



## SYMPOSIUM

全地球史解説

—MULTIER-地球多圏間相互作用計画—

# 全地球史解説のための 時計

熊 沢 峰 夫

くまざわ みねお

伊 藤 孝 士

いとう たかし

編集部

受理：1993年1月29日

筆者：名古屋大学理学部地球惑星科学教室 教授  
東京大学理学部地球惑星物理学教室 大学院生

地球の進化史解明に必要な地層の縞リズムの解析は、それに必要な時計の研究開発であると同時に、40億年前までの月・地球系だけでなく太陽系とその物理的環境解明の基礎である。このような研究に新しい考え方と方法を提案する。

## 1. 課題の目的

若い地球が残した海底堆積物は地球と宇宙の歴史を連続記録しているテープであるからこれを読みたい。堆積物の縞(図1)には0.1 mmから1 km以上の広い空間スケールに亘って多数の周期的な成分とその乱れとがある。それらは地球宇宙史を読み取るための刻時マークであると同時に地球史上の事件の記録でもある。全地球史解説(熊澤, 1993)のためには、縞を時計の目盛に見立てて時計としての縞の物理学的な研究が避けては通れない最も重要な基礎である。時計の狂いも地球史上意味をもつ重要な情報である。したがって、広い時間スケールをカバーする複数の時計の研究を行ない、その相互の較正をすることが決定的に重要で、それがそのまま地球惑星の進化研究になってしまう。われわれは地層の試料が得られる40億年前までの研究に使える実用的な時計について現状を整理検討してみた。われわれの時計は狂うのではなく太陽系の進化と共に進化する。全地球史解説計画においては、本文に述べる5系列の時計の研究と縞を読むテクノロジー確保の両方に等しく重点をおくのがよいと考える。その結果として精密な地球史はもとより、太陽活動の歴史、生命の歴史、さらに地球上に記録されているかも知れない宇宙の歴史も読みだす基礎を確立することができよう。

## 2. 複数の時計の特長と意義

### 1) 時間基準親クロック

現在われわれが使用している時間の基準はセシウム133原子の特定の二つの準位間の遷移に伴う放射の周期である。地球惑星科学にとって今も実用的な時間単位は昔使っていた時間の基準である地球の公転周期の1年である。ここでは地球の春

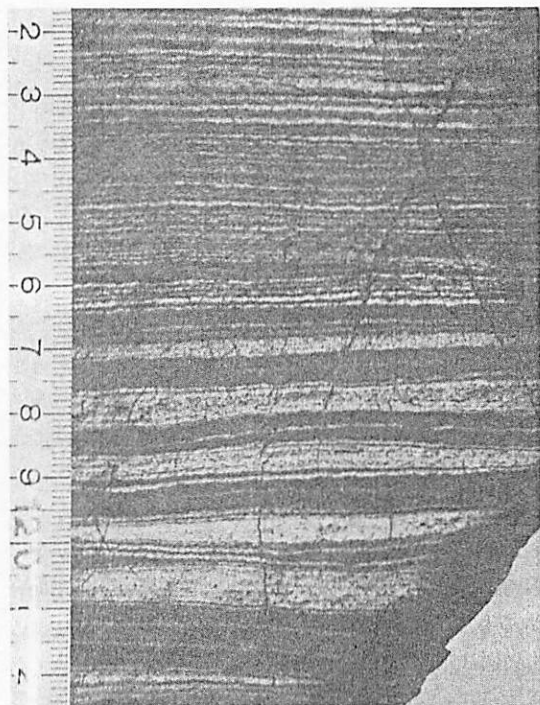


図1 深海底堆積物(33億年前)中の白い二酸化珪素と鉄酸化物の互層が変調縞を示す例。ミランコビッチサイクルの記録と見る考えもある。(オーストラリア、磯崎行雄氏採集)。

分点から次の春分点までのケプラー運動の時間(回帰年=365.2422 d)を親時計の「基準」にする。回帰年は季節変動として地球上の堆積物にはっきりマークを残すから、時計としての実用性がある。年周期とみられる地層の縞をひとつずつ数えていけば、40億年の地球の歴史上の事件を年単位の精度で解明することも将来はできるだろう。

実際の季節変動の周期を1年の単位(回帰年)にとると、惑星の摂動に起因する地球軌道の変動などのために、現在のケプラー運動の1年(恒星年=365.2564 d)とは小さい差を生じる。このような1年がセシウム時計の基準でどのように変動し、その原因が何であるかを解明することもわれわれの研究課題である。

## 2) 絶対時刻測定用クロック

絶対時刻というものは本来存在しないが、ここでは地球年代学で言うところの絶対年代を測定する方法を絶対時刻時計とよぶ。時間尺度には実験

的に決定される放射性元素の崩壊時定数(有効数字5桁以上)を用いる。この時計の読みは現在を基準にして time before present/year, 略して tbp/y で記述する。

年代測定の手段としては、同位体の分析データにもとづく放射年代測定法が今までに数多く開発使用されてきた。これらは分析を行なった時刻を基準にして、何かが起こった時刻を計測するものである。10億年オーダーの古い時代で信頼性のあるものは、われわれの現在の理解ではジルコンの放射年代測定法だけである。これはマグマの中でジルコン結晶が形成成長した時刻をそれと同時に結晶格子中に捕まったウランの崩壊を利用して測定するものである。現在の精度は0.5%はあるのでさしあたっての絶対年代測定としてはほぼ満足のできる状態にある。ジルコン時計の精度と信頼性が高い理由は次の二つである:(1)ジルコン結晶の成長時にウランは入り易いが、その崩壊娘核である鉛は取り込まれにくいいため鉛の初期濃度が低いこと、および(2)ジルコン結晶が物理的・化学的に極めて安定で、熱変成や風化に耐えて同位体組成が保存されること。

ジルコン年代測定は、まだオーストラリア国立大学の Compston らのところの SHRIMP だけでしかできない—という困った事態にある。われわれとしては、このような測定のできる研究室が国内に少なくとも一つはあって、簡単に高精度の測定ができることが不可欠だと考えている。いろいろな見解もあろうが、相応の研究費があれば、人材はあるのでこの絶対時刻測定クロックを確保することができる。

## 3) 潮汐時計とミランコビッチ時計:天体力学的なラップタイムクロック

短い時間差測定用のラップタイム時計には複雑な地球上の現象とは独立な周期現象を用いるのがよいので、天体力学的な周期性(自転と公転の周期)を用いる時計を模索した。宇宙にはこのような周期現象はいくらでもあるが、その周期が安定で、かつ、それがなんらかのメカニズムで地球上に記録されるものでなければ実用性がない。

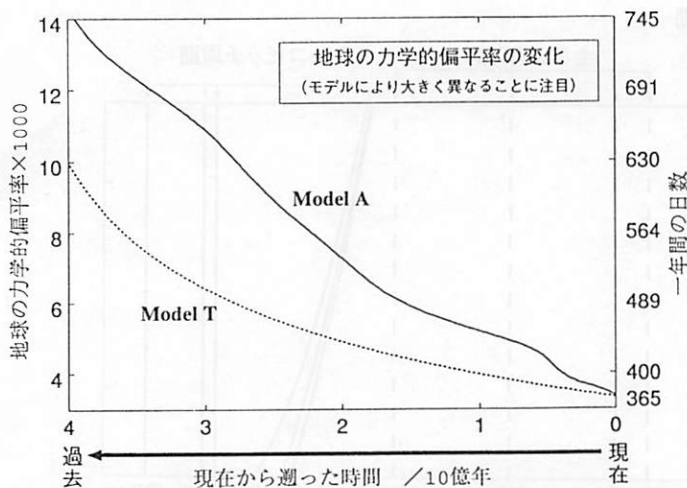


図3 地球回転の時代変化についての二つのモデル(伊藤, 1993, 参照のこと)がどのように大きく異なるかを示す。この図に将来描くべき正しい一本の線を確定することが、個性的地球とその進化の重要な一面を記述表現することになる。その線は地球システムの様々な変動を反映して短いタイムスケールの変動を含んでいるであろう。当面の目標はこの線のおよその形を地層の縞の解読によって決めることである。

移送や地球内部構造変化の結果、両者とも次第に遅くなってきた。ミランコビッチ時計の進化については伊藤(1993)に詳しく述べてある。彼の推定では、現在4万年周期のミランコビッチ周期が、初期地球では数千年にまで短くなっている可能性がある。潮汐摩擦は大陸と海の地理分布、地球内部の流動性などに依存し、地球の慣性モーメントは内部構造も関与するので、これらの変化に依存する地球自転速度変化の精密な数値データは地球進化を明らかにする基礎資料である。

このような研究は月地球回転力学系の進化の問題として昔からおもに測地学の立場で研究がなされてきたため、古い問題となり果ててもうおもしろいことはない—という見方もかなりあった。一方、この研究に必要な堆積物試料は回転力学研究者からは無縁の前近代的地質学の対象であると見られがちで、両者が連携をとるということは今までほとんどなかったといえよう。そのため少しでもデータがあるのは20億年前までである。しかし20億年以前の深海底に堆積した地層でもミランコビッチ周期ではないかと推察される縞があり、浅海の成長速度の大きいストロマトライトや堆積岩には潮汐によるとみられる縞が見出されている。しかしそれらはまだ同定検証されるには至っていないので、われわれは地球史解読の重点の対象としてこれらを徹底的に研究しようと計画している。

#### 4) 太陽時計：天体物理的ラップタイムクロック

天体が持つ恒常性のある自励的振動を考える。その典型は太陽活動の周期性であって、地球上に様々なマークを刻む。良く知られている太陽周期は気候と相関のある11年周期、炭素14生成率の変動から推定される2300年周期などである。これらはなじみ深い言葉で太陽時計と呼ぶのがよからう。11年の周期性は数百年の時間スケールでカオス的に消長し、それはそのまま地球上に気候変動をもたらして地層にその証拠を残す。過去の太陽活動の変動については年輪年代学による数千年前までのデータしかない。40億年も遡れば太陽活動の恒常性は保証されないであろうから、11年周期も11年でなかったかも知れない。太陽時計も進化するであろう。地層に縞を残すもっと長い周期の変動もあるだろうが、それを知る方法はいまのところ太陽(恒星)物理学の観測的理論的研究と地層の縞の解読解析以外にはない。われわれは天体物理学の応援を得ながら縞の解読を行なうことで、天文学にも積極的に大きな寄与ができると考える。

#### 5) 特定時刻をきめるイベントマーカー

イベントマーカーは、温度計測でいえば沸点のような定点到相当するものである。現代の科学でもキリストが誕生した年など特定のイベントが起こった時刻を基準にして記述する。われわれの間

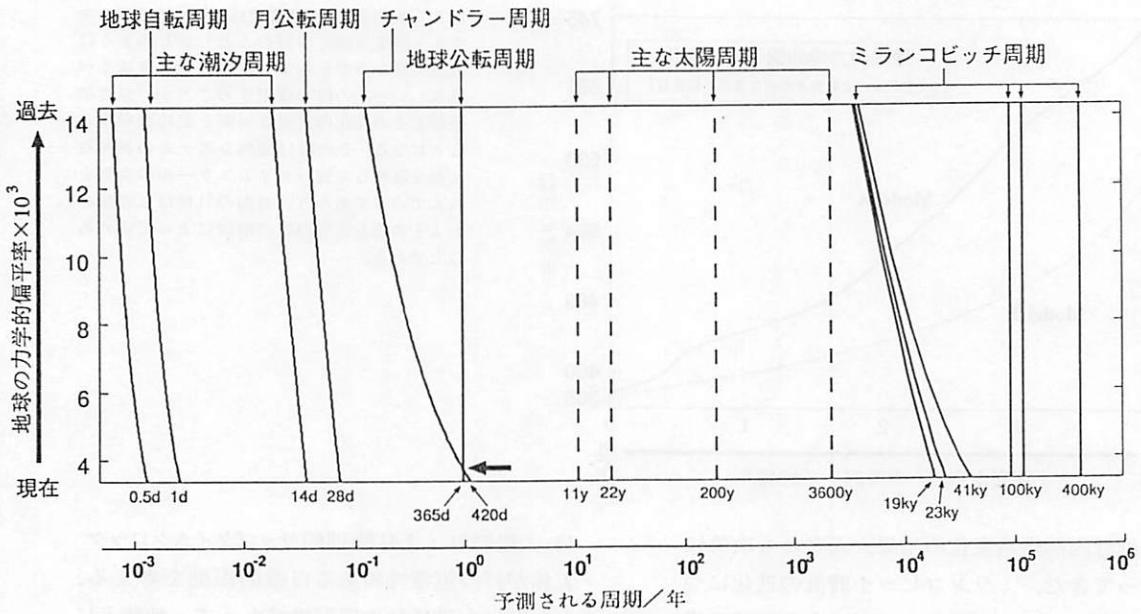


図2 地層に刻時マークとして残るであろう主なラップタイムクロックの周期スペクトルの変化を地球の力学的偏平率の関数で示す。これは地球とその進化の個性を排除した標準モデルである。例えば、地球内部の密度構造が変わることによる直接的な効果は、この標準モデルからの小さな差として表される。太陽周期と地球の公転周期および10万年より長いミランコビッチ周期はほとんど変わらないとされている。チャンドラー周期は刻時の縞として記録はされないであろうが、過去数億年以内に季節変動の1年周期との共鳴は生じたことがある(図中太い矢印)との予想には注目する。

われわれの結論は、(1)地球回転による一日の周期、(2)月の公転も関与する半日の潮汐周期と多数の分潮、および(3)ミランコビッチ周期(おもに1万年以上)しかまだ見あたらない—ということである。これらはすべて「地球の回転」に直接関係している。しかし上で「地球上の現象とは独立」といったのは、つまり地球の複雑な個性とは独立という意味であって、地球を質量、慣性モーメント、力学的偏平率(伊藤, 1993)という単純な三本の毛しかない没個性的一天体と見なすことによって、天体力学的な時計が明快に成立する。

地球の自転は光合成をする生物が関与する堆積物に一日周期のマークとして記録される。月と太陽の潮汐力は海洋潮汐の周期的変動による堆積環境の変動を通じてやはり地層に約半日周期の縞をつくる。そこでこれらを潮汐時計と呼ぶ。

ミランコビッチサイクルと一般に言われているものには三つある。それらは、地球軌道の離心率

が変動するため太陽地球間の距離が変化して地球への日射量変動すること(e-効果, 周期=100ky, 400ky), 地球自転軸方向が変動するため南北半球の日射の差が変動すること(o-効果, 周期=41ky), およびe-効果と春分点の移動が連携して特定半球の夏と冬の日射量の差が変動すること(p-効果, 周期=19ky, 23ky)である。o-効果とp-効果の周期は、最近の堆積物の酸素同位体の変動から推定される気候変動のスペクトルに見出されているので時計として有用なはずである。e-効果は小さいので実用性はまだ分かっていない。これらをミランコビッチ時計と呼んでおこう。

このような時計は太陽系の進化とともに進化する。これらの周期(e-効果によるミランコビッチ周期を除く)は、主に地球の力学的偏平率の変動で変わる。この偏平率は地球の自転速度でほとんど決まってしまうものである。地球の自転速度と月の公転速度は、潮汐摩擦効果による角運動量

題では地磁気の逆転、巨大隕石衝突、火山大噴火、更に太陽の近くでの超新星爆発など比較的短時間に起こる現象で地層にはっきりした痕跡が残るものが使える。その時刻を基準にしてその前後の時刻はラップタイムクロックで決めることになる。適切なイベントを搜索選択してその時刻を測定しておこうではないか。

### 3. 展望と次の課題

実際に地層の縞を観察してみると、多くの未同定の周期性が見出される。これらを理解することは、まさに地球史、惑星史、太陽史の「解説」である。この「謎解き」のためにはすでに知っていることを整理し、それを基準にして知らないことを検討できるようにして置くのがよい。

図2には主なラップタイム用時計の刻み周期のスペクトルを地球の偏平率の関数として示した。太陽時計はほとんど変化しないと考えられるのに対して、潮汐時計とミランコビッチ時計には大きな時間変化がある。この変動のしかたは地球を没個性的な天体であるとした場合、質量と角運動量保存など物理の没個性的基本法則にしばられているので一意的に決まっている。地球の個性について常識的な複数のモデルによって、図2の線の位置は線の太さの2倍程度しかずれないと見積られる。特に重要な点は、地球の偏平率(自転速度)がどれほど変化しても、ミランコビッチ周期と潮汐周期の変動は互いに強い拘束を受けていることである。すなわち、時間の刻みの単位が $10^6$ 以上異なってもこれらの二つの時計は独立ではない。このような強い拘束関係の存在は当然であるが、この分野では遠くの惑星の摂動や地球軌道の短い時間スケールの効果を精密に研究してきたためか、この地球史的意義は今まで見逃されていたようである。そこでこれに着目して積極的に使おうというのがわれわれの新しい視点であり、また非常に有力な武器でもある。すなわち、一定の制約のもとで変動する複数の時計と変動しない複数の時計の相互のずれ(周期の比と差)は地球の偏平率の関数であるから、関連する他の時計の時間刻みを

予測できる。したがって、縞の同定が紛れなくクロスチェックでき、かつ地球の偏平率(自転速度)と地層の堆積速度も求められるはずである。この場合、地層の縞の空間系列にも変調構造が見られるはずで(事実、そうになっている!)複数の時計がいわば互いに副尺として機能する仕組みになっている。このことは、40億年前までの地層の縞がもつ空間波数スペクトルを複数のラップタイム時計の周波数スペクトルとの対応で解説する方法を明らかにしたといえよう。

図2に示したのは大気海洋固体地球からなる一つのシステムへの外部フォーシングのスペクトルでもある。これに地球システムがどのように応答し、どのように縞として記録されるか、そのメカニズムも知っておかねばならない。また、地球自体の自励的変動もある。これらを合理的に理解するための物理モデリングも避けて通れないアプローチであろう。

図3にはこの偏平率の時代変化についての二つのモデルを示した。これは図2の線上を地球がどんな速さで動いたかを示す図といってもよい。図3に示す偏平率の時間変動がまだ確定していないことが、わが地球の実際にたどった個性的進化の道筋をまだほとんど解明できていないことを示している。図2を用いて地層の縞を解析し、絶対時刻時計も利用して図3の正確な線を決めることが地球史解説の重要な一面である。これは同時に時計の確立として次の解説のための基礎になる。このような研究を積み上げることが、太陽系に住むわれわれ自身とその物理的環境がたどってきた歴史を解明するために、避けては通れぬ最も早く確実な方法である。図2にはまだ考慮に入れるべきことが数多くあるが、詳しくは伊藤(1993)にゆずり、本文の結論を述べよう。

図2とその考え方がわれわれの新兵器である。

### 参考文献

- [1] 伊藤孝士: ミランコビッチクロックの進化, 月刊地球, 15, 316-323 (1993).
- [2] 熊沢峰夫: 全地球史解説プログラムの提案, 月刊地球, 15, 31-36 (1993).