

# 1I10 位相遅延量を使った相対 VLBI 補正の検証

○ 関戸衛、市川隆一 (NICT)、吉川真、竹内央、  
加藤隆二、市川勉 (JAXA)

## Evaluation of Delta-VLBI Delay Calibration with Phase Delay

○ Mamoru Sekido, Ryuichi Ichikawa(NICT), Makoto Yoshikawa, Hiroshi Takeuchi,  
Takaji Kato, Tsutomu Ichikawa(JAXA)

**Key Words:** Spacecraft Navigation, Very Long Baseline Interferometry

### Abstract

For the purpose to apply VLBI technique for spacecraft navigation, we are investigating the differential VLBI (Delta-VLBI) method. At the event of touchdown to asteroid ITOKAWA in November 2005, we made VLBI observations with Japanese domestic VLBI stations. To get high angular resolution, improvement of delay precision is important. We extracted phase delay observable from the VLBI observation data of HAYABUSA and the they were used for evaluation of the accuracy of differential VLBI method. Results of new technique of Delta-VLBI excess delay calibration (phase-group/phase delay calibration), which is jointly using group delay and phase delay observables of reference radio sources in the calibration process, is presented in this paper. One o the benefit of the new technique is enabling estimation of not only neutral atmospheric and clock parameters, but also ionospheric delay parameters. Additionally time interval of atmospheric parameter modeled by piece-wise linear function estimation could be set shorter and more frequent. This is due to high time resolution of phase delay observable. As a result of new calibration technique, the opposite sense of delay behavior in calibration, which appeared on the baseline related with Chichijima station in the phase-group delay calibration, was removed and the calibration accuracy has been improved. Although the magnitude of the total improvement was less than what we expected.

## 1 目的および背景

我々は、VLBI 観測を使って、宇宙飛翔体の軌道決定精度の向上を目指した研究を行っている ([1] [2] [3] [5])。宇宙探査機ハヤブサが小惑星イトカワに接近した時期に日本国内の VLBI ネットワークで観測したデータを使い、ハヤブサの VLBI 位相遅延観測量と近傍のクエーサの群遅延量を使って相対 VLBI 解析を行った結果について前回の宇宙科学技術連合講演会 [5] で報告した。日本国内の基線長の制限やハヤブサの信号の帯域幅の制約を克服して遅延計測精度を上げるため、位相遅延量をハヤブサの VLBI 観測データから抽出し解析を行った。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同じではなく、単純な差分では相対 VLBI の精度向上は限定的である。我々は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っているが、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 種類があるが、ハヤブサ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 [4]。相対 VLBI による遅延補正の精度を確認するにはピコ秒オーダーの高い遅延分解能が必要であるため、ハヤブサの観測データから高い計測精度が実現できる位相遅延量を抽出して解析に用いた。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が、今回の場合、小惑星イトカワはその軌道がよくわかっており、イトカワとほぼ同じ軌道を飛行するハヤブサ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、位相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。昨年の発表 [5] では、11 月のハヤブサの位相遅延量を基準天体の群遅延量で補正 (位相 - 群遅延校正) した結果について報告した。このとき、相対 VLBI により数百ピコ秒程度の精度で大気やクロックの同期誤差に伴う遅延量を補正できることを示した。しかし、南方にある父島を含む基線のデータでは補正量がハヤブサの遅延残差と逆センスを示した。これは電離媒質による遅延量の補正が群遅延と位相遅延で逆符号であることに対応し、電離媒質 (電離層及び太陽プラズマ) の影響が示唆された。

今回、基準天体からのフリンジ位相を抽出し、位相接続して位相遅延量を得ることに成功した。これを従来の群遅延量と併せて解析することにより、中性大気に加えて、大気電離層もパラメータとして推定し、ハヤブサの遅延量の補正 (位相 - 位相群遅延校正) を行った。

## 2 基準点体の位相遅延量の抽出

### 2.1 位相遅延量の定義

測地 VLBI など、一般に VLBI の観測遅延量としては群遅延量が使われており、ここで使う位相遅延の定義を明確にしておく必要がある。連続波電波源である基準天体 (クエーサ) の位相遅延量を、ふたつのアンテナ X, Y 局に届く電波の位相差を、周波数の違いを考慮しながら観測帯域幅全に渡って周波数方向に積分した平均位相差として定義する。ある周波数チャンネル  $i$  の電波角周波数  $\omega^{(i)}$  の信号を 2 つの離れたアンテナで観測したときの真の遅延量を  $\tau_{\text{true}}$  とする。簡単のためノイズを無視して信号だけで考え、 $j$  を虚数単位として信号を  $s(t) = S \exp\{-j\omega^{(i)}t\}$  とすると、X 局

の信号は

$$x(t) = s(t) = S \exp\{-j\omega^{(i)}t\} \quad (1)$$

、Y 局の信号は  $\tau_{\text{true}}$  だけ送れて届くので

$$y(t) = s(t - \tau) = s(t) \exp\{j\omega^{(i)}\tau_{\text{true}}\} \quad (2)$$

この信号を受信した VLBI 観測局では、記録が容易なように原子時計に同期した局部発信周波数  $\omega_0^i$  を使って低周波のビデオ帯の信号に周波数変換し記録を行う。ここで添字の  $i$  は周波数チャンネルを区別する添字とする。Y 局の信号について考えると、周波数変換は局部発信器の初期位相  $\phi_y^i$  を含めて  $\exp\{j(\omega_0^i + \phi_y^i)\}$  を掛算することと等価であり、周波数変換された信号は

$$y(t) = s'(t) \exp\{j(\omega^{(i)}\tau_{\text{true}} + \phi_y^i)\}, \quad (3)$$

但し  $s'(t) = s(t)e^{j\omega_0^i t}$ 。予測遅延量  $\tau_{\text{apr}}$  を使ってビデオ帯の信号で遅延追尾 ( $\times \exp\{-j(\omega^{(i)} - \omega_0^i)\tau_{\text{apr}}\}$ ) を行うと

$$y(t + \tau_{\text{apr}}) = s'(t) \exp\{j(\omega^{(i)}\tau_{\text{true}} + \phi_y^i)\} \times \exp\{-j(\omega^{(i)} - \omega_0^i)\tau_{\text{apr}}\}. \quad (4)$$

さらにフリンジストップ [6] を行った信号を  $Y(t)$  と定義すると

$$Y(t) \triangleq y(t + \tau_{\text{apr}}) \times \exp\{-j\omega_0^i \tau_{\text{apr}}\} = s'(t) \exp\{-j(\omega^{(i)}\tau^r + \phi_y^i)\}, \quad (5)$$

但し  $\tau^r \triangleq \tau_{\text{true}} - \tau_{\text{apr}}$  とおいた。VLBI の遅延量解析では X 局を基準局とするので X 局のデータには、遅延追尾などの補正を行わなわない。式 (3) を周波数変換して得られる  $Y(t)$  に対応する  $X(t)$  と  $Y(t)$  の複素共役との積をとり、

$$R_i(t) \triangleq X(t) \times Y(t)^* = S^2 \exp\{-j(\omega^{(i)}\tau^r + \phi_y^i - \phi_x^i)\}, \quad (6)$$

これがある電波周波数  $\omega^{(i)}$  の相互相関係数である。そのチャンネルについて周波数方向の積分を行うと、チャンネルが帯域  $B/2\pi$  をもっていたなら、表式はそのチャンネルの平均周波数である  $\omega_0^i + B/2^1$  を  $\omega^{(i)}$  とおけば、振幅については sinc 関数の項が掛かるだけで位相項はそのまま

$$\phi_{\text{Fringe}}^i = \omega^{(i)}\tau(t)^r + \phi_y^i - \phi_x^i \quad (7)$$

と表される。ここで相関係数を  $A \exp\{-j\phi_{\text{Fringe}}^i\}$  としている。 $\tau(t)^r$  は時間の関数であるが、予測遅延量

<sup>1</sup>帯域 B の矩形バンドを仮定

$\tau_{\text{apr}}$  の精度がよければゆっくりと変化するので、時間の一次項を最小2乗法やFFTを使って推定することができる。基準となるエポック  $t_{\text{ref}}$  から位相変化を  $\exp\{j(\omega_0^i)(t - t_{\text{ref}})\}\tau_{\text{rate}}$  を掛けて補正し、位相変化を止めて各チャンネルのデータを時間方向に足しあわせる。

群遅延量は周波数方向の位相勾配で定義される ( $\tau_g \triangleq \partial\phi/\partial\omega$ )。バンド幅合成では、位相校正信号 (PCAL) の位相 ( $\phi_{\text{pcal},y}^i - \phi_{\text{pcal},x}^i$ ) を使ってチャンネルごとの局部発信器位相の違いを修正し、周波数方向の位相勾配を推定する。こうして得られた群遅延量残差を  $\Delta\tau_{\text{BWS}}$  とすると、式 (6) に  $\exp\{j\omega_0^i\Delta\tau_{\text{BWS}}\}$  を掛けて群遅延残差  $\Delta\tau_{\text{BWS}}$  の位相勾配を補正する。これによりチャンネルごとの相関係数 式 (6) の位相の値はほとんど同一になり、周波数方向への複素相関係数の和をとることで SNR も改善される。こうして得られたバンド幅合成と、群遅延の位相勾配補正後のフリッジ位相は、なお遅延残差  $\delta\tau_{\text{rsd}}$  が残っているとすると以下のように表される。

$$\begin{aligned} \phi_{\text{fringe}} &= \langle \omega \rangle \delta\tau_{\text{rsd}} + \delta\phi^i \\ \tau_{\text{rsd}} &= \langle \tau_{\text{true}} - \tau_{\text{apr}} - \Delta\tau_{\text{BWS}} - \tau_{\text{rate}}^1(t - t_{\text{ref}}) \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

と表される。 $\langle \omega \rangle$  は観測した全帯域の平均電波角周波数であり、 $\langle \rangle$  は平均を示す。バンド幅合成で得られる群遅延量はエポック  $t_{\text{ref}}$  において

$$\tau_{\text{grp}} \triangleq \tau_{\text{apr}} + \Delta\tau_{\text{BWS}} \quad (9)$$

であり、位相遅延量を  $t_{\text{ref}}$  において

$$\tau_{\text{phs}} \triangleq \frac{\phi_{\text{fringe}} + 2\pi n}{\omega_0} + \tau_{\text{grp}} \quad (10)$$

で定義する。 $n$  は整数である。これは式 (8) から

$$\tau_{\text{phs}} = \frac{\sum_{i=0}^n \tau_{\text{true}}^i \omega^{(i)}}{\sum_{j=1}^n \omega^{(j)}} + \frac{2\pi n + \delta\phi}{\langle \omega \rangle} \quad (11)$$

となり、真の遅延の周波数方向の平均値に位相の不定性 ( $\frac{2\pi n}{\omega_0}$ ) とその他装置などに起因する位相残さ  $\delta\phi$  を加えたものであることがわかる。ここで真の遅延量は、幾何学的遅延以外に、大気、電離媒質の伝搬遅延を含み、周波数に依存した量であることに注意する。不定性の単位は観測周波数の逆数で 8.4GHz で約 120 ピコ秒であり、 $\delta\phi$  が観測中ほぼ定数とでき、整数  $n$  を確定できるならば、位相遅延量はオフセットをのぞいて、真の遅延量の良い観測量となる。

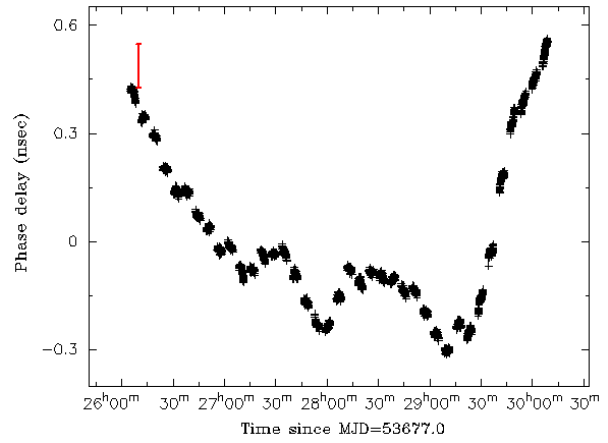


図1: 位相接続作業の例。位相遅延量からあらかじめ、できるだけ正確な予測遅延量を差し引いておき、位相接続のアンビギュイティの同定が容易なようにする。位相接続は、アンビギュイティ編集用のソフトウェアを使ってデータを見ながら行われる。左上に描かれている赤いバーはアンビギュイティの大きさである。

## 2.2 フリッジ位相の接続

実際に整数値  $n$  を決定することは難しいが、Scan と Scan の間の位相を接続して、観測全体でひとつのオフセットとすることで、位相遅延量が利用可能になる。図1に位相接続作業の例を示す。位相接続作業は現在のところ基本的にオペレータの手作業で行われており、自動化ソフトも開発されているが、最終的な確認は人の目で行っている。位相接続が可能かどうかは、Scan の間隔と基線長及び、得られたデータの SNR に大きく依存する。今回、6分間周期のスキャンでは国内基線ならクエーサの位相遅延量を観測量として使用するための条件である位相接続が可能であることが実証された。

このようにして得られた接続されたフリッジ位相を、平均観測周波数を使って遅延量に変換し、あらかじめ差し引いた予測遅延量と処理の過程で補正した遅延量を加えることで連続波電波源の位相遅延量が得られる。

## 3 相対 VLBI による遅延補正

相対 VLBI の遅延補正の基本的アルゴリズムについては昨年 の第 50 回宇科連に発表した集録原稿に詳しく述べているのでここでは割愛する。基本的に、大気 の天頂遅延量には連続折れ線関数を使用しクロックは一次までの時間項でモデル化する ([5])。

今回、群遅延量に加えて、位相遅延量が利用可能に

なり、遅延の精度とデータ点数、時間分解能の点で大幅に改善されると期待された。位相遅延量については、Scan 間の位相接続が成功しても全体の固定オフセット値としては不定なので、群遅延量のクロックオフセットと別に、位相遅延量についてもオフセット量を別に推定する。また、電離層の遅延量をモデル化するため電離層のマッピング関数 [7]

$$fm_{\text{ion}}(El, H) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H} \cos El\right)^2}} \quad (12)$$

を使って、天頂方向の電離層の厚さを  $\tau_{\text{ion},x}, \tau_{\text{ion},y}$  として、大気同様、連続折れ線関数でモデル化する。ここで  $R, H$  はそれぞれ地球の半径、観測地点の高さを km で表すしたもの、 $El$  は仰角である。観測データとしては、群遅延量、位相遅延量及び、各パラメータの束縛条件をあたえる。群遅延量の観測方程式は、以下のようなものになる。

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{\text{grp}} &= \tau_{\text{clk,grp}} + \dot{\tau}_{\text{clk}}(t - t_0) \\ &- \left[ \tau_{\text{atm},x}^{(0)} + \tau_{\text{atm},x}^{(n)}(t - t_{n-1}) + \sum_{i=0}^{n-1} \dot{\tau}_{\text{atm},x}^{(i)}(t_i - t_{i-1}) \right] \\ &\quad \times fm_{\text{atm}}(El_x) \\ &+ \left[ \tau_{\text{atm},y}^{(0)} + \tau_{\text{atm},y}^{(n)}(t - t_{n-1}) + \sum_{i=0}^{n-1} \dot{\tau}_{\text{atm},y}^{(i)}(t_i - t_{i-1}) \right] \\ &\quad \times fm_{\text{atm}}(El_y) \\ &(-/+ ) \left[ \tau_{\text{ion},x}^{(0)} + \tau_{\text{ion},x}^{(n)}(t - t_{n-1}) + \sum_{i=0}^{n-1} \dot{\tau}_{\text{ion},x}^{(i)}(t_i - t_{i-1}) \right] \\ &\quad \times fm_{\text{ion}}(El_x) \\ &(+/ - ) \left[ \tau_{\text{ion},y}^{(0)} + \tau_{\text{ion},y}^{(n)}(t - t_{n-1}) + \sum_{i=0}^{n-1} \dot{\tau}_{\text{ion},y}^{(i)}(t_i - t_{i-1}) \right] \\ &\quad \times fm_{\text{ion}}(El_y) \quad (13) \end{aligned}$$

位相遅延量については  $\tau_{\text{clk,grp}}$  を  $\tau_{\text{clk,phs}}$  という別のパラメータで置き、電離層の位相遅延量の符号 (-/+ ) を逆にする。

このような方程式で、大気、電離層、クロックのパラメータを推定し、ハヤブサの観測位相遅延量から差し引いた結果を図2に示す。パラメータフィッティングの入力データとしては、あらかじめ幾何学的遅延量と地上の気象データから予測される中性大気遅延量を差し引いた残差を入力した。群遅延を使った相対 VLBI 補正に見られてた逆センスの補正量が改善されているのがわかる。これは、位相遅延量を新たな観測量として加えることにより、電離層遅延量を新たにモデルに加えることができたためである。図では、最低仰

角(両局の仰角の小さい方)の大きさをカラーマップで示しており、上記の特性は大気の通過パスが大きくなる低仰角で起きていることもわかる。

位相遅延量を加えたの電離層のモデル化により、父島などの電離層の影響が大きい観測点は補正量が多少改善されたが、トータルで見ると位相遅延量の高い時間分解能と遅延計測精度から期待された程の劇的な改善は見られなかった。この原因の可能性のひとつとしては、電離層と中性大気のパラメータ間の相関が考えられる。両局の仰角が同じになるころに両局の天頂遅延量(大気、電離層)のカップリングが大きくなることが確認されており、パラメータ間のカップリングを少なくするため、大きく異なる仰角の観測や、基線長または方角の異なる3つ以上の局を同時に解析することによりパラメータの分離性をよくする必要がある。また、今回のハヤブサの観測では太陽からの離角が5度という非常に太陽近傍を観測していたため、太陽プラズマの影響による遅延もかなり大きく寄与していた可能性がある。今回のモデル化では、電離媒質として電離層しか考慮していない。今後、2周波観測による相対 VLBI を行い、電離媒質のより精密なモデル化などを行っていく必要がある。

## 4 まとめ

2005年11月にハヤブサが小惑星 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。参照電波源の観測量として従来の群遅延量に加えて、位相遅延量の利用が可能になり、6分間サイクルの相対 VLBI 観測で位相接続が可能であることを実証した。参照電波源の群遅延量/位相遅延量を併用(位相一群位相遅延校正)した結果、電離層をモデルパラメータとして加えることができ、電離層電子密度の高い父島を含む基線で群遅延量だけを使った(位相一群遅延校正)場合にみられた逆センスの遅延補正が改善された。しかし、位相遅延量の時間分解能と観測精度から期待される程の劇的な改善は見られなかった。原因として、中性大気や電離媒質のパラメータ間カップリングと、太陽プラズマの影響が考えられる。今後、S/X2周波観測によるモデルの精密化、精度向上を図っていきたい。

## 5 謝辞

ハヤブサの相対 VLBI 観測には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、久保木氏に協力していただいた。ここに感謝する。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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), “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集録 3G14, pp.1910-1915, 2006.
- [6] 高橋富士信、近藤哲朗、高橋幸雄, “VLBI 技術” オーム社 ISBN4-274-07852-3, pp.81-84, 1997.
- [7] , M.Sekido, T.Kondo, E. Kawai, “Evaluation of GPS-based ionospheric TEC map by comparison with VLBI data”, *Radio Science*, Vol.38, pp.1069-90, 2003.

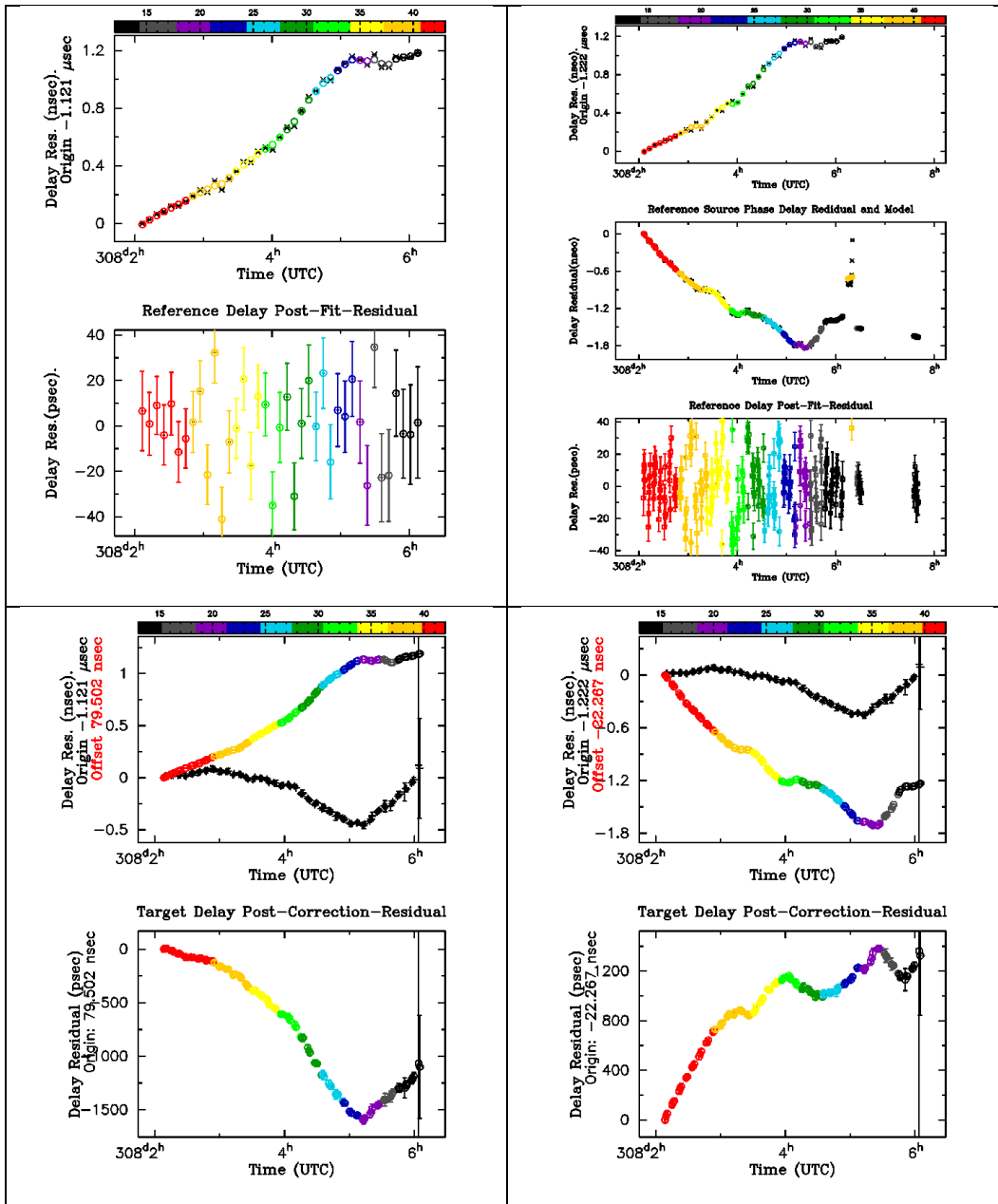


図 2: 相対 VLBI 法の適用結果例 (つくば-父島基線 2005/11/4). 上の段の図は、基準電波源の遅延量 (O-C) へのモデルフィッティング結果であり、下の段は推定で得たパラメータをハヤブサの遅延量 (O-C) への適用した結果を示す。ここで O は観測量 C は幾何学的遅延量と地上の気象データから予測される中性大気の遅延量の計算値である。左側の列は基準電波源のデータとして群遅延量だけを用いた場合 (昨年の報告)、右側の列は群遅延量と位相遅延量を併用してパラメータ推定を行い、ハヤブサの遅延量に適用した例である。角欄のパネルは右上段の欄を除き、上側のパネルが遅延残差とパラメータフィットの結果、下側にその差分 (Post fit residual) を示している。右上段の欄の上のパネルは群遅延量、真ん中の図は位相遅延量の O-C とそれへのモデルフィット結果であり、一番下に post-fit 残差を群遅延、位相遅延あわせてプロットしている。仰角 (両局の仰角の小さい方の値) をカラーマップで表示しており、赤い色は高い仰角、暗い色は低い仰角を示す。父島を含む基線では、群遅延を使った補正 (位相 - 群遅延校正: 左側の列) ではハヤブサの遅延残差と補正量が逆傾向を示し、補正後に残差が大きくなる現象があったが、位相遅延量を加えて補正することにより、逆センスの傾向は見られなくなり、補正量が改善されている。