掛かりを掴むために、このステージ 11 の気候変動の研究<sup>14)~16)</sup> が盛んである。

ここでは、特に、Milankovitch フォーシングの気候的歳差、赤道傾角および離心率の 3 要素の周波数成分が、氷期振動に対してどのように影響を及ぼしているかを調べることを本論の目的とする。各章の構成として、2 章の氷期振動では、太陽からの入射熱量の周期変動と氷床体積量の変化の状況を述べる。氷床体積量は、深海堆積物中の酸素同位体  $\delta^{18}\text{O}$  の周期的変動を示す記録を代替の指標としている。3 章のモデルでは、氷床体積の成長と減衰のモデル式を提示する。4 章の準 Milankovitch フォーシングでは、太陽からの入射熱を気候的歳差、赤道傾角および離心率の周波数成分の構成と、さらにノイズを付加したモデルを提示する。5 章の結果と考察では、3、4 章で示したモデルを使って氷床体積の成長・減衰や位相同期などの周期特性に係わる解析の結果と考察を述べる。最後に、6 章で結論を示す。

### 2. 氷期振動

北半球北緯 65° 位置での夏季における太陽からの入射

平成 21 年 1 月 6 日受理

\* 大学院工学研究科機械・生物化学工学専攻/生物環境化学工学科・教授

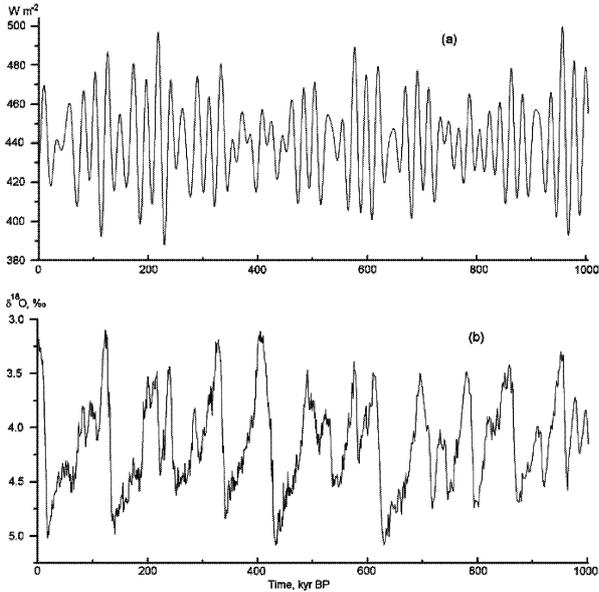


図1 過去100万年間の a) 北緯 65°, 6月の入射熱の変化 [Berger, Loutre, 1991] と b) 酸素同位体  $\delta^{18}\text{O}$  の記録 LR04 [Lisiecki, Raymo, 2005]

量を過去100万年前までの期間について図1(a)<sup>8),17)</sup>に示す。平均入射量は約  $440 \text{ W/m}^2$  で、入射量はほぼ±10%の範囲で振動している。地球の軌道は楕円で地軸の傾きがあることなどから、気候的歳差の2万年周期と赤道傾角の4.1万年周期、それに離心率の10万年周期がある。一方、図1(b)<sup>8),18)</sup>に海底堆積物中の酸素同位体  $\delta^{18}\text{O}$  の過去100万年前までのLR04の記録を示す。この値の変化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。おおよそ120万年前での氷床サイクルは4万年の周期を持っており、120万年から80万年辺りまでの期間に遷移域があり、それ以降現在まで10万年程度の長い周期に移行している(周期遷移問題)。この地球軌道の変化と  $\delta^{18}\text{O}$  のLR04記録の振動周波数をスペクトル解析した結果を図2<sup>8)</sup>に示す。地球軌道の変化による気候的歳差の1.9, 2.24および2.37万年の周期と赤道傾角の4.1万年の周期が顕著に現れている。これに対して、離心率の10万年近辺の周期はわずかに見られる程度である。LR04記録の解析結果からは、1.9, 2.24, 2.37万年の気候的歳差に相当する周期と4.1万年の赤道傾角に相当する顕著な周期が見られる。離心率の周期に相当する顕著な9.5万年の周期とその周辺にも数多くの周期が現れている。しかしながら、離心率の変化ではわずかにしか現れなかった周期に相当する周期が、このLR04の記録で顕著に現れることの疑問がある(10万年問題)。

### 3. モデル

氷期振動が非対称的な波形を持つ4万年や10万年の

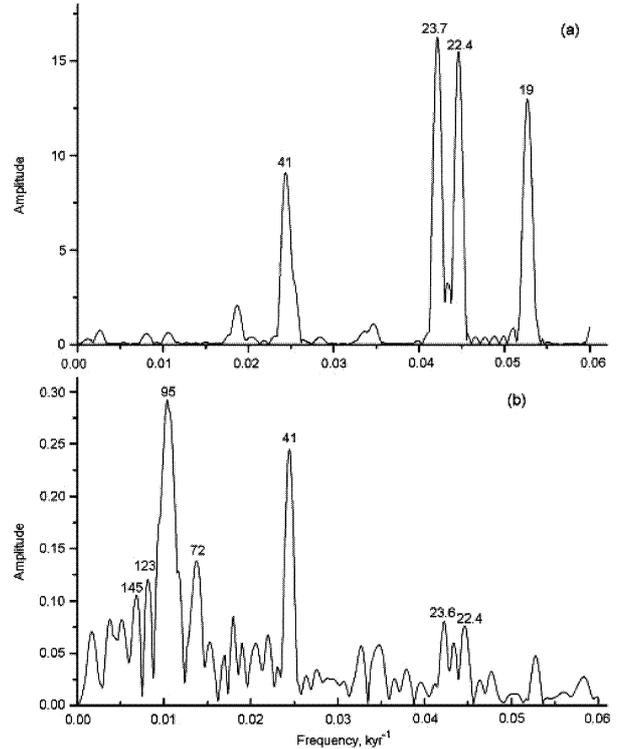


図2 周波数のスペクトル分析結果 a) 図1a)の北緯65°, 6月の入射熱, b) 図1b)の酸素同位体  $\delta^{18}\text{O}$

特定の周期を示すことやこの振動に対するMilankovitchフォーシングの役割を調べるために、簡単なモデルを使用する<sup>4),19)</sup>。このモデルでは、海水面積のon-offスイッチ機構を取り入れている。北半球での氷床体積量  $V$  は陸域での降雪速度  $P$  と太陽からの入射熱  $M$  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。

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

入射熱  $M$  は北緯  $65^\circ$  の位置で6月21日における入射量に依存するものとして、通常この値はMilankovitchフォーシングとして  $S + S_M I(t)$  の形で与えられる。 $S$  は平均入射熱で  $I(t)$  は入射量0平均値での時間変数  $t$  に対する単位変動量として規準化される。 $S_M$  はその定数である。降雪量の蓄積速度  $P$  は氷床量が多いと小さく、少ないと大きいと仮定する。これは氷床が成長して、そのアルベド効果によって大気温度が低下しその結果、海洋からの大気への蒸発量が減少して蓄積速度が低下する、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。

氷期から間氷期への移行のシナリオに付いては、多くの提案があり、その1つを以下に記す。氷床量がある最大値  $V_{\max}$  に到達すると、海水が急激に海洋を覆って大気温度は大きく低下する。そうすると陸地の氷床は次のような理由で急激に減少に向う。

- (1) 海水のアルベド効果が増加して海水温が低下する。
- (2) 海洋面を海水が覆うことで海水の蒸発量が減少する。そのため、降雨減少による砂漠地帯でのダストの増加と海水面低下による大陸棚の拡大によるダストの増加が起る。南極および周辺地域での氷床増加による地盤の圧力増大で火山活動の活発化でダストが増加する。よって CO<sub>2</sub> が減少して気温上昇につながる。
- (3) 氷床、海水共に減衰する。

よって、海水の成長による氷床の蓄積量  $P$  は次のように表現できる。

$$P = (p_0 - kV)(1 - a_{si}) \quad (2)$$

ここで、 $p_0$  と  $k$  は定数で、 $p_0$  は海水が完全に溶解してなくなった状態での蓄積速度であり、 $k$  は氷床の成長速度定数である。 $a_{si}$  は on の状態での海水の相対面積である。この海水の存在下での蓄積量の減少は、陸域での氷床の後退につながる。

太陽からの放射による地球への入射熱は次の式で与えられる。

$$M = (S + S_M I(t)) \cdot j \cdot n(t) \quad (3)$$

ここで、 $n(t)$  はホワイトノイズであり、太陽黒点や雲あるいはダストの影響を表わしている。1 を基準に  $\pm 1$  の単位幅で時間の関数として与えられる。 $j$  はその強度を表す係数であり、 $j=0$  でノイズの影響がない状態である。

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蓄積速度は、海水のないうる速度に戻るようになる。以上から、氷床の溶解と蓄積を組み合わせると、氷床の質量バランスは次のようになる。

$$\frac{dV}{dt} = (p_0 - kV)(1 - a_{si}) - (S + S_M I(t)) \cdot j \cdot n(t) \quad (4)$$

ここで、は海水が on のときは、 $a_{si} = a_{si-on}$  で、off のとき  $a_{si} = 0$  である。この式は、海水面積  $a_{si}$  が常に定数であ

れば線形であるが、氷床体積  $V$  が  $V_{\max}$  と  $V_{\min}$  の間で変化するとき、値が変わるので非線形となる。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。最大氷床体積量は、約 1 万年前の氷期の  $V_{\max}$  はおよそ  $50 \times 10^6 \text{ km}^3$  であり、この値を目安とする。相対海水面積は  $a_{si-on} = 0.3$  とする<sup>4)</sup>。これらパラメータの値を表 1 にまとめて示す。

#### 4. 準 Milankovitch フォーシング

Milankovitch フォーシングの単位変化量  $I(t)$  は、例えば、過去 100 万年の期間に関して図 1 に示した通りである。2 章で示した気候的歳差、赤道傾角および離心率の周期を持つ Milankovitch フォーシングが、氷床の成長、減衰にどの周波数成分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方法が取られている。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に、入射熱の変動は 3 つの軌道周期の主な周波数成分で構成されているものと仮定して、入射熱の変動成分  $I(t)$  を三角関数で近似している。この変動成分  $I(t)$  を準 Milankovitch フォーシングと呼ぶものとし、以下の式で表わす。

$$I(t) = \sum_{i=1}^n f_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (5)$$

ここで、 $f_i$  は  $i$  の周波数成分の強度を示す定数であり、 $\omega_i$  は同様の周波数、 $\phi_i$  は時間遅れである。周期は、気候的歳差の 1.9, 2.24 および 2.37 万年、赤道傾角の 4.1 万年および離心率の 9.5 万年の 5 成分とする。従って  $n=5$  である。遅れ時間  $\phi_i$  は地球の軌道から計算される値であるが、ここでは、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三角関数で近似して CO<sub>2</sub> や氷床体積のモデルの解析例が数例見られる<sup>20),21)</sup>。 $I(t)$  は単位変動量であるため、定数  $f_i$  は次の基準に従う。

$$\sum_{i=1}^n f_i \cong 1 \quad (6)$$

定数  $f_i$  の値は、図 2 のスペクトル解析の結果を参考にし、気候的歳差の 3 成分で同じ値 0.28 とし、赤道傾角で

表 1 モデルのパラメータ

Parameter	Short description	Value
$V_{\min}$	Minimum ice volume threshold	$3 \times 10^6 \text{ km}^3$
$V_{\max}$	Maximum ice volume threshold	$3 \sim 53 \times 10^6 \text{ km}^3$
$k$	Ice sheet constant growth rate	1/40 kyr
$p_0$	Precipitation rate	0.25 Sv
$S$	Constant ablation constant	0.21 Sv
$S_M$	Milankovitch ablation constant	0.023 Sv
$a_{si-on}$	Relative sea-ice area	0.3

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

表 2 準 Milankovitch フォーシングのパラメータ

$i$	$f_i(-)$	$\omega_i(1/\text{kyr})$	$\phi_i(-)$
1	0.28	$2\pi/19$	0.0
2	0.28	$2\pi/22.4$	$0.3\pi$
3	0.28	$2\pi/23.7$	$0.6\pi$
4	0.19	$2\pi/41$	$0.9\pi$
5	0.02	$2\pi/95$	$1.2\pi$

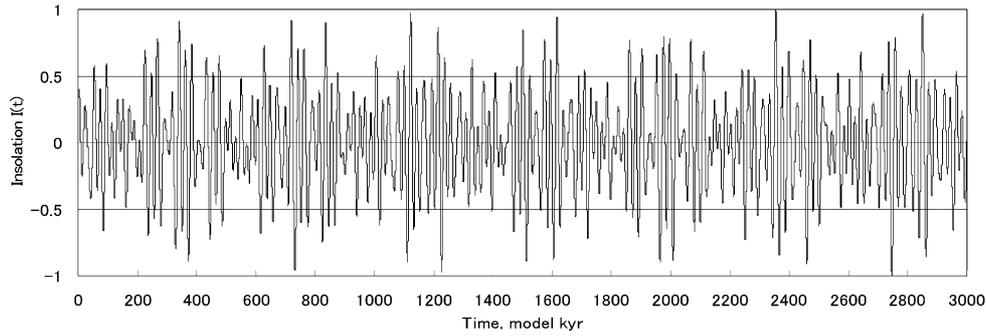


図3 300 万年モデル時間の準 Milankovitch 入射熱の変化

の値は気候的歳差での値の 2/3 程度の 0.19 とした。離心率での値は、前者の値に対して 1 オーダ下げた 0.02 の低い値を採用した。表 2 に計算で使用した  $f_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\phi_i$  の値を示す。

### 5. 結果と考察

300 万年間の準 Milankovitch フォーシングを入射熱量の単位変動  $I(t)$  を表わす (5) 式を用いて計算した結果を図 3 に示す。 $I(t)$  の値はプラス側の最大振幅の値がわずかに 1.0 を越える時間が 1 点のみあるが、期間全体を通して  $\pm 1.0$  の範囲に収まっている。振幅が大きい期間と小さい期間が約 40 万年の周期で繰り返している様子が見られる。この特性は、図 1 で示した北緯  $65^\circ$  での 6 月における過去の入射熱量の変動をよく模擬している。氷期振動の計算には、この準 Milankovitch フォーシングを組み込んだモデル式を使用する。10 万年周期の氷期一氷期サイクルを想定した氷床体積量の変化の様子を図 4 に示す。この計算は、最大氷床体積量  $V_{\max} = 46 \times 10^6 \text{ km}^3$  と最小氷床体積量  $V_{\min} = 3 \times 10^6 \text{ km}^3$  のしきい値を用いて 60 万年の期間で行った。(4) 式の積分計算の時間間隔は 10 年である。時間進行に伴う氷期振動の波形はそれぞれ異なっており、その周期はおおよそ 9 万年から 11 万年の範囲にある。氷床体積量  $V$  が時間進行と共に増加する成長期では、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している。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衰する。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。

氷床体積の初期値を変化させた場合の氷床体積量の時間推移に伴う様子を 300 万年の期間で調べた。体積量の初期値は 6 ケースとして、入射熱の単位変動  $I(t)$  およびノイズ  $n(t)$  の有無に対する計算を行った。氷床体積量のしきい値は、それぞれ  $V_{\max} = 46 \times 10^6 \text{ km}^3$ ,  $V_{\min} = 3 \times 10^6 \text{ km}^3$  としている。単位変動  $I(t)$  に準 Milankovitch フォーシングを適用してノイズなし  $n(t) = 0$  の条件 (図 5) では、6 ケースは、初期段階で個々に推移するが、2,000 万年程度経過すると全ての位相が同期する。一方、太陽からの入射熱が一定値でノイズなしとした  $I(t) = 0$ ,  $n(t) = 0$  の条件では、6 ケースは互いに関係なく推移して同期することはない。このことから、入射熱の変動は、氷床体積の周期的な振動に対してペースメーカーの役割を果たしている。ノイズを付加したノイズ強度の係数  $j = 0.1$  の条件では、6 ケースは全期間を通して位相同期することはない。ノイズがある強度レベルを超えると、これが位相同期の阻害要因になることが分かる。

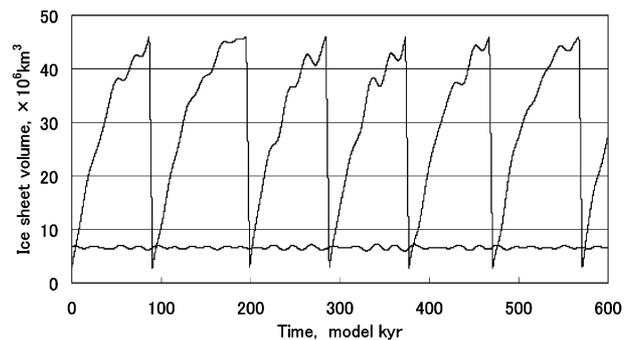


図4 60 万年間の準 Milankovitch フォーシング作用下での氷床体積の変化

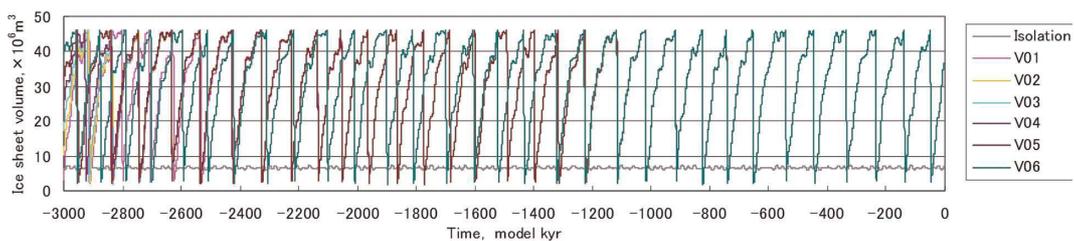


図5 300 万年間の準 Milankovitch フォーシング作用下での氷床体積の変化 6 通りの初期値での計算

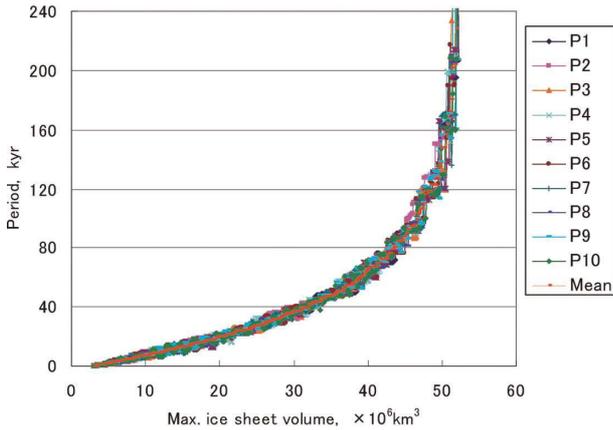


図6 最大氷床体積  $V_{\max}$  に対する氷期—間氷期サイクルの周期

準 Milankovitch フォーシングに含まれる複数の周波数の中でどの周波数が位相同期に影響しているのか、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、 $V_{\max}$  を設定して、氷期サイクルの計算開始から氷床体積  $V$  の振動波形に計 10 個の番号付けを順次行い、その波形の周期を P1 から P10 とした。また、これら 10 個の周期の平均値も求めた。この計算条件として、最小値は一定として  $V_{\min}=3 \times 10^6 \text{ km}^3$  とし、最大値は  $V_{\max}=3 \sim 53 \times 10^6 \text{ km}^3$  の範囲とした。気候的歳差の周期 1.9 万年の他に 2.24, 2.37 万年の周期および赤道傾角の 4.1 万年の周期に付いても、1.9 万年周期の場合と同様、それぞれの単独周期で計算を行い、 $V_{\max}$  と周期との関係および周期の度数分布を求めた。1.9 万年周期と全く同じように、基本周期とその整数倍周期で位相同期が起り、度数分布でそれら周期の高いピーク値を示した。次に、 $I(t)$  の周期が気候的歳差の 3 周期と赤道傾角の 1 周期の 4 要素の場合に付いて、単独周期の場合と同様に計算し、その周期特性を求めた。図 6 に  $V_{\max}$  と氷期サイクルの周期との関係を示す。 $I(t)$  が単独周期の場合に比べると、P1 ~ P10 個々の振動周期が分散しているために位相同期の周期を特定することは難しいが、度数分布ではピーク値を持つ周期が多数存在して複雑な分布を呈している。

ここで特徴的なことは、気候的歳差、赤道傾角の基本周期と同じ氷期サイクルの周期が、4.1 万年以外には見られないことである。 $I(t)$  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があったが、この複数周期を持つ  $I(t)$  と氷期サイクルの周期の間には対応関係が希薄になっている。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である。また、最も短い 1.9 万年の基本周期より短い周期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。過去 140 万年間の堆積物の調査から 94.9~131.2, 35.8, 21.2, 412.9, 45.3, 17.7 および 9.7 千年の周期の記録が報告<sup>22)</sup>されており、太陽からの入射熱変動の基本周期と異なる周

期やそれよりも短い周期が示されている。これらの周期は Milankovitch フォーシングと海水面の緩やかな変動に起因すると推測されている。また、過去 6,000 年の期間の調査結果から、1,450, 117, 64 および 57 年の短周期の記録が報告<sup>23)</sup>されており、この原因として、太陽からの放射熱の変動としている。これら堆積物の記録に現れる多くの周期は、準 Milankovitch フォーシングを用いたモデルによって得られた計算結果からも現れている。

一方、平均周期のピーク値は、P1~P10 周期のピーク値と一部一致するが、多くの場合この両者の値は異なっている。この様相は、 $I(t)$  が単独周期の場合の周期特性と大きく異なる点である。この不一致の原因を探ってみる。P1~P10 周期が、平均値の周期に集合している領域 ( $V_{\max}=46 \times 10^6 \text{ km}^3$  近辺) があると共に、平均値よりも長い周期の集団と短い周期の集団に 2 分化されている領域 ( $V_{\max}=47 \times 10^6 \text{ km}^3$  近辺) がある。P1~P10 の個々の周期に注目すると、これらは平均値の周期に一致する場合があると共に、平均値周期よりも長いあるいは短い周期を  $V_{\max}$  が増加するに従って目まぐるしく入れ替わりながら変化している様子が見られる。一方、平均値の周期は  $V_{\max}$  が増加すると共に、 $V_{\max}$  のある値の範囲で一定値を取りながら、ステップ状に増加している。このような現象は、氷床体積が入射熱変動  $I(t)$  に応答して変動し、位相同期しているためである。

Milankovitch フォーシングの周期変動成分の中で、特に離心率の 9.5 万年周期の氷床振動への影響を調べるために、この周期と気候的歳差、赤道傾角の全ての周期成分からなる準 Milankovitch フォーシングの入射熱変動  $I(t)$  を用いて同様の計算を行った。その結果を上記結果と比較すると、ここでは図示していないが、差異はほとんど認められない。上記の 9.5 万年の氷床サイクルの周期は、 $I(t)$  に離心率の 9.5 万年の周期が存在しない条件で明確に現れていることから、堆積物の  $\delta^{18}\text{O}$  の記録で現れる 9.5 万年や 11.5 万年の周期は、気候的歳差の 1.9, 2.37 万年周期の整数倍 ( $19 \text{ kyr} \times 5$ ,  $23.7 \times 5$ ) 周期が主要要因であり、これに離心率の 9.5 万年の周期が組み合わされていると言える。

## 6. 結 論

入射熱変動  $I(t)$  に気候的歳差、赤道傾角および離心率の主な周期を備え、これらの周期を三角関数で模擬した準 Milankovitch フォーシングを導入して、入射熱の変動が氷床体積の変化過程や振動特性に与える影響を調べ、次の結論を得た。

1. 太陽からの地球への入射熱に変動がなければ、氷期振動の位相同期はない。変動があることによって、氷期体積は位相同期する。
2. 入射熱が単独の周期を持つ場合には、氷床体積の

変動周期は単独周期を基本周期としてその整数倍の周期を持つ。

3. 入射熱に準 Milankovitch フォーシングを用いたモデルでは、気候の歳差、赤道傾角および離心率の基本周期はほとんど表れずに、これらの整数倍と組み合わせの周期が多数表れる。
4. 氷床振動の周期が入射熱の変動周期と位相同期する場合、個々の周期がこれらの平均値とほぼ同じ値の範囲にあるとき、個々の周期が平均値を挟んで2分化する2ケースが見られる。例えば、2分化の場合、10万年周期付近では、9.4、9.6万年周期と11.7、12万年周期が卓越して出現する。これは過去80万年前までの10万年周期の期間での周期特性をよく模擬している。

### 参考文献

- 1) M.E. Raymo, P. Huybers, Unlocking the mysteries of the ice ages, *Nature*, 451, 284-285, 2008.
- 2) 伊藤孝士, 阿部彩子, 第四紀の氷期サイクルと日射量変動, *地学雑誌*, 116, 6, 768-782, 2007.
- 3) D. Paillard, Glacial cycles: Toward a new paradigm, *Reviews of Geophysics*, 39, 3, 325-346, 2001.
- 4) Y. Ashkenazy, E. Tziperman, Are the 41 kyr glacial oscillations a linear response to Milankovitch forcing?, *Quaternary Science Review*, 23, 1879-1890, 2004.
- 5) L.E. Lisiecki, M.E. Raymo, Plio-Pleistocene climate evolution: trends and transitions in glacial cycle dynamics, *Quaternary Science Reviews*, 26, 56-69, 2007.
- 6) P. Huybers, Glacial variability over the last two million years: an extended depth-derived age model, continuous obliquity pacing, and the Pleistocene progression, 26, 37-55, 2007.
- 7) S.-Y. Lee, C.J. Poulsen, Amplification of obliquity forcing through mean annual and seasonal atmospheric feedbacks, *Climate of the past*, 4, 205-213, 2008.
- 8) V.A. Bol'shakov, How long will the "precession epoch" last in terms of Pleistocene glacial cycles?, *Russian Journal of Earth Sciences*, 10, ES3004, 2008.
- 9) 柏木洋彦, 鹿園直建, *地学雑誌*, 新生代におけるグローバル炭素循環と気候変動との関係, 112, 4, 373-488, 2003.
- 10) 松本克美, 最終氷期以降の海洋炭素循環と収支に関する研究, *地球化学*, 39, 47-62, 2005.
- 11) W.E. Ruddiman, Ice-driven CO<sub>2</sub> feedback on ice volume, *Climate of the Past*, 2, 43-55, 2006.
- 12) W.F. Ruddiman, Orbital changes and climate, *Quaternary Science Reviews*, 25, 3092-3112, 2006.
- 13) 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 pCO<sub>2</sub>, *Quaternary Science Reviews*, 25, 3150-3184, 2006.
- 14) U.C. Muller, J. Pross, Lesson from the past: present insolation minimum holds potential for glacial inception, *Quaternary Science Reviews*, 26, 3025-3029, 2007.
- 15) J.P. Helmke, H.A. Bauch, U. Rohl, E.S. Kandiano, Uniform climate development between the subtropical and subpolar Northwest Atlantic across marine isotope stage 11, *Climate of the Discussions*, 4, 433-457, 2008.
- 16) A.J. Dickson, M.J. Leng, M.A. Maslin, Mid-depth South Atlantic Ocean circulation and chemical stratification during MIS-10 to 12: implications for atmospheric CO<sub>2</sub>, *Climate of the Past*, 4, 333-344, 2008.
- 17) A. Berger, M.F. Loutre, Insolation values for the climate of the last 10 million years, *Quaternary Science Reviews*, 10, 297, doi: 10.1016/0277-3791(91)90033-Q, 1991.
- 18) L.E. Lisiecki, M.E. Raymo, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ<sup>18</sup>O records, *Paleoceanography*, 20, PA1003, 2005.
- 19) H. Gildor, E. Tziperman, Sea ice as the glacial cycles climate switch: Role of seasonal and orbital forcing, *Paleoceanography*, 15, 6, 605-615, 2000.
- 20) A.M. Hogg, Glacial cycles and carbon dioxide: A conceptual model, *Geophysical Research Letters*, 35, L01701, 1-5, 2008.
- 21) P. Huybers, E. Tziperman, Integrated summer insolation forcing and 40,000-year glacial cycle: The perspective from an ice-sheet/energy-balance model, *Paleoceanography*, 23, PA1208, 1-18, 2008.
- 22) S. Niggemann, A. Mangini, M. Mudelsee, D.K. Richter, G. Wirth, Sub-Milankovitch climate cycles in Holocene stalagmites from Sauerland, Germany, *Earth and Planetary Science Letters*, 216, 539-547, 2003.
- 23) W. Yang, D.J. Lehrmann, Milankovitch climatic signals in Lower Triassic (Olenekian) peritidal carbonate successions, Nanpanjiang Basin, South China, *PALAEO*, 201, 283-306, 2003.