



SYMPOSIUM

全地球史解説

—MULTIER-地球多圏間相互作用計画—

ミランコビッチクロックの進化

伊藤 孝士
いとう たかし

編集部

受理：1993年1月29日

筆者：東京大学理学部地球惑星物理学教室 大学院生

地球第四紀の氷期間氷期サイクルを駆動して来たと言われているミランコビッチサイクルは、気候系に対する入力の中でもそのメカニズムが明確に特定できる数少ない要因として盛んに研究されてきた。しかし、現在一般に知られているミランコビッチサイクルの特徴的周期は月地球系の力学進化に伴って大きく移り変わって来たはずである。このことと、太古代・原生代の縞状鉄鉱床に見られる周期的な縞模様とを考え合わせると、ミランコビッチサイクルの進化を理論的に追うことにより地球史を解読する上での相対年代測定基準、いわゆるラップタイムクロックを確立できるのであるのではないかと考えられる。本稿では、月地球系力学進化の理論的・観測的推定に伴って現れるあらゆる不確定性に対して大胆な仮定を置くことにより、40億年前までのミランコビッチサイクル進化の標準モデルを作り上げ、今後のより定量的な研究への礎を提供するものである。ひとたびこのような相対年代測定基準（ミランコビッチクロック）が確立できれば、堆積速度をはじめとする古環境推定のための重要なデータが数万年の精度で得られることになり、その意義は極めて大きい。今後はモデルの精度を向上させ、サンプル（堆積物）の年代測定との比較に耐え得る結果を出して行くことが課題となる。但し、ミランコビッチサイクルに現れる日射量変動が堆積物に現実的に記録されるかどうかは地球の気候システムの応答特性に大きく依存しており、過去の地球表層環境の振舞いと合わせて考えなければ説得力のある地球史解読は可能にならないであろう。

1. はじめに

太陽系の惑星は相互の重力摂動によりその軌道要素と自転軸の傾きを刻々と変えている。これに伴い、惑星表面に入射する太陽放射の量と分布は周期的に変化しており、気候変動の主要な一因をなすと言われている。この周期変動のタイムスケールは $10^4 \sim 10^6$ 年であり、少なくとも地球の第四紀における氷期間氷期サイクルのペースメーカーとなって来たことは間違いない（森山，1987）。

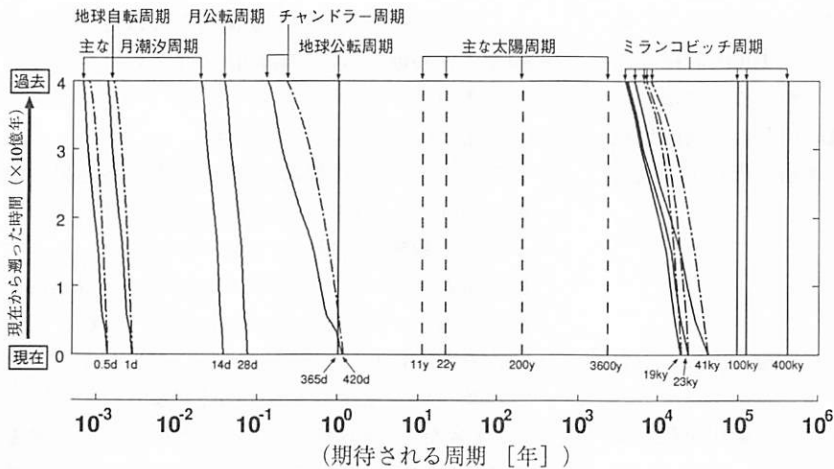


図1 月地球系に関するラップタイムクロック進化の様子。参考までに、一般に太陽周期と言われるものも書き添えた(太破線)。潮汐やミランコビッチサイクルに見られるように、縦軸を年代に取るとモデルによる違いが顕著に現れる。実線はAbe (1992)のモデル、一点鎖線はTureotte (1997)のモデル。縦軸をLODやdynamical ellipticityなどのモデル非依存パラメータに取るとこの差はなくなる。

こうした入射日射量の変動、いわゆるミランコビッチサイクルの研究は、その基礎となる天体力学の摂動問題まで遡るとかなり昔から行なわれてきた。その理由は、この問題で扱われる力学系が質点の惑星と剛体の地球という古典力学の典型例であって、しかも対象となる惑星が冥王星を除く8個だけなので、計算機がなかった時代でもかなり精密に運動方程式を解くことができるためであった。しかしながら、天体力学計算が質点-剛体系の理論をもとに進められて来たのは、単に $10^4 \sim 10^6$ 年スケールでは惑星系がこのような古典力学近似を満たすと思われて来たからだけであり、計算が簡単になるということ以外にアカデミックな根拠はない。ここですぐに予想されることは、地球を剛体とみなすことができない 10^9 年という長い時間スケールでは、潮汐摩擦による月地球系の力学進化によって月地球間距離と地球の自転速度が変わって来るので、これに伴ってミランコビッチサイクルの特徴的周期自体が進化して来たに違いないということである。本稿ではこの問題に焦点を当て、超長期でのミランコビッチサイクル進化についての展望と予備的な結果について述べる。

ミランコビッチサイクル進化の理論計算は地球史解明の上でどのような役割を果たすのであろうか。地球を含む太陽系の惑星の歴史を読む上では、複数の時計を設定しその相互で較正を行なうことが不可欠になる。例えば、ジルコンなどを用いて

行なわれる放射年代決定法などは、その精度の高さからサンプルの絶対年代を決定する上で極めて有効な方法となっている。これに対しミランコビッチサイクルは、堆積物中のマーカーとマーカーの間の相対年代を決定するためのラップタイムクロックとして位置付けることができる。例として、縞状鉄鉱中の縞模様を挙げるができる。縞状鉄鉱の垂直切断面には数多くの周期的な縞模様が見られるが、もしもこれがミランコビッチサイクル起源だとすれば、当時のミランコビッチサイクル周期を理論的に推定することによって縞と縞の間の相対年代を求めることができる。そうなれば、数十億年前の堆積物に対する数万年精度の相対年代測定基準を確立することができることになる。これこそまさに『ミランコビッチクロック』と呼ぶ所以である。参考までに、月地球回転力学系に関するラップタイムクロック進化の一覧表を図1として掲げた。

2. 自転軸の運動方程式と歳差定数

ミランコビッチサイクルは、惑星自転軸の一般的な運動方程式

$$\frac{ds}{dt} = \alpha (s \cdot n)(s \times n)$$

を解き、自転軸の運動を知ることから始まる。ここで s は地球の自転軸ベクトル、 n は地球軌道面

(黄道面)の法線ベクトルである。方程式(1)の解を求めるにはタイムステップを1000年程度にとって時間積分すれば良い。しかしここでは、ミランコビッチサイクルの特徴的周期の時間的進化のみを問題にしているので、運動方程式中の歳差定数

$$\alpha = \frac{3n^2}{2\omega} \frac{C-A}{C} \left\{ (1-e_s^2)^{-3/2} + \frac{M_m}{M_s} \left(\frac{a_s}{a_m} \right)^3 (1-e_m^2)^{-3/2} (1-3/2 \cdot \sin^2 i_m) \right\} \quad (2)$$

に上述の月地球系力学パラメータの変化を代入することだけで議論することができる。方程式(1)は \mathbf{s} の各成分について簡単に線形化できるし、ここではミランコビッチサイクルの周期という周波数領域での議論のみに的を絞っているので、歳差定数だけの議論で話が済むのである。なお、以下の議論を進めるにあたっては、次の4つの仮定を明確に置く必要がある。つまり、(1)月地球系の角運動量の保存、(2)太陽系の歴史の大部分で惑星の軌道が安定であること、(3)地球の内部密度構造が派手に変化しないこと、(4)地球のdynamical ellipticity(極方向の慣性モーメントを A 、赤道方向の慣性モーメントを C としたときに $(C-A)/C$ で表される量。日本語では『力学的偏平率』などと呼ぶ)が自転速度の二乗に比例すること、である。次に、これらの仮定について少し検討してみる。

仮定1) 月地球系の角運動量の保存

トルクを及ぼすような外力が働かなければ系の角運動量は保存する。この意味で角運動量は力学系を記述する上でもっとも重要な量であると言うことができよう。月地球系の場合、外力に相当するものは太陽との潮汐相互作用であるが、これは驚くほど小さい。図3(e)、図4(e)にはAbe *et al.* (1992)による月地球系の角運動量の変化を示しているが、これによれば、太陽との潮汐相互作用により失われる角運動量は40億年間で約1%以内と非常に小さいことがわかる。地球の場合には、月形成時の巨大衝突以後に角運動量を大

きく変化させるイベントがあったとは考えにくいので、この仮定は許容範囲内で正しいと言えることができる。

仮定2) 惑星の軌道の安定性

現在の天体力学業界には、太陽系の各惑星の運動はchaoticであるから運動方程式を何億年にもわたって数値的に解いても意味がないという、いわゆる太陽系カオス説がはびこっている(Sussman & Wisdom, 1992; Laskar, 1990)。しかしここで注意しなければならないのは、『カオス』という言葉が何を意味するかが明瞭でないことである。『カオスだからわからない』と言ったのでは何も始まらない。地球科学を研究する側に必要な見識は、「どうカオスで、どうわからないのか」を明らかにすることであろう。その意味でここでは、『太陽系はカオスだからミランコビッチサイクルを40億年前まで遡ることは不可能である』というあきらめをせず、太陽系がカオスでないとしてミランコビッチサイクルを40億年前まで遡り、次にはカオティックな軌道運動の影響がミランコビッチサイクルにどの程度影響を及ぼすのかを評価する、という立場を取る。太陽系カオス状態に対するこうした定量評価は我々の今後の課題なのだが、さして大きな影響はないだろうというのが予想である。ひとつには太陽系カオス説の旗頭であるLaskar自身の論文(Laskar & Robutel, 1993; Laskar *et al.*, 1993)による地球自転軸の安定性に関する議論が我々の予想を支えてくれている。また、昔ほど月が地球に近いということは、歳差運動に関する他の惑星からの重力摂動の効果が昔ほど相対的に小さいということになるので、もしも軌道運動がカオティックだったとしてもミランコビッチサイクルには大して影響しないであろうというのが我々の考えである。

定量的な見きわめは今後の課題だが、いずれにせよこの仮定も今回の研究の範囲内では正しいものとして話を進める。

仮定3) 地球の内部密度構造の不変性

この仮定の妥当性は実は良くわからない。地球の金属核が形成されたのが惑星集積の直後(10^8

年以内) だというのが事実だとしても (Stevenson, 1990), それがそのまま保たれて現在に到っているとはとても思えないからである. Kumazawa & Yoshida (1992) で唱えられているように金属核中の密度成層の大規模な崩壊が生じれば地球の自転速度に影響が及ぶのは必至であり, 後に示す本論での計算結果も大きな修正を余儀なくされる. けれどもまた, そのような事象が地球史においていつどのように起こったのかはよくわかっていないし, そもそも実際に起こったのかどうかということも未だに検証されていない. ミランコビッチサイクル進化の予備的モデル構築という立場に立てば, このような場合には「内部構造が変化しなかった場合にはこうである」として話を進めてみるというのが常套手段であり, ここでもその基本方針に乗っ取って, 「地球の内部密度構造は過去 40 億年間にわたって変わらなかった」という仮定を正しいと置くのである.

仮定 4) Dynamical Ellipticity と自転速度

この仮定は 3 の内部構造の不変性とも密接に結び付いたものである. 完全に均質な粘弾性的性質を持つ回転楕円体という理想的な物体を考えると, 慣性モーメントの比 $(C-A)/C$ (以後 dynamical ellipticity と呼ぶ) は扁平率 f (flattening) に等しく, 更に自転角速度 (ω) の二乗に比例する. これは均質な粘弾性回転楕円体の場合は事実だが, 地球は百歩譲って球対称であるとしても密度成層を持っているので均質ではなく, この関係が完全に成り立つわけではない. しかしまた, 先見的に内部構造モデル (例えば 1066 B や PREM のような) を与えてしまえば dynamical ellipticity と自転角速度の関係を一意的に導くことが可能だということも明らかである. 実際にこれは Dennis (1986) らによって極めて精密な定量的解析がなされている. しかしながら, Dennis が実際の観測データと合わせるために計算した 5 億年前までの dynamical ellipticity の値は, 二乗に比例するという扁平率が自転速度の仮定で筆者らが求めた f の値とさほど違いがないことが簡単に確かめられる. 今までに置いた大胆な仮定 (内部構造の

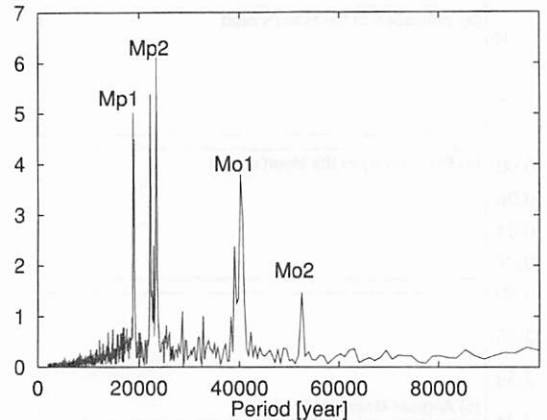


図2 地球の北緯 65 度における夏至一日平均の日射量時系列データのパワースペクトル. 過去 100 万年分を解析した. スペクトル解析の手法に凝らず, 単純なフーリエ変換を使っているのであまりきれいな結果が出ていないが, 19000 年, 23000 年, 41000 年, 54000 年のところに明瞭なピークがあり, ここではそれぞれに M_{p1} , M_{p2} , M_{o1} , M_{o2} という名前を付けた. 記号の意味は本文を参照のこと.

不変性, 月地球角運動量の保存など) に比較すればこれは極めてまともな結果と言わざるを得ず, 本稿の結果はすべてこの計算に基づいている.

3. ミランコビッチクロックの進化

さて, 以上の仮定をすべて正しいと思えば, 後は式 (2) によって 40 億年前までミランコビッチサイクルの特徴的周期の変遷を辿ることができる. 図 2 は, 過去 100 万年間の地球大気上端への入射日射量の時系列を単純なフーリエ変換によってパワースペクトルにしたものである. 四個のピークが目立つのが特徴であるが, このうち短周期側の二つが自転軸歳差角の変化によるもの, 長周期側の二つが赤道傾角の変化によるものなので, 便宜上 M_{p1} (Milankovitch Precession 1), M_{p2} , M_{o1} (Milankovitch Obliquity 1), M_{o2} と名付けることにする. 初めの三つは非常に有名だが, 最後の M_{o2} はピークの大きさが小さいためにあまり知られていないようであり, ここでの進化の議論でも対象としない. M_{o2} を除くこれら三個のピークが時代を遡るとともにどのように移り変わっていくのかを追ったのが図 3 である. ここには, Abe *et al.* (1992), Turcotte *et al.* (1977)

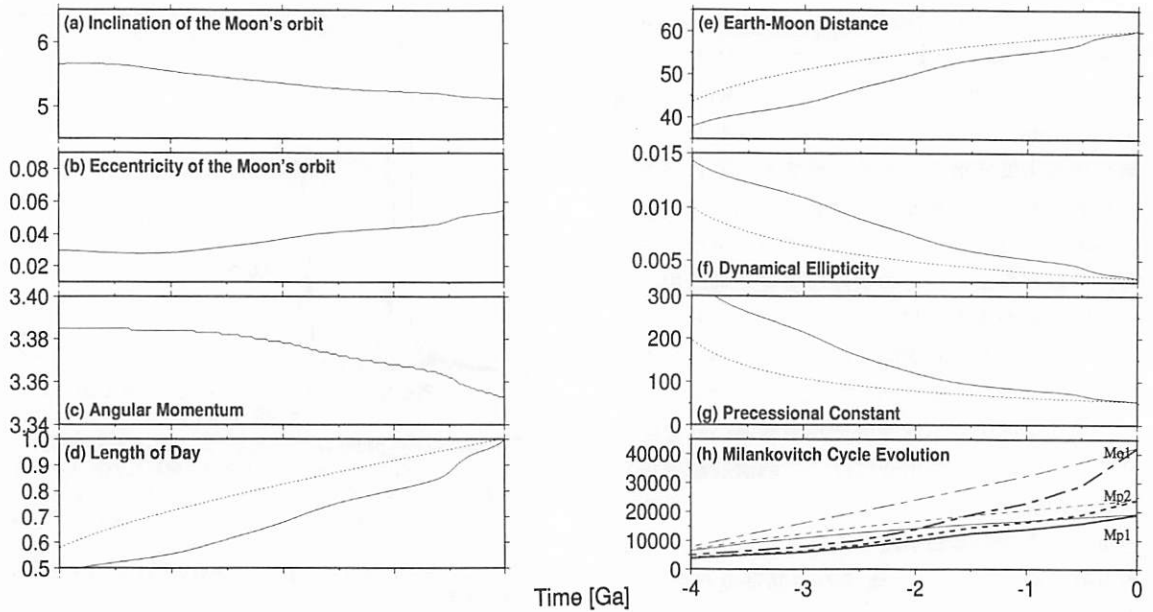


図3 月地球系ダイナミクスの進化を採り入れたミランコビッチサイクルの特徴的の周期の変遷。上から順に、(a) 黄道面に対する月軌道面の傾斜角 (単位は度), (b) 月軌道の離心率 (無次元), (c) 月地球系の角運動量 (単位は $10^{34} \text{ Kg/m}^2 \text{ s}^2$), 以上三個の結果は Abe *et al.* (1992) によっているが, 事実上ほとんど変化しない量である。Turcotte *et al.* (1977) の場合はこれらをすべて一定としている。(d) Length of Day (LOD, 現在値を1とする), (e) 月地球間距離, (単位は地球半径 R_E), (f) 地球の dynamical ellipticity (無次元), (h) 歳差定数 α (単位は arcsec/year), (g) ミランコビッチサイクル周期 M_{p1} (実線), M_{p2} (破線), M_{o1} (点線) の進化の様子 (単位は年)。LOD, 月地球間距離, dynamical ellipticity, 歳差定数のグラフには線が二本ずつあるが, 破線が Turcotte *et al.* (1977) のモデル (Model T と呼ぶことにする), 実線が Abe *et al.* (1992) のモデル (Model A と呼ぶことにする) によるもの, また, (g) では太線で書いた三本が Abe *et al.* (1992) のモデル, 細線が Turcotte *et al.* (1977) のモデルによるものである。横軸を年代に取った時のモデルによる結果の違いに注目する必要がある。

による月-地球力学系の物理パラメータの時間変化も一緒に掲載してある。念のために言っておけば, Turcotte *et al.* (1977) は月の軌道半径が時間の $2/13$ 乗に比例して増大するという簡単な仮定に乗った解析的計算結果, Abe *et al.* (1992) の方は太陽潮汐の効果や非軸対称・南北非対称な海陸分布の影響をも考慮した極めて複雑かつ大規模な数値計算を行なった結果である。まず図3は横軸を絶対年代に取ったプロットであり, 直観的にわかりやすい。昔ほど月と地球の距離が近かったので地球の自転速度は速く, それに応じてつぶれ具合 (dynamical ellipticity) も大きく, 歳差定数 α の値も大きい。系のこうした振舞いに対してミランコビッチサイクルの周期がどう変わるかを示したのが最下段の (h) である。定性的に明らかだが, 昔ほど歳差定数が大きかった, つまり

歳差の周期が短かったということは, ミランコビッチサイクルも短周期側に偏っていたことが予想される。計算結果はこの予想を裏付けるものである。このような結果は Walker & Zahnle (1986) によって定性的に, Berger *et al.* (1992) によって5億年前まで定量的に扱われたことがあったが, 大胆な仮定を置いたとはいえ今回の結果はミランコビッチサイクル進化を 10^9 年スケールで定量的にまともに扱った初めてのものであり, その持つ意味は極めて大きいと確信する。地球史解読に於ける相対年代測定基準としてのミランコビッチクロック確立に向けての第一歩を踏み出すために満足できる結果であると考えられる。

さて, 図3を見て気が付くことは, 横軸を年代に取った場合にはモデルの違いによってプロットに大きな差が付いてしまうということである。今

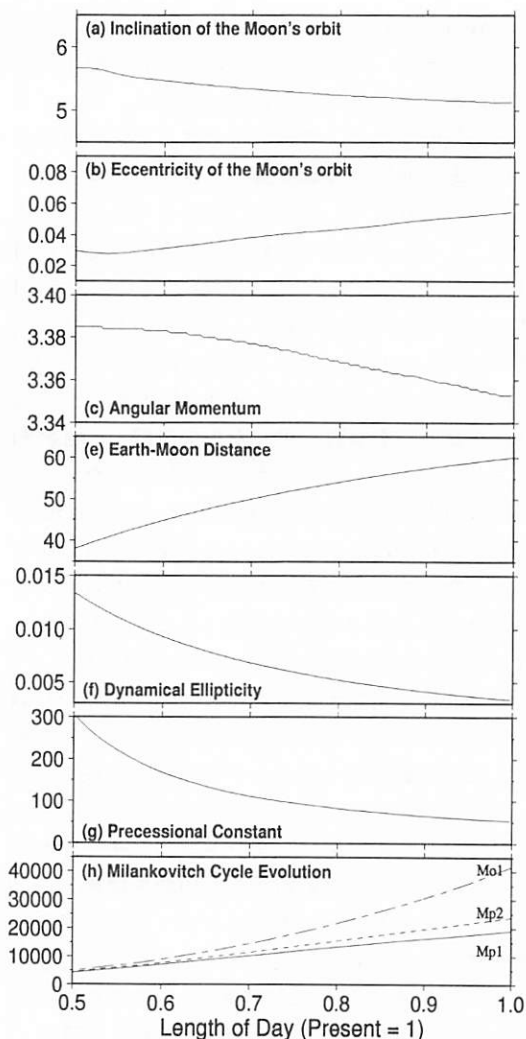


図4 月地球系ダイナミクスの進化を採り入れたミランコビッチサイクルの特徴的の周期の変遷。今度は横軸を Length of Day (LOD) に取っている。モデルによる違いは現れない。グラフの説明はすべて図3と共通。ただし横軸が LOD なので、図3の (d) に相当するものはない。各曲線の絶対年代との対応は図3を参照のこと。

回考えたふたつのモデルの共通点は、月地球系の角運動量とエネルギーが保存していること、時間を遡ると46億年前に月と地球がぶつかってしまうことの二点であり、潮汐摩擦の効かせ方はまったく異なっている。すなわち、年代というモデル依存のパラメータを横軸にとるとまったく違う結果に見えてしまうのである。そこで今度は、横軸

を Length of Day (LOD) の現在値との比でプロットしたものを図4に示す。LODは自転速度の-1乗に比例する量であるから、今述べたような理由によって横軸をLODにした場合にはふたつのモデルからの結果が完全に一致する。海陸分布がどうであろうと、月地球系の角運動量と地球の内部密度構造が変わらない限り（そしてこれは前述の仮定からあまり変わらないはずであると置いた）結果は同じになる。このような場合には、横軸を絶対年代とLODの二種類でプロットし、読む者が己の目的と都合で解釈するというのが理想である。

4. 新たなる問題点

今回ミランコビッチサイクル（気候システムに対する外力としての入射日射量の変動という意味）の進化の予備的結果を提唱したことで、我々が新たに考えるべき問題が山のように発掘された。今回の結果（図3・図4）は恐らく定性的に、またある程度は定量的にも正しいであろう。もっと基本的でかつ重大な問題は、太古代や原生代の堆積物にミランコビッチサイクルが記録されるのかどうか、そしてもし記録されていたとしても、そこからどのような情報を導き出すことが出来るのかということである。前者の疑問に対する楽観的な解答は、「あれだけ周期的に、しかも数多くのサイクルが繰り返されているのだから、原因としては潮汐かミランコビッチサイクルくらいしかない。しかし潮汐の振幅の大きなものは一日や半日という極めて短い周期しか持っていないので、堆積速度の面で無理がある。となるとやはりミランコビッチサイクルだ」というものであろう。しかしこれは厳密な答にはなっていない。たとえ図1の縞の原因になり得る周期を持つものが入射日射量の変動しか存在しないとすると、果たしてそれが堆積過程に反映される保証はどこにもないのである。そもそもミランコビッチサイクルに現れる日射量変動が現実的に堆積物に記録されるかどうかは地球の気候システムの応答特性に完全に依存している。しかも、大気が厚いか海陸分布が複雑であ

るなどの原因が積み重なることによって、気候システムの応答は入力に対してどんどん非線形性を増していく（入力からだけでは出力の特性がわからなくなる）。火星のように大気が希薄でかつ海洋もないような状況であれば、極冠あたりには日射量変動とリニアな関係を持つ縞々が延々と記録されているのかも知れない (Toon *et al.*, 1980)。けれども、20 億年前、30 億年前の地球大気は極めて厚く、大気上端に入射する日射量がたかだか 20% 増減しただけで下界にどれほどの影響が及ぶのかは甚だ大きな疑問が残るところである。そもそも現在（第四紀）の薄い大気のもとでの氷期間氷期 10 万年サイクルでさえミランコビッチサイクルでは説明できず、あまつさえ最近の琵琶湖底堆積物の粒度分析からは 3 万年だの 6 万年だの 110 万年だのという奇怪なスペクトルが前述の M_{p1} , M_{p2} , M_{o1} と同程度のパワーで得られてしまっていたりする (山本ほか, 1992)。ここまで来ると、一体我々は縞々に何を見ているだろうという問題にたどり着いてしまう。さらに追い打ちをかけるならば、もしも堆積物に見られる縞々がミランコビッチサイクル起源だということがはっきりしたとしても、そこから古環境に関するどのような情報が読みとれるのかがまだまだ判然としない。例えば、BIF (Banded Iron Formation) の縞々は古海洋の酸化状態の変化を表しているものとも言われている (Trendall & Morris, 1983)。酸化鉄が堆積している間は海洋は酸化的であり、そうでない時は還元元的であって、ミランコビッチクロックによってそのリズムを解明することが出来るという希望が持てるのである。多田 (1991) は日本海の事例について深海掘削コアサンプルの周回な解析を行ない、氷期には海水準が下がって海峡深度が浅くなり日本海への栄養塩類の供給が減少したために底層水が還元元的になり、間氷期には逆に栄養塩類の供給が増加して底層水が酸化的になって、それが堆積物に記録されていることを明らかにした。しかしこのような詳細な解析はサンプルが豊富な第四紀についてだから可能なことであって、20 億年前、30 億年前といった古い時

代の資料についてここまで言えるかどうかは全く不確かである。そもそも深層水の酸化状態が海洋循環に影響を受けていないはずはなく、それぞれ非線形気候システムの独壇場である。人知及ばぬ領域である面妖な地球表層の気候システムを解明できない限りこうした問題には答えられないわけだが、よしんば現在の境界条件のもとでそれが解けたとしても、Cryptozoic の境界条件（それ自体が何であったかすらわからない）のもとでの気候システムがわかったことにはならないのである。

以上の他にも越えるべき難関は星の数ほどあり、ひとつひとつを解説し出したら何年経っても終わることはないし、それは本稿の目的ではない。世の中はわからないことで溢れており、どれがわかっていてどれがわかっていないのかを見分け、なぜわからなくなっているのかとどうやったらわかるのかを考えるのが我々の生業である。重要なことは、モデルの不確定性を挙げつらうのではなく、ある程度に妥当な仮定を置くことで今までの見識の枠をぐんと広げることができたということである。気候変動の研究はともすれば地上に根を下ろした『天空見上げ型』の形態を取りがちであった。それに対しこの研究は、ミランコビッチサイクルという前時代的に言い古された用語を標榜してはいるが、地球をひとつの惑星として外から見る比較惑星的視点に立ち、長いタイムスケールで多圏間相互作用を定量的に解き明かすという壮大な（悪く言えば無謀な）志、いわば『地上見降ろし型』見地にもとづいたものである。曖昧な要素は確かにあるが、それ以上に、これからの気候変動研究の新しい枠組を提示するという意味に於いて、この研究の存在理由は完璧に保証されている。

謝辞：本稿の執筆にあたっては、東京大学理学部地球惑星物理学教室の濱野洋三教授、松井孝典助教授、東京都立大学理学部の増田耕一助教授との議論に於いて極めて有益な情報を大量に得ることが出来た。文部省宇宙科学研究所の安部正真さんからは月地球力学系進化計算の貴重なデジタルデータを提供して頂いた。また、ミランコビッチサイクルを大胆な仮定のもとで地球史解読のため

の時計のひとつとして見直すという観点は、名古屋大学理学部地球惑星科学教室の熊沢峰夫教授との議論の中で生まれたものである。ここにあらためて感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Abe, M., Mizutani, H., Tamura, Y. and Ooe, M.: Tidal evolution of the lunar orbit and the obliquity of the earth, *Proc. ISAS Lunar and Planetary Symp.*, **25**, in press (1992).
- [2] Berger, A., Loutre, M.-F. and Laskar, J.: Stability of the astronomical frequency over the earth's history for Paleoclimatic studies, *Science*, **255**, 560-566 (1992).
- [3] Dennis, C.: On the change of kinetical parameters of the Earth during geological times, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **87**, 559-568 (1986).
- [4] Kumazawa, M. and Yoshida, S.: A possible catastrophic collapse of the density stratification within the early core: Archean-Proterozoic boundary?, 文部省科学研究費重点領域研究「地球中心核」研究報告, **2**, 303-308 (1992).
- [5] Laskar, J.: Secular evolution of the solar system over 10 million years, *Astron. Astrophys.*, **198**, 341-362 (1988).
- [6] Stevenson, D.J.: Fluid dynamics of core formation, in *Origin of the Earth*, Oxford University Press, New York, 231-250 (1990).
- [7] Toon, O., Pollack, J., Ward, W., Burns, J. and Bilski, K.: The astronomical theory of climatic change on Mars, *Icarus*, **44**, 552-607 (1980).
- [8] Trendall, A.F. and Morris, R.C. eds.: Iron-Formation Facts and Problems, Vol. 6 of *Developments in Precambrian Geology*, Elsevier, Amsterdam (1983).
- [9] Turcotte, D., Cisne, J. and Nordmann, J.: On the evolution of the lunar orbit, *Icarus*, **30**, 254-266 (1977).
- [10] Walker, J.C.G. and Zahnle, K.J.: Lunar nodal tide and distance to the Moon during the Precambrian, *Nature*, **320**, 600-602 (1986).
- [11] 木下宙: 惑星系のカオス研究の現状, 天体力学研究会収録, 国立天文台三鷹, **25**, 印刷中(1992).
- [12] 多田隆治: ミランコビッチサイクルと日本海海洋変動, 科学, **61**, 640-644 (1991).
- [13] 中島映至: 地球軌道要素の変動と気候, 気象研究ノート, **140**, 81-114 (1980).
- [14] 森山茂: 地球型惑星の準周期的気候変動, 気象研究ノート, **155**, 179-206 (1987).
- [15] 山本淳之, 粕谷健二, 福山薫: 琵琶湖の堆積過程と古水環境, 地球環境変動とミランコヴィッチ・サイクル, 古今書院, 112-124 (1992).
- [16] Laskar, J. and Robutel, P.: The chaotic obliquity of the planets, *Nature*, **361**, 608-612 (1993).
- [17] Laskar, J.: The chaotic motion of the solar system: a numerical estimate of the size of the chaotic zones, *Icarus*, **88**, 266-291 (1990).
- [18] Laskar, J., Joutel, F. and Robutel, P.: Stabilization of the earth's obliquity by the moon, *Nature*, **361**, 615-617 (1993).
- [19] Sussman, G.J. and Wisdom, J.: Chaotic evolution of the solar system, *Science*, **257**, 56-62 (1992).



SYMPOSIUM

全地球史解説

—MULTIER-地球多圏間相互作用計画—

南極氷床のボーリング と環境変動の解説

庄子 仁
しょうじ ひとし

編集部

受理: 1993年1月20日

筆者: 富山大学理学部地球科学科 助教授