

三つの時計のおはなし

日置幸介(国立天文台地球回転研究系)

時計というと一般の人は腕時計や柱時計を、天文台の人は水素メーザやセシウム時計を思い浮かべるかもしれません。今からお話しするのは天然の「時計」です。地球の自転は一日を刻む時計として昔から利用されてきましたが、数百万年という長い時間はどうやってはかることができるのでしょうか。

最初にご紹介する時計は「放射性壊変」です。火成岩に含まれる ^{40}K (カリウム 40) は半減期十数億年で少しずつ ^{39}Ar (アルゴン 39) に変身してゆきます。人間の頭髪は(個人差がありますが)半減期 60 年程度で黒い髪が白く変わってゆきますから、ある人間の頭髪の黒と白の比率から大体の年齢がわかります。同じ原理で、岩石を拾ってきて ^{40}K (黒髪) と ^{39}Ar (しらが) の比を求めればその岩石の年齢(放射年代)がわかります。放射性壊変という規則正しい物理現象を利用した天然の砂時計です。次はミランコビッチサイクルという天文時計です。地球の自転軸は今のところ黄道面から 23.5 度傾き、才差運動をしながら、太陽を焦点とする楕円軌道をまわっています。この様相が他の天体の引力によって数万年の時間スケールで変化すると、日射量の変化が気候の微妙なバランスを崩し、氷期/間氷期をくり返すような気候変動をもたらします。これがミランコビッチサイクル、数万年周期の天然の振り子時計です。

どんな正確な時計でも、時計をときおり「読み」、「書きとめ」なければ比較できません。この役割を果たすのが地磁気の逆転です。今日磁石の N 極は北を指し、S 極は南を指しますが、ほんの百万年前は正反対だったのです。そのちょっと前は現在と同じ、そのまた前は現在と反対、というふうに地球磁場は極性の反転を何万年何十万年という時間スケールで繰り返しているのです(逆転そのものに要する時間は、正逆の安定な時間に比べると一瞬)。火成岩の誕生時の磁場方向

は「熱残留磁化」としてしっかり記憶されます。世界中からいろんな岩石を集めて磁化の極性を調べ、K-Ar 法で測った年齢順にならべれば、地磁気の極性の「年表」ができます。放射性壊変時計を地磁気逆転というグローバルな出来事のたびに読み取るわけです。こういった年表は 1960 年代にほぼ完成され、地層の年代の特定や、海洋磁気異常と組み合わせたプレート運動速度の予測などに活用されてきました。

放射年代の専売特許だったこの業界に参入してきたのがミランコビッチ時計です。地球の自転/公転変化が日照変化を、さらには気候変動をもたらすというミランコビッチの古い仮説が注目を集めはじめたのは比較的最近です。極域での氷床の消長は、海水中の酸素同位体比として堆積物中に記録されます。これは酸素原子の重さのわずかな違いによって、極に移動して氷の一部となるべき酸素の移動のしやすさが微妙に異なるからです。気候変動の化石から読み取った周期とミランコビッチ周期がぴったり合うことがわかってきたのが最近なのです。一方堆積物には、火成岩と同じように地層が堆積した当時の磁場の方向が、(火成岩に比べるとたよりないですが)堆積残留磁化として残っています。一本の堆積物試料から得た気候変動のパターンと磁場逆転のパターンを重ねあわせれば、天体のリズムに準拠した時刻目盛を磁場逆転の年代表につけることができます。

ここで初めて二つの時計が比べられました。両者は異なる原理に基づくものであるにもかかわらず数%の違いで一致しましたが、不思議なことに「違い」はランダムではなくミランコビッチ時計の読みが、放射壊変時計の読みよりいつも古くずれるのです。何かわけがありそうです。岩石の「しらが」、アルゴン 40 は他の元素と化合物をつくらない不活性ガスですから自然界で岩石中から少しずつ失われます。その結果 K-

Ar 年代が実際の年齢より若く求まることがしばしばあります。そのせいか「二つの時計が合わない」といってもミランコビッチサイクルを疑う人は少なく、従来の K-Ar 年代が間違っていると解釈する人が多いようです。先程堆積残留磁化が熱残留磁化に比べて「たよりない」と言いましたが、例えば残留磁化の固定が堆積時より遅れるという「堆積後残留磁化」の問題があります。つもったばかりの泥には後世まで安定に残るような残留磁化はまだ存在せず、上からふってくるより若い泥の重みで固くしまりゆく過程で徐々に安定磁化を獲得するという考え方です。これは気候変動の目盛と磁化の目盛が我々の都合に反してちょびりずれることを意味し、前者の読みが古くでるのはこちらでも説明できるかもしれません。

地球表面をおおうプレートと呼ばれる何枚かの固い岩盤は、ちょうど爪が伸びるくらいの速さでめいめい勝手な方向に動いています。プレートが離ればなれになる海底山脈（海嶺）では、それに沿って地中からわき出したマグマが冷えて新しい海底をつくっています。地球磁場は反転を繰り返していますから、新しい海底を形成する玄武岩などの岩石は正や負に磁化し、その結果海嶺に平行な磁気異常の縞模様ができます。縞模様の海嶺からの距離が、磁場反転時から現在までの間に海底がどれだけ動いたかになります。さて VLBI や GPS を使えばプレートの速度を直接測ることができますから、縞模様の幅をこの速度で割ってやれば地磁気が反転したのが何年前かわかります。これが第三の時計、宇宙測地学的時計なのです。時を刻むのはゆっくりしたプレートの動きであり、それを測地学的手法で測るところがポイントです。

VLBI で局どうしの速度を測った結果が、「プレート運動モデルの予測」によく合うという言い方を耳にします。このモデルが与えるプレートの速さは、海洋磁

気異常の縞模様と第一の時計（放射年代）に基づく磁場反転年表の二つから推定したものなのです。従って VLBI で測ったプレートの速さとモデルの予測が一致すれば第一と第三の時計が一致したことになり、逆に VLBI で測ったプレートの速さが予測より何%か速かったり遅かったりするなら、それは第一の時計による年代がその分間違っている有力な証拠となります。第一と第二の時計を比べると第二の時計の読みの方がいつも数%古くでるとい話を思い出してください。第三の時計はどちらに味方するのでしょうか？

プレートの速さは爪が伸びる速さ、今問題なのはそのまた数%の違いですからせいぜい年間数ミリの速度の違いの議論になります。アラスカとハワイが第一の時計の予測に基づいて丁度年間 5 センチの速さで近づいているとすると、第二の時計に基づく予測は年間 4.8 センチくらいになり、VLBI という正確なものさしを使っても時計の違いによる影響を検出するのは容易ではありません。そこを頑張って過去十年の世界中の VLBI データをできるだけ沢山使ってなるべく厳密な方法で検討すると、VLBI つまり第三の時計は、第二の時計より第一の時計の読みに近く、しかも第二の時計とは反対のずれを示すことがわかります。先程の例で言えば VLBI で測ったアラスカとハワイの相対速度は年間 5 センチでも 4.8 センチでもなく、5.2 センチになったわけです。

まずは三つの異なった原理に基づく時計が数%の範囲内で一致したことを素直に喜んだ上で、それらの間の小さいけれども統計的に有意な差の原因を考えるのは学問上おもしろそうです。思い付くだけでも ^{40}K の壊変定数や堆積残留磁化獲得機構の見直し、プレート運動の短周期（数百万年以下）変動など重要な発見がありそうです。

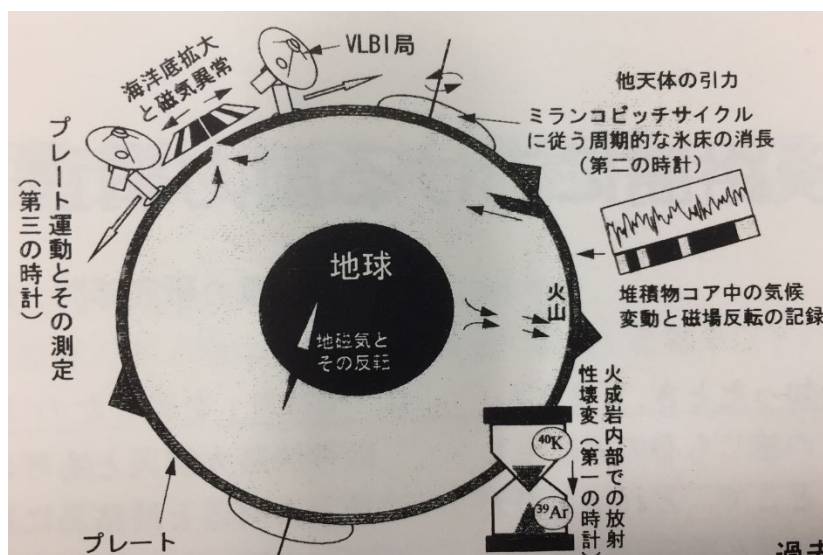


図1 過去数百万年を測る三つの時計