

相対 VLBI による軌道決定—これまでの状況—

関戸 衛^{*1}, 市川 隆一^{*1}, 吉川 真^{*2}, 望月奈々子^{*2}, 村田 泰宏^{*2},
加藤 隆二^{*2}, 市川 勉^{*2}, 竹内 央^{*2}, 大西 隆史^{*3}

Orbit determination with Δ VLBI —Current Status—

By

Mamoru SEKIDO^{*1}, Ryuichi ICHIKAWA^{*1}, Makoto YOSHIKAWA^{*2}, Nanako MOCHIZUKI^{*2},
Yasuhiro MURATA^{*2}, Takaji KATO^{*2}, Tsutomu ICHIKAWA^{*2}, Hiroshi TAKEUCHI^{*2}
and Takafumi OHNISHI^{*3}

Abstract: For the purpose to improve the orbit determination in Japanese space mission, Δ VLBI observations have been conducted for NOZOMI and HAYABUSA missions. Although, Δ VLBI observation data has not achieved enough contribution to improvement of orbit determination. One of the reasons is low precision of group delay observable due to the lack of singal bandwidth from spacecraft. The alternative observable phase delay has potential to measure the geometrical delay with higher precision than group delay. Though, integer number of phase ampiguity is a problem to use phase delay. In Nov. 2005, HAYABUSA has made touch down aproach to asteroid Itokawa, whose orbit has been given in good precision by measurement of other techniques. In this occasion, we could use phase delay observable by avoiding the problem of phase ambiguity. And the precision of Δ VLBI obseration with phase delay has been tested.

Keywords: Spacecraft Navigation, Very Long Baseline Interferometry

概 要

我々はこれまで火星探査機 NOZOMI と小惑星探査機 HAYABUSA をターゲットして、VLBI を R & RR 計測と併用して軌道決定精度を向上する技術の獲得を目指し、VLBI 観測を行ってきた。しかし残念ながら現在のところ VLBI の観測量を加えることで R & RR 計測の軌道決定精度を向上させるまでに至っていない。主要な要因としては、宇宙機からの信号帯域幅が狭いために VLBI の群遅延の計測精度が制限を受けているという問題がある。高精度の遅延計測が期待できる他の観測量として位相遅延量が考えられるが、一般には波長の整数倍の位相不定性の問題により、絶対遅延量虚計測ができない。しかし、2005 年 11 月に HAYABUSA がイトカワに接近した際には、このような位相不定性の問題を回避して位相遅延量を使用することが可能となった。そしてこの実験では位相遅延量を観測量として、相対 VLBI によるクロック、大気遅延量の補正精度の評価を行なうことができた。

1. 背 景

深宇宙飛翔体の電波航法に使用されているレンジ、及びレンジレート計測 (R & RR) は主に視線方向に感度を持ち、地球回転を利用して赤経・赤緯が推定されるが、これらの観測量は飛翔体の天球上の赤緯が低い場合には赤緯に対する感度

* 1 NICT
* 2 JAXA
* 3 Fujitsu Co. Ltd.

がなくなり、飛翔体の赤緯を計測することが困難になるという問題がある[1]。そこで、R & RR 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. [2],[3]）。JPL/NASA はこの観測技術を Delta Differential Oneway Range（DDOR）とよび、火星探査機などで使用して高精度な惑星周囲の軌道投入や、惑星表面への着地などに使用しており、多くの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。

2. これまでの状況

我々は日本における相対 VLBI 法を取り入れた飛翔体の軌道決定技術の確立に向けて、火星探査機 NOZOMI や小惑星探査機 HAYABUSA（図 1）をターゲットとした VLBI 実験を行ってきた（[4] [5] [6]）。しかし、残念ながら現在のところ VLBI 観測量と R & RR の併用によって軌道決定精度の向上にまで至っていないのが現状である。主要因の 1 つは、VLBI で計測する群遅延の計測精度が低いことである。これは飛翔体の信号帯域幅が狭いことに起因する。JPL/NASA が数十 MHz の帯域にマルチトーンを出す送信機を搭載した宇宙機を使っているが[8]、日本の宇宙ミッションでは相対 VLBI のための信号を想定しておらず、帯域は HAYABUSA のレンジ信号で 1 MHz 程度である。図 2 に HAYABUSA の観測で得られた群遅延の計測精度と帯域幅の関係を、レンジ信号、テレメトリ信号とクエーサの場合について示している。また、図 2 には、HAYABUSA を観測して得られた信号のスペクトルとそれに対応する相互相関関数（遅延分解関数）をレンジ信号、テレメトリ信号、JPL が運用する DDOR の信号、それぞれについて示している。これらの図からわかるように、群遅延の計測精度は信号の形態によって大きく異なり、帯域幅の広い信号ほど遅延分解関数の形が鋭くなり、遅延計測精度が向上する。測地 VLBI 観測においては、クエーサの信号は 300 MHz 程度の有効帯域幅を使って観測を行うため、遅延計測の精度が数十ピコ秒にも達する（図 2）。HAYABUSA においては、宇宙機上で周波数帯域幅の広い信号を生成することはできなくても、地上から広い帯域のマルチトーン信号を送り、衛星側で折り返して送信することで、JPL は HAYABUSA の DDOR 観測を行ったが、日本においてはそのような信号を試験的に送ることは、特に HAYABUSA の運用がクリティカルな現在においては大変難しいこととなっている。遅延計測精度は信号対雑音比（SNR）にも依存するため、相関処理時にノイズ成分を除く処理を行うことで SNR の改善も可能であり、受信する信号の時系列が予めわかっている場合には Matched Filter により SNR を向上させることができる。このような対処も今後更にすすめていく必要がある。

日本国内を使った基線が短いことも、JPL/NASA の DDOR 観測に対して不利な点である。VLBI の角度分解能 $\delta\theta$ は c を光速、 B を基線長として

$$\delta\theta = c \frac{\delta\tau}{B}$$

という関係があり、同一の遅延精度 $\delta\tau$ であれば、基線長が長いほうが測角精度が高くなる。JPL/NASA では、カリフォルニアのゴールドストーン、オーストラリアのチドビンビラ、スペインのマドリッドにある深宇宙探査用のネットワーク（DSN）を使って DDOR の観測を行っており、基線長は 8000 km ～ 12000 km の基線を使っている。一方我々は日本国内の VLBI 関連研究機関に協力を頼み、NICT の 34 m アンテナや、JAXA/ISAS の白田、内之浦のアンテナ以外に国立天文台水沢 20 m 局、国土地理院のつくば 32 m、父島 10 m 局で飛翔体の VLBI 観測を行ってきた。このうち最も長い水沢－父島の基線でも 1300 km であり、JPL/NASA に比べると約一桁小さいネットワークである。

基線長における不利を克服する上でも遅延量の精度向上は重要である。VLBI で得られる観測量には群遅延量のほかにフリッジ位相（位相遅延量）がある。位相遅延量は電波が 2 つの観測局へ到達する位相差であり、群遅延量に比べて高い遅延計測精度が期待できる。位相遅延量の問題は、波長の整数倍の位相不定性のために、遅延量の相対値しか得られないと

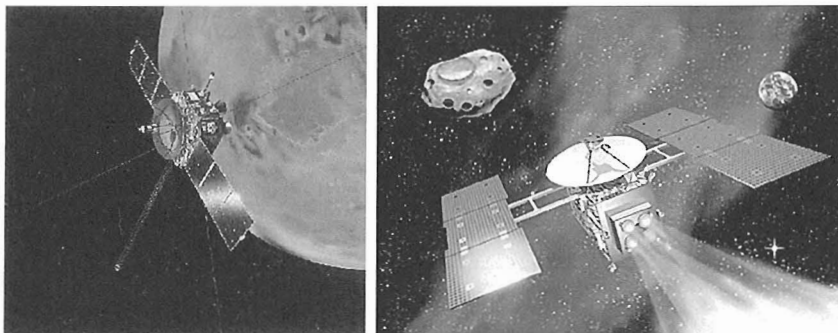


図 1 日本初の火星探査機 NOZOMI（左）と小惑星探査機 HAYABUSA（右）（cJAXA/ISAS）

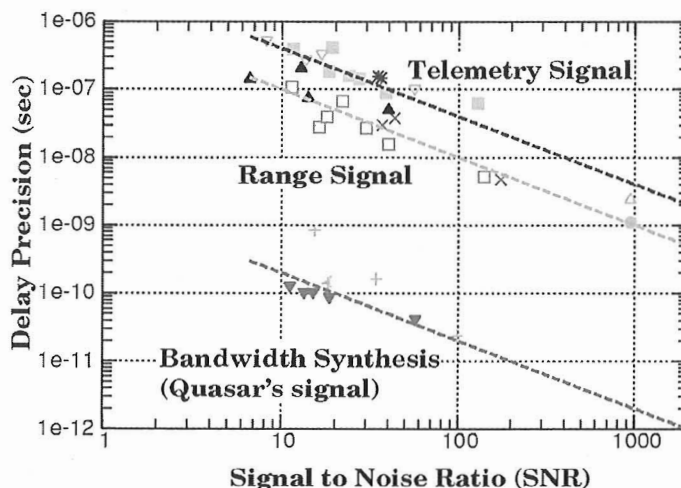


図2 遅延の計測精度（多項式 Fit 残差の RMS）と信号対雑音比（SNR）の関係を HAYABUSA のレンジ信号，テレメトリ信号，およびバンド幅合成を行ったクエーサのデータについて示す．一般に群遅延計測精度は SNR と有効信号帯域幅に反比例する個々が知られており，得られているデータはこれに従っている．

いうことにある．しかし，幸い 2005 年 11 月に HAYABUSA が小惑星イトカワにタッチダウンを行った際には，不定性の問題を回避して位相遅延量が利用できる絶好の機会が訪れた．

3. 2005 年 11 月，イトカワへのタッチダウン時の VLBI 観測

2005 年夏の終わりに，HAYABUSA は小惑星イトカワの近傍に到着し，11 月にはイトカワにタッチダウンを行った．イトカワはレーダ観測や光学観測によって軌道が数 km 程度の精度で求められていて，そのイトカワに地球から見てほぼ同一の場所に HAYABUSA が滞在することになった．VLBI の各基線が天球面上につくる干渉縞の幅は，最も長い 1300 km の水沢－父島基線が正対したとして 6 ミリ秒角（2 AU 離れたイトカワ近傍で 8 km），鹿島一つくばの 50 km 基線では，150 ミリ秒角（イトカワ近傍で 200 km）あり，遅延モデルが完全であれば，予測遅延量に対し 1 波長の不定性の範囲内に HAYABUSA が確実にいることになる．つまり，不定性を 0 として位相遅延量を使用することができると期待できる．これまで群遅延量の精度不足のため，相対 VLBI による大気，クロックなどの余剰遅延の誤差の補正精度を評価することができなかったが，この観測では，遅延量計測精度の高い位相遅延量を利用して相対 VLBI の補正精度を評価することができる．

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．基準電波源としては，天球上の座標が十分な精度で既知のものを使う必要があり，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．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，大気中で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 による補正後の誤差の大きさと要因を把握することは，観測精度の向上にとって重要である．

2005 年 11 月 4 日から 25 日，HAYABUSA のイトカワへのタッチダウンの時期にあわせて行った VLBI 観測には，日本国内の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，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 4 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 観測のスイッチング周期，観測局名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[9]から選んでいる．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（4 mas），1443-162（0.5 mas），1514-241（0.3 mas），1504-166（0.3 mas）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 としては比較的良好な条件であったが，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・

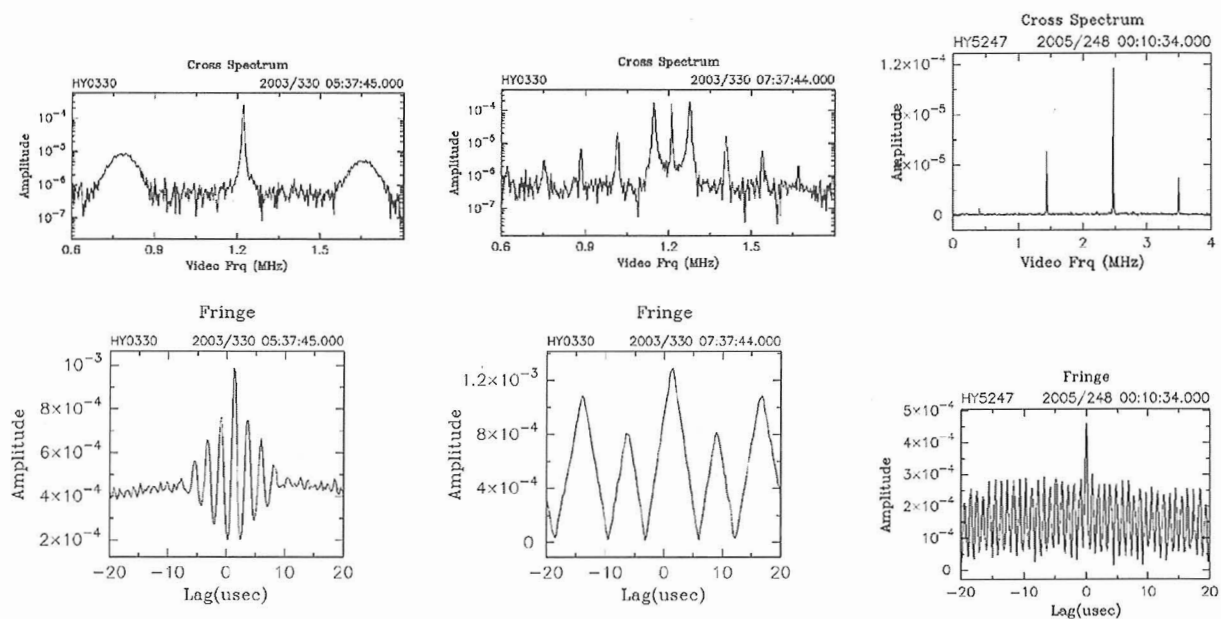


図3 HAYABUSA を VLBI 観測して得られた，相互相関スペクトル（上段）と遅延分解関数（下段）をレンジ信号（左）テレメトリ信号（中），DDOR の信号（右）について示す．信号の帯域幅は DDOR > レンジ信号 > テレメトリ信号の順に広く，遅延分解能もこの順に高い．

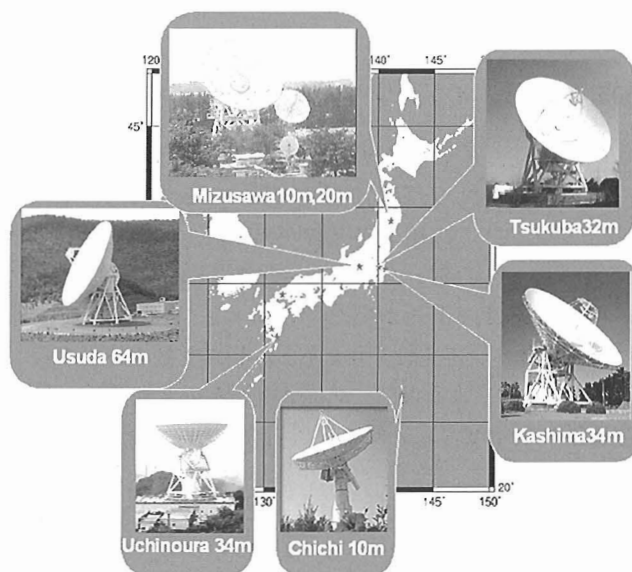


図4 HAYABUSA の相対 VLBI 観測に参加した日本国内の VLBI アンテナ群．

表1 HAYABUSA の11月4日から25日までに実施した相対 VLBI 観測の参加局，参照電波源，および HAYABUSA からの角距離．内之浦 34 m 局，臼田 64 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
11/4	1352-104 (3.3 deg.)	6 min.	鹿島 34m, つくば 32m, 父島 10m
11/12	1430-178 (3.3 deg.) 1443-162 (2.4 deg.)	6 min.	鹿島 34m, つくば 32m
11/19	1430-178 (8.5 deg.) 1443-162 (5.5 deg.)	6 min.	鹿島 34m, つくば 32m, 水沢 20m
11/25	1514-241 (5.8 deg.) 1504-166 (7.1 deg.)	6 min.	鹿島 34m, つくば 32m

位置天文 VLBI では太陽からの離角 10 度以内では観測を行わない。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。

4. 相対 VLBI の計測精度

相対 VLBI では、HAYABUSA と参照電波源を交互にスイッチング観測しているため、遅延量の補正を行うには、参照電波源の遅延量を時間的および空間的に補間する必要がある。そのアルゴリズムについての詳しい説明は、第 50 回宇宙科学技術連合講演会の予稿[10]に記載しているので、そちらを参照されたい。相対 VLBI による遅延補正を行なった結果の O-C のプロットを図 5 に示す。大まかな処理手順としては、(1) 基準電波源の O-C (観測量－理論的幾何学遅延量) のデータを、クロックのオフセット及びレイトと、VLBI の観測局の天頂遅延量を 30 分おきの折れ線連続関数の組み合わせでモデル化し、データにフィッティングして求める。(2) 得られた大気・クロックのパラメータを使って HAYABUSA の観測仰角に対する遅延量を同モデルで計算し、観測量から差し引く。という 2 つのステップである。図の左はクエーサの遅延量で、右側が HAYABUSA の遅延量の O-C である。相対 VLBI により、HAYABUSA の位相遅延量から大気・クロックに伴う Excess Delay が補正され、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。1-2 時間のスケールでの 100 ps 程度の時間変動が残っており、主な原因としては、HAYABUSA の位相遅延量を参照電波源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となどが考えられる。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補正により、この残差をさらに小さくできるかもしれない。100 ps (= 3 cm) という誤差の大きさは、鹿島－水沢 300 km の基線で 0.1 μ radian の空間分解能に対応し、R & RR 観測と組み合わせて軌道決定精度の改善に寄与できる精度である。

5. ま と め

R & RR 法に VLBI 観測を加えて宇宙飛翔体の軌道決定精度を向上させる技術の獲得に向けて、火星探査機 NOZOMI、小惑星探査機 HAYABUSA をターゲットとした VLBI 観測を行ってきたが、現在のところ、VLBI データを加えることによる

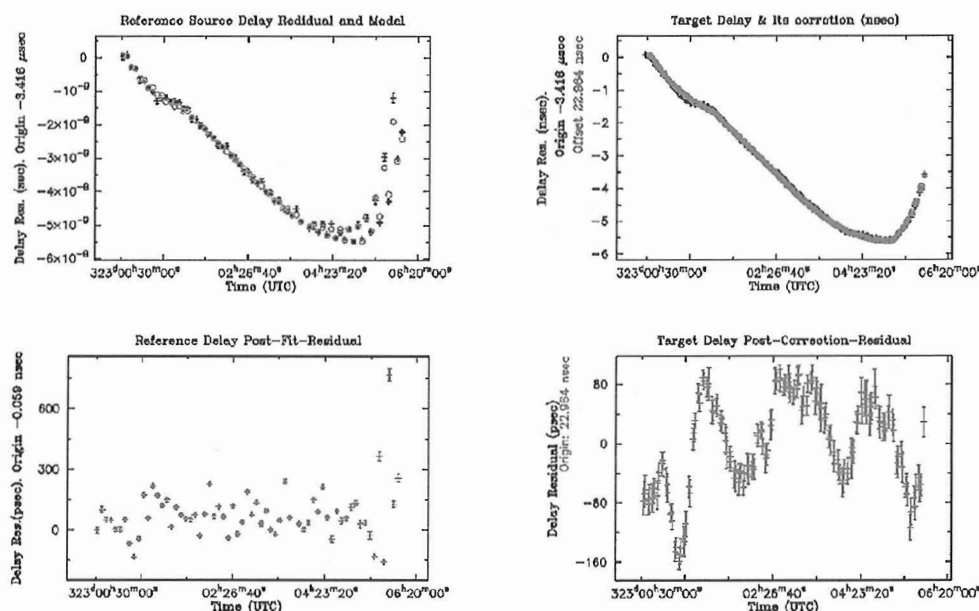


図5 2005 年 11 月 19 日の鹿島－水沢基線のデータを使った、相対 VLBI による遅延補正の例。左側は参照電波源 (クエーサ)、右側は HAYABUSA の遅延データである。左上のパネルの '+' は参照電波源の O-C の値で、幾何学的遅延残差の他に、大気遅延量や原子時計の同期誤差などの Excess Delay を含んでいる。これに、大気遅延量とクロックのモデルをフィッティングしたもの (本文参照) が '○' で示してあり、左下はその両者の残差である。右上のパネルの '+' は HAYABUSA の O-C データであり、'○' は参照電波源の求められた大気遅延量、クロックパラメータを使って計算した HAYABUSA の Excess Delay、つまり補正量である。右下のパネルは補正後の残差をプロットしており、6 時間に渡って ± 100 ps 以内に収まっている。

軌道の改善は明瞭ではない。その主な原因の一つは、飛翔体の帯域幅の制限による群遅延計測精度の不足にある。今後の宇宙機においてはVLBIのための広帯域のマルチトーン信号[11][12]を送信する者は運用上の問題で実現が難しく、今回後者のアプローチを試みた。2005年11月にHAYABUSAが小惑星イトカワにタッチダウンを行った期間に、日本国内のVLBI観測局の協力を得て相対VLBI観測を行った。イトカワの軌道が十分な精度で既知として扱えるので、位相遅延量の不定性を0として処理を行った。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)程度からその数倍であることが分かった。これは国内基線でも軌道決定精度の向上に寄与できるレベルである。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。

6. 謝 辞

NOZOMIの観測においては、カナダのヨーク大学 Wayne Cannon 博士, Sasha Novikov 博士, カナダ天然資源局の Mario Berube 氏に協力いただいた。国内の観測局として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, 劉氏, NICTの近藤氏, 小山氏, 川合氏, 元研究員の大崎氏, 山口大学の藤沢氏, 岐阜大学の高羽氏, 須藤氏, 北海道大学の徂徠氏に協力していただいてVLBI観測が実施できたことに、感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- [1] 加藤隆二, 吉川真, 大西隆史 “軌道決定の将来構想”, 「VLBI技術による宇宙研究」研究会集録 pp. 47–54, 2003.
- [2] Border J. S., F. F. Donovan, 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.
- [3] 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.
- [4] 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-2004212255, pp. 253–257, 2004.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Boder, J. S., “A Global Approach to Delta Differential One-way Range”, *Proceeding of the 25th International Symposium on Space Technology and Sciences*, ISTS 2006-d-49, 2006.
- [9] 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.
- [10] 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, “イトカワ接近時のHAYABUSAを使った相対VLBI観測の精度評価”, 第50回宇宙科学技術連合講演会 予稿集, 3G14, 2006.
- [11] 4 Spacecraft DOR Tones Specifications, “Delta-Differential One way Ranging (Delta-DOR) Operations”, *CCSDS White book*, CCSDS 506.0-W-1, May 2006, p. 4-1.
- [12] 関戸衛, 市川隆一, “飛翔体のVLBI群遅延計測に適した信号形態についての検討”, 第6回自動計測制御学会システムインテグレーション部門講演会2005年12月16日–18日予稿集, 1L3-4, 2005.