

月探査レビュー

月探査の主目的は科学か？

国立天文台 RISE月惑星探査検討室

並木則行

2016年1月10日(日)



はじめに

- これからの月探査において科学は主目的になるのか？(並木 → 橋本先生)
- そもそもこれまでの月探査だって科学が主目的だったのか？(橋本先生→並木)
- 科学成果を中心に
- もしや利用できるアイデアがあるかも？(温故知新 by 田中智)

米国の火星探査機パスファインダーは
エアバッグを使って軟着陸したが...





目次

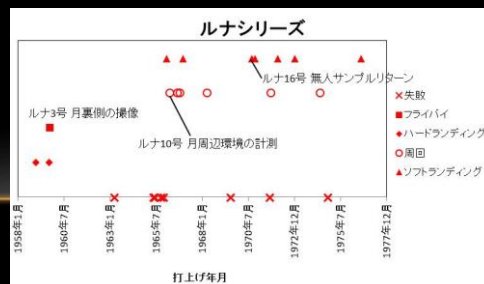
1. アポロ計画以前のミッション
 - 発見の時代
2. アポロ計画における月科学の進展
 - 月科学を超える成果
3. アポロ計画以降の月探査
 - 多国化・多目的化
4. これからの月探査
 - ポストISSの政治主導と国際協力



I. アポロ計画以前の月探査 ～発見の時代～

	打上げ	科学成果
ルナ1号	1959年1月2日	月近傍を通過。世界初の人工惑星になる。
ルナ2号	1959年9月4日	「晴れの海」に命中。月に初めて人工物を送り込む。
ルナ3号	1959年10月7日	世界で初めて月の裏側を撮影。
ルナ9号	1966年2月3日	世界初の月面軟着陸。着陸地点は「嵐の大洋」。
ルナ10号	1966年4月3日	世界で初めて月の人工衛星になる。
ルナ16号	1970年9月20日	「豊かの海」に軟着陸。岩石の標本を採取後、9月24日無事に帰還。
ルナ17号	1970年11月17日	「雨の海」に軟着陸し、世界初の月面車ルノホート1号が活動する。
ルナ24号	1976年8月18日	「危機の海」に着陸し標本を地球へ送る。ルナ計画最後のミッション。

旧ソビエトの月探査





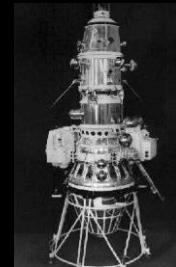
ルナ3号：月裏側の撮像

- 距離 63,500 kmから初めて月裏側の画像を取得
- 画像は不鮮明，しかし，表側と際立った違い
二分性の発見
- フィルムカメラ+自動現像
装置+スキャナ
- カメラはワイド($f = 200 \text{ mm}$)
と望遠($f = 500 \text{ mm}$)



ルナ10号：月周辺環境の計測

- 7種の観測機器
ガンマ線スペクトル計，三軸磁力計、流星
物質検出器、放電カウンター、赤外線観測
装置、X線検出器、荷電粒子検出器
- 磁場は存在しない、もしくはごく弱い
- 表面の岩石は玄武岩に類似
- 大気は存在しない
- 月の重力異常





ルナ16号：サンプルリターン

- 20号，24号と続く3回の採集の第一回目
16号：101 g
20号：30 g
24号：170 g
- ドリルコア ～ 2 m (20号)
- 年代は34億年(16号)， 34-36億年(24号)
- アポロサンプルとの質的な違い

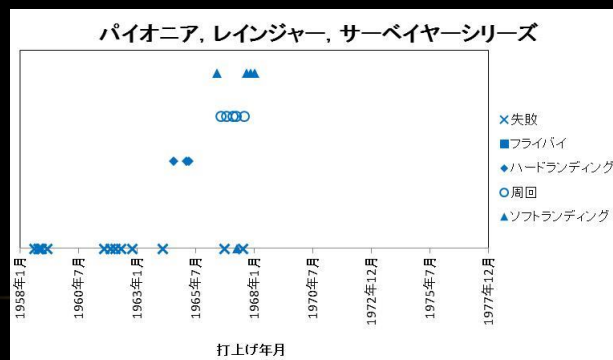


無人サンプル採集と有人サンプル採集の相違



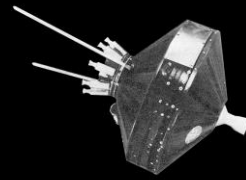
米国の月探査

- ひとえにアポロ計画のため
- 最初は失敗の連続
- 戦略的(同時並行， 短期間の連続打上げ)





パイオニア 0～4号

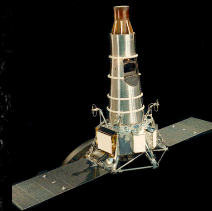


- 目的：
 - 磁場計測
 - 赤外放射計測
 - 月裏側の観測
- 5機はいずれも月に到達せず



レインジャー 1～9号

- 目的：
 - 弾道軌道(月への到達)
 - 質量測定
 - クローズアップ画像
- 1～6号は失敗
- 7～9号は月にハードランディング
 - 7号：Mare Cognitum
 - 8号：Mare Tranquillitatis
 - 9号：Alphonsus crater
- 科学成果
 - クレーターの飽和
 - Floor-fractured crater, cinder cone
 - LTP** (Lunar Transient Phenomena)

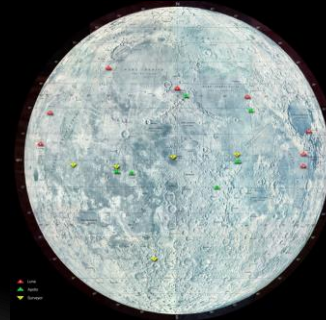


レインジャー8号撮像の
Sabine, Ritterクレーター



サーベイヤー 1~7号

- 目的：アポロ計画の準備(1)
着陸技術開発
- 科学成果
 - 1, 3号：Oceanus Procellarum
 - 5号：Mare Tranquillitatis, Mg-rich + Al-poor, アルファ散乱表面分析→玄武岩
 - 6号：Sinus Medii
 - 7号：Tycho Crater (highland), higher Al + lower Mg than #5 analysis → anorthosite (contradiction to Urey's theory)

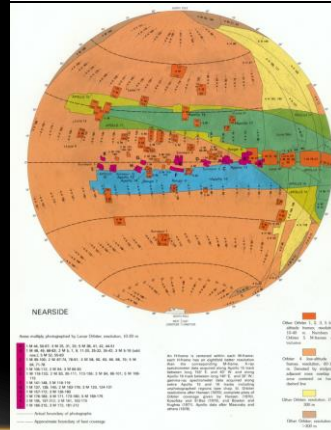


赤：ルナ，青：アポロ，
黄：サーベイヤー



ルナオービター 1~5号

- 目的：アポロ計画の準備(2)
周回軌道
表面のマッピング
- 搭載機器
高解像度カメラ，紫外線・赤外線撮影カメラ，放射線計測，磁場計測
- 科学成果
 - 1~3号：赤道軌道，boulder, lineamentsなど
 - 4号：表と裏の95%，Orientale basin
 - 5号：解像度 2 mと20 m, Copernichus, Tycho, Arithtarchus, Marius Hills (volcanic activity)



The Geologic History of the Moon
[Wilhelms et al., 1987]



II. アポロ計画の月探査 ～月科学を超える成果～

- 「惑星科学」の台頭
- 11号(1969年7月20日)から17号(1972年12月11日)まで、13号を除く、6回の着陸
- **有人探査**
 - 15号：宇宙飛行士に地質巡検のトレーニング
 - 16号：宇宙飛行士に火山地形のトレーニング
 - 17号：最初で最後の地質学者(シュミット)が参加

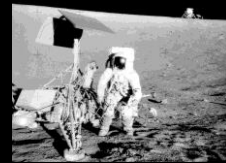


スコット船長のトレーニング風景



II. アポロ計画の月探査 ～月科学を超える成果～

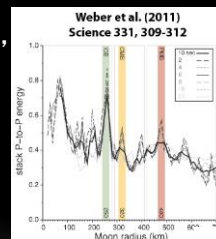
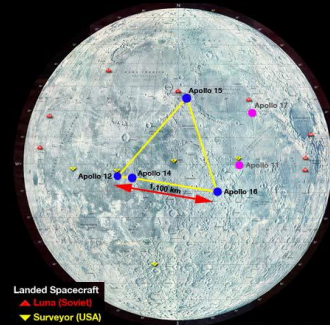
- 11号：Mare Tranquillitatis
地震計(月震は稀)、レーザ反射板
- 12号：Oceanus Procellarum
ALSEP (Apollo Lunar Surface Experiment Package)
- 14号：Fra Mauro
Fra Mauro層；Imbriumからの eject
ALSEP
- 15号：Mare Imbrium
Highland/mare境界、ハドリー峡谷・アペニン山脈
ALSEP
- 16号：Descartes Highlands
ALSPE
Impactこそ月の地質の主要因
- 17号：Mare Tranquillitatis
ALSEP
30 kmの踏査, 120 kgのサンプル



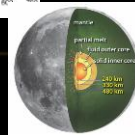


アポロの科学成果： 地震計

- 11, 12, 14, 15, 16号が月震計を設置
- 14号で **active月震探査**
- 観測時間は通算8年10ヶ月
- 12,558回の地震記録
- (地球)地震に比べてノイズは少ないが、散乱が強い
P波, S波の同定は困難
→ 統計処理
- **Next: ネットワーク (特に裏側)?**
- 1000 km以深は分からない



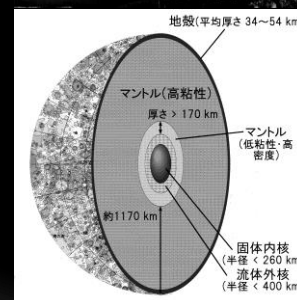
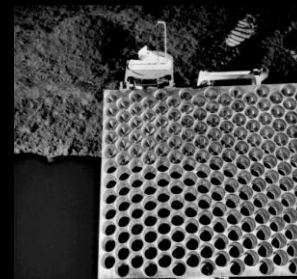
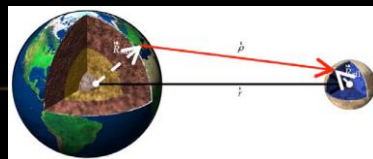
Weber et al. [2011] Science, 331, 309-312



アポロの科学成果： レーザ反射板

- 物理秤動観測
- マントル深部に低粘性・**高密度**の層が必要 → オーバーターン
- Next: 劇的に精度を上げるためには

大型反射板を設置する or 地上の大型望遠鏡を利用する or 桁違いに強力なレーザ



Matsumoto et al. [2015] GRL, DOI: 10.1002/2015GL065335



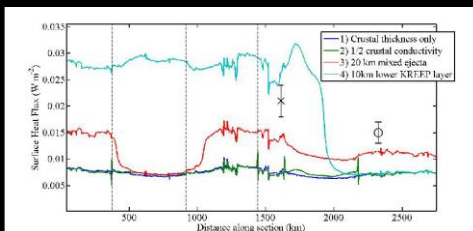
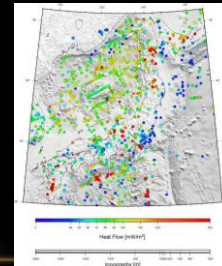
アポロの科学成果： 熱流量測定

- 15,17号での測定データ
- 地形の影響が大きい
- 地震ネットワーク以上に多点の観測が必要

軌道上から輝度温度測定 → Chang'E-1



上：ALSEP
下：日本周辺の
熱流量分布



モデル熱流量と実測値の比較。X：15号，O：17号[Siegler et al., LPSC2013].



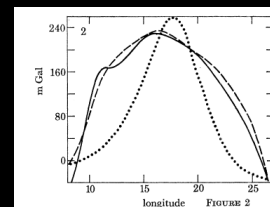
アポロの科学成果： 重力異常

- Lunar Orbiter (表側)と15, 16号の小型衛星(赤道域)
- Muller and Sjogren, 161 (3842): 680-684

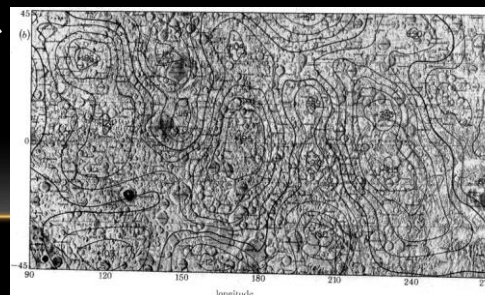
質量異常は表面にあると仮定

スプライン関数で近似

- 内部構造に関する重大なヒント



Sjogren, 1977, Phil. Trans., Ser. A, 285, 219-226.





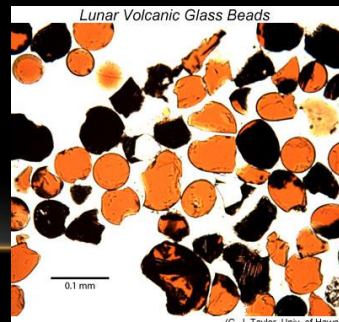
アポロの科学成果： 元素組成(X線, γ 線), ダスト

- 周回機から(赤道域)X線と γ 線を観測
 残念ながら赤道域のみ
- 浮遊ダスト



アポロの科学成果： サンプルリターン(I)

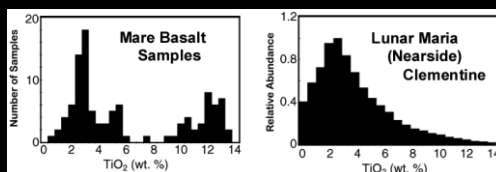
- 11号 : 40 kg , high Ti
- 12号 : low Ti, KREEP
- 14号 : impact-melt breccia (high-P phase)
- 15号 : **green glass**
- 16号 : impact melt
- 17号 : black-and-**orange glass**



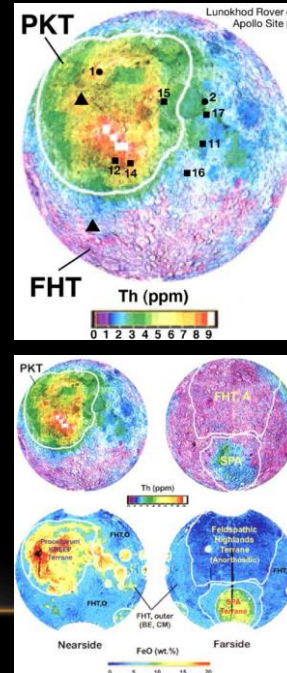


サンプルリターン： 地域性

- 角礫岩には種々のサンプルが含まれる...？
- 月面はFHT, PKT, SPAに三分される
- アポロサンプルは領域の境界から収集されている
- PKTの組成を反映している



Giguere et al. (2000) MaPS 35, 193



サンプルリターン： 月隕石

- アポロサンプル 400 kgに対して, 100個, 38 kg
- 全球からのサンプリング(PKT ~ 15 %)
 - 少なくとも56箇所から
 - 裏側からのサンプル: Dhofar 489
- 年代
 - アポロサンプル 38 ~ 32億年
 - 月隕石 43.5 ~ 28.7億年
- 裏側, 深部からのサンプル, **urKREEP**

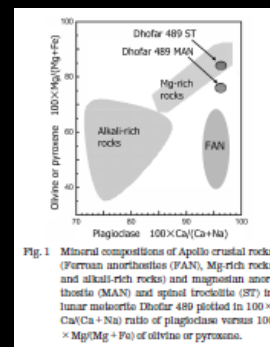


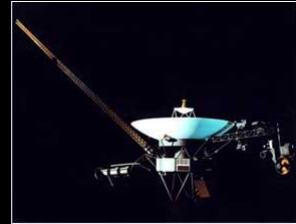
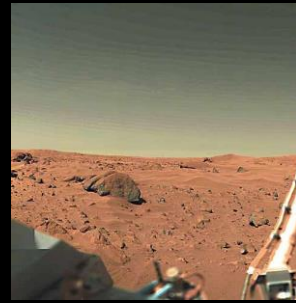
Fig. 1 Mineral compositions of Apollo crustal rocks (Feldspathic anorthosite (FAN), Mg-rich rocks and alkali-rich rocks) and magnesian anorthosite (MAN) and spinel troctolite (ST) in lunar meteorite Dhofar 489 plotted in $100 \times \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na})$ ratio of plagioclase versus $100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ of olivine or pyroxene.

荒井, 2009, 地球化学
43, 169-197.



アポロ計画の影響： 惑星探査の開花

- 火星探査
1973.11.3 マリナー10号
1975.8.20, 1975.9.9 バイキング1, 2号
- 金星探査
1961.2.12-1983.6.7 ベネラ
1978.5.20 パイオニアビーナス
- 木星探査
1972.3.2, 1973.4.6 パイオニア10, 11号
1977.9.5, 1977.8.20 ボイジャー1, 2号



Ⅲ. アポロ計画以後の月探査 ～多国化・多目的化～

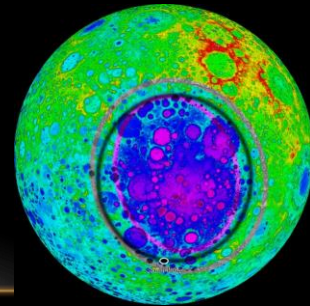
Clementine	25 Jan. 1994 - 5 May 1994
Lunar Prospector	7 Jan. 1998 - 31 July 1999
SMART-1	27 Sept. 2003 - 3 Sept. 2006
Kaguya (SELENE)	14 Sept. 2007 - 10 June 2009
Chang'E 1	24 Oct. 2009 - 1 Mar. 2010
Chandrayaan-1	22 Oct. 2008 - 31 Aug. 2009
LRO	17 June 2009 - STILL ACTIVE
LCROSS	17 June 2009 - 9 Oct. 2009
ARTEMIS	20 July 2009 - STILL ACTIVE
Chang'e 2	1 Oct. 2010 - April 2012
GRAIL	10 Sept. 2011 17 - Dec. 2011
LADEE	6 Sept. 2013 - 17 Apr. 2014
Chang'E 3	1 Dec. 2013 - STILL ACTIVE





米国：科学から資源へ CLEMENTINE

- 国防総省 + NASA + 弾道ミサイル防衛局
- 目的：
 - 高緯度地域の科学観測
 - 宇宙防衛小型化技術の機能確認**
- 搭載機器
 - 高分解能カメラ，紫外線・可視光カメラ，近赤外線カメラ，長赤外線カメラ，荷電粒子センサ，レーザ距離計，レーダ
- 科学成果
 - 南極エイトケン盆地の『発見』
 - 宇宙風化の定量化
 - 全球重力場
 - 鉱物マップ
 - 永久影中の水

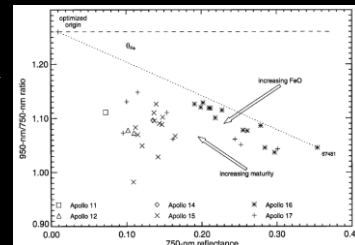


月南半球の地形。赤は高地，青は低地(かぐや/LALTデータ)。

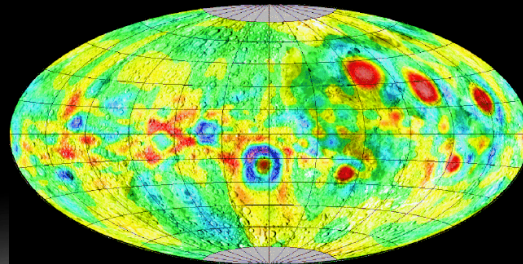


米国：科学から資源へ CLEMENTINE

- 科学成果
 - 南極エイトケン盆地の『発見』
 - 宇宙風化の定量化
 - 全球重力場
 - 鉱物マップ(FeO , TiO_2)
 - 永久影中の水**



Lucey et al., 2000, JGR, 105, 20,377-20,386.



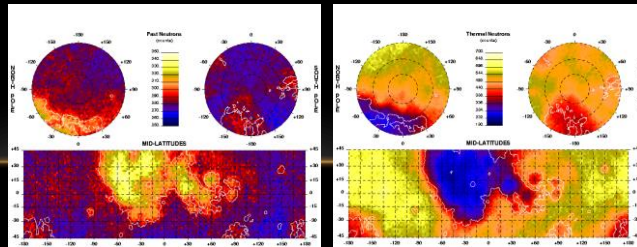
月南半球の地形。赤は高地，青は低地(かぐや/LALTデータ)。



米国：科学から資源へ LUNAR PROSPECTOR



- 目的：科学～資源
極域水の確認(正しくはH)
- 搭載機器
中性子線分光計，ガンマ線分光計，アルファ線分光計，
磁力計・電子反射計，ドップラー重力計測器
- 科学成果
極域に約30億
トンの水



米国：科学から資源へ LRO



- 目的：科学<資源，月利用
資源の計測
放射環境
- 搭載機器

Diviner Lunar Radiometer Experiment, LAMP (Lyman-Alpha Mapping Project),
LEND (Lunar Exploration Neutron Detector), LOLA (Lunar Orbiter Laser
Altimeter), LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera), Mini-RF

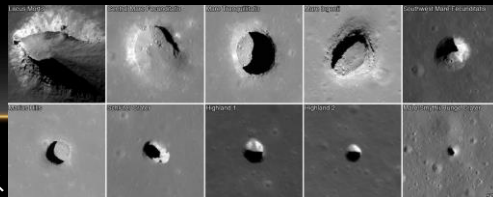
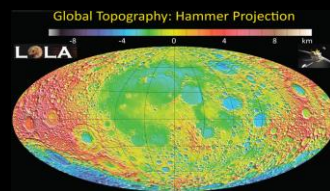
- 科学成果

0.5 m解像度のパノラマ

多数のpit

溶岩流の層を識別

若い(< 10億年)のテクトニクス



Wagner & Robinson, 2014, *Icarus*, **237**, 52-60.

米国：科学から資源へ LRO

- 科学成果
 - 0.5 m解像度のパノラマ
 - 多数のpit
 - 溶岩流の層を識別
 - 若い(< 10億年)のテクトニクス

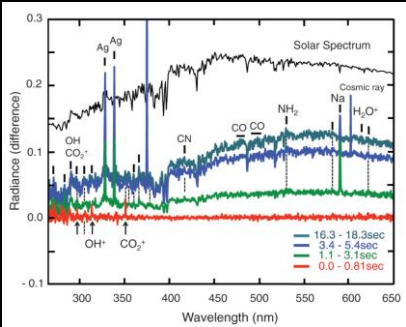
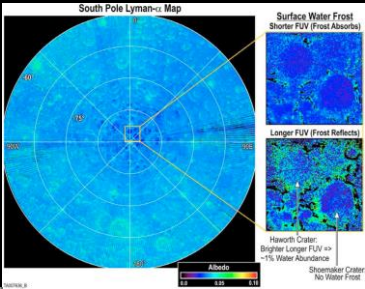


Robinson et al., 2012, *Planet. & Space Sci.*, **69**, 18-27

Watters et al., 2010, *Science*, **329**, 936-940.

米国：科学から資源へ LRO

- 科学成果
 - 極域PSR (Permanent Shadowed Region) の霜氷
 - LCROSS カベウスクレターへの衝突

Gladstone et al., 2012, *J. Geophys. Res.*, **117**, doi:10.1029/2011JE003913.

Colaprete et al., 2010, *Science*, **330**, 463-468.
Schultz et al., 2010, *Science*, **330**, 468-472.

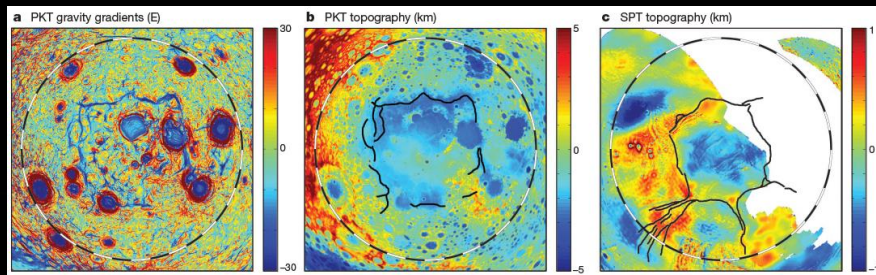


米国：科学から資源へ GRAIL



- 目的：科学 >> 資源，月利用
重力場と内部構造
有人探査のサポート
- 搭載機器
Kaバンド通信
- 科学成果
超高解像度の重力マップ

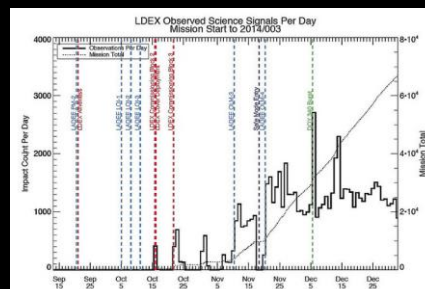
Andrews-Hanna et al., 2014, *Nature*, **514**, 68–71.



米国：科学から資源へ LADEE

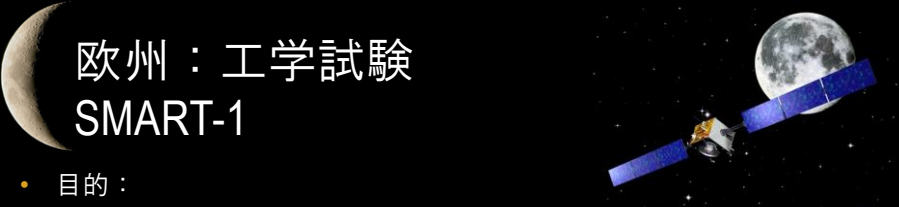


- 目的：科学 < 資源，月利用
大気の構成
ダスト環境
- 科学成果
双子座流星雨時にダスト量の増加を計測
浮遊ダストは確認できず



Horányi et al., 2014, LPSC2014.

欧州：工学試験 SMART-1

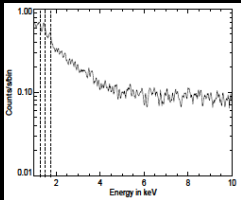


- 目的：
 - イオンエンジンの技術試験
- 搭載機器
 - X線スペクトロメータ・高精度月小型カメラ・小型赤外線スペクトロメータ
- 科学成果
 - ?...だが**小型衛星による月探査**の例

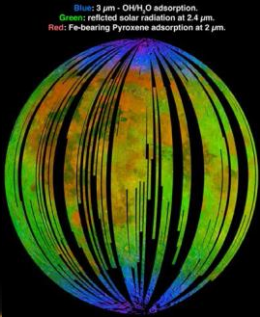


インド：深宇宙に参入 CHANDRAYAAN-1

Particle Induced X-ray emission計測
[Narendranath et al., 2014, ASR, **54**, 1993].



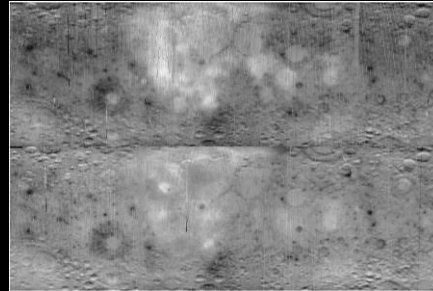
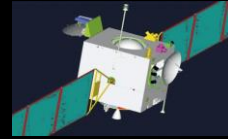
- 目的：
 - 地形図
 - 鉱物分布図
- 搭載機器
 - 地形マッピングカメラ(TMC), 高解像度スペクトルカメラ(HySI), レーザー高度計(LLRI), 高エネルギーX線スペクトロメータ(HEX), 月面衝突装置(MIP)
 - X線スペクトロメータ(C1XS) (ESA), 近赤外線スペクトロメータ(SIR-2) (ESA), 低キロ電子ボルト原子反射解析装置(SARA) (ESA), 放射線モニタ(RADOM) (ブルガリア科学アカデミー), 小型合成開口レーダ(MiniSAR) (NASA), 月面鉱物マッピング装置(英語版) (M3) (NASA)
- 科学成果
 - X線測定**(低S/N)
 - 鉱物中のOH基



OH/H₂Oの3 μm吸収 [Pieters et al., 2009, Science, **326**, 568-572].



中国：月探査を牽引 CHANG'E-1



- 目的：
 - 3次元画像
 - 元素分布
 - レゴリス調査
 - 惑星間環境
- 搭載機器

CCD立体カメラ, レーザ高度計, 画像分光器,
ガンマ線分光器, X線分光器, マイクロ波測定
器, 太陽高エネルギー粒子測定器, 太陽風粒
子測定器(低エネルギーイオン測定器)

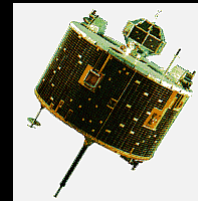
3 GHzの輝度温度.
上：昼間 9 ~ -10 K,
下：夜間 7 ~ -10 K
[Chan et al., 2010, EPSL,
295, 287-291].

- 科学成果

輝度温度の観測



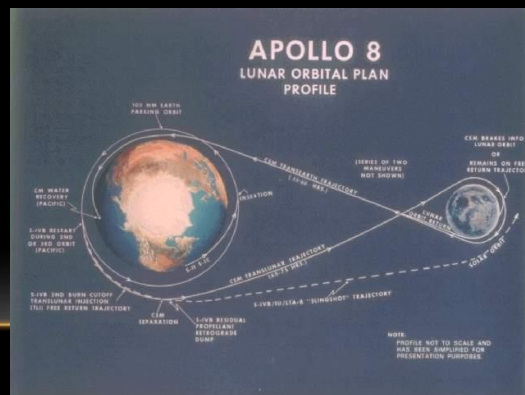
日本：科学と開発 ひてん・はごろも



- 目的：
 - 衛星軌道(スイングバイ)制御技術の確率
- 搭載機器
 - ダストカウンタ
- 科学成果

理学的成果はなし

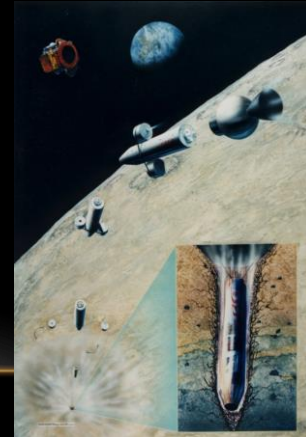
アポロ8号の8の字軌道.





日本：科学と開発 LUNAR-A

- 目的：
 - 内部構造
- 搭載機器
 - 地震計
 - 熱流量計
- 科学成果
 - 中止 → APPROACH計画(ペネトレータ2基)へ



日本：科学と開発 かぐや

- 目的：
 - グローバルマッピング
 - アウトリーチ**
- 搭載機器

蛍光X線分光計，ガンマ線分光計，マルチバンドイメージャ，
スペクトルプロファイラ，地形カメラ，月レーダサウンダー，
月磁場観測装置，レーザ高度計，プラズマ観測装置，粒子線計
測器，電波科学，超高層大気プラズマイメージャ，VLBI電波源，
リレー衛星，ハイビジョンカメラ
- 科学成果
 - 地殻形成と裏側の理解





日本：科学と開発 かぐや (TC/MI/SP)

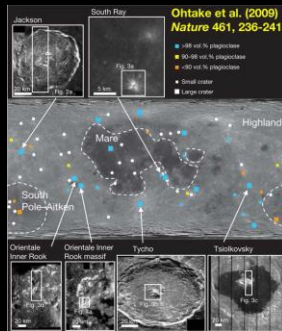


- 科学成果

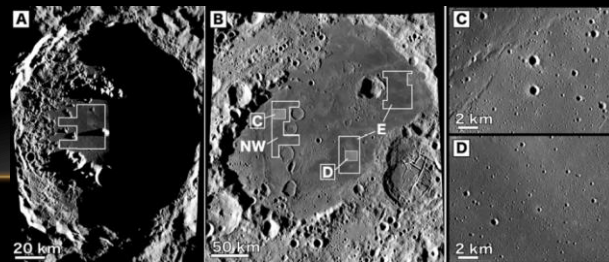
月岩石学の新展開 PAN (Pure Anorthosite)

月裏側の火山活動は36億年～24億年前まで継続

Next: 月裏側からサンプル採集



春山ほか, サイエンス, 2008.



日本：科学と開発 かぐや (LALT/VRAD/RSAT)

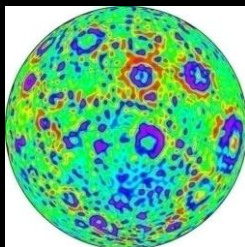


- 科学成果

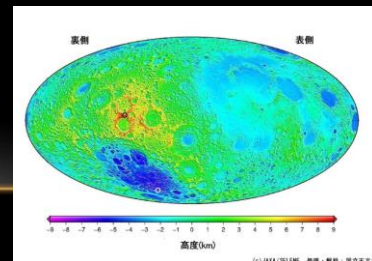
低次重力場係数の精度向上 → ラブ数 (k_2) の更新

月裏側の重力観測 → GRAILが一新, 桁違いに.

Next: 月レーザ測距の飛躍的発展?



左：月裏側のフリーエア
重力異常
右：全球地形図



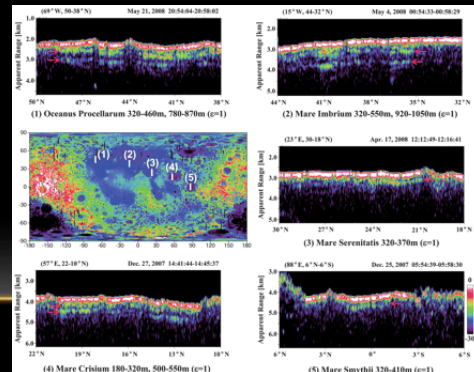


日本：科学と開発 かぐや (LRS)

- 科学成果

海の火山活動に複数回の休止期

Next: 地中レーダによる実証



海の地下構造 [Ono *et al.*, 2009, *Science*, **323**, pp. 909-912]



日本：科学と開発 かぐや (GRS)

- 科学成果

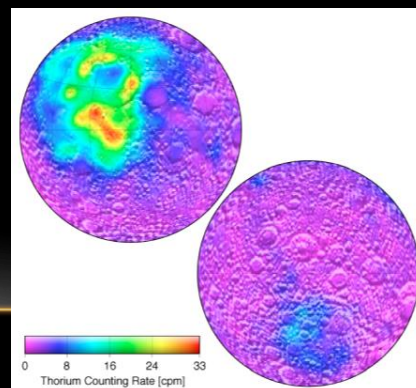
トリウム分布

Min. Thは地殻最厚いに対応

→ 最古の地殻？

Next: 裏側サンプルリターン

urKREEP



Yamashita *et al.*, 2010, *GRL*, **37**, L10201.]

日本：科学と開発 かぐや (HDTV)

- 科学成果
 - アニメ・漫画に登場するロケットがスペースシャトルからH2Aに
 - Next: 月面の音?!



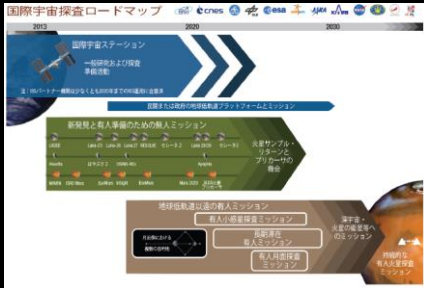


上：地球の出
左：シュレディンガー盆地

IV. これからの月探査 ～ポストISSの政治主導と国際協力～

- 国際宇宙探査ロードマップ
 - http://www.jspec.jaxa.jp/enterprise/data/roadmap_j.pdf

- 大規模・国際協力ミッションへの部分的参加・設計
- 日本独自・科学主導の小型ミッション
- 国際宇宙ステーションからの定常観測
- 地球観測衛星・天文観測衛星の利用



IV. これからの月探査 ～ポストISSの政治主導と国際協力～

- 無人月探査計画
ロシア，韓国も積極的

Timeline of lunar exploration missions (2010-2025):

- Japan:** SELENIO (2018)
- USA:** LRO (2009), GRAIL (2012), LADDER (2013), Vision and Voyagers for Planetary Science in the Decade 2013-2022
- China:** Chang'e 1 (2007), Chang'e 2 (2006), Chang'e 3 (2013), Chang'e 4 (2018), Chang'e 5 (2020), Chang'e 6 (2023)
- ESA:** SMART-1 (2006)
- Russia:** Luna 25 (2021), Luna 26 (2023), Luna 27 (2025), Luna 28 (2028)
- India:** Chandrayaan-2 (2020)
- South Korea:** KLENS (2025)

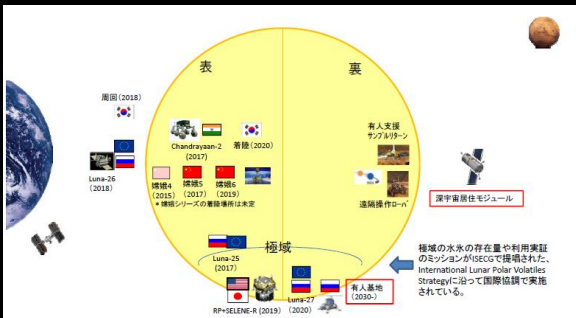
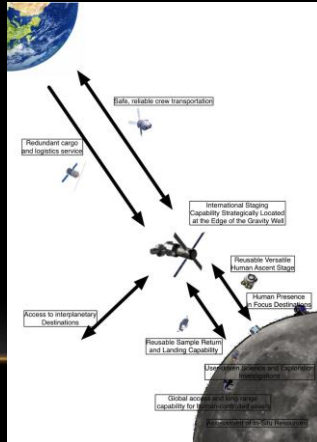
SLIM：ピンポイント 着陸

- 目的
 - 高精度着陸(100 mレベル)技術の実証
 - 軽量システム(月惑星探査の高頻度化)
 - 着陸誘導制御技術
 - 画像照合航法
 - 着陸衝撃吸収系
 - 薄膜電池シート，SUSラミネートバッテリー
 - 高性能推進系

IV. これからの月探査 ～ポストISSの政治主導と国際協力～

- 国際月ステーションからの無人・有人探査計画

ESA Vision 2030 (International symposium on Moon 2020-203, 15-16 Dec. 2015)

The diagram on the left illustrates various lunar exploration missions and capabilities. It includes a central yellow circle divided into '表' (Surface) and '裏' (Back). Missions shown include Luna-25 (2017), Luna-26 (2018), Chandrayaan-2 (2017), Chandrayaan-3 (2020), and others. It also mentions '極域' (Polar region) and '極域の水氷の存在量や利用実証のモニタリングがISDCで実施された。International Lunar Polar Volatiles Strategyに沿って国際協賛で実施されている。' (Monitoring of water ice presence and utilization in the polar region was implemented by ISDC. It is being implemented with international cooperation following the International Lunar Polar Volatiles Strategy).

The diagram on the right shows a lunar lander with various capabilities: 'Safe, reliable crew transportation', 'Redundant cargo and logistics service', 'International flagging Capability Strategically Located (at the Edge of the Gravity Well)', 'Reusable Versatile Human Incent Stage', 'Human Presence in Focus Destinations', 'Reusable Sample Return and Landing Capability', 'Access to interplanetary destinations', and 'Global services and emergency compatibility for lunar operations and ground infrastructure for life support'.

IV. これからの月探査 ～ポストISSの政治主導と国際協力～

- 大規模・国際協力ミッションへの部分的参加・設計

Ready-to-Onboardな観測機器の準備

利用・資源探査との親和性

※ ただし、ISS国際宇宙探査小委員会の掲げる目的は「科学と滞在」(資源利用は含まれない)[2016 宇宙科学シンポジウム]

SELENE-R

- 日本独自・科学主導の小型ミッション
- 国際宇宙ステーションからの定常観測
- 地球観測衛星・天文観測衛星の利用



IV. これからの月探査 ～ポストISSの政治主導と国際協力～

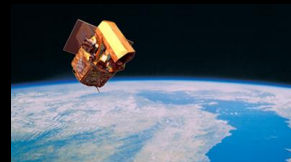
- 国際宇宙探査ロードマップ

1. 大規模・国際協力ミッションへの部分的参加・設計
2. **日本独自・科学主導の小型ミッション**

小型技術の活用：イプシロンロケット，小型衛星・超小型衛星

新パートナー(**台湾**，ベトナム...)

3. 国際宇宙ステーションからの定常観測
4. 地球観測衛星・天文観測衛星の利用



台湾の地上観測衛星
FORMOSAT-2. 2台のカメラを搭載して，最高解像度2mで地表を観測



IV. これからの月探査 ～ポストISSの政治主導と国際協力～

- 国際宇宙探査ロードマップ

1. 大規模・国際協力ミッションへの部分的参加・設計
2. 日本独自・科学主導の小型ミッション
3. **国際宇宙ステーションからの定常観測**

2020年代 月近傍からの着陸(4名以上)

無人ローバの遠隔操作など

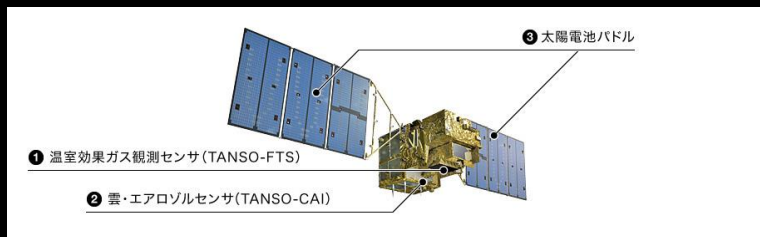
超小型衛星ミッションの可能性

4. 地球観測衛星・天文観測衛星の利用



IV. これからの月探査 ～ポストISSの政治主導と国際協力～

- 国際宇宙探査ロードマップ
 1. 大規模・国際協力ミッションへの部分的参加・設計
 2. 日本独自・科学主導の小型ミッション
 3. 国際宇宙ステーションからの定常観測
 4. 地球観測衛星・天文観測衛星の利用



温室効果ガス
観測衛星
いぶき
(GOSAT)

高感度セン
サを搭載



おわりに

- 過去のミッション，実現しなかった計画にもヒントがある
- 方法論は多様(月周回ステーションから地球観測衛星まで)
- 王道としての大規模国際協力ミッションと，ニッチとしての日本独自小型ミッションの使い分け