

月周回衛星「かぐや」(SELENE) プロジェクトについて

平成21年6月17日

宇宙航空研究開発機構
SELENEプロジェクトチーム
佐々木 進

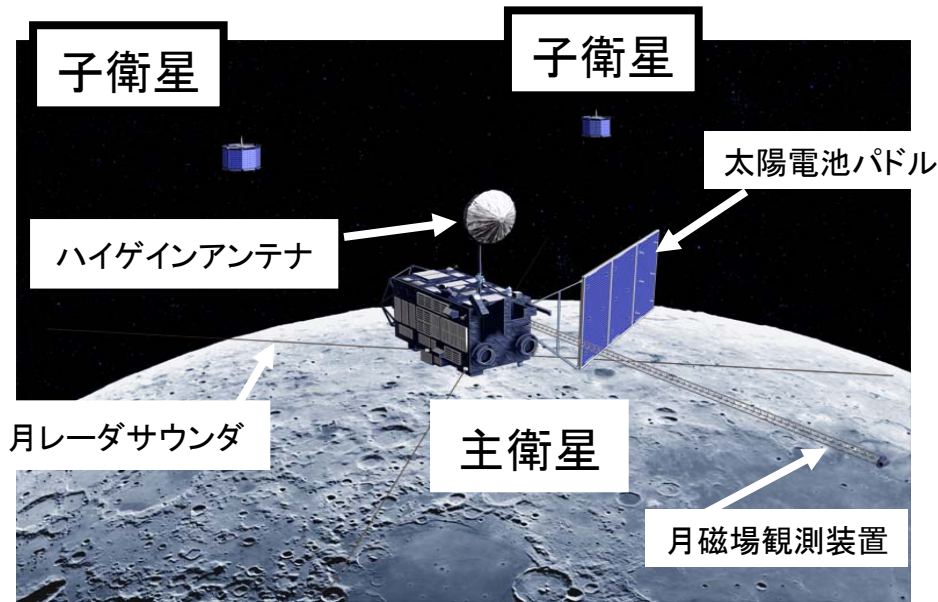


経緯

月周回衛星「かぐや」(SELENE)の宇宙開発委員会における主な報告内容を以下に示す。

- | | |
|-------------|--|
| 平成19年9月19日 | 打上げ後の運用状況について報告した。 |
| 平成19年10月24日 | クリティカルフェーズにおける衛星の運用結果について報告した。 |
| 平成19年12月26日 | 観測機器の初期機能確認結果について報告した。 |
| 平成20年4月16日 | その時点までの観測・科学成果、普及・啓蒙活動、受賞等について報告した。 |
| 平成20年11月5日 | 定常運用の運用結果等について報告した。 |
| 平成21年2月18日 | サイエンス特別編集号を中心にした観測データに基づく初期的解析成果、普及・啓蒙活動等について報告した。 |
| 平成21年4月8日 | 後期運用の低高度運用状況等について報告を行った。 |

「かぐや」概要



目的

(1) 月科学及び月利用調査

- ・ 月の科学(月の起源と進化の解明)、月での科学(月環境の解明)及び月からの科学(太陽地球系プラズマ環境の解明)のためのデータの取得。
- ・ また、これらの取得データは、将来の月面上活動や月利用のための調査に活用。

(2) 基盤技術の開発と蓄積

今後、月探査を進める上で必要となる基盤技術の開発及び蓄積。

(3) 宇宙開発、月探査の普及・啓発

ハイビジョンカメラによる「地球の出」等により、宇宙開発、月探査の普及・啓発を図る。

諸元

(主衛星)

質量: 約3ton(打上げ時)
(子衛星約50kg×2機を含む)
構体外形寸法: 約2.1×2.1×4.8m
姿勢制御方式: 3軸安定
発生電力: 約3.5 kW(最大)
ミッション期間: 約1年
観測軌道: 高度100km／傾斜角90度の円軌道

(子衛星)

質量: 約50kg
構体外形寸法: 約1.0×1.0×0.65m (八角柱状)
姿勢制御方式: スピン安定
発生電力: 約70W
観測軌道(分離時):

(リレー衛星(おきな)): 高度100km×2400kmの楕円軌道

(VRAD衛星(おうな)): 高度100km×800kmの楕円軌道

VRAD: VLBI RADio source

VLBI: Very Long Baseline Interferometry

かぐや(SELENE)の観測ミッション

	観測ミッション	観測項目	観測内容
1	蛍光X線分光計(XRS)	元素分布	太陽からのX線を受けて月面から放射される二次X線を観測し、月表面のAl, Si, Mg, Fe等の元素分布を調べる。
2	ガンマ線分光計(CRS)		月面から放射される γ 線を観測し、月表面の放射性元素(U, Th, K等)分布を調べる。
3	マルチバンドイメージャ(MI)	鉱物分布	月面からの可視近赤外光を複数の波長で観測し、地質を調べる。
4	スペクトルプロファイラ(SP)		月面からの可視近赤外光における連続スペクトルを観測し、地質中に含まれる鉱物の組成等を調べる。
5	地形カメラ(TC)	地形・ 表層構造	高分解能(10m)カメラ2台のステレオ撮像により、標高を含む地形データを取得する。
6	月レーダサウンダ(LRS)		月面に電波を発射し、その反射により月の表層構造(地下数km程度)を調べる。
7	レーザ高度計(LALT)		月面にレーザ光を発射し、その反射時間により、地形の起伏、高度を精密に測定する。
8	月磁場観測装置(LMAG)	月面環境	月面および月周辺の磁気分布を観測する。
9	粒子線計測器(CPS)		月周辺における、宇宙線や太陽から放射される高エネルギー放射線、及び月面から放射される α 線を観測する。
10	プラズマ観測装置(PAGE)		月周辺の太陽風の電子とイオン及び月面からの反射電子と二次イオンを測定する。
11	電波科学(RS)		衛星のリム通過時に衛星からの電波の位相変化を測定し、希薄な月電離層を検出する。
12	プラズマイメージャ(UPI)	地球プラズマ 環境	月軌道から地球の磁気圏及びプラズマ圏のダイナミクスを画像として観測する。
13	リレー衛星中継器(RSAT)	月の重力分布	主衛星が月裏側を飛行中に地球局との4ウェイドップラ計測を行う。主衛星の軌道擾乱から月裏側の重力場データを取得する。
14	衛星電波源(VRAD)		2機の子衛星に搭載する電波源に対し地球局から相対VLBI観測を行い、両衛星の軌道を精密に計測する。これにより月重力場を精密に観測する。
15	高精細映像取得システム (ハイビジョンカメラ:HDTV)	映像取得	月面上の「地球の出」等のハイビジョン撮影を行う。

C/O: 初期チェックアウト、機能確認
EM: Engineering Model
PFM: Proto Flight Model
PFT: Proto Flight Test

後期運用について

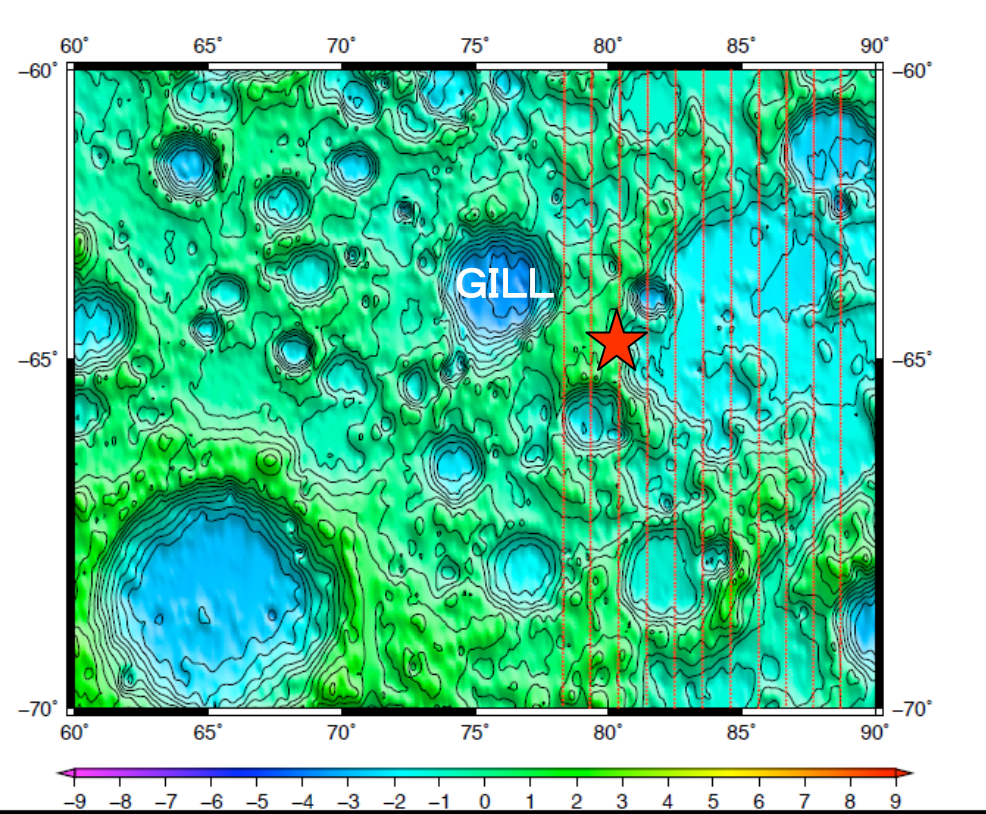
1. 4月以降の後期運用結果について

- ・ 4月中に近月点10-30kmにおいて、ミニ磁気圏領域を月磁場、プラズマ環境などを同時観測した。あわせて、HDTVカメラによる超低高度の映像撮影を実施した。
- ・ 5月末に、粒子線計測器(CPS)の重イオン放射線検出装置を動作させたが、初期チェックアウトと同じ不具合が再現した。

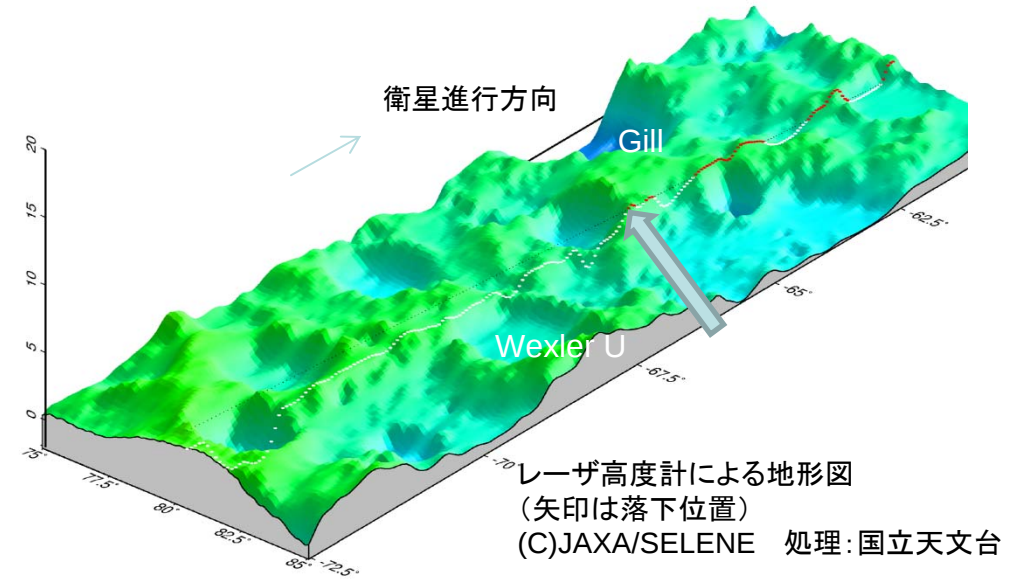
2. 制御落下について

- ・ 下記のとおり「かぐや」の制御落下を実施した。
 - 落下日時: 6月11日 3時25分10秒(日本での確認時間)
 - 落下場所: 月の表側(日陰) 月の表側の南緯65.5度 東経80.4度付近
 - 落下の衝突における閃光については、日本、台湾、韓国、オーストラリア、ニュージーランド、インドネシアなどにおいて100箇所程度が観測を試みるという事前連絡があった。
 - 観測ができたという報告は日本は天候不順のためなく、オーストラリアのアングロ-オーストラリアン天文台、インドのアブ山天文台にて閃光が確認できたと報告されている。これらの画像は、撮影時間からみると、「かぐや」の衝突の閃光の可能性がある。
<http://www.space.com/news/090610-kaguya-moon-impact.html>
 - 落下後、チャンドラヤン1号(インド)による衝突場所の観測においても「かぐや」落下場所の月面の観測が予定されている。
 - 制御落下の軌道においても、日照の領域を中心にHDTVカメラ、地形カメラなどの撮影を実施。

制御落下の位置情報



レーザ高度計による等高線図
(赤線は「かぐや」の軌道。星は落下位置)
(C)JAXA/SELENE 処理:国立天文台



レーザ高度計による地形図
(矢印は落下位置)
(C)JAXA/SELENE 処理:国立天文台

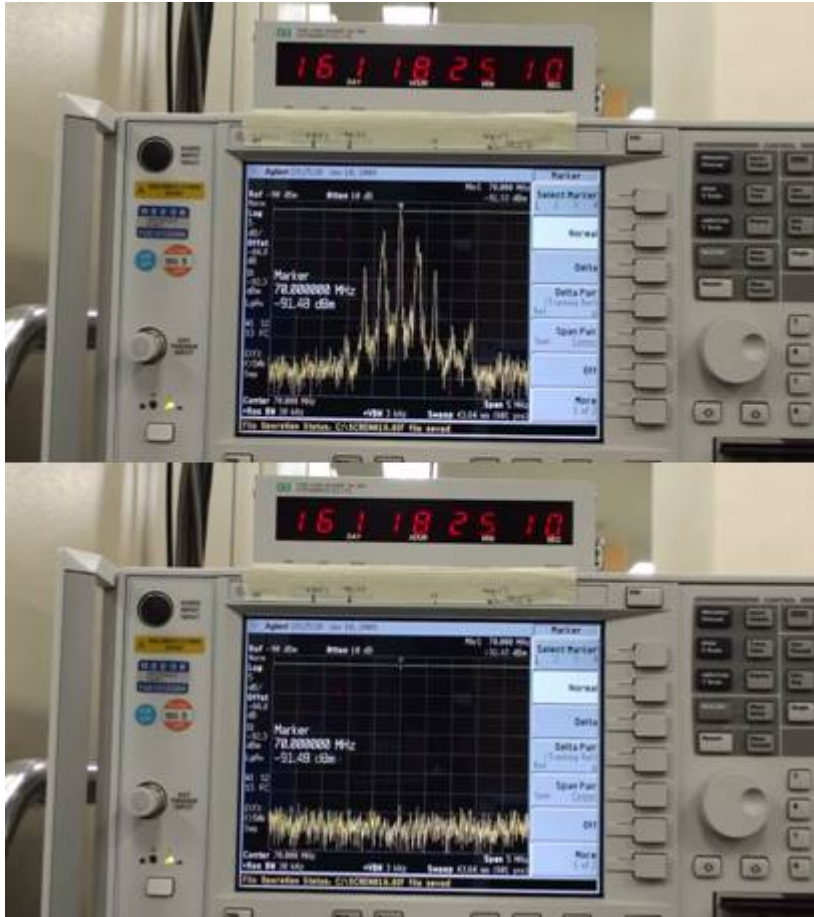


地形カメラによる衝突付近の地形図(星は落下位置)
(C)JAXA/SELENE

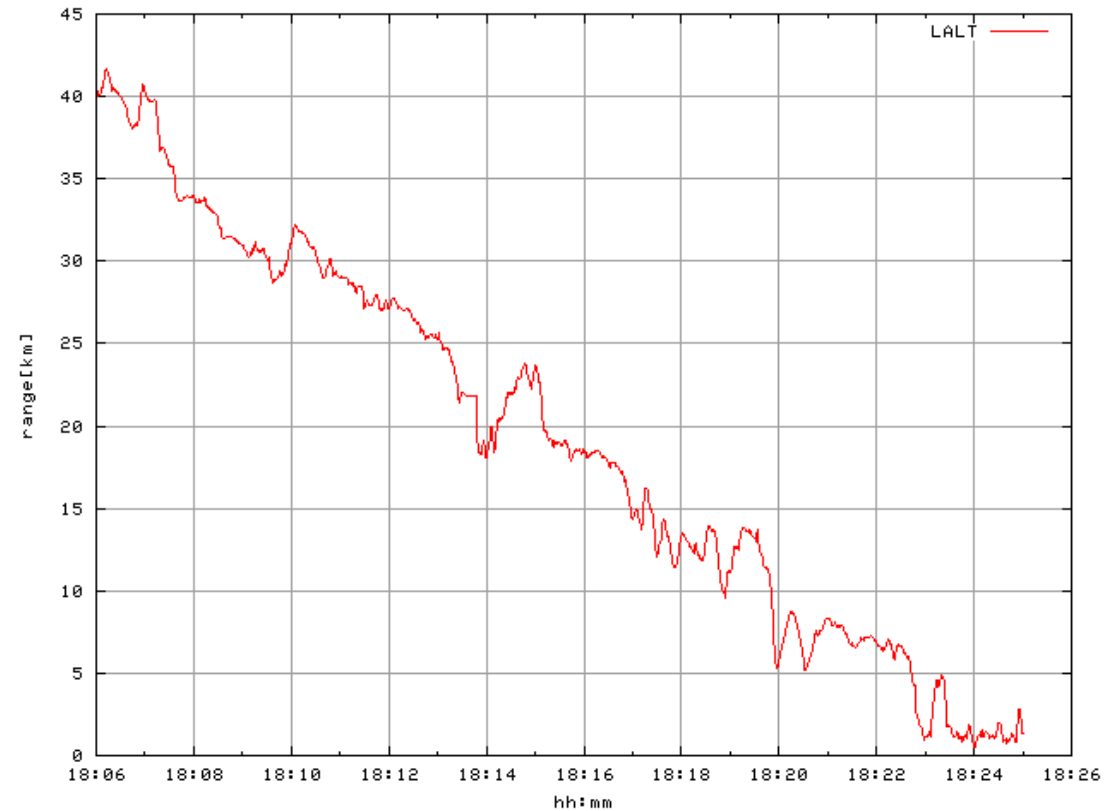
落下日時: 6月11日 3時25分10秒(日本での確認時間)

落下場所: 南緯65.5度 東経80.4度 GILL付近
(月の表側の日陰)

落下確認状況



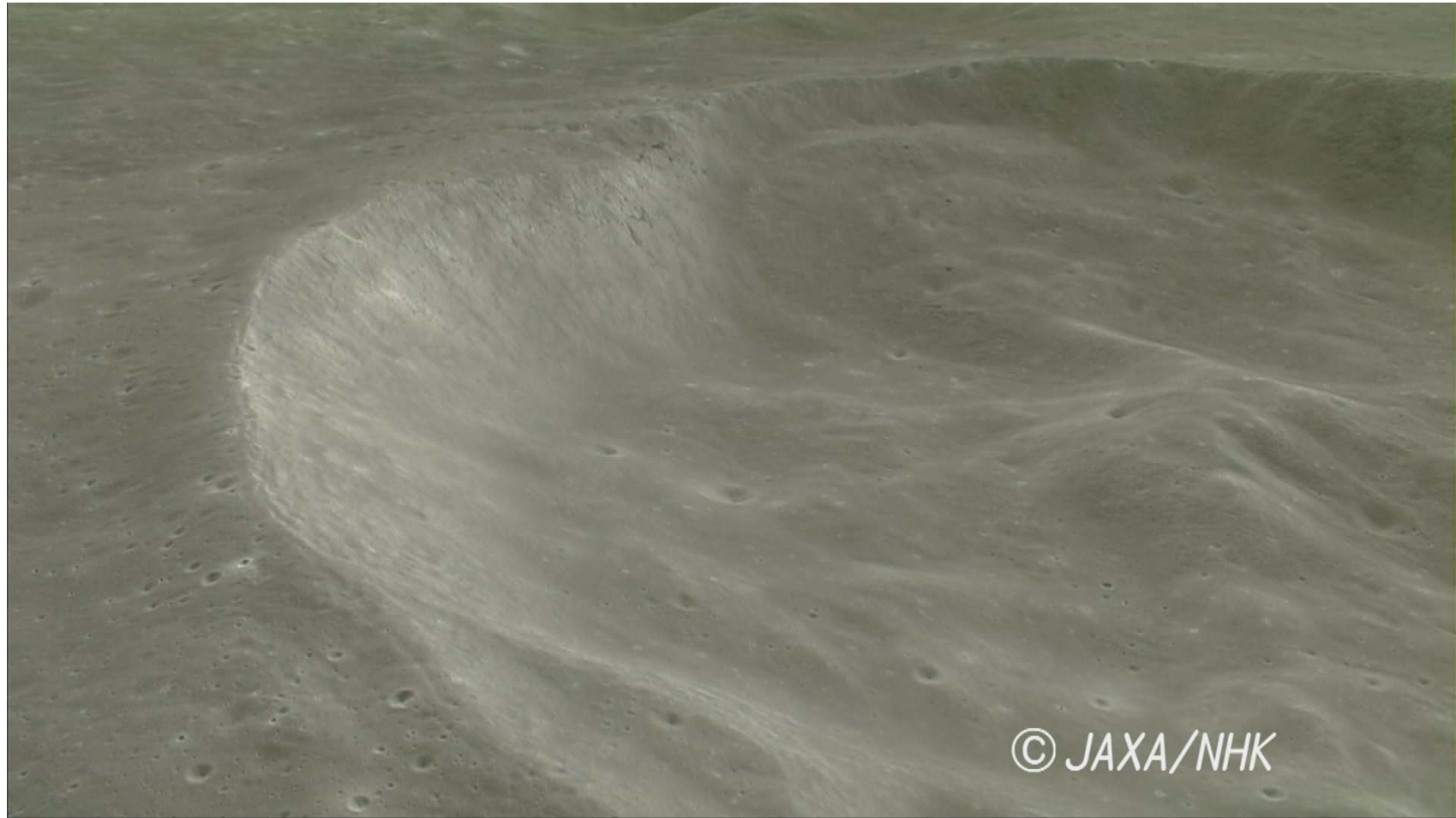
臼田宇宙空間観測所でのS帯受信データ
上が制御落下直前、下が直後



レーザ高度計による高度(レンジ)データ

※レーザ高度計による高度情報は、レーザの送受信、データ処理のために数秒前の高度情報を示しており、落下時の高度ではない。

ハイビジョンカメラが近月点付近で撮影した映像 RYDBERGクレータ付近



撮影時刻 2009年4月17日 7時58分から8時 0分

撮影場所 南緯45度、東経263度-262度付近 — 南緯52度、東経263度-262度付近
「かぐや」の高度: 月面上約11km

ハイビジョンカメラによる超低高度観測撮影映像リスト

撮影場所	日にち	撮影開始時刻	撮影終了時刻	撮影開始		撮影終了	
				経度	緯度	経度	緯度
低高度(近月点)撮影1 望遠	4月16日	21:05	21:06	東経264度	南緯45度	東経264度	南緯48度
低高度(近月点)撮影2 広角	4月16日	22:58	23:00	東経263－262度	南緯45度	東経263－262度	南緯52度
ジーマン1	4月19日	10:46	10:48	東経230度－228度	南緯68度	東経230度－227度	南緯74度
ジーマン2	4月19日	12:40	12:42	東経229度－226度	南緯74度	東経229度－224度	南緯81度
フィゾー1	4月19日	16:18	16:20	東経227度－225度	南緯56度	東経227度－225度	南緯62度
フィゾー2	4月19日	18:12	18:14	東経225度－224度	南緯61度	東経225度－223度	南緯68度
ミンコウスキー1	4月20日	12:47	12:49	東経214度	南緯49度	東経214度－213度	南緯55度
ミンコウスキー2	4月20日	14:41	14:43	東経213度－212度	南緯55度	東経213度－212度	南緯61度
ストーニ1	4月21日	5:32	5:34	東経205度－204度	南緯41度	東経205度－204度	南緯47度
ストーニ2	4月21日	7:26	7:28	東経204度－203度	南緯47度	東経204度－202度	南緯54度
アントニアジ1	4月22日	9:36	9:38	東経189度－187度	南緯58度	東経189度－187度	南緯65度
アントニアジ2	4月22日	11:30	11:32	東経188度－186度	南緯64度	東経188度－184度	南緯70度
ライブニッツ1	4月23日	5:59	6:01	東経179度－178度	南緯27度	東経179度－178度	南緯34度
ライブニッツ2	4月23日	7:53	7:55	東経178度－177度	南緯33度	東経178度－177度	南緯40度
ライマン1	4月24日	8:17	8:19	東経165度－161度	南緯63度	東経164度－160度	南緯70度
ライマン2	4月24日	10:08	10:10	東経164度－161度	南緯58度	東経164度－160度	南緯65－64度

「かぐや」科学成果 論文一覧(発行済みのもの)



査読付、科学論文は、発行済みのものが17件、受理済みのものが15件である。

No.	発行日	機器	主著者	投稿先	タイトル	備考
1	2008/10/1	GRS	唐牛 譲	遊星人 vol.17 no.3, 2008	月探査衛星「かぐや」搭載ガンマ線分光計で探る月表層の元素分布	日本惑星科学会誌
2	2008/10/1	LALT	荒木 博志	遊星人 vol.17 no.3, 2008	「かぐや」搭載レーザ高度計(LALT)による月全球高度観測—初期成果より—	日本惑星科学会誌
3	2008/10/1	MAP	西野 真木	遊星人 vol.17 no.3, 2008	「かぐや」MAPが明らかにする月ウェイク領域の現象	日本惑星科学会誌
4	2008/11/7	TC	J. Haruyama	Science 7 November 2008: 938–939.	Lack of Exposed Ice Inside Lunar South Pole Shackleton Crater	米国科学誌(サイエンス)
5	2008/12/4	SP	T. Matsunaga	Geophys. Res. Lett., 35, L23201	Discoveries on the lithology of lunar crater central peaks by SELENE Spectral Profiler	米国地球物理学連合(AGU)誌(GRL)
6	2008/12/30	LALT	H. Noda	Geophys. Res. Lett., 35, L24203	Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA(SELENE) laser altimeter	米国地球物理学連合(AGU)誌(GRL)
7	2008/12/31	PACE	Y. Saito	Geophys. Res. Lett., 35, L24205	Solar wind proton reflection at the lunar surface: Low energy ion measurement by MAP–PACE onboard SELENE	米国地球物理学連合(AGU)誌(GRL)
8	2009/1/6	MAP	T.Nagai	Ann. Geophys., 27, 59–64, 2009	Plasmoid formation for multiple onset substorms: observations of the Japanese Lunar Mission “Kaguya”	欧州地球科学連合(EGU)誌
9	2009/2/13	LALT	H. Araki	Science 13 February 2009: 897–900	Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya–LALT Laser Altimetry	米国科学誌(サイエンス)
10	2009/2/13	R/V	N. Namiki	Science 13 February 2009: 900–905.	Farside Gravity Field of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya)	米国科学誌(サイエンス)
11	2009/2/13	TC	J. Haruyama	Science 13 February 2009: 905–908	Long-Lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera	米国科学誌(サイエンス)
12	2009/2/13	LRS	T. Ono	Science 13 February 2009: 909–912.	Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers Under the Nearside Maria of the Moon	米国科学誌(サイエンス)
13	2009/3/24	R/V	F. Kikuchi	Radio Sci., 44, RS2008	Picosecond accuracy VLBI of the two subsatellites of SELENE (KAGUYA) using multifrequency and same beam	米国地球物理学連合(AGU)誌(RS)
14	2009/4/10	GRS	N. Hasebe	J. Phys. Soc. Jpn, Suppl. A Vol.78 (2009) pp. 18–25	High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer onboard Japanese First Lunar Mission SELENE(KAGUYA)	日本物理学会誌別冊
15	2009/4/10	GRS	N. Yamashita	J. Phys. Soc. Jpn, Suppl. A vol.78 (2009) pp. 153–156	Germanium Gamma-Ray Spectrometer on SELENE (KAGUYA)	日本物理学会誌別冊
16	2009/6/4	PACE–	M. Nishino	GRL	Pairwise energy gain–loss feature of solar wind protons in the near–Moon wake	米国地球物理学連合(AGU)誌(GRL)
17	2009/6/5	PACE	S. Yokota	GRL	First direct detection of ions originating from the Moon by MAP–PACE IMA onboard SELENE(KAGUYA)	米国地球物理学連合(AGU)誌(GRL)

上記のとおり、新たに、日本物理学会誌においてGRS論文が受理、発行された。

科学成果「かぐや」成果 論文一覧(受理済みのもの)

機器	主 著 者	投稿先	タイトル	備考
GRS	Y. Karouji	Planetary & Space Science	Distributions of K and Th on the Moon: The Initial Results from Observations by SELENE GRS	欧州地球科学連合(EGU)誌
UPI	M. Kagitani	EPS	Observation of the lunar sodium exosphere using UPI-TVIS onboard SELENE (Kaguya)	
R/V	岩田隆浩	測地学会誌	かぐや(SELENE)による測月ミッションの概要と、子衛星おきな・おうな(Rstar・Vstar)の開発並びに軌道上特性	かぐや特集号
R/V	浅利一善	測地学会誌	4Wayドプラー計測のロック判定方法と軌道上での検証	かぐや特集号
LALT	田澤誠一	測地学会誌	月形状の高精度決定のためのかぐや(SELENE)搭載レーザ高度計による観測	かぐや特集号
R/V	花田英夫	測地学会誌	月の重力場推定のための「かぐや」(SELENE)の2つの子衛星「おきな」と「おうな」の相対VLBI観測	かぐや特集号
R/V	菊池冬彦	測地学会誌	月探査計画かぐやにおける相対VLBIデータ解析システムの	かぐや特集号
R/V	Qinghui Liu	測地学会誌	New Method of Differential VLBI Observations in SELENE (Kaguya) and Error Analysis and Correction for Differential Phase delay	かぐや特集号
R/V	Sander Gooss	測地学会誌	Results For Orbit Determination of the Three Satellites of Kaguya	かぐや特集号
R/V	松本晃治	測地学会誌	「かぐや」衛星追跡データによる月重力場モデルの構築	かぐや特集号
LALT	荒木博志	測地学会誌	「かぐや」搭載レーザ高度計(LALT)によって明らかにされた月の形状と地形	かぐや特集号
R/V	並木則行	測地学会誌	月衝突盆地地形補償メカニズムの比較研究	かぐや特集号
RS	今村剛	測地学会誌	月電離層の電波掩蔽観測	かぐや特集号
TC-	諸田智克	Meteoritics and Planetary Science	Formation age of the 22-km-diameter lunar crater Giordano Bruno.	米国地球物理学連合(AGU)誌(GRL)
TC-	N.Asada	Advances in Geosciences	Computational Geology for Lunar Data Analysis	アジアオセアニア地球物理学会(AOGS)論文誌

上記のとおり、測地学会誌においては、「かぐや」特集号が発刊される予定である。また、UPIは、日本の惑星科学の英文論文誌EPSに論文が掲載される予定である。

広報・普及啓発

- (1) 国際天文学連合(The International Astronomical Union :IAU) 小惑星命名委員会において、入間市児童センター 佐藤直人さんがみつけた小惑星(10916)に対して、「かぐや」の子衛星にちなんだ“ Okina-Ouna”という名称の付与が認められた。

<http://www.cfa.harvard.edu/iau/lists/NumberedMPs010001.html>

- (2) 7月18日から8月23日まで秋葉原で実施されるグリーンフェスティバルの共催として、Fly me to the Moon in AKIBA—月周回衛星「かぐや」と今後の月探査と題した、「かぐや」の成果を中心とする月探査プロモーション活動を実施。特に7月18-19日の両日は、講演会および特別展示を実施。<http://www.sayonara-kaguya.jp>

- (3) 7月24-25日のJAXA相模原キャンパスの一般公開の一環として、相模原市立博物館と協力し、「かぐや」映像を用いたデジタルプラネタリウム用の番組—3D MOONの特別試写を実施

まとめ

月周回衛星「かぐや」(SELENE)は、平成21年6月11日に月面への制御落下を実施し、観測運用を終了した。また、JAXAにおいてプロジェクトとしての評価のまとめを行った。

補足

後期運用計画

期間		H20.11月1日～H21.1月31日	H21.2月1日～	～H21.6月11日
軌道		100km運用	低高度(50-20km)運用※1	落下運用
期待される成果	主目的	・ガンマ線分光計(GRS)による元素分布観測。(元素分布の所期のデータ収集) →平成20年12月末で取得を完了。	・月磁場観測装置(LMAG)、プラズマ観測装置(PACE)による月の磁場の3次元的分布及びミニ磁気圏に関するデータ取得。 →高度50kmで月磁場、プラズマ環境の3次元分布の観測を2月1日からほぼ2ヶ月間、取得を完了。 →さらに高度を下げ、ミニ磁気圏のある領域(南極エイトケン盆地)で、近月点高度10-30km程度での観測を4月から実施。その後、観測運用を6月11日まで継続。	・月の表側の目標地域へ落下運用
	オプション	・GRS以外の観測機器については科学観測データの高度化、品質向上。 ・南極の夏などこれまで観測されていなかった季節のデータの取得。	・他の観測機器については、観測機器の温度、地上系の制約の範囲で観測。 ・HDTVによる、より鮮明な月面の撮影。 →高度10kmの超低高度での鮮明な映像の取得を実施。	・落下運用直前の日照地域でのHDTVの静止画像、地形カメラなどの撮影を実施

※1 リレー衛星(おきな)については、H21.2月12日に落下

観測機器の運用結果

元素分布	XRS	初期チェックアウトにおいて、4枚のCCDを用いた観測時に計測ノイズが増加することが判明した。地上での再現試験結果等により、X線CCDの放射線ダメージにより、X線強度が高く観測されるケースが多く検出されたものと推定した。加えて、定常運用期間中太陽活動レベルの低い状態が継続し、必要なX線強度のデータが取得できなかった。このため、後期運用においても観測を継続し、所期データの取得を試みたが、太陽活動レベルの低い状況が継続した。
	GRS	平成20年2月から観測データに異常が見られた不具合は、データ解析の結果、極低温となる高圧印加部位にコンタミが付着し、微小なリーク電流が生じたことで検出器出力信号にノイズが乗ったことが原因と推定した。調査過程で不具合は解消し、運用を再開した。観測データが異常となる事象による観測を中断した約4ヶ月を除き、定常運用期間を通して観測データを取得した。後期運用で欠測期間を補完するための観測を行った後、追加観測を実施した。
鉱物分布	MI	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。
	SP	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。
地形表層	TC	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。
	LALT	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。
	LRS	平成20年9月、観測モードに移行できない不具合が発生した。原因究明を継続しており、電子回路部のサウンダー基板に異常があることが判明している。平成21年2月19日より、低高度での自然電波モードでの追加観測を実施した。
重力	RSAT	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。2月12日におきなほ月面に落下し、ミッションは完了した。
	VRAD	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。

観測機器の運用結果

環境	LMAG	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。
	PACE	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。
	CPS	CPSについては不具合が発生した2つの検出器を除き所定期間の観測データを取得した。なお不具合の原因については、地上での再現試験の結果、+5V電源用レギュレータの故障により本来の電圧を発生していないことが原因と推定した。制御落以前の後期運用期間において、不具合が発生したCPS（HID及びLPD-He）の観測データ取得を試みたが、不具合が再現した。
	RS	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。
	UPI	定常運用期間を通して計画どおり観測データを取得することができた。後期運用で追加観測を行った。なお、20年6月、11月に2軸ある望遠鏡の駆動機構が異常となる事象が発生し、それ以降は2軸を固定して極紫外およびナトリウムを中心にした観測を実施した。
広報	HDTV	定常運用期間を通して、放射線損傷が少なかったため、計画以上の地球の出、入り、月の映像を取得できた。後期運用で追加の映像取得を行い、超低高度映像の撮影を実施した。