

# Itokawa 接近時の HAYABUSA の相対 VLBI 観測による遅延補正精度の評価

○ 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)

## 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こと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る (e.g. [1],[2])。深宇宙の探査機の精密なナビゲーションは、最近の新宇宙探査ミッションの成功にとって非常に重要な技術となっており、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ている ([3] [4] [5])。これまで、HAYABUSA のレンジ信号、テレメトリ信号などを受信して群遅延量の観測を試みてきたが、信号帯域幅の問題で遅延量の計測精度が 1ns を切ることが難しく、飛翔体の計測精度の確認が十分にできていない。VLBI は天球上の角度計測技術であるが、原理的には遅延時間の計測を行っている。角度誤差  $\delta\theta$  は遅延計測誤差  $\delta\tau$  と基線長  $B$  と  $\delta\theta = \delta\tau/B$  の関係があり、国内の短い基線で高い空間分解能を得るには、遅延計測精度の向上が不可欠である。VLBI の観測遅延量には、群遅延の他に位相遅延量が得られ、後者は遅延の計測分解能は高いが、波長の整数倍の不定性のため絶対遅延量の計測は困難である。

2005 年 11 月、HAYABUSA が小惑星イトカワに着陸するイベントがあり、イトカワの軌道は光学観測やレーダ観測などによって数 km 程度の精度で決まっているため、それとほぼ同じ位置にある HAYABUSA についても、干渉計の 1 フリンジ間隔の範囲 (300km 基線で 2AU の位置において 約 36km) 以内で既知と考えることができる。そのため、位相遅延を使った場合でも不定性の問題を回避して、高精度の遅延量を扱うことができる。

VLBI を使った飛翔体の計測では、相対 VLBI という、近傍の基準電波源を使って大気や原子時計の同期誤差に起因する遅延を補正し、精度のよい幾何学的遅延量を求める手法をとる。相対 VLBI では、通常ターゲットの電波源と近傍の参照電波源を交互に観測するため、各局の大気モデル化により、遅延時間的な内挿と仰角の違いによる空間的な内挿/外挿を行なう。相対 VLBI 法による遅延補正精度の評価のためにも高精度の遅延量計測が不可欠であった。

今回、HAYABUSA が軌道のよくわかっているイトカ

ワとほぼ同じ位置にいる期間に観測を行うことにより、位相不定性を回避して計測精度の高い位相遅延を使用し、相対 VLBI の遅延精度の評価を行うことができた。

## 2 スイッチング観測データのモデル化

基準天体と飛翔体は交互に観測しているため、それぞれの天体で時刻のエ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や天頂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[7] を使用する。データ処理の手順としては、大気と原子時計の同期誤差に起因する Excess Delay をモデル化し、基準天体の観測遅延量を使ってモデル化したパラメータを解く。得られたパラメータを使ってターゲットの飛翔体の観測についての Excess Delay を計算し、補正を行なう。

ここで使った Excess Delay のモデルは、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表す。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。

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

これを基準天体の O-C の遅延データにフィッティングしてパラメータ  $(\tau_{clk}, \dot{\tau}_{clk}, \tau_{atm,x}^{(0)}, \tau_{atm,y}^{(0)}, \dot{\tau}_{atm,x}^{(0)}, \dot{\tau}_{atm,y}^{(0)})$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) を求める。ここで  $f_m(El_x)$  は大気遅延量のマッ

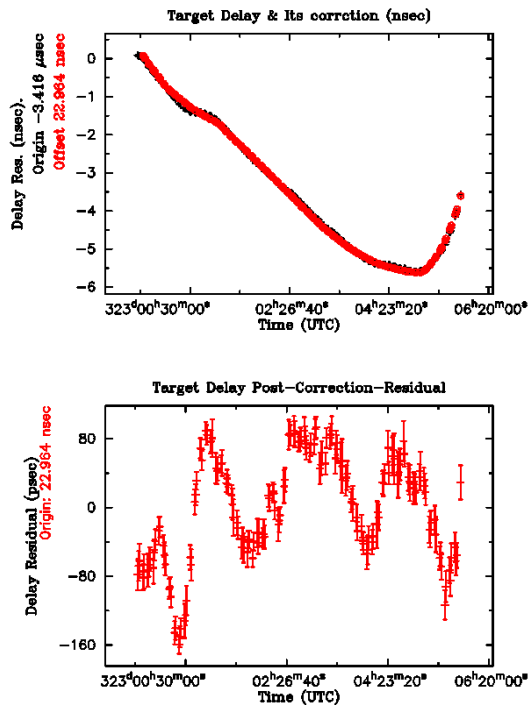


図 1: 相対 VLBI による遅延補正の例。2005 年 11 月 19 日 鹿島-水沢基線の HAYABUSA の遅延データ。上のパネルの '+' は HAYABUSA の O-C データであり、'○' は参照電波源の求められた大気/クロックのパラメータを使って HAYABUSA の Excess delay を計算した値で、右下はその残差である。約 23ns のオフセットを除いている。

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った。

### 3 相対 VLBI の計測精度

前節で述べた excess delay のモデルを使って、大気とクロックのパラメータを推定し、相対 VLBI による遅延校正を HAYABUSA の位相遅延量について行った結果を図 1 に示す。基準電波源の O-C データに式 (1) をフィッティングして得られたパラメータを使って HAYABUSA の Excess Delay を計算した結果が、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。今回の解析の結果、相対 VLBI によ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 程度であったことがわかった。

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。

### 参考文献

- [1] Border J.S., et al., *AIAA/AAS Astrodynamics Conference August 9-11 1982 San Diego CA.*, AIAA-82-1471, 1982.
- [2] 吉川真、西村 敏充,, 計測と制御, Vol.39, No.9, 564-569, 2000.
- [3] Ichikawa,R., et al.,*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., et al.,*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、他、第 48 回宇宙科学技術連合講演会 1D06, 2004.
- [6] Sekido, M., and T. Fukushima, "VLBI Delay Model for Radio Source at a Finite Distance", *Journal of Geodesy*, Vol.80, pp.137-149, 2006.
- [7] Neill A., *J. geophys. Res.*, Vol. 101 No. B2, pp3227-3246, 1996.
- [8] Ma C., et al., *Interferometry*", *Astron. J.*, Vol.116, pp.516-546, 1998.