

4-4 時空標準における VLBI 技術の果たす役割

4-4 Role of VLBI Technology in the Space-Time Standards

小山泰弘

KOYAMA Yasuhiro

要旨

VLBI 技術は、現在の天球基準座標系を実現しているクェーサーの電波を直接用いて計測することから 5 つの地球姿勢パラメータをすべて計測することができ、また長期間にわたって安定性に優れた測定結果を得られるという特徴を持っていることから、天球と地球の座標を決める基準座標系の構築において大きな役割を果たしている。また、遠距離にある 2 地点の間で正確な時刻周波数比較を行うことができ、光周波数標準同士の比較と評価をする上で有力な技術になる可能性も有している。極めて高い精度が要求される計測では、時間と空間を一体に扱うことが今後ますます重要になってくるが、VLBI 技術はその双方で高精度計測を行うことができ、時空標準の構築において大きな役割を果たすことが期待される。

In the VLBI observations, signals from Quasars which are realizing the current Celestial Reference Frame are directly used, and therefore all of the five Earth Orientation Parameters can be determined by the observations of VLBI. In addition, since the results of the VLBI observations are stable throughout the long time range, VLBI is playing an important role in establishing Terrestrial Reference Frame. The time and frequency difference between two places separated by a long distance can be precisely measured by using VLBI, and therefore VLBI is expected to have a potential to be used to compare and evaluate optical frequency standards. In the precise measurements, space and time have to be dealt together and the VLBI is expected to play an important role to establish the unified space-time standards.

[キーワード]

超長基線電波干渉計, 空間標準, 時間周波数標準, 基準座標系

Very Long Baseline Interferometry, Spatial reference, Time and frequency standards, Reference frames

1 まえがき

1960 年代に VLBI (Very Long Baseline Interferometry、超長基線電波干渉計) 技術が初めて登場したとき、それを可能にしたのは高速で大容量のデータ記録技術が利用できるようになっていたことと併せて、水素メーザーという周波数標準が発明されていたことが重要な役割を果たした^[1]。それまで、複数の電波望遠鏡で受信した信号を重ね合わせてその結果の信号の振幅を測定すれば、電波源の位置や大きさを正確に測定したり、さらには電波源の精密な構造を調べることができることは知られていた。しかし、そのためには受信し

た信号の周波数を変換するために使用する局部信号を共通にする必要があり、そのために 1 つの共通の局部信号を同軸ケーブルでそれぞれの電波望遠鏡に供給する必要があった。また、受信した信号を再生可能な状態で記録することができなかったため、やはり同軸ケーブルで受信信号を伝送してそのまま合成する必要があり、電波望遠鏡間の距離を大きく離すことには限界があった。ところが、水素メーザーが利用できるようなったことで、電波望遠鏡ごとに独立な周波数標準に準拠した局部信号を生成することができるようになり、可干渉性(コヒーレンス)を維持したまま周波数変換することができるようになった。また、記録す

る信号に正確な時刻情報を付与しつつ正確なタイミングで AD 変換をすることができるようになり、その結果、自由に電波望遠鏡の間の距離を増やすことができるようになって、VLBI 技術が初めて実現することになった。そして、遠く離れた 2 地点の電波望遠鏡のペアからなる基線の長さや方向が正確に測定できるということがこの VLBI 技術に新たな利用分野を生み出すこととなり、プレート運動仮説の実証を経て、プレートテクトニクス理論体系が測地学の分野に確立されるとともに、地球姿勢変動の計測もそれまでの光学望遠鏡による手法から VLBI による観測へとその役割を移し、計測精度が格段に向上することになった。以上のように、水素メーザーという周波数標準器の登場によって、天文学や測地学においてそれまで不可能であった測定が可能となり、さまざまな分野で新しい研究領域が切り拓かれることになるわけであるが、その橋渡しをしたのが VLBI という技術であったと言うことができる。

現在、VLBI 技術は電波天文観測における主流の観測技術となっているとともに、国際測地学協会 (IAG = International Association of Geodesy) のもとに国際 VLBI 事業 (IVS = International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) が組織され、そのもとで測地目的の国際 VLBI 観測が組織的に運用されている。このデータは国際地球回転基準座標系事業 (IERS = International Earth Rotation and Reference Systems Service) に提供されて、天球基準座標系と地球基準座標系の構築、および地球姿勢パラメータの決定に利用されている。本稿では、上記のような経緯を踏まえ、VLBI 技術における基本的原理とその実現において周波数標準が果たす役割と要求される特性について述べるとともに、現在利用されている基準座標系構築における VLBI の役割について紹介し、また今後の時空間を一体として考えた時空標準の概念を実現するために期待される役割について述べる。

2 VLBI の測定原理

2.1 VLBI による遅延時間の測定原理

VLBI では、クエーサーなどの天体電波源からの電波を複数の電波望遠鏡で同時に受信する。そ

の際、ある周波数帯域 $f_0 \sim f_0 + B$ の信号を周波数変換して $0 \sim B$ の帯域のいわゆるベースバンドに変換したのち、 $2B$ のナイキストレートで AD サンプリングしてデジタル信号に変換する。一般的には、まず B よりも大きな帯域をバンド通過フィルタ (BPF = Band Pass Filter) で切り出したのち、その信号と位相ロック発振器 (PLO = Phase Locked Oscillator) で生成した CW (Continuous Wave) 信号を混合器 (ミキサ) に入力し、PLO 出力を局部周波数信号として中間周波数 (IF = Intermediate Frequency) 信号に変換する。そしてその後、イメージ抑圧混合器 (IRM = Image Rejection Mixer) でベースバンド信号に変換するというように、2 段階もしくはそれ以上のステージにわけて周波数変換を行うことが行われる。このとき、X 局で受信してベースバンドに変換した信号を $f_x(t) = G_x s(t) + n_x(t)$ で表し、Y 局で受信してベースバンドに変換した信号を $f_y(t) = G_y s(t - \tau_g) + n_y(t)$ と表す。ここで、 $n_x(t)$ と $n_y(t)$ はそれぞれ X 局と Y 局の受信信号に付加される独立な雑音、 $s(t)$ は X 局と Y 局とで共通に受信される天体電波源からの信号であり、その際 X 局で受信された信号が Y 局に受信されるまでの時間の遅れ、すなわち遅延時間を τ_g とした。簡単のため、ここでは τ_g の変化については考えないことにする。 G_x と G_y は X 局と Y 局それぞれのアンテナでのゲインを表す。 $f_x(t)$ と $f_y(t)$ の相互相関関数 $c_{xy}(\tau)$ を $c_{xy}(\tau) = \int f_x(t) f_y(t - \tau) dt$ で定義すると、

$$c_{xy}(\tau) = G_x G_y \int s(t) s(t - \tau_g - \tau) dt + G_x \int s(t) n_y(t - \tau) dt + G_y \int n_x(t) s(t - \tau_g - \tau) dt + \int n_x(t) n_y(t - \tau) dt \quad (1)$$

となる。ここで、一般的に信号成分 s は雑音成分 n_x や n_y とは無相関であるので、(1) 式の右辺第 2 項と第 3 項は第 4 項の中に含めてしまえる。その右辺第 4 項は、X 局と Y 局それぞれの受信機の雑音温度を T_x と T_y 、積分時間を T として $T_x T_y / \sqrt{2BT\sigma(\tau)}$ で表すことができる。ここで、 $\sigma(\tau)$ は標準偏差が 1 でスペクトルが一定のノイズである。一方、(1) 式の右辺第 1 項からは $G_x G_y T_s^2 \cos \pi B(\tau + \tau_g) [\sin \pi B(\tau + \tau_g) / \pi B(\tau + \tau_g)]$ という式が導かれる。ここで、 T_s は、受信された信号強度を温度換算したものである。この関数をグラフに表すと図 1 のようになる。

$G_x G_y T_s^2$ が $T_x T_y / \sqrt{2BT\sigma(\tau)}$ よりも有意に大きな

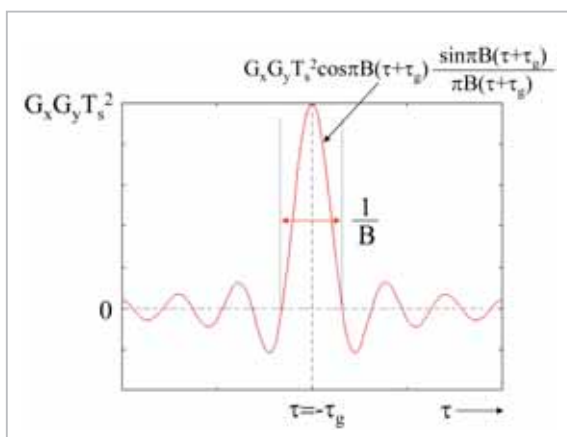


図1 信号成分による相互相関関数の関数形

時、 $c_{xy}(\tau)$ の極大値を与える τ から τ_g が推定される。このときの τ_g の推定の不確かさ σ_{τ_g} は $\sqrt{3}/\pi B \text{ SNR}$ で与えられる。ここで、SNRは信号と雑音の比である。SNRの値が小さい場合、図1に加えられる(1)式の右辺第4項の影響が大きく、本来の極大値から離れたところで(1)式が極大値を与えることがあり、それが τ_g の推定の不確かさに寄与すると理解できる。一方、観測する周波数帯域 B を大きくとれば、それだけ図1に示すピークの幅が狭くなり、 τ_g の推定不確かさは B に反比例して小さくすることができる。したがって、高精度に τ_g を推定するためには、観測帯域 B を大きくすればよいことになるが、 B が大きくなった分だけADサンプリングの際のサンプリングレートも増やす必要があり、記録するデータも大きくなるので、主に記録装置の速度によって B が制限されることになる。そこで考え出されたのが、バンド幅合成という手法であった。1つのチャンネルあたりの帯域 B は小さくしながら、 f_0 の異なる複数の観測チャンネルでデータを記録して相互相関関数 $c_{xyi}(\tau)$ を計算し、その和 $\sum_i c_{xyi}(\tau)$ を計算する。その結果得られる精遅延決定関数は、観測チャンネルの局部周波数信号の周波数の標準偏差から求められる有効観測帯域幅 σ_f の逆数程度の幅のメインピークを持つようになり、そこから推定される τ_g の推定不確かさは $1/(2\pi\sigma_f \text{ SNR})$ となる。SNRを30程度になるように積分時間を確保したとして、 σ_f を370 MHz程度に設定すれば、この推定不確かさは約14 psと見積もられる。積分時間を長くにとってSNRがさらに大きくなるよ

うにすれば、原理的には遅延時間の推定不確かさは小さくすることができるが、10 psよりも小さくしても大気遅延の正確な推定に限界があり、むしろ1つの電波源に対する積分時間は必要最小限として単位時間あたりの観測数を増加させたほうが地球姿勢パラメタや局位置の推定にとっては有利になるため、SNRの設定値は30程度にとられることが多い。

測地VLBIでは、このようにして得られる高精度な遅延時間を用いて観測局の相対位置や地球姿勢パラメタなどを推定する。ある1つの電波源に対して得られる遅延時間 τ_g には、観測局の位置関係と電波源の方向とから決まる幾何学的遅延のほか、それぞれの観測局におけるケーブル遅延、大気や電離層による伝播遅延、それぞれの観測局の時系の同期不確かさなどの要因による遅延量がすべて含まれる。電離層による伝播遅延については、電離層遅延が周波数に対する分散性を持っていることを利用して、2つの異なる周波数での観測結果の差から補正値を計算して補正することが可能である。大気遅延には、周波数による分散性がないが、仰角によって電波が大気を通過する距離が変わり、遅延量が変化することを利用して遅延量を推定する方法が取られることが一般的である。そこで、ここでは簡単のため、電離層遅延と大気遅延、および地球の自転を考慮せず、またケーブル遅延は一定値で変化しないこととし、図2のように2次元のモデルを考える。

VLBIで用いられるパラボラアンテナは鋭い指向性を持つので、1つの電波源に対する観測が終わると次に観測する電波源の方向に大きくアンテナの指向方向を変える。このとき、アンテナを駆動するときの中心点を結ぶ基線の長さを D 、それぞれのアンテナの受信機の位置と駆動中心点との間の距離を r_x と r_y 、 i 番目の電波源の方向と基線のなす角を θ_i 、観測の結果得られる遅延時間の推定値を τ_i 、 X 局と Y 局の同期不確かさを Δt とすると、図中の式のように結果的に D は r_x 、 r_y 、 Δt によらず τ_i のみから導かれるということがわかる。実際のデータ解析では、 θ_i は不明であり既知の値であるわけではないので、推定パラメタの数よりも多数の観測データを用いて、最小2乗推定によって推定パラメタの推定値を求めることになる。このときでも、やはり基準点の位置はそれぞ

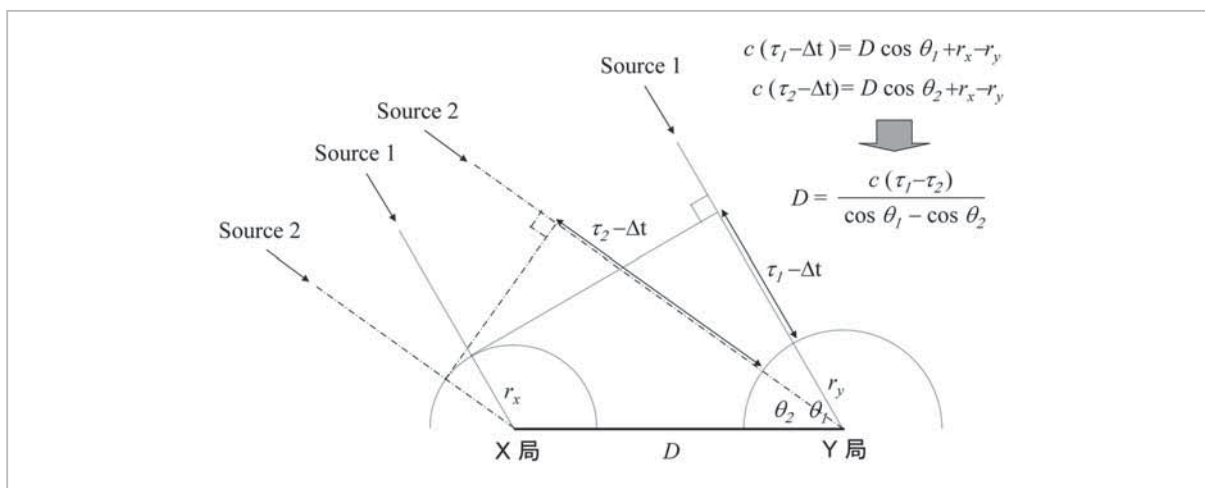


図2 測地 VLBI における基準点と遅延時間の関係を示すモデル

れのアンテナを駆動するときの不動点である駆動軸の交点の位置になる。また、実際には、電波源からの電波は直接受信機に届くわけではなく、パラボラの形状をした主鏡と双曲面の形状をした副鏡などで複数回反射されて受信機に導かれるような構造になっているが、いずれにしても回転の中心点のまわりを受信機が球面上を移動するというモデルに帰着させることができる。このとき、 r_x や r_y はアンテナの設計図などから測定することも原理的には可能であるが、これらを正確に計測しても得られる測位結果には関係がないので、これらは不明のままとしても問題とはならない。

なお、大気遅延については一般的には仰角依存性を利用して推定すると述べたが、大気遅延に方位角に依存する異方性があったり、局所的な構造があったりした場合には正確な補正を行うことができなくなる。この問題を解決し、より高精度な計測を行うためには詳細な気象数値モデルを用い、波線追跡法によって観測時の視線方向での遅延時間を正確に補正することも最近の研究の対象となっている。

2.2 VLBI と周波数標準の関係

VLBI 観測では、周波数標準として水素メーザーが一般的に用いられる。それは、(1)式で与えられる相互相関関数の積分において十分な SN 比を確保するために必要な数秒から数分の時間にわたって、信号成分が可干渉性(コヒーレンス)を保つため、短期の周波数安定性が必要となるため

ある。最も重要なのは、受信した $f_0 \sim f_0 + B$ の帯域の信号を $0 \sim B$ のベースバンドに変換するとき使用する局部周波数信号の周波数 f_0 が安定であることである。 f_0 の位相が積分の最初から最後まで $2\pi/8$ の範囲内で安定していれば、積分時間を延ばすことで SN 比を改善することが可能であり、つまりコヒーレンスを保つことができる。現在一般的な測地 VLBI で使われる X バンドの周波数 8 GHz に対して例えば積分時間 100 秒にわたってこの条件を満たすには、 1.5×10^{-13} の安定度が必要ということになる。例えば一般的なセシウム原子時計では、この程度の時間スケールに対してこの安定度を達成することは困難であるが、水素メーザーを用いれば達成することが可能である。一方、長期に対しては、図2における Δt が遅延時間の推定の不確かさの範囲内で一定に保たれていることが重要となる。ここで、例えばそのための条件を 10 ps と設定すると、理想的には測地 VLBI が実施される通常の単位が 24 時間であるので、24 時間にわたって時刻の揺らぎが 10 ps 以内に制御されていることを要する。このときの相対的な周波数安定度は 1.1×10^{-16} と計算される。水素メーザーで 1 日にわたってこの安定度を確保することは困難であり、通常は 1~3 時間おきに基準局に対するほかの観測局のクロックオフセットを推定し、その間は線形に変化すると仮定してデータ解析するという手法を用いる。1 時間おきにクロックオフセットを推定する場合には、必要とされる周波数安定度は 2.8×10^{-15} である。

以上の議論は X バンドでの測地 VLBI 実験の場合であるが、天体の構造を解明することが目的となる天文 VLBI 観測では、さまざまな周波数での観測が行われる。例えば、これまでに VLBI として最も高い周波数で観測が行われたことのある 210 GHz では、位相変動として $2\pi/8$ を保つために 1 秒の積分時間でも水素メーザーの限界に近い 6×10^{-13} の周波数安定度が要求されることになる。このような高い周波数では、大気の揺らぎによる遅延変動の影響も大きくなり、VLBI 観測を行うことが原理的に困難になってくる。

3 基準座標系の構築と地球姿勢パラメタ

地球の形状は太陽や月などの天体の重力による潮汐効果で絶えず変形しているほか、地球表面は十数枚のプレートと呼ばれる固い岩盤の固まりに覆われていて、それらが互いの速度を持って動いている。したがって、本来、地球上の位置を特定するための座標系の基準を正確に定義することはなかなか困難である。まず最も初期的な方法は、北極と南極の緯度をそれぞれ 90 度として緯度を定義し、ある特定の場所を通る子午線の経度を 0 度と定めることで、任意の点の緯度と経度とを定めることができるようにすることである。ところが、北極点の位置は極運動と呼ばれる現象によって移動することは 19 世紀にはすでに確かめられており、この極運動によって同じ地点の緯度が変化すると不都合があるため、1900 年から 1905 年までの北極の平均位置から慣用国際原点 (Conventional International Origin) が計算され、使われるようになった。また、経度の基準としては、1884 年に米国のワシントン D.C. で開催された国際子午線会議によって、英国のグリニッジ天文台を通る子午線を経度 0 度の本初子午線とすることが国際的に合意された。まずこれらの定義によって、世界中の任意の場所で、緯度と経度とで場所を表現することが可能となった。日本では、1886 年にこの本初子午線を採用する勅令が交付され、その後 1892 年に当時の東京天文台にあった子午環の位置を国内の経度と緯度の原点として用いることが決められている。子午環という装置は、恒星が南中したときの時刻と高度 (水平方向となす角度) を正確に測定できるように、正確に南北方

向にのみ動かすことができるように設計された望遠鏡である。まず、ある恒星の南中時間を測定すれば、同じ天体がグリニッジ天文台において南中する時刻との差から、観測地点における経度を知ることができる。逆に、観測地点の経度が既知であれば、その地点での時刻を知ることができる。また、正確な赤経と赤緯が記載された星表が整備されれば、そこに記載されている恒星の南中を観測することで世界中どこでも単独に同様の測定をすることが可能になる。そのような目的のために整備された星表は基本星表と呼ばれる。実際には、まず国際電信によって遠く離れた 2 地点の時計を同期させてから星表に記載された恒星の南中時刻を測定することによって、その 2 地点の経度差を測定することができるので、そういった方法で経度を測定しておいて、あとはその経度の値をもとにして時刻を計測することになる。緯度は、星表に記載された恒星の赤緯とその恒星の南中高度とから算出できる。ちなみに、上述の 1886 年の勅令によって、国内の標準時が 1 つに定められ、その後東京天文台が子午環による測定によって標準時の決定を行う任務を担うこととされた。

このように定められた緯度と経度は、その後の正確な測定によって大きな不確かさを伴っていたことがあきらかとなる。例えば、2002 年に改訂された日本経緯度原点の緯度と経度はそれまでの値と緯度、経度ともに約 12 秒角の差がある。この違いは、同じ座標系のもとでは約 450 m の位置の差に相当する。このような位置の不確かさをもたらしたものはさまざまな要因があったと考えられるが、仮に経度の不確かさが時刻の同期不確かさであったとすると約 0.8 秒の不確かさがあったとすると生じる不確かさである。この程度の測地系の不整合はかつては検出することさえ困難なものであったが、VLBI に代表される宇宙測地技術の登場によってグローバルに高精度な位置計測が可能となってきたことにもなって、高精度な基準座標系が必要となってきた。国際的に初めて系統的に構築された地球基準座標系は 1988 年に整備された ITRF 88 である [3]。ITRF 88 が公表されたとき、ITRF は IERS が公表する地球基準座標系ということから IERS Terrestrial Reference Frame の略称であるとされた。IERS は、VLBI などの宇宙測地技術のデータを用いて、地球姿勢パラメタを

公表することに責任を持っている国際機関であり、そのための必要性から地球の基準座標系と天球基準座標系とを構築し、公表している。1991年に開催された国際天文学連合 (IAU = International Astronomical Union) の総会と国際地球物理学測地学連合 (IUGG = International Union of Geodesy and Geophysics) では、IERS の公表する天球基準座標系と地球基準座標系が正式な基準座標系として勧告に採用され、それ以降 ITRF は International Terrestrial Reference Frame の略とされている。なお、それまで基本星表として使われていた恒星による基本星表にかわって電波天体の赤経、赤緯を定めた天球基準座標系が採用されたわけであるが、これは、それまで使われていた子午環などによる光学的な測定よりも VLBI を用いた電波天体の観測技術のほうがはるかに高精度であったことが認められたのであるということが出来る。

天球基準座標系と地球基準座標系はいずれも直交3次元座標系である。したがって、両者の間の座標変換は3行3列の回転行列によって定義される。天球基準座標系のスケールは任意であるので、拡大・縮小の自由度が不要であることを考えると、独立なパラメタの数は5つある。5つのパラメタの選び方には任意性があるが、UT1-UTC、極運動(2つ)、歳差・章動(2つ)からなる5つのパラメタで定義したものが地球姿勢パラメタと定義される。ここで、UT1-UTC は協定世界時 (UTC) と極運動の補正をしたあとの世界時 (UT0) との差を示し、地球の自転の位相が協定世界時に対してずれている量を表している。UTC は、セシウム原子の量子遷移の周波数から定義される秒の長さから決められる時系であり、UT1 との差が常に0.9秒以下となるように1秒単位でうるう秒の調整が行われる。極運動は、地球の自転軸が地球の表面を貫く点が動くことを表現するものであり、CIO 点に対して北極の位置が経度0度方向にずれている角度を ω_x 、西経90度の方向にずれている角度を ω_y として表わされる。歳差と章動はどちらも地球の自転軸に天球における方向の変化を指すものであり、そのうち約25800年周期の最も大きな変動成分を歳差と呼び、それ以外の微小な変動成分を章動と呼ぶ。章動の量は、主要な成分からモデル計算される量からのずれを真春分点の黄経方向へのずれの成分と黄道傾斜角のずれの成分の2

つの量で表示する。ここで述べた5つのパラメタのうち、UT1-UTC、および歳差・章動の2パラメタの計3つのパラメタは天球基準座標系を実現しているクエーサーを直接観測し、天球基準座標系に対する地球基準座標系の関係を測定することのできる VLBI 以外に直接測定する方法はない。人工衛星に搭載されたコーナークューブ反射鏡に向けてレーザーを照射し、往復時間を正確に計測する衛星レーザー測距 (SLR = Satellite Laser Ranging) と全地球航法衛星システム (GNSS = Global Navigation Satellite System) では、いずれも人工衛星の観測を行う限り、1日の長さの変動 (LOD: Length Of Day) の計測は可能であるが、UT1-UTC を直接計測することはできない。LOD の変動量を積算すれば、UT1-UTC の変化量を得ることは可能であるが、衛星軌道が慣性系の宇宙空間に対して回転することと UT1-UTC の変動とを区別することができないため、長期的には安定な解を得ることができないためである。歳差・章動については、本質的に天体の観測によって、天体の日周運動を測定することが必要であるので、現在では VLBI の観測データのみを用いて計測されている。3つの代表的な宇宙測地技術に対し、5つの地球姿勢パラメタの計測の可否を表に整理すると表1のようになる。

歳差・章動の主要因は太陽、月、および太陽系惑星からの引力であり、極運動や UT1-UTC は固体地球と大気や海洋との相互作用、流体核とマントルとの間の相互作用などによって引き起こされるものと考えられている。これらのプロセスは完全にモデル化することはできないので、実際に測定を行って初めて天球基準座標系と地球基準座標系との関係が明らかとなる。正確な地球姿勢パラメタは、衛星測位における人工衛星の精密軌道の決定や深宇宙探査機の管制で用いられているほ

表1 宇宙測地技術と地球姿勢パラメタの測定の関係

	VLBI	SLR	GNSS
UT1-UTC	○	×	×
LOD	○	○	○
極運動	○	○	○
歳差・章動	○	×	×

か、地球姿勢パラメタの変動を解析することで地球内部の物理構造や物性の研究も進められているため、IERSが表1のような宇宙測地技術を総合的に用いて推定量を決定し、定期的に発行するBulletinや技術報告の形で公表を行っている[4]。

ところで、基準座標系は和文では厳格に使い分けがされていないが、英文ではSystemとFrameとが使い分けられている。Systemは基準座標系を構築するために必要な定義を定めたものであり、天球基準座標系に対するものがICRS(International Celestial Reference System)、地球基準座標系に対するものがITRS(International Terrestrial Reference System)と表記される。それに対し、これらの定義に沿って具体的に利用できるようにするため、天体の座標値(赤経、赤緯)、および観測基準点の座標値(XYZ成分)とその変化量(速度)をそれぞれリストに対してFrameという用語を用いる。Systemは一度定義すれば継続性を重視して必要最小限の改訂しかしないようにされるが、Frameは観測データが蓄積されてきて精度が高まってくると、頻繁に更新される。例えば、ITRFは1988年以降、ITRF 89からITRF 94まで毎年改訂され、その後ITRF 96、ITRF 97、ITRF 2000、ITRF 2005と都度改訂されて現在に至っている[5]。ICRFは、1997年にIERSから公表されたあと、2009年にICRF 2が公表された[6]。

ITRF 2008では、2008年までに取得されたVLBI、SLR、GNSS、DORIS(Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)の4種類の宇宙測地技術の観測データがすべて使用されている。異なる方法で計測されたデータを統合するためには、複数の観測施設が近くに設置されているコロケーション地点における地上測量の結果が用いられる。地上測量の結果にも当然ながら不確かさが含まれているので、それぞれの地上測量の不確かさに応じた重み付けを行いながら、最小2乗推定によってそれぞれの宇宙測地技術の間のスケールを調整する。ITRF 2005では、長期的な安定性に優れることから、VLBIのスケールを基準として、ほかの3つの宇宙測地技術のスケールを調整する手法がとられたが、ITRF 2008ではVLBIとSLRのスケールの平均が基準として採用されている。原点の位置は地球の重心にとられることになっているが、VLBIは地

球の重心の位置を推定することができないので、SLR、GNSS、DORISのデータから原点の位置が決められる。その後、すべての地点での水平速度が、地球表面の回転モーメントが0になるようにされたプレート運動モデルであるNNR-Nuvel-1Aモデル(No-net-rotation Nuvel-1Aモデル)との差の2乗和が最小になるように回転を加え、最終的なITRF 2008が構築されている。国内には、ITRF 2008に掲載されている観測点が68地点あるが、そのうちXYZ座標値の標準不確かさとして最低の1mmが与えられているのはVLBI観測点が2地点、SLR観測点が2地点、GNSS観測点が29地点となっている。このうち、NICTの観測地点としては鹿島宇宙技術センターのVLBI観測点、小金井のSLR観測点、および鹿島と小金井のGNSS観測点の4つある。これらの観測点の位置が高精度に決定されているのは、NICTが長年にわたって高精度な観測データを蓄積してきたことによるものにほかならない。とくに、2つ以上の宇宙測地技術で高精度な位置が与えられているコロケーション地点は国内で4か所しかなく、そのうちの2か所がNICTの施設であることは特筆に値する。実際、鹿島宇宙技術センターのVLBI観測点が国際地球基準座標系の上で高精度に決まっていたことから、2002年に施行された改正測量法では、鹿島宇宙技術センターの位置が国内の測地成果を再計算する上での基点として使われて[7]おり、国内における重要な位置情報の基礎を築いたものといえる。

4 時空標準の構築における今後のVLBIに期待される役割

現在、国際原子時(TAI)とそれをもとにした協定世界時(UTC)とは、世界中の時間周波数計量標準機関で運用されているセシウム原子時計と水素メーザーをもとに構築されている。各国の計量標準機関は、通信衛星を用いた衛星双方向時刻比較法もしくはGPS観測による方法のいずれかでドイツのPTBと結ばれており、その比較結果がフランスにある国際度量衡局に報告されて国際原子時が決定されている。その際、例えばNICTとドイツの計量標準機関であるPTBとの間で実施している時刻比較の不確かさは、タイプAの不確かさ

が 300 ps、タイプ B の不確かさが 5 ns となっている。今後、国際原子時をさらに高精度化していくためには、この 2 種類の不確かさを低減していくことが求められる。例えば、100 ps の不確かさで GPS を用いた時刻比較をする場合、GPS アンテナの位置は 3 cm 程度の正確さで決められている必要がある。今後、さらにこの時刻比較の不確かさを低減しようとする場合、時刻比較を行うための設備の位置はますます重要になってくる。また、近年、光周波数標準の研究開発が盛んに行われるようになってきている。NICT でも、カルシウムイオンのシングルイオントラップ法と、ストロンチウム原子の光格子時計方式の 2 つの方式で光周波数標準の研究開発に取り組んでいる。これらの周波数標準では、 10^{-16} 台からさらには 10^{-17} 台の周波数精度や周波数安定度を目指されており、実際にそのような性能が達成されつつある。 10^{-17} のような微小な周波数差を議論するようになると、一般相対性理論から約 10 cm の高さの差をきちんと評価しておく必要があることになる。ここで言う高さとは重力ポテンシャルにおける高さであり、ジオイド面からの高さが重要となる。準拠楕円体からの高さは ITRF における XYZ3 成分から単純な計算で求めることができ、その精度は ITRF における精度がそのまま反映されるが、地球の等ポテンシャル面であるジオイド面の準拠楕円体から高さ、すなわちジオイド高の不確かさは最新のデータでも全球にわたる標準偏差で約 15 cm であると見積もられている [8]。長周期の地球の重力場は軌道上から重力を観測する衛星ミッションによって高精度に求めることができるようになったが、局所的なジオイド高の成分は水準測量によって計測することが必要であり、海岸線からの距離が大きくなるに従ってその不確かさが累積してしまうことが大きな不確かさ要因となっている。光周波数標準が 10^{-18} 台の周波数差を測定できるようになると、ジオイド高の測定精度を一般相対論効果の計測から高めることとなり、まさに時間と空間の標準が相互に重要な役割を果たすこととなる。

国際度量衡委員会のもとに設置されている時間周波数諮問委員会では、近い将来に秒の定義を新しくすることが検討されているが、そのためには独立した複数の研究機関で光周波数標準の比較と評価をして、周波数の精度を確認することが必要

とされている。そのためには、それぞれの光周波数標準のジオイド面からの高さを正確に把握していることが必要であり、また正確な比較をするためにも比較に用いるアンテナ等のシステムの正確な位置の情報が必要となる。このように考えていくと、3 で述べたような地球基準座標系における位置が正確に定義されている地点は非常に大きな価値を持つことになってくる。VLBI に代表されるような高精度な宇宙測地技術は、位置の高精度な計測とともに遠地点間の時刻周波数比較を高精度に実施できる可能性を持っており、このような測定技術を高精度化、高度化することで時間と空間を統一的に扱う時空標準を構築することが今後重要になってくると考えられる。現在、IVS のもとでは、次世代の国際測地 VLBI 観測の計画として、VLBI2010 という名称での将来計画の検討が進められている [9]。VLBI2010 では、従来の測地 VLBI 観測よりも受信する信号の帯域を大幅に拡大し、2 GHz から 18 GHz 程度までの広い周波数帯域の信号を使用することが考えられている。しかも、これまでの遅延時間の決定が群遅延と呼ばれる情報を使用していたのに対し、より高精度な遅延時間を決めることができる位相遅延を積極的に使うことが想定されている。このようにすることで、遅延時間の決定精度としては 4 ps 程度を達成することが目標とされている。これまで、NICT では距離基準計測システムの開発のため、1.5 m 程度の口径の超小型 VLBI 観測用アンテナを開発し、これを用いた距離基準の計測性能に加えて時刻比較における性能の評価の準備も進めているところである [10]。このような小型の観測システムは、移動しての観測に有利であるので、今後、海外で光周波数標準を開発している研究機関と協力をし、高精度な時刻比較への適用をすることが大いに期待される。

5 むすび

本稿では、VLBI 技術の基本原則をごく簡単に解説するとともに、その基本原則をベースとしてこれまで空間における基準座標系の構築やその間を取り持つ地球姿勢パラメータの決定に大きな役割を果たしていることを紹介した。VLBI 技術は、本質的に水素レーザーという高安定な周波数標準

を用いて精密な時間の計測を行って、それをもとに空間上の位置などを計測する技術であるので、時間の標準と空間の基準の双方を橋渡しするようなものであるということが出来る。かつて、経度を正確に測定することがその地点における時刻を正確に知ることにつながっていたが、計測技術が進歩してその精度が格段に高まった現在ではなおいっそう時間と空間の計測はお互いに不可分な関係になってきており、光周波数標準による新しい秒の定義が実現されるためにはさらに時空を一体として取り扱うことが不可欠になってくる。高安定な周波数標準の実現が VLBI 技術を可能とし、

空間の基準が高精度化したことが、翻って国際原子時の高度化、高精度化へとつながり、時間の計測の精度を高めるということになるとすると、まさに時空標準の中で果たす大きな役割が VLBI 技術に課されていると見る事が出来る。光周波数標準の技術が確立し、光の周波数の領域でコヒーレントを保ったまま信号の情報を記録できるようになれば、光を用いた VLBI 技術も近い将来可能になるかもしれない。そうなると、また天文学や地球物理学において新たなブレークスルーが生じることも大きく期待される。

参考文献

- 1 高橋富士信, 近藤哲朗, 高橋幸雄, "VLBI 技術," オーム社, ISBN4-274-07852-3, 1997.
- 2 T. Hobiger, Y. Kinoshita, S. Shimizu, R. Ichikawa, M. Furuya, T. Kondo, and Y. Koyama, "On the importance of accurately ray-traced troposphere corrections for interferometric SAR data," *Journal of Geodesy*, Vol. 84, No. 9, pp. 537–546, 2010.
- 3 C. Boucher and Z. Altamimi, "The initial IERS Terrestrial Reference Frame," IERS Technical Note, No.1, 1989.
- 4 W. R. Dick and B. Richter (eds.), "IERS Annual Report 2007," International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau, ISBN 978-3-89888-917-9, 2009.
- 5 Z. Altamimi, X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher, "ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters," *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, B09401, doi: 10.1029/2007JB004949, 2007.
- 6 A. L. Fey, D. Gordon, and C. S. Jacobs (eds.), "The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry," IERS Technical Note, No. 35, ISBN 3-89888-918-6, 2009.
- 7 辻宏道, 田辺正, 河和宏, 高島和宏, 宮川康平, 栗原忍, 松坂茂, "鹿島 26 m VLBI アンテナの測地学への貢献," *国土地理院時報*, No. 103, pp. 53–62, 2004.
- 8 N. K. Pavlis and J. Saleh, "Error Propagation with Geographic Specificity for Very High Degree Geopotential Models," in *Proc. GGSM 2004 IAG International Symposium Porto*, edited by C. Jekeli et al., pp. 149–154, 2004.
- 9 B. Petrachenko, A. Niell, D. Behrend, B. Corey, J. Böhm, P. Charlot, A. Collioud, J. Gipson, R. Haas, T. Hobiger, Y. Koyama, D. MacMillan, Z. Malkin, T. Nilsson, A. Pany, G. Tuccari, A. Whitney, and J. Wresnik, "Design Aspects of the VLBI2010 System, Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee," NASA TM-2009-214180, 2009.
- 10 市川隆一 ほか, "距離基準超小型 VLBI システムの開発とその実証実験成果," *情報通信研究機構季報*, 本特集号, 4-6, 2010.



こ やま やす ひろ
小山泰弘

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループグループリー
ダー 博士(学術)
宇宙測地、電波科学