

DORR および DOPPLER を用いた月周回衛星 SMART-1 の軌道決定

菊池 冬彦^{*1}, 劉 慶会^{*1}, Sander Goossens^{*1}, 松本 晃治^{*1},
花田 英夫^{*1}, 河野 宣之^{*1}, 岩田 隆浩^{*2},
RSAT/VRAD ミッショングループ^{*1}, 上海天文台^{*3},
ウルムチ天文台^{*4}, 水沢 VERA 観測所^{*5}

Orbit Determination of Lunar Orbiter SMART-1 by using DORR and Doppler

By

Fuyuhiko KIKUCHI^{*1}, Qinghui LIU^{*1}, Sander GOOSSENS^{*1}, Koji MATSUMOTO^{*1},
Hideo HANADA^{*1}, Nobuyuki KAWANO^{*1}, Takahiro IWATA^{*2},
RSAT/VRAD mission group^{*1}, SHANGHAI Astronomical Observatory^{*3},
URUMQI Astronomical Observatory^{*4} and Mizusawa VERA Observatory^{*5}

Abstract: In order to estimate the lunar gravity field accurately than previous result for more than one order of magnitude, the precise orbit determination (OD) by combining the Doppler and VLBI will be carried out in RSAT and VRAD mission in SELENE. In order to reveal the contribution of VLBI for OD, the VLBI observations of ESA's lunar orbiter SMART-1 were carried out. The OD was carried out by using Doppler, DOR (Differential One way Range), and its combination. As a result of the overlap analysis, it was shown that the error of the along- and cross-track components of the orbit elements were appreciably reduced by combining the Doppler and DOR. Though the baseline and observation period of VLBI observation were insufficiency, the result represents a contribution of VLBI for OD.

Keywords: Orbit determination, Doppler, VLBI, DOR, VRAD, RSAT, SELENE, Moon

概 要

2007 年度に打ち上げが予定されている月探査機 SELENE の VRAD ミッションでは、月周回 2 衛星の位置を相対 VLBI 観測により数 10 cm の精度で決定し、RSAT ミッションにて行われる 2 way & 4-way ドップラ観測と合わせた軌道解析により、従来の精度を一桁以上上回る高精度月重力場推定を行い、月内部構造の解明を目標としている。今回、VRAD ミッションの予備実験として、ESA の月探査機 SMART-1 の VLBI 観測を行った。VLBI 観測には VRAD 用観測システム、解析ソフトウェアを使用し、ドップラと DOR (Differential One way Range) という 2 種の独立な観測量を用いた軌道推定を行い推定結果の比較を行った。オーバーラップ解

* 1 RISE project office, National Astronomical Observatory of Japan
* 2 Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)/JAXA
* 3 SHANGHAI Astronomical Observatory
* 4 URUMQI Astronomical Observatory
* 5 Mizusawa VERA Observatory, National Astronomical Observatory of Japan

析による軌道推定精度の評価の結果、ドップラと DOR を観測量とした場合、ドップラのみで軌道決定を行った場合に比べて along track, cross track 方向の位置決定誤差に 5 倍から 10 倍の改善が見られ、軌道決定における VLBI 観測の重要性を示した。

1. は じ め に

VLBI による衛星の軌道決定はこれまで JPL/NASA のグループを中心に行われており [7]、我国でも JAXA, NICT, 国立天文台を中心にその本格的な導入が進められている。従来のレンジ & ドップラ観測では、観測量が地上局から見た衛星の方向である視線方向にのみ感度をもつため、視線垂直方向成分に関して軌道決定精度の明らかな低下が見られた。一方、VLBI では電波源からの信号を離れた 2 局で同時に受信し、その到達距離差 (DOR : Differential One way Range) を観測量とするため、レンジ & ドップラ観測では感度のなかった視線垂直方向に感度をもつ。したがって、両者を組み合わせることにより感度の相互補完が可能となり、高精度な軌道推定が可能となる。

SELENE/VRAD ミッション [3] では、月周回の 2 機の小型衛星を同時 (または交互) に観測し、主要な誤差要因である大気遅延、電離層遅延、クロックオフセット、局内遅延等の誤差要因を相殺する同一ビーム VLBI (またはスイッチング VLBI) 観測を行う [2]。さらに精度向上のため従来の群遅延方式ではなく、世界初の多周波数 VLBI 法による位相遅延方式 [5] を採用し、月近傍での 2 衛星間の相対位置を 20 cm の精度で決定する。同一ビーム VLBI 観測とともに、2 機の小型衛星それぞれについて従来の 2-way ドップラ観測を行うことにより、数 10 cm オーダーでの位置決定精度の実現が期待できる。SELENE 主衛星に関しては、月表側では 2-way ドップラ、月裏側ではリレー衛星を介した 4-way ドップラ観測を行い (RSAT ミッション [4])、 1σ 1 km の精度での軌道推定を行う。これら 2 機の小型衛星と主衛星の高精度軌道推定を行うことにより、現在、世界最高精度の月重力場モデルを一桁以上上回る月重力場モデルの作成が可能となる [6]。

一方、SELENE 主衛星の位置情報は、LALT ミッション [1] の測距データの絶対値校正などを行うために重要である。しかしながら、その要求精度はおおよそ 100 m であり、現状の 2-way & 4-way ドップラ観測のみでは要求精度の実現が困難である。現在、RSAT / VRAD ミッションではドップラと VLBI による主衛星の高精度位置決定の可能性を検討しており、VLBI による宇宙飛翔体の位置決定技術の習得とその有効性を検証するための予備実験として、ESA の月探査機 SMART-1 の VLBI 観測実験を行った。ドップラデータに関しては ESA の Trevor Morley 氏からの提供を受け、RSAT / VRAD ミッションで使用する軌道解析プログラム GEODYN II を使用した、ドップラおよび DOR を観測量とする軌道推定を行った。本論文では観測システム、解析ソフトウェアの概要とともに、ドップラデータの提供のあった 5 月 30 日の初期解析結果について報告する。

2. 月周回衛星 SMART-1 の VLBI 観測試験

2.1 目的

本観測の目的は、ドップラと VLBI の観測量である DOR という互いに独立な 2 種の観測量を用いて軌道推定結果の比較を行い、VLBI 観測の有効性を検証することである。また、本観測は 2007 年度に迫った SELENE / VRAD ミッションの最終的な予備試験観測の意味合いも兼ねており、VRAD 地上局の整備や解析ソフトの評価も同時に行った。また、今回の試験観測では、観測時間や軌道半径などの制限のため、SMART-1 の軌道推定結果のみから月重力場を推定することは困難であったが、SELENE やこれまでの月探査ミッションと併せた総合的な解析を行う際、月重力場推定に有効なデータとなることが期待される。

2.2 観測の概要

2006 年 9 月 3 日の月面衝突までの間に、5 月 30 日、8 月 3 日、4 日、22 日、30 日の計 5 日間の SMART-1 の VLBI 観測実験を行った。観測には VRAD ミッションの定常観測時の国内局となる VERA の水沢局、小笠原局と水沢 10 m 局、1 ヶ月間 × 2 回のキャンペーン観測時の海外局である上海局、ウルムチ局が参加した。5 月 30 日の観測には水沢 10 m 局、上海局が参加した。SMART-1 の月周回軌道は軌道傾斜角 89 度の極楕円軌道であり、近月点は南半球側にある。軌道推定を行った 5 月 30 日の SMART-1 の軌道面の概略図を図 1 に示す。近月点高度は 336 km、遠月点高度は 3024 km であり、軌道面は地球から見た月の方向に対して約 45 度傾いている。

SMART-1 から送信される信号は大別して S 帯信号 (搬送波 1 波のみ) と、KaTE と呼ばれる TT & C 用の通信機器から送信される X 帯信号 (搬送波と周波数がそれぞれ 2 MHz と 16 MHz 離れたトーン信号) で構成される。運用上の制約から X

帯信号を受信できたのは8月4日のみであり、その他の観測ではS帯信号1波のみを記録した。また各観測局の時刻基準である原子時計の時刻差（クロックオフセット）や観測機器内遅延などの補正を行うため、位置が既知で、かつ地球から十分遠方にあり不動点とみなすことができる参照電波源 QSO と SMART-1 を交互に観測するスイッチング方式の相対 VLBI 観測を行った。

2.3 VLBI 観測機器および相関処理ソフトウェア

SMART-1 から送信された信号の記録には SELENE / VRAD 用に開発した狭帯域 VLBI システムを使用した。システムの概要を図2に示す。RF帯の信号を2度周波数変換し、カットオフ周波数 90 kHz のローパスフィルターにかけた後、サンプリングレート 200 kbps の記録システム S-RTP にて記録した。SMART-1 から送信された信号は帯域幅がわずか数十 Hz の狭帯域信号であったため、低サンプリングレートの記録システムを用いることにより、データ量の大幅な削減とデータ転送、解析時間の短縮を図ることが可能となった。

VLBI 相関処理には、SELENE / VRAD 用相関処理ソフトウェアを使用した。相関処理ソフトウェアは従来、相関器と呼ばれるハードウェアで行われていた計算を PC 上で実現可能とする。相関処理の内容を図3に示す。相関処理では始めに地球回転パラメータや衛星の軌道予報値を用いて、リファレンス局に対するリモート局の遅延時間の予測値を計算する。この予測値の分だけリモート局の信号を時間軸方向へずらし、2局で記録した信号間の相互相関関数の位相であるフリンジ位相残差（相関位相）を計算する。地球回転の計算精度が十分である場合、軌道予報値が正しければフリンジ位相残差は 0 となる。しかしながら、軌道予報値に誤差が含まれる場合、フリンジ位相残差は相関処理に使用した遅延時間の予測値の誤差すなわち軌道予報値の誤差を表す。

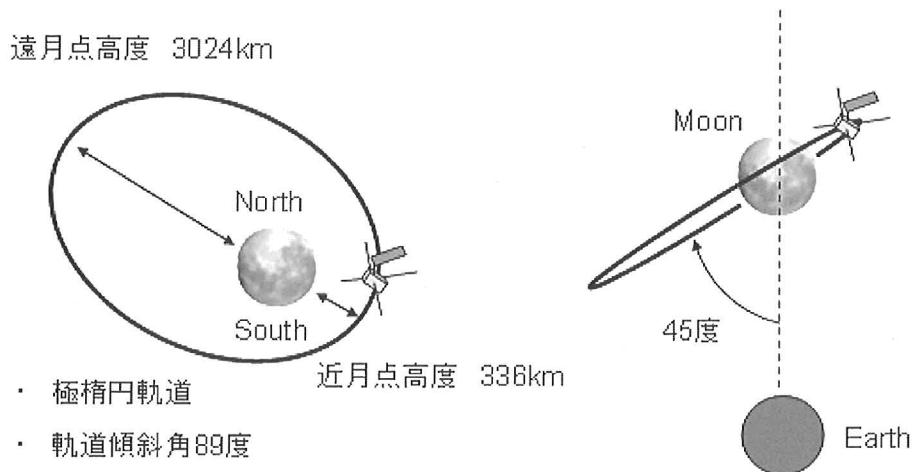


図1 5月30日のVLBI観測時における月周回衛星 SMART-1 の軌道面

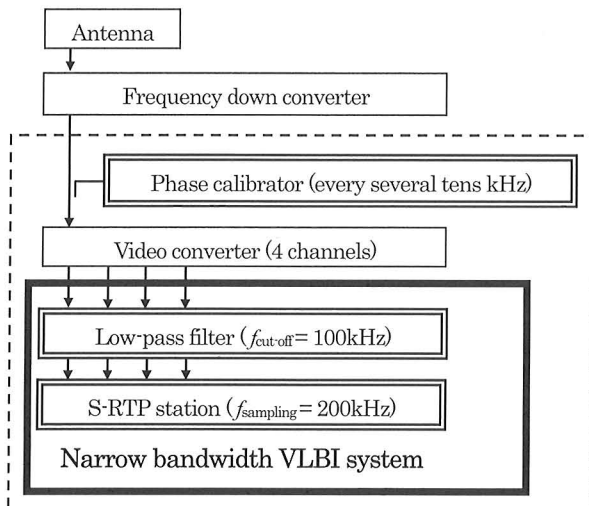


図2 VRAD 用狭帯域 VLBI システムの概要

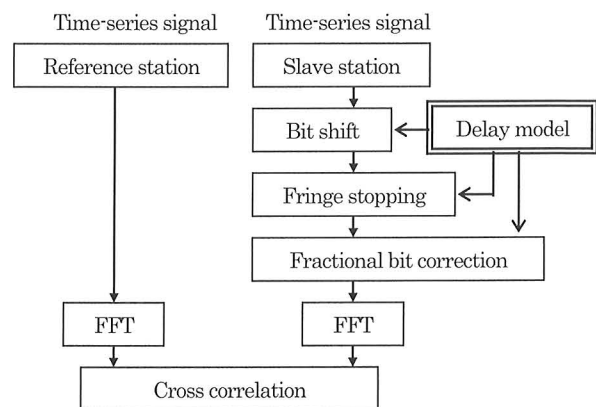


図3 相関処理内容の概要

2.4 相関処理結果

相関処理の結果得られるフリッジ位相残差 $\Delta\phi$, 遅延時間 $\Delta\tau$, DOR は以下の関係式で表される.

$$DOR = c \cdot \Delta\tau = \frac{\Delta\phi + 2\pi \cdot n}{2\pi f_{RF}} \quad \dots (1)$$

ここで, c は光速, f_{RF} は信号の周波数, n は任意の整数を表す. 図4に相関処理の結果得られた遅延時間残差を示す. 遅延時間残差に光速を掛けたものが DOR となる. 図中, プロットが欠けている区間は参照電波源である QSO の観測期間に対応する. 相関処理の結果, 得られるフリッジ位相残差は 0 から 2π に限られるため, (1) 式中, $2\pi n$ で表される不確定 (アンビグイティ) が存在する. アンビグイティの推定方法には, 周波数の異なる複数の信号, あるいは周波数帯域の広い信号を用いて, フリッジ位相残差の周波数微分からアンビグイティ差を推定する群遅延方式がある. また, VRAD ミッションのように, アンビグイティの推定のために最適化された周波数配列を持つ信号の組み合わせを用いる多周波数 VLBI 法による位相遅延方式がある. SMART-1 の場合, 送信される信号が搬送波 1 波のみであったためどちらの手法も適応外であり, アンビグイティの残る位相遅延を使用せざるを得ない. そのため VLBI の観測量である DOR には $0.136 \times n[m]$ (n は整数) のバイアスが含まれる. このバイアスは軌道推定の際にパラメータとして推定する.

2.5 軌道推定

軌道推定には, SELENE / RSAT / VRAD ミッションで使用する軌道解析プログラム GEODYN II [6] を使用した. 今回の解析では軌道推定における VLBI 観測の寄与を調べるため, 軌道推定に用いる観測量は①ドップラのみ, ②DOR のみ, ③ドップラ + DOR の3つのケースを検討した. 軌道推定結果の評価はオーバーラップ解析により行った. オーバーラップ解析では, 3時間の観測期間を前半2時間, 後半2時間に分割してそれぞれ軌道推定を行い, 1時間のオーバーラップ区間での各推定パラメータの差を計算し, その RMS から軌道決定精度を評価した. 軌道解析における推定パラメータは, 衛星の位置および速度ベクトル, 太陽輻射圧, 加速度, 観測量のバイアスおよびレートバイアスとした. その他, 月重力場モデルは LP 150 Q を使用した. SMART-1 は遠月点高度の高い長楕円軌道をとるため, 月重力場モデルの 40 次項までを考慮した. DOR およびドップラの積分時間はそれぞれ 1 秒および 10 秒とし, 重み付けは経験的な数値としてそれぞれ 10 m, 2.1 cm/s とした.

図5に, ドップラのみを観測量とした場合とドップラ + DOR を観測量とした場合の軌道推定後のドップラの残差を示す. 両者を比較すると, 特に 11 時以降の結果について, ドップラのみを用いた場合に見られる長周期のトレンドが, DOR を併せた解析では取り除かれていることがわかる. これは, 視線方向にのみ感度を持つドップラでは推定できなかった軌道誤差を DOR データが補完した結果であると考えられる. ドップラと DOR を観測量とした場合, ドップラの残差の RMS は 0.21 mm/s であった.

図6は DOR のみを観測量とした場合とドップラ + DOR を観測量とした場合の軌道推定後の DOR の残差を示す. DOR のみを観測量とした場合, DOR の残差の RMS は 0.86 cm であり, ドップラ + DOR を観測量とした場合, RMS は 7.52 cm であった. ここで, DOR のみを観測量とした場合では軌道予報値と推定軌道の差が十数 km と軌道予報値の精度と比べて大き

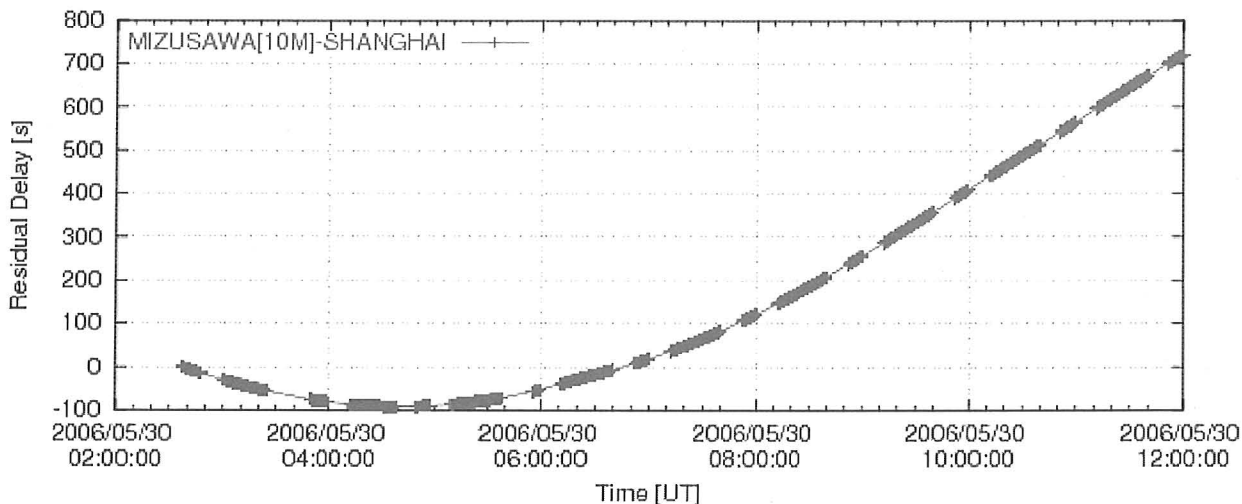


図4 相関処理により推定された遅延時間残差

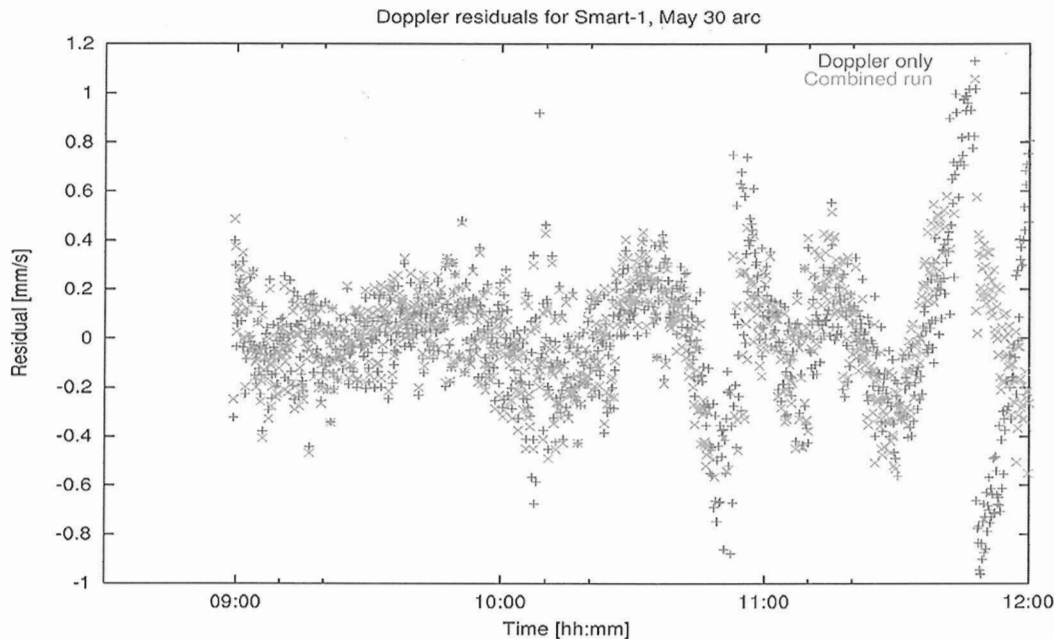


図5 軌道推定後のドップラの残差．軌道推定にドップラのみを用いた場合とドップラおよびDORを用いた場合．

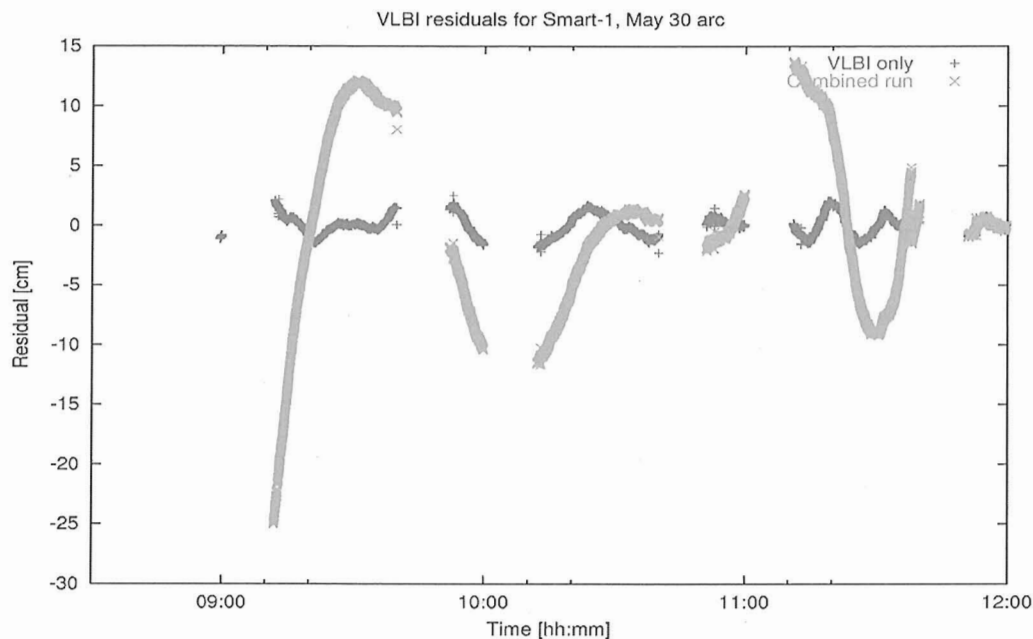


図6 軌道推定後のDORの残差．軌道推定にDORのみを用いた場合とドップラおよびDORを用いた場合．

いため軌道は正しく収束していないものと考えられる．その原因としては、軌道周期が5時間であるのに対して観測期間がわずか3時間であったことに加え、1基線のみのVLBI観測であったことや、観測量に大きなバイアスが乗っていたことが挙げられる．そのため、軌道要素を含む複数のパラメータを同時推定することができず、DORのRMSを最小とするような軌道の極小値に収束したものと考えられる．ドップラ+DORを観測量とした場合では、推定軌道は軌道予報値の誤差の範囲内で収束しているが、DORの残差には数十cmの変動が見られる．DORの変動の要因としては熱雑音、大気遅延変動、電離層遅延変動等が考えられる．しかし、この中で振幅の最も大きな大気変動であってもDORに換算するとS帯ではおよそ数cm程度であり、DORの残差の変動の要因としては考えられない．その他の要因としては軌道推定に用いた加速度モデルの誤りが考えられる．今回の軌道推定ではcprモデルを採用したが、観測期間中に単発的な軌道制御が行われた場合、それを完全に説明することはできず、DORの残差として残ることが予想される．

図7, 図8はオーバーラップ解析の結果得られたドップラおよびDORの残差を示す. DORの残差に関しては図6で示した結果と同様に残差に大きな数十cmの変動が残っており, またオーバーラップ区間においてあまり一致していない. 一方, ドップラに関しては, ドップラとDORを観測量とした場合(図中: combined), オーバーラップ区間において残差が良く一致している. この結果から, DOR自体の観測精度は良くないが, ドップラの感度が弱い部分に補完的に作用したことで推定軌道が誤差の範囲内で収束したものと考えられる.

表1は推定された衛星の位置パラメータのオーバーラップ区間における差のRMSを示す. ドップラのみを観測量とした場合, radial成分のRMSが159mであるのに対して, along track, cross track方向成分のRMSがそれぞれ4556m, 2880mと一桁以上大きい. DORのみを観測量とした場合では, 各パラメータでRMSが十数から数十kmと非常に大きく, 軌道推定結果の信頼度は低い. 一方, ドップラとDORを観測量とした場合, radial方向はドップラのみの場合とほぼ同程度だが,

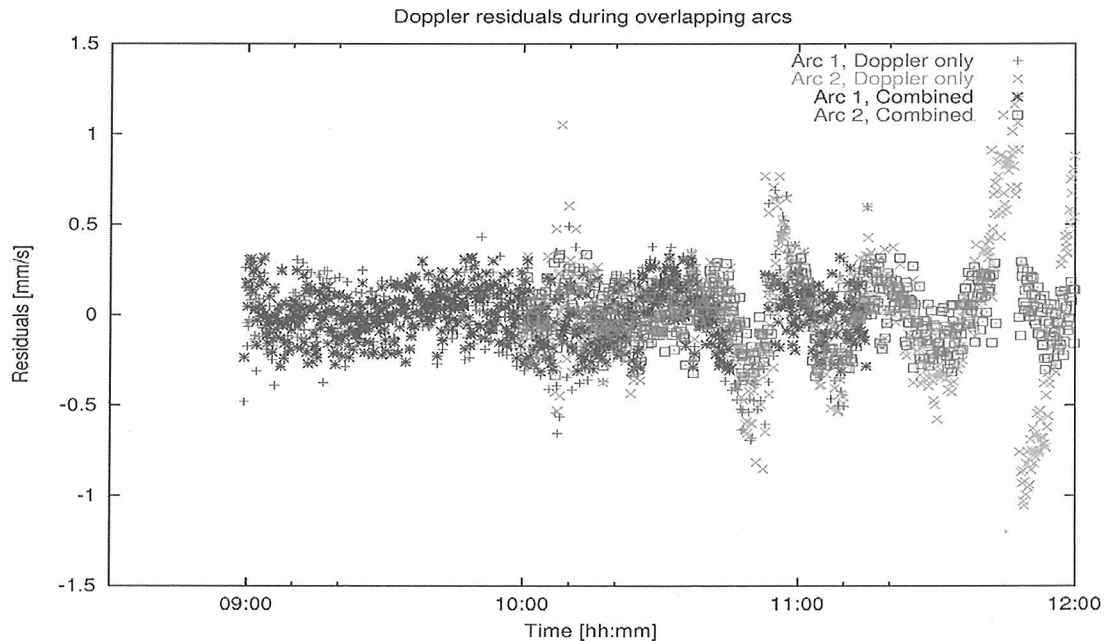


図7 軌道推定後のドップラの残差. 軌道推定にドップラのみを用いた場合とドップラおよびDORを用いた場合.

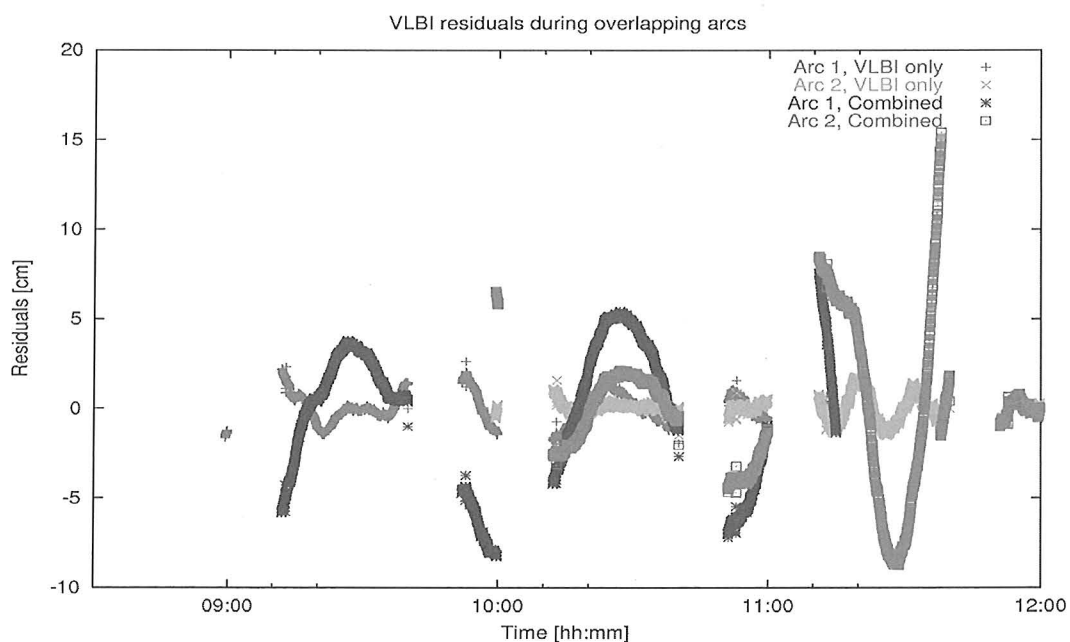


図8 軌道推定後のDORの残差. 軌道推定にDORのみを用いた場合とドップラおよびDORを用いた場合.

表1 オーバーラップ区間において推定された各軌道要素の差のRMS

Data	Radial (m)	Along (m)	Cross (m)
Doppler Only	159.56	4556.54	2880.67
DOR Only	14894.5	14772.9	50610.2
Combined	220.52	578.85	561.60

along track, cross track 方向のRMSに大きな改善が見られ, along track 成分については約1桁, cross track 成分については5分の1にRMSが減少している. この結果から, DOR 単独での軌道推定は困難であったが, ドップラに感度のない衛星の視線垂直方向への運動に感度を持つDORをドップラに対して補完的に用いることで, 軌道推定精度が改善されたものと考えられる.

3. 考察

SELENE 主衛星の場合, SMART-1と同様に1波のみの信号を送信するが, 帯域幅が10 MHzあるため, その範囲内での群遅延と, SMART-1と同様なアンビギュイティありの位相遅延の2種の観測量が軌道推定に使用できる. 主衛星の送信信号はX帯であるため, フリンジ位相残差の主要な誤差要因は大気変動である. フリンジ位相残差の変動量は大気の状態に大きく依存するが, およそ10度から40度である. 群遅延方式の場合, 位相誤差 σ_ϕ を40度, 周波数帯域幅 f_B を10 MHzとすると, 下記の関係式により, DORの推定誤差 σ_{DOR} は約3 mとなる.

$$\sigma_{DOR} = \frac{\sigma_\phi}{2\pi f_B}$$

VERA局を想定し, 基線長を2000 km, 月-地球間距離を36万 kmとすると, 月近傍での衛星位置への感度は600 mとなり, 目標とする主衛星の位置決定精度100 mに比べ大きい. 一方, SMART-1と同様なアンビギュイティの残る位相遅延方式の場合, 位相誤差を40度, 信号周波数 f を8468 [MHz]とするとDORの推定誤差は下記の関係式により約4 mmとなり, 月近傍での衛星位置への感度は0.75 mとなる. ただし, バイアス値を軌道解析時に推定する必要がある.

$$\sigma_{DOR} = \frac{\sigma_\phi}{2\pi f}$$

DORの推定誤差に着目すると, 主衛星の位置決定には位相遅延方式が有効であると考えられるが, アンビギュイティの取り扱いに注意しなければならない. ここで, SMART-1の軌道解析ではバイアス値がある位相遅延方式の場合, 観測条件が不十分であったにも関わらず, オーバーラップ解析の結果, 衛星位置の推定誤差は約200 mから500 mであった. この結果から主衛星の位相遅延方式の場合, 基線数や観測時間を揃えることで100 m以下での位置決定の可能性はある. 今回のSMART-1の軌道解析の結果のみからは最終的な主衛星の位置決定精度を評価することはできないが, 未解析の8月22日, 30日の観測では, 多基線で10時間以上の長時間観測を行っており, 今後はその解析結果を用いてより詳細な検討を行う.

4. まとめと今後の課題

SELENE / VRAD ミッションの最終的な予備観測として月周回衛星SMART-1のVLBI観測を行った. VLBI観測にはVRAD用観測システム, 解析ソフトウェアを使用し, ドップラとDORという2種の独立な観測量を用いた軌道推定を行い推定結果の比較を行った. オーバーラップ解析による軌道推定精度の評価の結果, ドップラとDORを観測量とした場合, ドップラのみで軌道決定を行った場合に比べてalong track, cross track 方向の位置決定誤差に5倍から10倍の改善が見られ, 軌道決定におけるVLBI観測の重要性の一端を示した. しかしながら, 今回の予備観測ではVLBI観測が1基線のみだったことや, 観測時間が軌道周期の3/5であったことから軌道推定後のDORの残差に数十cmの大きな変動が見られた. 今後の課題としては, より良い条件の下での同様の解析が必要であることから, 未解析分の8月のVLBI観測結果を用いて軌道解析を行う. 8月22日の観測では, 軌道面が視線方向に対して90度となるface-on時に10時間以上のVLBI観測を行って

おり、データ量としては十分な解析が期待できる。また、8月30日の観測では、軌道面が視線方向と平行となる edge-on 時に10時間以上の観測を行っている。ドップラでは視線方向の衛星の位置変化に感度を持ち、VLBIでは視線垂直方向への位置変化に感度を持つため、face-on 時と edge-on 時の軌道推定結果の比較は、各観測量の寄与の評価に最適である。

参 考 文 献

- [1] Araki, H., M. Ooe, T. Tsubokawa, N. Kawano, H. Hanada, and K. Heki, “Lunar Laser Altimetry in the SELENE Project”, *Adv. Space Res.*, 23, No.11, 1813-1816, 1999.
- [2] Fuyuhiko KIKUCHI, “Differential Phase Delay Estimation by Same Beam VLBI Method”, Doctor thesis, 2006
- [3] Hanada, H., T. Iwata, Y. Kono, and K. Matsumoto, “VRAD Mission: Precise Observation of Orbits of Sub-satellites in SELENE”, *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, 73-76, 2002.
- [4] Iwata, T., M. Takahashi, N. Namiki, H. Hanada, N. Kawano, K. Heki, K. Matsumoto, and T. Takano, “Mission Instruments for Lunar Gravity Measurements using SELENE sub-satellites”, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 47, No. 1, 558-563, 2001.
- [5] Kono, Y., H. Hanada, J. S. Ping, Y. Koyama, Y. Fukuzaki, and N. Kawano, “Precise positioning of spacecrafts by multi-frequency VLBI”, *Earth Planets Space*, 55, 581-589, 2003.
- [6] Matsumoto, K., K. Heki, and H. Hanada, “Global Lunar Gravity Field Recovery from SELENE”, *IVS 2002 General Meeting Proceedings*, 381-385, 2002.
- [7] Thornton, C. L. and J. S. Border, “Radiometric Tracking Techniques for Deep Space Navigation, JPL Deep Space Communication and Navigation Series”, Edited by J. H. Yuen, 85 pp, Wiley and Sons Inc., US, 2003.