

「かぐや」による月の科学，月での科学，月からの科学*

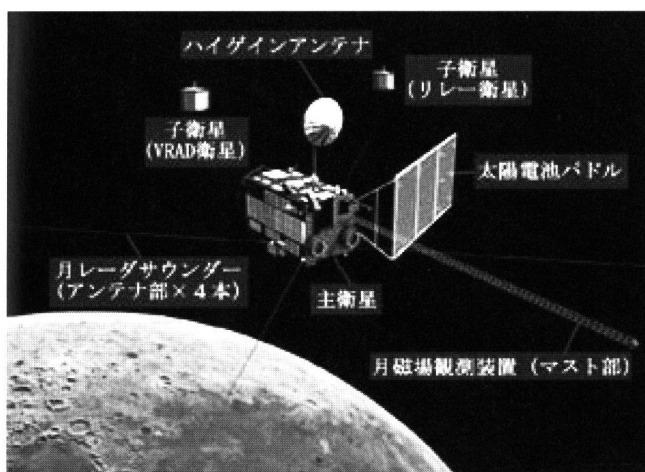
橋本弘藏**

1. はじめに

月周回衛星「かぐや (SELENE)」は、2007 年 9 月 14 日 10 時 31 分に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) により打ち上げられた、月の起源と進化の解明のための探査機である。高度約 100km、周期 118 分の極・円軌道を周回する主衛星と、2 機の子衛星から構成されている。14 種類のミッション機器が搭載され、順調に観測を続けており、アポロ計画以来最大規模の本格的な月の探査である。周回衛星「かぐや」による、月の地形、測距、地下構造、鉱物分布、重力異常の観測や、月での磁場、太陽風、プラズマ、電磁波動の観測、月からのテレビ、可視、極紫外線による地球やその周辺の観測といった科学成果を紹介する。

2008 年 10 月の生存圏研究所公開講演会以降に、米国の科学誌「サイエンス」や地球物理学連合(AGU)の雑誌に多数掲載されるなど、注目される成果を挙げてきた。本稿は講演会の原稿に、これらの成果を中心に加筆したものである。カラーの図や詳しい説明は掲載していないが、後述の JAXA の「かぐや」関連ホームページを参照されたい。

2. 観測装置と初期結果¹⁾



質量:	約 3 ton (打ち上げ時) (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 軸固定
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 / 軌道傾斜角 90 度

図 1 : かぐやの概要©JAXA¹⁾

かぐやの軌道は、高度 100±30km、軌道面傾斜角 90 度、周期 118 分、月表面移動速度 1.6km/s で、周回毎の軌道間隔は高度 100km で 33km である(図 1)。搭載されている観測装置について、大きく分けると以下になる。

1) 月の表面の物質の元素や鉱物の組成などを調べる、蛍光 X 線分光計(XRS)、ガンマ線分光計(GRS)、マルチバンドイメージャ(MI)、スペクトルプロファイラ(SP)。

*2009 年 6 月 26 日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存圏電波応用分野 mail: kozo@rish.kyoto-u.ac.jp

2) 月の地形、地下構造を調べ、月の進化や火山活動など、月の活動史を明らかにする、地形カメラ(TC)、レーダサウンダー(LRS)、レーザ高度計(LALT)。

3) 月の運動や重力などを調べる、衛星電波源(VRAD)、リレー衛星(RSAT)。

4) 月の表面の岩石の磁場を調べて、過去の磁場を調べる、磁力計(LMAG)。

5) 月から地球の磁気圏やプラズマ圏の観測を行う、プラズマイメージャ(UPI)。

6) 将来の人類の月への進出に備え、月の環境、すなわち放射線や粒子線の量などを調べ、危険度などの判断材料を提供する、粒子線計測器(CPS)、プラズマ観測器(PACE)、電波科学実験(RS)。

7) 月の上空からみた「地球の出」の映像などを撮影する、ハイビジョンカメラ(HDTV)。

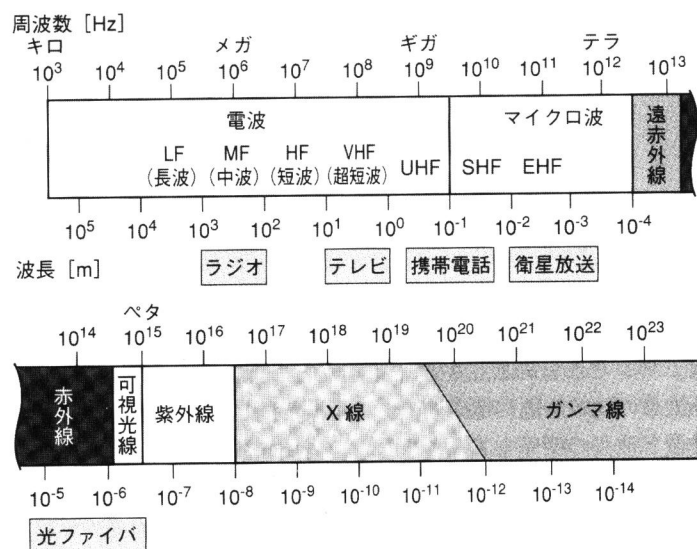


図2：光の周波数と波長³⁾

個々の観測装置の概要を以下に述べる^{1,2)}。観測に用いられているアルファ線はヘリウムの原子核からなる粒子線であるが、図2のように可視光線、紫外線、X線、ガンマ線は電磁波で、この順で波長が短くなってゆく。すなわち、様々な波長で観測を行なっていることになる。

2.1 蛍光X線分光計(XRS)

太陽から放射されるX線が、月表面の物質で反射して、蛍光X線を発する。物質に含まれる元素によってそれぞれ波長が異なるので、月の表面にある元素や、その量が推定できる。特に、マグネシウム、アルミニウム、ケイ素、鉄などの量を調べる。今までには、アポロが持ち帰った月の岩石しかない。XRSは20kmの空間分解能を誇る。

打上げ時期の遅れにより、太陽X線が一番弱い時期になり、源になる太陽フレアが発生しないために、本来の観測ができていない。しかし、図3のように太陽に依らないX線のスペクトルが観測されている。太陽によらないカルシウムや鉄のX線の蛍光発光は重要な発見である⁴⁾。

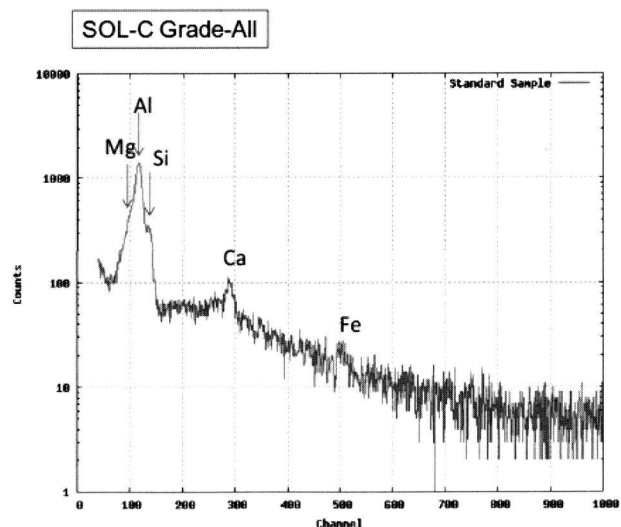


図3：太陽によらないX線蛍光発光⁴⁾

2.2 ガンマ線分光計(GRS)

地球と同様に、月の表面からは天然放射性元素であるカリウム、ウラン、トリウムからガンマ線が

放出されている。また、大気のない月では、宇宙線が直接月面に当たり、月の主要元素である鉄、チタン、カルシウム、珪素、アルミニウム、マグネシウム、酸素などからガンマ線が放出されている。 γ (ガンマ) 線分光計は、それらのガンマ線から元素とその濃度の空間分布を調べることであり⁵⁾。カリウムやウラン、トリウムなどのガンマ線から月の内部の放射性元素量や熱の蓄積が分かる。

0.2-12MeV の広範なエネルギーを高分解能で測定できるので、これまでにはない高精度で元素を同定することができる。空間分解能は約 100km である。極地の永久影の表面に水 (氷) が存在すれば、水素の存在の有無を直接観測できる。

「かぐや」に搭載したガンマ線分光計により初期 2 ヶ月間で観測したエネルギースペクトルを、図 4 の太線で示した⁵⁾。上述の主要元素や自然放射性元素がはっきりと観測された。比較のためにルナ・プロスペクター²⁾で得られたエネルギースペクトルを細線で示した。明らかにかぐやの分光計のほうが高い分解能で月からのガンマ線を観測していることがわかる。

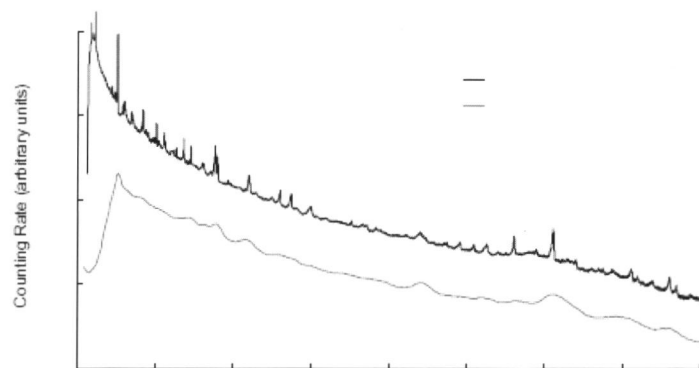


図 4 : かぐや(太線)とルナ・プロスペクタ(細線)の GRS で得たエネルギースペクトルの比較⁵⁾

2.3 マルチバンドイメージャ(MI)

月表面を 9 つの波長で観測して、それぞれの波長の強弱から、月の表面を構成する鉱物の種類を調べる。表面の岩石種が分かれば、月の表面がどのようにしてできたかも推測できる。可視光で 20m、近赤外で 60m の高い空間分解能を有する。

図 5 a) に単一のバンドで得られた画像を示す。同図 b) には、1994 年に打ち上げられたクレメンタインで得られた同様の画像を示したが、これよりもかなり解像度が高くなっている⁶⁾。カラーの図なのでここには示さないが、2 つの波長バンドの強度比を求めることにより、クレータ形成時に月表面に掘り起こされた物質の分布や、クレータ地下に存在する鉱物の化学組成を知ることができる⁷⁾。

2.4 スペクトルプロファイラ(SP)

スペクトルプロファイラも、マルチバンドイメージャと同様、月表面の岩石のスペクトルを測る。しかし、マルチバンド イメージャと異なり、衛星直下の月面からの 0.5-2.6 μ m の波長範囲の光を 3 つの検出器と 2 つの回折格子を用いて 296 に分割し、その強弱を極めて精密に調べることが出来る。実験室に

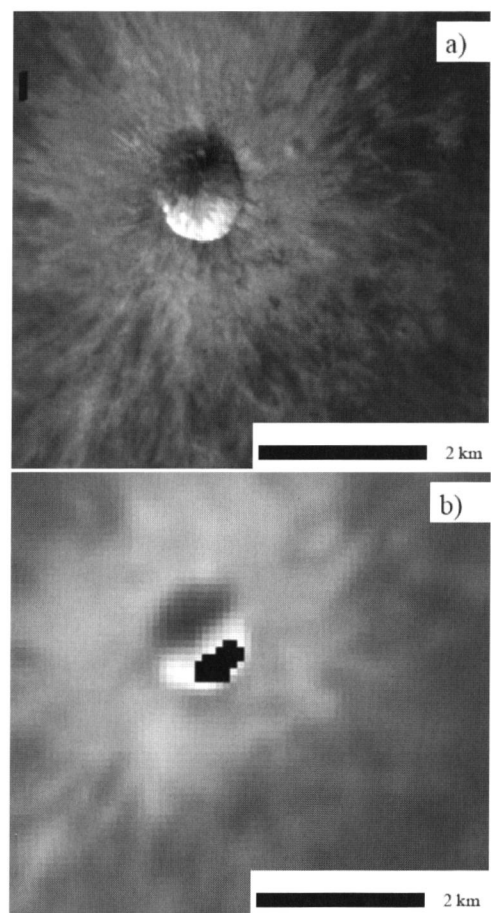


図 5 : MI 750nm バンドの画像比較
a)かぐや、b)クレメンタイン⁶⁾

おける月サンプルの $1.2\text{--}1.3\ \mu\text{m}$ での吸収との比較から、月裏側の Jackson クレータの中央丘において、月面で初めて結晶質斜長石からなる岩体を発見する等の成果を既にあげており、米国 AGU の雑誌 (GRL) に掲載された⁸⁾。

2.5 地形カメラ(TC)

衛星の斜め前方と後方みるための 2 つの可視域単色カメラからなる。高度 100km から 1 画素あたり 10 メートルという高分解能で撮影する。2 つのカメラの視差から、月の地形を立体的に知ることができ、全球の高精度数値地形モデル(DTM)を作成する。なお、マルチバンドイメーჯャ、スペクトルプロファイラ、地形カメラを合わせて、月面撮像/分光機器 (LISM) と呼んでいる。図 6 に立

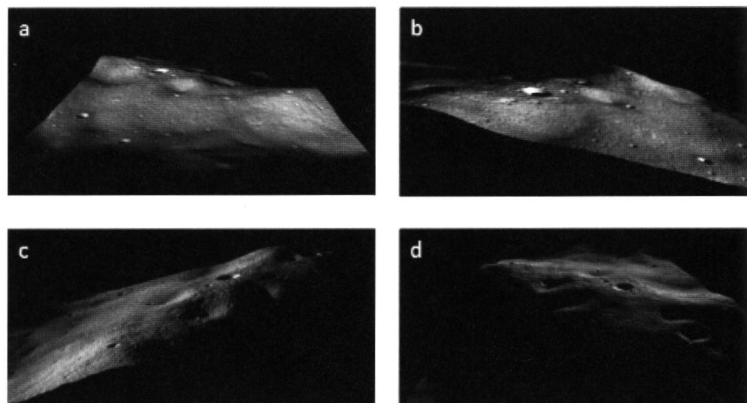


図 6 : TC 立体視画像から得られた透視図©JAXA⁷⁾

体視ペア画像から作られた東西南北各方向からの俯瞰図を示す。高分解能であることも分かる⁹⁾。

月の南極点近くに存在するシャクルトンクレータ内部の太陽光が 1 年中全く当たらない永久影の領域の撮像に世界で初めて成功し、クレータ底表面には、水氷が存在しないか、あったとしても非常に少ない量であることを明らかにし、「かぐや」の成果としてはじめて「サイエンス」に掲載された¹⁰⁾¹¹⁾。また高分解能を生かして、月の海のクレータの個数密度からその場所の形成年代を推定し、25 億年前と従来よりも若い時代までマグマの噴出活動が継続していたことを示した¹²⁾¹³⁾。

2.6 レーダサウンダー(LRS)

月の表面へ 5MHz の短波帯の電波を発射して、月の表面や地下数 km 位からの反射波の往復時間や強度を測定し、その地下構造を調べる。地形カメラなどのデータを組み合わせ、月の表面の構造を、地下まで含めて立体的に知ることができる。

図 7 に LRS で観測されたエコーの高さ(距離)に対する強度分布の例を示す。表面からの強いエコー(Surface Echo)に対して、弱いエコー(Subsurface Echo)が地下から返ってきているのが分かる¹⁴⁾。詳細は合成開口レーダの手法を用いて、詳しく解析される。かぐや画像ギャラリー

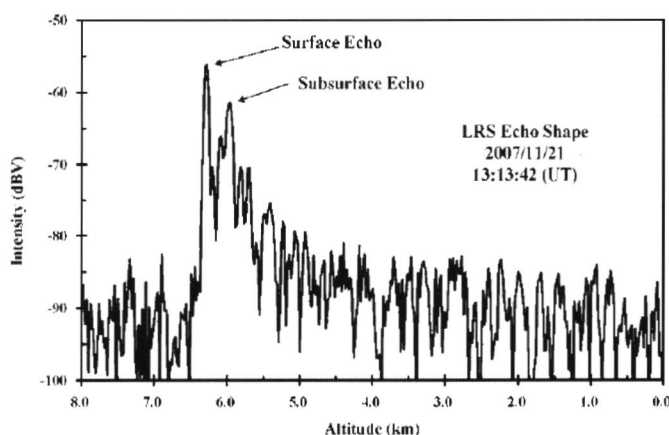


図 7 : 地下からのエコー⁸⁾

に表示されている⁷⁾。LRS には、筆者らが設計した、1MHz 以下の電波を観測する装置も搭載されており、月の影であるウエイクでの電子密度分布測定をはじめ、地球周辺の衛星で見られる静電孤立波やオーロラキロメータ放射の月の影響を受けた観測とそれらの解析などを行なっている。

月の表側の起伏が少ない海において、多数のエコーの解析に成功しており、地下数百メートルの深さ

に層状構造があることや、その層は褶曲¹していることを示した。この深さは 1972 年のアポロ 17 号による観測よりも浅いものであった。また、褶曲状況から、褶曲を起こした地殻変動は地層群の自らの重さによって発生したものであるとの従来の考えを覆し、月全体の冷却が主たる要因となっていることを発見した。これらは「サイエンス」に掲載された¹³⁾¹⁵⁾。

2.7 レーザ高度計(LALT)

周回衛星からレーザ光を発射し、その反射の往復時間を調べ、月の表面の地形の起伏、高度を精密に測定する。このデータは、衛星電波源やリレー衛星による観測とも組み合わせ、月の内部構造を詳しく調べる。さらに TC の画像と統合して、地形図を作製する。図 8 に観測例を示す⁷⁾。

LALT は観測を続け、従来よりも 2 桁高い 0.5 度の精度で月の全球地形図も作製した。その結果、2-300km 以下のサイズの地形再現を劇的に向上

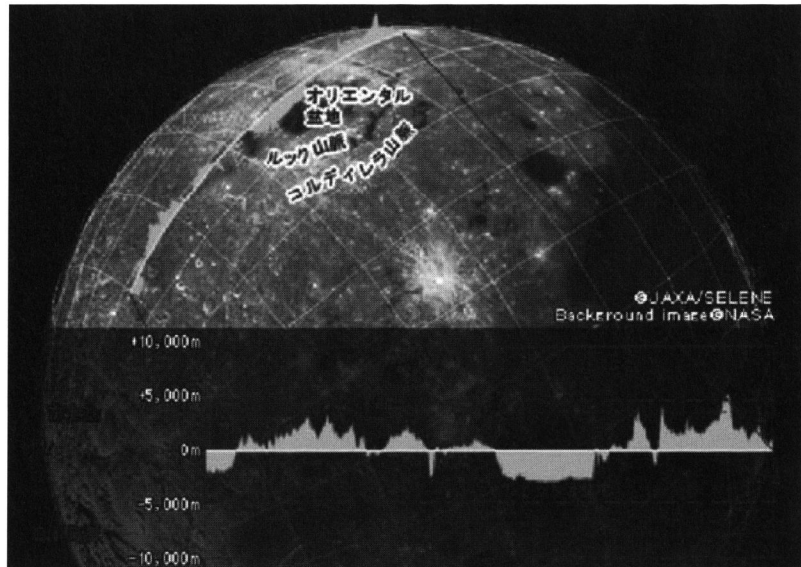


図 8：高度計データ例©JAXA⁷⁾

させ、月の最高地点、最低地点の場所や高度を明らかにした。この成果は「サイエンス」に掲載された¹³⁾¹⁶⁾。

2.8 衛星電波源(VRAD)

リレー衛星(おきな)、VRAD 衛星(おうな)に搭載された 2 つの電波源から発せられる電波により、月の重力を精密に測定する。衛星は、月の重力によって軌道が変化し、電波が地上に伝わる時間も変化する。2 つの電波を使ってその差を測定し、軌道の変化を極めて高精度に求めることができる(VLBI：超長基線電波干渉法)。この軌道の変化から、月の重力の様子を詳しく割り出し、月の内部を知る手がかりを得る。

成果はリレー衛星および電波科学実験の項で述べる。

2.9 リレー衛星(RSAT)

月は公転と自転の周期が一緒であるため、月の裏側を見ることが出来ない。つまり、周回衛星が月の裏側の上空を飛行しているときには、周回衛星からのデータを受信できない。リレー衛星は、月の裏側にいる周回衛星と、地球との電波の中継を行う。これによって、衛星電波源のデータを裏側でも取得でき、これまでほとんど測られたことがなかった月の裏側の重力場のデータを測ることができる。

VRAD と RSAT を用いて月の表側のみならず裏側でも重力分布の測定を行い、両者ではっきりした重力異常の違いを発見した。月の裏側のアポロ盆地では、負の重力異常となっており、地形の凹みや、地下に軽い物質が埋もれていることを示していた。さらに外に向かって同心円状に正の異常も存在していた⁷⁾。月全体の重力分布を観測し、これらの成果は「サイエンス」に掲載された¹³⁾¹⁷⁾。

¹ しゅうきよく：地層の側方から大きな力が掛かった際に、地層が曲がりくねるように変形する現象のこと (<http://ja.wikipedia.org/wiki/褶曲>)。

2.10 磁力計(LMAG)

月にはかつて磁場があったといわれているが、磁力計は、月の磁気異常や現在の磁場環境を測定する。これにより、地球のように中心部に液体の核(コア)が存在し、その対流で磁場が生じる(ダイナモ説)のかといった月の磁気異常の起源の解明を目指す。磁力計は衛星本体からの影響を避けるため、12メートルのマストの先端に取りつけられている。

磁気異常を高精度で測定している他、プラズマ観測器(PACE)との共同観測を順調に続けている。

2.11 プラズマイメージャ(UPI)

月には空気がないので空気による光の影響を受けず、月は1ヶ月で地球を一回りするので、地球を取り巻いて全体を観測できる、非常に適した環境である。地球を取り巻くプラズマによる酸素イオンとヘリウムイオンによる発光を、紫外線で撮影して、月から地球の磁気圏、プラズマ圏を調べる。可視光では、オーロラや電離層から発せられる光(大気光)なども捉える。

調整に時間を要したが、機器は順調である。観測には条件が多い²⁾。

2.12 粒子線計測器(CPS)

宇宙線や太陽から放射される高エネルギー放射線の量を測定し、将来、人間が月に進出時の放射線の危険性に関する基礎的データを得る。また、月の表面の物質に含まれるラドンから放出されるアルファ線も測ることができる。ラドンガスの放出量は、月表層の地下構造や月表面の地殻変動と密接に関係していると考えられており、月の内部構造や進化の歴史を調べることができる。

初期トラブルがあり遅れていたが、その後順調にデータを集積中である。

2.13 プラズマ観測器(PACE)

月周辺の、太陽風などが原因で存在している電子やイオンを調べ、太陽風と月・地球との相互作用や、月と地球の磁気圏の相互作用の解明などを目指す。また、希薄な月の大気中に存在するナトリウムやカリウムなどの分布を調べ、それらの元素の成因を究明する。

二つのイオン観測器を用いて、太陽風のイオンと、月で反射された太陽風のイオンの観測に成功した。その量は入射イオンの0.1-1%であった¹⁸⁾。反射されるイオンは太陽風中のヘリウムではなく、陽子であることや、加速されていることなどを明らかにし、米国AGUの雑誌(GRL)に掲載された¹⁹⁾。

2.14 電波科学実験(RS)

電波科学観測は、搭載装置はないが、「おうな(VRAD)」から地球へ送信される電波を使って観測を行う。この電波が、月面すれすれを通るときに受ける変化から、月の電離層の影響を調べる。理論どおり、1cm³当たり1個程度なのか、ソ連の観測のように千個もあるのかに決着をつけることが出来る。ちなみに、地球の電離層には、最大100万個も存在する。

図9に電波の通路の図と、電離層の影響を受けた位相(厳密には、二つの周波数の電波を使った差動位相)の変化を示す。位相の長期変動は地球の電離層の影響であるが、月の表面近くで僅かな位相の増加が観測されている。月の昼側でこのような観測結果が多く見られており、月の電離層に起因するものである可能性があるが、地球電離層がもたらす誤差が大きいので、さらなる解析とデータ蓄積を進めている²⁰⁾。

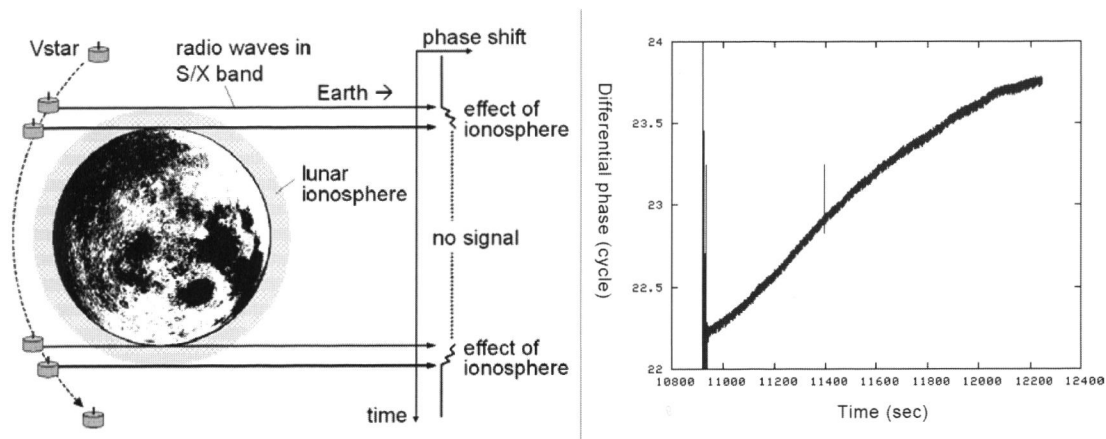


図9：電波科学実験の原理と位相変化の観測例¹⁹⁾

2.15 ハイビジョンカメラ(HDTV)

望遠と広角の220万画素のCCD撮像素子のハイビジョンカメラを搭載し、月の上空から見た「地球の出」や「地球の入り」や月面などの映像を撮影する。月からのハイビジョン映像の送信は世界で初めての試みである。お茶の間に月の映像や月から見た地球のハイビジョン映像を送り、多くの人々の関心を盛り上げた意義は大きい⁷⁾。

3. むすび

分光計、多スペクトル観測、地上カメラ、地下構造、高度計、重力計測、プラズマ計測、電波科学などの「かぐや」の観測結果の一部を示した。公開講演以降に得られた情報も追加して紹介した。なお、「かぐや」は、平成21年6月11日午前3時25分、月表面に落下し役割を終えた。

謝辞

宇宙航空研究開発機構(JAXA)や多数の観測機器PI、担当者の協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) http://www.kaguya.jaxa.jp/ja/about/about_sat_j.htm かぐやプロジェクトの概要
- 2) 青木満、月の科学、ベレ出版、2008.
- 3) 山下、イラスト・図解、光ファイバ通信のしくみが分かる本、技術評論社、2002.
- 4) Okada, T., et al., X-ray fluorescence spectrometry of lunar surface by XRS onboard SELENE (Kaguya), 2008-k-40, 26th Intern. Symp. On Space Technology and Science (ISTS), Hamamatsu, Japan, June 2008. <http://www.senkyo.co.jp/ists2008/pdf/2008-k-40.pdf> 以下のISTSの引用文献は同様にアクセス可能
- 5) Hasebe, N., et al., High Performance Germanium Gamma-Ray Spectrometer on Lunar Polar Orbiter SELENE (KAGUYA), 2008-k-41, ISTS, 2008.
- 6) Ohtake, M., et al, Preliminary Results of the SELENE Multiband Imager, 2008-k-43, ISTS, 2008.
- 7) http://wms.selene.jaxa.jp/index_j.html かぐや画像ギャラリー
- 8) Matsunaga, T., et al., Discoveries on the lithology of lunar crater central peaks by SELENE Spectral Profiler, Geophys. Res. Lett., **35**, doi:10.1029/2008GL035810, 2008.
- 9) Haruyama, J., et al, Preliminary Results of the SELENE Terrain Camera, 2008-k-44, ISTS, 2008.
- 10) Haruyama, J., et al., Science, **322**, 938-9393, 7 November 2008.
- 11) http://www.jaxa.jp/press/2008/10/20081024_kaguya_j.html カラーの図を含む解説がある。

- 12) Haruyama, J., et al., Science, **323**, 905-908, 13 February 2009.
- 13) http://www.jaxa.jp/press/2009/02/20090213_kaguya_j.html カラーの図を含む解説がある。
- 14) Ono, T., et al., Initial Results from the Lunar Radar Sounder Observation on-board the Kaguya (Selene) Spacecraft, 2008-k-47, ISTS, 2008.
- 15) Ono, T., et al., Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers under the Nearside Maria of the Moon, Science, **323**, 909-912, 13 February 2009.
- 16) Araki, H., et al., Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry Science, **323**, 897-900, 13 February 2009.
- 17) Namiki, N., et al., Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya), Science, **323**, 900-905, 13 February 2009
- 18) Saito, Y., et al., Low Energy Charged Particle Measurement by MAP-PACE Onboard KAGUYA, 2008-k-49, ISTS, 2008.
- 19) Saito, Y., et al., Solar wind proton reflection at the lunar surface: Low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA), Geophys. Res. Lett., **35**, L24205, doi:10.1029/2008GL036077, 2008.
- 20) Imamura et al., Studying the Lunar Ionosphere with the SELENE Radio Science Experiment, 2008-k-54, ISTS, 2008.