

SELENE リレー衛星による測月観測システムの開発

岩田隆浩、(NASDA)、並木則行、青島千晶(九大理)、花田英夫、河野宣之、
河野裕介(天文台水沢)、RSAT/VRAD ミッショングループ

1. はじめに

月の時空計測を行う測月観測には、月周回衛星を中継する電波の測距・ドプラ計測(RARR)による軌道決定から主に月の重力場分布を求める研究手法と、月面のレーザ反射鏡を利用した月レーザ測距(LLR)から月の主に運動を求める手法が、研究されてきた。月周回衛星を中継する電波を用いた測距・ドプラ計測による軌道決定から、月の重力場分布を求めることは、月の表面地形や内部構造を解明する上で重要である。これまで Lunar Orbiter (Lorell and Sjogren 1968)から Lunar Prospector (Konopoliv et al. 1998) に至る 2 ウェイの RARR 観測では、月の表側の重力場については高分解能の観測が行われ、100 次までの重力場展開係数が求められてきた。一方月の裏側については、表側や高高度衛星の軌道から推定していたため、表側と比べて精度や分解能が不十分であった。

2004 年打上げ予定の SELENE (月周回衛星; *e.g.* Iwata et al. 1999) では、測月ミッション機器として、リレー衛星搭載中継器(以下、機器・ミッションを総称して RSAT)と相対 VLBI 用衛星・月面電波源(同、VRAD)が搭載予定である(岩田他、1998)。RSAT では、高度 100km 円軌道の周回衛星の月裏側の軌道を、高度 2400-100km 楕円軌道のリレー衛星経由で計測する 4 ウェイドプラ観測を行う(図 1)。これにより、月の裏側の重力場が初めて高分解能で得られ、70 次までの重力場展開係数に月裏側の詳細情報が加わることになる(Namiki et al. 1999; Matsumoto et al. 1999)。

VRAD (Hanada et al. 1999) では、リレー衛星に搭載される衛星電波源(VRAD-1)と、周回衛星から分離して月面に軟着陸する推進モジュールに搭載される月面電波源(VRAD-2)から発せられる、S 帯 3 波と X 帯 1 波について、相対 VLBI 観測を行う(図 1)。本観測では、軌道・姿勢制御を行わないリレー衛星について長時間の高精度位置決定が行われることから、重力場展開係数の特に低次側成分について、従来方式の 1 桁を上回る高精度データが得られる(Heki et al. 1999)。

SELENE 測月の主役となるリレー衛星は、重力場の高精度観測と軽量化の要請により、軌道・姿勢制御系を持たないで、機器及び運用の両面での効率化を目指し、40kg 級の衛星とすることが可能になった(Iwata et al. 1998; 岩田他、1998)。これらの観測機器及び運用の設計検討について述べる。

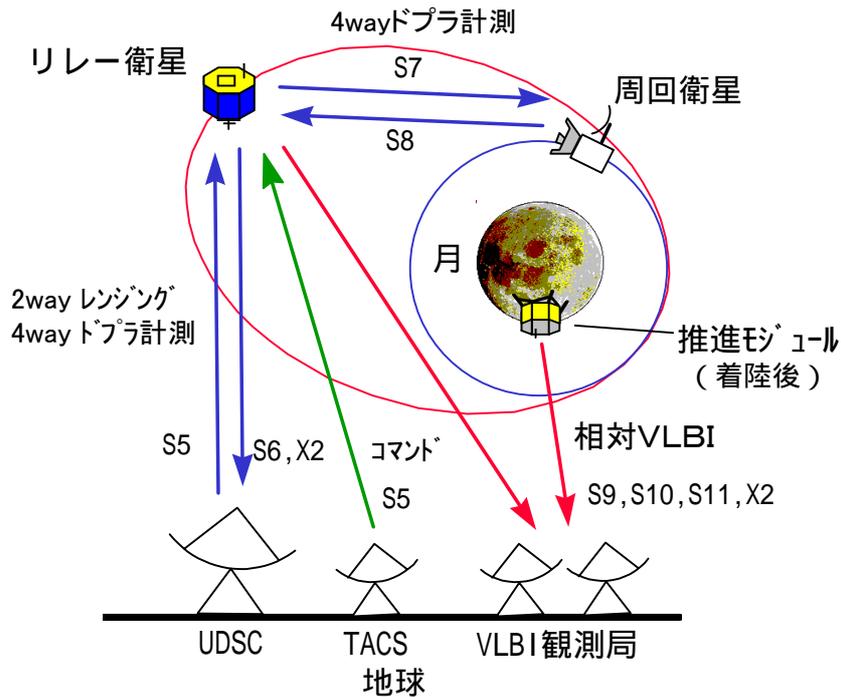


図1 SELENEによる月重力場観測ミッションの概念図。

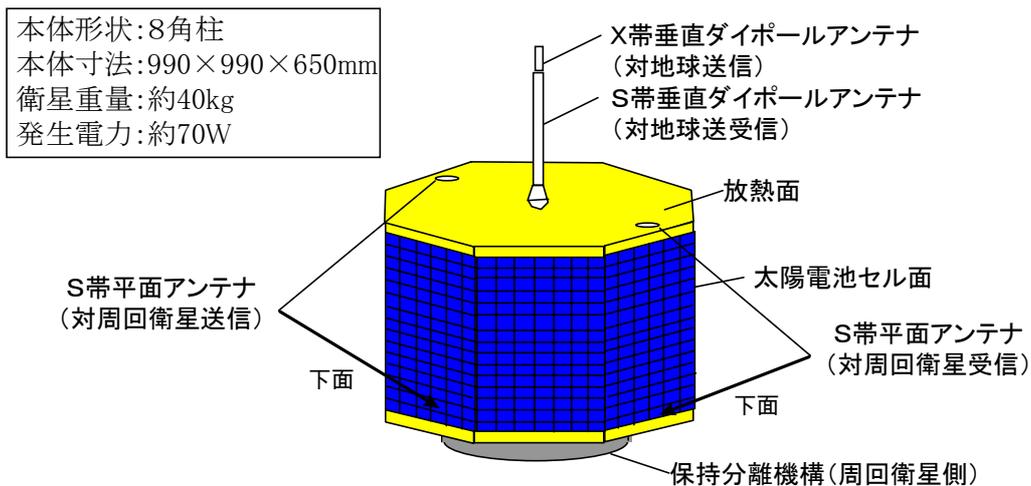


図2 SELENE リレー衛星のアンテナ構成見直し後の外観及び主要諸元。

2. リレー衛星システムの設計

リレー衛星は、観測機器としてRSATとVRAD-1を搭載し、バス機器として電源系、熱制御系、構体系、計装系から成る。図2に外観及び主要諸元を、図3に機器構成系統図を示す。なお観測機器のブロック図は、岩田他(1998)に示した。RSATは通信系機能を併せ持ち、対地球指向のS/X帯ダイポールアンテナ、対周回衛星指向の4台のS帯平面アンテナ、衛星内部の中継器から構成され、バス機器のテレメトリ/コマンド制御も行う。

リレー衛星では、重力場の精密測定のため軌道・姿勢制御マヌーバを行わず、スピン安定による姿勢保持を図る(Iwata *et al.* 1998)。分離時のチップオフ、重力場傾斜、太陽輻射圧等の要因によるスピン軸の傾斜と、太陽電池セル発生電力及び地球方向通信リンクの要請により、白道面垂直に対し $\pm 20\text{deg}$ を維持するため、スピンレート $> 10\text{rpm}$ 、チップオフレート $< 6\text{deg/sec}$ での分離・放出を行

う。本分離機構は新規開発となることから、試作試験用モデル（BBM）を用いた地上試験を行って、スピンレート、チップオフレート、分離速度等の設計データを取得し、併せて火工品のチップオフレートに対する影響を評価している。また、無重量状態かつ真空状態における機能・性能確認のため、ピギーバック衛星 μ Lab Sat による軌道上実証を行う。

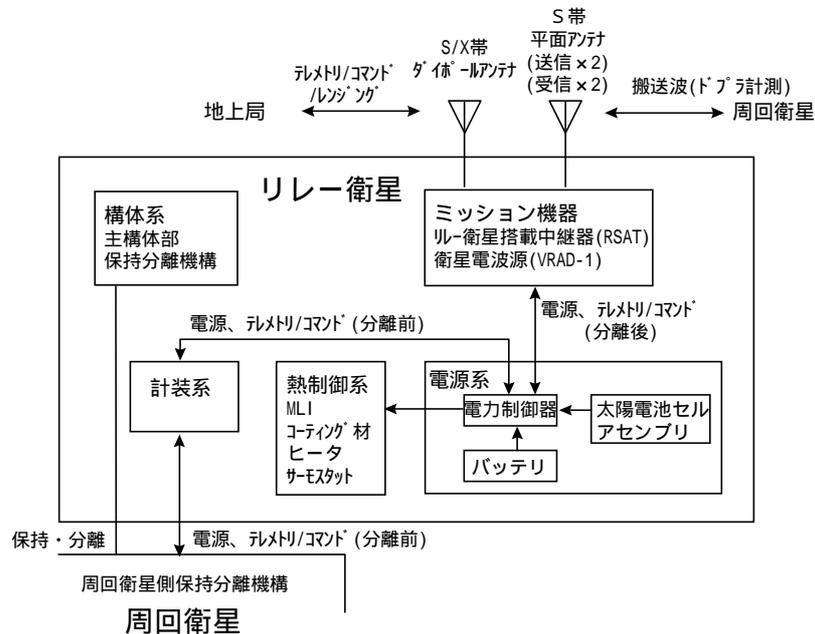


図3 リレー衛星バス機器の構成図。ミッション機器については岩田他（1998）に記載。

[リレー衛星平面アンテナの設計検討]

リレー衛星の4way ドプラ計測では、衛星スピンによるオムニアンテナのドプラ変位を観測値から推定して除去する必要があるが、ドプラ計測精度（目標 0.1mm/sec）に比べて4桁大きい（最大 1300mm/sec）ことから、大きな誤差要因となる。これを改善する方法として、オムニアンテナを送信用と受信用に分離してスピン軸に対称に配置することにより、推定すべき精度は概ね2桁緩和される。

オムニアンテナの送受信分離に伴い、アンテナ素子数は2台から4台に増える。搭載性および重量インパクトの小さい方法として、 μ Lab Sat 用に開発された送受信共用の広帯域型平面アンテナを、送信または受信帯域のみの狭帯域型に改修して使用する。アンテナの目標仕様を表1にまとめる。

本アンテナは宇宙での使用は初となるため、 μ Lab Sat で検証しない項目について解析または実験による検証を行う。耐放射線試験として、サンプルへの紫外線（電子線の代替）・線照射試験による外観及び電気性能の変化の確認を行う。これまでに、紫外線照射試験により電気特性及び引っ張り強度特性に劣化傾向がないことを確認している。また、耐温度環境試験として、使用温度内での耐久試験及び電気性能試験（共振周波数の温度特性等）による機能確認を行う。サンプルをサイズ2程度の吸収体の箱（外側は金属）に入れ、液体窒素等を用いて温度環境を作り、電気性能を測定することを計画している。

表1 平面アンテナの目標仕様

信号種	; ドプラ計測用の無変調搬送波、RHCP
相手局	; SELENE周回衛星ハイゲインアンテナ
中心周波数(暫定)	; [送信] 2241.579 MHz

[受信] 2051.614 MHz
 帯域幅 ; [送受信] 20 MHz程度以上 (暫定)
 要求アンテナ利得 ; [送受信] -5.0 dBi以上
 ビーム幅 ; [送受信] 法線方向より ± 70° 以上 (目標)
 重量 ; 約50g (目標)

3 . リレー衛星地上局運用の設計検討

リレー衛星の運用では、衛星の制御・モニタは月ミッション運用解析センター (CeLMOR) で行なわれ、コマンド送信は NASDA の TACS (追跡局)、テレメトリ受信は宇宙研の臼田局を経由する。RSAT の 4 ウェイドブラ計測では運用及び送受信は臼田局で行なわれ、VRAD の相対 VLBI 観測は VLBI 各極で各々実施される (図 1)。4 ウェイドブラ計測の開始時の運用手順を、表 2 にまとめる。臼田局での 4 ウェイドブラ運用の機能は新規開発となることから、その諸元を設計すると共に適合性試験の方法を検討した。

表 2 4 ウェイドブラ計測運用の手順概要

月ミッション運用解析センター (CeLMOR)	臼田局 (UDSC)
(1) 周回衛星、TACSのモード切替 (2) リレー衛星のモード切替、衛星状態モニタ	(1) 臼田局のモード切替 (3) リレー衛星の 2 ウェイ捕捉 (4) 周回衛星の 4 ウェイ捕捉 (5) 2 ウェイRARR・4 ウェイドブラデータ取得

[リレー衛星 2way / 4way 回線のドブラ捕捉に関する諸元]

RSATの4ウェイドブラ計測では、ドブラ捕捉時の回線マージンが得られない周回衛星 リレー衛星回線では、ドブラ捕捉追尾を行なわない広帯域中継とし、他の回線ではドブラ捕捉追尾を行なう。衛星側の受信機のループバンドは、ループS/Nと捕捉時間を考慮して決定する。捕捉可能周波数変化率は、ループS/Nと固有周波数 n とダンピングファクター に依存し、実験式は下記で表される。

$$\text{捕捉可能周波数変化率} = (1/4\pi) (\omega n)^2 \{1 - 2/\sqrt{(S/N)}\}$$

ここで、 $n=1.9BL$ (ダンピングファクタ = $1/2$ の場合) とする。S/N値及び n より表3の値が得られ、ドブラ周波数変化率が最大となる臼田曲 X 帯ダウンリンク回線の受信機でも、捕捉可能である。アップリンク周波数について、予測誤差と考える範囲を含む周波数範囲を、上記の捕捉可能周波数変化率の範囲内の速度で掃引するため、所用捕捉時間はドブラ周波数予測精度に依存し、ドブラ周波数予測精度が10cm/secの時1秒程度となり、運用上問題ないことが確認された。

表 3 リレー衛星 RARR の回線諸元

経路	臼田 ル-衛星	ル-衛星 臼田	ル-衛星 周回衛星	周回衛星 ル-衛星	ル-衛星 臼田
	2way				
	4way		4way		
周波数 [MHz] (符号)	2081.466 (S3)	2260.415 (S4)	2241.579 (S5)	2051.614 (S6)	8456.125 (X2)
ループ帯域幅(2BL) [Hz]	1k	30	100	N/A	100
受信帯域幅 [Hz]	N/A	N/A	N/A	120k	N/A
捕捉可能周波数範囲 [Hz]	50k	N/A	50k	N/A	N/A
最小捕捉可能周波数	81k	37	810	N/A	810

変化率 [Hz/sec]					
キャリア追尾 S/N [dB]	15	13.5	15	N/A	15
キャリア追尾 回線マージン [dB]	41.8 (測距: 4.6)	2.9 (TLM: 1.8)	4.3	N/A	2.6
最大相対速度 [km/sec]	2.0	2.0	1.4	1.4	2
最大ドプラシフト* [Hz]	14k	30k	25k	33k	132k
最大相対速度変化率 [m/sec ²]	1.3	1.3	1.5	1.5	1.3
最大ドプラ変化率* [Hz/sec]	9	20	21	29	94

* 各経路の合計値。

(参考) 周波数変換式 ; $S4=S3*240/221$, $S5=S3*238/221$, $S6=S5*270/295$, $X2=S6+S3*680/221$

4.まとめ

SELENE の測月ミッションの観測機器として、測距及び4 ウェイドプラ計測のためのリレー衛星搭載中継器 (RSAT)、相対 VLBI のための衛星電波源 (VRAD-1)、及びこれらを搭載するリレー衛星を開発している。リレー衛星の周回衛星とのリンクのための S 帯オムニアンテナでは、4 ウェイドプラ計測時に衛星スピンによる影響を除去するため、送受信をスピン軸対象の各アンテナで行なうこととした。この場合の重量増を押さえるため、ピギーバック衛星用に開発された平面アンテナを改造して用いることとし、これまでに耐宇宙環境試験として紫外線照射試験を実施して健全性を確認した。一方、4 ウェイドプラ計測運用について、臼田局における地上設備改造のため詳細な設計検討を行い、衛星および地上系の受信機におけるドプラ捕捉ループ帯域幅を決定して、回線 S/N 及び捕捉時間が運用上問題ないことを確認した。これらの運用については、RSAT シミュレータを製作して、地上局適合性試験によって事前実証を行なう。

参考文献

Hanada, H., *et al.*, *Proc. GEMSTON*, 126.

Heki, K., Matsumoto, K., and Floberghagen, R., *Adv. Space Res.*, 23, 1821 (1999).

Iwata, T., Funaki, M., Takizawa, Y., and Sasaki, S., *Proc. 8th ITCOP*, 289 (1999).

Iwata, T., Kaneko, Y., Ogawa, M., Namiki, N., and Kawano, N., *Proc. 21st ISTS*, 98-i-03 (1998).

岩田、並木、河野、花田、1998 年度 VLBI シンポジウム、P.112 (1998).

Konopoliv, A. S., Binder, A. B., Hood, L. L., Kucinskis, A. B., Sjogren, W. L., and Williams, J. G., *Sci.*, 281, 1476 (1998).

Lorell, L., and Sjogren, W. L., *Sci.*, 159, 625 (1968).

Matsumoto, K., Heki, K., and Rowlands, D. D., *Adv. Space Res.*, 23, 1809 (1999).

Namiki, N., Hanada, H., Tsubokawa, T., Kawano, N., Ooe, M., Heki, K., Iwata, T., Ogawa, M., and Takano, T., *Adv. Space Res.*, 23, 1817 (1999).