

## 星の電波で大陸の動きを測る



### わかっているのは過去の動き

「新しい地球観」を開いたプレート理論は、大きく分けて2つの状況証拠によって支えられている。1つは、地震活動や、地震波の伝わり方、海底の熱流量などといった現在のプレート活動を反映するデータである。もう1つは、はるか昔のプレート活動の跡をとどめている数かずの記録だ。

その代表といえるのが、岩石の生成当時の地球磁場のようすを探る古地磁気学や、地磁気の反転パターンを記録している海洋底の磁気異常の縞模様などである。プレート理論の最も基本的な考え方であるプレート同士の相対運動の定量的な研究は、後者のデータが支えている。

ここで、プレートの相対運動によって地表におけるさまざまな現象を説明しようとするプレートテクトニクスの成り立つ、時間的範囲を考えてみよう。現時点の我々の知識では、プレートテクトニクスは45億年に及ぶ地球の全歴史のうち、過去数億年の出来事を、せいぜい数百万年の時間分解能をもって説明するに過ぎない。

すなわち、地球の歴史の大部分を占める先カン

ブリア時代（約5億6000万年前以前）におけるテクトニクスの様式はまだ良くわかっていない。また、新生代（約6400万年前以降）の出来事でも、我々が使う単位は相変わらず百万年であり、それより小さい時間のものさしで物事を記述するには至っていない。

こんごの地球科学の重要課題は、プレートの運動がどれくらい昔から見られたのか、またどれくらいの時間スケールで、プレートが硬い板としての定常的な振る舞いをしているのかを明らかにすることであろう。古い時代については、現在新生代や中生代（約6400万～約2億4000万年前）について行われている調査研究を、さらに先カンブリア時代にさかのぼって行えばよい。

一方、プレートテクトニクスの時間分解能を与えるのは、海洋底の磁気異常の縞模様で代表される古地球物理学的データだ。だが、この時間分解能を上げて、例えば1年ごとのプレート運動を知ろうとすると、同じような手法では歯がたたない。磁気異常の縞模様から海洋底の拡大速度を推定するときには、数万年から数百万年の周期を持つ、地磁気の反転のパターンを見ているだけなので、原理的にそれ以下の時間分解能は持ちようが

ない。現時点のプレート運動を、過去の記録に頼らずに測定するには、新しい技術が必要になってくる。

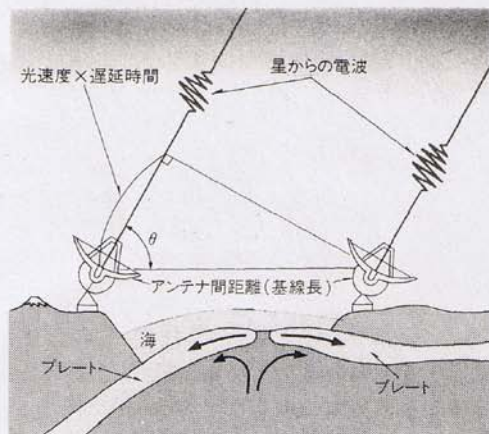
## 距離を正確に測るVLBI

時々刻々のプレート運動を実測して、現在のプレートの状態と過去のプレート運動の記録の溝を埋めるデータを得よう、と登場したものにVLBI（超長基線電波干渉法）やSLR（人工衛星レーザー測距）という方法がある。

VLBI (Very Long Baseline Interferometry) は、最初は電波天文学者たちによって、準星など遠くの天体電波源の構造を詳しく研究するために開発された。電波天文学が、従来の光学観測を主とする天文学に比べて決定的に劣るのは、その角度分解能である。

しかし、離れた2つの電波望遠鏡を使って、同じ電波源を観測すれば角度分解能は飛躍的に改善され、電波源の位置や構造が精密に求められる。この時2つの望遠鏡の位置が遠く離れるほど、角度分解能が良くなる。この性質を生かして2つの電波望遠鏡を限りなく離れたものがVLBIである。電波源の方向が正確にわかれば、逆に2つのアンテナ間の距離が正確に求められるというわけだ。

遠くの天体電波源から到来した電波は、数千キロ離れた2つのアンテナで受信、同時に別々の磁気テープに記録される。この時2つのアンテナの近



① VLBIの原理。直角三角形の1辺と1角がわかれば、斜辺の長さがわかる。

② VLBI実験に参加している郵政省電波研究所鹿島支所の直径26mのパラボラアンテナ。



くでそれぞれ正確な時間信号を記録する。時計には、1日に100億分の1秒程度しか狂わない水素メーザーなどの極めて精密な原子時計を使う。

記録された磁気テープは後で持ち寄って、計算機によって処理され、片方のアンテナに到来した電波が、もう一方のアンテナに到来した電波より、どれくらいの時間遅れているかが100億分の1秒の精度でわかる。

①に示すように、到来時間の差に光速をかければ、電波星からの2局の距離の差が数センチの精度で求められる。ここでもし、2局の原子時計がぴったり合っていて、星の方向( $\theta$ )が正確に求められていれば、2局間の距離が正確に求められるわけである。

現実には、時計は完全にぴったり合っているわけではなく、また地球が回転しているため、2局から見た電波源の方向も時々刻々変化してゆく。このため実際には1回6分ほどの観測をさまざまな電波源を使って何十回も行い、最小2乗法を用いて2局間の距離(基線長)や、地球回転のパラメータなどを推定することになる。

この時もし、2つのアンテナが違うプレートに属していたとして、これらのプレートが互いに運動していたとすると、アンテナ間の基線長には、年間数センチのゆっくりした変化が現れるであろう。現在日本では、茨城県の鹿島町にある、郵政省電波研究所鹿島支所の直径26mのパラボラアンテナ(②)で、アメリカの局などと活発に実験を行っており、実験後のデータ処理も鹿島で行われている。このようなVLBI局は、北米やヨーロッパ

●米国カリフォルニア州モハービ局のアンテナ。



を中心に世界各地に設置されており、電波天文学や地球回転の研究にも役立っている。

### 昨夏からわが国も実験に参加

VLBIと同じくらいの精度を持つ測定技術として、もう一つSLR (Satellite Laser Ranging) がある。地上に置かれたレーザー局から発射された強力な短い光のパルスは、反射鏡のつけられた人工衛星に反射されて返ってくる。そのとき、その光パルスの行き帰りの時間を測ることによって、局と衛星間の距離を測る(測距)ことができる。もしこの人工衛星の軌道が正確にわかっているならば、このような測距の繰り返しによって、地表のレーザー局の位置が詳しく求められる。

このような反射鏡のつけられた衛星のひとつがラジオス(レーザー・ジオダイナミクス・サテライトの略)である。この衛星は直径60cm、重さ411kg。1976年に米国によって極めて安定な軌道に打ち上げられた。この衛星は完全に受動的であり、その機能は光のパルスを反射するだけである。地上からこのラジオスにレーザーのパルスを送るSLR局も、VLBI局のように世界中に配置されている。日本では、和歌山県の海上保安庁下里水路観測所にSLR局が置かれ、観測が行われている。

プレート運動の測定を目的とした国際的なVLBI及びSLRの共同実験は、今のところ米国航空宇宙局(NASA)が地殻力学計画(クラスタル・ダイナミクス・プログラム=CDP)と



## 岩波書店

東京千代田一ツ橋/振替東京6-26240

# 宇宙はいかに創られたか

J.D.バロー、J.シルク著 林 一訳

なぜ生命は発生でき、人間は存在しているのか、また、宇宙の一様性と等方性は完全なものではなく、なぜわずかに非対称的なのか。この二つの問いは密接にからみ、宇宙の起源にひそむ謎に導く。つまり、宇宙は原初から現在の姿にセットされていたのか、それとも……、知られざる宇宙の神秘を明らかにする。  
【岩波現代選書NS版545】 新B6判・定価1500円

# 医療革新とコンピュータ

神沼二真著 現在、医療の中でコンピュータはどのような役割を果たしているのか、ネットワーク、人工知能の発展とともに医療はどう変わるのか、医療を受ける側からの望ましいシステムはどのようなものか、コンピュータ時代の医療の現状と将来を、第一線の著者が、さまざまな角度からわかりやすく解説。  
【NEW SCIENCE AGE9】 新B6判・定価950円

現代科学の営為を多面的にとらえる

# 科学

5月号 ¥55円  
定価680円

【巻頭言】 新入生を迎えて……水谷 仁

【ホットスポット】

遺伝子工学は顕微鏡である……堀田凱樹

生命の起源I……Freeman J. Dyson

ショウジョウバエの形態形成遺伝子……黒岩 厚

心機能の初期発生……神野耕太郎

一活動電位の光学的測定によるアプローチ

モレキュラーデバイス……水島公一・岡本正義

オランウータンの社会構造……鈴木 晃

【話題】 ハレー彗星の探査……山本哲生

【オムニ評論】

サイエンスファクション……Bernard Dixon

してとりまとめている。鹿島のVLBI局や下里のSLR局は、その一環として実験に参加している。例えば鹿島は、米国の標準的なVLBIシステムと互換性を持つ「K-3・VLBIシステム」を独自に開発し、カリフォルニアのモハービ局(③)などとの試験観測の成功の後、84年度からCDP実験に参加している。

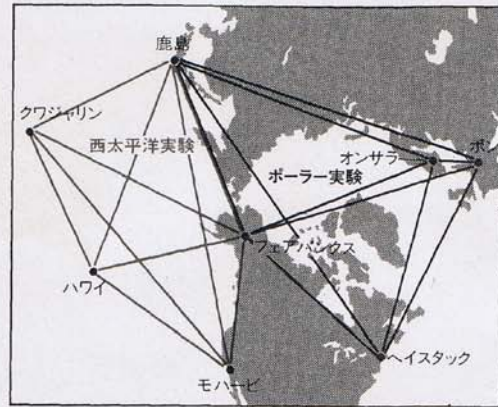
84年夏には鹿島—ハワイ—クワジャリン(マーシャル群島)—フェアバンクス(アラスカ)—モハービの5局による西太平洋実験と、鹿島—フェアバンクス—ヘイスタック(米東海岸)—ボン(西独)—オンサラ(スウェーデン)の5局からなるポーラー実験に参加した(④)。これらの実験は、これから毎年定期的に行われる予定である。この中で特にハワイ局とクワジャリン局は、太平洋プレートに属しており、ユーラシアプレート、あるいは北米プレートにある鹿島局との間で年間10<sup>-7</sup>弱ほど、距離が短くなることが期待され、85年度からの結果が待ち遠しい。

### 分解能が100万倍の目に期待

CDP計画の特徴は、プレート境界をはさむ基線を用いた文字通り、プレート運動の測定のための実験ばかりでなく、ひとつのプレート内の局だけによる、プレートの非変形を確かめる実験も含まれていることである。これは、プレート境界をまたぐ2局間の相対運動が検出できても、プレート自体は変形していないことを確かめなければ、プレート運動を検出したとは言えないからである。この実験は主に、VLBI局の多く分布する北米大陸内で行われている。またカリフォルニアやアラスカなど、複雑な変形の期待される地域では、それらの変形を測るために、特に局を密に配置して測定が行われている。その時はトラックなどに積んだ可搬型のVLBIやSLRの局が活躍している。

日本国内でも、地域的な地殻変動を測定する目的で、鹿島局と筑波研究学園都市にある国土地理院との間で実験が開始されている。将来は国内でも可搬型のVLBI局を製作し、日本各地に移動して、鹿島局を基準局として実験を行う予定である。日本列島だけにとどまらず、太平洋プレートに属する南島島や、フィリピン海プレートに属す

④西太平洋実験と、ポーラー実験のそれぞれの参加局。



る南大東島などの離島と、本土との間で実験を行えば、国内でもプレート運動を検出できる可能性があり、面白い結果が得られるだろう。

現在知られているプレート運動速度は、前に述べたように海洋底の岩石の残留磁化の反転のパターンをもとにしたもので、過去数百万年の海洋底の拡大速度の平均をもって、現在の「瞬間的」なプレートの速度としている。

VLBIやSLRを用いると、我々の生活レベルである数年単位で動きを測ることができ、文字通り瞬間的な運動に近づくわけである。100万年と1年とは実に6けたの差がある。実際に1年間プレート運動を測った時、本当に100万年間のプレート運動の大きさの100万分の1の値が得られる、と皆が信じているわけではない。むしろ物事を、時間分解能が6けた良い目で見ることによって、全く新しい事実が明らかになることが期待される。

### プレートはまじめに動くか

わかりやすい例をあげると、人間が時速3<sup>km/h</sup>で歩いているとする。これを時間単位でしか見ることができない人は、時速3<sup>km/h</sup>という事実しかわからない。ところが、もし10分の1秒ごとに速度を測れば、その速度に周期的な変化が見えて、その人間を実際に見なくても、人間は車輪で歩いているのではなく、2本の足を交互に出すことによって歩いている、という事実が推察できるはずである。

もっと極端な例をあげると、秒速10<sup>km/s</sup>で走って

いる自動車は、平均して1秒に100分の1ミリ進むことになるが、それが測定可能だとして実際に測ってみると果たしてどうであろうか。本当に1秒ごとにきちんと100分の1ミリずつ動いているかもしれないし、あるいは速度自体に周期的変動が検出され、車体の共振特性や、エンジンのシリンダーの個々の爆発による回転トルクの変動などを反映した、興味深いデータが得られるかもしれない。

プレート運動についても、同じことが考えられる。海洋プレートは磁気異常の縞模様でみる限り、定常的に動いているように見えるが、もっと細かい目で見ると、それほど毎年まじめに(?)動いているか疑問である。もしプレート運動の速度に非定常性がある(例えば、1980年代は年間10%で動き、1990年代は全然動かなかった、など)、それがわかれば、それはプレート自体の物理的性質、プレートを動かす原動力、プレート境界を成す断層面の性質などを解明する貴重なデータとなるはずである。

### むちゃくちゃな結果が出るかも

V L B I や S L R による瞬間的なプレート運動の測定は、地球科学でも全く未知の分野であり、どういう結果が得られるのかはわからない。が、一応我々に想像可能ないくつかの可能性を考えてみよう。

一番考えやすいのが、プレートがこれまでの数百万年間に動いたのと同じような速さや向きで、毎年動いているというものである。数年間の測定結果を、そのまま何百万年の現象に結びつけるのは、多少危険が感じられる。しかし、運動速度の大きさや向きが予測した値に一致し、それらが全地球的につじつまが合えば、現在における瞬間的なプレート運動をとらえたと考えてもよいであろう(もちろん観測はこんごも続けてゆかなければならないが)。こういう結果は喜ばしくはあるが、当たり前過ぎて、その後の発展性という点で少々面白みに欠ける。

次に考えられる可能性は、プレートの運動の速さや向きが、数百万年の平均とは幾分違っている、という場合である。このときは、プレートは時々向きや速さを変えながらも、長い目で見れば

一定の速度で動いているということになるのだろうか。

まったくむちゃくちゃな結果が得られるかも知れない。このときは、数年のような短い時間スケールでは、プレートという概念が成り立たないのかも知れない。あるいは、1年間のプレート運動などというものの自体が、地球回転や地球潮汐、またはそれ以外の未知の短周期の変化に完全に隠されてしまって、検出不可能なのかも知れない(量子力学における不確定性原理を思い起こさせる)。

### これまでのデータは予測と一致

最後に、まだ不十分ながら現在までに得られている V L B I と S L R のデータを紹介します。いずれも NASA から発表されたものだ。S L R の方が V L B I より少し歴史が古いのので、データも多少豊富である。米国では東海岸のヘイスタック観測所と、カリフォルニアのオーエンスバレー電波観測所の間を結ぶ4000キロの基線で、76年から V L B I 実験が行われている。これは同じ北米プレート内の局同士なので、基線長の変化はないことが予測されるが、現在までの測定結果によると基線長の変化は年間  $0.0 \pm 0.5\%$  で有意な変化は検出されていない。

また、カリフォルニアにあるサンアンドレアス断層をはさんだ900キロの基線(クインシーサンジェゴ間)でも、S L R 実験が72年から行われている。数百万年の運動の平均値によると、毎年5.5%の割合で基線が短くなることが予測されている。これに対して、72年から79年までの実測はそれより少し多い毎年  $8.0 \pm 2\%$  の割合で短くなってゆくことを示した。最新の報告では、82年までのデータを含めて毎年  $6.5 \pm 1.5\%$  という値を出しており、一応予測と一致する傾向を示している。

最近では北米とオーストラリアなどの局との間の S L R 実験の報告もあり、予測値にかなり近い値が得られている。しかし、まだ全測定期間が短いので何とも言えない。一方、V L B I に関しては、プレート運動を測る目的の実験はまだ始まったばかりである。意味のある結果が得られるのはまだ数年先であるが、その確実性は高い。 ■