

## VLBI でみる地球

日置幸介

海洋底が大陸を乗せて地表を動きまわるといふプレートテクトニクスの考えは現代地球科学の指導原理であるが、肝心のプレートの動きについては“状況証拠”しか得られていないことを指摘する人は多い。また実際にプレートが動いている“直接証拠”を見るまではプレートなんて信じないという立場の人もある。VLBI(長基線干渉法)の測地応用実験はそのような人たちのために始まった。わずか数年の間にVLBIはプレートテクトニクスの予言を見事に実証するとともに、新たな謎をもたらしつつある。

### プレートの動きを測る

VLBI(Very Long Baseline Interferometry, 図1)は本来、電波天文学で培われた技術であるが、電波望遠鏡(パラボラアンテナ)の位置や地球回転のふらつきが今までにない高精度で求められることから測地応用の期待が高かった。なかでもアンテナ間の距離(基線長)はどんなに遠くても誤差数cmで求められるとあって、異なるプレートに置いたアンテナ間の距離変化から、年間数cmにすぎないプレートの動きを実測する可能性が、後述の衛星レーザー測距(SLR)とともに地球科学者の注目を集めた。

こうして国際VLBI実験はNASAの地殻力学計画として始まり、わが国では郵政省通信総合研究所(当時電波研究所)が1984年から茨城県鹿島にある直径26mの電波望遠鏡を用いて参加している。この実験は、太平洋、北アメリカ、ユーラシアの各プレート上のアンテナの距離を、VLBIという正確な“ものさし”でくり返し測ってその変化を検出しようというものである。翌1985年には早くも鹿島とハワイとの数cmの距離の縮み

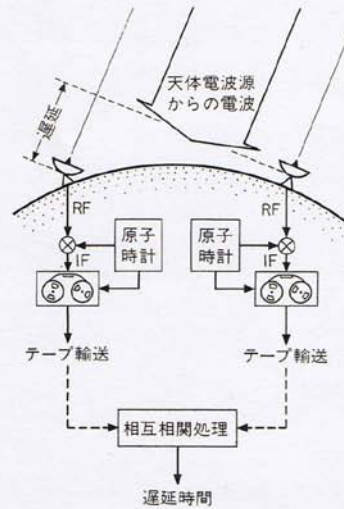


図1 VLBIの原理図。クォーサーから来た雑音電波は原子周波数標準によって周波数変換(RF(高周波)からIF(中間周波数)へ)され、時刻符号とともにレコーダにデジタル記録される。あとでテープを持ち寄って比較することによって遅延時間を求め、それをもとにアンテナ間の距離を求める。技術的な詳細は文献<sup>(1)</sup>参照。

が予想通り検出され<sup>(1)</sup>、日本列島下に沈み込む太平洋プレートの動きとして話題を呼んだ。

プレート境界は発散型(海嶺)、収束型(海溝)、すれちがひ型(トランスフォーム断層)に分けられる<sup>(2)</sup>。後二者においてはプレート運動の向きが、前者では海洋磁気異常の縞模様の幅としてプレートの速さがわかる。ただしこの“速さ”は数十万年から数百万年といった地磁気反転の時間スケールに基づいた間接的で長期平均的な値であるから、新たにプレート運動直接測定の手段を手にした意義は大きい。VLBIによるプレート運動の実測は今までの方法では到達できなかった地球科学のフロンティアであり、決して“あらかじめ答のわかった”仮説検証実験ではない。5年間のデータの蓄積は、“ハワイが日本に近づいているらしい”という定性的な段階から一歩進んで、鹿島とハワイの距離変化率は予測とどこまで合うのかという議論までも可能にしつつあるのである。

### “仮説の時代”の終わり

図2に国際VLBI網と、代表的な基線の時間

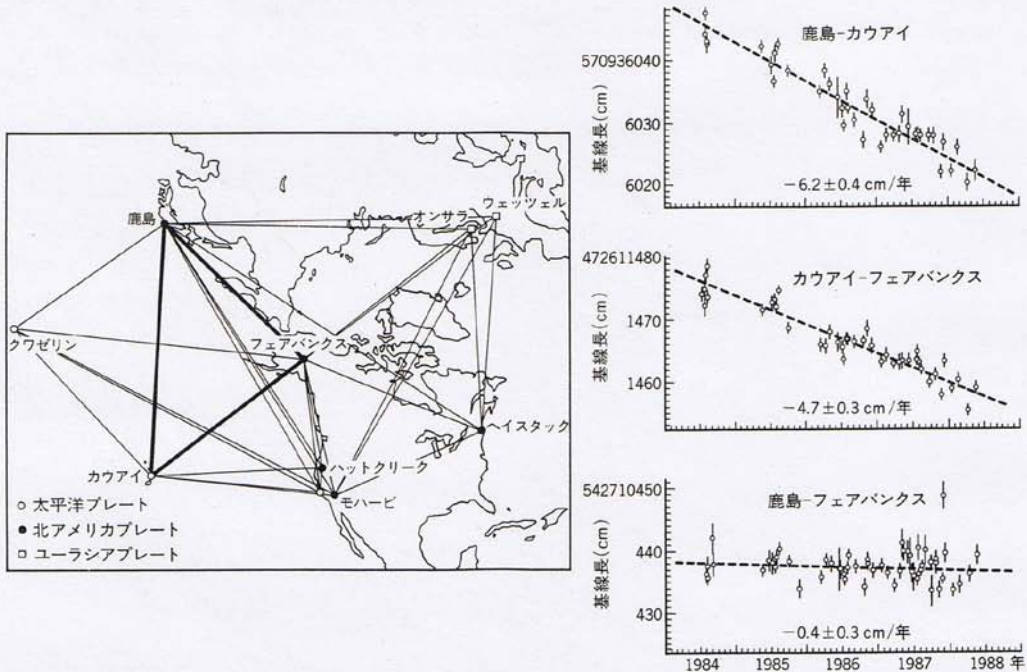


図2 国際 VLBI 実験網と代表的な局間の距離の時間変化. グラフの縦軸は基線長, 横軸は時間を, 数値は基線長変化率を示す. 太平洋プレートの西北への動きに伴って鹿島-ハワイ(カウアイ), アラスカ(フェアバンクス)-ハワイの距離が年々短くなる.

変化を示す. 鹿島とハワイの距離が毎年 6 cm 強で縮み, アラスカとハワイの距離が幾分か小さい毎年 4 cm 強で縮んでいるのは, 西北に動く太平洋プレートという常識と調和する. 一方同じ北アメリカプレートに属する<sup>(3)(4)</sup>鹿島とアラスカの距離があまり変わっていないのも常識的である.

これらの距離変化につじつまが合うように最小 2 乗推定した各局の水平速度を図 3 に示す. ふつう距離変化から位置変化を求めるにはある点を固定する必要がある. ここでは北アメリカの安定大陸上の局を固定したので, これらは北アメリカプレートから見た動きにほかならない. プレートの動きは地球上のある固定点(オイラー極)のまわりの回転として表わせる<sup>(2)</sup>. したがってオイラー極を北極として描いたメルカトル地図を描くとそのプレートは真横に動くはずである.

図 3a, b ではそれぞれプレート運動モデル<sup>(5)</sup>に基づく太平洋プレートとユーラシアプレートのオイラー極を北極にとった. 同じプレートに属する局の動きはピッタリと揃い, これらのプレートが一

体として動いているのがよくわかる. こういったここ数年間のプレートの動きが過去数百万年の平均的な動きとよく合うということから, 両者は同じ運動を見ていると考えてよい. “それ自身変形しないプレートが互いにゆっくりと動く”という仮説はここに実証されたのである.

### 押されて縮む日本列島

では VLBI の結果はすべて予言通りだったのだろうか. 実はそう単純でもないのである. 図 3a は北アメリカプレートから見た各局の動きだが, よく見ると太平洋プレートの 3 局に加えて“北アメリカプレート上にある”はずの鹿島局までがそれらと同じ向きに動いているのがわかる. プレートは変形しないはずであり, 同じプレート上の局が動くのは変である. 東北日本北アメリカプレート説には異論がないわけではないが, どんなプレートを設定してもこのような西北西への年間 3 cm を越える動きは説明がつかない. 実はこ



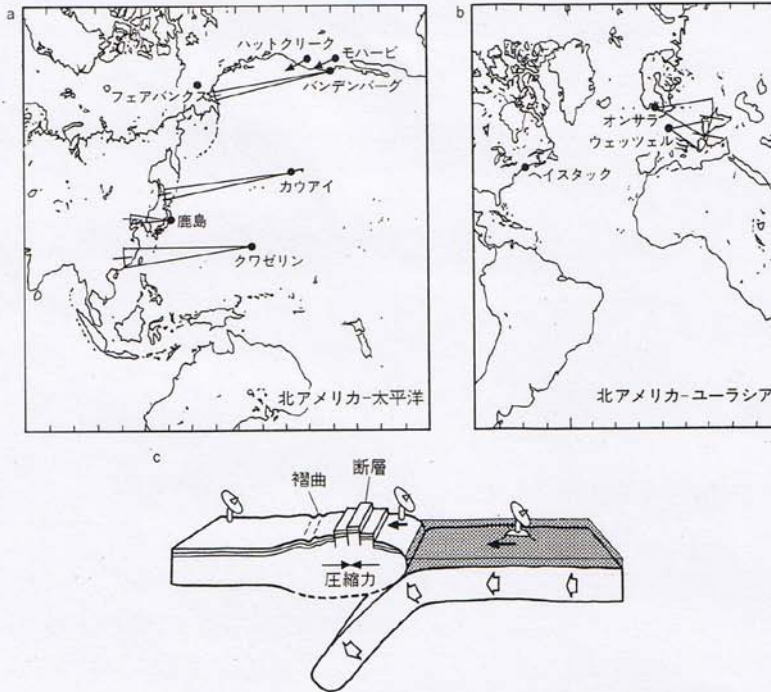


図3 北アメリカプレートに対するVLBI局の水平速度。扇の向きと長さは運動の向きと速さを、扇の幅と扇の先端の線分はそれらの正規誤差を示す。aは北アメリカ-太平洋の、bは北アメリカ-ユーラシアの各プレートのオイラー極(本文参照)を中心としたメルカトル図法、速度ベクトルには各局の緯度の余弦の逆数を掛けているので、太平洋プレート、ユーラシアプレートの上の局の速度は真横向きでかつ同じ大きさになるはずである。鹿島局の動きが太平洋プレートと同じ向きになるのは、沈み込む太平洋プレートの“押し”に伴う日本列島の短縮変形(c)によるものと考えられる。

これはプレートが内部変形しているためなのである。

鹿島の運動方向が太平洋プレートと同じというのがその説明のカギとなる。太平洋プレートの沈み込みによる東方からの“押し”によって東北日本が一様な圧縮応力場にあることは広く知られている<sup>(6)</sup>。その結果、地殻はひび割れたり(活断層)、しわがよったり(活褶曲)して短縮変形する。その際、鹿島のような太平洋岸は沈み込むプレートと同じ向きにじわじわ動くに違いない(図3c)。従来の地上測量によると、このような短縮は年間 $10^{-7}$ (100 kmのものが年々1 cmずつ短くなる)程度らしい<sup>(7)</sup>。日本列島の幅は数百 kmであるから鹿島の年間数 cmの動きはほどよい大きさである。

プレートの相互作用によってその境界部が“ある程度”変形するのは常識なので、この結果は決してプレート論との矛盾ではなく、沈み込み帯の変形が“どの程度”であるかの一つの例である。VLBIのライバルである衛星レーザー測距の最近の解析によると、紀伊半島先端にある海上保安庁の下里局が西北に毎年4 cmずつ動いているという<sup>(8)</sup>。これもフィリピン海プレートの沈み込みに伴う西南日本の縮みとして解釈するべきだろうが、

地殻の恒久的な変形というよりむしろ地震に先行する弾性変形に近いかもしれない。

### 距離変化率の謎

最後はグローバルな話題である。鹿島などプレートのはしっこを除くと、VLBI局どうしの距離変化はプレートテクトニクスの予測にほぼ等しい。すなわち同じプレート上の局を結ぶ基線はあまり変化せず、異なるプレートを結ぶ基線はプレート運動モデル<sup>(9)</sup>から計算される変化率にほぼ従う。しかし観測変化率の精度向上につれて、それらが予測変化率と少しだけ違うことがわかってきた。

テキサスのフォートデービス局と北アメリカ東海岸のウェストフォード局を結ぶ長さ3000 kmあまりの基線をとってみる。両者とも北アメリカプレートの安定地域に属し、当然両者の距離変化はないと予測される。ところが1981~1986年の6年間の、365回にわたるVLBI実験は、両者の距離が毎年7 mmずつ短くなっていることを示した<sup>(9)</sup>。変化率の誤差はせいぜい1 mm/年程度であるからこれは大きすぎる。

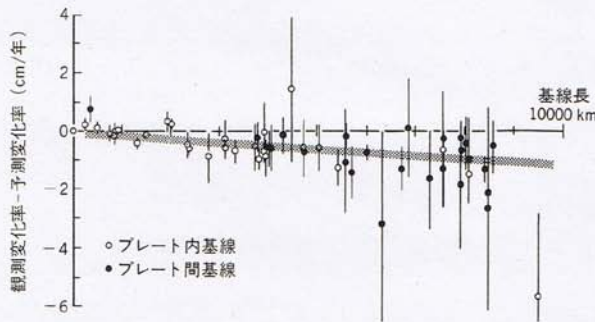


図4 1986年までのすべてのVLBIデータ<sup>(9)</sup>に基づく距離変化率の予測値と観測値の比較。横軸は距離を、縦軸は観測値と予測値の“ずれ”を示す。観測値はいつも予測値よりマイナス側にずれ(縦軸が負になる)、そのずれは両局の距離に比例して大きくなる。両者の比例係数(図中で影をつけた線)は距離1000 km 当たり年間約1.3 mmである。

次に同じウェストフォード局と、西ドイツのウェツェル局を結ぶ約6000 kmの基線をみてみよう。モデル<sup>(9)</sup>は、北アメリカプレートとユーラシアプレートを結ぶこのプレート間基線に毎年19 mmの伸びを予測する。ところが1983~1986年までの238回に及ぶVLBI実験は年間12 mmの伸長しか示さなかった<sup>(9)</sup>。この変化率の誤差も年間2 mm程度であるから(予測値の誤差も同程度)両者のくいちがいはやはり有意である。これらの微妙な差をモデルと観測の扱う時間スケールの違いのせいにするのはたやすい。しかしこの“ずれ”には次のような面白い特徴があるのである。

特徴とは、なぜか“いつも観測値は予測値より負にずれ”，そして“ずれの大きさは距離に比例する”ということである(図4)。その意味するところはこの“ずれ”をプレート運動による寄与を除いたあとの距離変化と考えるとわかりやすい。すなわち地球上の任意の2点を結ぶ距離は縮みつつあり、その速さは距離に比例する。“ハッブルの法則”をご存じだろうか。それは遠くの銀河ほど高速でわれわれから遠ざかっているという法則で、宇宙全体の一様な膨張の証拠として3Kの背景放射と並ぶビッグバン宇宙論のよりどころである。図4の現象はちょうどその反対で、地球の一様な収縮とも解釈できる。

収縮率を見積もってみよう。図4の縦軸と横軸の比例係数は1万 kmで年間約1.3 cm、すなわち余分な縮みは距離1000 km当たり毎年1 mm強ということになる。これを全世界にあてはめると地球半径は毎年1 cm近く減少することになるが、これは実際の現象としてはいささか大きすぎ

るというのが率直な感想である。少なくとも地質年代を通じての永年的な現象とすると、三葉虫が地球に出現したころには地球半径は今の倍くらいあったことになりちょっと受け入れがたい。

残る可能性は二つである。第一はこれをみせかけの現象とする立場である。われわれも系統的な誤差源となり得る大気モデルを変えたり、準星の構造変化を考慮したりといろいろな方法を試しているが今のところそのような誤差源は発見されていない。ただVLBIはなにぶん若い技術でありわれわれのまだ知らないどんな誤差源があっても不思議ではないのである。第二はこれを永年変化ではなく周期をもつ現象とする可能性である。生き物のようにふくれたり縮んだりする地球を想像するわけである。もっとも、そのようなメカニズムが可能かどうかはまた別の問題である。

(Kosuke HEKI 郵政省通信総合研究所)

## 文 献

- (1) K. HEKI et al.: *Tectonophysics*, **144**, 151(1987)
- (2) 上田誠也: 岩波講座地球科学第1巻, 岩波書店(1978)p. 225
- (3) 小林洋二: 月刊地球, **5**, 510(1983)
- (4) 中村一明: 地震研究所彙報, **58**, 711(1983)
- (5) J. B. MINSTER & T. H. JORDAN: *J. Geophys. Res.*, **83**, 5331(1978)
- (6) K. HUZITA: *Mem. Geol. Soc. Japan*, **18**, 129(1980)
- (7) 原田健久・葛西篤男: 測地学会誌, **17**, 4(1971)
- (8) 佐々木稔: 1988年度経緯度研究会
- (9) J. W. RYAN & C. MA: *NASA Technical Memorandum* 100682(1987)
- (10) 郵政省電波研究所編: 電波研究所季報, 第30巻, K-3型超長基線電波干渉計(VLBI)システム開発特集号(1984)