

「かぐや」で得られた科学・工学成果



「空の日・宇宙の日」記念特別講演会
平成22年9月14日

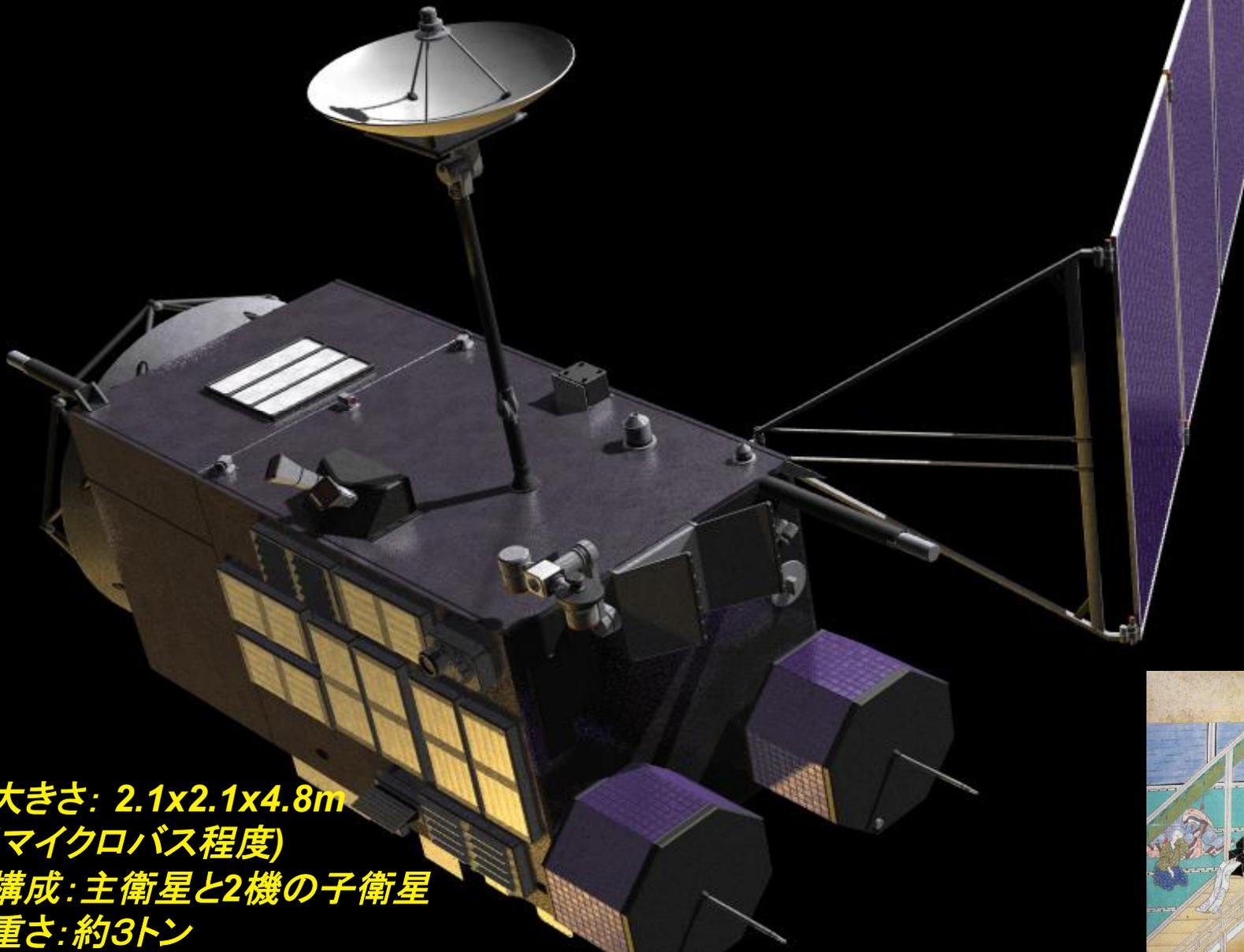


© JAXA/NHK

講演の内容

1. "かぐや"の概要: 目的、構成、運用
2. "かぐや"で得られた主な科学成果
3. "かぐや"を支えた主な工学技術
4. "かぐや"後の展望

月探査機“かぐや”



たけとり物語

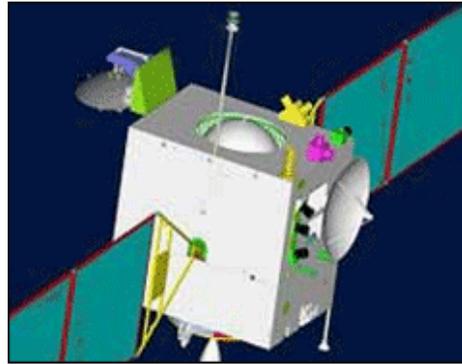


大きさ: 2.1x2.1x4.8m
(マイクロバス程度)
構成: 主衛星と2機の子衛星
重さ: 約3トン

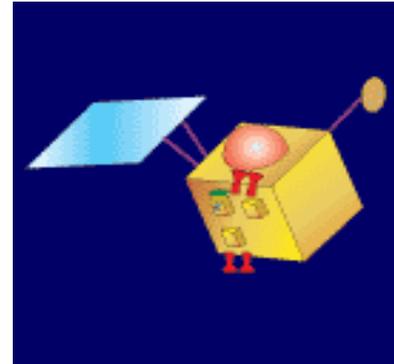
最近の世界の月探査ミッション



かぐや



嫦娥1号



チャンドラヤーン1号

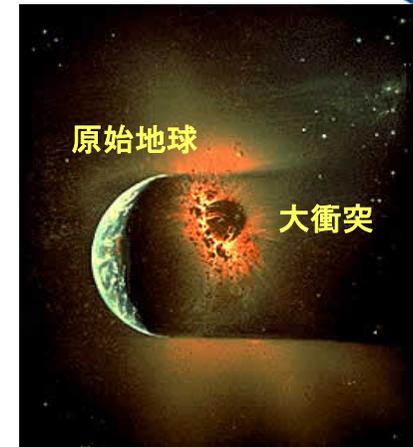
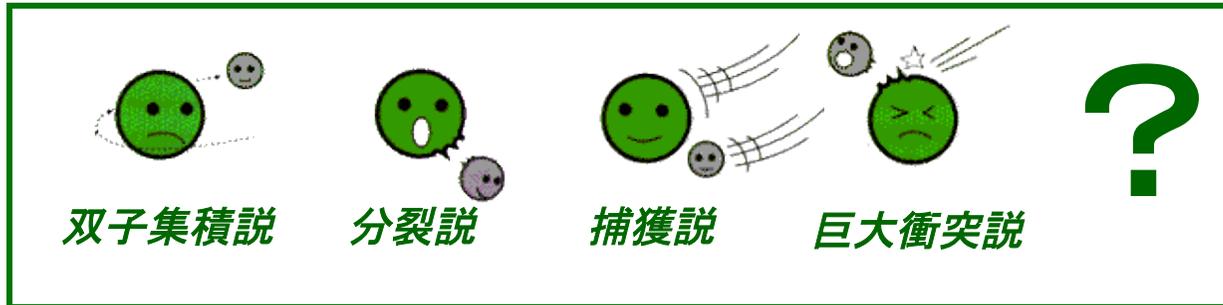


LRO

| | かぐや(日本) | 嫦娥1号(中国) | チャンドラヤーン1号(インド) | LRO(米国) |
|---------|---------|----------|-----------------|---------|
| 打上げ時質量 | 2,885kg | 2,350kg | 1,050kg | 1,000kg |
| 月周回軌道高度 | 100km | 200km | 100km | 50km |
| 定常運用期間 | 1年間 | 1年間 | 2年間 | 1年間 |
| 打上げ時期 | 2007年9月 | 2007年10月 | 2008年4月 | 2009年6月 |

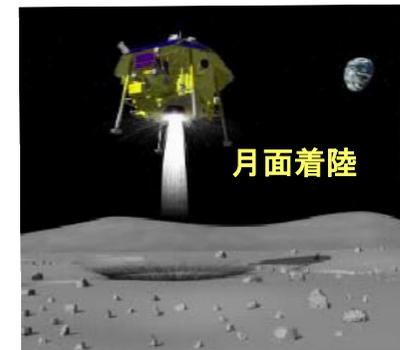
“かぐや”の目的

1. 月がどのように生まれ、どのように進化して今のようになったのか(起源と進化)の解明



原始地球に火星くらいの大天体が衝突？

2. 将来、人類が月で活動したり、月を利用するための調査(月のどこに基地を作れば良いか？等)



月利用のための探査技術

3. 月探査・開発のための技術の習得

4. 宇宙科学・開発の面白さの社会へのアピール

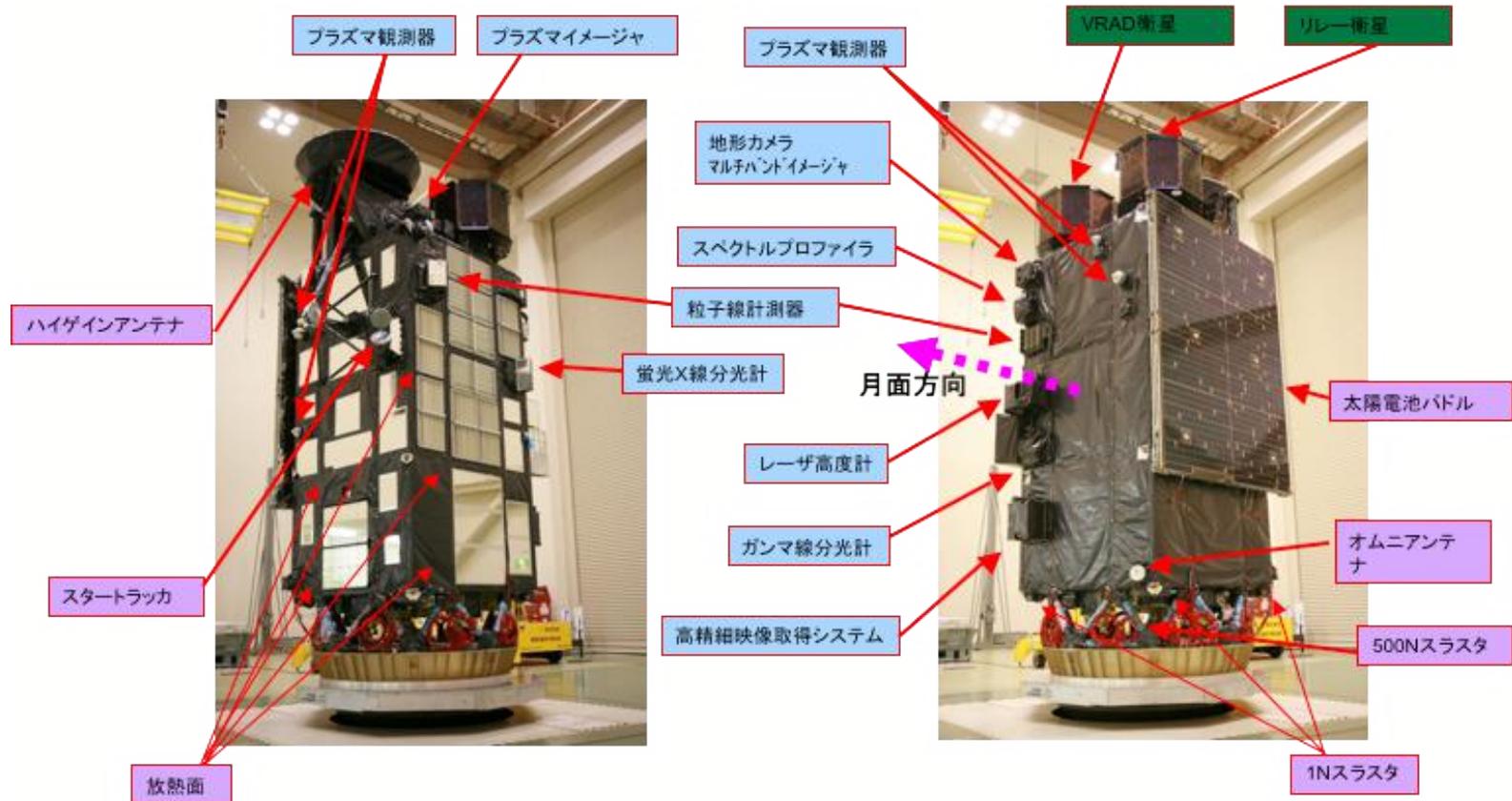


宇宙への興味と感動

主な観測機器と配置



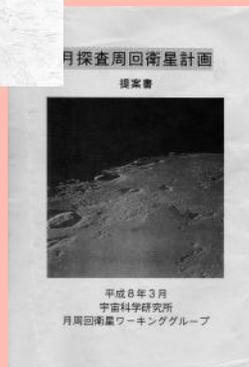
- 表面の元素、鉱物の組成を調べる機器・・・4台
- 表面の地形と地下の構造を調べる機器・・・3台
- 重力場を調べる機器・・・2台
- 環境を調べる機器・・・5台 (1台は重力場用機器と同じ機器)
- 広報用機器 (ハイビジョンカメラ)・・・1台



“かぐや”の歴史

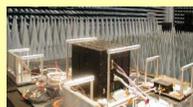
1995-1998年

準備・提案



1999-2004年

衛星本体・観測機器の製作



2005-2006年

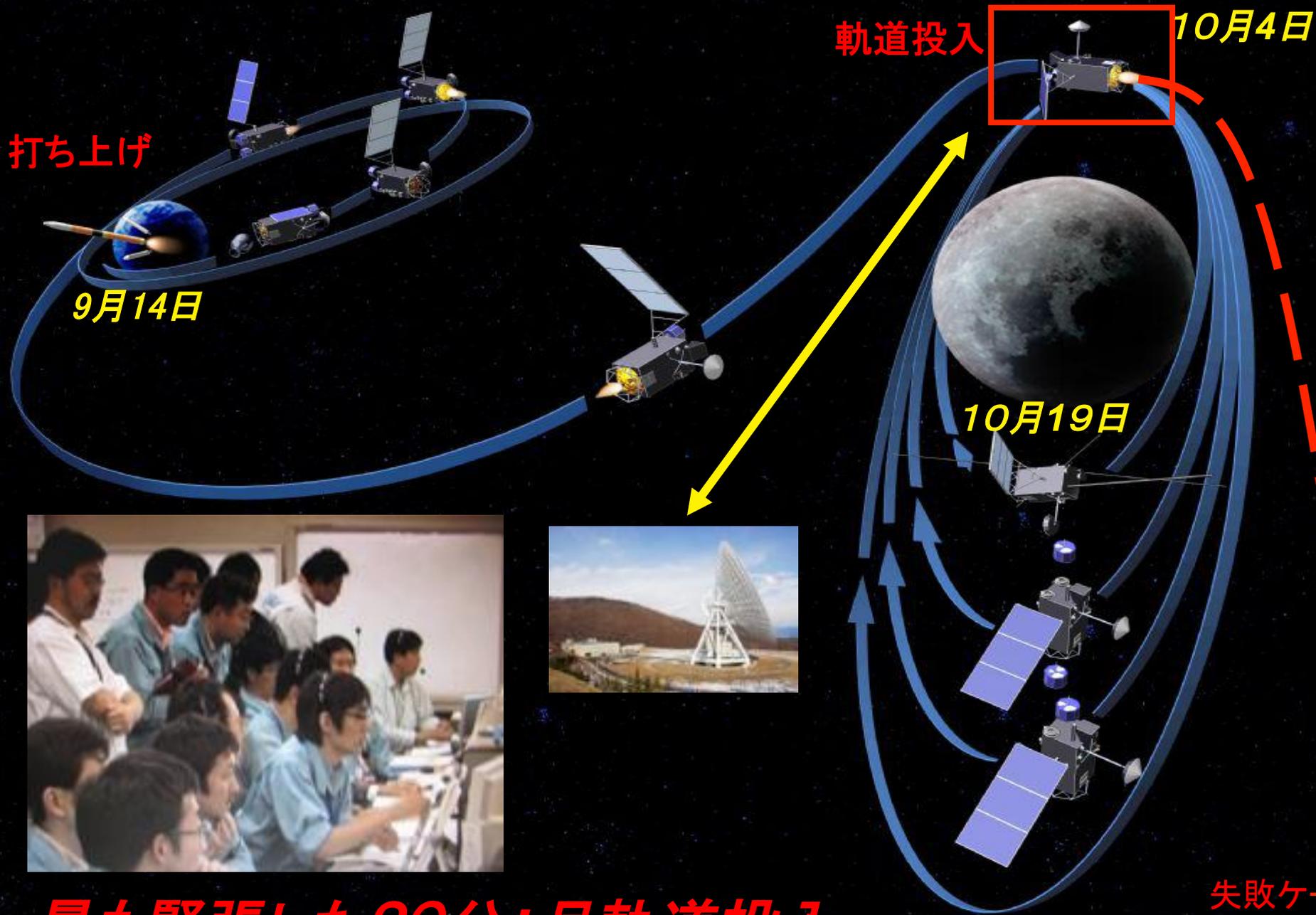
組立・試験



2007-2009年

打上・運用

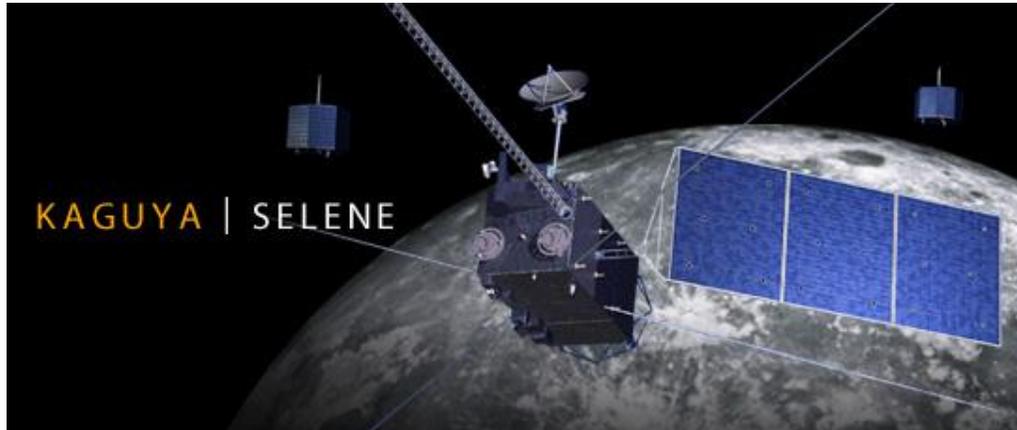




最も緊張した20分：月軌道投入



子衛星の分離と観測機器伸展物の展開



月周回軌道上での“かぐや”(イラスト)



リレー衛星(おきな)分離(10月9日)

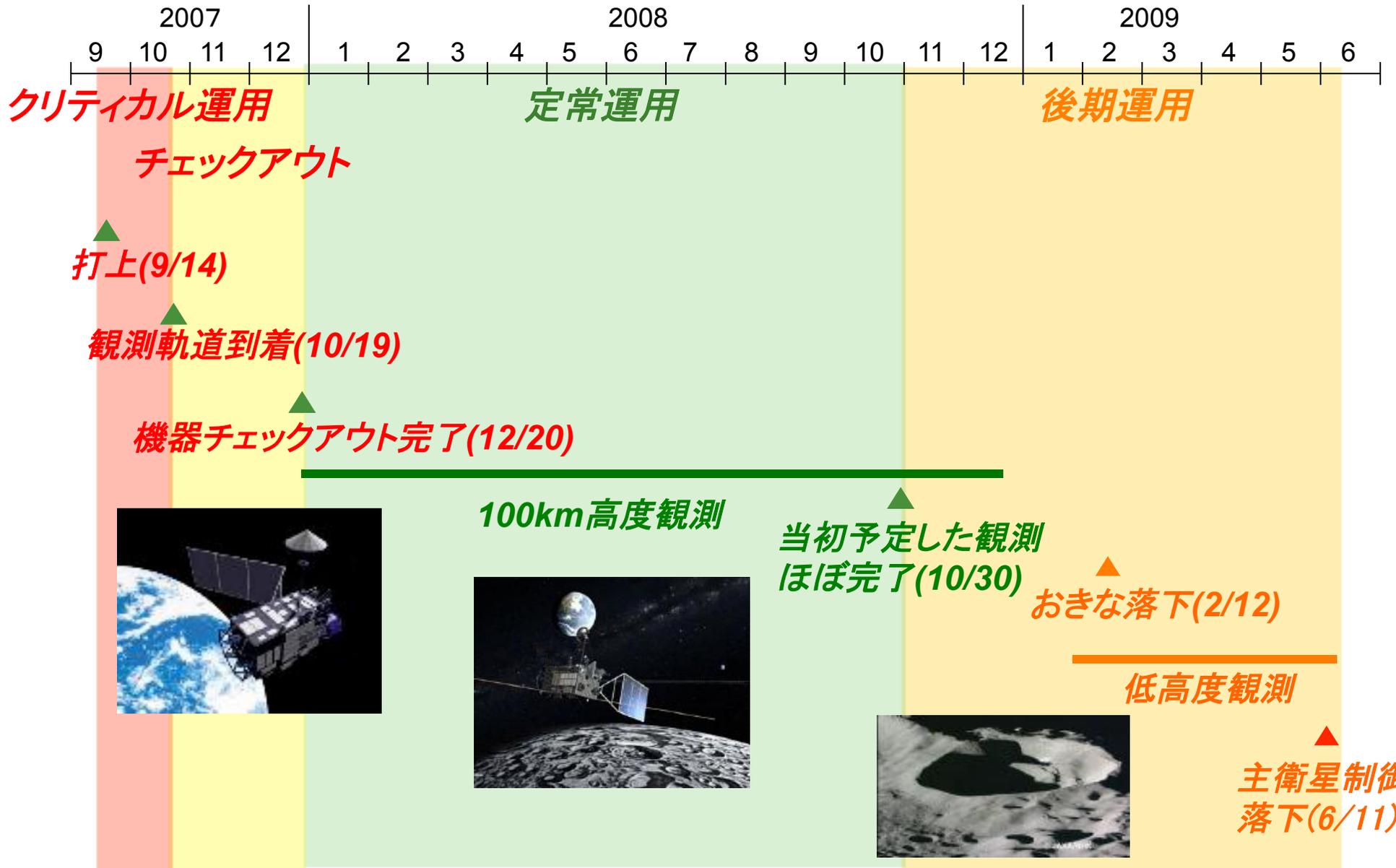


VRAD衛星(おうな)分離(10月12日)



磁力計マスト、レーダサウンダーのアンテナ等展開(10月28日~31日)

かぐやの飛行運用経過



HDTVで撮影した月面



© JAXA/NHK

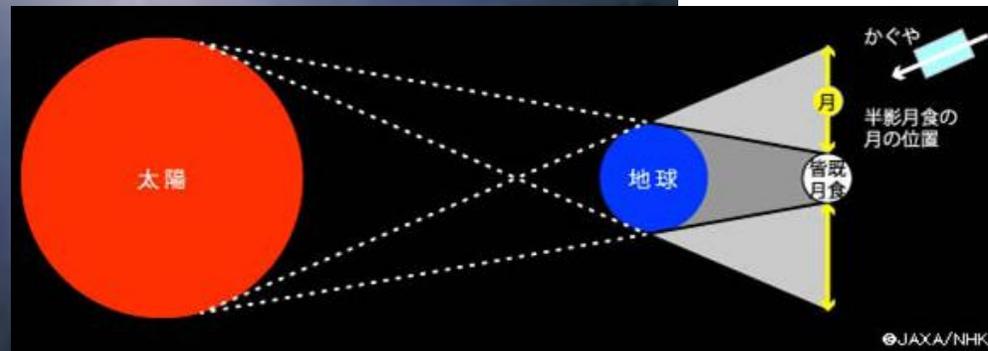




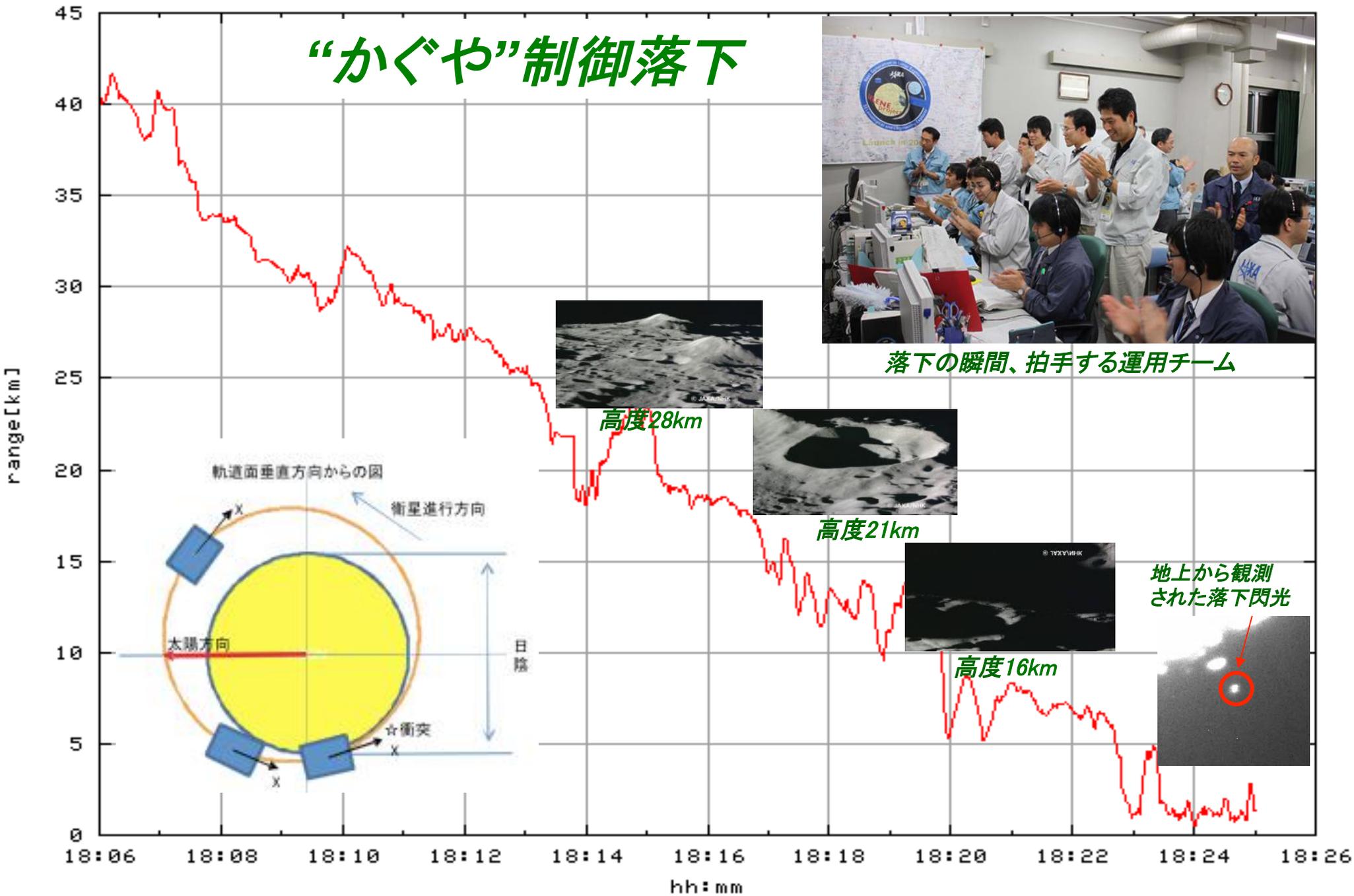
HDTVで撮影した満地球の出



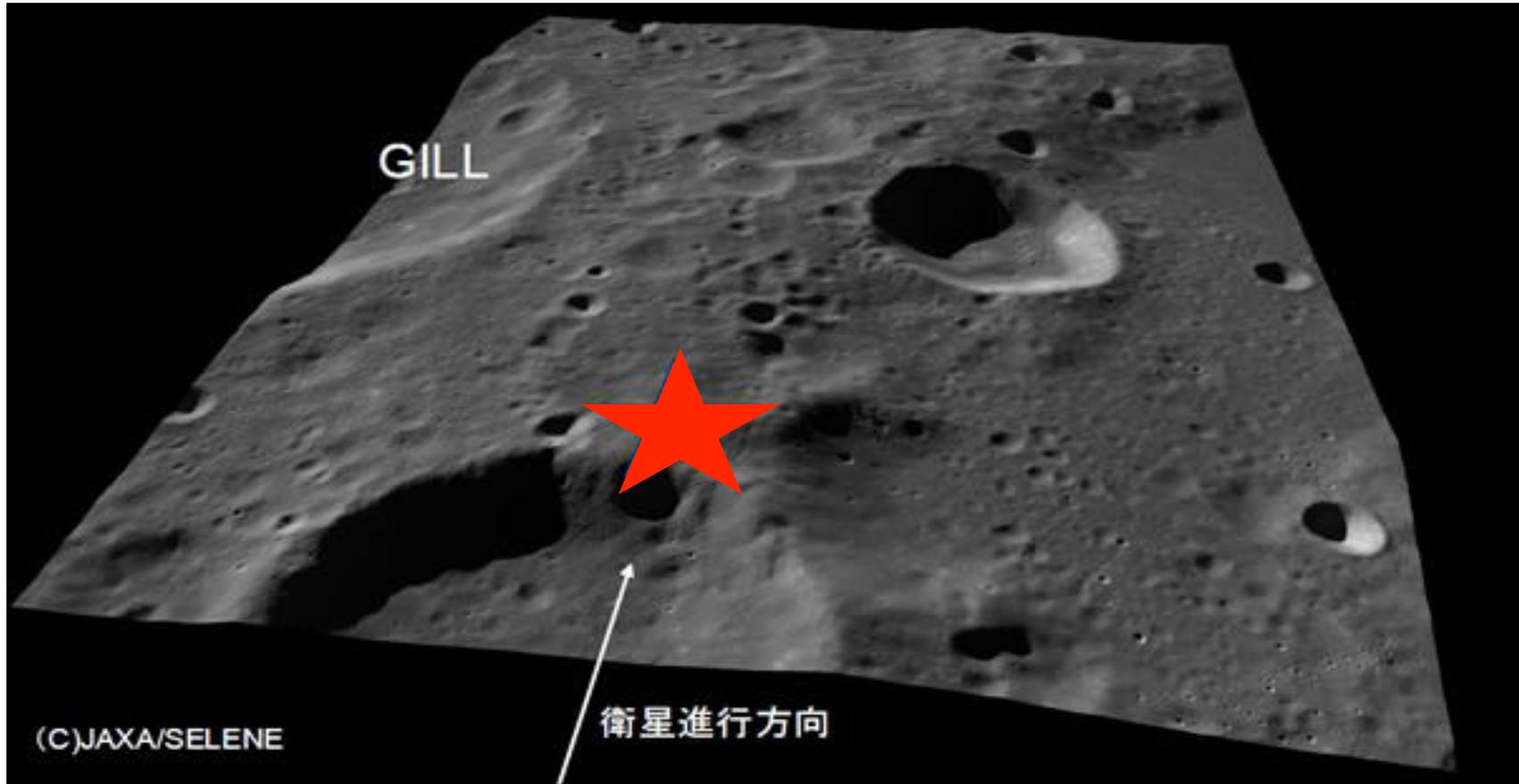
月から見た月食時の地球 ダイヤモンドリング



“かぐや”制御落下



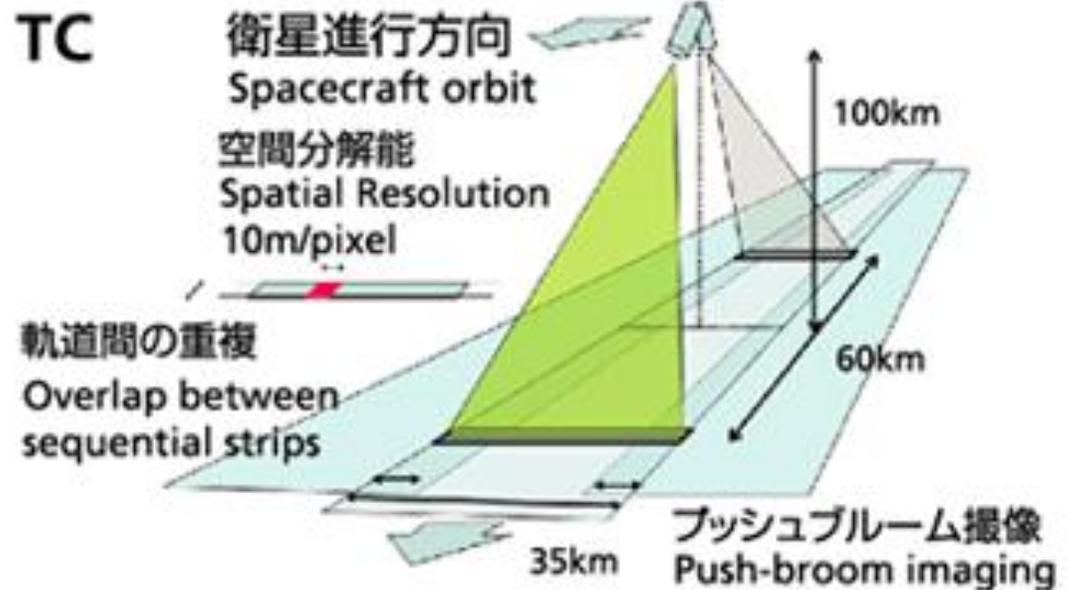
落下場所: GILLクレータ付近



- ★ 落下時間: 平成21年6月11日午前3時25分(日本標準時)
落下場所: 南緯65.5度 東経80.4度
高度: 平均面より約900m、約10度程度の斜面

地形カメラ(ステレオカメラ)

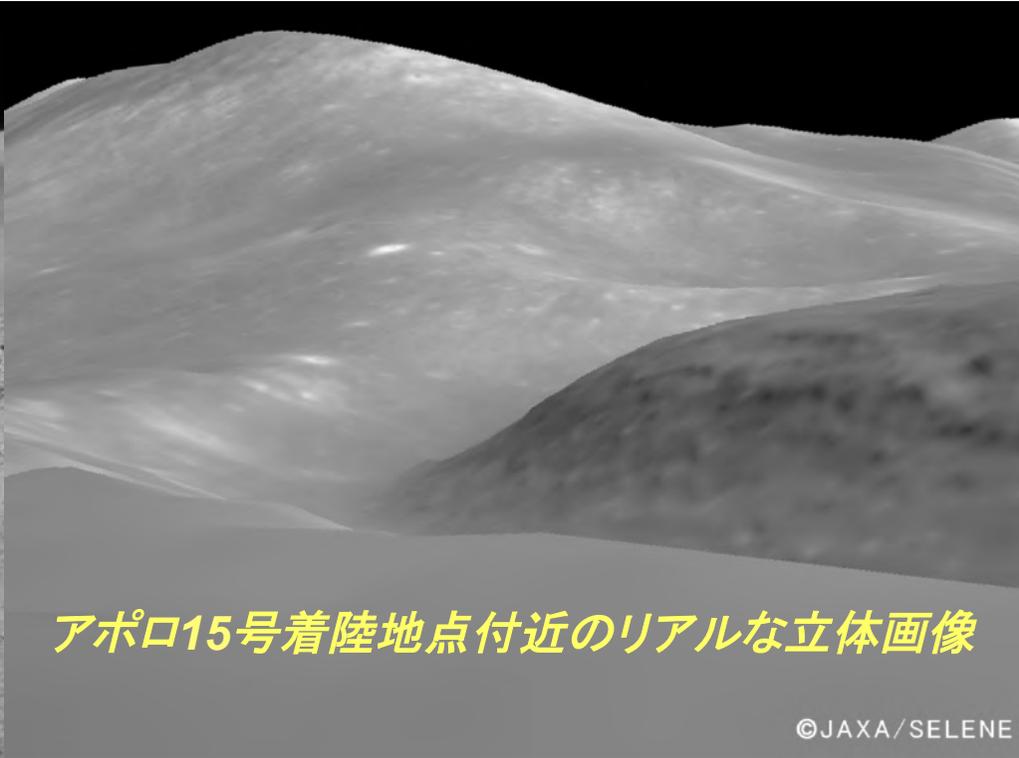
2台のカメラによるステレオ撮像、空間分解能 10m



地形カメラ(ステレオカメラ)

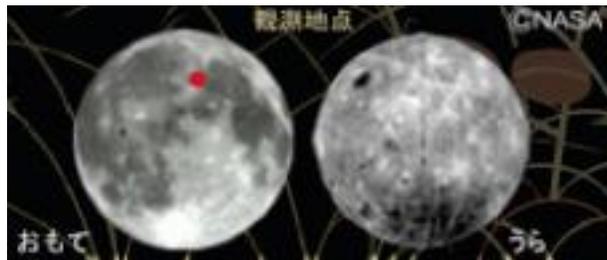


アポロの写真

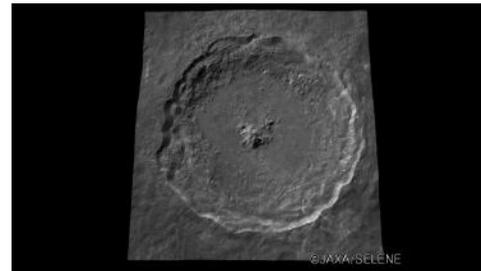


アポロ15号着陸地点付近のリアルな立体画像

©JAXA/SELENE



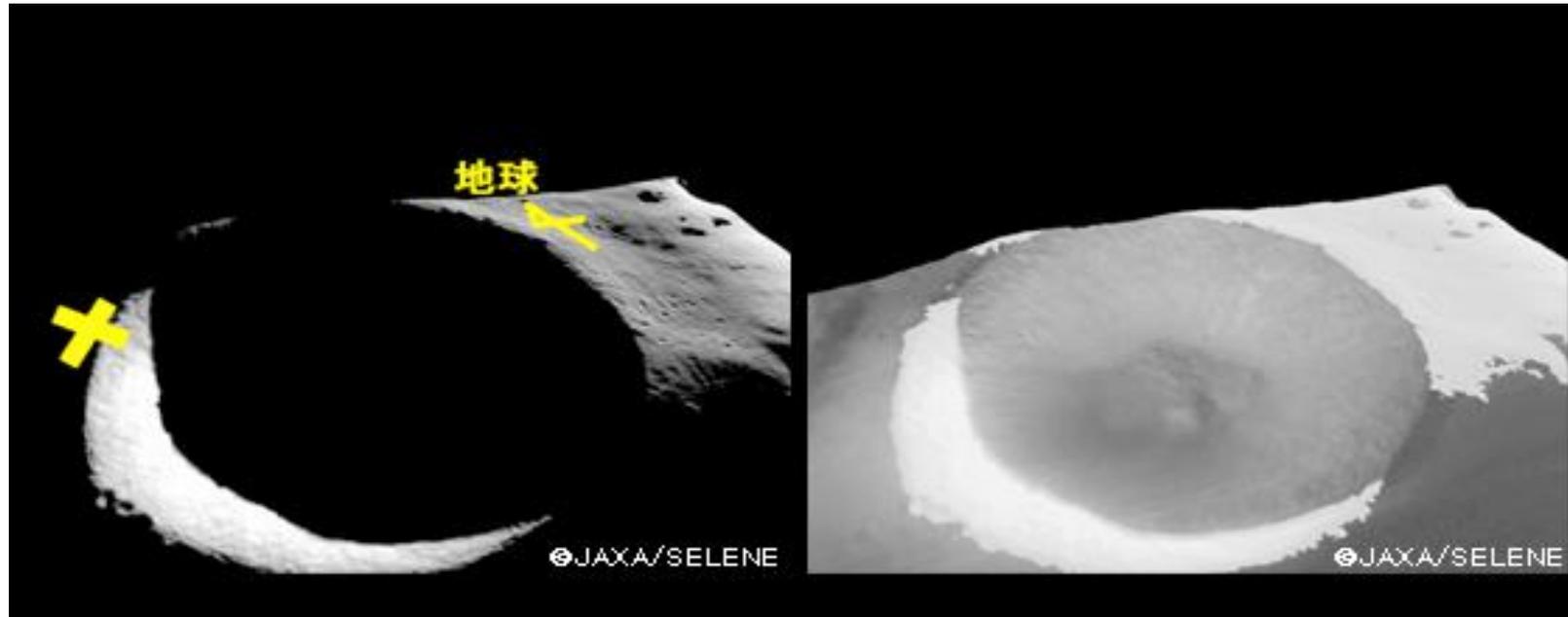
● 観測点



チョコレートタ

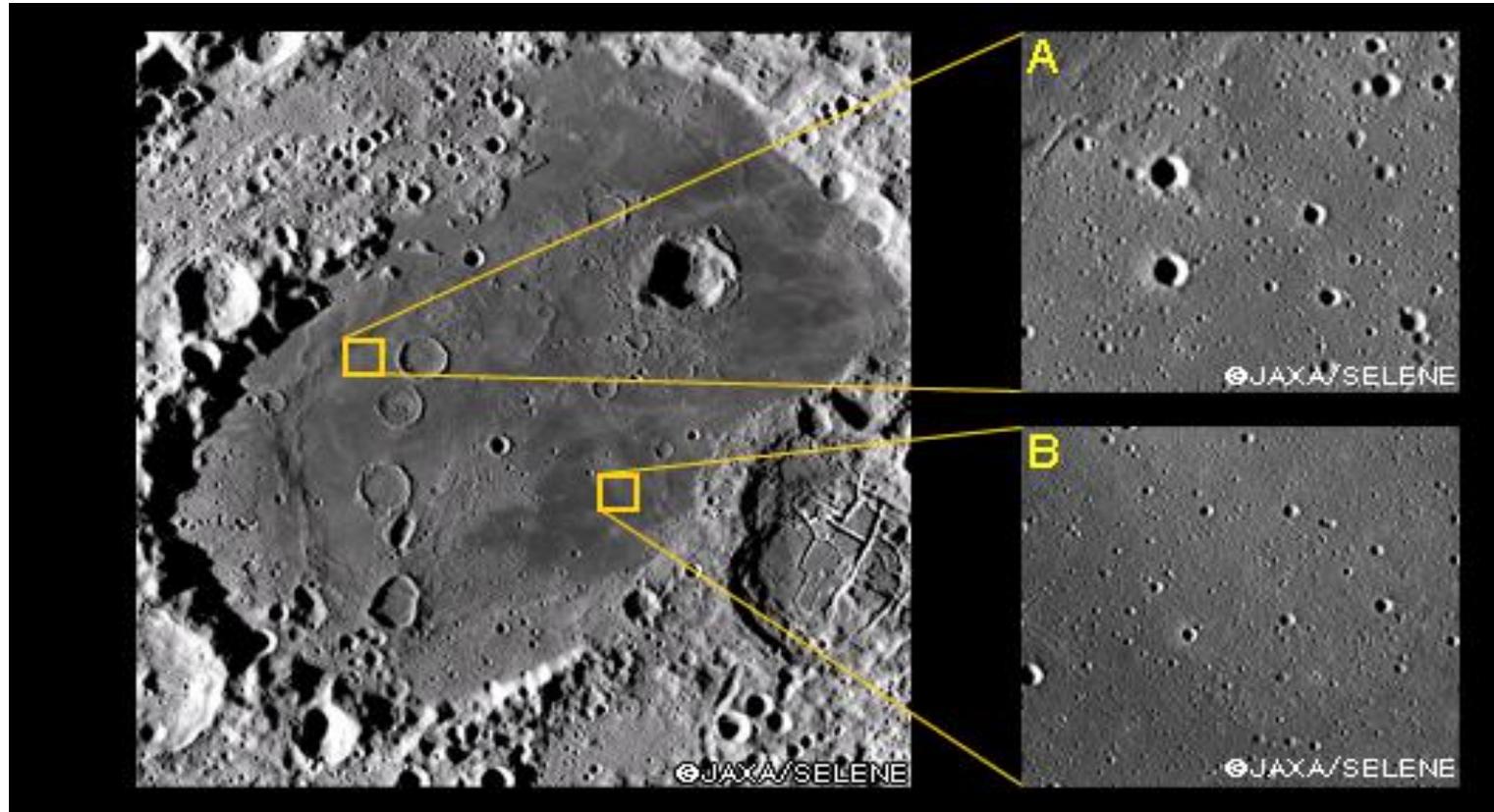


極域の永久陰の水氷



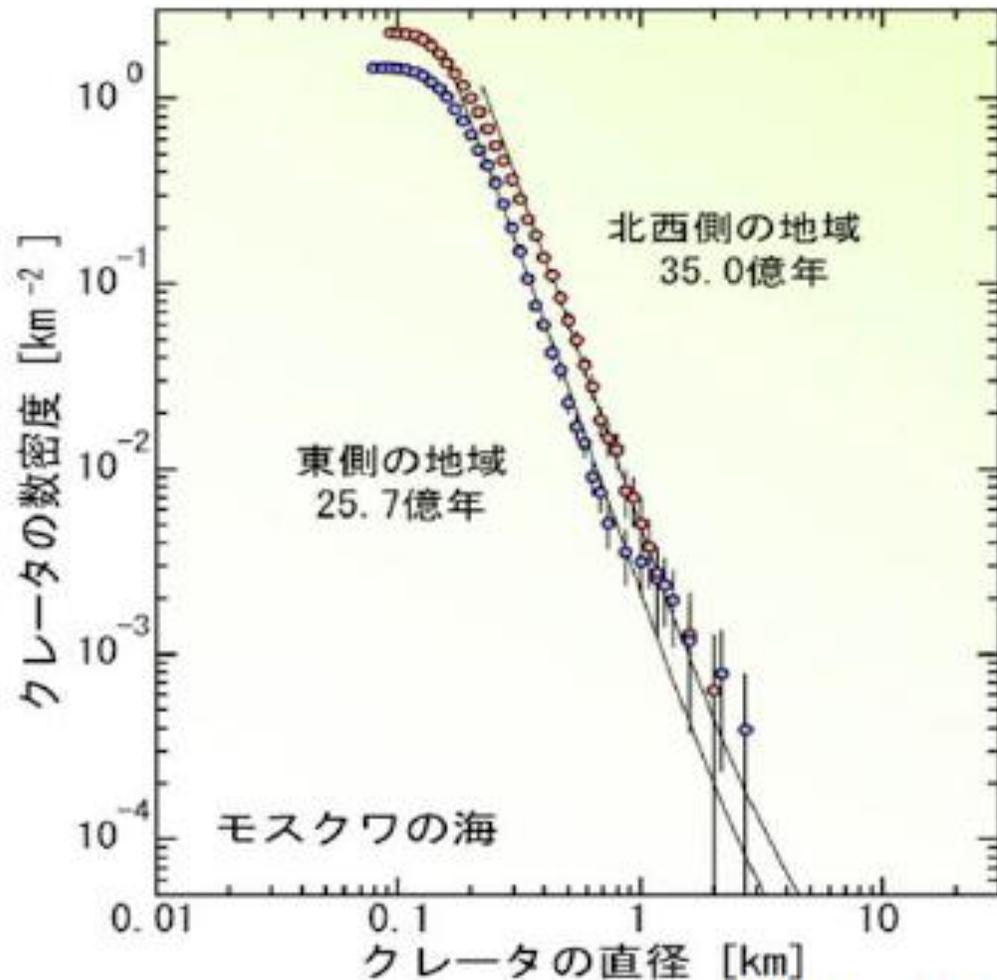
永久に太陽光が当たらない極域のクレーターの内部は極低温状態であることから、水分子が捕らえられ水氷が存在している可能性があると考えられている。しかし、地形カメラが映し出した南極付近のシャックルトンクレータの内部には、水氷による高い反射率の場所は存在せず、クレータ底部には水氷は露出した形で大量には存在しないことが判明した。以前の月探査機のデータからの推定では、水氷はあっても数パーセントとされており、「かぐや」の観測結果と一致している。

クレータの分布観測を利用した月面の年代推定



10m分解能の地形カメラによって得られた画像データをもとに、クレータ年代学の手法により、月の裏側の海(モスクワの海など)の形成年代を調べた。その結果、月の裏側で、25億年前までの長い期間にわたりマグマの噴出活動があったことが判明した(図中A領域は35億年前、B領域は25.7億年前)。従来の観測データから推定されていたモスクワの海の年代は、30数億年前とされていた。

地形カメラによる月の裏側の海の年代推定 今回のクレータ個数密度計測結果 ーモスクワの海ー



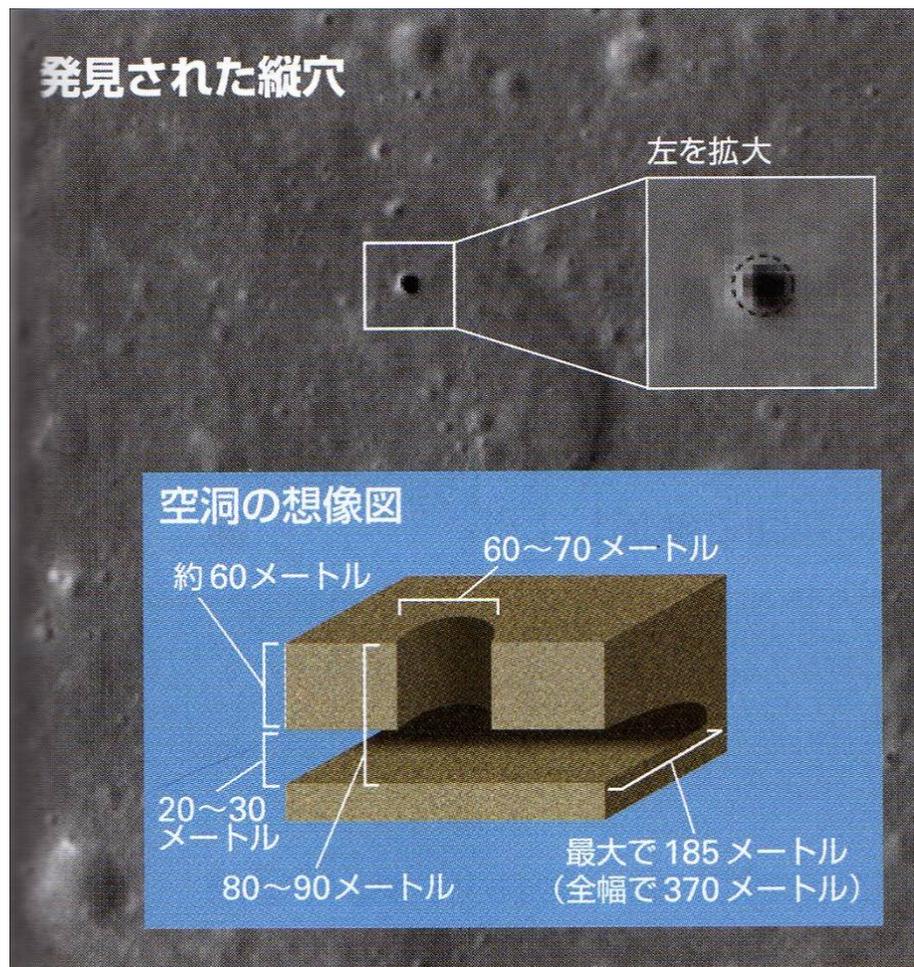
(C)JAXA/SELENE

・これまでの月の裏側の画像データでは、直径数100m程度のクレータについては、正確な直径や個数密度を調べるのが、十分に出来なかった。

・しかし、より高分解能な「かぐや」の地形カメラによって、直径200～300m以上の小さなクレータが正確に把握できるようになった。

・これまでの観測データから30数億年前に形成されたと考えられていたモスクワの海では、東側の地域(前のページの東領域)で、クレータの個数密度が小さいことから、更に若く約25億年前に形成されたということが推定された。

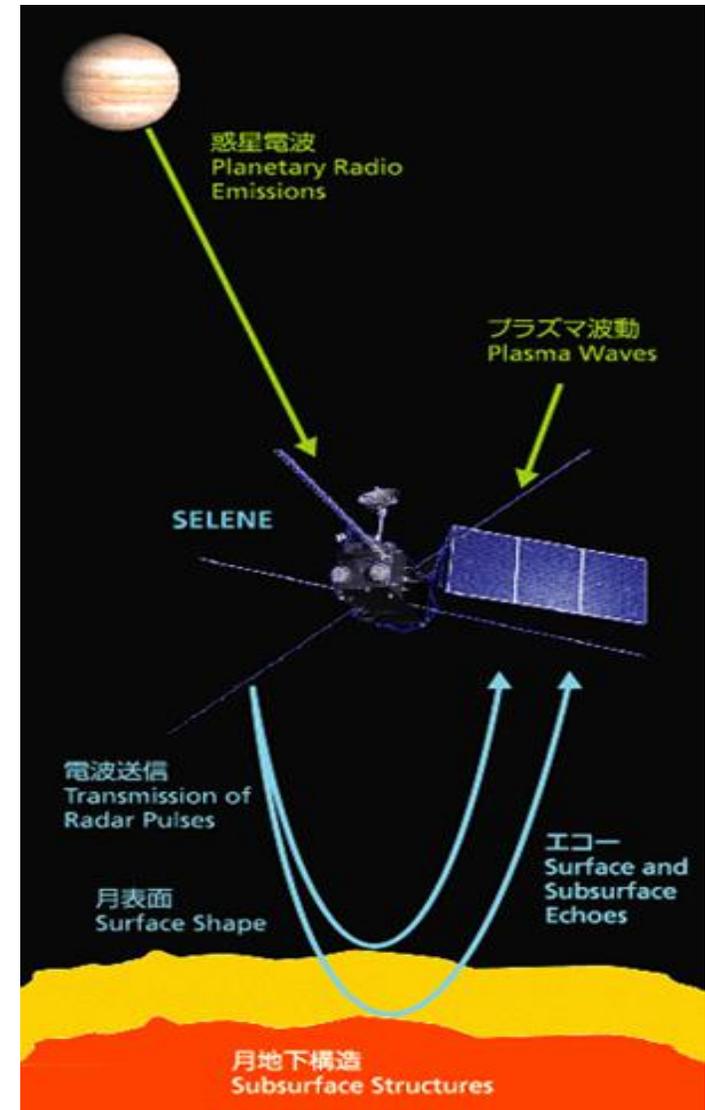
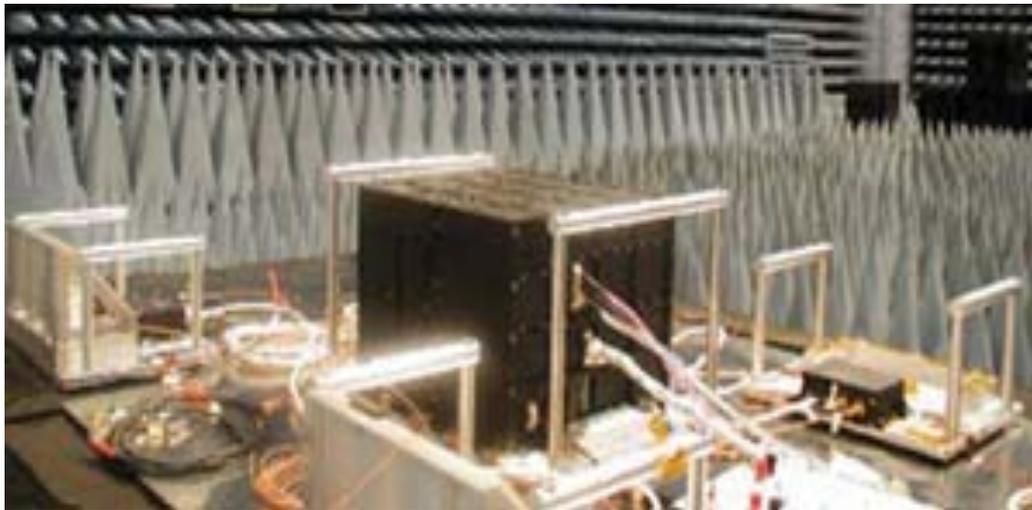
月の縦穴



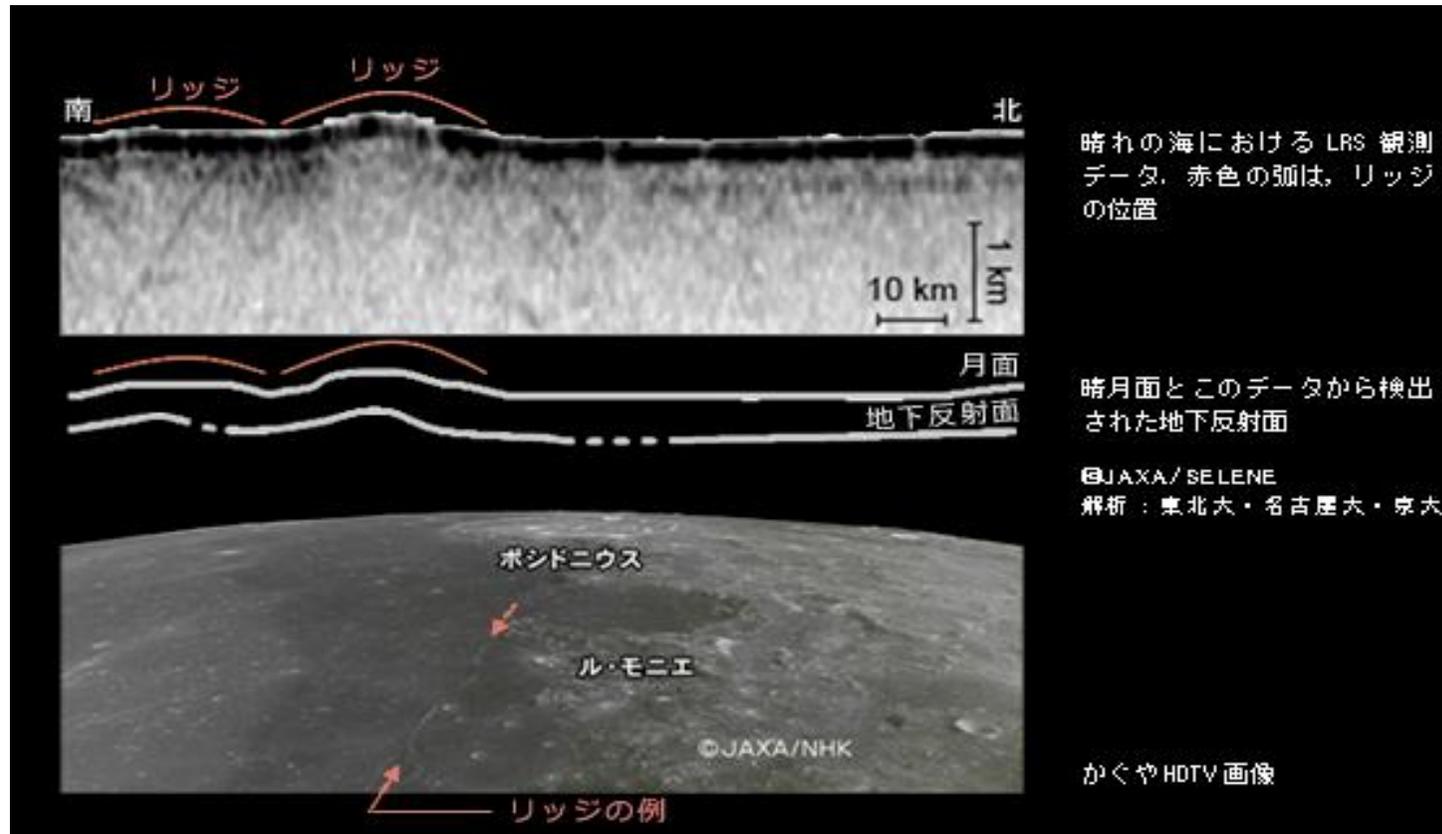
かぐやのデータから月の表面に、地下深くに通じる直径60~70メートルの縦穴が開いている場所が見つかった。場所は、月の表側の、嵐の大洋のほぼ中心、マリウス丘付近。この縦穴が非常に火山活動が高かったマリウスヒルズという領域にあること、そして溶岩が流れた痕であるリルとよばれる地形の中程にあることから、縦穴は、その下に存在している空洞である「溶岩チューブ」(または「溶岩トンネル」)につながっている「天窗である可能性が高い。溶岩チューブは、最大370mにも及びうることがわかった。

月レーダーサウンダー

電波(5 MHz)による地下構造探査
地下5 kmまで分解能100m



月の地下構造の探査



暗れの海における LRS 観測データ。赤色の弧は、リッジの位置

暗月面とこのデータから検出された地下反射面

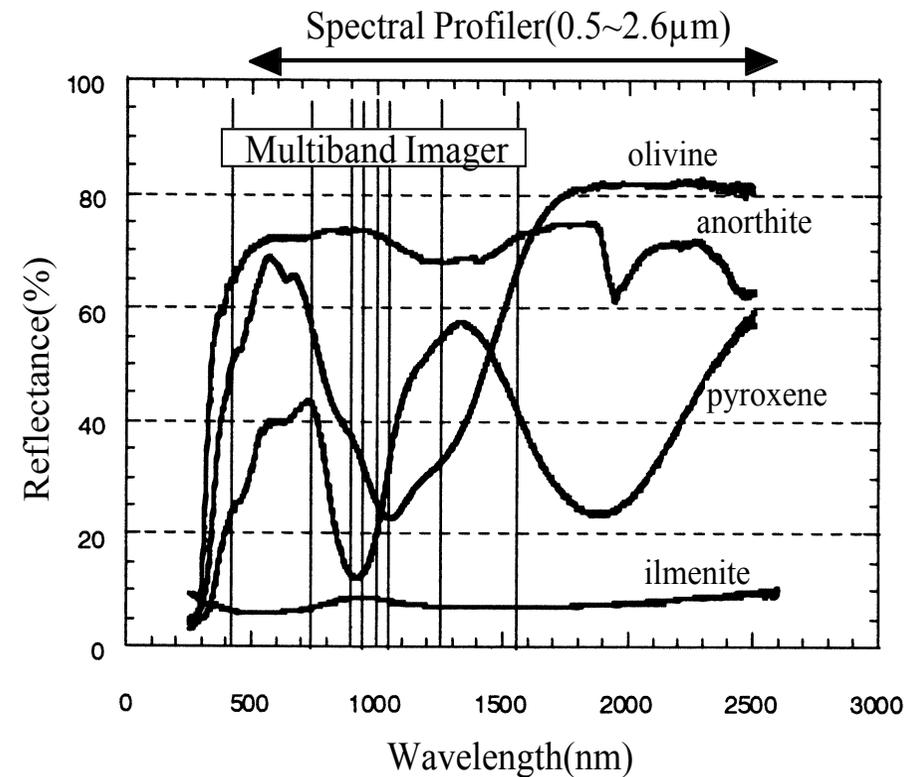
©JAXA/SELENE
解析：東北大・名古屋大・京大

かぐや HDTV 画像

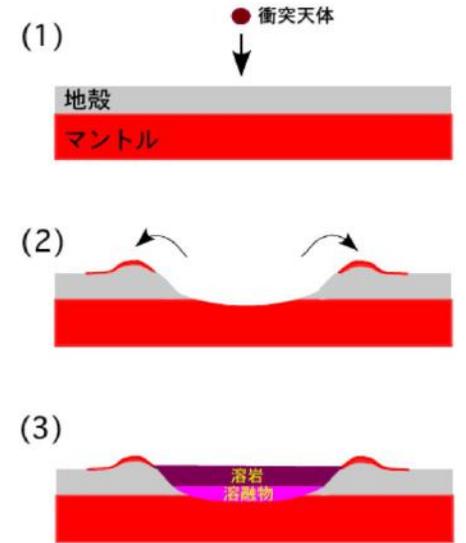
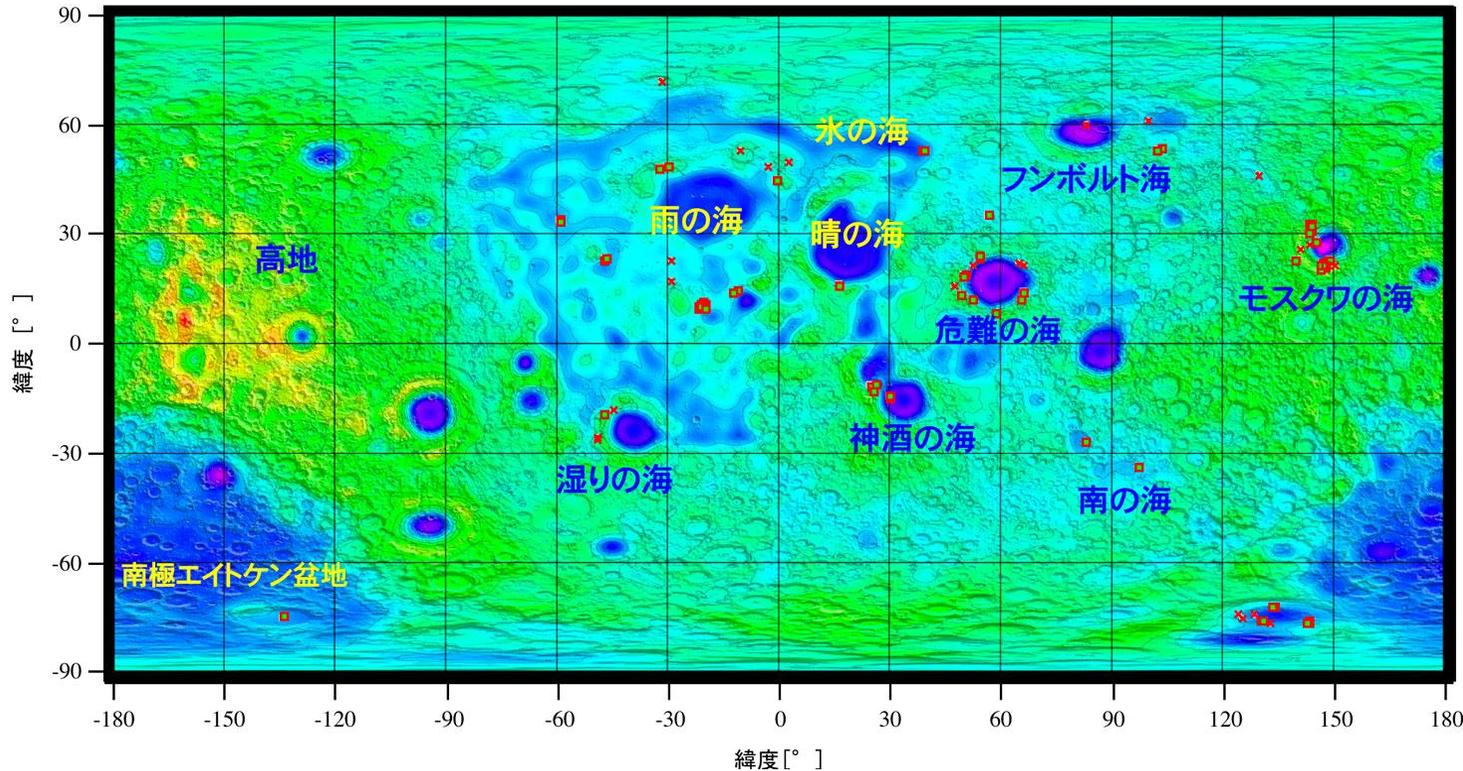
月の地下の構造はこれまで殆ど調べられていない。「かぐや」は月面に向けて電波を発射し、その反射を調べる方法により地下の構造を探査した。その結果、細長く盛り上がったリッジと呼ばれる地形は、その地下構造から、冷却により月全体が収縮したためにできた表面の皺であることが判明した。年代を推定した結果、これまで考えられたよりも遅い時期まで月の冷却がおきていたことが示された。

スペクトルプロファイラ

可視～近赤外 ($0.5 \mu\text{m} \sim 2.6 \mu\text{m}$) 連続分光(分解能5nm)
空間分解能 500m



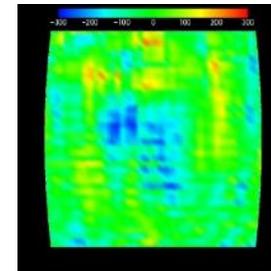
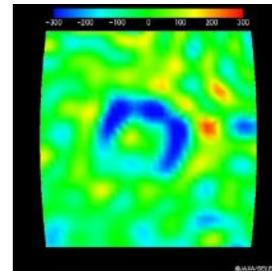
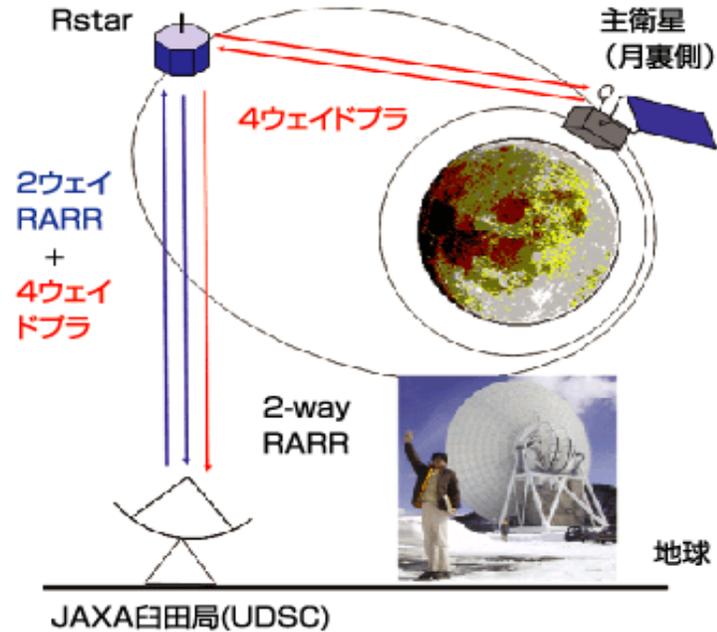
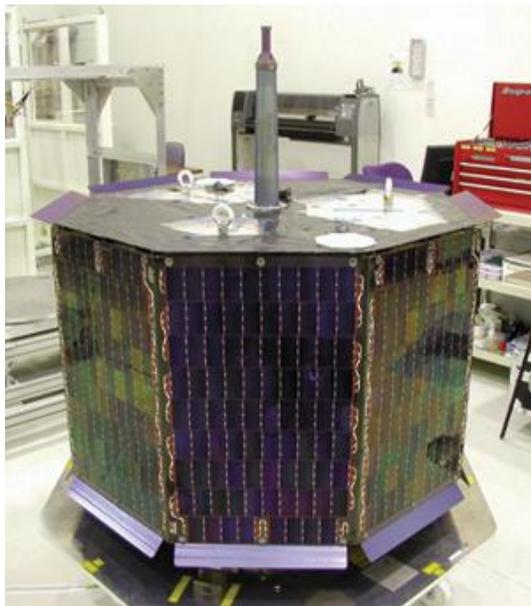
天体衝突による溶岩噴出現象の解明



月全体の地殻の厚さ分布(地殻の薄い部分が青)。スペクトルプロファイラで明らかになったカンラン石に富む領域(■)は、どれも地殻の薄い巨大衝突盆地の周りにある。このことから、月の表面に見出されたカンラン石は、かなり深い(100km)ところにある物質、すなわちマントルが、巨大天体の衝突によって掘り起こされたこと(右図)が判明した。

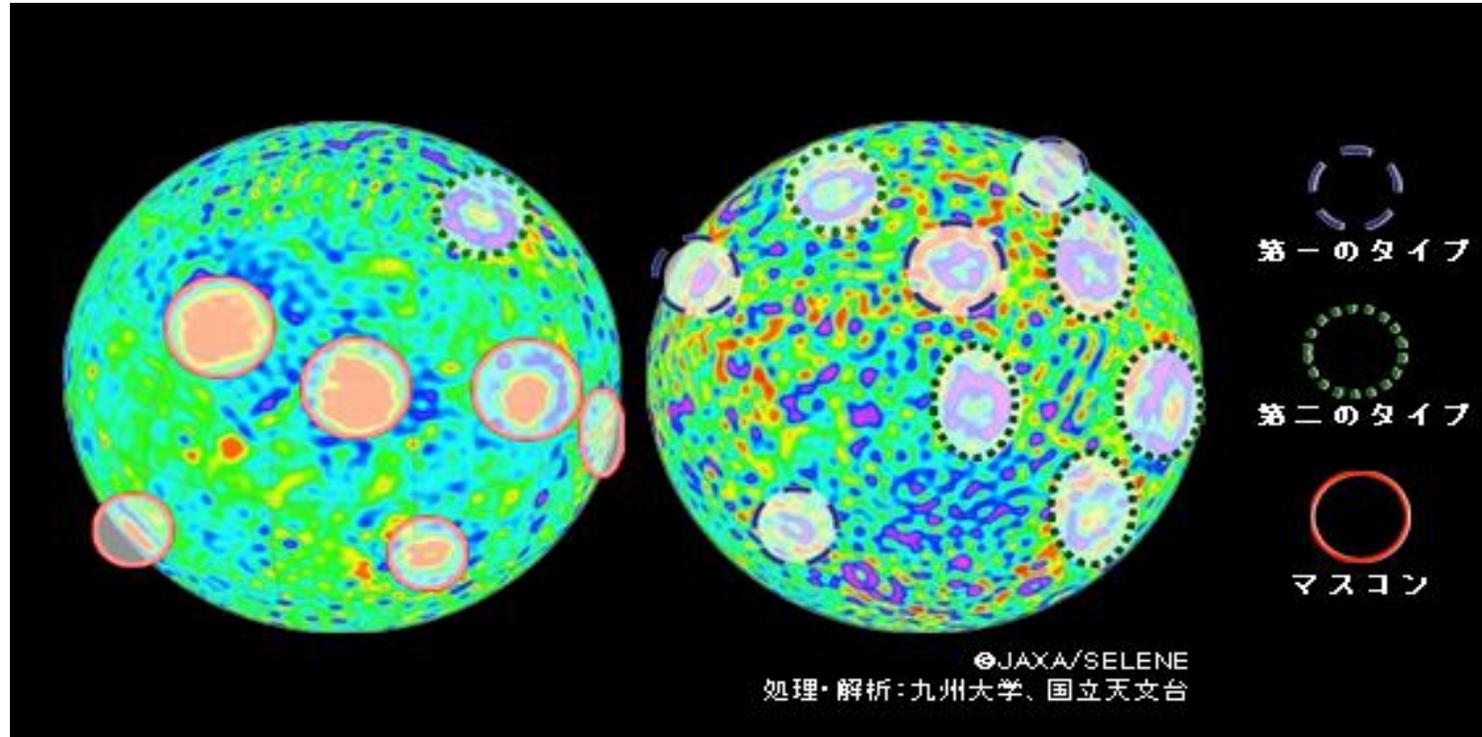
リレー衛星による月重力場の観測

周回衛星の電波をリレー衛星(近月点100km, 遠月点2400kmに投入)で地上に中継し4ウェイドップラ観測を行う。これにより月の裏側の重力分布を計測。



左は、かぐやによりとらえられたアポロ盆地の鮮明な重力場。右はかぐや以前のアポロ盆地の重力場モデル (LP165P)

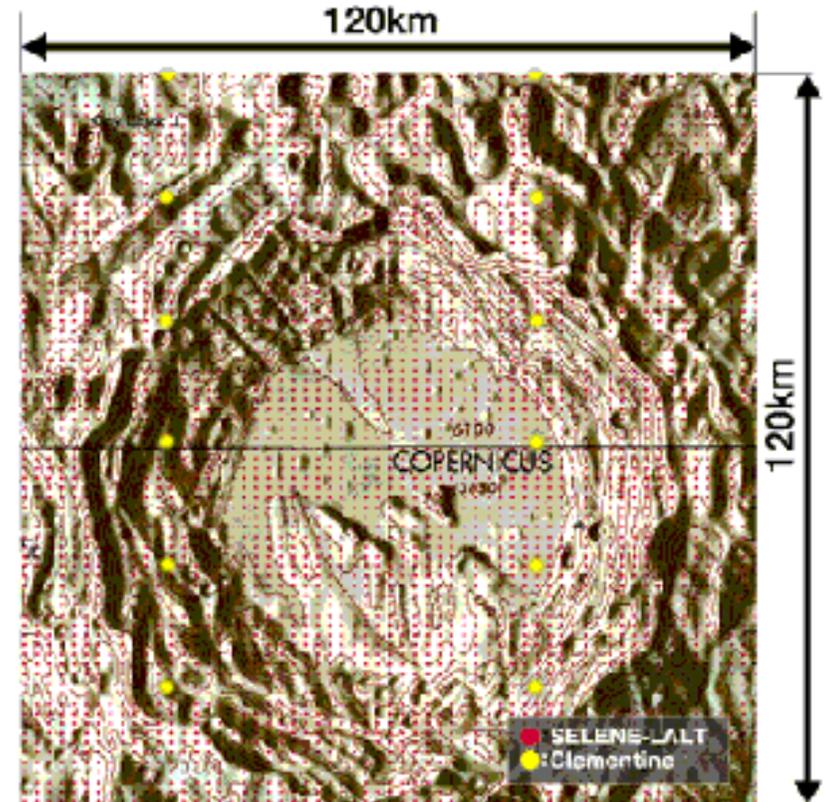
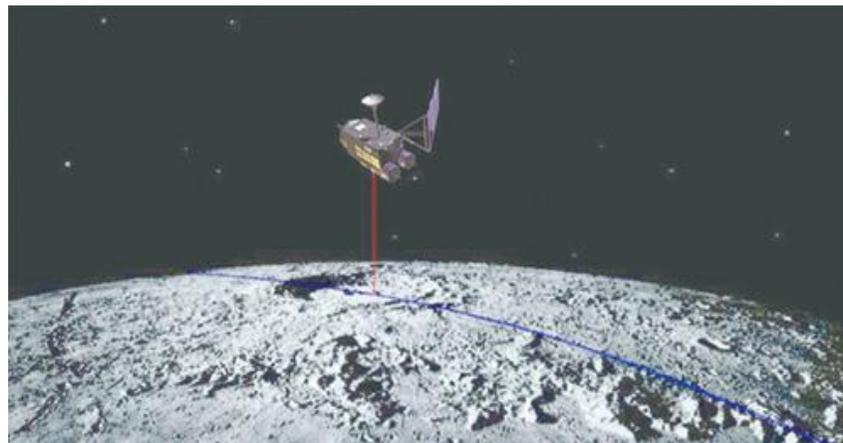
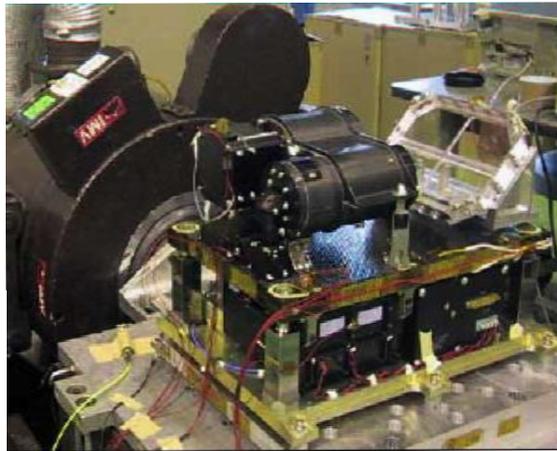
月の裏側の重力異常



リレー衛星 (おきな) を用いて月の裏側の重力場を世界で始めて直接観測した。月の表側ではマスコンと呼ばれる強い正の重力異常のあることが既に知られていたが、裏側ではクレーターや盆地の地形に対応した正負のリング型の重力異常があることが分かった。これは40億年～35億年前には月の表側と裏側の内部の温度が異なっていたこと、つまり月の二分性は表面だけでなく内部にまで達していたことを示している。

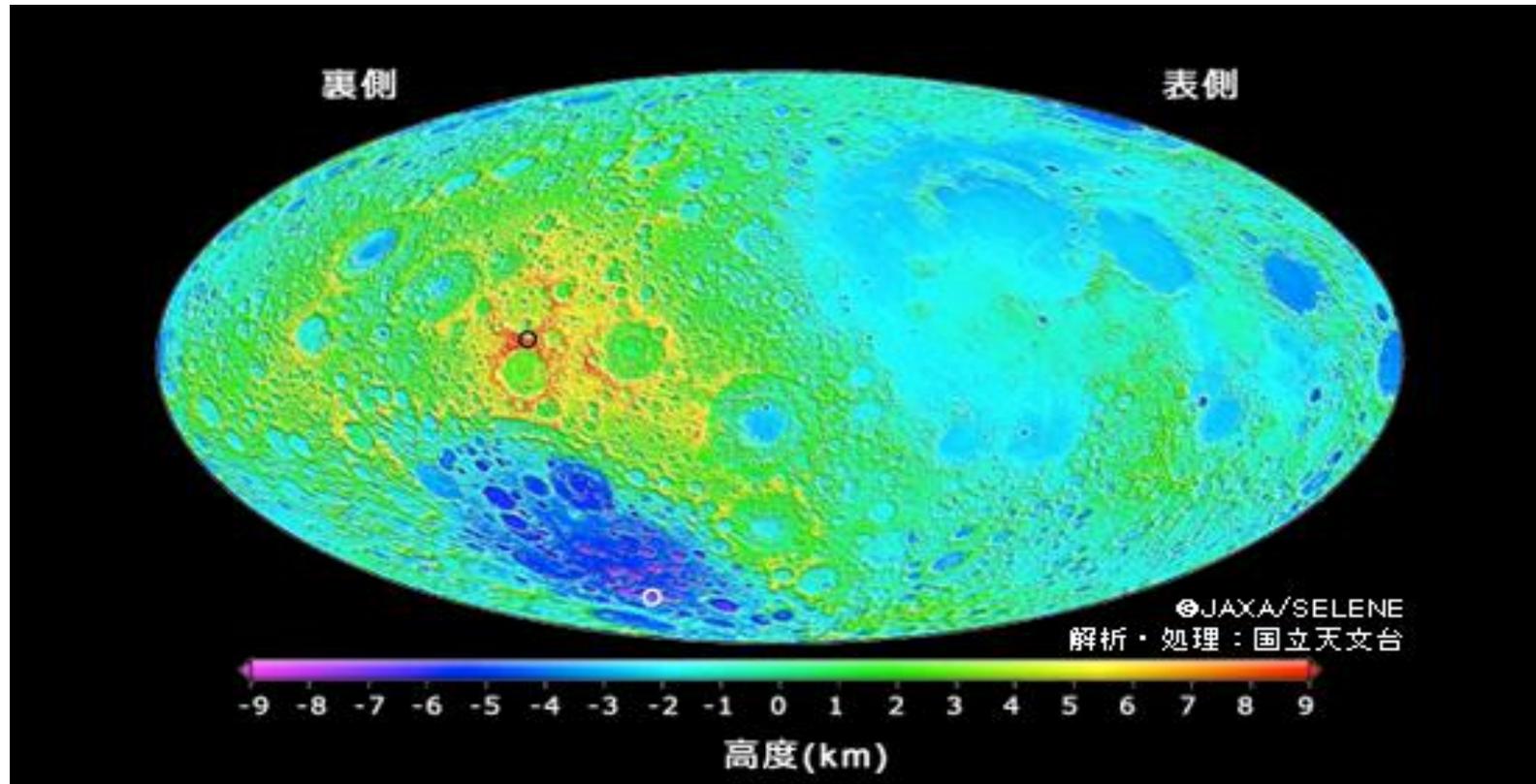
レーザー高度計

Nd:YAGレーザー、フットプリント30m、高度分解能 5m、空間分解能 1600m



コペルニクスクレータ
(直径約90km)の観測例。図中の細かな●は測
定点。南北方向に約1.6km、東西方向に約2km
間隔で測定できる。1年間の観測で3千万点以
上測定。

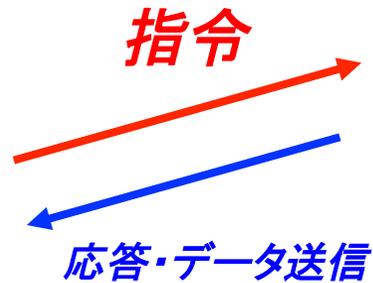
月の精細な高度地図



レーザ高度計により高い分解能の月全球地形図を取得した。従来の地形図と比べて200km-300km以下のサイズの地形が鮮明に見えるようになった。月の最高地点は+10.75 km、最低地点は-9.06 km、高度差は従来考えられていたよりも2km以上大きく、19.81kmであることがわかった。

かぐやを支えた主な技術

一種の自動機械(ロボット)



指令の受け取り・応答・データ送信
自律的動作

観測運用の実施

観測姿勢の維持

電力の管理

温度管理

自己診断と不具合対応



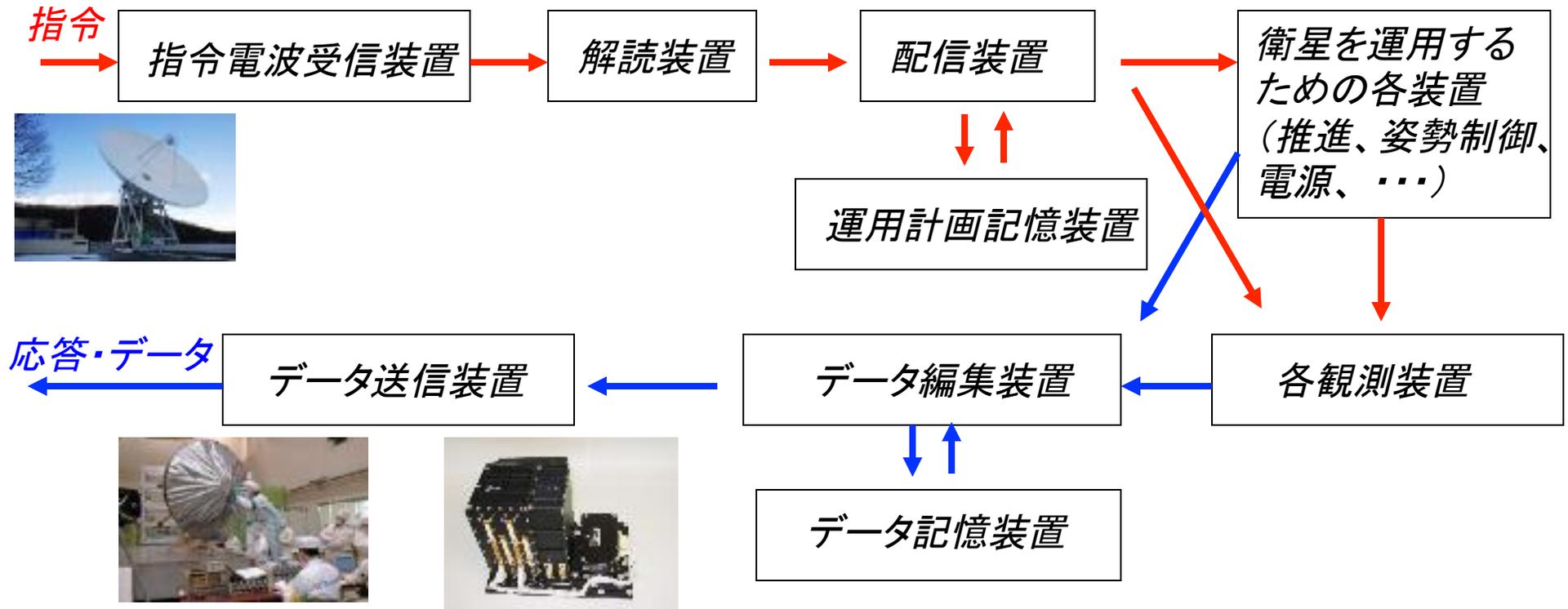
コントロールセンター



かぐやを支えた主な技術

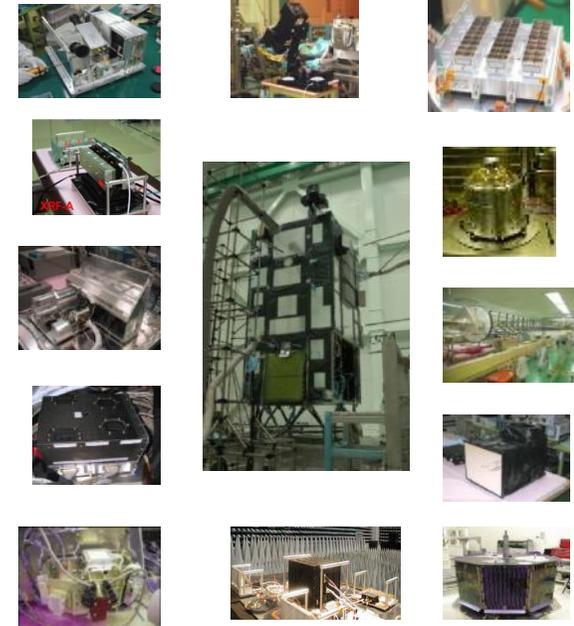
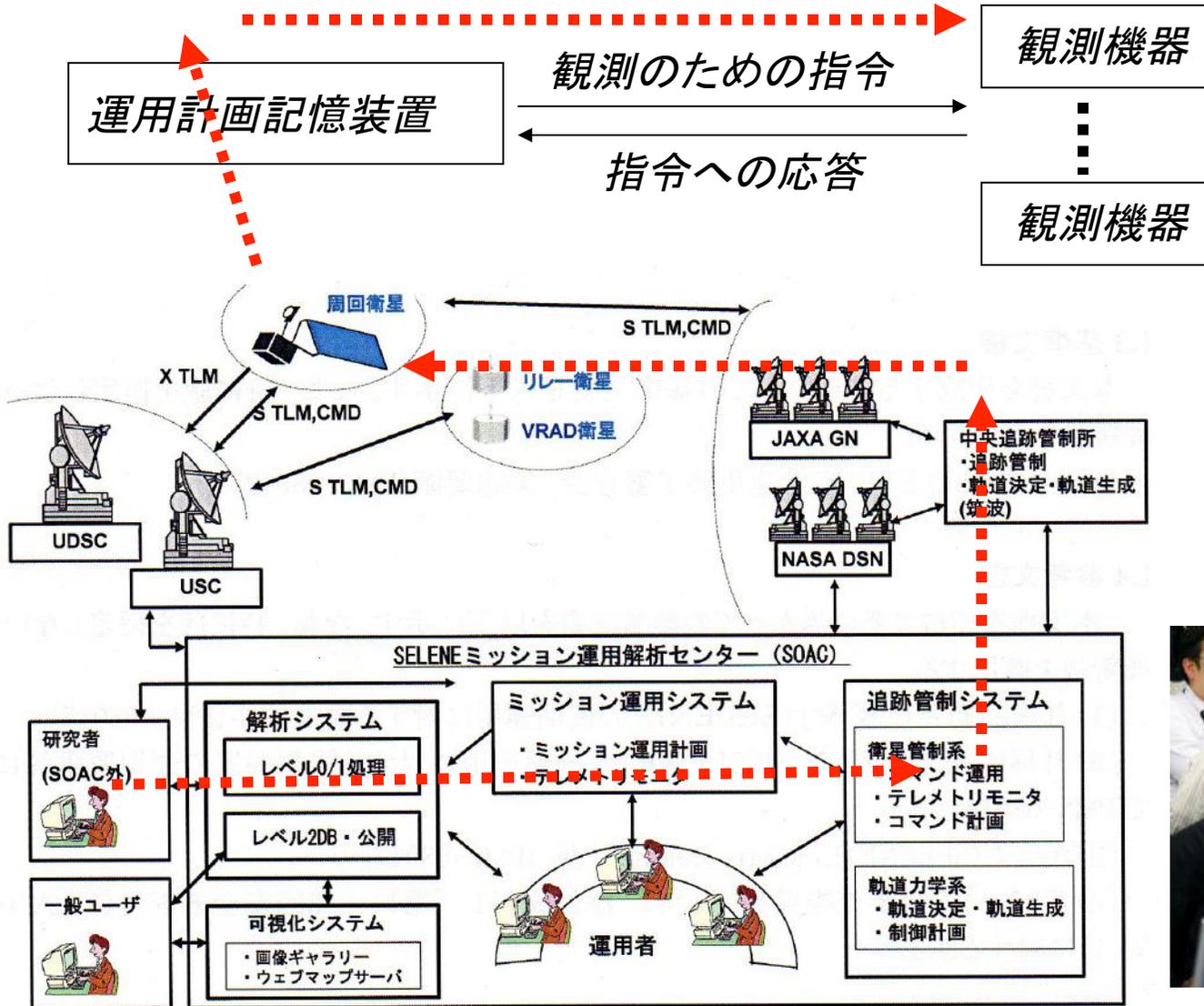
| 区分 | 機能 | かぐやのシステム名 |
|----------------|------------------------|-----------|
| 運用者とのコミュニケーション | 指令の受け取り・応答 観測データの送信 | データ処理システム |
| | 観測運用の実施 | |
| 自律的動作 | 観測軌道の維持 | 推進システム |
| | 観測姿勢の維持 | 姿勢制御システム |
| | 電力の管理 | 電力システム |
| | 温度管理 | 熱制御システム |
| | 自己診断と不具合対応 | データ処理システム |

指令の受け取り・応答、観測データの送信

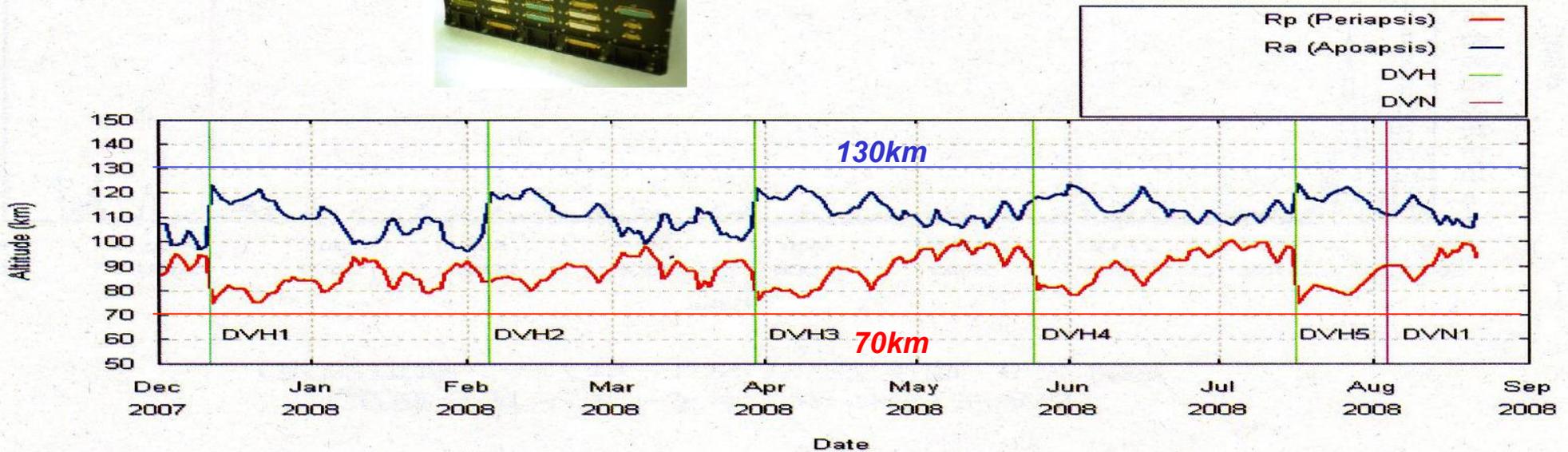


約21ヶ月にわたる飛行運用中上記機能は正常に動作した。

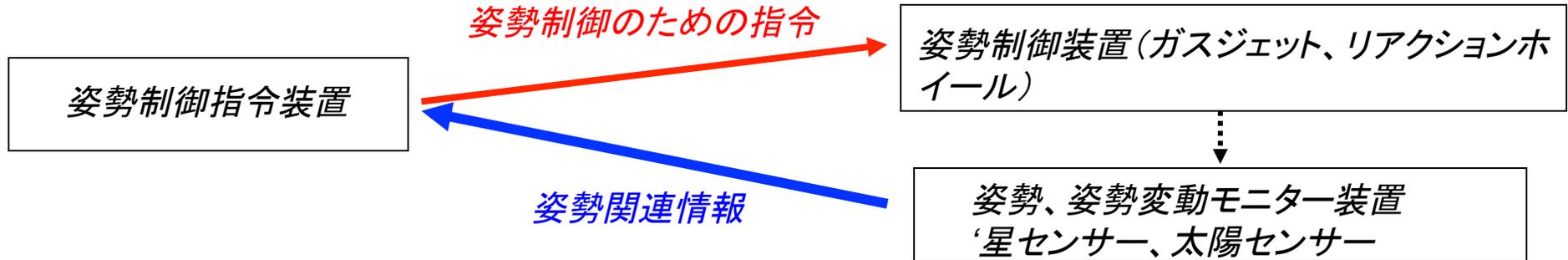
観測運用の実施(自動運用)



観測軌道の維持

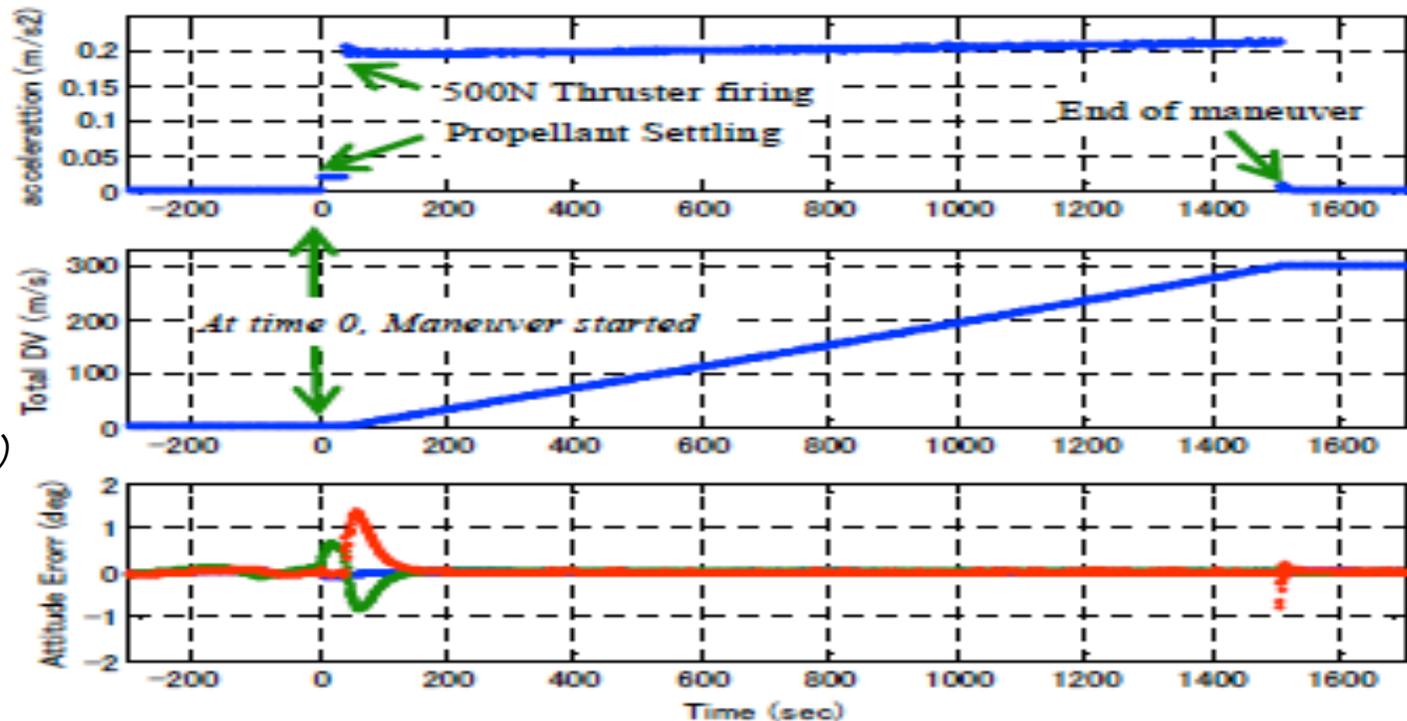


姿勢の制御



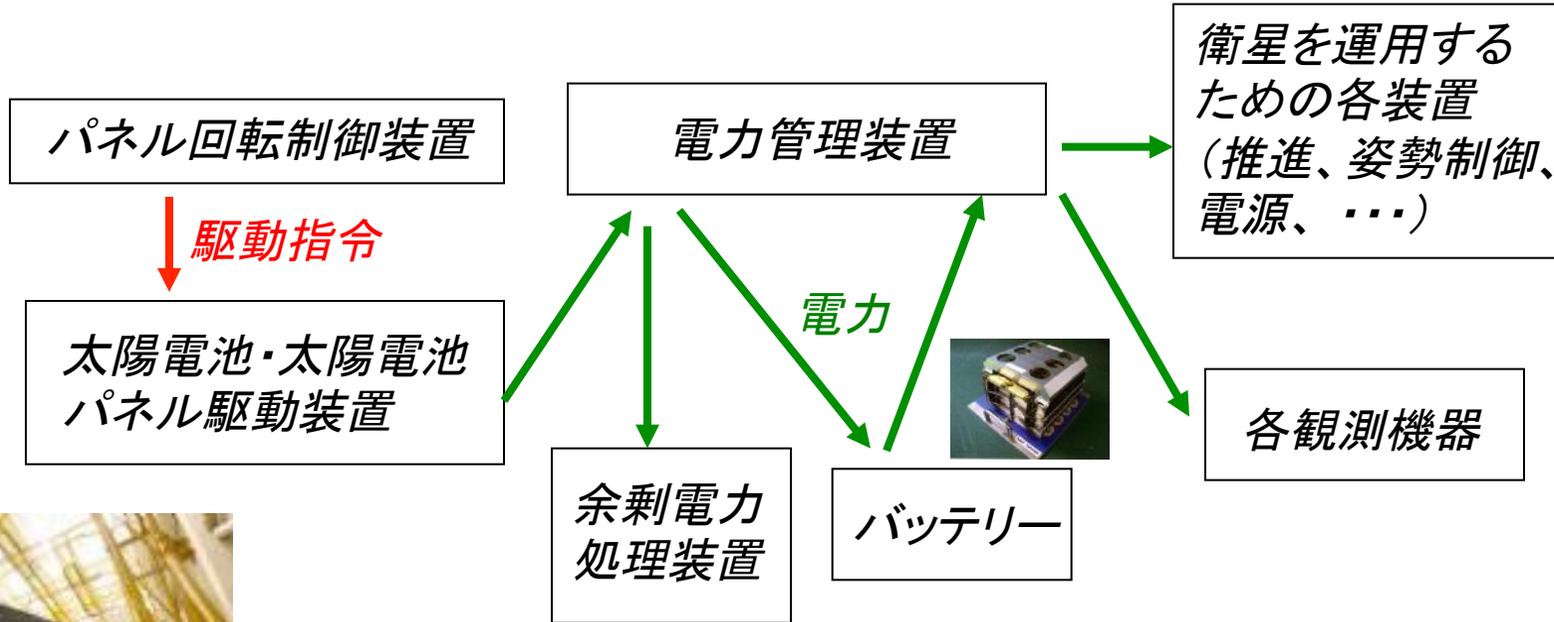
メインエンジン
(500Nスラスタ)

姿勢誤差量

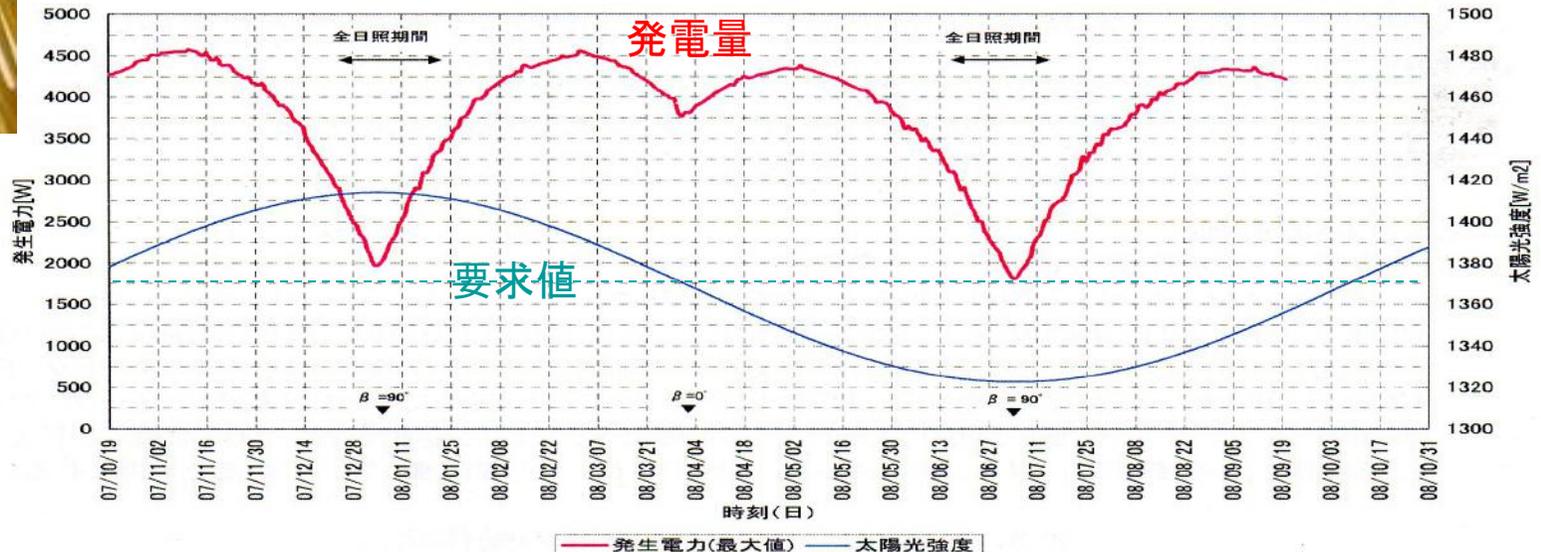


軌道投入時の姿勢維持

電力の管理



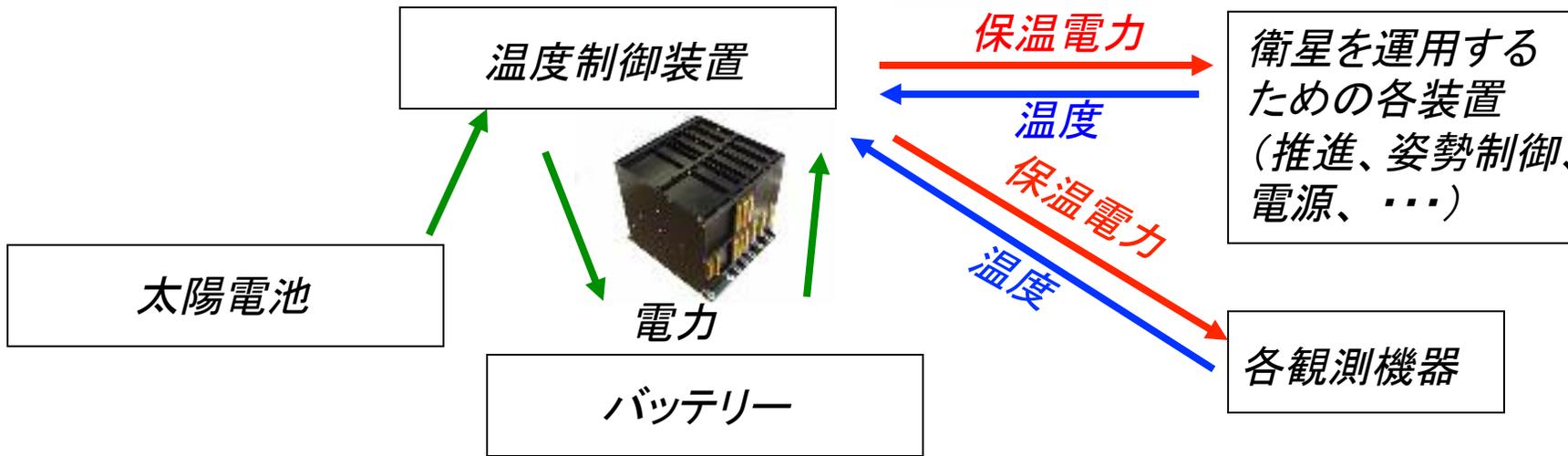
太陽電池パネル



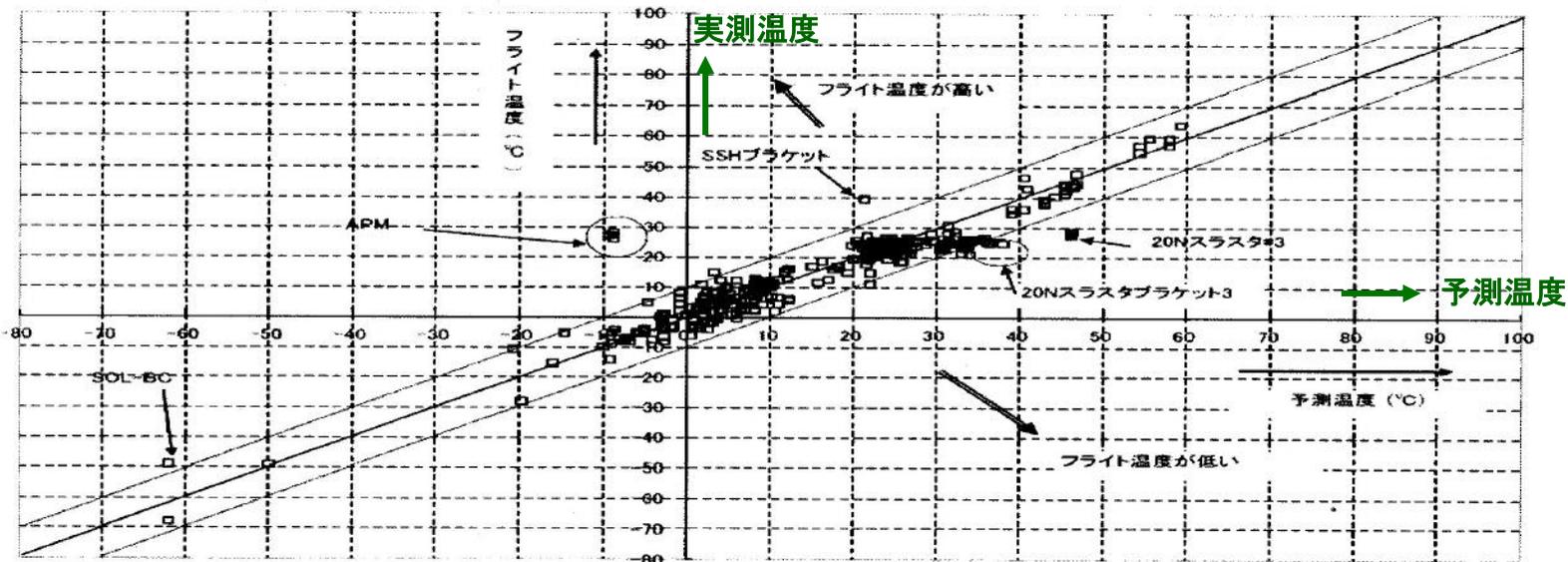
温度管理



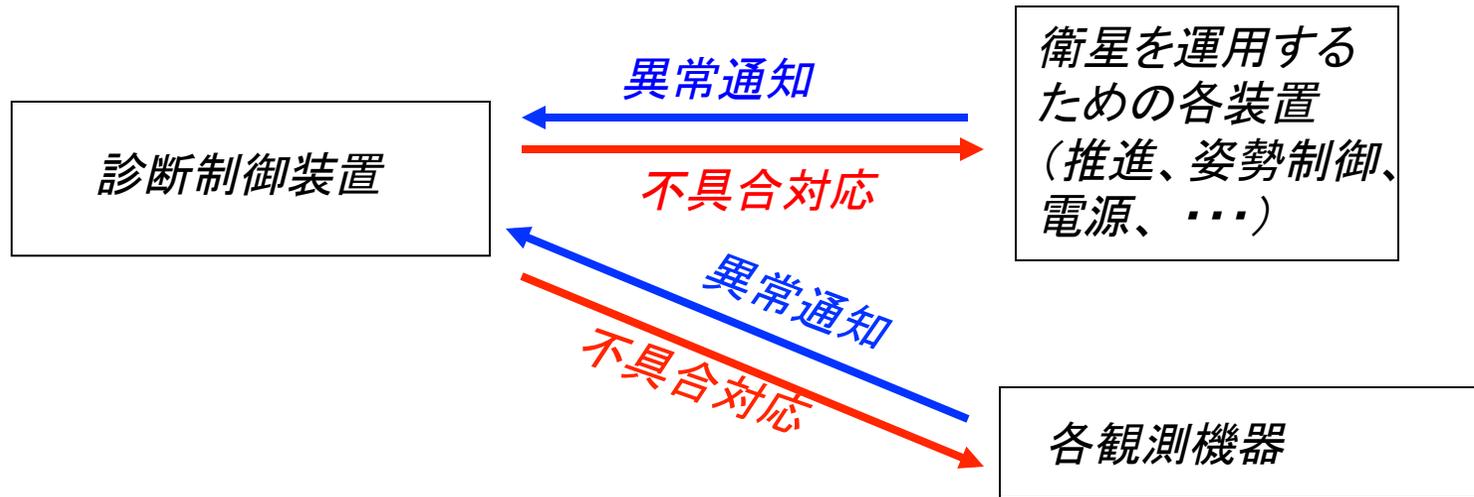
サーマルルーバー
など熱制御器



月周回軌道 $\beta = 90^\circ$ (2008年1月4日 0:00~02:00) 最高温度の比較



自己診断と不具合対応



事例

- ・観測の制御コンピュータが宇宙放射線によってエラーを起こし、自身の自己回復機能では対応できなくなった時、その観測器に対する電源オフ(運用停止措置)
- ・姿勢判定に用いる星センサーが一時的に不具合を起こしたとき自動的に予備の星センサーに切り替え
- ・姿勢制御に用いるリアクションホイール1台が回転摩擦力が増加して機能が不十分になったとき、自動的にガスジェットでの姿勢制御に切り替え

これからの月探査

2007年

2010年代中頃

将来

●月探査計画

「かぐや(SELENE)」
周回による全体観測



SELENE-2
着陸による表面探査



SELENE-X
有人月探査を見据えた
ミッション(検討中)



日本人が月面上で長期
滞在を開始し、科学探査
及び月の利用を推進
している。(検討中)

日本人クルーの
参加の判断(状況に応じて)

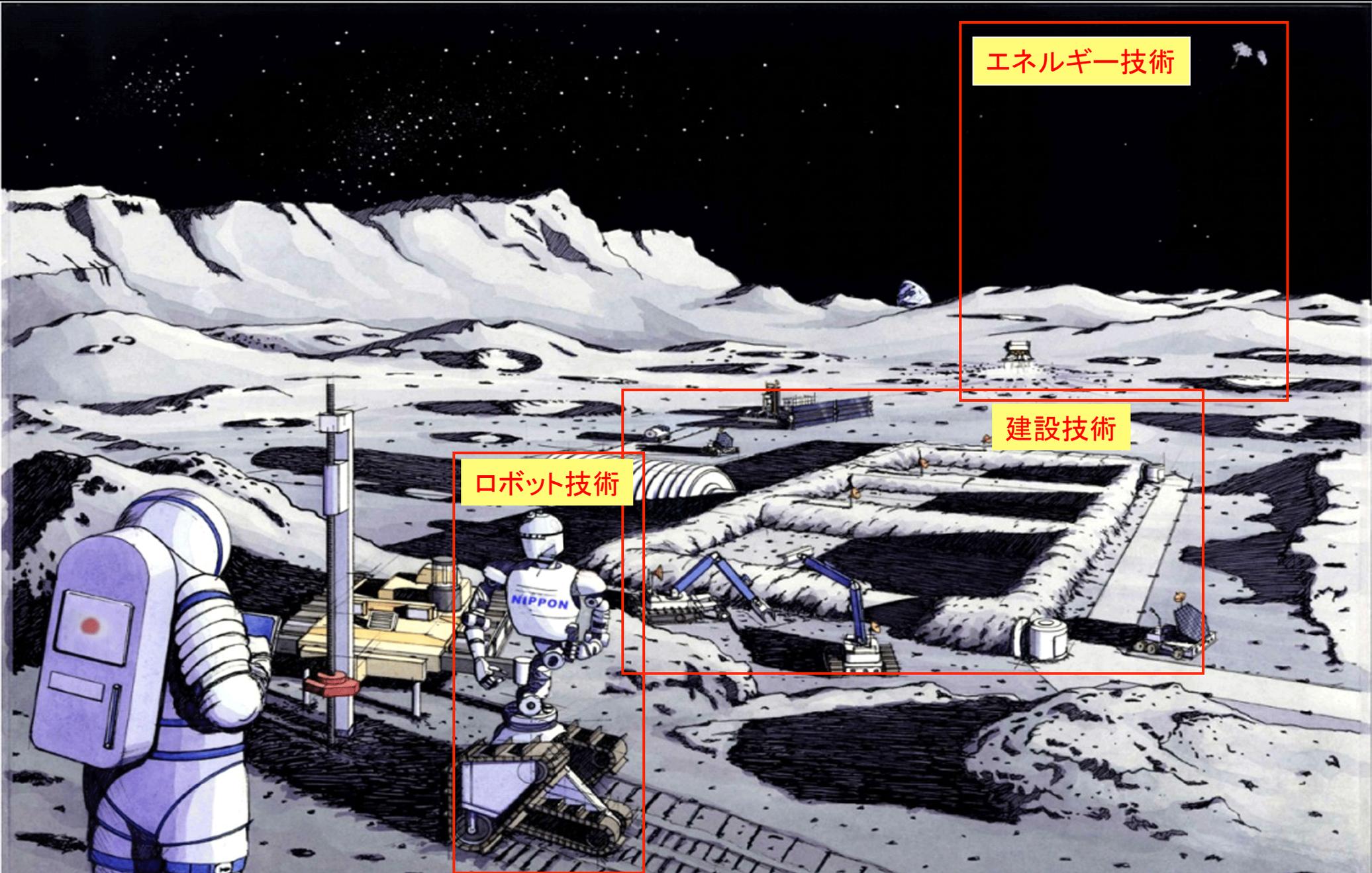
国際月面拠点プログラム
へ参加し、日本人が月面
へ到達する。(検討中)



●有人技術

ISS、HTVの運用・利用等を通じて、
有人基盤技術を獲得・発展

将来の日本の有人月探査イメージ



エネルギー技術

建設技術

ロボット技術

まとめ

1. “かぐや”はアポロ計画以来最大級の月探査計画として月の起源と進化を研究することを主目的として実施された。
2. 月軌道への投入技術、軌道制御技術、姿勢維持技術など将来の月・惑星探査に応用可能な探査技術が習得できた。
3. 月面の元素、鉱物、地形、地下、重力場、磁場、環境の観測を行い膨大な科学データを得た。これらの解析により、“月の起源と進化”の解明に歴史的な進歩をもたらすことが期待される。

A painting of a cherry blossom tree in full bloom. The tree is the central focus, with its branches spreading out and covered in dense, light pink and white blossoms. The background is a dark, deep blue-green, suggesting a night sky. In the upper left corner, a bright, glowing yellow circle represents the full moon. The overall style is soft and painterly, with visible brushstrokes and a gentle, atmospheric quality.

ご静聴ありがとうございました。

絵：満月祭宴(木村圭吾、1992)