

相対 VLBI 観測による「のぞみ」位置決定を支える周辺技術

市川隆一, 関戸衛, 大崎裕生, 小山泰宏, 近藤哲朗

要旨

宇宙飛翔体の軌道決定を目的とした相対 VLBI 観測を実施し、得られたデータの解析を行い、高精度の軌道情報を得るためには、最適な解析モデルの構築と同時に、観測を成功させ誤差を軽減するため諸問題を解決する必要がある。ここでは特に、飛翔体と交互に観測するキューサーの選択条件や飛翔体追尾などのスケジュール作成時に配慮すべき問題と、電離層・中性大気による伝搬遅延誤差の除去法について概説した。「のぞみ」相対 VLBI 観測では、BERN 大学による汎地球的規模の全電子数情報と VLBI 局近傍の GPS 観測点データから得られる大気遅延推定値をそれぞれ遅延除去に用いている。

1. はじめに

通信総合研究所では、宇宙科学研究所、国立天文台、および山口大学と共同で火星探査船「のぞみ」の相対 VLBI 試験観測を 2002 年 9 月以降複数回にわたって実施してきた。一連の観測は、相対 VLBI 法による高精度軌道推定技術の確立と共に、2003 年 6 月に予定されている「のぞみ」の第 2 回スイングバイの直前に予定されている実際の軌道決定に向けた技術開発という位置づけである。これは、探査船に搭載されたハイゲインアンテナが地球に正対せず、信号強度が不十分であるため従来の RANGE&RANGE RATE(R&RR) 法での軌道決定がそのスイングバイの直前に困難であるため、相対 VLBI 法での軌道推定が必要とされていることによる [1]。

2003 年 4 月 1 日現在、これまでに 2002 年 9 月に 3 回、10 月に 4 回、2003 年 1 月に 4 回、2 月に 1 回、および 3 月に 2 回の「のぞみ」相対 VLBI 観測を実施してきた。観測参加局は、「のぞみ」の運用を担当する臼田 64m の他、鹿島 34m と 11m、小金井 11m、岐阜大 11m、北大苫小牧 11m、および山口大 32m である。データ取得システムとしては、従来の VLBI 観測システムである K4 システムをバックアップに用いた他は、主に通信総合研究所で現在開発中のインターネット VLBI システムを用いている [2]。

これらの観測から得られたデータのうち、相関処理により群遅延が決定できた事例について、集中的に現在解析が進められている。ここで解析の核となる部分は、関戸ら [3] により導出された有限距離の VLBI 遅延モデルに基づく解析ソフトである。このモデルは、電波源が無限遠にあると見なせるキューサーと異なり、地球から「のぞみ」までは有限の距離であり電波の波面を球面波で取り扱う必要があるために開発された手法に基づいている [3]。今年 1 月以降の観測では、狭帯域で非常に弱いトーン信号のみが「のぞみ」で受信できる状態であるため、群遅延決定が極めて困難となっている状況である。そのため、位相遅延観測量による軌道決定手法の開発も急ぎ進められている。

相対 VLBI 法による宇宙飛翔体の高精度軌道決定においては、有限距離モデル解析の適用に加えて観測立案、相関処理、および解析面で従来の VLBI と若干異なる配慮が必要である。観測立案では、天球上を移動する電波源を追尾する観測スケジュール作成が、相関処理では有限距離での予測値計算が、さらに解析では外部データによる電離層・大気による伝搬遅延除去が必要とされる。本報告では、これらのうち特にスケジュール作成と伝搬遅延除去について、現在「のぞみ」観測とそのデータ処理に用いている手法について概説する。

2. スケジュール作成

宇宙飛翔体の位置決定を目的とした相対 VLBI を実施するにあたって留意する点はいくつかある。まず、キューサーは赤道座標系でほぼ不動点と見なせるのに対し、飛翔体の位置が常に移動するため、アンテナ制御と関係の深い観測スケジュールの作成について留意する必要がある。

Figure 1は鹿島34m Xバンドのアンテナビーム半値幅に対する飛翔体電波源の動きをシミュレートした結果である。ここでは、2002年10月21日当時の「のぞみ」と共に比較的天球上での動きの大きい磁気探査衛星GEOTAILの2002年6月4日当時の例を示した。観測で有効な信号を取得できるビーム幅の上限を仮に半値幅の4分の1程度とすると、GEOTAILでは1分強、「のぞみ」では約90分弱でこの上限を越える。そこで、これらの飛翔体を有効に追尾するため、実際の観測では一定時間毎（飛翔体の動きに応じて1～2分毎）の飛翔体位置（赤経・赤緯）を記述した専用のスケジュールファイルを作成し、これによりアンテナ制御を行っている。

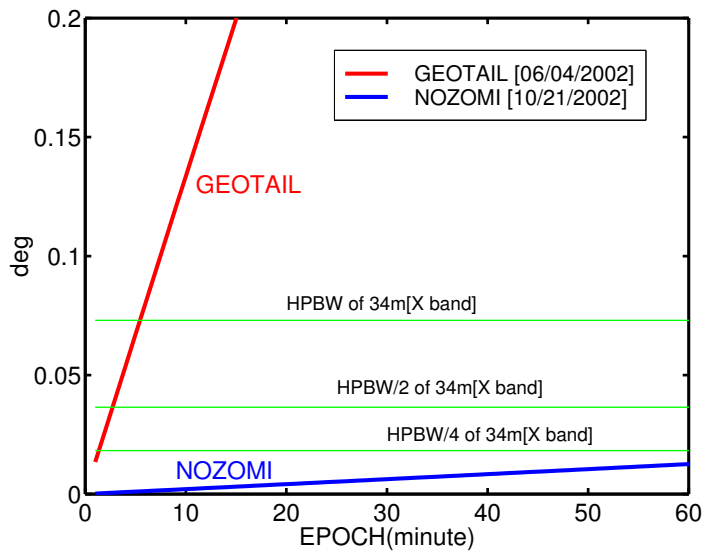


Figure 1. 天球上での飛翔体移動量とアンテナビーム幅との比較

また相対 VLBI 観測では、飛翔体とその近傍のクェーサーを切り替えることで大気や電離層などの共通誤差要因を効果的に取り除く効果が期待される。観測に最適なクェーサーを選択する上で考慮すべき条件として、(1) 飛翔体の近傍（天球上の離角で1～2度程度）にあること、(2) クロックオフセットの決定に十分な信号強度を持つこと、(3) 電波源位置がよく決まっていること、などが考えられる。しかしながら、これらの条件に適合するクェーサーが飛翔体の近傍に存在するとは限らず、天球上の離角で数度以上離れた星を観測せざるを得ない場合もあり得る。

とはいうものの、今回の「のぞみ」相対 VLBI 観測のように複数の観測局が参加する場合、観測 OBS 数や積分時間がアンテナ駆動速度の最も遅いアンテナによって制約を受けるため、飛翔体とクェーサーとの離角には自ずと上限があり、これまでの経験上最大でも10度程度である。実際の観測では、Figure 2 に示す黒四角で示した4つの「のぞみ」近傍のクェーサーを観測対象としている。これらは、従来の測地 VLBI 観測などではほとんど観測対象とされず、信号強度の比較的弱い星ではあるが、IP-VLBI システムによる帯域 4MHz、2bit サンプリング、1ch の観測条件で、11m クラスのアンテナで60秒程度の積分時間を確保すればFRINGEが十分に得られることが確認されている。

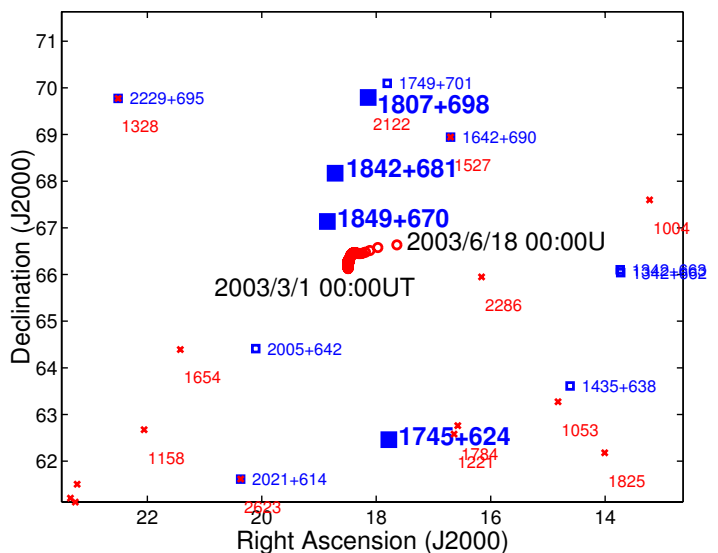


Figure 2. 「のぞみ」相対 VLBI 観測で観測対象としたクェーサー（黒四角）と「のぞみ」（丸印）の天球上での動き（2003年3月1日～6月1日）

3. 伝搬遅延の除去

既に述べたように、各局でのアンテナ駆動速度や飛翔体と限られたキューサーの交互観測という制約上、伝搬遅延の相殺効果が十分に期待できない状態で相対 VLBI 観測を行わざるを得ないのが現実である。しかも、従来の測地 VLBI 観測ほど天球上のキューサーを満遍なく観測することは困難であり、ある程度特定の方位・仰角に観測が偏りがちになる。したがって、各パラメータ間のカップリングにより VLBI データそのものを用いて、電離層や中性大気による伝搬遅延を精度良く同時推定することが困難になる。そこで、今回の軌道決定手法の開発では、VLBI とは独立の GPS のデータを用いてこれらの伝搬遅延除去を行う方法を導入した。

3.1. 電離層遅延

まず、「のぞみ」相対 VLBI 観測データの解析での電離層遅延の除去では、BERN 大学が定期的に WEB や ftp サイトで提供している全球規模の電離層全電子数 (TEC: Total Electron Content) 情報を用いる手法を用いている。

BERN 大学では、全世界約 300 点の GPS 観測点からなる IGS(International GPS Service) 観測網のデータを用いて解析した毎日 2 時間毎の TEC 推定値から求めた GIM(Global Ionosphere Map) と呼ぶ汎地球規模の TEC 分布図を WEB で公開している。BERN 大学には、CODE(The Center for Orbit Determination in Europe) と呼ばれる IGS 観測網による GPS 衛星軌道決定センターの一つが置かれ、TEC 推定はその業務の一環として実施されている。ここで推定された TEC 値は、CODE の匿名 ftp サーバから自由に取得することができ、各々の研究者がそれぞれの目的に応じて利用可能となっている。Figure 3 は、同サーバから取得した TEC 量データより計算した「のぞみ」相対 VLBI 観測局間の基線での電離層遅延量の差をプロットした図である [4]。

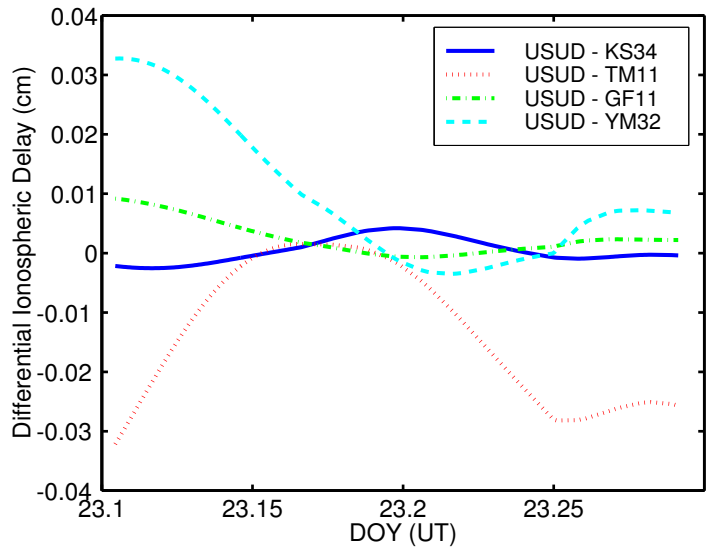


Figure 3. BERN 大学の GIM データより計算した 2003 年 1 月 23 日における各基線での電離層遅延差 (観測局名はそれぞれ、USUD: 白田、KS34: 鹿島 34m、TM11: 苫小牧 11m、GF11: 岐阜 11m、YM32: 山口 32m である)

この図より、特に基線間の緯度差が大きい白田 64m - 山口 32m の基線で電離層遅延量差の変動が大きいことが明瞭に見て取れる。汎地球規模の推定値である GIM/TEC データは、本質的に 1000km 以上の空間スケールを持つ TEC 変動を捉えることができるが、比較的短距離の日本国内の VLBI 観測網での電離層遅延量差を計算する上で取り扱いに注意を要する。今回の例では、図に示されるように遅延量差の大きさは最大でも 4cm 弱であった。2003 年 4 月現在、太陽活動が静穏期に向かっている時期であることから、TEC の短周期変動の影響は小さいと考えられるが、今後より定量的な精度評価を行う必要が

ある。

電離層遅延の推定法は、他にも VLBI 観測点近傍の測地 GPS 観測データからの推定、わが国に 1000 点を越える観測点を有する国土地理院 GPS 観測網 (GEONET) から得られるローカルな電離層分布情報の使用、あるいは従来の 2 周波 VLBI 観測からの直接推定などが考えられ、これらの手法についても相互に比較して最適な電離層遅延除去法の確立を目指す予定である。

3.2. 大気遅延

「のぞみ」相対 VLBI 観測データの処理では、中性大気による伝搬遅延の除去も GPS データを用いている。今回相対 VLBI 観測を行った VLBI 各局の近傍には Table 1 に示すような GPS 観測点が存在し、それぞれの観測データは毎日の観測終了後ほぼ 1 日程度で匿名 ftp サイトより取得できる。

Table 1. VLBI 局近傍の GPS 観測点。観測局 ID のうち I は IGS 局、G は国土地理院 GEONET 局を示す。

| VLBI 局 | GPS 局 | 観測局 ID | 設置場所 |
|-------------|-------|-----------|----------------------------|
| 苫小牧 11m | 苫小牧 | 950136(G) | 北海道苫小牧市緑ヶ丘公園 |
| 水沢 10, 20m | 水沢 1 | 940029(G) | 岩手県水沢市国土地理院水沢測地観測所 |
| 鹿島 34m, 11m | 鹿島 | KSMV(I) | 茨城県鹿嶋市通信総合研究所鹿島宇宙通信研究センター |
| 小金井 11m | 小金井 | KGNI(I) | 東京都小金井市通信総合研究所小金井本所 |
| 白田 64m | 白田 | USUD(I) | 長野県白田町宇宙科学研究所白田宇宙空間観測所 |
| 岐阜 11m, 3m | 岐阜 | 950290(G) | 岐阜県岐阜市岐阜県立岐南工業高校 |
| 山口 32m | 美東 | 950411(G) | 山口県美東町美東町立綾木小学校 |
| 父島 (参考)10m | 父島 | 942003(G) | 東京都小笠原村国土地理院父島 GPS 衛星軌道観測所 |

また IGS により、高速暦 (rapid orbit) と呼ばれる高精度の軌道情報も同程度のタイムラグで同じ ftp サイトより取得可能である。この軌道情報は、精度 10cm と言われる精密暦 (final orbit) より 2 ~ 3 倍程度精度が劣るが、GPS 局位置に強い制約条件をかけた GPS 解析により、天頂方向の大気遅延推定が数 mm の精度で達成できる [5]。こうして推定した天頂方向の大気遅延の例を Figure 4 に示す。この図では、主として乾燥大気に起因する静水圧遅延と水蒸気に起因する湿潤遅延を足し合わせた全大気遅延のプロットを示した。まず GPS データより 1 時間毎の天頂遅延を推定し、その推定値をスプライン補完した上で「のぞみ」観測を実施した時刻での天頂遅延に引き直す処理を行った。山岳地域にある白田局と太平洋沿岸に位置する鹿島局との標高差は 1500m に及び、そのため双方の遅延量の差は約 45cm にも及ぶ。一方、白田、鹿島ともに数時間スケールの短周期変動が見られるが、これは主に水蒸気変動によるものと考えられる。

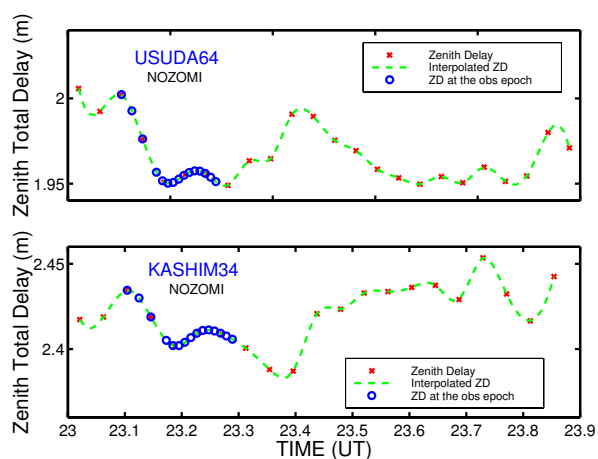


Figure 4. VLBI 局近傍の GPS 観測データより推定した 2003 年 1 月 23 日における、白田、鹿島での天頂方向の大気遅延量。図中で × 印で示したプロットが GPS による推定値、波線はその推定値をスプライン補完したプロット、および、丸印は「のぞみ」観測を実施した時刻でのプロットである。

さらに Figure 5 には基線間での遅延量差のプロットを示した。ここでは、視線方向の遅延を Niell による NMF マッピング関数を用いて計算した [6]。白田局を含む基線では、いずれも基線間での高度差が大気遅延差を大きくする効果として働くため、絶対値で 50~80cm の遅延差が生じる。低仰角の観測が含まれれば、この効果はさらに顕著となり、仰角 10 度程度で 2m 以上に達する。

現状では、匿名 ftp サーバからの GPS データ取得から大気遅延推定値の算出まで、相対 VLBI 観測後ほぼ 2 日程度の時間を要する。IGS から観測後数時間程度で提供されている超高速暦 (ultra rapid orbit) を使えば、より迅速な解析を行うことは可能であるが、この暦は高速暦の 2~3 倍程度精度が落ちるため現在は使用していない。軌道決定の面から言えば、リアルタイム性の要請は強く、大気遅延推定に十分な精度を確保できているか今後評価する必要がある。

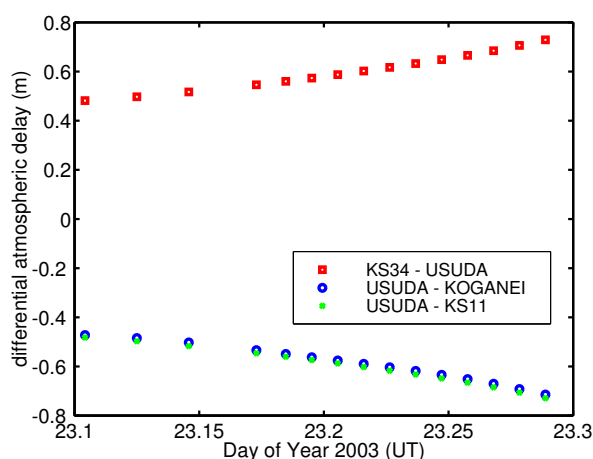


Figure 5. VLBI 局近傍の GPS 観測データより推定した 2003 年 1 月 23 日における、鹿島 34m - 白田基線、白田 - 小金井、および白田 - 鹿島 11m 基線での大気遅延差

4. まとめ

「のぞみ」相対 VLBI 観測のデータを処理し、軌道決定を行う上で考慮すべき周辺技術について、特に観測スケジュールの作成と伝搬遅延除去について概説した。天球上を移動する飛翔体からの信号を的確に受信しつつ、観測に参加する各アンテナの駆動速度などを考慮した専用スケジュールを作成し現在の観測で用いている。しかしながら、信号強度や位置決定精度の点で観測可能なクエーサー数は限られ、電離層や大気の大気遅延誤差を相殺可能な相対 VLBI 観測は現状では難しい。また、専用スケジュール作成はまだ手動であり、今後観測スケジュールの自動生成プログラムを整備する必要がある。伝搬遅延除去については、VLBI 観測点近傍の GPS 点からのデータ解析で得られる大気遅延、および BERN 大学提供の IGS 観測網による TEC 情報から計算した電離層遅延を用いる方法を「のぞみ」相対 VLBI では用いている。電離層遅延については、将来的に国土地理院 GEONET や VLBI 解析そのものからの推定法などと比較して定量的評価を行い、最適な除去法を確立する必要がある。

参考文献

- [1] Yoshikawa et al., Present status and future problems of the orbit determination for Nozomi spacecraft, IVS Technical Development Center News, No. 19, p.37-40, 2001.
- [2] Kondo et al., Real-time Gigabit VLBI System and Internet VLBI System, IVS 2002 General Meeting Proceedings, 0.142-146, 2002.
- [3] 関戸衛、福島登志夫、有限距離電波源に対する VLBI 遅延モデル、本研究会集録、2003.
- [4] Sekido et al., Evaluation of GPS-based ionospheric TEC map by comparing with VLBI data, Radio Sci., 2003(in printing).
- [5] Ohtani, R., and Naito, I., Comparisons of GPS-derived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan, J. Geophys. Res., 105, 26,917-26,930, 2000.
- [6] Niell, A., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelength, J. Geophys. Res., 101(B2), 3227-3246, 1996.