

推進2-1-2
(推進1-1-3)



月周回衛星「かぐや」(SELENE) プロジェクトに係る事後評価について

平成21年6月18日 初版
平成21年6月26日 A改訂

宇宙航空研究開発機構
SELENEプロジェクトチーム
佐々木 進 加藤 學



目次

	推進部会評価項目(事後評価)		
	a.評価	b.成否の要因に対する分析	c. 効率性
1. 「かぐや」(SELENE)の概要			
2. スケジュール			
3. 成果(アウトプット)	○		
4. 成果(アウトカム)	○		
5. 成果(インパクト)	○		
6. 成否の要因に対する分析		○	
7. プロジェクトの効率性に対する分析			○
8. そのほか			

1. 概要 - ミッションの概要

ミッションの概要

(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。

宇宙開発に関する長期的な計画

平成15年9月1日総務大臣 文部科学大臣 国土交通大臣

Ⅱ. 重点的に取り組む業務に係わる目標と方向

2. フロンティアの拡大②太陽系探査科学より引用

太陽系を理解する様々なアプローチのうち、科学衛星による直接探査が最も効果的な成果を挙げると期待される「太陽系形成の歴史を探る」こと及び「太陽、太陽系空間、惑星環境を探る」ことを重点的に推進する。

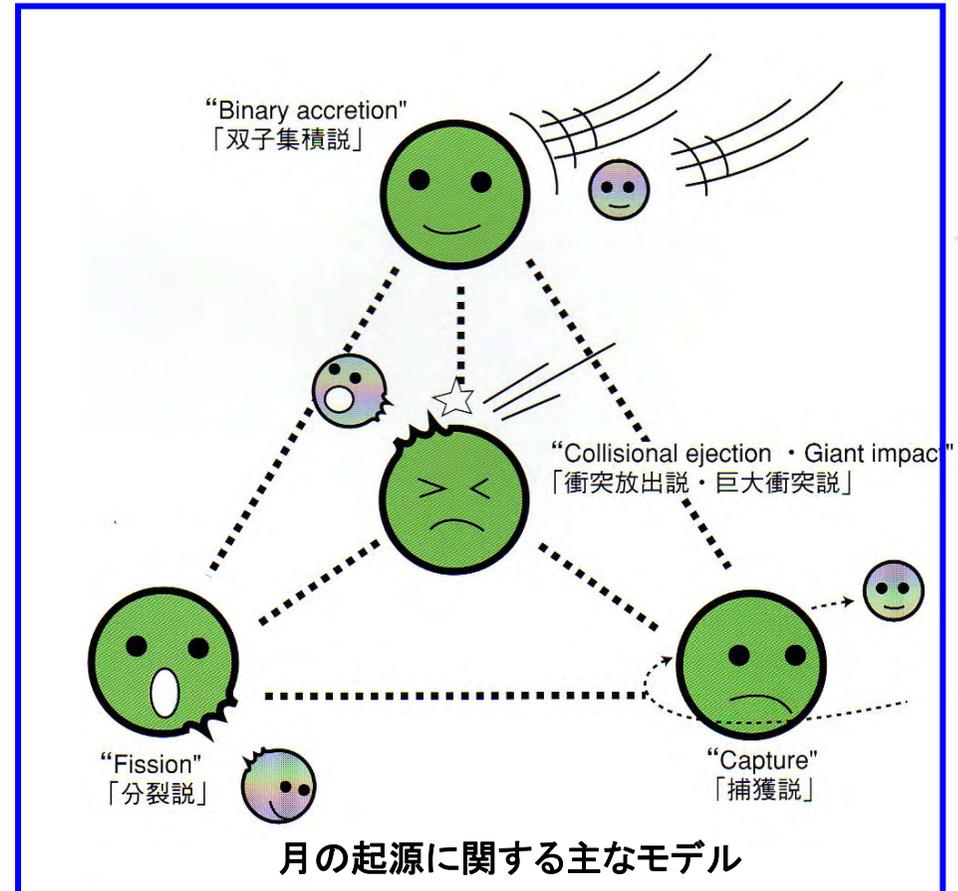
このため、月は地球の形成に深く係わり、地球型惑星の標準的形成・進化過程を保存しているため、月の起源と進化の解明を目指した月の科学探査を進める



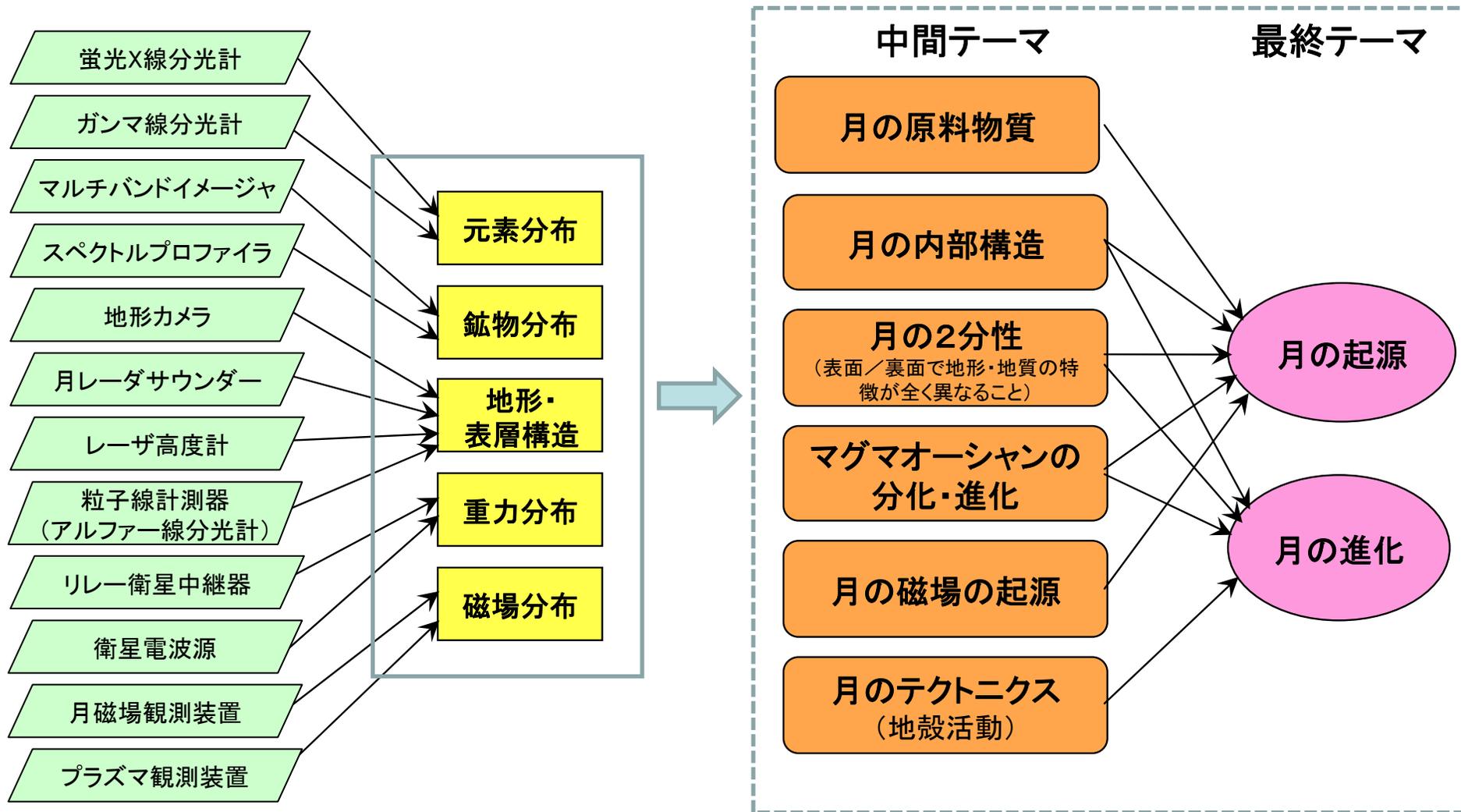
1. 概要 ーかぐや(SELENE)の月科学目標

下記の月科学目標を達成するための観測データを取得する。

1. 月の科学
月の起源と進化の解明
2. 月での科学
月面環境の解明
3. 月からの科学
太陽地球系プラズマ環境の解明

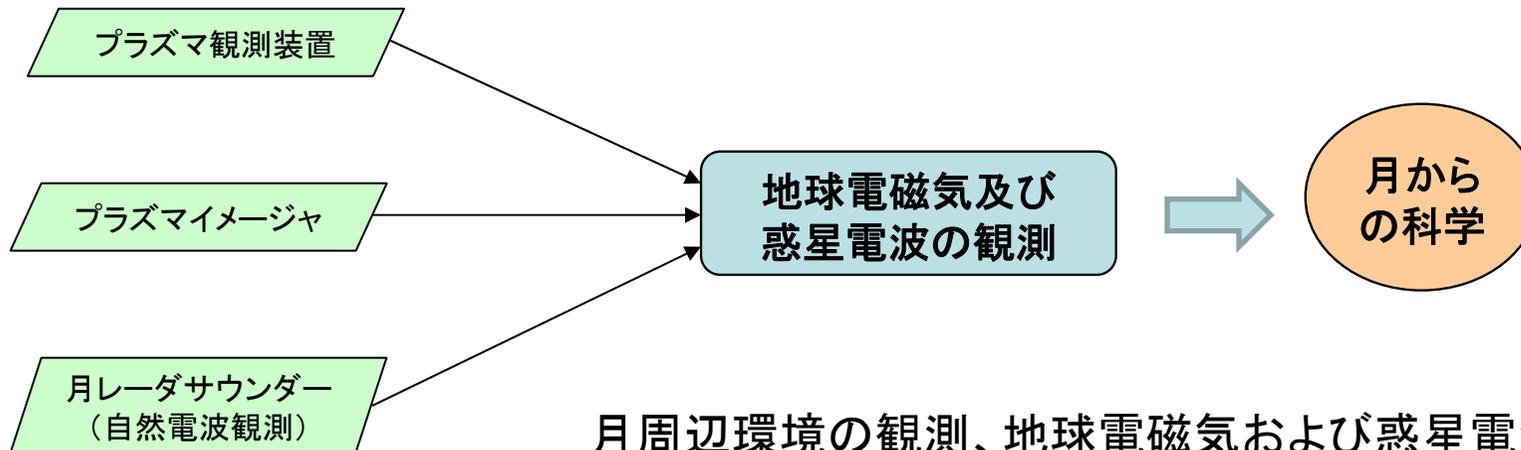
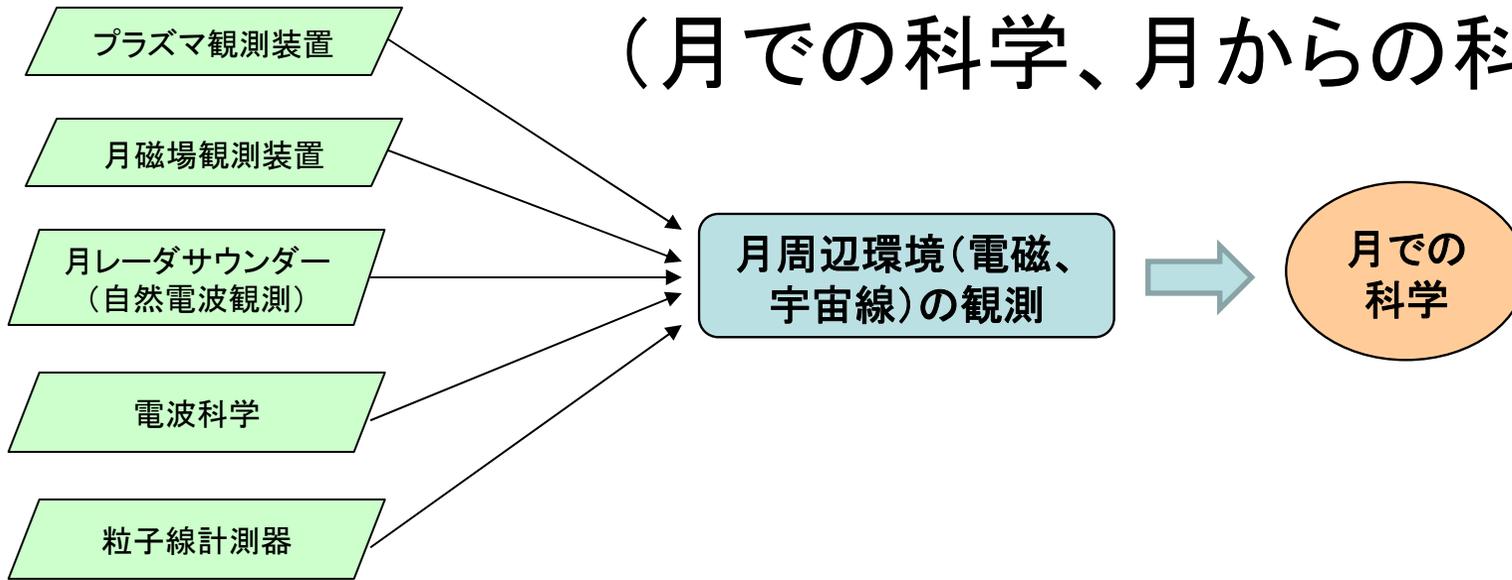


1. 概要 - 月科学 (月の科学)



月の科学 (月の起源と進化の解明に迫るために、元素分布、鉱物分布、地形・表層構造、重力分布、磁場分布を観測。この観測データを統合解析することにより、原料物質、内部構造などの中間テーマの研究を実施し、最終的には月の生成モデルの研究者との協力により起源と進化のなぞに迫る。

1. 概要 - 月科学 (月での科学、月からの科学)



月周辺環境の観測、地球電磁気および惑星電波の観測により、
月での科学、月からの科学の研究を行う。

1. 概要 - ミッションの目標

平成17年6月の推進部会において制定されたSELENEミッション成功基準

1) ミニマム成功基準

- ・ 月周回軌道に投入し、観測のための衛星運用(3軸姿勢制御、熱制御、軌道制御等)が行われること。
- ・ 「月の科学」にインパクトを与える観測データを取得すること。このため、月周回軌道(高度約100kmの極軌道)において、元素・鉱物分布、地形・表層構造、内部構造(重力場、磁場)の新しい知見に繋がる観測データを月が1回自転する期間取得すること。

2) フル成功基準

- ・ 月周回軌道(高度約100kmの極軌道)において、約1年間、「月の科学」、「月での科学」、「月からの科学」に大きく貢献するデータを取得すること。

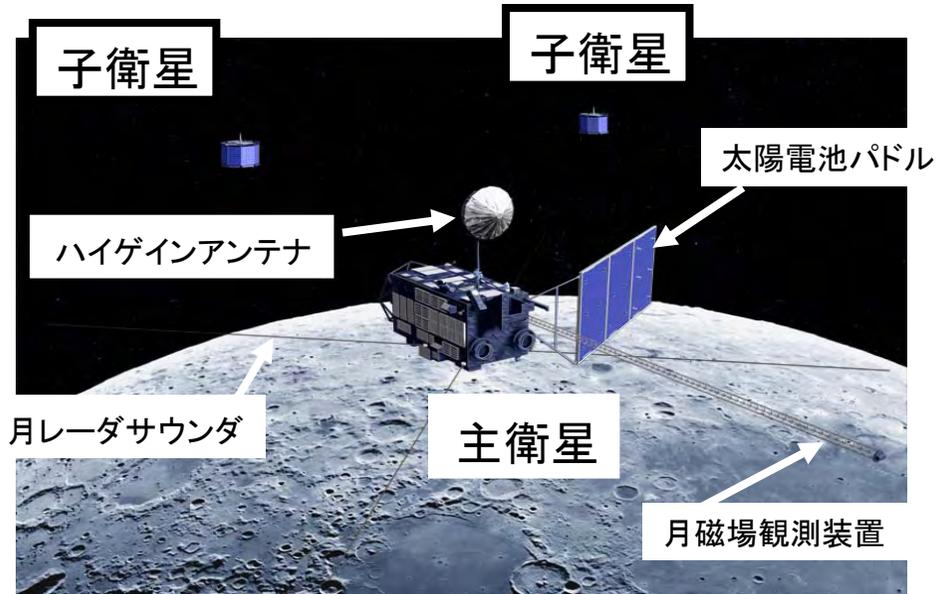
3) エクストラ成功基準

- ・ 約1年間の観測ミッションを達成した後、残存する推進薬を用いて、観測ミッション期間の延長や低高度での観測を実施すること。

1. 概要 - 科学目的 (観測ミッション)

観測項目		観測ミッション名称	観測内容
元素分布	1	蛍光X線分光計(XRS)	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、月表面の元素(Al, Si, Mg, Fe等)の分布を調べる。
	2	ガンマ線分光計(GRS)	月面から放射されるガンマ線を観測し、月表面の元素(U, Th, K, H等)の分布を調べる。
鉱物分布	3	マルチバンドイメージャ(MI)	月面からの可視近赤外光を9つの波長バンドで観測し、鉱物分布を調べる。
	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、月表面の鉱物組成を精度良く調べる。
地形・ 表層構造	5	地形カメラ(TC)	高分解能(10m)カメラ2台のステレオ撮像により、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程度まで)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(往復時間)から、地形の起伏、高度を精密に測定する。
月周辺 環境	8	月磁場観測装置(LMAG)	月周辺の磁気分布を計測し、月面の磁気異常を調べる。
	9	粒子線計測器(CPS)	月周辺における、宇宙線や宇宙放射線粒子、及び月面のラドンから放射される α 線を観測する。
	10	プラズマ観測装置(PACE)	月周辺における、太陽風等に起因する電子及びイオンの分布を測定する。
	11	電波科学(RS)	VRAD衛星から送信される電波の位相変化を測定し、希薄な月電離層を観測する。
	12	プラズマイメージャ(UPI)	月軌道から、地球の磁気圏及びプラズマ圏を画像として観測する。
重力分布	13	リレー衛星中継器(RSAT)	月裏側を飛行中の主衛星の電波を「おきな」(リレー衛星)で中継する。これを地球局でドップラ計測し、主衛星の軌道の擾乱を観測することによって、月裏側の重力場データを取得する。
	14	衛星電波源(VRAD)	「おきな」(リレー衛星)及び「おうな」(VRAD衛星)に搭載するS,X帯電波源を対象に、地球局による相対VLBI観測を行い、各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。(VLBI: 超長基線電波干渉計。電波の経路差から電波源の位置を正確に求める。)
精細画像	15	高精細映像取得システム(HDTV)	月面上の「地球の出」等のハイビジョン撮影を行う。

1. 概要 - 諸元



月周回軌道飛行中のコンフィギュレーション

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

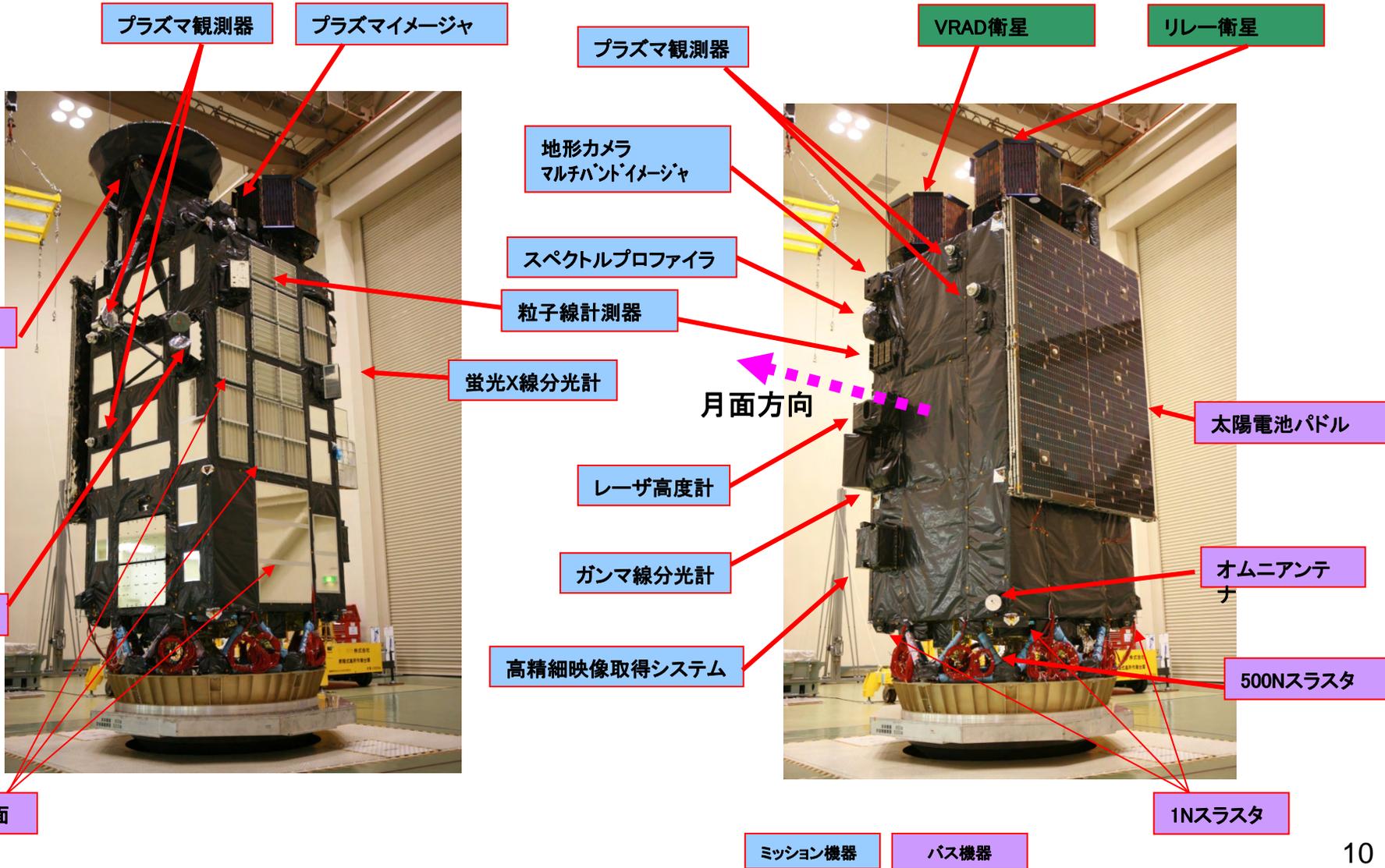
(子衛星)

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

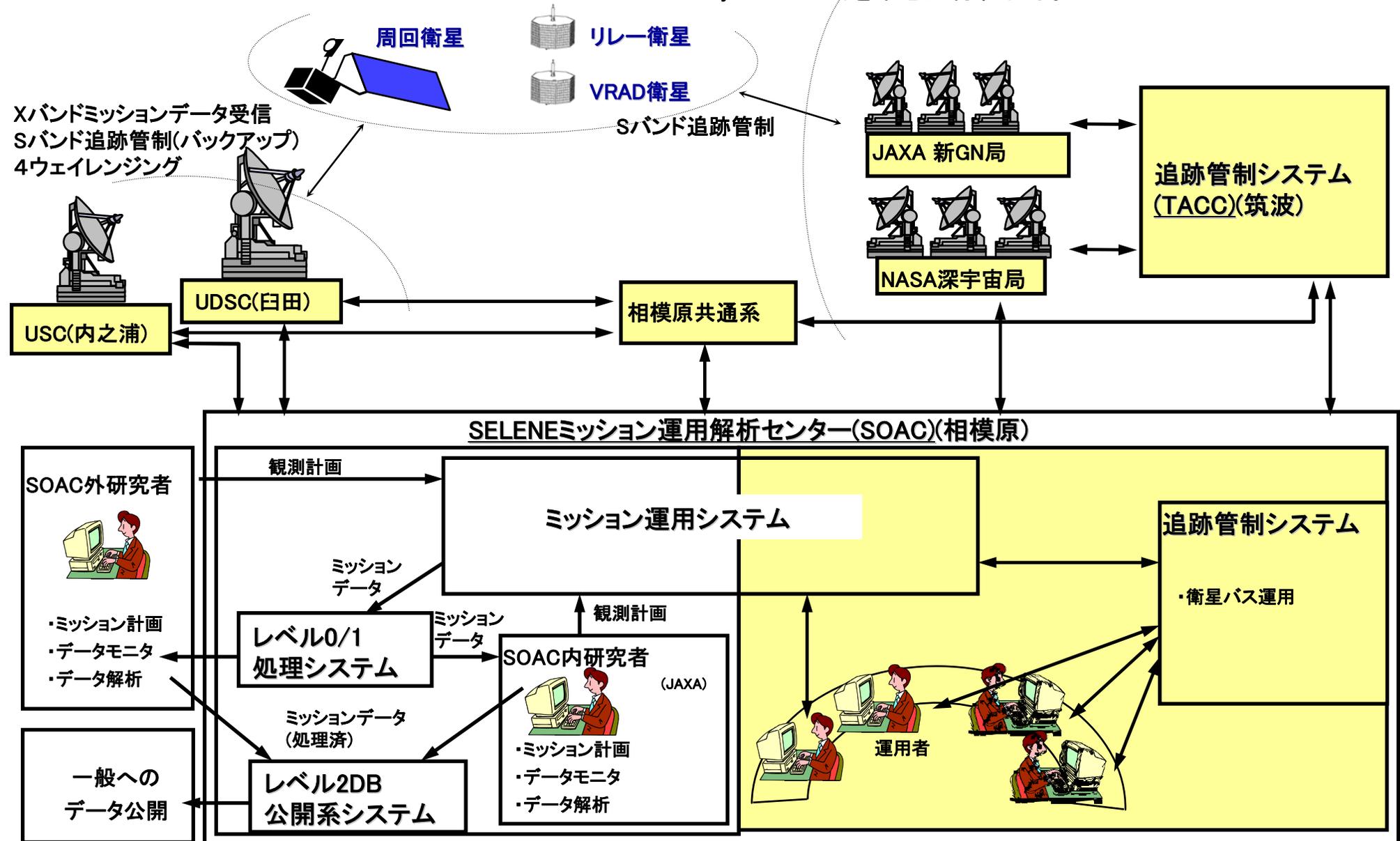
VLBI: Very Long Baseline Interferometry

1. 概要 - 機器配置



1. 概要 - 地上システム

SELENEの運用は、相模原キャンパスに設置されたSELENEミッション運用解析センター(SOAC; SELENE Operation and Analysis Center)を中心に行われる。



略語注) XRS: 蛍光X線分光計 GRS: ガンマ線分光計 CPS: 粒子線計測器 LRS: 月レーダサウンダ
 LMAG: 磁力計 PACE: プラズマ観測器 UPI: プラズマイメージャ
 TC: 地形カメラ SP: スペクトルプロファイラ MI: マルチバンドイメージャ
 LALT: レーザ高度計 VRAD: 衛星電波源 RSAT: リレー衛星搭載・対向中継器

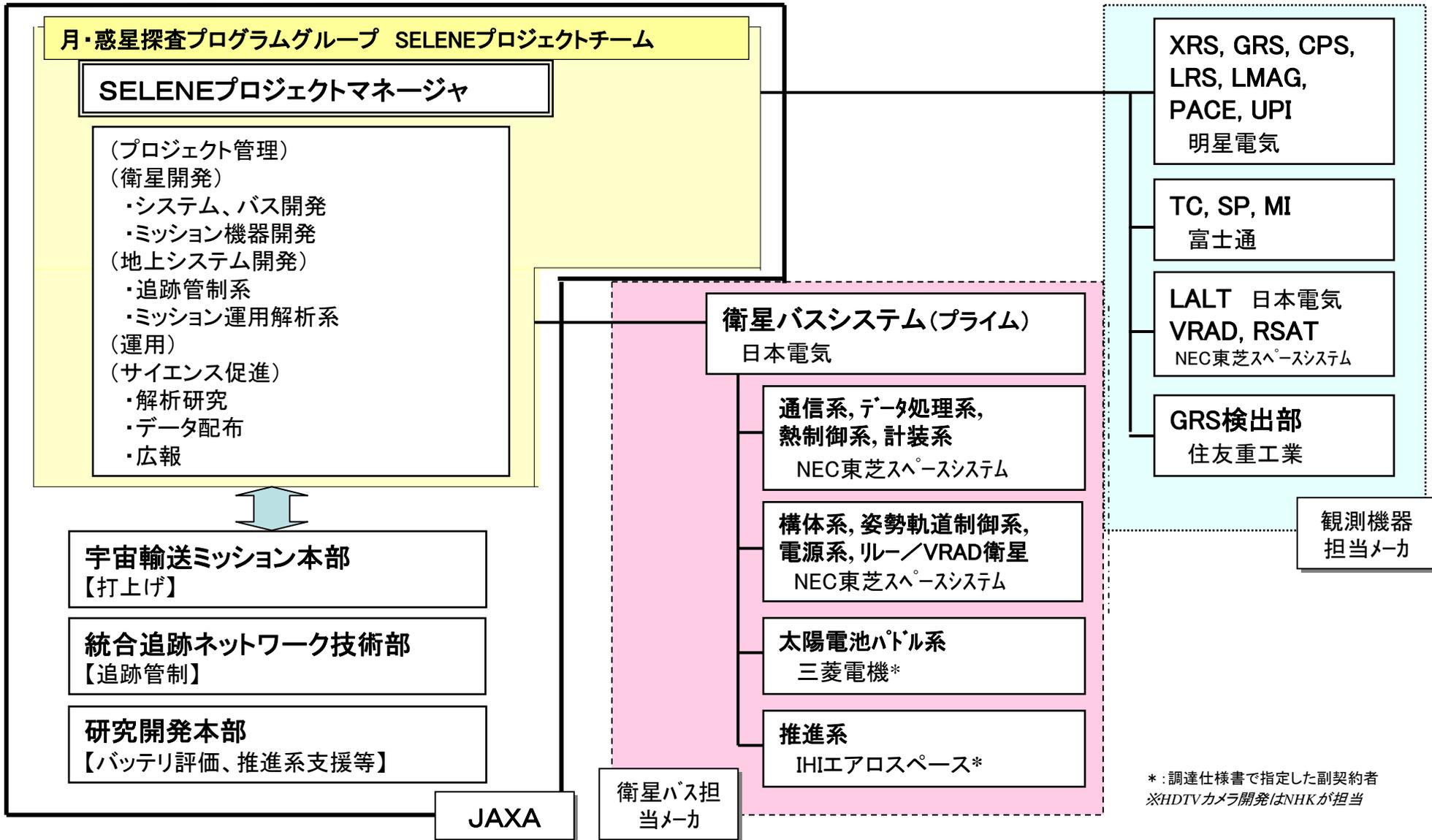
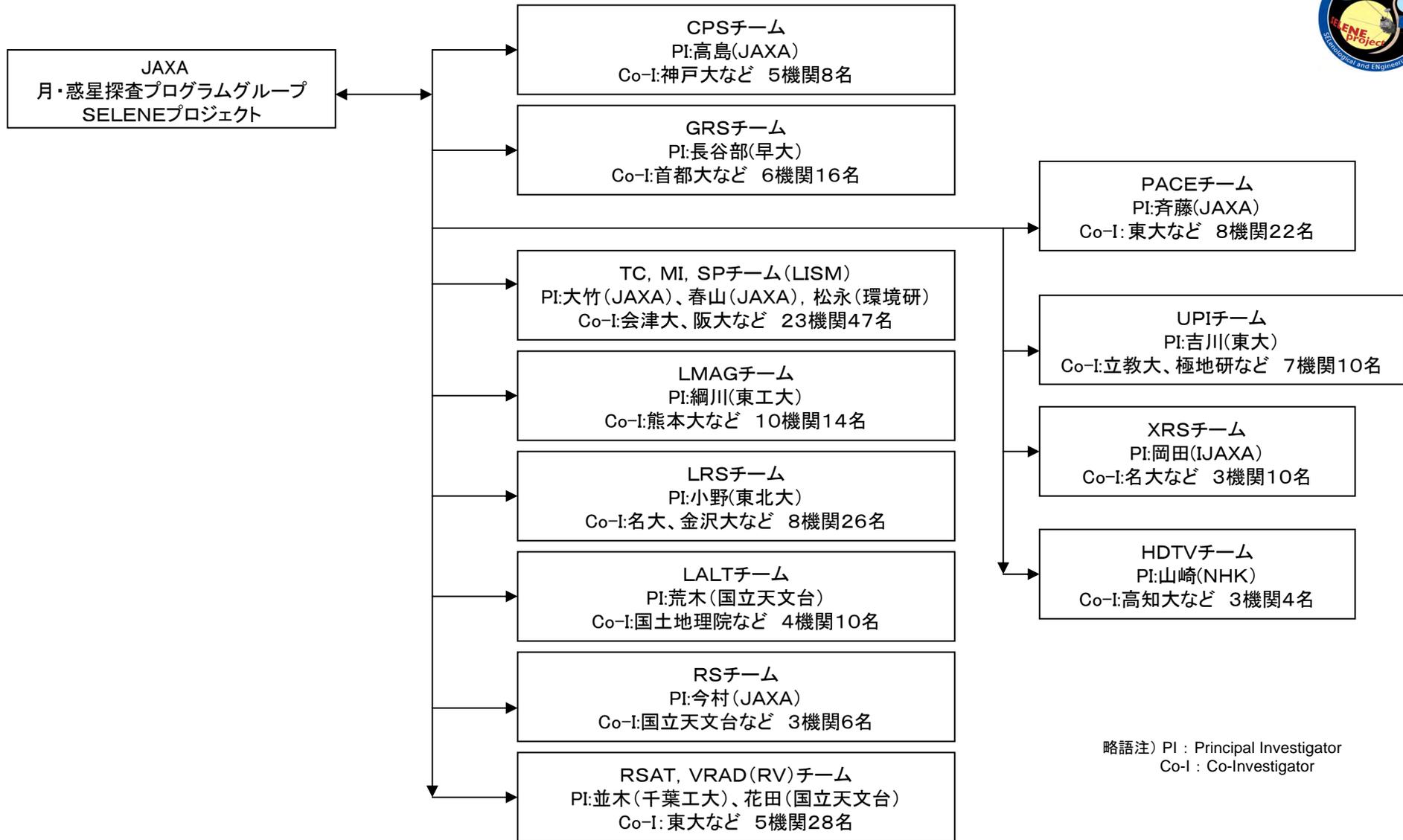


図1 「かぐや」開発体制(組織名等は平成21年現在)



※1 複数の機器チームに所属している研究者は重複カウントせず。学生は含んでいない。

※2 海外研究者は、フランス、ドイツ、韓国、中国、米国、スウェーデン、イギリスから参加。

図2 「かぐや」観測機器チーム(組織名等は平成21年現在)

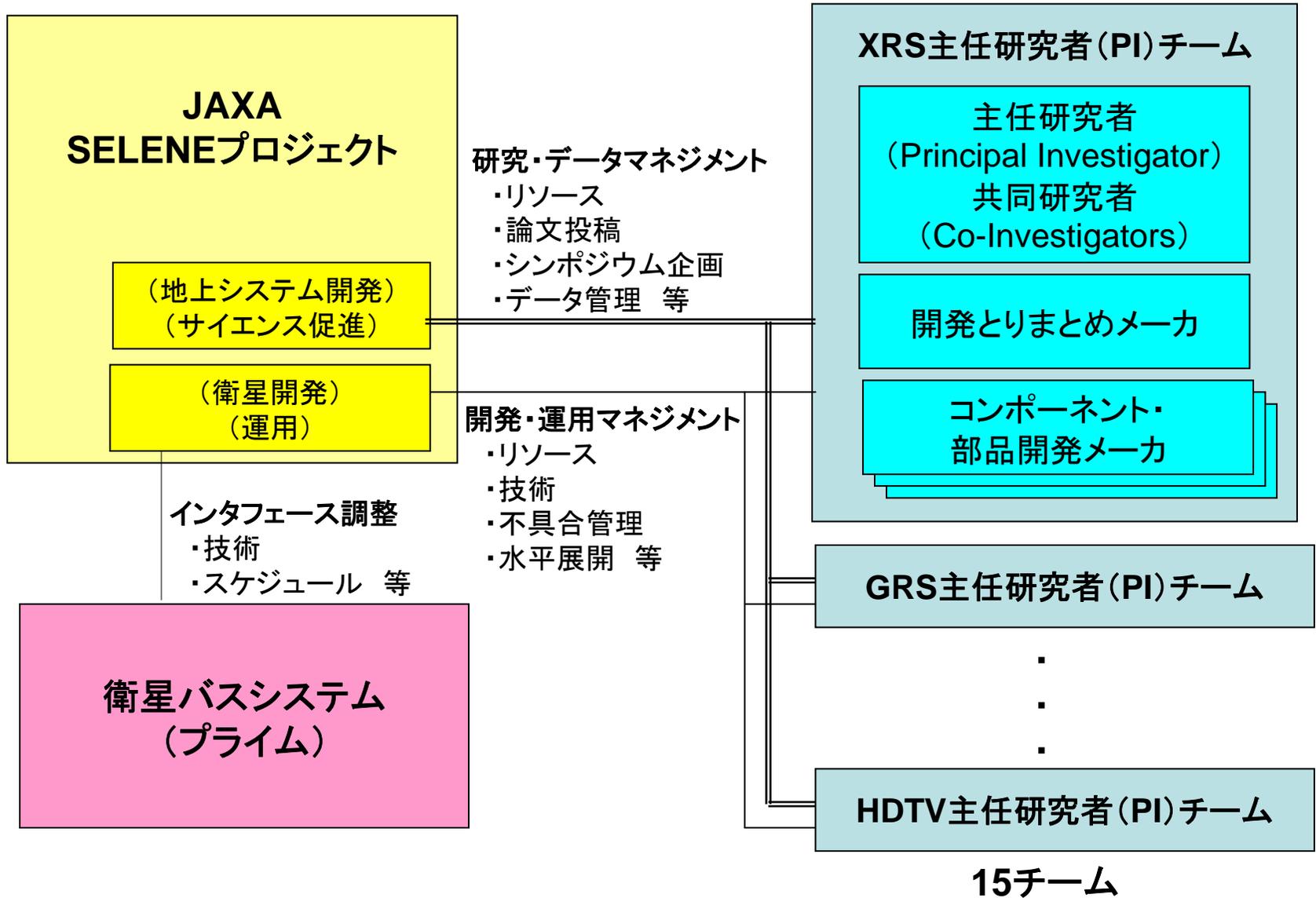


図3 SELENEプロジェクトと主任研究者 (PI) チームとの協力関係

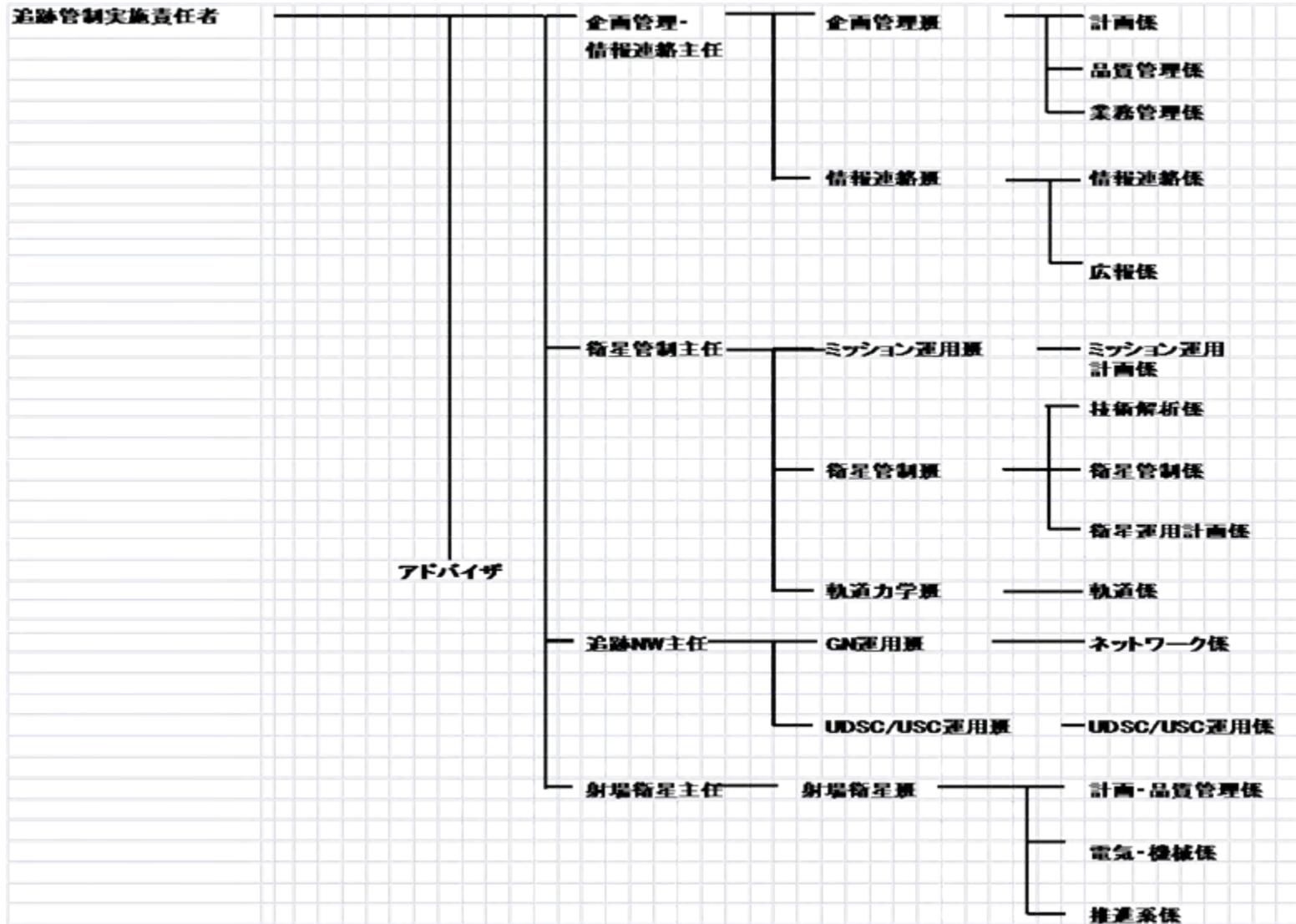


図4 打ち上げ時のJAXAの体制(追跡管制隊)

※衛星、地上システムの開発・運用で約150名が従事。この下で、メーカーが従事。ただし、宇宙輸送ミッション本部による打ち上げサービス調達など事務作業にかかわる人数を含んでいない。

2. スケジュール

年度	FY11	FY12	FY13	FY14	FY15	FY16	FY17	FY18	FY19	FY20	FY21
主要マイルストーン		開発移行前 審査	基本設計 審査	詳細設計 審査				開発完了 審査	▲ 打上げ		▲ 制御 落下
開発フェーズ		基本設計	詳細設計	維持設計							
1. 衛星	EM設計・製作・試験		PFM設計・製作・単体試験			システムPFT			射場作業		
2. ロケット						機体製作			射場作業		
3. 地上系 (追跡管制系, データ解析・公開系等)	設計・製作・試験								定常運用 移行審査	定常運用 終了審査	ミッション 完了審査
4. 運用							運用計画・準備		▽ C/O	定常運用	後期運用

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

2. スケジュール - 開発経緯

- ・平成7年8月の宇宙開発計画見直しにおいて、月の科学データ取得と月面着陸技術習得を目標とした月周回衛星・着陸実験衛星の研究着手を要望し、了承された。
- ・平成9年8月の宇宙開発計画見直しにおいて、月周回衛星・月面着陸実験機等から構成される月探査衛星を平成15年度頃の打上げを目標に開発研究着手を要望し、了承された。
- ・平成10年8月の宇宙開発計画見直しにおいて月周回衛星(SELENE)の開発着手を要望し、了承された。
- ・平成11年12月の宇宙開発計画見直しにおいて、打上げ年次を平成16年度に変更した。
- ・平成12年度に、H-IIロケットをはじめとする一連の事故・不具合の発生を踏まえて、より確実な開発が求められることになった。これをうけて、SELENEにおいても、月面軟着実験については研究を十分に行うこととし、月の周回観測などに特化することを平成12年8月の計画調整部会において提案し、了承された。
- ・平成15年7月の計画・評価部会において、SELENEの科学的・工学的目標の設定などの確認が行われ、平成17年の打上げの妥当性、およびハイビジョンカメラの搭載が了承された。
- ・平成17年6月の推進部会において、SELENEミッション成功基準について審議され、計画は妥当である旨判断された。
- ・平成19年9月5日の宇宙開発委員会において、SELENEの打上げについては平成19年9月13日とすることを報告した。

2. スケジュール - 運用経緯

- ① 平成19年9月14日に打上げ、同年10月18日に観測軌道に投入、10月20日にクリティカルフェーズを完了した。途中、平成19年9月29日に「かぐや(SELENE)」ハイビジョンカメラにより11万Km彼方から遠ざかる地球を撮影し、公開した。
- ② 平成19年12月20日まで、バス系初期機能確認、ミッション機器の初期機能確認を実施し、ミッションデータの収集・記録等の観測ミッションに係る機能や特性等を把握した。
- ③ 初期機能確認において得られたデータを処理、解析し、観測機器の初画像等を順次公開した。
 - ・11月7日、14日にハイビジョンカメラの画像を公開
 - ・11月9日、4ウェイドップラーにより、月の裏側の重力場の直接的観測を世界で初めて実施したことを公表
 - ・11月16日、地形カメラ、マルチバンドイメージャの初期画像を公開
 - ・11月28、月磁場観測装置、月レーダサウンダーの初期データを公開
- ④ 平成19年12月21日から平成20年10月30日まで定常運用を実施し、ミニマム成功基準を達成した。あわせて、元素分布の観測を除き、フル成功基準に対応した観測データ取得を完了した。
- ⑤ 平成20年11月1日から平成21年1月31日まで高度100kmでの後期運用を実施し、元素の補完観測を行い、フル成功基準を達成した。あわせて、ハイビジョンカメラによる満地球の出、入り、月面などの撮影を行った。
- ⑥ 平成21年2月1日から同年4月16日まで高度50kmでの後期運用を実施し、磁場分布・プラズマ環境を中心にした観測を行い、エキストラ成功基準を達成した。また、同年2月13日にリレー衛星「おきな」は月の裏側に落下し、裏側の重力分布の観測ミッションを完了した。あわせて、ハイビジョンカメラによる地球のダイヤモンドリング、月面などの撮影を行った。
- ⑦ 平成21年4月17日から同年6月10日まで更なる低高度(近月点10-30km)での後期運用を実施し、磁場分布・プラズマ環境を中心にした観測をさらに行った。あわせて、ハイビジョンカメラなどによる超低高度観測を実施した。
- ⑧ 平成21年6月11日午前3時25分に主衛星を月の表側のGILLクレータ付近に制御落下させ、ミッションを完了した。

3. 成果(アウトプット)

ミニマム成功基準

月周回軌道に投入し、観測のための衛星運用(3軸姿勢制御、熱制御、軌道制御等)が行われること。

技術開発ミッション	成功基準の要求	評価
月周回軌道への投入	月軌道投入ができること	○: 左記を達成
月周回中の3軸制御、熱制御及び追跡管制運用	観測のための衛星運用(3軸制御、熱制御、軌道制御など)が行われること。	○: 1年間左記を達成

※技術開発・運用結果については、日本航空宇宙学会の学会誌に連続解説として掲載した。また、ISTS浜松2008の「かぐや」特別セッションにても報告した。

3. 成果(アウトプット)

ミニマム成功基準

「月の科学」にインパクトを与える観測データを取得すること。このため、月周回軌道(高度約100kmの極軌道)において、元素・鉱物分布、地形・表層構造、内部構造(重力場、磁場)の新しい知見に繋がる観測データを月が1回自転する期間取得すること。

ミッション	成功基準の要求	評価
元素・鉱物分布	新しい知見に繋がる観測データを月が1回自転する期間取得する	○: 元素・鉱物分布のデータを平成19年12月末から平成20年1月末まで高度100kmで取得
地形・表層構造		○: 地形・表層構造のデータを平成19年12月末から平成20年1月末まで高度100kmで取得
内部構造(重力場、磁場)		○: 元素・鉱物分布のデータを平成19年12月末から平成20年1月末まで高度100kmで取得

3. 成果(アウトプット)

フル成功基準(月科学)

月周回軌道(高度約100kmの極軌道)において、約1年間、「月の科学」、「月での科学」、「月からの科学」に大きく貢献するデータを取得すること。

分類	観測対象	観測機器	評価
月の科学	元素分布	XRS, GRS	<○:達成> 蛍光X線分光計(XRS)はCCDの放射線ダメージ及び太陽活動が静穏であったことによりデータ取得は限定的であったものの、ガンマ線分光計(GRS)により元素分布に関する所望のデータを取得した。
	鉱物分布	MI SP	<○:達成> マルチバンドイメージャ(MI)、スペクトルプロファイラ(SP)により、所期の観測を実施し、全球のMIの分光データおよびSPのスペクトルデータを取得した。
	地形	TC LALT	<○:達成> 地形カメラ(TC)、レーザー高度計(LALT)により、所期の観測を実施し、全球の地形・高度データを取得した。
	表層構造	LRS CPS/ARD	<○:達成> 月レーダサウンダー(LRS)のサウンダー観測によって全球の表層探査のデータ、粒子線計測器(CPS)のARDによる月面表層からのアルファ線の全球にわたる観測データを取得した。
	磁場異常	LMAG PACE	<○:達成> 月磁場観測装置(LMAG)による全球にわたる磁場の観測データおよびプラズマ観測装置(PACE)の電子反射計による月面からの反射電子の観測により全球磁気異常マップの作成に必要なデータを取得した。
	重力分布	RSAT VRAD	<○:達成> リレー衛星中継器(RSAT)の2wayおよび4wayドップラー観測により初めて月全球の重力計測データを取得した。また相対VLBI用電波源(VRAD)の相対VLBI観測のデータも取得しており、高精度な重力場モデル作成に必要な観測データを取得した。

3. 成果(アウトプット)

フル成功基準(月科学)

月周回軌道(高度約100kmの極軌道)において、約1年間、「月の科学」、「月での科学」、「月からの科学」に大きく貢献するデータを取得すること。

分類	観測対象	観測機器	評価
月での科学	月周辺環境(電磁、宇宙線)の観測	LMAG PACE CPS/PS LRS RS	<p><○:達成> CPS/PSについては5つの検出器のうち2つが継続的に運用できなかったもののそれ以外の検出器の継続観測を優先させるとともに、LMAGによる磁場計測、PACEによる電子、イオンの観測、LRSによる自然電波観測、RSによる電波科学観測、高エネルギー陽子・電子観測を実施した。これらにより、十分な月周辺環境の観測データを取得した。</p>
月からの科学	地球電磁気及び惑星電波の観測	LRS UPI PACE	<p><○:達成> LRSの自然電波観測、プラズマイメージャ(UPI)による地球磁気圏の観測、PACEによる電子、イオンの観測により、プラズマ物理/惑星電波について十分なデータを取得した。</p>

3. 成果 (アウトプット)

エクストラ成功基準 (月科学)

約1年間の観測ミッションを達成した後、残存する推進薬を用いて、観測ミッション期間の延長や低高度での観測を実施すること。

分類	観測対象	観測機器	評価
月での科学	月周辺環境 (電磁、宇宙線) の観測	LMAG PACE CPS/PS LRS RS	<p><○:達成> LMAGによる磁場計測、PACEによる電子、イオンの観測を高度50kmで約2カ月間のデータ取得を完了した。さらに、50kmよりも低高度において、LMAGによる磁場計測、PACEによる電子、イオンの観測、LRS自然電波モードにより電波観測も実施し、1か月分のデータ取得を完了した。さらに、南極エイトケン盆地付近については、超低高度 (10-30km) でのLMAGによる磁場計測、PACEによる電子、イオンの観測、LRS自然電波モードにより電波観測も実施し、1か月分のデータ取得を完了した。</p>
月の科学	元素分布、鉱物分布、地形、表層構造、磁場異常、重力分布	XRS, GRS, MI, SP, TC, LALT, LRS, LMAG, CPS/ARD, RSAT, VRAD	<p><○:達成> 高度50kmおよび超低高度での観測を継続し、詳細なデータ取得を完了した。</p>

4. 成果(アウトカム)

月科学及び月利用調査 -月の科学、月での科学、月からの科学のためのデータの取得

- SELENEの観測データは現在、世界で最も高精度なデータであり、日本が世界に伍して月の起源と進化の解明に迫る情報を有していることになる。
- 初期科学成果の状況
 - 一国内外学会学術講演会で「かぐや」特別セッションの実施(打ち上げ後で12回:月惑星探査科学会(LPSC)、国際隕石学会、惑星科学会、宇宙科学技術連合講演会、電気通信学会、ISTSなど)
 - 一打ち上げ後の査読付き論文としては17件が発行された。さらに、15件が受理され、出版を待っている状況である(平成21年6月5日現在)

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面の元素分布	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エイク領域の現象	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)

4. 成果(アウトカム)

月科学及び月利用調査

-月の科学、月での科学、月からの科学のためのデータの取得

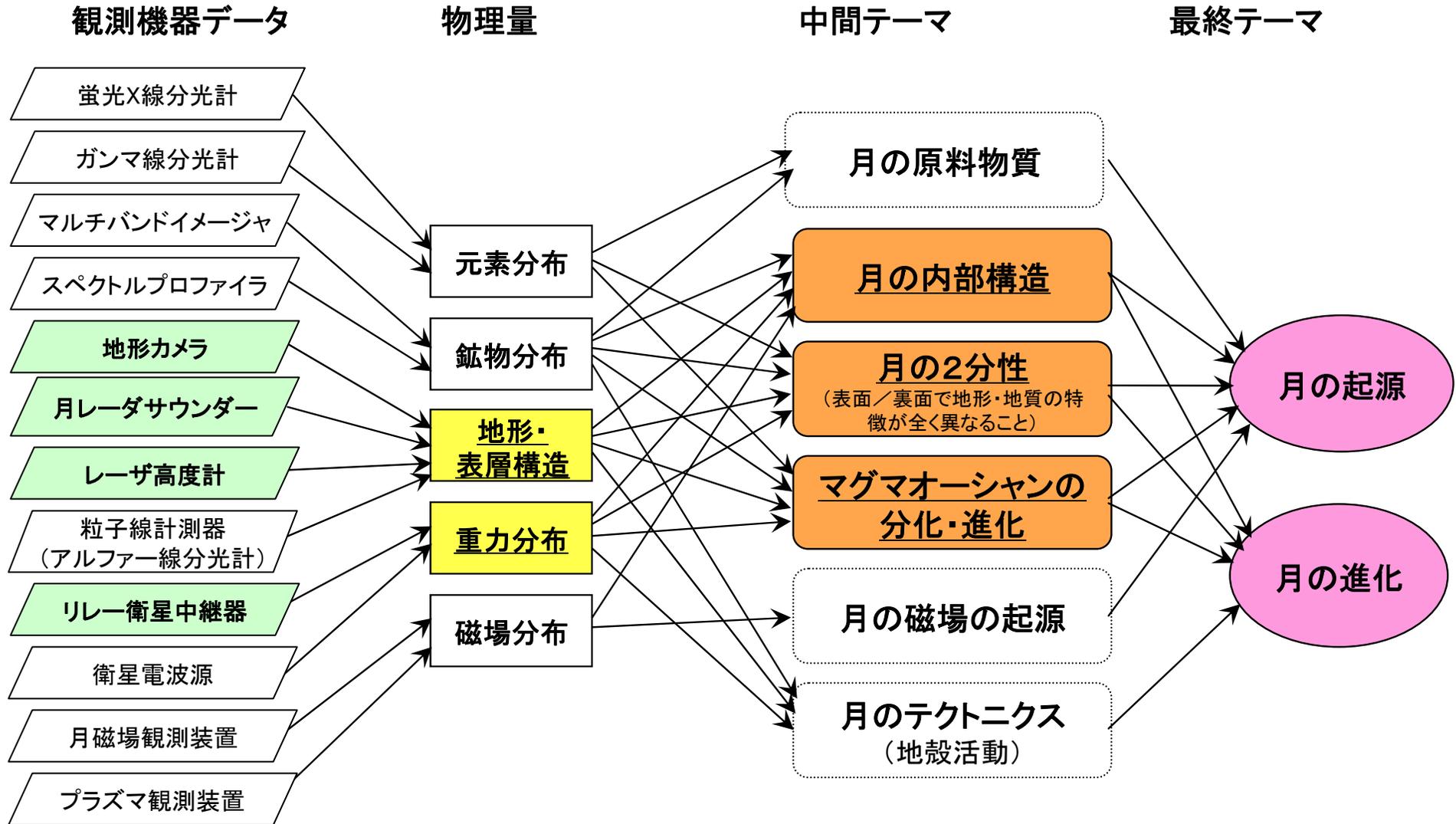
米科学誌「サイエンス」特別編集号

1. 表紙: 地形カメラによるモスクワの海画像
2. 論評 (perspective): かぐやの研究に関する論評
3. 研究論文 (Reports)



- 1) Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers under the Nearside Maria of the Moon
月周回衛星「かぐや(SELENE)」搭載の月レーダサウンダーによる月の表側の海の部分の地下構造探査
- 2) Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry
月周回衛星「かぐや」搭載レーザ高度計(LALT)によって得られた月の全球形状および極域地形図
- 3) Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya)
「かぐや(SELENE)」の4ウェイドップラ観測から得られた月の裏側の重力場
- 4) Long-lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera
月周回衛星「かぐや(SELENE)」搭載の地形カメラによる月の裏側のマグマ噴出活動の長期継続

サイエンス掲載論文による月の科学に関する成果



サイエンスに掲載された論文においては、オレンジ色の中間テーマに関する研究成果として報告されたが、これらの個別の成果では、最終テーマである月の起源の説を同じ方向で強化するというものではないため、統合解析研究を進める必要がある。