

VLBI の 10 年—地球科学への貢献

真 鍋 盛 二

〈国立天文台・水沢観測センター 〒023 岩手県水沢市星ガ丘町 2-12〉

E-mail: manabe@miz.nao.ac.jp

VLBI が高精度測地計測方法として登場して 15 年，国際ネットワークによる地球回転定常観測が始まってから 10 年が経過した。この間にかつて無い精度のデータを大量に生みだし，大気と固体地球の相互作用，流体核—マントル境界の物理，プレート運動の実測とプレート境界のテクトニクスなど，地球科学に多大な貢献をした。しかし，簡便な GPS の普及に伴い測地計測分野での勢力分布が激変している。VLBI の地球科学への貢献を紹介するとともに，今後の役割について述べる。

1. はじめに

天文月報の大多数の読者は VLBI（超長基線電波干渉法）と聞くと，天体を高い分解能でマッピングし，AGN 等の構造を描き出す観測方法を思い描くかもしれない。しかし今までに行われた VLBI 観測の殆どは地球科学を目的としたものである。VLBI は最初に天体物理分野で成功を納め，技術的にも Mark I, Mark II と進歩してきた。しかし，VLBI を精密測地計測の手段として実用化するにはまだ精度が不足で，例えば 1968 年にカナダの 2100 km 基線で行われた最初の測地観測の精度は 20 m であった。群遅延時間を用いる観測では観測周波数帯域幅が精度を決めるが，当時の技術では帯域を広げることは困難であった。これに突破口をあけたのはロジャースである。彼は帯域幅合成法を考案し，実質的に 100 倍以上に広げることに成功した。この方法に基づいて NASA が開発したシステムを Mark III という。ここに至って VLBI は 1/1000 秒角 (1 mas)，地表面の長さにして 3 cm，しかも観測地点間の距離によらない，という従来の測地計測手段とは桁違いの精度を実現し，画期的な計測手段として登場したのである。日本では，電波研究所(現 通信総合研究所) が K 1, K 2 と開発を進め，1980 年代には

Mark III と互換性をもつ K 3 を開発し日米の大陸間測地観測に成功したことはよく知られている。

VLBI による本格的な測地観測は 1979 年から開始され，地球回転のモニタリングが始まったのは 1980 年 11 月である。一方，ラジオスを用いた衛星測地の精度も格段に向上し，時代は宇宙測地技術へと向かったのである。この趨勢を受けて，地球回転のいろいろな観測方法を比較し地球回転観測の国際事業を見直すために Merit という観測及び解析のキャンペーンが 1983 年 10 月から 1 年間行われ，その結果国際地球回転事業では VLBI，人工衛星レーザー測距 (SLR) と月レーザー測距 (LLR) という宇宙測地技術の結果だけを用いることになった。[その後 GPS が加わった。]

NASA の地殻力学計画 (CDP) が始まったのは 1983 年，国際 VLBI 観測網による定常的な地球回転観測が開始されたのは Merit にあわせた 1984 年からであり，ちょうど満 10 年経過したことになる。かつてない精度のデータを大量に生みだし，グローバルな測地計測分野に君臨していた VLBI にも，最近になって GPS が強力なライバルとして登場し，すでに VLBI を凌駕する分野もでてきた。一方，さらに高精度を目指して次世代の VLBI の開発が進められている。ここではこのような節目にあたり，VLBI が地球科学になした貢献を紹介

介しよう。

2. VLBI 測地観測の概観

まず簡単に VLBI による測地観測を概観しておこう。通常の VLBI では同じ電波源からの電波をそれぞれアンテナを1つずつ持つ2局で受信し、その到達時間差(幾何学的遅延時間, τ_g)を測る。これだけでは観測局の位置も電波源の位置も決まらないが、いろいろな方向の電波源をつぎつぎに観測すると基線ベクトルを決めることができる。また、同じ電波源を位置関係を変えて何度も観測すると電波源の位置が決まる。ただし、一度に一つの電波源しか観測できないので、次の観測

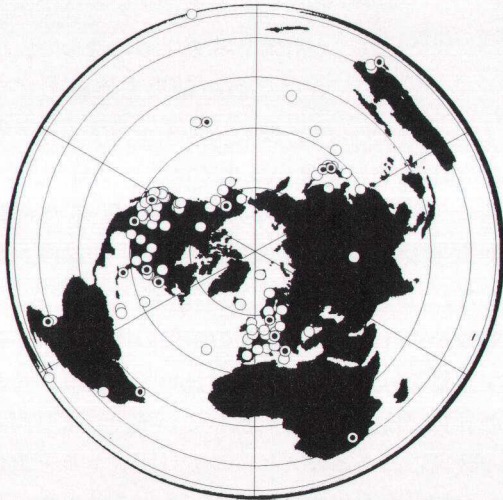


図2 24時間観測ごとの遅延時間残差標準偏差の変化。縦軸の単位は 10^{-12} 秒(0.3mmに相当)である。

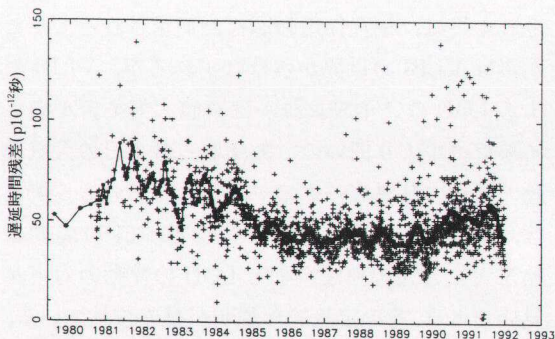


図1 VLBI 観測局の分布。○は地球回転の定常観測局である。

までの間に地球の自転のために基線ベクトルは動いてしまうことを考慮しなくてはならない。逆に基線ベクトルの電波源に対する動きから地球回転を決めることができるのである。

VLBI の観測を2局で行うことは希で、普通は3局以上でネットワークを組んで行う。図1に今までに測地観測を行った観測局の分布を示す。例えば、地球回転観測では、ネットワークが変わることによる観測局位置や電波源位置の誤差の影響を減らし、一様なデータを得ることが重要なので、ネットワーク構成をできるだけ一定にする。地球回転観測の定常観測に参加した観測局は図1では◎で示されている。地球回転の定常観測の頻度はネットワーク毎に最多で1週間に2回から月に1回程度までである。国立天文台がネットワークセンターを行っている太平洋観測網の頻度は月1回である。

一方、観測局位置を決定する観測では NASA の CDP が典型的である。この種の観測ではネットワーク構成は不定で、1年に1回か2回、多くとも数回の繰り返し観測を行い、移動局を含むこともある。通常、ネットワーク構成局数は地球回転ネットワークよりも多く、いろいろな構成をとって行うので全体としての観測量はかなり大きい。

VLBI の観測精度であるが、図2に示すように τ_g で 50μ 秒、つまり電波の進みにして 1.5 cm 程度である。1990 年頃までは順調に減少しているが、その後はむしろ悪化している。観測スケジュールの作り方が変わったためと思われるが、図6からわかるように最終的な局位置の推定精度は改善されているので問題はないと考えられる。

3. 地球回転

地球は1日に一度規則正しく自転しているが、細かく見るとその軸の向きや速度は絶えず変化している。回転軸は地表で 10 m 程の範囲を動き(極運動)、自転速度或いはその逆数の1日の長さ

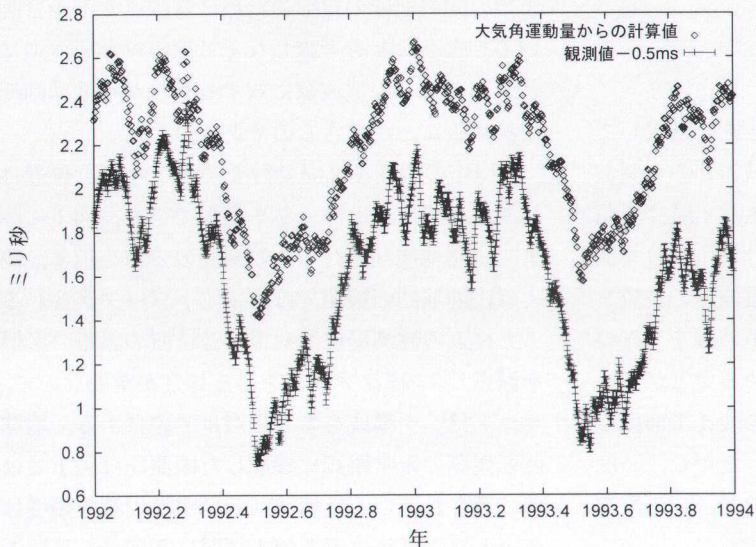


図3 VLBIなどで観測された LOD と大気角運動量からの計算値の比較。重なりをさけるために観測値からは0.5ms引いてある。

(LOD) は 2 ミリ秒程変化する。LOD を積分した UT 1 は地球の自転角を表し、市民生活で使われている UTC との差が大きくなると閏秒が挿入されるのはよく知られていることである。ちなみに、今年(1995年)は閏秒は挿入されない。また、月や太陽の潮汐力により歳差運動と章動運動を行っている。

VLBI や SLR による地球回転観測が始まる前は、PZT などを用いて星を光学的に観測し、経緯度変化から地球回転を決定していた。当時の決定精度は 0.02 秒角程度であったのが、VLBI では 0.001 秒角を切り現在では 0.0002 秒角程度にまで達している。これは実に地表で 6 mm に相当する。このような精度の飛躍があつて、様々な研究がなされたがここでは大気角運動量 (AAM) と LOD, 海洋潮汐と極運動・LOD, 章動と流体核—マントル相互作用について紹介しよう。

まず成功を取めたのは数年以下の周期の LOD 変動と大気角運動量 (AAM) 変化の関係である。地球の固体部分 (地殻とマントル) は一体となって回転し、観測は地殻の上で行われているので、流体核の運動を無視すれば、LOD の変動は固体部

分の角運動量の変化ということになる。一方、地球を孤立系と考えれば全体の角運動量は保存し、LOD とともに AAM は増えるはずである。AAM は風速分布が変わることと気圧分布が変わることにより変化するが、そのうち 90% が風の影響である。風が山脈にぶつかったり、海の波をおこして固体地球と相互作用しているのである。

VLBI や SLR が実用化されたのと同じ頃から、数値天気予報のために地球大気全体の運動が計算されるようになった。図 3 に二つの結果を比較して示す。極めてよく一致することが

見て取れる。もっと速い変化ではどうであろうか。1 日より短い超短周期変動を検出するために 1992 年夏に SEARCH 92 というキャンペーン観測が行われた。その時の VLBI, GPS 及び AAM と潮汐から計算した UT 1 の結果の比較を図 4 に示す。驚くべき一致と言って良いであろう。これらの計算では流体核を無視している。つまり両者の一致はこのタイムスケールではマントルと流体核の自転軸方向の運動は独立だということを示している。

AAM と LOD の全体としてのバランスが証明された後は、相互作用の過程が追求される。ここからは VLBI の世界からははずれるが、VLBI による LOD のノイズレベルは数値大気モデルのノイズレベルより低いので数年から数十日の大気変動の研究の基礎データの一つとなっている。例えば、Madden-Julian 振動という 40~50 日周期の熱帯大気の大規模な振動と LOD の変動の対応が見いだされ、その定量的な説明が試みられている。

図 4 でみたように 1 日より短い周期の変化が検出できるようになった。SEARCH 92 の結果によ

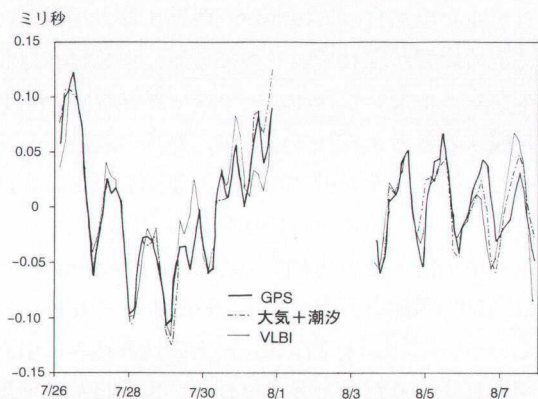


図4 SEARCH 92 キャンペーン中の LOD. 期間中の
平均値を引いてある。横軸は1992年中の日付。

れば、VLBI による UT 1 と Schwiederski の海洋潮汐モデルから計算した値は、主な日周及び半日周潮汐周期に対して 2μ 秒で一致する。UT 1 の長周期潮汐成分からはマンツルの弾性変形を特徴づける数の一つである重力ラブ数 k と慣性率 C の比 k/C を決定できる。ここでは AAM による UT 1 変動はノイズなので取り除く。最近の結果 (Robertson, 1994) によれば長周期潮汐の平衡潮からのはずれは従来のモデルよりずっと大きい。1992 年秋から TOPEX/Poseidon 衛星による数 cm レベル精度の海面高度データが得られていて、遠からず海洋潮汐モデルは大幅に改良される

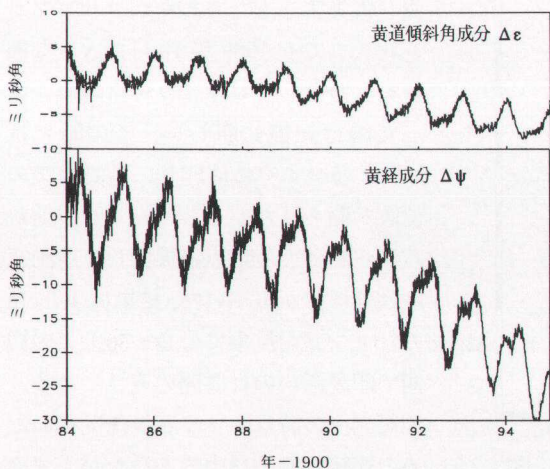


図5 章動の IAU1980 からのはずれ

であろう。その後はいよいよマンツルの非弾性変形に迫ることになる。

章動による流体核とマンツルの相互作用の解明は VLBI なくしては不可能であったといえる。章動は VLBI 及び LLR で観測可能であるが、VLBI の寄与が圧倒的である。図 5 に章動の黄経成分 $\Delta\psi$ と黄道傾斜角成分 $\Delta\epsilon$ の 1980 IAU 章動表からのはずれを示す。IAU の値はマンツルは弾性変形し流体核とマンツルの境界は静水圧平衡にあるとし、さらに海洋の影響も無視して計算されている。一見して年周変化が卓越している。これは流体核とマンツルの境界 (CMB) の形が静水圧平衡を仮定したものから 500 m 程ずれている (Gwinn et al, 1986) として説明され、流体核内の運動理論に大きな枠を与えるものである。年周以外の主なものには 18.6 年、半年及び 2 週間周期のものがある。これらは剛体地球モデル (Kinoshita and Souchay, 1990; Zhu and Groten, 1989), 海洋潮汐 (Wahr and Sasao, 1981) 及びマンツルの非弾性 (Dehant, 1990; Wahr and Bergen, 1986), 力学的偏率の変更と固体内核の影響 (Mathews et al. 1991) を取り入れることにより大部分は説明されるが (Herring et al 1991, Herring 1994), 年周逆行成分, 2 週間順行成分などに不一致がみられる。また、歳差についてはまだ不確定なところがある。

4. プレート運動と地殻変動

VLBI (及び SLR) の初期の成果として最も重要なものは大陸スケールの測距を行い、現に動いているプレート運動を実証したことであろう。図 6 は最も頻繁に観測されている Westford (米国マサチューセッツ州, 北米プレート) と Wettzell (南ドイツ, ユーラシアプレート) の距離変化を示す。データの直線近似と NUVEL-1 (Argus and Gordon, 1991) モデルによる予測の 2 本の直線も示されているがほとんど区別できない。観測とモ

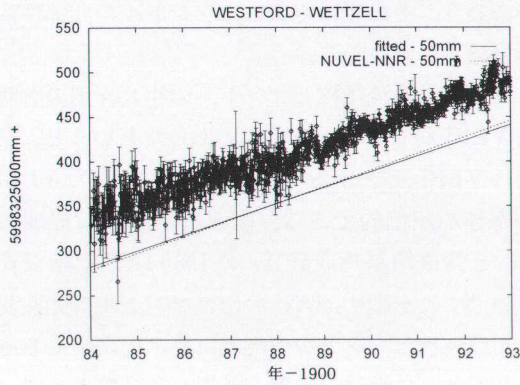


図6 Westford-Wetzell 基線長の変化。あてはめられた直線 (fitted) とプレート運動モデルによる変化 (NUVEL-NNR) は50mm ずらして描かれている。

デルから与えられる距離変化率はそれぞれ 17.7 mm/yr \pm 0.2 mm/y 及び 18.9 mm/yr であり、現在のプレート運動モデルは 1 mm/yr 程度で観測と合っていると云える。

ところがこれらはプレートの境界から遠く離れたところにある場合であって、プレート境界近くにある局にはあてはまらない。図7は環太平洋地域の VLBI 観測局の運動を表すが、鹿島の運動は

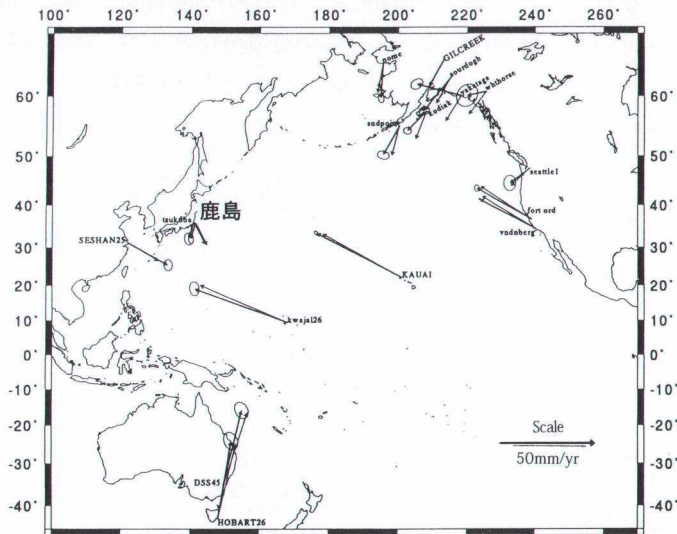


図7 VLBI 局の移動速度。楕円を指している矢印は実測値で楕円のなものはプレート運動モデルによるものである。

モデルと全然合っていない。西進する太平洋プレートの影響が現れているのである。東北日本は北米プレートないしはオホーツクマイクロプレートに属すると考えられているが、鹿島の運動としてはむしろユーラシアプレートの運動を仮定したほうがプレート運動からのはずれの方向が太平洋プレートの沈み込み方向と一致する (Boraido et al., 1993)。鉛直方向には 12.8 mm/yr で沈み込んでいる。これも太平洋プレートの沈み込みに引きずられているためと考えられる。東北日本は地震の活動期を迎えた折、今後 2~3 年で鹿島に加えて水沢の運動が決まり、プレート運動の理解が進むものと期待される。

最近、日置 (1994) は北米大陸の VLBI 局の 3 次元運動の解析から興味深い結果を得た。氷河期が終わり氷河が融けるとアイソスタシーのために地面が上昇する。その際、鉛直運動を惹き起こすだけでなく、まわりから質量を補うために水平方向の運動も惹き起こす。これの適当なレオロジーに基づく理論計算と VLBI による観測値が見事に一致することを示したのである。昭和基地における VLBI 観測から南極大陸の氷床の消長を検出する可能性を示すもので、環境問題も絡んで大変興味深い。

1月に平成7年兵庫県南部地震が発生し大災害をもたらしたが、サンフランシスコでも1989年10月に大きな被害をもたらしたロマプリータ地震があったのは記憶に新しい。この時には VLBI 局がすぐに展開し、地震直後の位置が測られた。もちろんそれ以前から測られている地点に展開し、運動速度はほぼ分かっていた。結果は 4.5 cm のジャンプを見事にとらえた。この観測で印象深いのは展開の速さである。地震発生の際はちょうど技術開発のための連続観測の最中であつたが、すぐに観測計画を変更し移動局を手配して

観測にとりかかった。私はちょうどその時に米国にいたので端から見ていたが、NASA と NOAA が協力して進む様子を日本だったらどうだろうと考えたことを思い出す。

5. 新たなライバルの登場と VLBI の今後

以上に紹介したように VLBI は宇宙測地時代をリードしてきた。同じ時代に活躍した SLR はライバルであり協力者でもあった。しかしながら、この両者には装置が大がかりで運用経費もかかるという欠点がある。従って観測点を沢山配置することができない。VLBI の場合には相関処理という問題もある。VLBI 装置が大がかりになるのは銀河系外電波源の微弱な電波を受けるためと超高精度な周波数標準が必要なためである。

ここを解決したのが GPS である。小型、安価、自動観測可能なので観測点を面的に配置できる上に、複数の衛星を同時に観測するので 3 次元位置が瞬時に決まる。もちろん GPS は万能ではなく、VLBI より高精度でもない。観測パラメーターのうち UT 1 を独自に決定できないし歳差、章動も観測できない。軌道決定をしなくてはならないという、衛星測地に共通な面倒なこともある。さらに、米国海軍のシステムであり、どう運用されるか不透明なところがある。湾岸戦争の時に時計比較の精度が急に上がったのはよく知られた事実である。GPS 利用のコストは低いが、衛星を含めたシステム全体を考えれば莫大なコストがかかっていると思われる。

GPS が VLBI と肩を並べる精度をもつ観測方法としてデビューしたのは GIG 91 キャンペーンである。SEARCH 92 における VLBI との比較は図 4 に示す通りで、現在はいくつかの解析センターが毎日の極運動と LOD を発表し、国際地球回転事業は GPS による結果に重みをおいた極運動と LOD を発表している。それとは対照的に、地球回転観測のために幾つかのネットワークを運用

してきた米国の VLBI は、NEOS-A による週 1 回の観測に縮小してしまった。

この現状で VLBI が今後果たすべき役割は何であろうか。それは測地計測の基準としての役割であると考えられる。VLBI は銀河系外電波源に準拠して大陸間を直接つなぐ最も高精度・高安定な計測方法である。これは海面上昇の監視や後氷期上昇と言った長期にわたる観測を必要とする研究には必須の要件である。また、テクトニックな運動を解明するためには基準となる座標系が常に必要となる。歳差・章動の観測には唯一の方法であり、地球深部の研究に欠かせない。位置天文学においては VLBI による歳差・章動によって基本的な座標系が設定されている。

VLBI では観測周波数の広帯域化による雑音の低減と高感度化、相対 VLBI による相関位相の利用と大気揺らぎの相殺など、更に高精度を目指して技術開発が進んでいる。これらを用いた現在よりも二桁の精度向上を目指す画期的な VLBI システム VERA (VLBI for the study of Earth Rotation and Astrometry) が提案されてきているが、ここに至って自前の超高性能 VLBI システムを実現すべく国内全 VLBI 関係者によって最適なシステムの検討がなされている。この装置は天文学のみならず地球回転変動の観測を通じた地球深部研究、東アジアにおける地殻変動研究、地球環境のモニターなどの基幹装置として、地球科学に新発見をもたらすと期待され、早期実現を願うものである。

Contribution of VLBI to geodynamics in recent 10 years

Seiji MANABE

Division of Earth Rotation, National Astronomical Observatory

Abstract: Contributions of VLBI to the earth dynamics and crustal dynamics are reviewed. Its future role is discussed, while competing and co-existing with GPS as most powerful positioning tool.