

V-13. 位置天文学への応用

松波 直幸* 弓 滋**

VLBI APPLICATION TO ASTROMETRY

By

Naoyuki MATSUNAMI and Shigeru YUMI

1. はじめに

VLBIが威力を発揮する場の一つが位置天文学である。表題の Astrometry は、その中で特に測定に重点をおいて言われる言葉であるが、ここでは、精密測定による位置天文学という意味にしておく。地球回転の測定は、地球の外の空間の知識と、密接なつながりを持っている。すなわち、既に長年月にわたって恒星の赤経・赤緯の値を用いて地球回転の様子が観測されているが、逆に恒星の位置決定のためには、地球の形や運動が必要だけわかっていなければならない。そこで、まずVLBIの位置天文学全般への応用を考えた上で、地球回転の3成分の決定について述べる。第1の成分はいわゆる自転運動で、実際には与えられた値からの残差を決定すればよい。残りの2成分は極運動で、天文学では普通 $x \cdot y$ と書く。これらの事柄についても、最近数年間に既に重要な報告が発表されている^{(1), (2), (3), (4)}。

前章の地殻変動の問題は、地球の表面の局所的あるいは全体的変形を求めようという問題であった。VLBIの基線の両端の位置を、地球全体に対して比較的局所的にとれば、その地域の中の局地的変形を知ることができ、また、数千kmの基線をとれば、地球の大きさの規模の測定になるので、地球潮汐によって起こされる地球表面の系統的変形を時間の関数として求めることや、大陸移動の様子まで知ることができる。そこで重要な特徴は、基本的な測定量が、地球表面上の各観測点を結ぶ直線距離(基線の長さ)であったことである。これは地球に固定した座標系だけで取り扱うことができる。(もちろん、精密測定が可能になると、地球の形の定義も大変難しい問題になることはよく知られている。)

それに対して、この章で取扱うものはVLBIの基線ベクトルの方向が主となる。電波干渉計の一般的性質と

して基線ベクトルの長さや方向が、観測される天体の方向とともに基本的な量であることは、もはや繰り返す必要はないが、比較的基線の短い電波干渉計では、基線の長さが十分な精度で与えられていて、その方向が重要な役割を演じていたことは、電波天文学の歴史でも明らかである。一般に方向を問題にするときは、ある座標系を用いて記述することになるが、目的次第で、最もふさわしい座標系をとればよい。天文学では天球面を考へて、空間にある天体についての知識に基づいて、赤道座標系や黄道座標系などを作り、理想的な慣性系を表している。VLBIは、地球の自転を利用して天体電波の光路差の変化を知ろうとする方法(一口に言えば干渉フリンジを観測する方法)であるから、赤道座標系をとるのがよい。場合によっては、1部分に重点をおいた取り扱いもあるが、考え方の基本としては赤道座標系が重要である。幾つかの異なる量がどのように分離決定可能かは後に述べるとおりである。すなわち、地球の自転軸をZ軸に、赤道面をX-Y面にとり、春分点の方向を軸にとることによって解析を進める。

2. 地球の回転運動と VLBI 測定

前節で地球の回転運動を挙げたが、その3成分のうち自転運動を除く他の2成分である極運動は一口で言えば、地球の形状軸に対して自転軸の位置が約1,2年で、周期的に変動する現象であり、外力のトルクは関係ない。月及び太陽からトルクを受けて、地球の回転軸の方向が外の空間に対して変動するのは才差・章動である。永年的な成分を才差運動、周期成分を章動運動というが、これには長周期から短周期までいろいろある。地球上から天体を観測するとき、天体の見掛けの方向はすべてこの影響を受けて時々変化して行くが、各定数の値は一応決定されている。才差運動は周期が約26000年で、1年に約50"の割合で自転軸の方向が移動する。ニュー

*東京天文台, **緯度観測所

カムが決定した一般才差の値は、1900年において100年あたり $5025''.64$ 、日月才差の値は $5037''.08$ である。最近この値が、100年あたり約 $1''$ の補正を要することが明らかになりつつある⁽⁵⁾。従来の観測データによるだけでは、この改良値の決定は十分といえないので、MITのグループがVLBI実験から求めた試み⁽³⁾、ケンブリッジの5km電波干渉計の観測から得られた見通し⁽⁶⁾などが出てきた。前者は約1年半のデータから $50''.29 \pm 0''.02$ を得、後者は5年離れた観測によって、100年あたり $\pm 0''.25$ の精度で値が求められるという。今後の観測が期待されるところである。章動の中でよく知られているのは、周期約18.6年、振幅約 $9''.21$ の項であるが、この振幅の4けた目の値が、地球の内部構造に密接な関係を持つので、従来の観測精度を上回るものとして、VLBIデータに期待する声が強いのでは当然である。実際の計算処理において問題になるのは、各種の周期成分を分離決定する方法である。最終的には少しでも多くの観測データが望ましい。このような点に関連し、自転運動の不均一性や極運動については、本来時々刻々、実際には比較的短期間の平均値として決定する必要がある。長年月にわたる多くのデータから、平均して求めるのでは不十分である。地球の表面の回転運動の様子は地球内部や大気・海洋などの性質に密接に関連するので、刻々変動しても仕方がない。しかも、実際にこのような情報を利用する分野として、一般の天文観測、人工衛星利用、宇宙空間における航法などがあるので、最近はますます精密な値の決定・予報が要求されている。現状では、各国天文台における光学観測及びドップラー観測の結果を、パリの国際報時局(BIH)において総合、整約しているが、1週間から2週間位かかる。

3. 天体の赤経・赤緯と VLBI 測定

ある座標系を具体的に与えるものは当然、個々の天体の座標値である。VLBIでは、電波点源を観測するので、そのような遠距離の天体に対して基線ベクトルの方向がどうなるかという見方を要する。注意したいのは、これから天体の赤緯及び赤経の差が求められることである。赤緯が求められるのは、地球の自転に従って長時間同一の天体を観測できるからであり、原理的には、位置天文学本来の、長い伝統を持つ子午線観測と同じことである。赤経の差は、各々の天体に対する基線の方向の違いを仲介として求められるが、時計あるいは標準周波数発振器の安定度は、一連の観測時間中だけ保証されればよいので、光学的天体による子午線観測に比べて大きい利点となる。多数の天体の間で赤経の差が求められた後

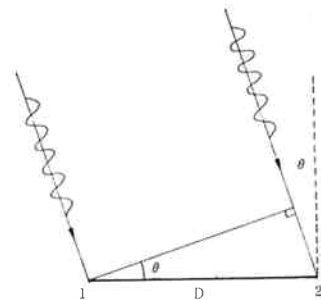
は、従来の方法によって与えられていた値と比較して、適当に赤経の原点を決めればよい。この結果の差異を検討することによって、各種の天文定数の値の改良まで行うことになる。この辺の事情については、太陽系天体に人工の電波源をおくことによって、更に本質的な座標系の研究が進展することになる。

また、光学的天体を間接的に用いるかぎり、電波点源の光学的天体との同定が大きな意味を持つ。従来の恒星の星表位置が示している座標系は、各恒星の固有運動(視線方向に垂直)の影響を受けているのに対し、電波点源は遠距離のため固有運動が測定に掛からないほど小さい。したがって、問題の電波点源について光学的天体が同定されれば、従来与えられていた座標値と、VLBIによる値を比較できる。VLBIの結果が、理想的な慣性系により近いものと考えれば、従来の方法の基となっている才差・章動定数の改良や、基本星表等の赤経・赤緯、固有運動などについての系統的改良が行われる。

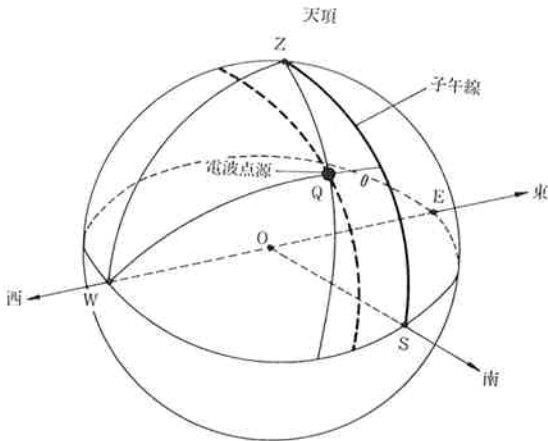
以上で概念的な説明は終わりとし、これらが観測量とどのような関係になっているかを示そう。

4. 電波干渉計の幾何学的関係

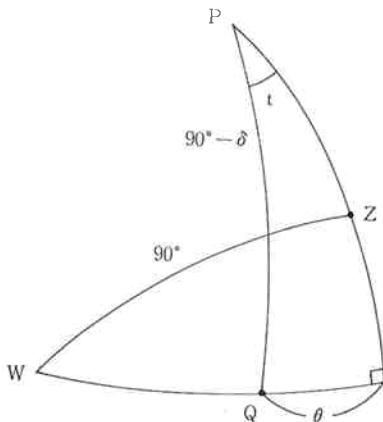
問題の角度の測定について電波干渉計の基本的な幾何学的性質に注意してみる。光路差の測定値に対する各種の補正はV-5, V-6等に述べられているので、ここでは原理的な幾何学的関係のみとする。最も直観的な場合として東西干渉計を考える。これは二つのアンテナが東西方向にあるので、地球の自転軸に平行な基線成分は無い。I-2でわかっているように(第1図)、フリンジの現れ方は基線に対して一定の角度をもつ方向の、どの天体についても同じである。第1図の θ は、天体の方向を基線の子午面から計った角度であり、基線の回りに天体の方向を廻転してみても光路差は同じである。そこで第2図のように、天球上で東西干渉計の幾何学的関係を示すことができる。天体をQとし、天頂をZ、東西の方向をE、



第1図 電波干渉計の原理



第2図 東西干渉計と天球座標



第3図 東西干渉計の球面3角形

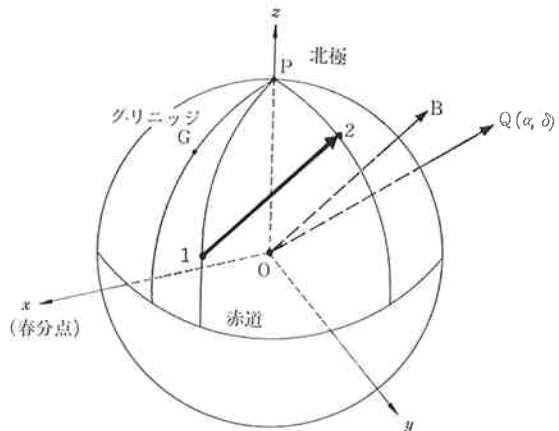
W とすると、子午線は ZS、それに平行で Q を通る小円との角距離が θ である。第2図から第3図のような、球面3角形を取り出すと、 θ と天体の時角 t 、赤緯 δ との間に簡単な関係が得られる。すなわち、

$$\sin \theta = \sin(90^\circ - \delta) \cdot \sin t.$$

光路差 d は、基線の長さ D によって $D \sin \theta$ と書けるから、

$$d = D \sin \theta = D \cdot \cos \delta \cdot \sin t. \quad \dots\dots(1)$$

d が $\sin t$ で表されることは基本的なことである。時角 t は、天体の赤経 α と地方恒星時(グリニッジ恒星時と経度 λ) によって与えられるから、(1)式は、既に基線の長さや天体の赤経・赤緯を含んでいる。基線が東西方向にない場合やVLBIの場合はこれを拡張した形で表される。時角 t の代わりに、赤道面内の基線成分の子午線に対して考えたような時角が入るだけである。我々の一般的な場合は、第4図で与えられる。地球の外の空



第4図 一般の電波干渉計：1, 2 はアンテナ位置、 \vec{OB} は基線12の地心ベクトルの方向、 \vec{OQ} は電波点源の方向である。

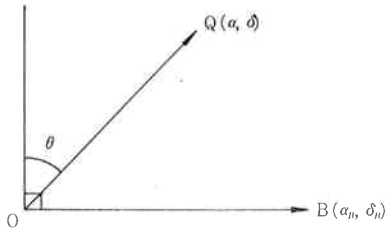
間座標系としては、前述のように x 軸を春分点の方向に、 y 軸を赤道面内で 90° 離れた方向にとる。 z 軸は北極方向である。 G をグリニッジとすれば、 PG は本初子午線である。地球上の二つのアンテナの位置を、1, 2 としたが、その地心座標を $r_1, \lambda_1, \varphi_1$ 及び $r_2, \lambda_2, \varphi_2$ とする。 r は地心距離、 λ は地心経度、 φ は地心緯度である。 λ は東経を(+)にとる。 θ_0 をグリニッジ恒星時とすると、地方恒星時は、各々のアンテナの位置について $\theta_0 + \lambda_1, \theta_0 + \lambda_2$ となる。したがってアンテナの位置は、次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_1 \cos \varphi_1 \cos (\theta_0 + \lambda_1) \\ y_1 &= r_1 \cos \varphi_1 \sin (\theta_0 + \lambda_1) \\ z_1 &= r_1 \sin \varphi_1 \\ x_2 &= r_2 \cos \varphi_2 \cos (\theta_0 + \lambda_2) \\ y_2 &= r_2 \cos \varphi_2 \sin (\theta_0 + \lambda_2) \\ z_2 &= r_2 \sin \varphi_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

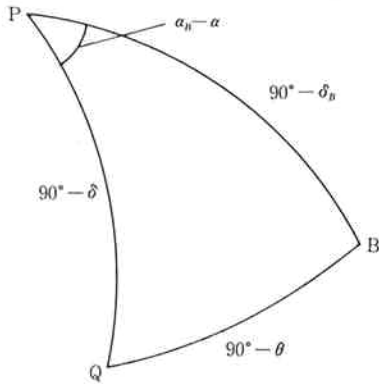
基線 $\vec{12}$ の成分は $x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1$ である。基線の長さ D は $D^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$ で表される。基線の方向を赤道座標で (α_B, δ_B) と表すと、 α_B は日周変化を示すことになる。もちろん、 δ_B も地球の姿勢が微小変動すれば、それに従って変化する。天体の方向 (α, δ) と基線ベクトルの方向 (α_B, δ_B) の関係は、地心から二つのベクトルを考えれば、その平面内では単に、第5図のようになるから第1図と同じである。そこで、第6図のように、球面3角形を取り出してみると直ちに

$$\sin \theta = \sin \delta_B \sin \delta + \cos \delta_B \cos \delta \cos (\alpha_B - \alpha).$$

したがって光路差は(1)式より、



第5図 基線方向と電波点源方向との関係、 θ は第1図と同じ意味をもつ。



第6図 一般の電波干渉計と天球座標の関係を表す球面3角形

$$d = D \sin \delta_B \sin \delta + D \cos \delta_B \cos \delta \cos (\alpha_B - \alpha) \quad \dots\dots(3)$$

ここで、基線ベクトルを地球自転軸に平行な成分 Z と垂直な成分 R に分けると、

$$Z \equiv D \sin \delta_B, R \equiv D \cos \delta_B \quad \dots\dots(4)$$

であるから、

$$d = Z \sin \delta + R \cos \delta \cos (\alpha_B - \alpha) \quad \dots\dots(5)$$

この形が一般の場合のもので、東西干渉計では $Z=0$ とおけばよい。なお、光路差測定中の短時間の間にも基線ベクトルは動くので、実際にはそれを考慮して、 d あるいは幾何学的時間遅れ $\tau_g \equiv d/c$ (c は光速) を求めなくてはならないが、ここでは省略する。

5. 赤経・赤緯及び基線成分の決定

(5)式から直ちに天体の赤経・赤緯及び基線成分の長さの決め方を具体的に理解することができる。各々の値の採用値に対して、補正量 $\Delta\alpha, \Delta\delta, \Delta Z, \Delta R$ を決定すればよい。一つの天体を24時間観測したとすると、第1項の $Z \sin \delta$ は時間について一定であるが、第2項は、(1)式の $\sin t$ に対応するので、時間について周期変

化を示す。その振幅は $R \cos \delta$ である。数時間以上の観測があれば、この二つの項を分離することができる。その程度に $S-N$ 比は大きいことが望ましいのである。もし δ が与えられていればそれから Z と R が求められるし、逆も考えられる。一般には、2個以上の天体を適当な時間内に観測すれば補正量を求めることができる。すなわち、第1項の残差が2個の天体についてそれぞれ、

$$\Delta Z \cdot \sin \delta_1 + Z \cdot \cos \delta_1 \cdot \Delta \delta_1$$

$$\Delta Z \cdot \sin \delta_2 + Z \cdot \cos \delta_2 \cdot \Delta \delta_2$$

となり、第2項の残差は、

$$\Delta R \cdot \cos \delta_1 - R \cdot \sin \delta_1 \cdot \Delta \delta_1$$

$$\Delta R \cdot \cos \delta_2 - R \cdot \sin \delta_2 \cdot \Delta \delta_2$$

となる。この四つの関係から、 $\Delta Z, \Delta R, \Delta \delta_1, \Delta \delta_2$ が求められるわけである。実際は数個の天体を用い、未知量も適当に限って解くなど、いろいろ工夫をすればよい。なお、上の関係から $\Delta \delta$ の決まりやすさは δ, Z, R の大きさによることがわかる。また、 $\Delta Z, \Delta R$ の決まりやすさは δ による。赤経についても(5)式により $R \cos \delta \cos (\alpha_B - \alpha)$ の残差をとれば $-R \cos \delta \cdot \sin (\alpha_B - \alpha) \cdot \Delta \alpha$ となるから、この項を分離すれば $\Delta \alpha$ が出る。このとき、 α_B にも誤差があると、 $\Delta \alpha$ だけを分離できないが、二つの天体について差をとって共通な分を消去できれば $\Delta \alpha$ の差、すなわち、 α の差が求められる。光学的天文学の子午線観測では α に対応する時刻の子午線通過を観測するので、二つの天体については α の差の時間だけ待たなければならない。この点は、電波観測では大きく離れた(天球上の)角度を精度よく決められるのが利点である、との言い方もしばしばされるゆえんである。これに関連して differential method という表現もある⁽²⁾。VLBIでは、光路差の測定に影響する要因が沢山あるが、その幾つかを共通になるように、二つ以上の天体電波源を基線の一端で観測を行って、必要な位相情報を求めると、比較的精度が良くなるという方法である(スイッチ法とか4アンテナ法といった呼び名もある)。ただ、二つの天体があまり離れていると、地球の大気・電離層の影響が違いすぎて補正が難しくなるし、アンテナの性質も複雑になるので、できるだけ相互に近いものを観測するように計画する方がよい。赤経・赤緯の値は電波干渉計のグループがそれぞれ直接・間接の目的を持って決定しており、既に数十個の電波点源について $0''.001$ 単位の決定値が1950.0年に引き直されて発表されている⁽³⁾。これによって光学的天体との同定も精密になって来たが、電波点源の座標が数十日の間に変動するものも多く、位置がわずかながら変化したという報告も出てきたので(I-1, V-9. 参照)、今後 $0''.001$ のけたを問題

にするようになると、そのような電波点源の性質まで考慮に入れなければならない。

6. 地球自転の不均一性の測定

地球回転を取扱うために、(5)式を更に x, y, z 成分に分けると、

$$d = (z_2 - z_1) \sin \delta + (x_2 - x_1) \cos \delta \cos \alpha + (y_2 - y_1) \cos \delta \sin \alpha \quad \dots\dots(6)$$

となり、(2)式からは、

$$\left. \begin{aligned} z_2 - z_1 &= r_2 \sin \varphi_2 - r_1 \sin \varphi_1 \equiv Z, \\ x_2 - x_1 &= (r_2 \cos \varphi_2 \cos \lambda_2 - r_1 \cos \varphi_1 \cos \lambda_1) \cdot \\ &\quad \cos \theta_0 - (r_2 \cos \varphi_2 \sin \lambda_2 - r_1 \cdot \\ &\quad \cos \varphi_1 \sin \lambda_1) \sin \theta_0, \\ y_2 - y_1 &= (r_2 \cos \varphi_2 \cos \lambda_2 - r_1 \cos \varphi_1 \\ &\quad \cos \lambda_1) \sin \theta_0 + (r_2 \cos \varphi_2 \sin \lambda_2 \\ &\quad - r_1 \cos \varphi_1 \sin \lambda_1) \cos \theta_0. \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$

したがって、

$$\left. \begin{aligned} r_2 \cos \varphi_2 \cos \lambda_2 - r_1 \cos \varphi_1 \sin \lambda_1 &\equiv U \\ r_2 \cos \varphi_2 \sin \lambda_2 - r_1 \cos \varphi_1 \sin \lambda_1 &\equiv V_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

と書くと、 U は基線の赤道面内でグリニッジ方向の成分、 V はそれに垂直な成分を表す(本特集号 **V-9** で取り扱ったような電波干渉計で用いる基線の赤経、赤緯方向成分を表す U, V とは関係ない)。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} x_2 - x_1 &= U \cos \theta_0 - V \sin \theta_0, \\ y_2 - y_1 &= U \sin \theta_0 + V \cos \theta_0, \\ (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 &= U^2 + V^2 = R^2. \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

(6)式は、(7)、(8)、(9)式によって、

$$d = Z \sin \delta + (U \cos \alpha + V \sin \alpha) \cos \delta \cos \theta_0 + (U \sin \alpha - V \cos \alpha) \cos \delta \sin \theta_0 \quad \dots\dots(10)$$

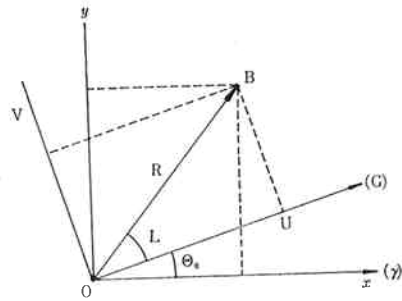
となり、時間の関数として見やすい。この第2項、第3項をまとめて考えると(5)式の第2項と同じ意味を持つことが明らかである。(9)式から直ちに、 R の方向の地心経度 L によって、

$$U = R \cos L, \quad V = R \sin L \quad \dots\dots(11)$$

と表せるので、(10)式は、

$$d = Z \sin \delta + R \cos \delta \cos(\theta_0 - \alpha + L) \quad \dots\dots(12)$$

となる。(5)式と比べると $\alpha_B = \theta_0 + L$ が確かめられる。 $\theta_0 + L - \alpha$ は R の方向に子午線をもつ地点での時角で



第7図 赤道面内の基線成分

あるから、(12)式の第2項は(1)式と同じ意味を持つ。(10)式は、

$$d = Z \sin \delta + U \cos(\alpha - \theta_0) \cos \delta + V \sin(\alpha - \theta_0) \cos \delta \quad \dots\dots(13)$$

とも書ける。赤道面内での各成分の関係を、第7図に示す。

自転の不均一性は、UT1を時計に対して観測から求め、普通UTC(協定世界時)に対して発表されるが、ここでは概念的にUT1-TAIを求めると考えておけばよい。UT1は、各地点での観測値UT0に対して、極運動の補正を行って、地球全体としての自転運動そのものを表すようにした値であり、TAIは国際原子時である。自転は長年月にわたっては、遅れの傾向を持つが、比較的短期間では、ふらつきの様子を示して、平均的な時計に対しては進み・遅れとなる。ここでは、時計から予測された恒星時θが実際に観測されたときに $\theta - u$ 、すなわち u 、だけ遅れていたと考えることにする。そのため、VLBI観測によって求められる光路差については、(13)式の θ_0 の代わりに $\theta_0 - u$ とおけば、

$$\{U \sin(\theta_0 - \alpha) + V \cos(\theta_0 - \alpha)\} \cos \delta \cdot u,$$

あるいは、

$$R \sin(\theta_0 - \alpha + L) \cos \delta \cdot u \quad \dots\dots(14)$$

が加わる。ただし、2次以上の微小量を見捨ててある。観測データからこの項を分離することができて、 R と δ が十分な精度でわかっているならば u が求められる。 δ が 0° に近い方がよいことは当然である。ひとつ、注意しなければならないのは、天体の $\Delta\alpha$ とは当然ながら(14)式の形からは全く分離できないことである。これは、 $\Delta\alpha$ が u の値と違って、不規則な変動はしないはずだということを考慮したり、天体の α, δ は、前述のように何等かの方法で決定されると考えることになる。(14)式の項を分離するには24時間必要と考えると、まず、24時間

平均値の u が求められる。1日の中での変動は測定が十分高精度なら、更に残差を検討すればよい。 u の決定精度は R と δ の大きさで決まることがわかったので、MITグループの実験⁽⁵⁾のように R が約4,000 kmの場合、光路差を約30 cm (1 ns) まで求められるとすれば、 $30 \text{ cm} = 4,000 \text{ km} \times \cos \delta \cdot u$ から $\cos \delta \cdot u \approx 0''.015$, $\delta = 0^\circ$ なら約1 ms まで求められることになる。各局での局内補正の測定精度を1 ns より十分小さく抑え、大気の影響も10 cm 以下まで処理することが必要であるが、既に可能になっている。観測的には、時計をUT 2に近付けるように、周波数オフセットして用いれば、観測値は時計に対して100 ms より小さい程度で得られる。そこで u を100 ms とすると、 $\delta = 0^\circ$, $R = 4000 \text{ km}$ については、問題の項の振幅は約29 ms となる。これが1日周期のフリンジを示す。イギリスのケンブリッジの電波干渉計はVLBIではなく、共通の局部発振器を持つが、東西の基線長は約5 km なので、5 GHz の位相を数度まで抑えられれば、 $0''.04$, $\delta = 0^\circ$ なら約3 ms まで決定できる。実際、 $\pm 4 \text{ ms}$ の値を発表しているが⁽⁶⁾、1 mm まで問題とするので、夏期は大気の水蒸気の影響を受ける。また、NRAOの35 km 干渉計の結果は⁽⁶⁾、基線を長くした割には精度が上らないことを示しているのも、もっともなことである。 α , δ 及びUT 1などの測定について現状では10~100 km の基線が最適のように思われる。ただ、1 ms あるいは $0''.01$ より高精度を問題にする場合には、局地的な干渉計だけでは、基線方向の変動を生ずる地球潮汐の影響を分離できないから、地球上の適当な数か所でその影響を分離しなければならない。この点、VLBIでは基線が長いために精度は原理的には良く、大気の補正も、更に改良される状況にある。実際、大気モデルの改良、22 GHz による水蒸気の測定などが急務となっている。地球潮汐もモデルとして考慮されているが、最近VLBI実験で初めて地殻の潮汐を検出したとの報告もあるので、近い将来この方面の補正も可能となる(I-1. 参照)。

7. 極運動の決定

地球の自転軸が平均極位置からずれているために、経度も緯度も、各瞬間ではそれに応じた値を示す。緯度は緯度変化を示すので、恒星を用いて1900年以降の観測が続けられている。経度はそのために経度変化を示し、時刻決定ではUT 0を与える。そこで、平均極が地球の形状軸と一致しているとし、ある地点での恒星時の観測値あるいは経度の観測値 λ_{obs} が、平均極に対して決っている値 λ_m に極運動の影響 $\Delta\lambda$ を加えたものと考え、

緯度の観測値 φ_{obs} も平均極に対する値 φ_m に、極運動の影響 $\Delta\varphi$ が加わったものとする。よく知られている式は、慣用的に緯度観測で通常使用されている x, y という記法を用いて、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= x \cos \lambda_w + y \sin \lambda_w, \\ \Delta\lambda &= (x \sin \lambda_w - z \cos \lambda_w) \tan \varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots(15)$$

の形で与えられ、西経 λ_w を正にとっている。これは、

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{obs} &= \varphi_m + \Delta\varphi \\ \text{UT } 1 &= \text{UT } 0 + \Delta\lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots(16)$$

と考えたもので、UT 0に補正を加えて観測地点によらない値UT 1を求めるようになっている。我々の場合は東経を正にとるので、

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi &= x \cos \lambda - y \sin \lambda \\ \Delta\lambda &= (x \sin \lambda + y \cos \lambda) \tan \varphi \end{aligned} \right\} \dots\dots(17)$$

と書ける。ここでは地球に固定した座標系でよいから U, V, Z を用いる。(7)式、(8)式と(17)式により、2次以上の微量を無視すると、

$$\left. \begin{aligned} Z_{obs} &= Z + Ux - Vy \\ U_{obs} &= U - Zx \\ V_{obs} &= V + Zy \end{aligned} \right\} \dots\dots(18)$$

となる。これを Z, U, V と残差 $\Delta Z, \Delta U, \Delta V$ と考えると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta Z &= Ux - Vy \\ \Delta U &= -Zx \\ \Delta V &= Zy \end{aligned} \right\} \dots\dots(19)$$

と書け、これから直ちに、

$$Z\Delta Z + U\Delta U + V\Delta V = 0. \dots\dots(20)$$

これは、 $U^2 + V^2 + Z^2 = D^2$ (一定) であるから当然の帰結である。この現象では U, V, Z の値はそれぞれ変わっても、地球上の2点の距離は変わらないからである。

ここで、UT 1の不均一性と極運動の影響をまとめると、そのための残差として(13)式により、

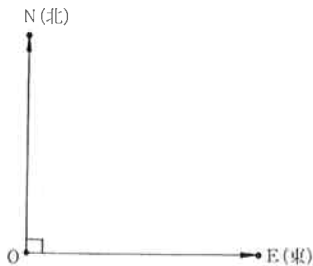
$$\begin{aligned} \Delta d &= (Ux - Vy) \sin \delta - Z \cdot x \cdot \cos \delta \cos(\alpha - \theta_0) \\ &\quad + Z \cdot y \cdot \cos \delta \sin(\alpha - \theta_0) + R \cos \delta \cdot u \\ &\quad \cdot \sin(\theta_0 + L - \alpha), \end{aligned} \dots\dots(21)$$

あるいは、更に書き直すと、

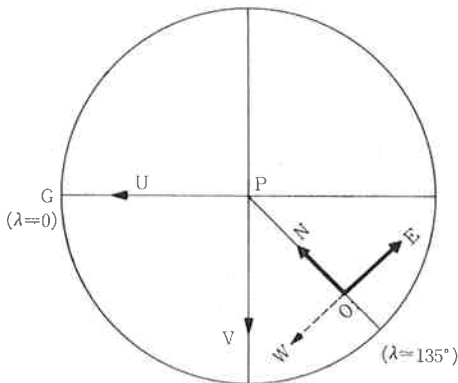
$$\begin{aligned} &= (Ux - Vy) \sin \delta + (Vu - Zx) \cos \delta \cdot \\ &\quad \cos(\theta_0 - \alpha) + (Uu - Zy) \cos \delta \cdot \\ &\quad \sin(\theta_0 - \alpha) \end{aligned} \dots\dots(22)$$

となる。ここで見掛け上は三つの項の係数が分離できれば u 及び x, y が求められるように見えるが、この三つの量は独立ではない。(1)式を見ると、 $Z=0$ ならば第1項から $Ux - Vy$ が求められ、第4項から u が求められることは明かである。また、 $R=0$ の場合は、基線が自転軸に平行となるが、このときに u は出てこないが、 x, y は求められることは注意すべきである。 R は 0 でも U, V に対する残差は x, y のために現れるので、基線を長時間にわたって測定することができるために可能なことである。光学的天文学の天頂儀や写真天頂筒のように、緯度変化だけを測定する場合は、1か所の観測だけでは x, y は求められない。なお、日本とオーストラリアの間には、この場合に非常に近い基線が考えられる。上の場合は U, V が 0 であるから、従来の時刻観測のデータを各地から集めて x, y を求める方法とは比べられない。一般に2組の干渉計があれば、二つの基線について $Ux - Vy$ が得られるので、 x, y は求められ、 $R \neq 0$ ならば u も求められる。一方を $Z=0$ にとると u が求めやすいので、第8図のように、東西・南北干渉計を考えると u, x, y の測定に便利である。これは3か所のアンテナ E, O, N で作る場合である。

これを日本地域で考えると、第9図のように考えてよ



第8図 東西及び南北干渉計



第9図 日本地域における東西、南北干渉計、Pは北極、Gはグリニッジの方向。(WONをとる方が現実的となる。)

い。 x, y の決め方を確かめてみると、次のように書ける。基線 \vec{OE} については U_E, V_E と書き、 $Z_E=0$ である。基線 \vec{ON} については U_N, V_N, Z_N と書くとき、各々の Z 成分の残差 $\Delta E, \Delta N$ は、

$$\left. \begin{aligned} \Delta E &= U_E \cdot x - V_E \cdot y \\ \Delta N &= U_N \cdot x - V_N \cdot y \end{aligned} \right\} \dots\dots(23)$$

であるが、近似的に $U_E \approx V_N, V_E \approx -U_N$ となっているので、

$$\left. \begin{aligned} V_N \Delta E + U_N \Delta N &= (U_N^2 + V_N^2)x, \\ U_N \Delta E - V_N \Delta N &= (U_N^2 + V_N^2)y. \end{aligned} \right\} \dots\dots(24)$$

$U_N^2 + V_N^2$ は十分大きいから x, y は求められる。その決定精度も UT 1 の場合と同様に考えればよい。日本国内で考えると、あまり長い基線をとるのは現実的でなくなるか、上の状況に近似的なものも考えてもよい。そこで1000 kmの基線をとると、光路差の残差を10cmの精度で得られるとすれば、約 $0''.02$ まで決まる。 $0''.01$ までは地球潮汐等の問題はないと考えられる。そこで、この程度の規模の干渉計でデータ処理が速く行ければ UT 1, x, y の決定、予測を行うために適当なものとなる。これは、日本列島全体にわたっての地殻変動を監視することになるかも知れない。国内ならば、各種の通信回線を比較的容易に利用できるもので、大量のデータ処理も可能と思われる。

これに対して、もっと広い地域について10000 km程度の基線を考えて、太平洋地域の計画とか全世界的な計画になる。そのときは、二つのアンテナで一つの天体を同時に観測することのできる時間が短くなるので計算処理が難しくなり、前述の天文定数の誤差の影響、電波源の特殊な微細構造や変動の様子などが検出されてくる可能性なども考えると、 $0''.01$ より小さい角度を精密に時々刻々問題にするためには、 $S-N$ 比を少しでも上げることが最も重要となる。

今までにいろいろな量について、光路差に対する影響を考えてきたので、その残差を比較的眼やすい形にまとめておく。すなわち、残差 Δd は、(1), (2)式等を参照して、

$$\begin{aligned} \Delta d &= \Delta Z \cdot \sin \delta + \Delta \delta \cdot Z \cdot \cos \delta + (Ux - Vy) \sin \delta \\ &+ (\Delta R \cdot \cos \delta - \Delta \delta \cdot R \sin \delta) \cos(\theta_0 + L - \alpha) \\ &+ (\Delta \alpha + u - \Delta L) R \cdot \cos \delta \cdot \sin(\theta_0 + L - \alpha) \\ &- x \cos L - y \sin L \cdot Z \cdot \cos \delta \cdot \cos(\theta_0 + L - \alpha) \\ &- (x \sin L + y \cos L) Z \cdot \cos \delta \cdot \sin(\theta_0 + L - \alpha) \end{aligned} \dots\dots(25)$$

と書ける。基線の成分については Z, U, V だけで書くか、 R, L だけで書くこともできるが、見やすさのため

に上のようにしておく。 $\Delta U, \Delta V, \Delta Z$ は採用値の誤差や、地球潮汐・地殻変動などの影響を意味し、

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= \Delta U \cdot \cos L + \Delta V \cdot \sin L \\ R \cdot \Delta L &= -\Delta U \cdot \sin L + \Delta V \cdot \cos L \end{aligned} \right\} \dots\dots (26)$$

である。求める量の分離については、例えば三つの天体を観測して(25)式の1行目の値と2行目の係数をとれば、三つの天体の $\Delta \delta$ と、 $\Delta Z, \Delta R$ 及び $U_x - V_y$ の値が得られる。本章5.でも述べたように、幾つかの量だけに注目して残差の整約計算を行うのが実際的である。 x, y については(25)式の4行目と5行目から求められることは、(21)式の説明のとおりであるが、注意すべきものは3行目の $\Delta \alpha + u - \Delta L$ である。これの取扱い方が、具体的な条件でいろいろになる。電波点源のカタログに問題がなければ、観測時の u と ΔL を見ることになり、もし ΔL が十分わかっているれば u が分離される。また、同時内に幾つかの天体を観測すると、 $\Delta \alpha$ の差の値は分離されて高精度で求められる。

8. 将来への展望

現在までに、位置天文学的な各種の量をVLBI実験で求めたのはMITグループである。その中では、いろいろのプロジェクトについて特別なグループが出来て研究を実行している。測地的な問題に重点をおいて実験を進めているグループ、宇宙航法や人工衛星利用の手段として開発を推進しているグループ等、広い分野にわたってVLBIを利用しつつある。特に、電波源の微細構造については、VLBIの開発のきっかけの問題でもあり、既に数年前からアメリカ各地の伝統的な電波天文観測所が主となって、世界的な規模の観測が続けられている。これは、角度測定の分解能が上ってくると、非常に重要な情報として、位置天文学的な測定にも並行して考慮されるべきデータとなる。このような状況にあって、今後はVLBIの包括的な観測のための国際協力態勢を作り上げることが不可欠となっている。そのためには、まず、現在のVLBIの方法を一層改良し、より確実に、より速く、また、容易に運用されるシステムを開発しなければならない。

MITグループのCounselman IIIは、VLBIの限界となっている要因について表を示している⁽²⁾。そこでは、地球回転と地球潮汐に対しては現状で約 $0''.005$ が限界となっているが、将来は大気補正を改良することによって $0''.001$ 以下まで求めることが期待できるとしている。従来の数々の実験でみられるように、大気の影響と局部発振器の安定度の不足は大きな障害であった。大

気については、最近ますます情報が増えているので相当な改良が可能であり、水蒸気については、22 GHz 観測が方法としては既に明らかである。発振器の問題は最大の障害とさえ言われることもあるが、各研究所で、VLBIのための水素メーザその他が研究開発されつつあり、現在より格段に良くなることは確かである。その上、高級な通信回線によって、各所の局部発振器を何らかの方法で関係付けることも研究が始まっている。

目的によっては、本章5.で述べた differential method による測定が発達している。単独の測定からは、値の決定精度が $0''.01$ の程度に止まってしまう場合でも、同時内に二つ以上の天体を観測することによって、共通な影響を除き、位相についての、より確かな情報を得ることによって $0''.001$ より高精度が得られる。もっとも簡単な例は、一つの電波源の中での数個の点源の相対位置関係を検出する場合である。それを大きい角度に拡張し得る場合は位置天文学的に有用となってくる。そこで、天体の赤経・赤緯及びそれ等に直結する座標系の問題では、比較的高精度まで達することができる。もちろん、基線の長さの問題もそうである。UT1や極運動については、各観測時期ごとに基線の方向の絶対値を決定することを行うので難しいことになる。地球上の長さだけを問題にする場合や、天球上の位置関係だけを問題にする場合に比べ、天球に対する地球の姿勢を求めようとするのであるから必然的な難しさがあると言える。

ケンブリッジ 5 km の干渉計や、NRAO の 35 km 干渉計の例は、システムの緻密さが特徴であり、基線ベクトルの方向を求めるための強力な方法を示唆している。現在のところ、これらは電波天文学を主目的としており、ケンブリッジの Elsmore も、そのために観測当日のUT1の値を、より早く予測するの必要を感じて、UT1決定の試みを行うことになったのだと言っていた。将来、この種のシステムで、位置天文学を主目的としたものを世界のどこか適当な地点に作る事が望ましい。そこでは、常時観測によってUT1や極運動も現在より質、量ともに向上したものが決定、通報されることになる。このような、比較的、局地的なシステムと、世界的規模のVLBIシステムとは、それぞれ利点を持っており、両者を並行運用することが必要である。我々は、日本の関係者のますますの活躍を願ってやまないものである。

参 考 文 献

- (1) Shapiro, I. I., Robertson, D. S., Knight, C. A., Counselman III, C. C., Rogers, A. E. E., Hinteregger, H. F., Lippincott, S., Whitney, A. R., Clark,

- T.A., Niell, A.E., and Spitzmesser, D.J.; "Transcontinental Baselines and the Rotation of the Earth Measured by Radio Interferometry", *Science*, **186**, pp. 920-922, 1974.
- (2) Counselman III, C. C.; "Radio Astrometry", *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **14** pp. 197-214, 1976.
- (3) Counselman III, C. C.; "VLBI Experiments", Report at the session of Commission 19 and 31 of the 16th General Assembly of IAU (Grenoble, 1976).
- (4) Walter, H. G.; "Precision Estimation of Precession and Nutation from Radio Interferometric Observations", *Astron. Astrophys.*, **59**, pp. 433-440, 1977.
- (5) Fricke, W.; "Fundamental Systems of Positions and Proper Motions", *Annual Rev. Astron. Astrophys.*, **10**, pp. 101-128, 1972
- (6) Elsmore, B.; "Methods for the Determination of Lunisolar Precession from Observations of Extragalactic Radio Sources", *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, **177**, pp. 291-298, 1976.
- (7) Clark, T. A., Hutton, L. K., Marandino, G. E., Counselman III, C.C., Robertson, D.S., Shapiro, I.I., Wittels, J.J., Hinteregger, H.F., Knight, C. A., Rogers, A.E.E., Whitney, A.R., Niell, A.E., Roennoeng, B.O. and Rydbeck, O.E.H.; "Radio Source Positions from VLBI Observations", *Astron. J.*, **81**, pp. 599-603, 1976.
- (8) Elsmore, B.; "UT1 Determination by 5 km Radio Interferometer", Report at the session of Commission 19 and 31 of the 16th General Assembly of IAU (Grenoble, 1976).
- (9) Johnston, K.; "Experiments by NRAO 35 km Radio Interferometer", Report at the session of commission 19 and 31 of the 16th General Assembly of IAU (Grenoble, 1976).

