



## SYMPOSIUM

全地球史解読

—地球多圏相互作用の解明に向けて—

# 地球赤道傾角の進化

伊藤 孝士

いとう たかし

編集部

受理：1994年4月5日

筆者：国立天文台位置天文・天体力学研究系

全地球史解読のための時計として、日射量変動長周期進化の解明は極めて本質的な意義を持つ。しかしながら、現状の認識には不確実性が極めて多く、太陽系惑星運動の長時間積分を含め今後に残された課題は無数にある。本稿では、その中でもとりわけ謎に満ちた赤道傾角の進化史について概観し、今後の研究における方策を探ることを試みる。

## 1. 日射量と自転運動

地球大気上端に入射する太陽放射の変動が表層気候変化の重要な引金になっているという事はかなり昔から予想されてきたことであり (Croll, 1875; Adhémar, 1842), 今更ここでレビューを繰り返す必要はないと思われる。日射量変動の原因は取りも直さず地球の回転変動であり、公転軌道の変化・自転軸の傾きの変化が、季節別・緯度別の日射量を大きく変化させることは一般的によく知られている事実である (中島, 1980)。地球自転軸のこうした変動は、時間スケールも振幅も小さな章動 (笹尾, 1979) と呼ばれるものから、大振幅で数万年スケールの歳差運動、惑星間の重力摂動による数十万年スケールの軌道要素変動、更に長い時間スケールにおける永年変化 (後に述べる気候摩擦や潮汐摩擦) などがあり、これらがすべて組み合わせられて全地球史における日射量変動の歴史を形成してきた。これらのうち、太陽と月の重力による章動 (年周・月周・半年周・半月周・18.6年周など) の効果は、その小さい振幅と短い周期から考えてもほとんど無視し得ると思われるので、ここでは考慮しない (こうした章動が気候変動に効果を持つと主張する研究もある (Trendall, 1973; Currie, 1984) が、これらは周期が似ている現象を取り上げて「似とる」と言っているだけで、その物理的メカニズムの考察にはほとんど立ち入っていない。悪い意味での「縞縞学」の典型である)。氷期間氷期サイクルとの関連で特に問題となるのは  $10^3$  年から  $10^5$  年の時間スケールを持つ地球回転変動であり、自転軸歳差と軌道要素変動がその代表例である。これらの研究の歴史的経緯については木下 (1993) にわかり

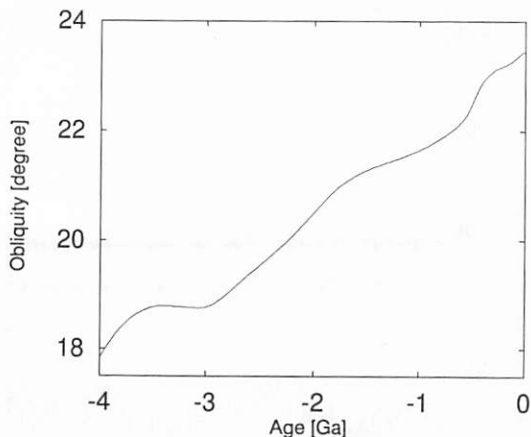


図1 潮汐摩擦による赤道傾角の永年変化計算の一例。Abe *et al.* (1992) による。40億年前(左端)から現在(右端)までを示した。多少の凹凸はあるが、潮汐摩擦によって赤道傾角が単調に漸増していることがわかる。この傾向は他の研究結果とも調和的である。

やすい解説があるので、そちらを参照されたい。

公転軌道要素変動の研究に於いては惑星を質点として扱うのが普通であるし、自転軸歳差の計算に於いても軌道面に対する赤道面の傾き(赤道傾角)の平均値は与えられるものとして扱う場合が多い。赤道傾角の変化は、日射量分布において低緯度域と高緯度域のコントラストを支配するという重要な役割を持っているのだが(増田, 1993)、その全地球史にわたる変動についてはわからないことが多すぎ、まともな定量的議論はほとんどなされて来なかったと言っても過言ではない。しかしながら、日射量変動の歴史を全地球史にわたって遡るには月地球力学系の潮汐進化に伴う自転速度変動を知るのみでは足りず、赤道傾角の進化も定量的に追う必要がある。日射量変動進化の過去の研究、例えば Ito *et al.* (1993) や Berger & Loutre (1993) では、赤道傾角は現在値のまま一定であるという仮定のもとに計算を進めている。Abe *et al.* (1992) などの代表的な月地球力学進化計算の結果を見ると、赤道傾角はここ40億年間で18度から23度くらいまで増加しているにすぎず(図1)、この程度であれば赤道傾角の効果はさほど大きくないかのように思える。赤道傾角を  $\epsilon$  で表したとき、日射量に対しては余弦

( $\cos \epsilon$ ) でしか効果を及ぼさないからである。しかしながら、もしも潮汐摩擦以外の効果が大きく働き、太古代や原生代の赤道傾角の値が現在と大きく異なっていたとしたら、日射量変動は赤道傾角の変化によって決定的な影響を被らざるを得ない。そもそも、貝殻化石の縞々や潮汐堆積物といった明確な定量的証拠が残りやすい地球自転速度とは異なり、赤道傾角は気候帯の緯度分布以外に痕跡の残る望みが薄く、自転速度変動に比べるとともに証拠が探しにくい物理量なのである。しかもその変動要因には不確定な要素が無数に存在し、10億年スケールにわたる赤道傾角の進化を推定することは不可能(または無意味)であると言いつつ研究者まで出現する始末であった。

地球物理学者や天文学者がこのような迷いの森の中で彷徨している最中に、かなり奇抜な論文が地質学者の手によって発表された。George E. Williams は、過去における LOD (Length Of Day = 1日の長さ、地球自転速度の逆数) 変動についての信頼できる地質学的証拠を次から次へと見つけ出して来た気鋭の地質学者である(大野, 1993)。その彼が1993年に *Earth-Science Reviews* に発表した論文は、「先カンブリア代の地球の赤道傾角は現在値よりもはるかに大きく、 $60^\circ$  から  $70^\circ$  ほどもあった可能性が高い」という驚くべきものであった。本稿の結論から言えば、この論文にある報告はいまだに決定的な確証に欠け、信頼に足るレベルには到達していない。しかしながら、力学的には極めて困難と思われるこのような事象の存在を示唆する(かもしれない)地質学的証拠を自らの足で見つけ出し、地球物理学者や天文学者に対して従来説の根本的見直しを迫った Williams の気迫は十分尊敬に値するものである。以下ではこの論文の内容をもとに、地球の赤道傾角を長い時間スケールにわたって変化させる要因とその可能な振幅について考察を加えてみる。

## 2. 赤道傾角変動の諸要因

Williams (1993) が上述のような激しい帰結に到った推論の過程を整理してみよう。まず、彼

の本拠地である南オーストラリアには、典型的な周氷河地形である氷楔（ひょうせつ、英語では sand wedge または ice wedge）が見つかり、その年代は原生代末期の6億5000万年前と推定されている。氷楔は、気温の年較差が激しく凍結融解の作用が顕著な地域で形成されるものであり（貝塚ほか、1985）、現在の地球上では、シベリアなどの高緯度内陸部またはアンデス・ヒマラヤといった山岳地帯という、要は「寒い」ところでしか形成されない。そのようなものが6億5000万年前の南オーストラリアで作られたと思われるのだが、一般的に流布している大陸復元の研究結果を見てみると、何とこの時代のオーストラリア大陸は赤道域を中心とする低緯度にあっただけなのである。第四紀の常識で考えれば、低緯度域は気候温暖で氷楔ができるような環境が存在するとは考え難い。また逆に、中国大陸などは当時の高緯度に位置していたと考えられ、気温の年較差や凍結融解作用という観点からは氷楔が見つかるべきだと思われるのに、そのような証拠はまったく見つからない。このことは何を意味するのであろうか？ Williams の解釈はこうである。「地球の赤道傾角が現在の23.45°程度であれば、日射量の分布は極で最小・赤道で最大という常識通りの分布をする。しかし、赤道傾角がどんどん増大し、ある閾値を越えた時点でこの分布は逆転し、極で最大・赤道で最小という事態を向かえる（図2）。南オーストラリアに見つかった6億5000万年前の氷楔は、このような大きな赤道傾角をもたらした気候帯の逆転現象（reverse climatic zonation）であろう。」これが彼の解釈である。更に、25億年前といった原生代初期の時代の岩石からも氷床の存在を示唆する形跡が見つかり、しかもこれらの古地磁気傾角は小さく、同様に低緯度で生成したことを示すという。後で詳しく述べるように、潮汐摩擦や気候摩擦はすべて赤道傾角を増大させる方向に作用するので、原生代の昔に大きかった赤道傾角が現代に於いて小さくなってしまったことの説明にはなり得ない。これらの事実を鑑みて Williams

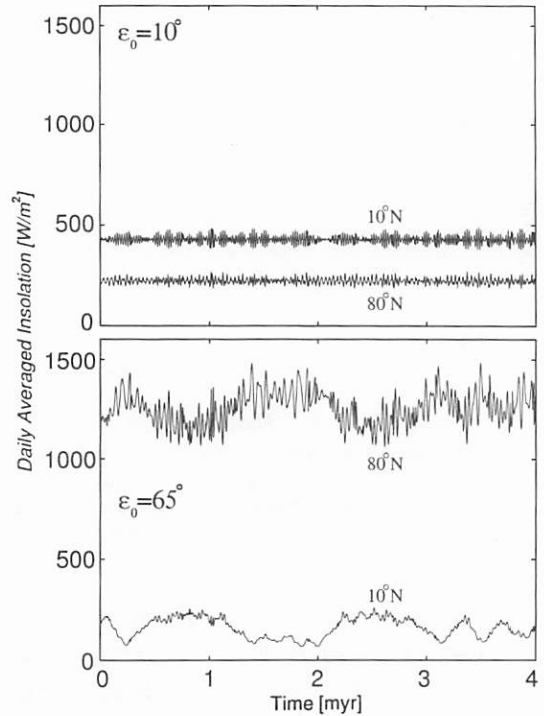


図2 大きな赤道傾角による日射量分布逆転の様子の典型例。上が赤道傾角初期値  $\epsilon_0 = 10^\circ$  の場合、下が  $\epsilon_0 = 65^\circ$  の場合の、各緯度の地点に入射する夏至一日平均の日射量を筆者が計算したもの（単位は  $W/m^2$ ）。赤道傾角以外は現在の観測値を初期条件とし、未来400万年間について計算した。赤道傾角が小さい場合には直観通りに低緯度域の方が日射量が多くなるが、 $\epsilon_0 = 65^\circ$  ともなると高緯度域の方が日射量が多くなる逆転現象が生じる。 $\epsilon_0 = 65^\circ$  の場合（下図）では振幅の絶対値も大きくなっているが、これは、歳差定数の値の減少によって典型的な自転軌道共鳴が生じているためである（本文参照）。

が提唱した赤道傾角の進化史は図3である。原生代末期における赤道傾角の急激な減少を彼はすべてコアマンツル境界のエネルギー散逸過程で話を付けようとしている（後述）。

気候帯逆転の原因と思われる日射量分布の逆転は、赤道傾角がおおよそ  $54^\circ$  のところで生じる。この値は簡単な幾何学的計算から求められるが（Ward, 1974）、その他の原因でも日射量分布の逆転が起こるのではないかと考える研究者もいる。例えば、赤道域における日射量の減少を説明するために「当時の地球には土星のように氷でできたリングがあり、このために赤道域に入射する日射

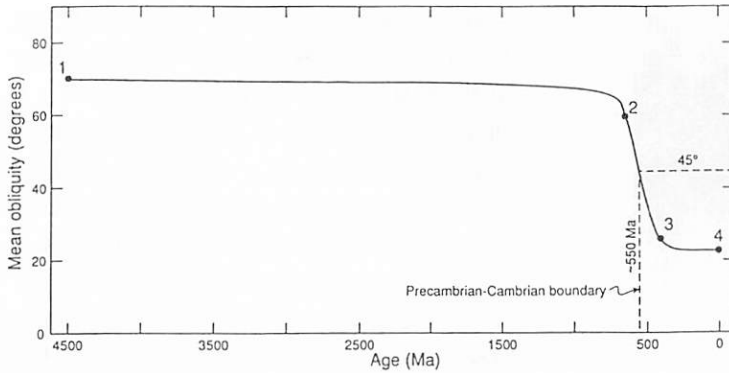


図3 Williams (1993) が提唱する地球赤道傾角(平均値)の進化史。横軸は惑星集積期(46億年前, 左端)から現在(右端)まで取られている。この曲線は4個の制御点からなり、それぞれ(1)地球集積末期の赤道傾角初期値は70°近くあった、(2)原生代末期の低緯度の氷床は大きな赤道傾角を示す、(3)顕生代半ばの4億3000万年前には現在と同じような(高緯度が寒く低緯度が暖かい)気候が見られることから赤道傾角は小さかっただろう、(4)現在値を示している。これら4点をつなぐとこの図が書けるのだが、そうだとすると図中にも示されているようにPrecambrian-Cambrian境界(原生代・顕生代境界)で急激な赤道傾角の減少があったことになる。図はWilliams (1993) からそのまま引用した。

が遮られてしまったのではないか」という説も提案された。しかしながら、そのようなリングが本当にあったのかどうかはまったくわからないし、当時あってなぜ今ないのかということに対する説明も付かない。そもそも、そのようなリングが存在したとしても日射量はやはり極よりも赤道の方が多という報告さえあるので(Brinkman & McGregor, 1979)、この説は棄却される。原生代初期の氷床痕跡が古地磁気伏角の低い場所から産出するという事実については、当時の地球磁場の双極子成分が小さく、自転軸と磁極が大幅にずれていたのではないかという仮説も提唱されたが、原生代の氷床跡は複数の時代に跨って発見されており、非常に長い期間にわたって地球磁場が双極子から外れて続けたということは考えにくいので、この説も没になった。惑星集積初期の可能な赤道傾角初期値に関しては古くから研究がなされているが、微惑星の衝突速度や微惑星と非衝突母惑星の質量比によっては70°や80°といった非常に大きな値を赤道傾角の初期値として取ることも十分可能だとされている(Hartmann & Vail, 1986)。このように大きな赤道傾角があった場合、それらを現在の値にまで減少させてきたメカニズムは何であったのであろうか? とりわけ、Williams が提唱するような原生代の終りの急激な変動は本当に生じたのだろうか?

外部天体の衝突という説はかなり昔から考えられて来た。例えば月の成因については、地球集積の末期に火星サイズの微惑星が衝突して地球のマ

ントルにあたる部分を吹き飛ばし月を形成したという説が支配的であり、このような衝突が他の時代にも起こったならば赤道傾角に大きな影響が及ぶのは必至である。しかしながら、月形成時のような heavy bombardment 期ならまだしも、その後の穏やかな時代にこのような巨大衝突が生じた可能性は高いとは言えない。また、そのような巨大衝突があったとすれば惑星表層全体がマグマオーシャンと化して岩石年代がすべてリセットされてしまうだろう(Melosh, 1990)が、現在の地表からは40億年より古い年代を示す岩石も発見されており、太古代や原生代の間にこのような大イベントがあったとは考えにくい。少なくともここで問題となっている原生代末期または顕生代初期にこうした巨大衝突が起こった確証はどこにもないので、我々は巨大衝突説には手を染めないことにする。

月地球系の潮汐摩擦による赤道傾角の変化についても、1960年代以来盛んに研究が行われてきた。潮汐摩擦は10億年スケールの非常にゆっくりしたプロセスであるが、月地球間の距離や月の軌道傾斜角などに依存して複雑に変化し、赤道傾角を増大させるか減少させるかを定性的に述べることは大変困難である。しかしひとつ確からしいことは、月形成直後における混沌とした状況を除けば、ここ40億年くらいは潮汐摩擦は赤道傾角を増大させる方向に働いて来たであろうということである。複数の研究者の計算結果がこの事実を支持しており(Kaula, 1964; MacDonald,

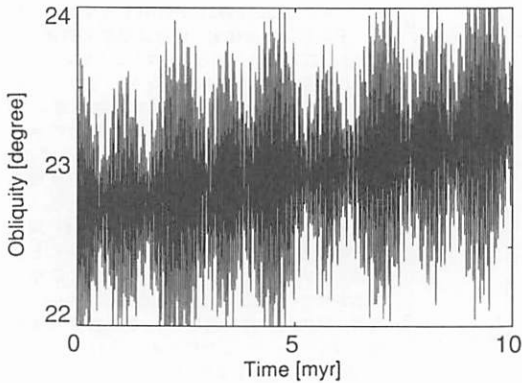


図4 気候摩擦による赤道傾角の永年変化計算の一例。現在の観測値を初期条件として1000万年後まで計算した。永年的な増加傾向の上に短い周期の変動が乗っていることが特徴である。Ito *et al.* (1994) からの引用であるが、この図は地球の粘性的変形時間遅れ(波数2)を3000年、氷床変動による力学的偏平率の変化振幅を0.5%として見積もったものである。このように気候摩擦は赤道傾角を増大させる方向に働くため、図3にあるような減少イベントの説明にはなり得ない。

1964; Goldreich, 1966; Mignard, 1982; 安部, 大江, 1993), このことは原生代の大きな赤道傾角を減らす要因として潮汐摩擦が役に立たないということの意味している。図1には Abe *et al.* (1992) による最新の計算結果を示したが、潮汐摩擦によって長い期間に赤道傾角が漸増していることが見て取れる。

次に、最近話題に上ることが多くなった気候摩擦について考えてみよう。地球は氷床が存在し得る表層気候システムを持つので、氷床の消長に伴う慣性率の変動が自転運動に対してフィードバック的な影響を及ぼしてきたということは十分に考えられる。氷床の発達と消耗には固体地球の変形も付随するが、これには必然的に粘性的な変形の時間遅れが伴う。この時間遅れが微妙なタイミングで地球の角運動量収支に影響を及ぼし赤道傾角の永年変化を駆動する、という研究が近年になって報告され始めている (Rubincam, 1990; Bills, 1994; Ito *et al.*, 1994)。このメカニズムは「気候摩擦」と呼ばれ、地球多圏間相互作用が明瞭な物理的プロセスとして発現する好例として近年にわかに脚光を浴びている。図4には、気候摩擦

を再現する数値モデルを動かして求めた赤道傾角永年変化の実態の一例を挙げた。短周期の変動が永年的な単調増加トレンドの上に乗っていることが明らかに見て取れるが、この単調増加傾向こそ気候摩擦の本質である。そしてそれ故に、Williams が唱える原生代終わりの急激な赤道傾角減少の要因にはなり得ない。気候摩擦によって赤道傾角が小さくなることはほとんどあり得ないからである。ちなみに、気候摩擦による赤道傾角の永年増加量は気候システムの線形性及び海洋大陸配置に大きく依存しており (平, 1991; 伊藤, 1993)、定性的には明らかなこのプロセスが表層気候環境に対して定量的にどこまで意義を持っているかについては今後の研究が待たれるところである。

### 3. コアマントル消散結合と赤道傾角の永年減少

以上の「摩擦」効果はいずれも赤道傾角を増大させる方向にしか作用しないし、巨大衝突は(赤道傾角を減少させる効果は持ち得るものの)生じた可能性は低い。自転軸の歳差と公転軌道面の歳差がある種の共鳴関係に陥って生じる自転軌道共鳴 (spin-orbital resonance, Ward (1979), Ward & Rudy (1991)) は力学的に非常に面白い現象ではあるものの、時間スケールが $10^7$ 年と中途半端で、しかも永年変化というよりは「大振幅で不規則な赤道傾角の準周期的運動」と呼んだ方が適切であり (図2)、赤道傾角の単調減少または単調増加傾向を説明するのには使えない。赤道傾角の減少は即ち自転運動エネルギーの減少を意味する。ということは、何かしらで地球の自転運動エネルギーを減らすメカニズムが存在しなければならない。我々が持っている現在の地球物理学の見識でこの候補として挙げられるのは、地球内部におけるコアマントル境界での消散結合 (core-mantle dissipative coupling) によるエネルギー散逸過程くらいのものである。コアマントル境界において流体核と固体マントルが擦り合うことによるエネルギー散逸過程の具体的メカニズムとしては大きく次の三つが考えられる。すなわ

ち、(1) 流体核の粘性による運動エネルギーの散逸、(2) コアとマンツルの電磁氣的結合によるジュール熱の発生、(3) コアマンツル境界の凹凸により流体核内に乱流が生じることによるエネルギー散逸、である。これらが効果的に組み合わせられれば、確かに理屈の上ではわずかな期間に赤道傾角を大幅に減少させることも可能かもしれない。しかし、これらの散逸過程を支配する物理量についての現在の知識は余りにも乏しく、あるかないかを議論するレベルにすら到達していない。例えば流体核の粘性構造に関して言えば、地震波の減衰 (Suzuki & Sato, 1970) から得られた値 ( $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ ) と物性理論 (Gans, 1972) から得られた値 ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) との間には実に 11 桁もの違いがあり、お世辞にもよくわかっているとは言えない。ましてや、流体核の流速場や粘性構造についての微細な三次元構造を知っている人など誰もいない。コアマンツル間の電磁氣的結合の鍵を握る電気伝導度構造に関しても、実験と理論とでは 4 桁近い開きがある (Shankland *et al.*, 1993)。更に、コアマンツル境界の地形に関しては、地震波の水平方向速度不均質あるいは地球磁場の西方移動観測の解析的研究 (Yoshida & Hamano, 1993) などにより水平波数 3 程度の凹凸についてまではある程度のイメージが得られているものの、乱流によるエネルギー散逸が問題になるような細かいスケールの構造はもちろんわかっていない。どれもこれもわからないことだらけで非常に歯切れが悪いのだが、現時点での統一的な業界標準的見解は「確かにわからないことが多いが、それらがすべてわかったとしてもコアマンツル消散結合が赤道傾角の永年減少に与える影響は微々たるものであるはず」(Rochester, 1976) というものである。Williams (1993) は、岩手県水沢市の緯度観測所 (現国立天文台水沢観測センター) の青木信仰・角田忠一らが 1970 年代初めに提唱したコアマンツル境界でのエネルギー散逸理論 (Aoki, 1969; Aoki & Kakuta, 1971) を根拠に論陣を張っているのだが、コアマンツル結合が赤道傾角の永年減少に極めて大きな影響を持つ可能性を指摘した

これらの理論は今や廃れており、観測事実も否定的な見解を呈している (笹尾, 1993)。そもそも、赤道傾角が太古代から原生代にかけて 30 億年間も大きな値を保って来たならば、その間には自転運動のエネルギー散逸がほとんどなかったということである。それなのに、原生代の終わりになって突如として散逸過程が働き始めたというのはどういことであろうか？ 摩擦が働くのであれば過去の昔に働いて赤道傾角を小さくしていただろうし、働かないのであれば現在に至るまでずっと働かずに赤道傾角の値は大きく保たれていてしかるべきであろう。天王星の赤道傾角の現在値は  $97.9^\circ$  という驚くべき大きさであるが、このような状態は惑星集積期以来 40 億年にわたって保たれて来たと言われている (Korycansky *et al.*, 1990)。地球の赤道傾角だけがどうして今更おいそれと減られようか？

不確定要素をずらずらと列挙したところで、究極的に不確定な要因について述べよう。Williams は「当時の大陸配置を復元しようとする試みの研究によれば、オーストラリアは低緯度にあつたらしい」と言っている。彼がここで立脚しているのは Scotese (1984) や Smith *et al.* (1973) などが提唱するよく知られた研究結果のようである。確かにこうした一群の研究の結果を見ると、原生代末期から顕生代にかけてはオーストラリアが低緯度に配置されているケースが多い。けれども、手に取って調べられる海洋底という連続的・直接的な物的証拠が存在しない 2 億年より昔の大陸復元には本質的な任意性が付きまとい、前出の Scotese (1984) や Smith *et al.* (1973) でさえも相互の大陸配置はまったくと言ってよいほど異なっている。しかも、他の研究者の結果 (Morel & Irving, 1978) などでは必ずしもオーストラリアがこの時期に低緯度にあつたということにはなっていないし、ごく最近の研究 (Uchimura, 1994) などにおいては原生代から顕生代にかけて南極周辺をうろつくオーストラリアの姿が復元されている。こうした見解不統一を乗り越えなければ当時の周氷河地形の謎を解明したことにはなり得ない



ことは明らかであり、古地磁気学の分野に大きな一石が投げられたと見ることもできよう。

#### 4. 残された問題点

以上、とりとめもなく地球赤道傾角の永年変化の可能性について概観してきたが、ひとこととて言えば、とにかくまだわからないことが多過ぎてはつきりしたことは何も言えないというのが実情である。けれども、全地球史解読のための時計を構築するためには日射量変動周期を40億年の昔にまで遡ることは必要欠くべからざる要件であり、そのためには赤道傾角の進化史を観測データとの比較に耐え得る精度で追う必要がある。よしんば地球の赤道傾角がそれ自体では非常に安定なものであったとしても、折しも昨今は太陽系カオス説が盛んに提唱されており(Laskar, 1990; Sussman & Wisdom, 1992)、自転運動や公転運動を10億年スケールで復元することなど不可能かつ無意味であるという意見が支配的である。しかしながら、太陽系の惑星運動のカオス性は単に数学的なものであり、現実的(物理的)には周期的な軌道運動にほとんど何らの変化も加わらないだろうという報告もある(木下, 中井, 1994)。日射量変動を追跡する研究に携わるにあたっては、このような現状を認識し、惑星運動の長期間高速積分を含めて天体力学の領域に深く踏み込んで行く必要があるように思われる。惑星の公転運動や自転運動はそれ自体でも十分に興味深く、この分野は旧世紀の過去から深遠なる蛸壺を形成している。そもそも古気候変動に関心があった我々がその魅惑的な領域にはまり込んでしまったら、古気候のフィールドには二度と戻って来ることができないかもしれないのだけれど……。

#### 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 Planet. Symp.*, **25**, 226–231 (1992).
- [2] Adhémar, J. A. : *Révolutions de la mer*, privately published, Paris (1842).
- [3] Aoki, S. and Kakuta, C. : The excess secular change in the obliquity of the ecliptic and its relation to the internal motion of the Earth, *Celes. Mech.*, **4**, 171–181 (1971).
- [4] Aoki, S. : Friction between mantle and core of the Earth as a cause of the secular change in obliquity, *Astron. J.*, **74**, 284–291 (1969).
- [5] Berger, A. L. and Loutre, M. F. : Astronomical forcing through geological time, *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, **19**, 15–24 (1993).
- [6] Bills, B. G. : Obliquity-oblateness feedback : are climatically sensitive values of obliquity dynamically unstable?, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 177–180 (1994).
- [7] Brinkman, A. W. and McGregor, J. : The effect of the ring system on the solar radiation reaching the top of Saturn's atmosphere : direct radiation, *Icarus*, **38**, 479–482 (1979).
- [8] Croll, J. : *Climate and Time*, Daldy, Isbister & Co., London (1875).
- [9] Currie, R. G. : On bistable phasing of 18.6 year nodal induced flood in India, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 50–53 (1984).
- [10] Gans, R. F. : Viscosity of the earth's core, *J. Geophys. Res.*, **77**, 360–366 (1972).
- [11] Goldreich, P. : History of the lunar orbit, *Rev. Geophys.*, **4**, 411–439 (1966).
- [12] Hartmann, W. K. and Vail, S. M. : Giant impactors : plausible sizes and populations, in Hartmann, W. K., Phillips, R. J. and Taylor, G. J. eds., *Origin of the Moon*, Lunar and Planetary Institute, Houston (1986).
- [13] Ito, T., Kumazawa, M., Hamano, Y., Matsui, T. and Masuda, K. : Long term evolution of the solar insolation variation over 4 Ga, *Proc. Japan Acad.*, **69**, 233–237 (1993).
- [14] Ito, T., Masuda, K., Hamano, Y. and Matsui, T. : Climate friction : a possible cause for secular drift of the earth's obliquity, *J. Geophys. Res.* (in preparation) (1994).
- [15] Kaula, W. M. : Tidal dissipation by solid friction and the resulting orbital evolution, *Rev. Geophys.*, **2**, 661–624 (1964).
- [16] Korycansky, D. G., Bodenheimer, P., Cassen, P. and Pollack, J. B. : One-dimensional calculations of a large impact on Uranus, *Icarus*, **84**, 528–541 (1990).
- [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] MacDonald, G. J. F. : Tidal friction, *Rev. Geophys.*, **2**, 467–541 (1964).
- [19] Melosh, H. J. : Giant impacts and the thermal state of the early earth, in *Origin of the Earth*, Oxford University Press, New York, 69–83 (1990).
- [20] Mignard, F. : Long time integration of the Moon's orbit, in Brosche, P. and Sündermann, J. eds., *Tidal Friction and the Earth's Rotation II*, Springer, Berlin (1982).
- [21] Morel, P. and Irving, E. : Tentative paleocontinental maps for the early Phanerozoic, *J. Geol.*, **86**, 535–561 (1978).
- [22] Rochester, M. G. : The secular decrease of obliquity due to dissipative core-mantle coupling, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **46**, 109–126 (1976).
- [23] Rubincam, D. P. : Mars : change in axial tilt due to climate?, *Science*, **248**, 720–721.
- [24] Scotese, C. R. and Bonhommet, N. eds. : *Plate Reconstruction From Paleozoic Paleomagnetism*, Vol.12 of *Geo-*

dynamics series, American Geophysical Union, Washington, D. C. (1984).

[25] Shankland, T. J., Peyronneau, J. and Poirier, J.-P. : Electrical conductivity of the earth's lower mantle, *Nature*, **366**, 453-455 (1993).

[26] Smith, A. G., Briden, J. C. and Drewry, G. E. : Phanerozoic World Maps, in *Organisms and Continents Through Time*, Palaeontological Association, London, Special papers in Palaeontology 12, Systematics Association Publication 9 (1987).

[27] Sussman, G. J. and Wisdom, J. : Chaotic evolution of the solar system, *Science*, **257**, 56-62 (1992).

[28] Suzuki, Y. and Sato, R. : Viscosity determination in the earth's outer core from ScS and SKS phases, *J. Phys. Earth*, **18**, 157-170 (1970).

[29] Trendall, A. F. : Varve cycles in the Weeli Wolli formation of the Precambrian Hamersley group, western Australia, *Econ. Geol.*, **68**, 1089-1097 (1973).

[30] Uchimura, H. : *Inverse problem of Paleomagnetic reconstruction*, PhD thesis, Tokyo Institute of Technology (1994).

[31] Ward, W. R. and Rudy, D. J. : Resonant obliquity of Mars?, *Icarus*, **94**, 160-164 (1991).

[32] Ward, W. R. : Climatic variations on Mars : 1. astronomical theory of insolation, *J. Geophys. Res.*, **79**, 3375-3386 (1974).

[33] Ward, W. R. : Present obliquity oscillations of Mars : fourth-order accuracy in orbital  $e$  and  $I$ , *J. Geophys. Res.*, **84**, 237-241 (1979).

[34] Williams, J. G. : History of the earth's obliquity, *Earth-Sci. Rev.*, **34**, 1-45 (1993).

[35] Yoshida, S. and Hamano, Y. : Geomagnetic secular variations are caused by length-of-day fluctuations, *Proc. Japan Acad.*, **69**, 73-78 (1993).

[36] 安部正真, 大江昌嗣 : 地球-月系力学進化の問題点, *地球*, **15**, 306-310 (1993).

[37] 伊藤孝士 : ミランコビッチサイクルの進化, *地球*, **15**, 316-323 (1993).

[38] 大野照文 : Wells 以来-地球月力学系の歴史を記録した化石や堆積物の縞状構造解説 30 年の歩み, *地球*, **16**, 53-59 (1993).

[39] 貝塚爽平, 太田陽子, 小崎尚, 小池一之, 野上道男, 町田洋, 米倉伸之 (編) : 写真と図で見る地形学, 東京大学出版会 (1985).

[40] 木下宙 : ミランコヴィチ周期計算の基礎について, *地球*, **15**, 314-315 (1993).

[41] 木下宙, 中井宏 : 最果ての星・冥王星の奇妙な運動, *天文月報*, **87**, 100-107 (1994).

[42] 笹尾哲夫 : 流体核をもつ地球の運動, 現代天文学講座 1, 地球回転, 恒星社, 109-167 (1979).

[43] 笹尾哲夫 : 地球の章動, *地球*, **16**, 4-7 (1993).

[44] 平朝彦 : 温室地球の環境-白亜紀の世界, *科学*, **61**, 657-662 (1991).

[45] 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).

[46] 増田耕一 : 氷期・間氷期サイクルと地球軌道要素, 気象研究ノート, **177**, 223-248 (1993).



## SYMPOSIUM

全地球史解説

- 地球多圏相互作用の解明に向けて -

# 大気によるチャンドラー ウォブルの励起

古屋 正 人

ふるや まさと

濱野 洋 三

はまの ようぞう

内藤 勲 夫

ないとう いさお

編集部

受理 : 1994 年 4 月 9 日

筆者 : 東京大学理学部

東京大学理学部

国立天文台地球回転研究系