

SELENE の 3 機の月周回衛星を用いた軌道決定による 月重力場観測システム

岩 田 隆 浩^{*1}, 並 木 則 行^{*2},

花 田 英 夫^{*3}, RSAT/VRAD グループ

Lunar Gravity Measurements System by Orbital Determination using Three Lunar Orbiter of SELENE

By

Takahiro IWATA^{*1}, Noriyuki NAMIKI^{*2}, Hideo HANADA^{*3} and RSAT/VRAD Group

Abstract: Global mapping of the lunar gravity field will be conducted by using two small sub-satellites of SELENE: the Relay Satellite (Rstar) and the VLBI Radio Satellite (Vstar). Four-way Doppler measurements toward the SELENE Main Orbiter above the lunar far side will be carried out by the Relay Satellite Transponders (RSAT) on Rstar and the Main Orbiter. Phase-delay differential VLBI observations will be performed for multi-frequency carrier waves emitted from the Differential VLBI Radio Sources (VRAD) on Rstar and Vstar. We have executed proto-flight tests and confirmed that instruments and the ground system of RSAT and VRAD have enough performances to improve the accuracy of the lunar gravity field.

Keywords: SELENE, Moon, gravity field, Doppler measurement, small satellite

概 要

SELENE による測月観測のためのリレー衛星中継器 (RSAT) は, リレー衛星 (Rstar) に搭載される RSAT-1 と主衛星に搭載される RSAT-2 から構成され, 主衛星の月の裏側の軌道を Rstar 経由の 4 way ドプラ計測により観測する. RSAT による月裏側の重力場分布の観測と, 相対 VLBI 用電波源 (VRAD) による重力場低次項の精測により, 月重力場モデルの改善を図る.

1. は じ め に

月惑星を周回する宇宙機の軌道は, その天体の重力場構造に起因する摂動を受けることから, 軌道の精測により得られる重力場球面調和関数の展開係数は, 天体の内部構造の解明に寄与する. 従来の月惑星周回機の軌道は, 地球周回衛星と同様に, 2 way (地上局→宇宙機→地上局) の電波の遅延・ドプラシフトを利用した距離・距離変化率計測 (RARR) により計測されてきた. これに対して, 軌道決定に相対 VLBI による測位を導入することは, 宇宙機側のシステムの簡易化が可

* 1 JAXA 宇宙研 (Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)/JAXA)

* 2 九州大学理学部 (Kyushu University)

* 3 国立天文台水沢観測所 (National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ)/NINS)

能になるだけでなく、位置決定精度の改善をもたらすため注目を集めている。

月対地球のスケール、質量比は、他の衛星対惑星系と比較して特異に大きく、その内部構造を調べることは地球-月系の起源の解明にとって重要である。これまで Lunar Prospector に至る軌道観測により、重力場モデル LP 165 P が求められ、地形との比較によるクレータ形成時の物質の集積現象やコアの物理量の推定がなされてきた[9]。ところが月の自転は月-地球系の公転に同期していることから、地球から見た月の裏側の軌道は縁辺部が高度の高い衛星から求められるに過ぎず、重力場観測としての空間分解能は粗く、特に重力場係数の高次側の推定には Kaula[5]の拘束条件が仮定されてきた。また表側の縁辺部も、軌道に対する摂動の方向が視線方向に直交しているため、RARR での測定精度は粗かった。

2007 年度打上げ予定の月周回衛星 SELENE では、測月 (selenodesy) を目的とした 2 機の小型衛星が主衛星から分離される[4]。これら 3 機の月周回衛星を用いた、4 ウェイドブラ計測による月の裏側の軌道決定と、多周波相対 VLBI 観測による軌道の長期変動成分の高精度測定から、月重力場について LP 165 P を凌ぐ高精度かつグローバルな観測を実現する。

2. ミッションの概要

2.1 ミッションプロフィール

図 1 に、SELENE を構成する主衛星、リレー衛星 (Rstar)、VRAD 衛星 (Vstar) のコンフィギュレーションを示す。4 ウェイドブラ計測のためのコヒーレント搬送波の中継を行う「リレー衛星中継器 (RSAT)」は、Rstar と主衛星に搭載されている。また、多周波相対 VLBI 観測のための搬送波の放射を行う「相対 VLBI 用電波源 (VRAD)」は、Rstar と Vstar に搭載されている。

SELENE は H-IIA ロケットによる打上げの後、地球を 2 周半周回するフェージング軌道を経過してから月周回極軌道に投入される。次いで、まず Rstar が主衛星から分離して、高度 2,400–100 km (軌道長半径：約 3,000 km) の楕円軌道に投入される。続いて、Vstar が高度 800–100 km (軌道長半径：約 2,200 km) の楕円軌道に投入される。この後、主衛星は高度 100 km の円軌道に移動し、約 1 年間の観測ミッションを行う。主衛星の軌道は約 2 ヶ月毎の軌道制御マニューバにより 100 ± 30 km に維持されるが、小型衛星 Rstar/Vstar は軌道制御が行われないため、月重力場分布や地球重力場の摂動を受けて変化する。

2.2 RSAT : リレー衛星中継器

RSAT 及び VRAD によるミッションの概念図を図 2 に示す。図中の符号 (S4~9, X2) で示されている各経路の信号諸元を表 1 に示す。また、これらの観測システムの信号系統概念図を図 3 に示す。RSAT ミッションでは、主衛星が月の裏側を飛行中に、宇宙研臼田局 → Rstar → 主衛星 → Rstar → 臼田局の 4 way の経路で電波の中継を行い、これを臼田局でドブラ計測して主衛星の軌道を決める。なお、これと同時に、臼田局 → Rstar → 臼田局の 2 way の RARR 観測も実施して、Rstar の

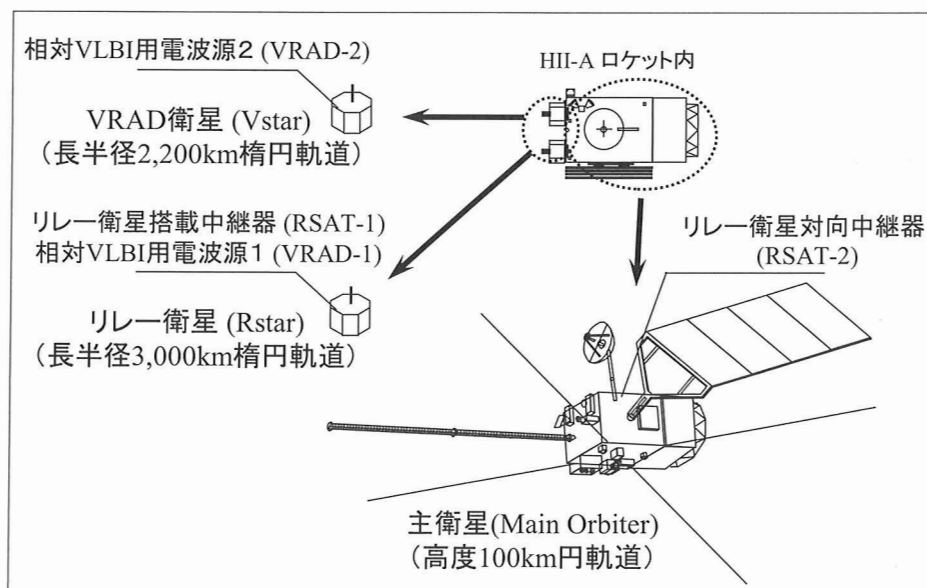


図1 SELENEを構成する3衛星の外観とRISE各機器の搭載位置

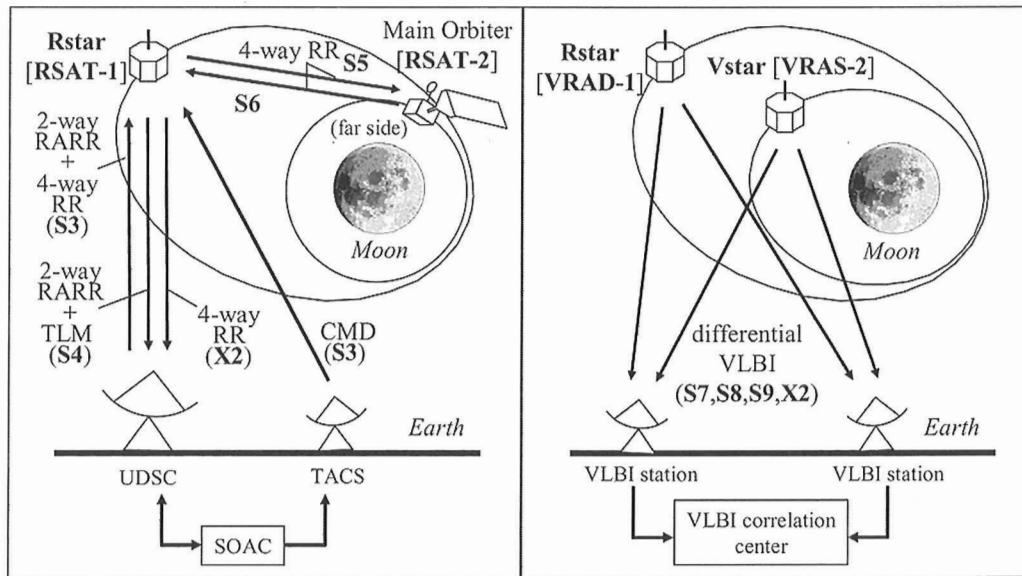


図2 SELENEによる月重力場観測ミッションの概念図
左図：RSATによる4ウェイドプラ計測，右図：VRADによる多周波相対VLBI観測

表1 RSAT/VRAD ミッションの信号諸元

符号	周波数 [MHz]	経路 *	loop-band 幅 (2BL) [Hz]	内容 *
S3	2081.466	UDSC to Rstar/Vstar	1,000	CMD, RNG, RR
		GN to Rstar/Vstar	1,000	CMD
S4	2260.416	Rstar/Vstar to UDSC	30	TLM, RNG, RR
S5	2241.579	Rstar to MO	100	RR
S6	2051.614	MO to Rstar	-	RR
S7	2212.0	Rstar/Vstar to VLBI	-	VLBI
S8	2218.0	Rstar/Vstar to VLBI	-	VLBI
S9	2287.3125	Rstar/Vstar to VLBI	-	VLBI
X2	8456.125	Rstar to UDSC	100	RR
		Rstar/Vstar to VLBI	-	VLBI

*) UDSC: Usuda Deep Space Center, GN: Ground Network, MO: Main Orbiter,
CMD: command, RNG: ranging, RR: ranging rate, TLM: telemetry,

軌道を決めておく。Rstar での中継にはリレー衛星搭載中継器 (RSAT-1)，主衛星での中継にはリレー衛星対向中継器 (RSAT-2) を用いる。

臼田局の64 m アンテナでは、水素メーザに同期したS帯測距信号をRstar に送信する (符号：S3)。RSAT-1のS帯中継器では、臼田局からのS帯測距信号を捕捉追尾して、2 way で臼田局に折り返す (S4) のと同時に、4 way ドプラ計測のために搬送波を抽出して無変調で主衛星に中継する (S5, フォワード信号)。RSAT-2では、フォワード信号を捕捉追尾してRstar に折り返す (S6, リターン信号)。次いでRSAT-1のS/X帯中継器では、リターン信号を広帯域受信してX帯にアップリンクし、臼田局に中継する (X2)。臼田局で受信されたRSATの4 way ドプラ及び2 way RARR データは、NASDAの追跡管制所 (TACS) で受信された主衛星の2 way RARR データと共に、筑波追跡管制センター (TACC) において工学値変換がなされ、宇宙研相模原キャンパス内の月ミッション運用解析センター (SOAC) に保管される。この後、GEODYN-II 改良型重力場推定ソフトウェアにより、データ校正及び重力場解析を行う。

所要観測精度は、重力場観測カバレッジと所要推定精度から決められ、Rstar に対する2 way ドプラ観測精度として0.2 mm/s (18 秒積分値)、主衛星に対する4 way ドプラ観測精度として1.0 mm/s (10 秒積分値) を目標としている。2003年に実施したRSATと臼田局間の適合性試験では、これらの値を満足していることが示された[10]。

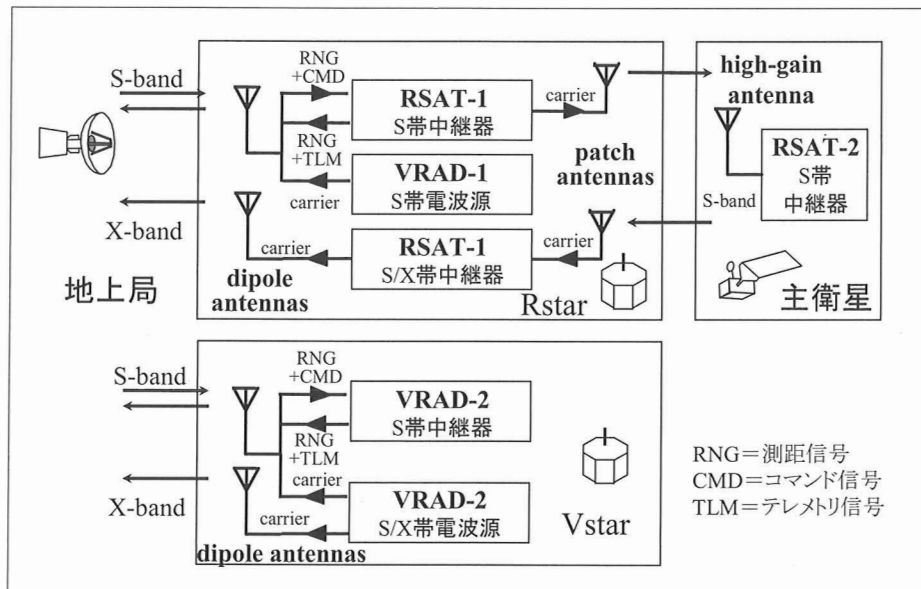


図3 RSAT/VRAD観測機器の信号系統概念図

2.3 VRAD：相対VLBI用衛星電波源

VRAD ミッションでは、Rstar に搭載される電波源 VRAD-1 と Vstar に搭載される電波源 VRAD-2 から、共に S/X 帯の無変調搬送波を発射する (S 7, S 8, S 8, X 2)。但し Rstar の X 帯送信には、RSAT の 4 ウェイドプラ観測用 X 帯信号との共用である。地上 VLBI 観測局では、両者の電波源を各々 100 秒積分で交互に相対 VLBI 観測することにより、位相分解能を高精度化する。また、地球 (並びに月) の電離層遅延の補正と共に、1 波では決まらない 2π の不確定性を解くために、S 帯の約 70 MHz と 6 MHz 離れた 3 波と X 帯の 1 波による多周波 VLBI 観測とする。

VLBI 観測局として、国立天文台天文広域精測望遠鏡 (VERA) の水沢・入来・石垣島・父島、及び上海・烏魯木齊 (中国)、Hobart (豪州)、Wetzel (ドイツ) の各局を予定している。VRAD は無変調搬送波であることから、地上局側の S/N 向上のため専用の狭帯域 (60 kHz) VLBI バックエンドが開発して観測局に配備した。取得・記録された VLBI データは、国立天文台の VRAD 相関器で相関処理された後 SOAC に保管され、RSAT データと共に重力場推定に用いられる。

VRAD バックエンドを用いた宇宙機の相対 VLBI 観測は、Lunar Prospector と 3C 273 b を用いた CRL 鹿島 34 m - GSI 筑波 3.8 m 基線での観測により実証され、月での相対位置決定精度が 20 cm になることが示された[7]。

3. 観測システムの開発と検証

3.1 観測機器

RSAT と VRAD の観測機器は、前節に述べた 4 way 中継と VLBI 用電波の発射に関わる機能を有すると共に、Rstar/Vstar 両衛星のコマンド受信・テレメトリ送信機能を併せ持ち、衛星内部に搭載される通信機器と外部に搭載されるアンテナから構成される。通信機器においては、4 way 中継と多周波 VLBI が各々同期周波数であること、相互混信を抑制すること、既割当周波数を活用すること、周波数合成回路を簡易にすることを考慮して、周波数関係を決定し、中継器の一部に新規周波数合成回路を持たせた[4]。Rstar/Vstar と地球との通信には、S/X 帯垂直ダイポールアンテナを用いることとし、既設計科学衛星用アンテナをベースに、広い指向性 ($\pm 16^\circ$ 以上) を持たせるための改造を行った。Rstar の対主衛星間通信には、広角ビームを持つ 2 対の送信用及び受信用 S 帯平面アンテナを用いることとし、ビギーバック衛星 μ -Lab Sat 用アンテナをベースに狭帯域化した軽量型アンテナを開発した。

3.2 小型衛星

Rstar/Vstar は selenodesy 観測に特化した小型衛星であり、重力場摂動の検出に対する姿勢・軌道制御の影響を無くすことと軽量化のため、能動的姿勢制御・軌道制御を行わないスピン衛星である。主衛星からの分離とスピン印加は、新規開発した伸展バネ式の軽量型分離機構を用いて行う。分離特性がその後の姿勢に影響することから、重力キャンセル装置と衛星模擬機構を用いた地上分離特性試験を行って、スピン角速度、分離速度、分離外乱量などをパラメータとして設計の最適化を行った[3]。分離特性については、分離機構の開発モデルを μ -Lab Sat の分離に用いて、軌道上での実証により基本的

性能を確認した。

Rstar/Vstar 姿勢の変動要因として、短期成分には、機軸と慣性主軸のずれによるアンテナ位相中心の回転と、分離時チップオフに起因する姿勢の倒れがある。慣性主軸のずれの量は、質量特性計測試験によって設計配分値内であることを確認した。分離時チップオフにより発生するニューテーションは、ニューテーションダンパにより除去され、ニューテーションの中心方向が姿勢の倒れとして残る。この確度は分離特性試験により得られたチップオフ初期値の 3σ 値として 5.7° を配分した。この他に主衛星側の取付精度、指向精度、残留レートに基づいて分離時の姿勢誤差 1° が配分されており、以上によって分離時のRstar/Vstarの初期姿勢方向が決まる。Rstar/Vstar 姿勢変動要因の長期成分には、太陽輻射圧と重力傾斜による姿勢の倒れがある。垂直ダイポールアンテナに対する太陽輻射の影響が大きいことから、これをキャンセルするフレアを取り付けている。これらの量は初期姿勢方向によって決まり、解析上の最大値は 13.6° となり、通信及び発生電力の成立性に支障がないことを確認した[2]。

RSAT/VRADの観測データでは、衛星スピンと姿勢変動が外乱量として取り込まれることから、これらを推定して較正することが必要となる。衛星スピンは、アンテナ位相パターンの回転に伴って、基本波及び高調波がドブラのサンプリングデータに混入する。これらはフィルタにより除去することができ、のぞみ(Planet-B)の観測データから有効性が示されている[8]。また、アンテナ位相中心に対する姿勢変動は、ドブラデータに対して最小二乗法から推定可能であることが、擬似データを用いて検証されている[6]。

3.3 地上系

中継衛星を経由した4ウェイ通信としてはTDRSの例があるが、TDRSは地球局に対してほぼ静止しており、ドブラ偏移はTDRSとユーザ衛星間でのみ生じた。一方SELENEでは、地球局・リレー衛星・周回衛星間の相対位置は常に変化するため、4ウェイ各回線のドブラ偏移に対して搬送波捕捉と追尾を行う必要がある。図4に、4ウェイでの捕捉で行うドブラ周波数プロファイルを示す。白田局アップリンク信号(S3)は、まずRstarのドブラ予測値の範囲($\pm 3\sigma$)を掃印され、次いで主衛星のドブラ予測値近傍に移動してから、その予測値の範囲を掃印される。

衛星側の受信機のループバンド(表1)は、ループS/Nを最小マージンとすることと捕捉時間が運用上問題ないことを考慮して決定した。この時、捕捉可能周波数変化率は、回線解析上の最小ループS/N、固有周波数 ω_n 、ダンピングファクター ξ に依存する。これらの値から、出力(P)と等価雑音帯域幅($2B_L$)を以下の関係を考慮して最適化した。

- 1) 通信の成立性：所要S/N(信号電力対雑音電力比)

$$S_{\min}/N = (1-\alpha) \eta_{\text{gain}} \eta_{\text{loss}} P/2B_L \quad (\alpha > 0 : \text{回線マージン})$$

- 2) 観測計測精度：ドブラ(測距・距離変化率)計測精度

$$\sigma_{\text{rr}} = (c/4\pi f T) \sqrt{2/(S/N)} \quad (f : \text{受信周波数}, T : \text{積分時間})$$

- 3) 運用成立性：最大捕捉可能周波数変化率

$$\xi = (1/4\pi) (1.9B_L)^2 [1 - 2/\sqrt{(S/N)}]$$

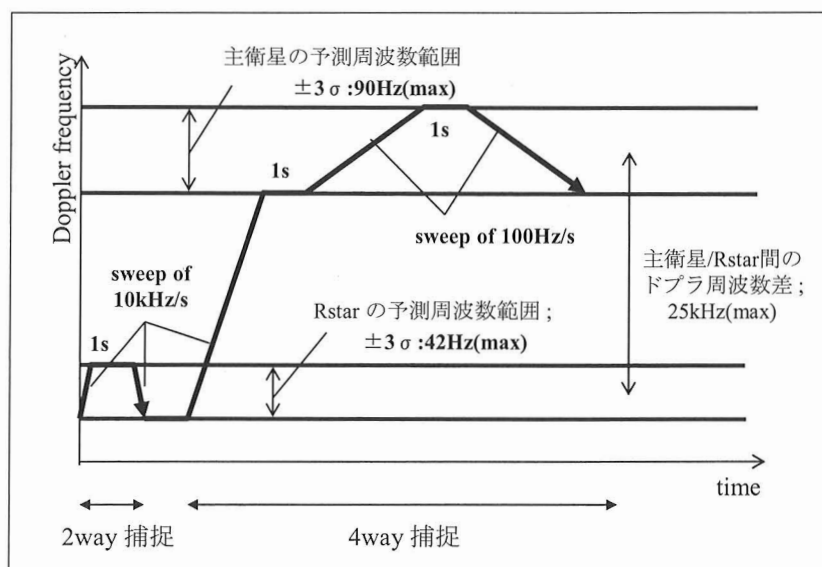


図4 RSATによる4ウェイ補則運用でのドブラ周波数プロファイルの概念図

臼田局適合性試験及び各衛星の総合電気性能試験では、各系の受信機の閾値が上記観戦マージンの式に対して十分余裕を有することから、通信の成立性を確認した。観測精度については2.2節で述べたとおり成立性を確認した。また、最大補足可能周波数変化率についても、理論式から算出される値に対するマージンを有していることを確認した。この値(ξ)と、各衛星の軌道予報値精度(小川他, 本研究会)から算出されるドプラ精度から、4ウェイ捕捉運用に要する時間が推定され、この値は配分値内であることを確認した[1]。

4. ま と め

SELENEでは、主衛星と2機の小型衛星Rstar/Vstarに搭載される、リレー衛星中継器(RSAT)による4ウェイドプラ計測と、相対VLBI用衛星電波源(VRAD)による多周波相対VLBI観測から、月重力場の高精度かつグローバルなマッピングを行う。これらの観測機器、衛星及び地上システムの検証により、ミッションの成立性を確認した。

参 考 文 献

- [1] Iwata, T., Minamino, H., Namiki, N., Hanada, H., Kawano, N., and Takano, T., "Development of SELENE Small Sub-satellites for Lunar Gravity Observation", *Adv. Space Res.*, submitted, 2006
- [2] Iwata, T., Namiki, N., Noda, H., Hanada, H., Matsumoto, K., Kawano, N., "Improvement of the lunar gravity field map using three orbiter of SELENE", in *Proc. 25th International Symposium on Space Technology and Science*, Nissei Eblo, Tokyo, in press, 2006
- [3] Iwata, T., Sasaki, T., Noda, H., Asari, K., Kikuchi, F., Hanada, H., Kawano, N., and Takano, T., "Development of SELENE Small Satellite Systems and their Applications for Selenodesy", *Proc. 24th International Symposium on Space Technology and Science*, Nissei Eblo, Tokyo, pp. 668–673, 2004
- [4] Iwata, T., Takahashi, M., Namiki, N., Hanada, H., Kawano, N., Heki, K., Matsumoto, K., Takano, T., "Mission instruments for lunar gravity measurements using SELENE sub-satellites", *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 558–563, 2001
- [5] Kaula, W. M., *Theory of Satellite Geodesy*, Blaisdell, Waltham, MA, 1966
- [6] Kikuchi, F., Kono, Y., Hanada, H., Iwata, T., Ono, T., and Kawano, N., "Attitude Estimation for a Spin Stabilized Spacecraft from Doppler Shift (in Japanese)", *Transact IEICE (B)*, J 86-B, 6, 959–968, 2003
- [7] Kono, Y., Hanada, H., Iwadate, K., Koyama, Y., Funazaki, Y., and Kawano, N., "VRAD Mission: Precise Observation of Orbits of Sub-satellites in SELENE with International VLBI Network", *Proc. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2002 General Meeting*, NASA/CP-2002-210002, pp 179–183, 2002
- [8] Kono, Y., Ping, J., Kato, T., Ichikawa, T., and Kawano, N., "Analysis of Short Period Variations of Doppler Frequency Caused by the Spin of Mars Spacecraft, NOZOMI", *Transact. IEICE (B)*, J 84-B, 6, 1071–1078, 2001
- [9] Konopliv, A. S., Asmar, S. W., Carranza, E., Sjogren, W. L., and Yuan, D. N., "Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector", *Icarus*, 150, 1–18, 2001
- [10] Noda, H., Asari, K., Iwata, T., Kawano, N., and Yamamoto, Z., "Ground-base Verification of Four-way Doppler Measurement for the SELENE Mission," In *A Window on the Future of Geodesy, Intern. Asocc. Geod. Symp.*, Vol. 128, Springer, Berlin, pp. 152–156, 2005