

## D 2

# 大陸移動・プレート運動を実測する宇宙測地技術

## Real Measurements of Continental Drifts and Plate Motions

### Using Space Geodetic Techniques

高橋富士信およびCRL時空計測研究グループ

Fujinobu Takahashi and Space & Time Measurements Group in CRL

郵政省通信総合研究所

Communications Research Laboratory, MPT

#### Abstract

The revolutions of global geodetic measurements have begun using Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR) and Global Positioning System (GPS). Communications Research Laboratory (CRL) has performed international VLBI experiments since 1983 and SLR observations since 1990. The space geodesy have revealed the dramatic results and coincidence between the old continental drift predictions and the latest real measurements of plate motions

#### 1. はじめに

テレビや写真集などで、しばしばランドサットからの日本列島の撮影画像を見る機会がある。画像の美しさとともに、我々が見慣れた地図と同じ海岸線の映像に驚かされることがある。人類が地球の表面から離れることができなかつた時代に、これほどまでに正確な地図がつくられてきたことに驚嘆せざるを得ない。

これまでの測地・測量の方法では、地球という2次元曲面上にへばりついた、いわば尺取り虫としての測量隊が、地上の基準点間の距離や方位の測定を繰り返しながら、その結果を集積して立体的3次元的に地図を作成してきた。残念ながらこの方法では、測量の繰り返しによる誤差の累積が大きくなりがちであり、精度の大幅な改善は困難である。

この地上測量の精度は5-6桁精度、つまり100kmの測定で10cm程度の誤差が入り込むことは避けられない。北海道・九州では数mもの誤差がある。

一方、VLBI、SLRなどの宇宙測地技術では大陸間距離1万kmを2~3cmの誤差で測定できるので、9桁の測定精度が可能である。この比較から宇宙測地技術の測定精度が従来方法を大幅に改善していることが分かる。この技術を利用して、大陸間距離を測る試みが行われてきた。その最も劇的な成果が、後述するようなハワイやマーシャル諸島などの太平洋上の島々が日本列島に接近していることを実証した成果であった。本稿では大陸移動・プレート運動の科学、宇宙測地技術の概要、宇宙測地技術の主要な成果を紹介する。

#### 2. 大陸は移動する（プレート運動の理論）

アメリカ地球物理学会が工夫した面白いパズルがある。厚板の世界地図をほぼ海岸線に沿って切り離したジグソーパズルの一種である。このパズルを並べてみると、確かにアフリカ大陸の西海岸と南アメリカ大陸の東岸はぴったりと重なることが実感できる。また、南極大陸のまわりに、アフリカ・南米両大陸の南端とマダガスカル、インド半島、豪州を集めると一固まりになることも実感できる。多分、ドイツのベルリンで生れたウエゲナーが大陸移動説を主張したのも、最初はパズルの発想による直観によるものであろう。ウエゲナーによれば、かつて地球上の大陸は1つに集まって、原始的な超大陸「パンゲア」をつくっていた。ギリシャ語で「すべての大陸」を意味する言葉であるという。

これらの結論と証拠を集めて、彼は「大陸と海洋の起源」と題する本を出版した。当時の学会におけるウエゲナー説に対する反応は、懐疑的であったと伝えられている。その理由の1つは、大陸を移動させる原動力の問題である。ウエゲナーは、地殻に働く月や太陽による潮汐力を主として考えていた。しかし、こうした潮汐力が大陸を動かすほどの力を持っていれば、地球の自転は1年以内に停止するであろうことが証明されて、潮汐力は見捨てられた。

ウエゲナーの死後、地球のマントル内の対流によって大陸が運ばれるというホームズ説が現われ、プレートテクトニクス理論の先駆けとなった。1950年代に入ると、高感度な磁力計が普及し、岩石の磁化方向が検出できる

ようになった。人類の海洋開発が進むにつれ、海面上で地磁気異常が測定できるようになったが、例えば太平洋や大西洋などの海面上を航行しながら地磁気以上を測定すると、見事な縞模様を得られることが分かったのである。別の方法で地球磁場の反転のタイムスケールが決められれば、海洋底が拡大してゆくスピードを推定することが可能となるわけである。地球磁場の逆転の歴史は、地上の岩石の放射能年代測定により、ある程度分かっているため、この縞模様のパターンから年間数cmの超微速度で海洋底が拡大していることが判明してきたのである。

この海洋底拡大説と大陸移動説が発展して、プレートテクトニクス理論に進化してゆくことになる。しかし、大陸間の距離は一般に数千km以上あり、通常の測量技術では数十m以上の誤差を生じてしまい、年間数cmの大陸移動を検証するためには、少なくとも数百年間の変化を経なければ測定は不可能である。しかし1980年代後期になって宇宙測地技術が登場し一気に、実測が現実的課題となったのである。

### 3. 宇宙測地技術—VLBI/SLR/GPS

VLBIとは、超遠方にある準星電波源から発せられた電波雑音を、例えば日本とアメリカというような地球の裏側とでもいう程に遠く離れた2地点で受信する測定法である。そして、両局で受信した同一波面の遅延時間差を0.1ナノ秒という精度で測定するわけである。その遅延データから大陸間の距離がcm精度で測定が可能となる。VLBI測定の原理は本当に簡単だが、この原理を実践・実現することは生易しいものでない。ハード・ソフトの開発が国際的協力のもとに進められた結果、実現したものである。

例えば、時間の管理と時計合わせは、VLBI実験の常に大きな問題である。もし相互に時計が不安定であれば、そのゆらぎが直接、遅延時間の誤差となって入り込んでくる。VLBIで、例えば日米間の距離を計る場合、最低24時間の測定が必要である。24時間は約 $10^8$ 秒であり、必要な測定精度が0.1ナノ秒 ( $10^{-10}$ 秒) を達成するには、両者の比から $10^{15}$ という相対精度が必要であることが判る。これを実現するのは水素メーザ原子時計であり、この性能が実験の精度を決めることになる。わが国ではVLBIの独自開発でCRLが重要な役割を果たし国際的評価を受けてきた。

CRLも大きな役割を果たしたNASAの地殻力学プロジェクト (CDP) の成果から、VLBIで達成されてきた測地精度を評価してみよう。1984年以来CDPの中で測定してきた107基線について、基線長の再現性誤差を評価すると、ほぼ基線長に比例した再現性誤差となっていることが判る (第1図)。6,000kmをこえる長基線では、水蒸気による遅延誤差などの大気モデル誤差が、主要な再現性誤差要因と考えられる。こうした課題は残っているにせよ、 $2 \times 10^{-9}$ という驚異的な再現性が得られており、9桁の精度という目標は達成されていると言えよう。参考までに、VLBIで測定できる基線長とは各アンテナのAz/EI駆動軸の交点、つまりアンテナをどの方向へ向けても動かない不動点間の距離である。

VLBIの測定結果の、正確さを検証するためには、別の原理による比較測定が不可欠である。これを確度の評価と呼ぶが、VLBIと同程度以上の精度を持つ別手段との相互比較が必要である。大陸間の長基線については、「あじさい」や「ラジオス」といったレーザ測地衛星を媒介とした衛星レーザ測距SLR法が唯一のcm精度の比較手段と言える。地上から衛星にレーザ光線を照射して、その反射往復時間を測定することで、大陸間地上局間の距離1万kmを数cmの精度で測定が可能である。CRLではSLR実験を1990年から参加し、海上保安庁が1985年から参加し大きな貢献をしてきている。

中距離では、最近のGPS (全世界測位システム) を利用した測地法との比較が効果的である。GPS衛星には原子時計が搭載されており、衛星から発射される正確な時刻パルスが地上で受信して、位置を決定する方法である。2周波GPS受信法を用いなければ、電離層の補正を行うことができ、200~300kmの距離を2~3cmの精度で測定が可能である。各技術間の競争が、一層の精度の向上を引き起こしている。

### 4. 宇宙測地技術の成果

宇宙測地技術を実際に適用して、大陸間距離を測る試みがNASA/CDP計画のもとCRLなどにより行われてきた。その最も劇的な成果が、後述するようなハワイやマーシャル諸島などの太平洋上の島々が日本列島に接近していることを実証した成果であった。まず大陸間距離測定そのものからも大きな成果が得られた。従来の地上測量では、重力の方向が垂直の基準としているため、東京付近では、角度で12秒角もの鉛直線ずれが生じているのである。このずれによる日本列島の見かけ上の位置ずれが、CRLとNASAとの日米共同VLBI実験の中で正

確に検証された(1984年)。国土地理院の日本測地座標系は、VLBIが基準とする座標系に対して約860.9mだけ南東の方向にずれていることが分かった。逆にこのことは、日本列島の鹿島VLBI局の位置が、地球的規模で超高精度に決定されたことを意味している。

1983年5月に発生した秋田沖を震源とする日本海中部地震は、日本列島のもう1つの北米プレートが重なりあっているとの説を信憑性を高めた。フォッサマグナと呼ばれる、本州を分離する地質学上の構造線が北米プレートとユーラシア(アジア)プレートとの境界をなしているとの説が有力となってきている。これが事実であるとするれば、日本列島の北東半分は、北米大陸と同系であることになる。東京はワシントンと同じプレート上にあることを意味する。この点に関しても、日米VLBI実験は、興味深いデータを提供してきている。鹿島とアラスカ・フェアバンクスのVLBI基線長測定結果が、10年間にわたりほとんど変化を見せていない。一方、日本と中国との間の距離は年間約3cm短縮していることが日中VLBI実験の結果明らかとなった。この両者からVLBIの測定結果は、東北日本が北米プレートにあるという仮説を支持したと言える。

こうした宇宙測地技術の成果の総括から、岩石磁気などの結果に基づくプレートテクトニクス理論が概ね実測値と一致した傾向を示したことが結論出来よう。これは大変重要なことを意味している。岩石磁気の節で述べた通り、プレートテクトニクスのモデルは数百万年というタイムスケールから導き出された結論である。数百万年というスケールでプレートは一樣に運動していても、年というスケールでは、ステップ状に運動していても構わないはずである。ところが、VLBIによる測定結果は、プレートが年というスケールでスムーズに運動していることを明らかにしてしまった。まさにプレートは「ずるずると」連続的に動いており、間欠的にステップ状に運動してはいないことが証明されたのである。

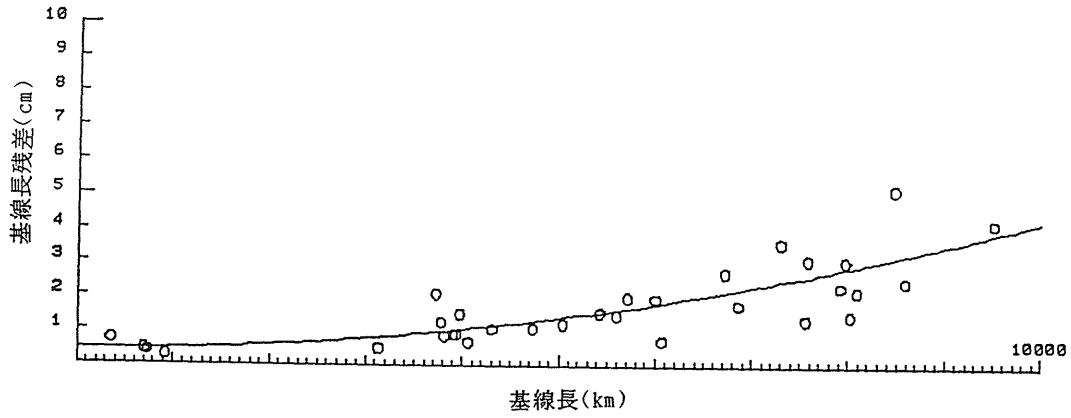
さて、VLBI測地実験の最も劇的な成果である。ハワイやマーシャル諸島など太平洋上の島々が動いたという実験成果について少し詳しくご紹介しよう。CRLは、1984年からNASAと日米実験、1985年から国土地理院との国内実験、そして1989年から研究所独自の西太平洋実験を実施してきている。日米共同実験により、ハワイやマーシャル諸島などの太平洋上の島々の動きが検出され、国内共同実験により父島の動き、西太平洋実験により我国の最東端の南鳥島の動きが検出されたのである。第2図にCRLが関与している主な太平洋地域のVLBI実験の基線配置を示す。この実験により得られた基線長の変化をやはり第2図に示す。第3図は、鹿島とハワイのカウアイ島を結ぶ直線距離の変化を示すもので、1984年から1992年までの間に50cm以上基線長が短縮していることがはっきりと分かる。この測定値の減少率は、最小2乗法により年間6.3cm程度であることが分かった。この量はハワイの水平運動の日本列島方向成分であり、実際のハワイの水平運動は年間9cm程度にもなる。これらの結果からプレートテクトニクス理論と実測との比較研究が一気に華開くという地殻力学上の学問的貢献をすることができた。ハワイもマーシャル諸島も年間9cm程度の速度で、おおむね北西方向に太平洋上を運動しているのである。

まさに「ひょっこりひょうたん島」を地で行った話であるが、「ひょっこりひょうたん島」の場合には、海底から切り離された浮島であったようだが、この場合のハワイやマーシャル諸島は、太平洋の深海底の岩盤と一緒に運動しているのである。まさに大陸も深海底も実際に移動しているのである。

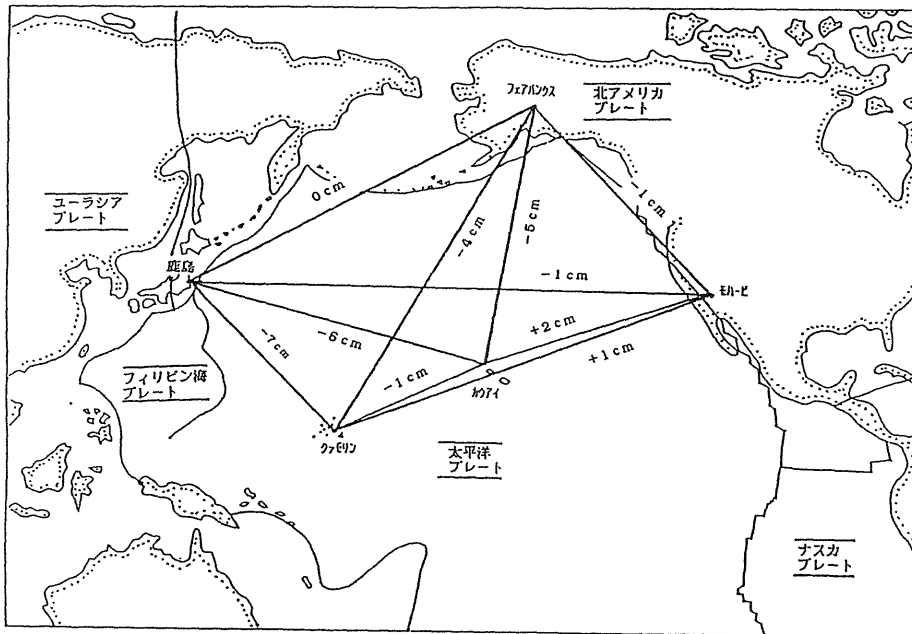
## 5. おわりに

日本列島は、世界にも稀な、4つの巨大な地殻プレートが相接し、衝突し、片方が他方の下に沈み込むなど、非常に活動的な地帯である。昔から日本は「火山列島」とか「地震の巣」であると言われてきたが、プレートテクトニクス理論により、この巨大な活動性のエネルギー源が、地球の表面を覆う厚さ約100kmのプレートの相互エネルギーによるものであることが判明してきている。また、伊豆半島付近では、フィリピン海プレートが北進し、日本列島に衝突しており、現在最も心配されている駿河湾を震源とする大地震は、このフィリピン海プレートの動きが原因と考えられている。また3つのプレートが直下で層状をなす首都圏直下地震も心配されている。

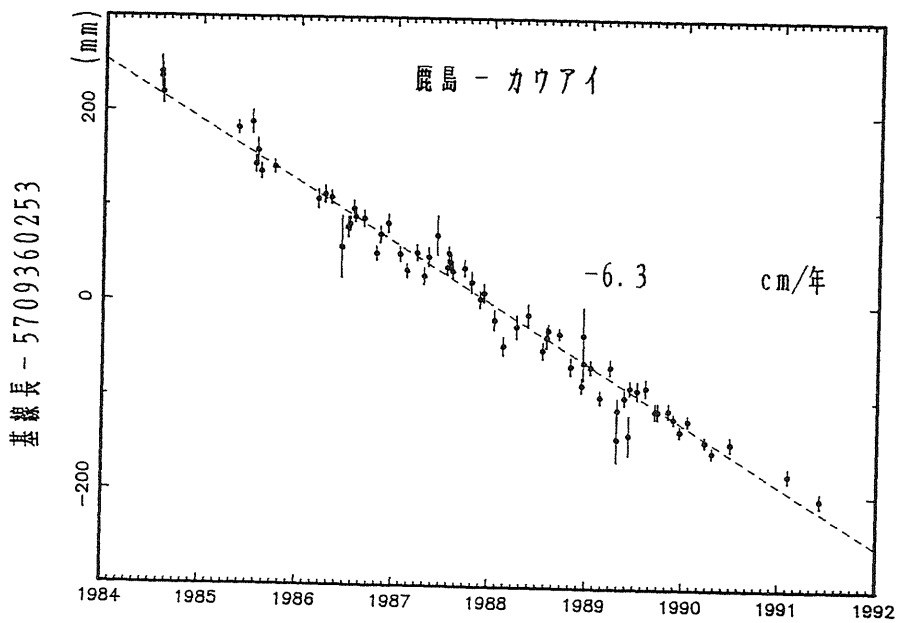
今後は、宇宙測地技術を日本周辺の危険地域に重点的に配置し地殻変動やプレート運動を計測することが一層求められることになろう。



第1図 基線長と基線長残差の関係。基線長残差は図3のように基線長データに直線を当てはめたとき、各データの直線からのずれを加重平均したもの。曲線は両者の関係を最も良く再現するような局位置推定誤差を仮定したときの予測基線長残差。



第2図 日米太平洋実験参加の基線長変化



第3図 鹿島とハワイのカウアイ島を結ぶ直線距離の変化