

3G14 イトカワ接近時の HAYABUSA を使った相対 VLBI 観測の精度評価

○ 関戸衛、市川隆一 (NICT)、吉川真、望月奈々子、
村田泰宏、加藤隆二、市川勉、竹内央 (JAXA)、大西隆史 (富士通)

Evaluation of Delta-VLBI with HAYABUSA at Touchdown to Itokawa

○ Mamoru Sekido, Ryuichi Ichikawa(NICT), Makoto Yoshikawa, Nanako Mochizuki, Yasuhiro Murata, Takaji Kato, Tsutomu Ichikawa, Hiroshi Takeuchi(JAXA), Takafumi Ohnishi (Fujitsu Co. Ltd.)

Key Words: Spacecraft Navigation, Very Long Baseline Interferometry

Abstract

In November 2005, spacecraft HAYABUSA has made touchdown approach to the asteroid ITOKAWA. At this occasion, we organized Delta-VLBI observation of HAYABUSA with six Japanese domestic VLBI stations of four institutes. We used phase delay, which has higher resolution than group delay, as observable for this experiments. After the correction of excess delay with delta-VLBI technique, remaining error was reduced to around the order of 0.1 nsec. This delay error corresponds to 0.1μ rad. on a 300 km domestic baseline.

1 目的および背景

深宇宙飛翔体の電波航法に使用されているレンジ計測とそれと相補的な計測特性をもつ超長基線電波干渉計 (VLBI) の観測を組み合わせるにより深宇宙探査機の航法誘導の精度を向上させることができ (e.g. [1],[2])、深宇宙の探査機の精密なナビゲーション、ミッションの成功にとって非常に重要な技術となってきた。我々は日本における相対 VLBI 法による飛翔体の軌道決定技術の確立に向けて実験を続けてきた ([3] [4] [5])。2005 年 11 月、HAYABUSA が小惑星イトカワに着陸する前後の期間において、日本国内の VLBI 観測局を用いて HAYABUSA の相対 VLBI 観測を行った。相対 VLBI 法は、観測対象の電波源とその近傍の基準電波源 (クエーサ) を交互に観測し、基準電波源を使って VLBI の観測量に付随する大気・電離層・原子時計の同期誤差など、システムティックな遅延量誤差を補正して、軌道決定に必要な幾何学的遅延量を精度よく得るための手法である。このとき、基準電波源としては、天球上の座標が精密に測定されているものを使用することが必要であり、VLBI 観測で計測された国際天球座標系 (ICRF) の天体がよく用いられる。しかし、ICRF の基準電波源は数百個程度であるため、一般に観測対象のごく近傍に基準電波源を見つけることができる確率はそれ程高くなく、参照電波源との離角が数度程度ある場合が一般的である。そのためターゲットの飛翔体と参照電波源では観測仰角も多少異なるため大気の伝播経路もまったく同じではない。大気遅延量の仰角依存性をモデル化したマッピング関数を

使って、このような経路差についても補正を行なうが、相対 VLBI によってもなお残る誤差の大きさと要因を把握することは、観測精度向上にとって重要である。

観測遅延量には、信号の群速度による遅延 (群遅延) と位相速度の遅延 (位相遅延) の 2 つがあるが、HAYABUSA については信号帯域幅などの問題から群遅延量の計測精度は数十ナノ秒程度であることがわかっている [6]。相対 VLBI による遅延補正の精度を確認するには更に高い遅延分解能が必要であるため、今回の観測ではより高い計測精度が実現できる位相遅延量を用いて観測を行った。位相遅延量には位相周期の整数倍の不定性があり、一般に遅延量の絶対量の計測が困難である。しかし、今回の場合、小惑星イトカワは光学観測・レーダ観測などによってその軌道がよく分かっており、イトカワとほぼ同じ軌道を飛行する HAYABUSA の位置もほぼ既知と考えることができるため、高い精度の予報値軌道を利用することができた。そのため、VLBI 観測の干渉縞の間隔よりも小さな領域に HAYABUSA の位置がほぼ既知であることから、不定性の問題を回避して相対 VLBI 計測の精度評価が可能となった。本発表では、11 月の HAYABUSA の相対 VLBI 観測データから、位相遅延量を使って相対 VLBI 手法による遅延校正精度の評価結果を行ったので報告する。

2 相対 VLBI による遅延補正のアルゴリズム

2.1 相対 VLBI による遅延補正

VLBI は天球面上での探査機の位置を計測する角度計測手法であるが、その基本的な観測量は遅延量 (時間) である。相対 VLBI は、参照電波源との離角を測定する手法であると考えられているが、実際には参照電波源を使って伝播媒質と原子時計の同期誤差という VLBI 固有の誤差要因を校正することが相対 VLBI の本質である。測定 (推定) する角度は、アприオリとして与える電波源位置 (位相追尾中心) と真の位置との離角である。もちろん解析手法によっては、ターゲットと参照電波源のそれぞれの遅延量の直接の差を求め、参照電波源位置に対するターゲット電波源の位置を推定することは可能であるが、参照電波源とターゲットの電波源の離隔は数度 ~ 10 度程度あり、この大きさの角距離を推定するとモデルの非線形性と相対誤差の大きさが問題になることが多い。

宇宙空間の基準慣性座標系における基線ベクトル \vec{B} 、クエーサへの単位方向ベクトル \vec{S} を使って、クエーサに対する観測遅延量は、

$$\tau_{ref}^{obs} = -\frac{\vec{B} \cdot \vec{S}}{c} + \tau_{clk} + \tau_{atm} \pm \tau_{ion} + \tau_{etc} \quad (1)$$

のように表される。 $\tau_{clk}, \tau_{atm}, \tau_{ion}, \tau_{etc}$ はそれぞれ原子時計の同期誤差、大気の寄与、電離層の寄与、および観測システムのハードウェアや電波原構造などに起因する遅延である。電離層遅延の符号は群遅延で '+' 位相遅延量で '-' である。参照電波源はその位置が十分な精度で既知であるものを選ぶが、その影響を見積もるため、誤差を $\Delta\vec{S}$ とおき、真の基線ベクトルを \vec{B} 、その誤差を $\Delta\vec{B}$ とすると、幾何学的遅延量の理論予測値は

$$\tau_{ref}^{th} = -\frac{(\vec{B} + \Delta\vec{B}) \cdot (\vec{S} + \Delta\vec{S})}{c} \quad (2)$$

で計算され、基準天体についての O-C (観測値—理論値) は誤差の 1 次項だけを残して

$$\Delta\tau_{ref}^{O-C} = \frac{\Delta\vec{B} \cdot \vec{S} + \Delta\vec{S} \cdot \vec{B}}{c} + \tau_{clk} + \tau_{atm} \pm \tau_{ion} + \tau_{etc} \quad (3)$$

と書ける。

一方、飛翔体に対する観測方程式は、電波源までの距離が有限であることを考慮して、式 (1) の右辺第 1 項を $-\vec{K} \cdot \vec{B}/c$ で置き換えた

$$\tau_{sc}^{obs} = -\frac{\vec{B} \cdot \vec{K}}{c} + \tau_{clk} + \tau_{atm} \pm \tau_{ion} + \tau'_{etc} \quad (4)$$

で表される [7][8]。ただしベクトル \vec{K} は観測局 1,2 から電波源 0 へのベクトルをそれぞれ $\vec{R}_{01}, \vec{R}_{02}$ として

$$\vec{K} = \frac{\vec{R}_{01} + \vec{R}_{02}}{R_{01} + R_{02}} \quad (5)$$

で定義されるベクトルである。式 (5) を飛翔体の軌道予報値を使って計算したものを \vec{K}^0 、真の \vec{K} との差を $\Delta\vec{K}$ とすると、軌道予報値を使って計算される飛翔体の予測遅延量 $-\vec{K}^0 \cdot (\vec{B} + \Delta\vec{B})/c$ を差し引いた O-C は

$$\Delta\tau_{sc}^{O-C} = \frac{-\Delta\vec{K} \cdot \vec{B} + \vec{K}^0 \cdot \Delta\vec{B}}{c} + \tau_{clk} + \tau_{atm} \pm \tau_{ion} + \Delta\tau_{etc} \quad (6)$$

となる。これを使って電波源位置の一次項である $\Delta\vec{K}$ を最小 2 乗推定すると、電波源の位置天文的な推定ができる。しかし、このままでは、第 2 項以降の大気などの誤差要因がバイアス誤差として影響するので、基準電波源の観測から得られる Excess Delay で補正を行う。式 (3) を差し引くと

$$\Delta\tau_{sc}^{obserr} = -\frac{\Delta\vec{K} \cdot \vec{B}}{c} - \frac{\Delta\vec{S} \cdot \vec{B}}{c} + \frac{\Delta\vec{B} \cdot (\vec{K}^0 - \vec{S})}{c} + \tau_{err} \quad (7)$$

となる。この式 (7) の右辺第 1 項が VLBI において位置天文的解析を行なう際に飛翔体の位置 $\Delta\vec{K}$ を推定するための主要項である。第 2 項は参照電波源の位置の誤差に比例する項であり、電波源位置のよくわかった天体を参照電波源とする必要があるのは、この項に起因している。第 3 項は、飛翔体と基準天体の離角と観測局位置の誤差に比例する項で、一般には小さく、離角 5 度以下、基線の誤差が 3cm 以下なら 8ps 以下であるが、電波源の離角と観測局位置の精度に依存して無視できない場合があるので注意が必要である。 τ_{err} は、相対 VLBI で補正しきれなかった大気、電離層などの遅延誤差である。今回の場合のように基準天体の群遅延で飛翔体の位相遅延量を補正した場合には電離層遅延の 2 倍が誤差として寄与することになる。

以上のように、相対 VLBI の特徴は、ターゲットの飛翔体から 10 度以内の離角に基準電波源を選び、式 (7) の補正を行うことにより、両観測局の原子時計の同期誤差、歩度の違い、大気の遅延量を補正し、ターゲット電波源に対する幾何学的遅延量を得ることにある。

2.2 スイッチング観測データのモデル化

実際に式 (7) を計算する段階では、基準天体と飛翔体は交互に観測しているので、それぞれの天体で時刻の工

ポックや仰角が異なるため、基準天体の観測データを内挿する必要があり、また仰角の違いを補正するために大気の仰角マッピング関数を考慮する必要がある。大気のマッピング関数とは、ある仰角のとき信号が伝播する大気のパスの長さと同方向の大気の厚さの比で定義される関数で、ここでは A.Neil の NMF[9] を使用した。

アルゴリズムとしては、基準天体の O-C のデータに対して、原子時計の同期誤差（以下クロック）及び大気の大気遅延量を一定間隔毎にレート異なる連続折れ線関数で推定する。つまり、全体を $(t_0 \dots t_n)$ を区切りとする n 個の区間に分割し、それぞれの区間における X 局、Y 局の大気遅延量の変化率 $(\dot{\tau}_{atm,x}^{(i)}, \dot{\tau}_{atm,y}^{(i)})$ と初期エポックでの大気遅延量オフセット、および変化率 $(\tau_{atm,x}^{(0)}, \tau_{atm,y}^{(0)}, \dot{\tau}_{atm,x}^{(0)}, \dot{\tau}_{atm,y}^{(0)})$ で Excess Delay をモデル化する。

$$\begin{aligned} \Delta\tau = & \tau_{clk} + \dot{\tau}_{clk}(t - t_0) \\ & - \left[\tau_{atm,x}^{(0)} + \tau_{atm,x}^{(n)}(t - t_{n-1}) + \sum_{i=0}^{n-1} \dot{\tau}_{atm,x}^{(i)}(t_i - t_{i-1}) \right] \\ & \quad \times f_m(El_x) \\ & + \left[\tau_{atm,y}^{(0)} + \tau_{atm,y}^{(n)}(t - t_{n-1}) + \sum_{i=0}^{n-1} \dot{\tau}_{atm,y}^{(i)}(t_i - t_{i-1}) \right] \\ & \quad \times f_m(El_y) \quad (8) \end{aligned}$$

これを基準天体の O-C のデータにフィッティングしてパラメータ $(\tau_{clk}, \dot{\tau}_{clk}, \tau_{atm,x}^{(0)}, \tau_{atm,y}^{(0)}, \dot{\tau}_{atm,x}^{(i)}, \dot{\tau}_{atm,y}^{(i)})(i = 0, 1, \dots, n)$ を求める。ここで $f_m(El_x)$ は大気遅延量のマッピング関数で X 局の仰角 El_x は時間の引数を省略している。Y 局についても同様である。実際のデータ処理においては、全観測時間を 30 分毎の区間に分割し、天頂大気の変化率に 18ps/hour 程度の束縛条件を付けて推定を行なっている。こうして求められたクロックと大気のパラメータを使って、式 (8) で計算される Excess Delay を HAYABUSA の観測データの時刻と仰角 (t, El_x, El_y) について計算し、HAYABUSA の観測データから差し引く。以上が相対 VLBI により大気とクロックによる Excess Delay を補正する処理手順である。

3 遅延・角度の計測精度

VLBI は基本的に測角観測を行うシステムであるが、その精度は、観測者から電波源への方向に垂直な面に投影した基線ベクトルの大きさを B 、遅延の計測精度を $\delta\tau$ として

$$d\theta \sim \frac{c|\delta\tau|}{B} \quad (9)$$

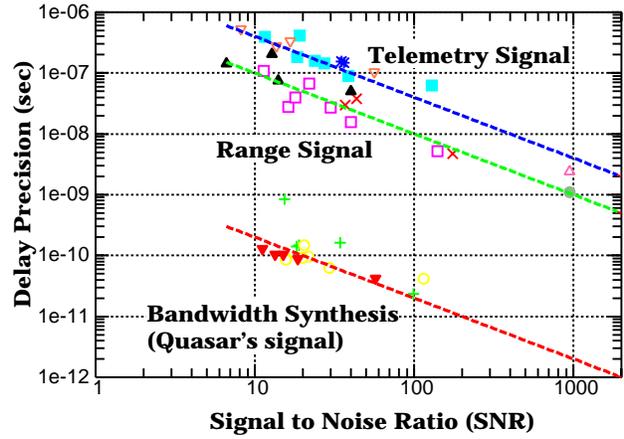


図 1: 遅延の計測精度（ばらつきの RMS）と信号対雑音比（SNR）の関係を HAYABUSA のレンジ信号、テレメトリ信号、およびバンド幅合成を行ったクエーサのデータについて示している。

で見積もることができる。測角誤差は遅延の計測精度に比例し基線長に反比例する。JPL/NASA はカリフォルニア (USA)、マドリッド (スペイン)、キャンベラ (オーストラリア) にある深宇宙追跡局 (DSN) の大型アンテナで DDOR 観測を行うため、8000km 以上の基線長で VLBI 観測を行う。一方、我々の観測は鹿島-つくば (50km)、鹿島-水沢 (300 km)、鹿島-父島 (約 1000km) など一桁以上短い基線で観測を行っており、JPL/NASA と同程度の測角精度を得るためには、1 桁以上の遅延計測精度が必要である。一つの目安として、レンジとレンジレートから推定されている深宇宙探査機の軌道決定精度 $1 \mu\text{radian}$ と同等の空間分解能を 300km 基線で達成するための遅延計測精度 $0.3\text{m}(=1 \text{ nsec})$ の遅延計測精度を考えてみる。

これまでに得られた HAYABUSA のレンジ信号、テレメトリ信号などの遅延量のばらつき (RMS) を信号対雑音比 (SNR) に対してプロットした結果を図 1 に示す。群遅延量の計測精度は一般に SNR と信号帯域幅に反比例する。レンジ信号 (帯域幅 $\pm 1\text{MHz}$) はテレメトリ信号 (帯域幅 $\pm 74\text{kHz}$) より帯域幅が広いいためやや遅延の計測精度が高いが、それでも 1ns を超える遅延計測精度を得るためには 1000 以上の SNR が必要であり、容易ではないことがわかる。通常、測地 VLBI でクエーサの観測を行う際には、500MHz 程度の帯域に 10 チャンネルの信号チャンネルを配置し、帯域幅合成処理により有効帯域幅 300MHz 以上で観測を行っている。HAYABUSA の参照電波として観測したクエーサの群遅延計測のばらつきの RMS と SNR の関係を、比較のため同図にプロットしている。クエーサ

の観測データは有効帯域幅が大きい、小さな SNR でも遅延の計測精度が高いことがわかる。NASA は飛翔体の送信信号として数 MHz ~ 十数 MHz の帯域に複数のトーン信号 (マルチトーン) をたてる方法で比較的広い有効帯域幅を確保し、1ns ~ 0.1ns 程度の精度で DDOR の観測を行っている。将来的には日本の宇宙探査機においてもマルチトーン信号を使って精度の高い群遅延計測を行うことが必要であると考えられるが、HAYABUSA については、現在のところ数 MHz 帯域幅のマルチトーン信号を使って実験を行なう予定はなく、群遅延計測による遅延の高精度化はすぐには実現困難である。このような理由で、群遅延を使った場合には、国内の短・中距離の基線を使った VLBI 観測では、HAYABUSA の ITOKAWA 接近時の観測において十分な精度の検証実験を行うことが難しいと考えられた。そこで、今回は遅延計測精度の高い位相遅延を使った観測を実行した。位相遅延計測の利点として、一本のキャリア信号が検出できれば遅延を計測できること、衛星側に特別な送信信号・システムが不要であること、及び遅延の計測精度が高いといった点がある。一方で位相遅延量は波長の整数倍の不定性の問題があるが、今回の観測では軌道があらかじめわかっている ITOKAWA とほぼ同一の位置にいるため、ITOKAWA の軌道を予報値軌道として使うことにより、不定性を 0 と仮定でき、この問題を回避できる。

こうして 2005 年 11 月の HAYABUSA 観測は、飛翔体の相対 VLBI 観測の精度、特に相対 VLBI による大気や原子時計の同期誤差をどの程度の精度で補正できるか確認するための有効な実験となった。

4 HAYABUSA の相対 VLBI 観測

2005 年 11 月 4 日から 25 日にかけて、HAYABUSA は ITOKAWA へのタッチダウントライアルを行った。VLBI 観測には、日本国内の VLBI 関連研究機関の協力により JAXA/ISAS、NICT のほか、国土地理院、国立天文台水沢の観測局が参加し、のべ 6 つの VLBI 観測局が参加した。観測に参加したアンテナ群を図 2 に示す。また、表 1 に観測に使用した参照電波源、HAYABUSA からの角距離、相対 VLBI のスイッチング周期、観測局 ID などをまとめて示している。参照電波源は、1352-104 を除いて、電波源位置が精密に計測されている国際天球座標系 (ICRF) のカタログ [10] から選んでいる。これは、式 (7) からわかるように、参照電波源の位置の誤差が、相対 VLBI では補正後の遅延量の直接に直接寄与するため、参照電波源の位置の精

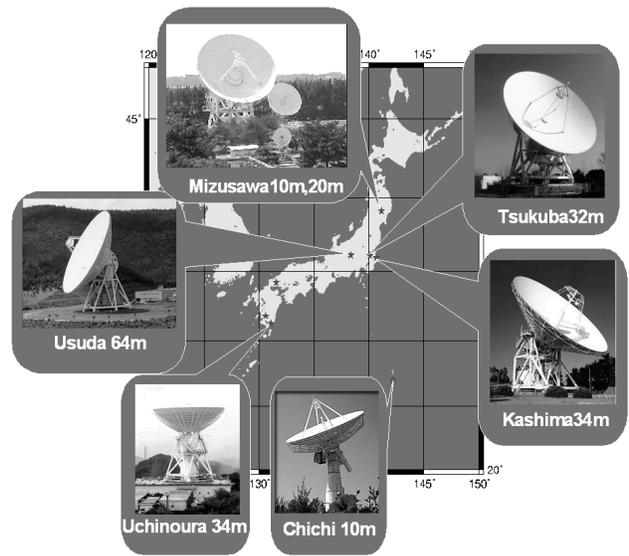


図 2: Fig:HAYABUSA の相対 VLBI 観測に参加した日本国内の VLBI アンテナ群。

度は、相対 VLBI による遅延補正を行ううえで重要である。ICRF のカタログによると、参照電波源の位置誤差はそれぞれ 1430-178(4mas), 1443-162 (0.5mas), 1514-241(0.3mas), 1504-166(0.3mas) である。今回は参照電波源を最小で 2.4 度の離角にみつけることができ、相対 VLBI としては比較的よい条件であったが、一方で、このときの HAYABUSA-ITOKAWA は地球から見てほぼ太陽の反対側にあり、太陽との離角が小さい (4~5 度) 領域で観測を行なうことになった。太陽の近傍ではコロナの電離媒質の不均一性による遅延・電波の屈折などの影響を受けるため、通常の測地・位置天文 VLBI では太陽からの離角 10 度以内では観測を行なわない。今回の観測ではこのような太陽プラズマも HAYABUSA の位置計測の誤差に影響した可能性がある。

5 相対 VLBI の計測精度

HAYABUSA 観測遅延量として位相遅延 2 節で述べたアルゴリズムで相対 VLBI による遅延校正を行った結果を図 3 に示す。基準電波源の O-C データに式 (8) をフィッティングして得られた大気・クロックのパラメータを使って計算した結果が、HAYABUSA の O-C データをよく説明していることがわかる。これにより、HAYABUSA の位相遅延量がから大気・クロックに伴う Excess Delay が校正され、期待どおりに観測の全期間 (約 6 時間) に渡ってほぼ一定の遅延残差が得られている。今回の観測結果では、相対 VLBI によ

表 1: HAYABUSA の 11 月 4 から 25 日までに実施した相対 VLBI 観測の参加局、参照天体、および HAYABUSA からの角距離。観測局 ID は鹿島 3 4 m (O), つくば 3 2 m (T)、水沢 2 0 m (M), 父島 1 0 m (C) である。内之浦 3 4 m 局、臼田 6 4 m 局は飛翔体の運用のため基準電波源とのスイッチング観測を行わなかったため、今回の解析に含めていない。

月日	基準電波源 (離角)	Switching Cycle	観測局 ID
11/4	1352-104 (3.3 deg.)	6 min.	O, T, C
11/12	1430-178 (3.3 deg.) 1443-162 (2.4 deg.)	6 min.	O, T
11/19	1430-178 (8.5 deg.) 1443-162 (5.5 deg.)	6 min.	O, T, M
11/25	1514-241 (5.8 deg.) 1504-166 (7.1 deg.)	6 min.	O, T

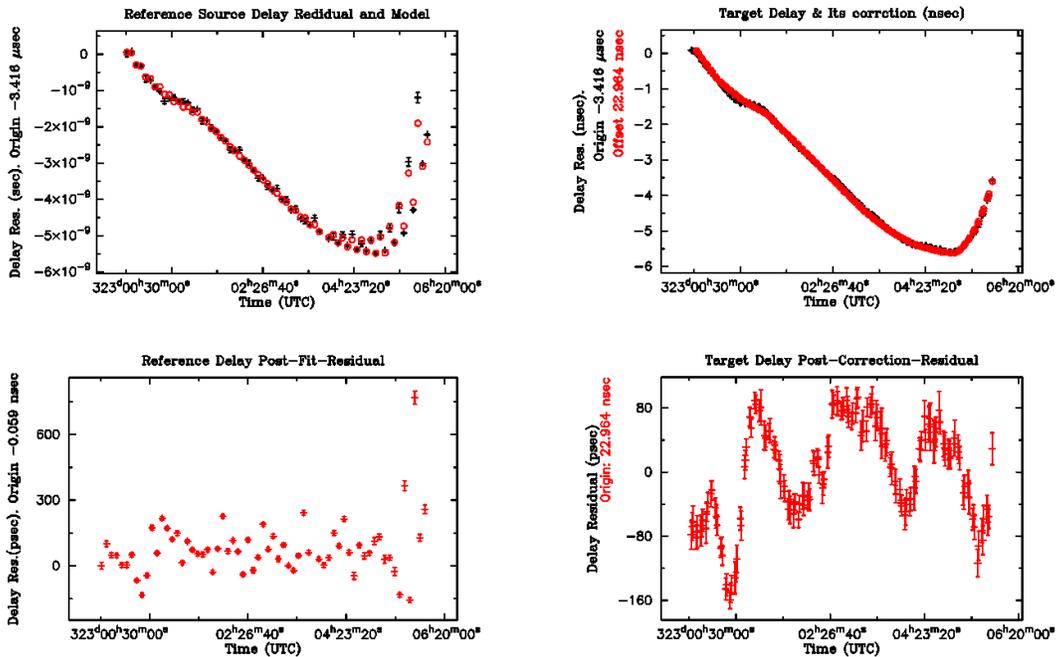


図 3: 相対 VLBI による遅延補正の例。2005 年 11 月 19 日 鹿島-水沢基線。左側上下は基準天体 (クエーサー)、右側上下は HAYABUSA の遅延データである。左上のパネルは基準天体の O-C の値 (式 (3)) を '+' でプロットしており、これに、大気とクロックのモデル (式 (8)) をフィットした結果を '○' で示している。左下はそのフィッティングの残差である。右上のパネルの '+' は HAYABUSA の O-C データであり、'○' は参照電波源の求められたパラメータを使って HAYABUSA のクロック及び大気の遅延量を計算した値である。右下はその残差である。22ns 程度のオフセットを調整している。

る遅延補正の精度は、精度の良い場合で百 psec 以下、父島を含む基線で 1ns 程度であった。

残差にはまだ遅延変動残差が残っており、原因の解明が課題であるが、主な原因としては、HAYABUSA の位相遅延量を基準天体の群遅延で補正しているため、電離層の遅延量が 2 倍寄与して誤差となっていることや、太陽離角が小さかったため太陽プラズマの影響が大きかったなどが考えられる。前者が原因であれば、参照電波源についてもフリンジ位相を使った遅延校正ができればこの残差をさらに小さくできるかもしれない。

6 まとめ

2005 年 11 月に HAYABUSA が小惑星 ITOKAWA に着陸する直前の期間に、日本国内の VLBI 観測局の協力を得て相対 VLBI 観測を行った。相対 VLBI による Excess Delay の補正を行ない、相対 VLBI で得られる遅延の精度は現在のところ、100 ピコ秒 (3cm) からその数倍程度であることが分かった。遅延残差にはまだシステムティックな変動がのこっており、その原因については、電離層の影響や太陽プラズマの影響が考えられる。

7 謝辞

HAYABUSA の相対 VLBI 観測に協力していただいた国土地理院の高島氏、藤咲氏、国立天文台の田村氏、花田氏、菊池氏、河野氏、NICT の近藤氏、小山氏、川合氏に、ここで感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] Border J.S., F.F.Donivan, S.G.Finley, C.E.Hildebrand, B. Moultrie, and L.J. Skierve, "Determining Spacecraft Angular Position with Delta VLBI: The Voyager Demonstration", *AIAA/AAS Astrodynamics Conference August 9-11 1982 San Diego CA.*, AIAA-82-1471, 1982.
- [2] 吉川真、西村 敏充、"深宇宙探査機の軌道決定の現状と将来", 計測と制御, Vol.39, No.9, 564-569, 2000.
- [3] Ichikawa,R., M.Sekido, H.Osaki, Y.Koyama, T.Kondo, T.Ohnishi, M.Yoshikawa, W.Cannon,

A.Novikov, M.Berube, NOZOMI VLBI Group "An Evaluation of VLBI Observations for the Deep Space Tracking of the Interplanetary Spacecrafts", *in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings*, edited by Nancy R. Vandenberg and Karen D. Baver, NASA/CP-2004- 212255, pp.253-257, 2004.

- [4] Sekido, M., R. Ichikawa, H. Osaki, T. Kondo, Y. Koyama, M. Yoshikawa, T. Ohnishi, W. Cannon, A. Novikov, M. Berube, and NOZOMI VLBI group, "VLBI Observation for Spacecraft Navigation (NOZOMI) - Data Processing and Analysis Status Report", *in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 General Meeting Proceedings*, edited by Nancy R. Vandenberg and Karen D. Baver, NASA/CP-2004- 212255, pp.258-262, 2004.
- [5] 関戸衛、市川隆一、大崎裕生、近藤哲朗、小山泰弘、吉川真、大西隆史、W.Cannon, A. Novikov, M. Berube, のぞみ VLBI グループ、"VLBI を使った飛翔体位置計測観測 - 火星探査機 NOZOMI の VLBI 観測データ解析 -", 第 48 回宇宙科学技術連合講演会 1D06, 2004.
- [6] 関戸 衛、市川隆一、吉川真、加藤隆二、望月奈々子、村田泰宏、大西隆史、飛翔体 VLBI 観測グループ、"飛翔体の VLBI 観測 - 2005 年状況報告 -", *VLBI 懇談会 2005 年度シンポジウム (2005 年 12 月 8 日 - 10 日, 三鷹) 集録*, pp.34-37. 2005.
- [7] T. Fukushima, "Lunar VLBI observation model", *Astron. & Astrophys* Vol. 291, pp. 320-323, 1994.
- [8] Sekido, M., and T. Fukushima, "VLBI Delay Model for Radio Source at a Finite Distance", *Journal of Geodesy*, Vol.80, pp.137-149, 2006.
- [9] Neill A., "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths", *J. geophys. Res.*, Vol. 101 No. B2, pp3227-3246, 1996.
- [10] Ma C., E.F. Arias, T.M. Eubanks, A.L. Fey, A.-M. Gontier, C.S. Jacobs, O.J.Sovers, B.A. Archinal, P. Charlot, "The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry", *Astron. J.*, Vol.116, pp.516-546, 1998.