

3-14 物理モデル計算 ～VLBI における物理の応用

高橋幸雄

3.14.1 VLBI におけるモデル計算

VLBI では、観測されるデータは、遥かかなたの電波天体からくる雑音的な自然電波を地上の2局で観測し、その到達時刻の遅延時間及びその時間変化である。これから、この遅延時間を用いて、それらに関する各種物理現象の数値を、モデル化して推定していく。すなわち観測値 (τ_o) と、物理モデルを仮定して予測値 (τ_c) を計算し、その差が小さくなり、差がランダムな量だけになってばらばらな分布になるように物理モデルの数値を調整していく。推定する方法は、いろいろあるが、線形推定法 (パラメータの変数の多乗乗の効果は小さいので1次だけで推定) が、観測精度が良く安定し、高い信頼度で解析ができる。そのためには、多乗乗項が非常に小さくなるほど、観測値と予測値の差をできるだけ小さくしておく必要がある。さらに、推定するパラメータをあまり多くすると精度が下がったり、信頼度が無くなること、推定できない物理モデルもあるため、予測値はできるだけ正確なものを用意しておく必要がある。また、推定を行う最小2乗法やカルマンフィルター法等に使われる推定パラメータの偏微分値が必要になる。これを行うのが物理モデル計算である。この流れの概念を図1に示す。

推定において、VLBI のいい点は、一番大きい要因である基線ベクトル (2局の相対位置) が、遅延時間 τ に対して直角三角形というシンプルな幾何学性から、線形性があるため、推定がシンプルな式になるため、推定がやりやすく、安定度や信頼度が高くなる。

物理モデルは、最新のモデルを使う。さらに、VLBI で測定され精度が上がったモデルも多くあり、その最新データを使うようにする。章動や歳差、地球回転はもとより、天体の位置や、大気の補正などは、いくつかの最新観測値を駆使して推定し、解析の信頼度をあげていく。

また、大気モデルは、いろいろなモデルがあり、どのモデルがいいか、あるいは推定する時のパラメータ法によって、推定がうまく行くものもあり、その方法は解析方法や目的に合わせて行っていく。

それでは、どんな物理学が関係するか、先ず VLBI の原理から理解を始めよう。VLBI (超長基線電波干渉計) は、宇宙の遥か彼方の天体からくる電波を、地上の複数の電波望遠鏡で観測して、その到達時間差を高精度に測定するもので、いわゆる干渉計である。その概念図を図2に示す。そのルーツは、天体の形を観測する電波干渉計技術である。従来は、天体の構造・形を観測するのに使われており、比較的近い同じエリアに望遠鏡を配置した電波干渉計であるが、それを地球規模の非常に遠いところの電波望遠鏡群で観測することで、地上の位置や地球回転など、いろいろな測定ができるようになった。それは、一番重要な時刻の同時性、時刻の正しさが独立して保持できるようになったことと、大容量の記録が可能になったことによって実現できるようになった。

電波が放射する宇宙彼方の天体から、辿っていくことにする。宇宙の果てにある天体の位置関係である。いわゆる位置天文であるが、10 億光年以上の遙か彼方の天体の位置は動いていないように見えるが、実は動いており、その話は後述の電波位置天文の節です。

次に、電波が到達している経路がある。宇宙を電波が辿ってくる間には、星間物質や重力の影響などがある。場合によっては、未知の物質による影響もある。ただしこれらの影響があったとしても、VLBI では地上に到達した複数の電波望遠鏡の相対時間差(遅延時間)だけが意味を持つため、その経路の違いはほとんど無視できるが、電波源位置や構造・形に現れる。

太陽系にきた電波は、次に影響があるのが、太陽や惑星の重力場による相対論効果の影響である。また太陽コロナの近くを通過した場合は、コロナによる遅延が発生するため、この効果も考慮する。あるいは土星や木星など大型惑星の重力場も、電波の方向が近く、その近傍をかすめる場合も含める必要がある。これも、電波源の位置・方向を変える効果の方が大きい。特に太陽重力場の曲りの効果は、伝搬経路が太陽に一番近づく距離に反比例してモデル化されている。

やっと、電波が地上付近にたどり着いてきた。これに掛かった時間は、数 10 億年もかかり、壮大な旅の末である。そのため、電波は極めて微弱となる。ここで注意してほしいのは、VLBI で観測するのは天体からの電波といっても、GPS などの人工的な規則正しい信号とは違って、共通雑音である。発信源が雑音でも星の規則正しい信号でも何でも、地上にたどり着いた時に共通であればいいのである。

地上にたどり着くにつれて、観測地点間の共通性が無くなっていくので、しっかりしたモデルとして経路の違いを補正しないと行けない。まず出てくるのが、地球を覆っている電子の層、電離層の影響である。電波は、電離気体の中を伝搬すると、電子が揺らされ、屈折や遅延(位相は位相遅延として進み、群遅延は遅れる)を起こす。

次が、大気の影響である。大気は大きく分けて、水蒸気と、それ以外の乾燥大気に分けて考える。それぞれの振る舞いが異なり、場所や時間依存性が大きく、局所的な現象でもあり、その効果を正しくとらえることは難しく、主な誤差要因になっている。特に難しいのは、伝搬路であり、屈折と遅延の両方の影響を考えないと行けない。しかも、経路全体での遅延は、高さや方向によっても異なる。そのトータルなものが大気による伝搬遅延である。一方、データがあるのは地上付近の主に観測地点での気圧、水蒸気圧、気温であり、それから上空や方角によつての違いを推測することになり、難しさや不確定が増してくる。

乾燥大気は、地上から 30km 位までの高さまで広がっており、遅延としてみた場合は、天頂付近でトータルで 2-3 m と大きい。大局的な変動であるため、方角の違いも比較的小さく、モデル化しやすく、比較的正しいモデルが提案されている。一方、難しいのが水蒸気成分である。こちらは雨などの気象データのうち、方角や時間変動、あるいは局所性が強く、モデル化しにくい。非常に多くのモデルの提案がなされてきている。

VLBI では、この不確定な大気の伝搬を、モデルを立ててパラメータ化し推定し、精度を

上げている。

最近は、GPS 等の多種の観測データなどを活用した電離層の観測データ、大気の観測データ、水蒸気の観測データが提供されるので、これらを用いて、予測を高精度にすることができるようになったが、大気モデルの推定は、ほぼ必ず行うので、最終的には自分の観測データで、大気の状態を推定し、精度を上げている状況と言ってもいいかもしれない。

電波はアンテナに到達するが、そこでもう二つ補正をしないとイケない。電波はどこにたどり着くと到達時刻として記録されるかという、電波から電気信号に変換され増幅や周波数変換などの後、サンプリングされる。つまり電波はアンテナの大きな面で電波を1点に集め、それを信号処理してケーブルなどで伝送して時刻と合わせて記録する。この集約点は、すべての電波が同じ時刻にたどり着く場所でもある。VLBIで観測される時刻は、この点で受信すると想定した時刻に対して一定量を加えたものである。時刻同期を目的とする以外はこの一定の時間は無関係となる。一方、アンテナによっては、この集約点の位置が、異なる方向の天体を観測すると、動いてしまう。一方我々が求めたいのは地上に対して動かない基準点である。そこで、この集約点を基準点にする補正をアンテナ軸補正と呼ぶ。集約点が動く軌道を開数にして、1つの基準点に変換することである。

次に、ケーブルを伝送する時に、ケーブルの状態、例えば温度などで、屈折率が変わり、遅延時間の変化が生じる。この変化の補正が必要で、これはケーブル遅延補正、あるいは内部遅延補正である。これは、ケーブルの材質によって、温度と同じ変化をしたり、逆の変化をする。また経路の全体の温度環境や光伝送ケーブルを使う場合などはケーブルの捻じれで遅延が生じることもあるが、ケーブル遅延として補正する。

なお、アンテナ軸補正やケーブル遅延は、変化を取り除けば、時刻差として一定値が加わることになる。時計の正確な時刻差を測る時刻同期実験では、この一定値を正確に求めないとイケない。その方法は、較正装置を介在して求める方法を取るが、それは時刻同期実験のところで記載される。

これで長い電波の旅は終わったように思えるが、その過程の中で、まだ出ていない物理効果がある。これは、電波への影響と云うよりは、位置関係あるいは座標変換について述べないとイケない。一つは、相対論効果である。観測される遅延時間は、どの座標系で見た時刻差なのかという事である。実験に用いている原子時計は、地球のジオイド上での時刻で、地球の重心固定座標系で見た時刻である。一方、我々が相手にしている電波は宇宙の果てから来た電波で、これが平面波であるとして幾何学的な取り扱いができるのは、太陽系の影響を受けない座標系から見た現象である。この座標系を太陽系重心にいる人から見たものとして太陽系重心座標系とする。この2つの座標系の変換をしないとイケない。ここには地球の公転運動や、木星、土星の動きなどが影響する。相対論的座標系変換を求める。それを行うと、太陽系重心座標系と地球固定系座標系の時間変換も行う。

もう一つは、天体に対する基線の向きであり、太陽系重心座標系と地球慣性基準座標系（地球重心座標系で方向を定義したもの）の回転すなわち軸の方向の座標変換である。そ

の回転座標変換を、地球回転及び歳差、章動と呼んでいる。太陽系の外から見ると、地球の平均形状軸は、太陽の引力の影響でコマのようにまわっており、大きな首振りで見られる 25800 年で一周している。これを歳差運動という。星の位置が動いていなくても、地上で見ていると次第に動いていって 25800 年して元に戻るように見える。もう一つは、地球内部の核とマンツルの結合や共振現象などで、大きな首振りの周りで周期的な小さな首振りを行っている。一番大きく長い周期で 18.6 年で、それ以外にも多くの周期をもった変動がある。これらに関しても、かなり精密なモデルが提唱されており、それを上回って、VLBI でより正確な測定もされている。

次に平均形状軸と実際の地球の表面の動きとして、自転運動と、自転軸の動き（極運動）がある。世界時 UT1 と呼ばれる地球回転の角度に相当する時刻と、地球上における地球の自転の形状軸の位置すなわち極運動（Wobble）である。これに関しては、以前は天体の光の望遠鏡観測などで得られたデータを用いて観測されていたが、VLBI のほうがはるかに精度がよく、今では VLBI や GPS などの宇宙測位技術での高精度な測定値を用いたり、推定している。

また、地球は太陽や月の重力で潮汐と呼ばれる引っ張る力（引力）で形状を変形し、1 日数 10cm にも達する。固体地球の地球潮汐による観測局の変化を補正する。さらに、海等の水の動きも潮汐等によって影響をうける。潮の満ち引きがそうである。この潮の満ち引きによる地球表面の負荷の変化によっても地球表面が変形する海洋潮汐負荷効果の補正を行う。さらに、自転軸の揺らぎによる潮汐変化が現れ、それによる潮汐への影響として極潮汐補正も行う。

こうした計算をする場合、地球、太陽、月、木星や土星のようなその他の惑星等の計算式を、日本では海上保安庁の水路部やアメリカの JPL などが出していて、それを計算する。これらの数値は、潮汐の計算や座標変換における太陽・月・地球の位置関係に使われる。

さらに、2つのアンテナ間の相対位置（基線ベクトル）は、各実験内では一定の固定値であるが、プレート運動や地殻変動などで、地球上の位置で動かないものはない。単に相対位置を推定する以外に、長期間の複数の実験を用いる場合は、位置として、ある基準日における位置とその変化という形で推定することもある。

VLBI で求まるのは、相対位置であり、各観測局の位置（X、Y、Z や緯度、経度、高さ等）として表示するには、位置の基準が必要である。この位置の基準となる地球基準座標系をどうするかに関しても考えておく必要がある。

最後に時刻差について述べる。観測時刻には、各観測局の時系の差がある。時系の差の特徴は、電波天体を切り替えても、それに寄らず、短い時間に関しては一定のオフセットまたは時刻に対しての 1 次変化で、電波天体や方角に寄らないという事である。すなわち、推定する場合、短い期間で見ればオフセットと時間の一時傾斜の推定を行えば推定できる。1 日程度で見れば、不規則の時間変化やジャンプが見られるので、それにあつた推定を行う。

3.14.2 物理効果とモデル式

それでは、3で紹介した物理効果について個別に示し、1990年代までに使っていた物理モデルは以下のようなものがある。詳細説明が必要な場合は、元に戻って各項目をクリックしてください。

- 2. 1 電波源位置変化、電波源の構造
- 2. 2 宇宙空間伝搬
- 2. 3 コロナの影響
- 2. 4 重力歪曲効果（太陽など）
- 2. 5 太陽系慣性（重心）座標系と地球重心固定座標系の変換（相対論効果）
 - ①延時間、観測局の位置変換
 - ②太陽系慣性座標系時刻(力学時:TDB、Barycentric Dynamical Time)と国際原子時(TAI)
- 2. 6 回転座標系
 - ①歳差
 - ②章動
 - ③地球自転運動(UT1)
 - ④極運動(Wobble)
 - ⑤UT1 や長周期角運動と大気などとの関係
 - ⑥地球自転・極運動の補間法
- 2. 7 電離層遅延補正
- 2. 8 大気遅延
 - ①乾燥大気遅延
 - ②水蒸気遅延
 - ③総合モデル
- 2. 9 地球潮汐
- 2. 10 海洋潮汐負荷・大気負荷
- 2. 11 極潮汐（Pole Tide）
- 2. 12 太陽・月・惑星位置計算（エフェメリス、天体歴）
- 2. 13 アンテナ軸補正
- 2. 14 局内遅延（ケーブル遅延）補正
- 2. 15 プレート運動を考慮した位置推定
- 2. 16 地球基準座標系（ITRF）
- 2. 17 時系

これら物理モデルを用いて、理論計算を行う。VLBIの観測量は、遅延時間及び遅延時間変化率の2つの物理量で、その観測値と、理論計算値の差が小さくなるようにパラメータ

を推定していく。理論計算を高精度の行うことができること、最も変動の大きい位置変化に関しては線形性が成り立つため、推定は線形1次式で解析が行うことができる。この推定に用いる各物理効果のパラメータに関する遅延時間、遅延時間変化率の偏微分値が必要となる。推定するたびに偏微分計算をするのは非効率であるため、偏微分値をあらかじめ計算しておき、データベースに格納しておき、必要に応じて取り出して、推定時に使う。

さらに、遅延時間、遅延時間変化率における各物理効果の大きさがどのくらいあるかを、すぐに取り出せるように、寄与の大きさも事前に計算しデータベースに収納しておく。

3.14.3 計算ソフトウェアの製作

物理モデルを計算するソフトウェアは米国 Mark-III の CALC と呼ばれるものがあり、それに、いくつかの日本のモデルを組み込んで新しく作り直した KAPRI を作成した。

CALC は、Fortran と呼ばれる当時の計算機の言語で広く使われていたもので書かれている。26000 ステップのソフトであった。もちろんコメント行も多く、実質はその 1/3 くらいが実行行で、全体の文字数は、注釈も含めて約 12 万文字くらいである。

大学で、学んではいたが、これほどのプログラムを見たのは初めてで、それを就職したばかり新人に全部見ておけというのであった。これが、VLBI の出会いでもあり、この中に VLBI における物理学が詰まっていたとは、当時は知るよしもなかった。それを、昼夜、土日なく、勉強しながら頭に入れて言ったのである。ここから、壮大な物理の世界に入り込んでしまった。

CALC を分析して、各種モデルを理解し、それをもとに KAPRI を開発したが、両者の大きな違いは、K3 システムの DB として独自のシステム KASTL をつけたもので、これとのアクセスを作った点や、海洋潮汐モデルを緯度観測所のモデルを導入したこと、章動モデルとして新しいモデルを導入したことなどである。また、座標・時系変換において、相対論効果を取り入れたモデルにしたことなどであった。

3.14.4 他機関との連携について

こうした多岐にわたる物理に係るために、日本の多くの機関と仲良くやることができた。まず、地球回転等に関しては、当時の国立天文台緯度観測所（現自然科学研究機構国立天文台水沢 VLBI 観測所）である。章動の理論のバイブル、Whar のモデルに深くかかわった笹尾教授がおられ、一から教わった。また、横山教授、真鍋教授等多くの素晴らしい地球回転の研究者と一緒にモデル用のソフトの作成などを進めることができたことは、大きな財産となった。また、解析や VLBI 実験、さらには新しい装置の開発、天文台の VELA 計画等長く深くお付き合いをすることになった。非常にいいパートナーであったと思っている。緯度観測所は、VLBI が登場するまでの高精度な地球回転パラメータの UT1、地球自転軸の (Wobble X,Y) などを、光学観測で測定する世界規模のネットワークの日本の観測点で、多くの地球回転などに関する物理現象を発見してきた由緒ある観測所である。ちなみ

に、水沢のそばに平泉があり、世界遺産になったが、そこに行く機会があった。また、個人ごとであるが海鞘を食べれるようになったのも、水沢に何回も訪れたことによる。

国立天文台としては三鷹本部の位置天文を観測する研究者とも深く関係してきた。我々の VLBI は、地球の観測をするだけでなく、電波源の位置も高精度に観測でき、三鷹と水沢などの位置天文の研究者とも関係した。

天文台以外で関係が深いのは、建設省国土地理院（現国土交通省国土地理院）である。こちらの研究者とも仲良く長く連携をしてきた。物理モデル作成ではなく、一緒に多くの VLBI 実験をやってきて、測地座標を決めることをやってきた。他の章で紹介があるので、ここでは省略する。

測地座標系に関係する宇宙測地技術としては、日本では、我々電波研での VLBI と並行して、運輸省海上保安庁水路部（現国土交通省海上保安庁海洋情報部）が SLR 等のレーザ測距技術の開発、観測を行ってきた。この水路部とも、測地系の関係では深く連携をしてきた機関である。今でも思い出されるのが、日本測地系の改訂として進めた測地系 2000 を作る時に、地理院、水路部、天文台などと一緒に、我々も参加して議論したことを思い出す。

外国では、VLBI のモデルに関しては、米国の GSFC や、MIT の Heering 教授、ドイツの Shu 教授などが関係していた。

3.14.5 VLBI における物理学との出会い

VLBI は、一体何か。超長基線電波干渉計、言葉で表せばこれだけであるが、宇宙ができた初期の電波が、現在の地球にたどり着き、それを最新の電気工学の電波望遠鏡で観測し、そして情報処理して、その結果、ハワイが日本に近づくという地表面の地殻変動・プレート運動を観測し、地球回転などの測定を行う壮大な物理学のドラマがここにある。私は、大学で、原子核理論をやっていたが、そこで学んだ流体核運動が、実は地球においても起きていた。また原子核力等での現象が、パルサーや電波の発生などにも絡んでおり、ミクロな世界の現象が、実はマクロな世界でも同じように出てきたというのは驚きであった。宇宙の現象は、ミクロやマクロ等の違いこそあれ、どこでも、類似した現状が起きており、宇宙が大きな統一した法則の中にあることを、実感した瞬間でもあった。

また、光の曲りなど、重力場による相対論が出てきたことは、この技術の深さを知った。それは、扱っているのは、巨大な電波天体であり、地球であり大きなスケールでの対象を扱いながら、相対論効果が出てくるオーダ (10^{-9}) も、同時に扱わなければならない、このスケールの大きさと、微小な物理効果まで扱うとてつもない技術であった。実は、精度が上がれば上がるほど、考えないといけない物理効果は複雑で多岐にわたることも、VLBI の進化に伴って物理を考える時に遭遇したことである。そう、VLBI は、あらゆる物理効果を駆使し、かつ物理効果を考慮していく驚くべき学問であったのである。それは、逆に、VLBI が、いろいろな物理現象を解き明かす技術でもある裏返しの事でもある。

電波の位置や、電波減の解明や、重力レンズなどの現象から、太陽系の動き、伝搬、地球回転やプレート運動等の地球科学、相対論効果にも出てくる重力場による時系の影響、電離層の影響、太陽コロナの影響、湿度や気圧や日常の気象と関係する大気の伝搬、そして測地系等いろいろなものが関与している。もっとも驚くべきことは、地上には不変な基準はなく、最も長期にわたって動きが少ない基準を宇宙の天体に求めたことでもある。すなわち、地上の基準を、宇宙の果てにある天体にしたということで、宇宙と地球が同じ土俵でつながったわけである。これほどまでに広いスケールを同じように扱う技術はおそらく他にはない。そのため、物理現象が広い範囲に多岐にわたることになるのである。