

## 資料10-2

科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
宇宙開発利用部会  
ISS・国際宇宙探査小委員会  
(第10回)H26.11.12

# 「月探査の意義について」

2014年11月12日

大阪大学 理学研究科  
佐伯和人

# 本日の話題

(1) 月と火星の特徴

(2) 月(火星)探査の位置づけ

(3) 月探査ロードマップの考え方

## 月と火星の基本データ

	半径 (km)	地球との距離 (km)	大気圧 (bar)	大気	地表温度 (平均) (°C)
月	1737	38万	0.00	なし	-170 ~ 120
火星	3396	5759万 (2018年) 会合周期 780日ごとに 打ち上げ好機	0.01	CO <sub>2</sub> (95%) N <sub>2</sub> (3%) Ar (1.5%)	-150 ~ 20 (-60)
地球	6378		1	N <sub>2</sub> (78%) O <sub>2</sub> (21%) Ar (1%)	-90 ~ 60 (15)



撮影：鈴木邦彦

人類の**次のフロンティア**  
として必要な条件は、

- 1) 大きい
- 2) 近い
- 3) 分化している

# 月は**大きい**・・・惑星に近い

月 1737 km (地球の**約1/4**)

火星 3396 km (地球の**約1/2**)

地球 6378 km

火星328 m(14号車)

# 月は近い

太陽の直径を2 m とすると

地球 1.8 cm

月 0.5 cm

火星 1.0 cm

地球 215 m(9号車)

地球 - 月 0.55 m

火星最接近 (2018年)  
地球 - 火星 83 m 3車両強



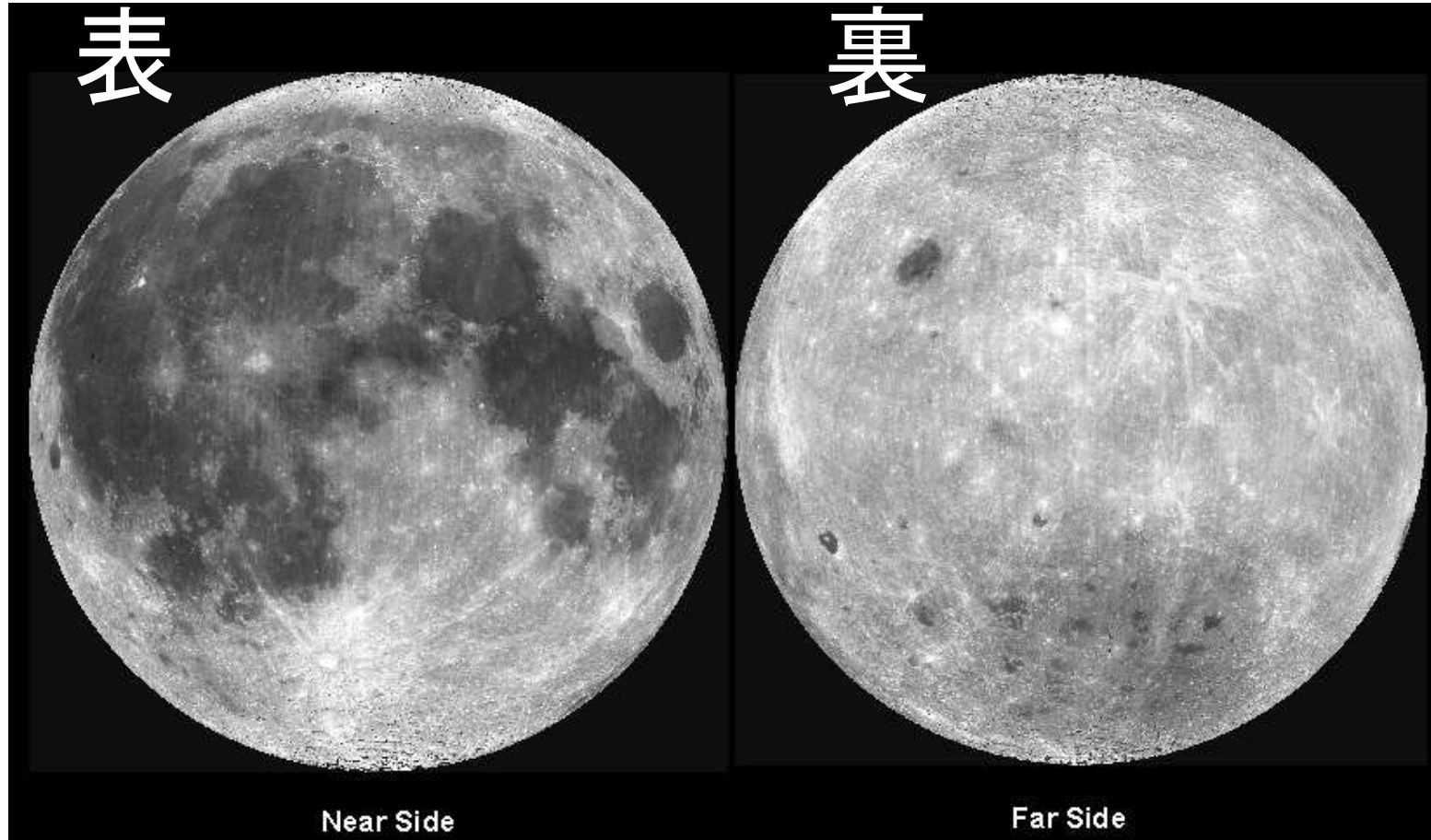
新幹線N700系 16両編成 405 m  
 先頭車 27.35 m  
 中間車 25 m

木星 1.1 km      土星 2.1 km

## 月と火星の特徴

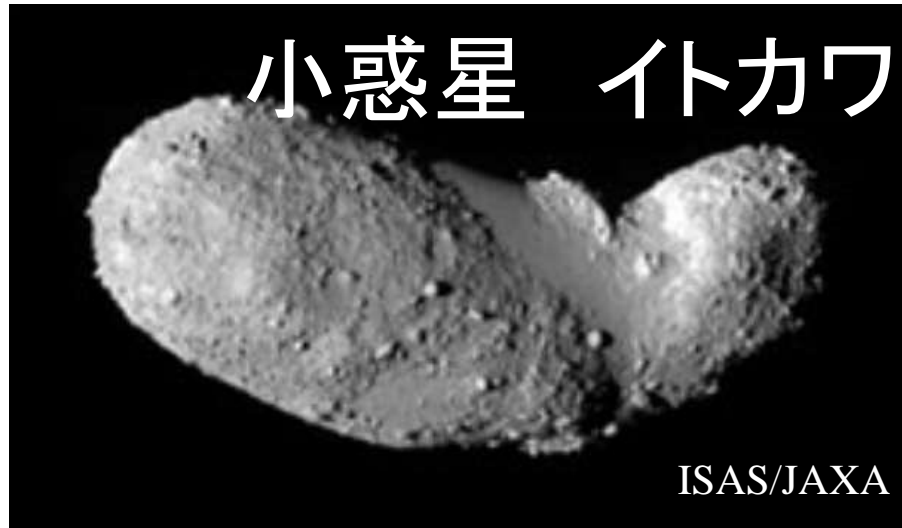
月は常に表側を地球に向けている(=通信利便性(これも近さ))

*Clementine Albedo Map of the Moon / NASA*



月は自転と公転が一致しているので、表しか見えない。  
火星の衛星フォボス、ダイモス、木星の4つのガリレオ衛星なども同じ<sup>7</sup>

# 月は分化している



未分化な天体

おおむね一様な物質



分化した天体

地殻＋マントル＋核

鉱山は分化した天体にのみ存在する



# まとめ

	月	火星	地球	小惑星 イトカワ 約 500 m	小惑星 ベスタ 約 500 km
大きい (資源の量)	○	○	○	×	△
近い (距離だけでは 測れない 利便性)	○	×	◎	△	×
分化している (元素濃集機構)	○	○	◎	×	△

## 月が火星より優れている点

- ・圧倒的に地球に近い
- ・同じ面が地球に向いている
- ・最初期の地殻が保存されている

## 火星が月より優れている点

- ・大気が存在
- ・かつて海があった
- ・圧倒的な揮発成分資源量

# 本日の話題

(1) 月と火星の特徴

(2) 月(火星)探査の位置づけ

(3) 月探査ロードマップの考え方

## 惑星進化の段階の理解

未分化な小惑星 → 分化した小惑星 → 月 → 火星 → 地球  
卵(+前世の記憶)                      胎児                      赤ちゃん                      幼児                      青年

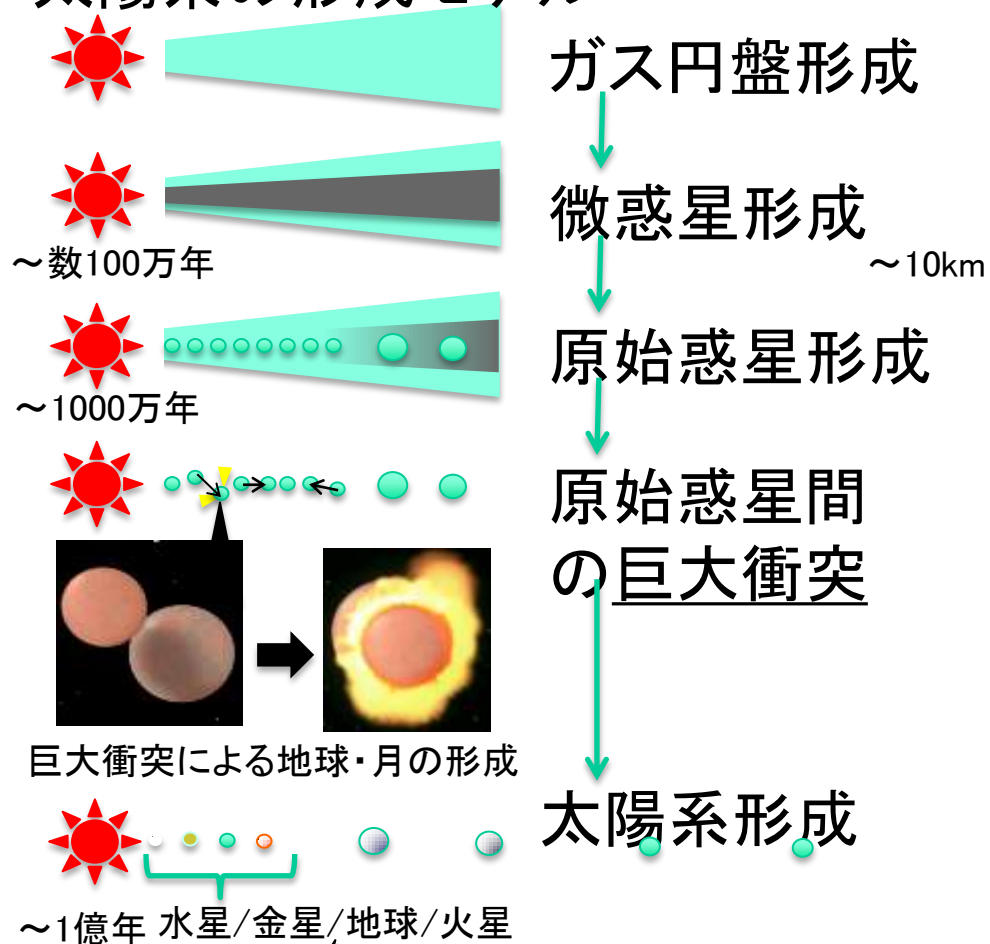


地殻の形成

核の形成

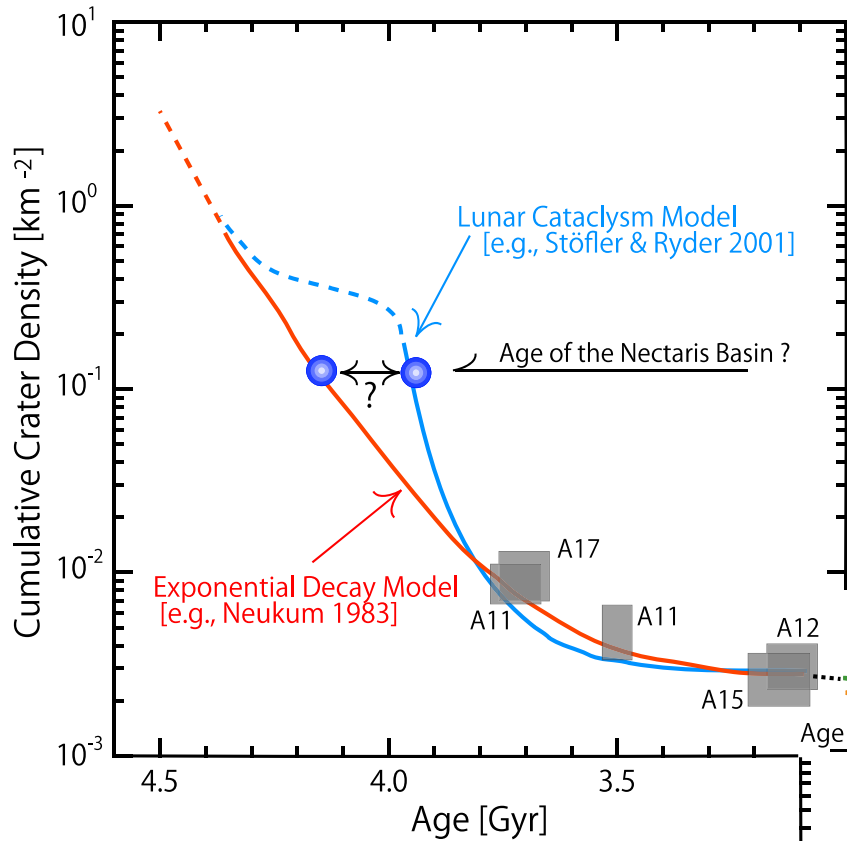
大気・海の形成  
生命の発生

# 太陽系の軌道進化の理解・・・隕石衝突記録を元に読み解く 太陽系の形成モデル



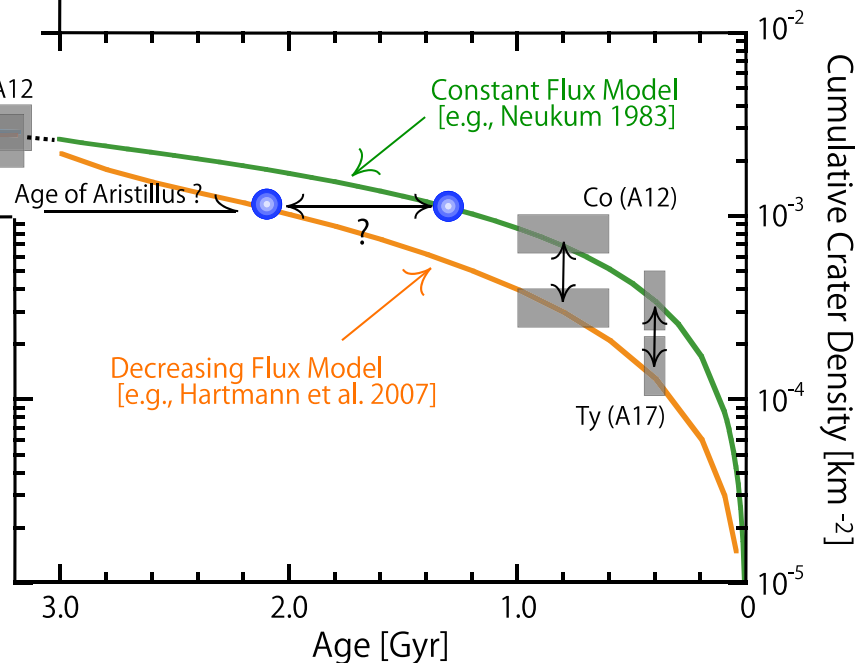
# 月(火星)探査の位置づけ

## 太陽系の軌道進化の理解・・・隕石衝突記録を元に読み解く



### 月面のクレータ数密度と絶対年代の関係 (クレータ年代学関数)

アポロ・ルナ試料の欠落のため、30億年前～現在、39億年前以前の年代範囲において、クレータ年代学関数には大きな不確定性がある。



# 本日の話題

(1) 月と火星の特徴

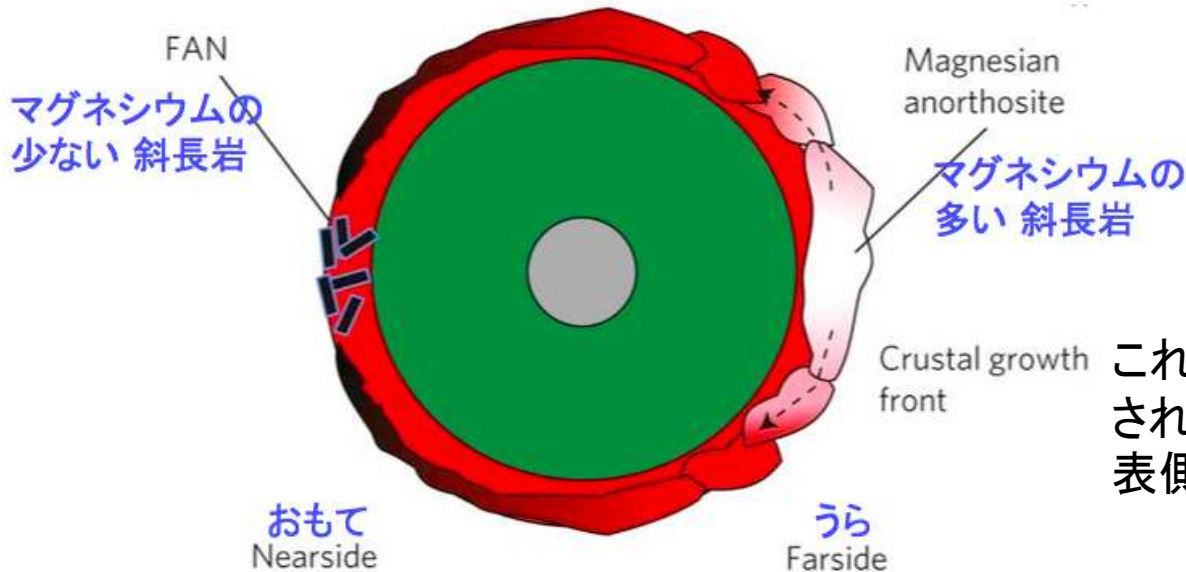
(2) 月(火星)探査の位置づけ

(3) 月探査ロードマップの考え方

## 科学での月攻略の大きなポイントは3つ

1) 裏側地殻探査(表側との対比)・・・月は裏から固まった?

2) 地震計ネットワーク・・・地下構造わからずして月の起源はわからない!



これまでマグマの海全体が同時に固まったとされていたが、裏側に大陸ができて、次第に表側に陸が広がっていったのかも

Ohtake et al. (2012)

3) 極域探査・・・揮発成分は天体表面をどう動かすか?

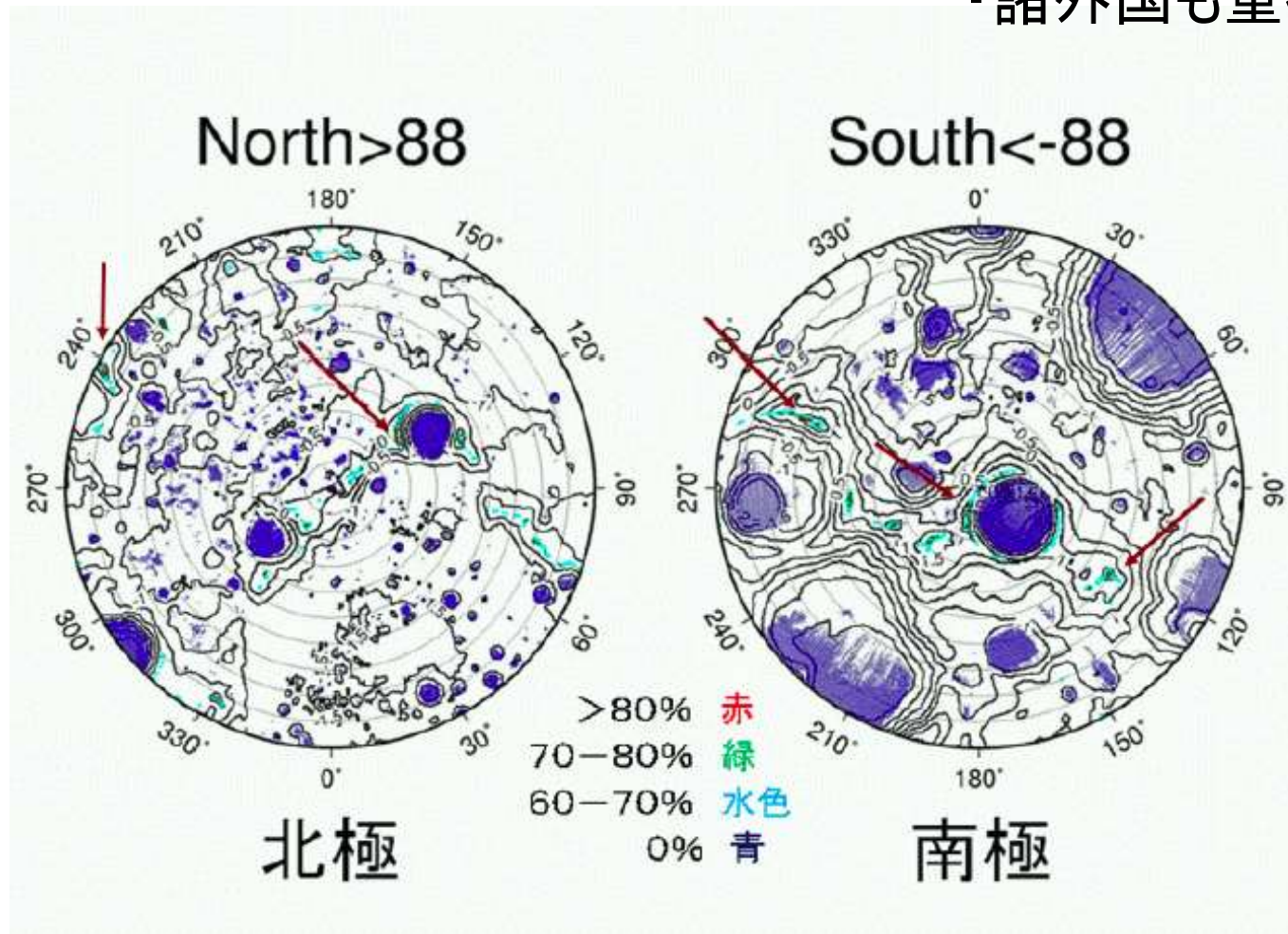
資源という観点で**良い場所**は**限られている**

- 高日照率領域
- 永久影領域（水氷の存在）
- 放射性物質濃集領域
- 縦穴構造



# 高日照率領域

- ・太陽光発電に有利
- ・越夜のハードルが低い
- ・諸外国も重視

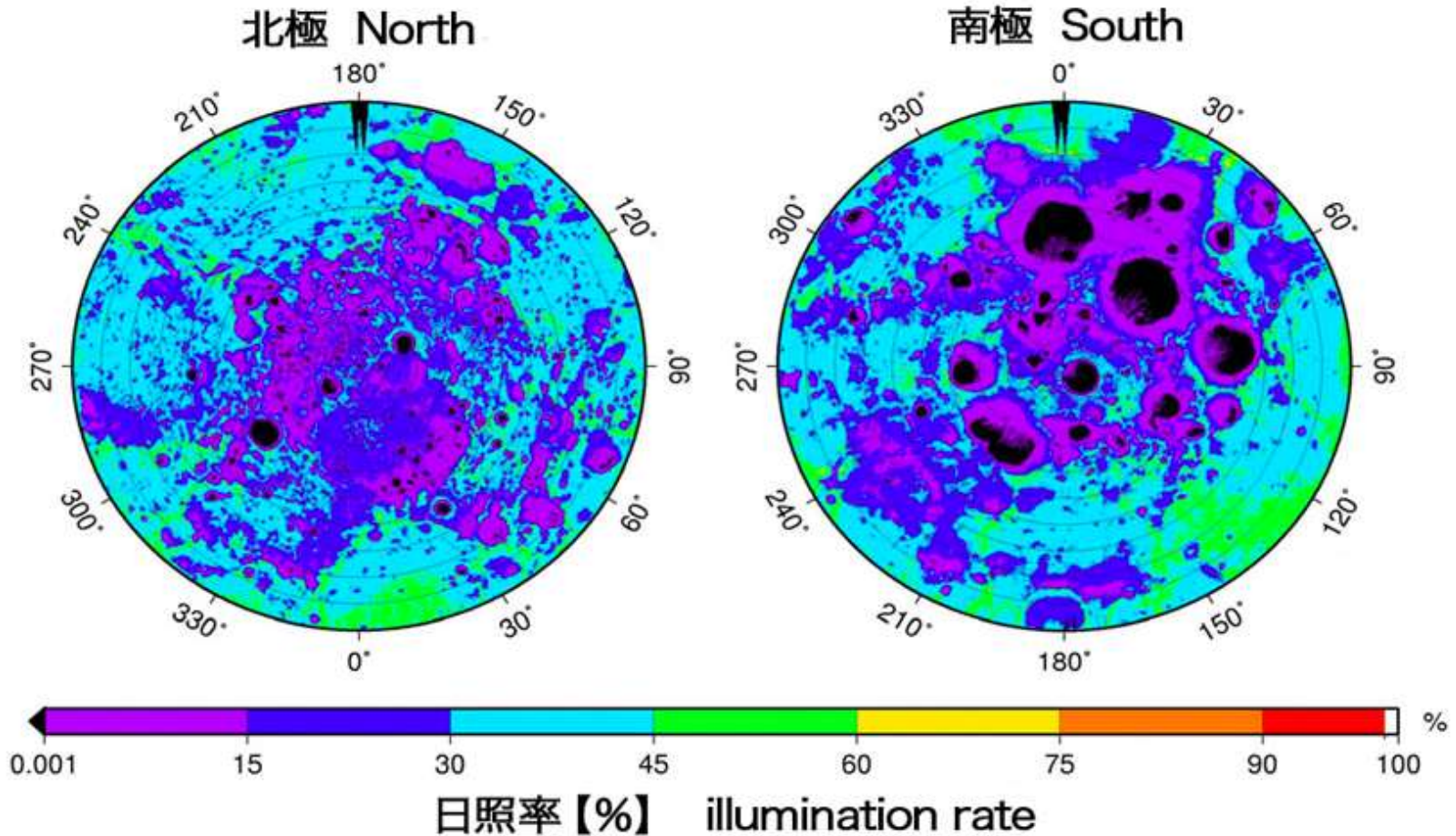


高日照率領域 (JAXA/KAGUYA)

北極周辺と南極周辺(緯度88度以上)の日照率マップ 提供 / 野田寛大(国立天文台)/JAXA

# 永久影領域(水氷が存在か)

- ・飲み水
- ・酸素の元
- ・燃料の元

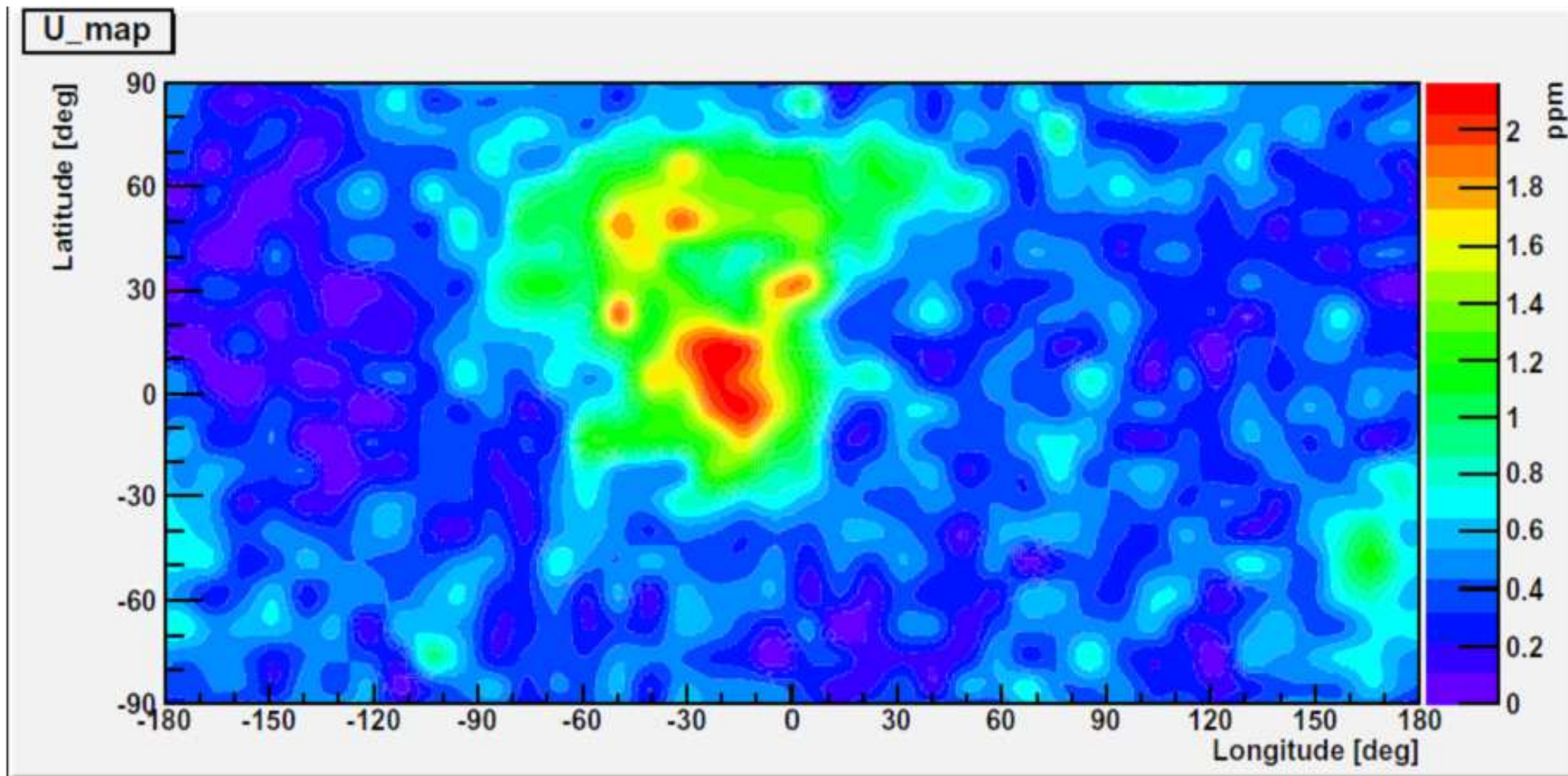


## 永久影領域 (JAXA/KAGUYA)

北極周辺と南極周辺(緯度85度以上)の日照率マップ。黒い部分が永久影領域。

提供 / 野田寛大(国立天文台)/JAXA

# 放射性物質濃集領域



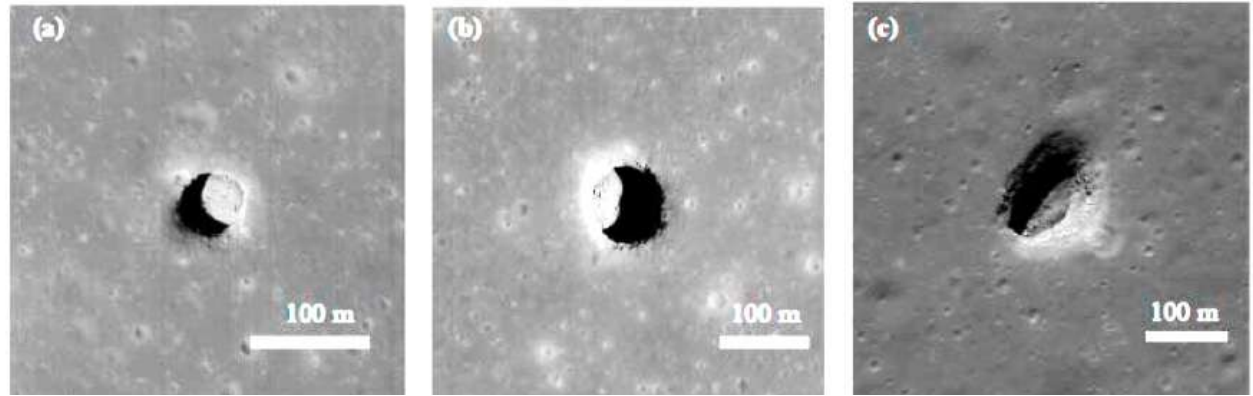
## ウラン濃度分布マップ

「かぐや」データベースのガンマ線分光器のデータを元に作成。

提供/長谷部信行、長岡央(早稲田大学)

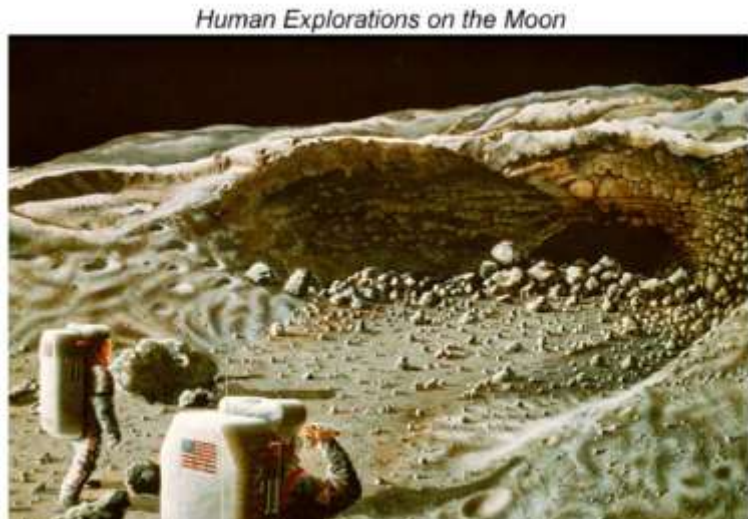
(参考:地球品位 0.1% 1000 ppm ウラン鉱石)

## 月での長期居住の 基地建設に 有利な可能性



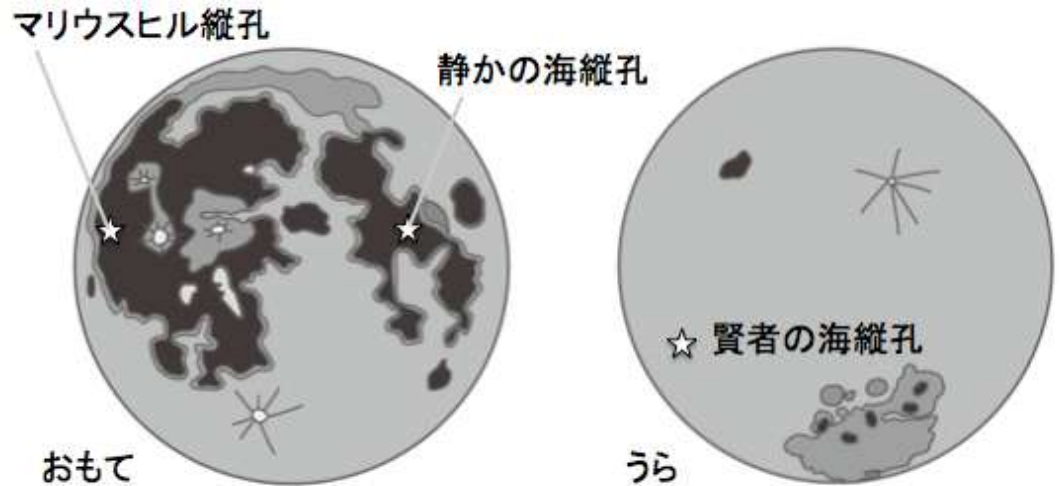
(a) マリウスヒル孔 (b) 静かの海孔 (c) 賢者の海孔(裏)

Haruyama et al., 2011



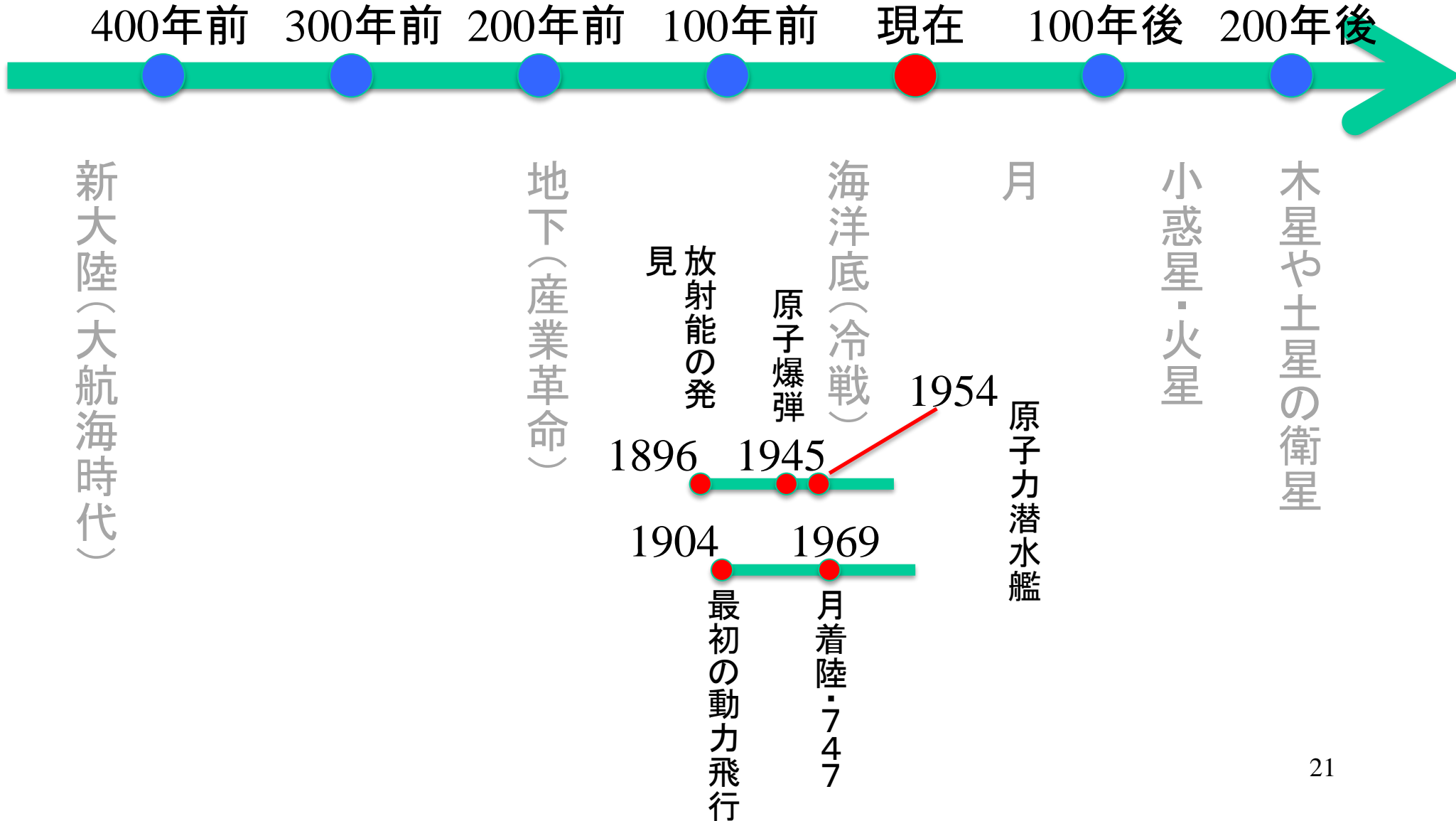
## 溶岩チューブ探査想像図

NASA



## 主要な縦穴の位置

# 人類のフロンティアの変遷



## 科学コミュニティをまとめる活動

### 1) SELENE-2 着陸地点検討会

目的: 2010年半ば打ち上げ予定のSELENE-2着陸地点を提案

期間: 2010年～2012年

主体: 多学会横断、着陸地点検討会(103名)

### 2) 「月惑星探査の来る 10 年」検討活動

目的: 惑星科学コミュニティの将来を担う探査提案を作成しWG化する

期間: 2009年～2014年

主体: 惑星科学会将来計画専門委員会下の将来惑星探査検討グループ  
ただし、提案・検討は惑星科学会に閉じない

### 3) 月科学研究会、月探査ロードマップ作成作業

目的: 科学コミュニティの提案する月探査レシピの備蓄展開

期間: 2014年夏～

主体: 惑星科学コンソーシアム(惑星科学会を中心に組織中)

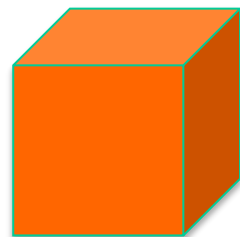
**どのような活動も、議論の透明性と一般啓発が大切**

以下、補足資料

# 月は地球より少し早く冷えた



使い捨て  
カイロ小(月)



1 cm



使い捨て  
カイロ大(地球)

4 cm

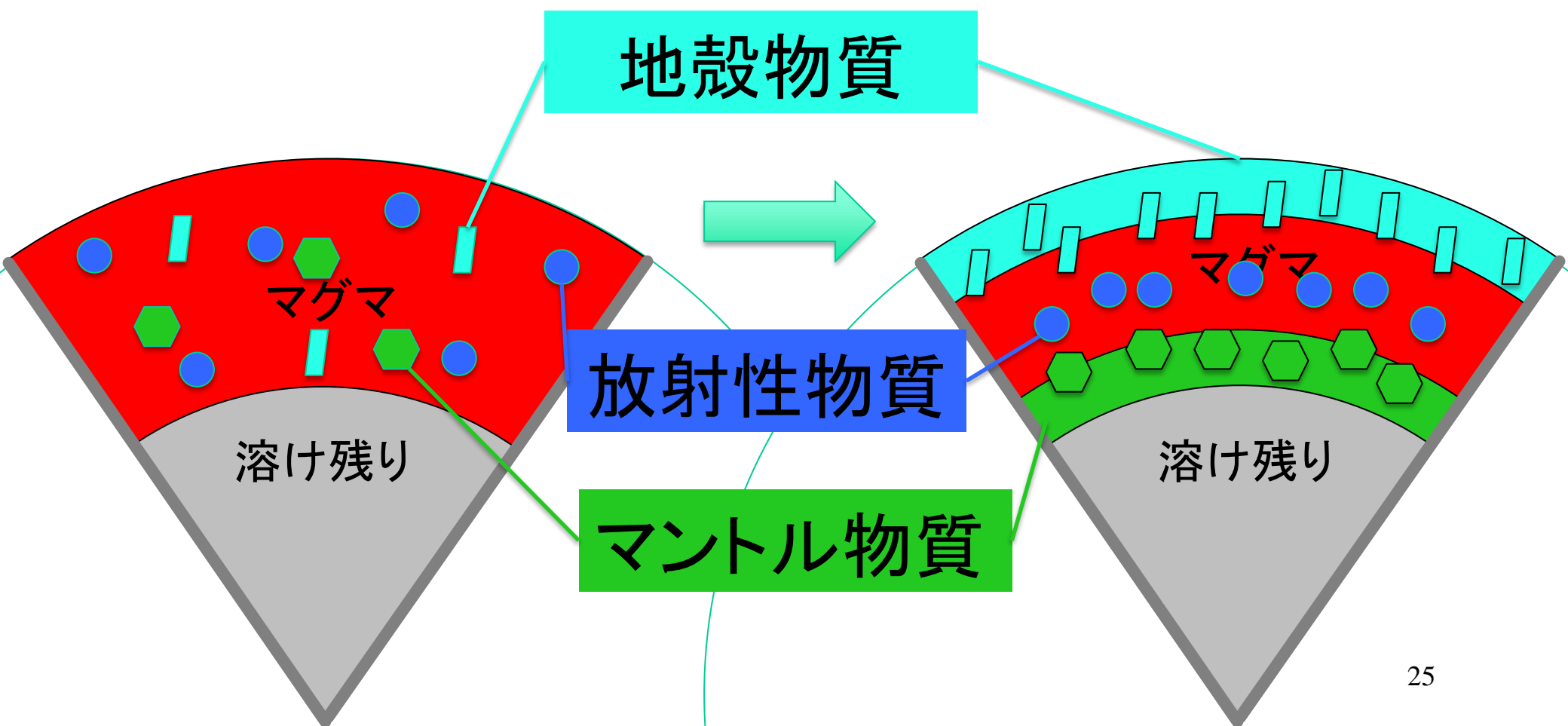
熱くなる中身	1	:	$4 \times 4 \times 4 = 64$
熱が逃げる表面積	1	:	$4 \times 4 = 16$

火山活動は約12億年前までに終了



# マグマの海仮説

マグマの海の中から、軽い地殻物質が浮いて固まった

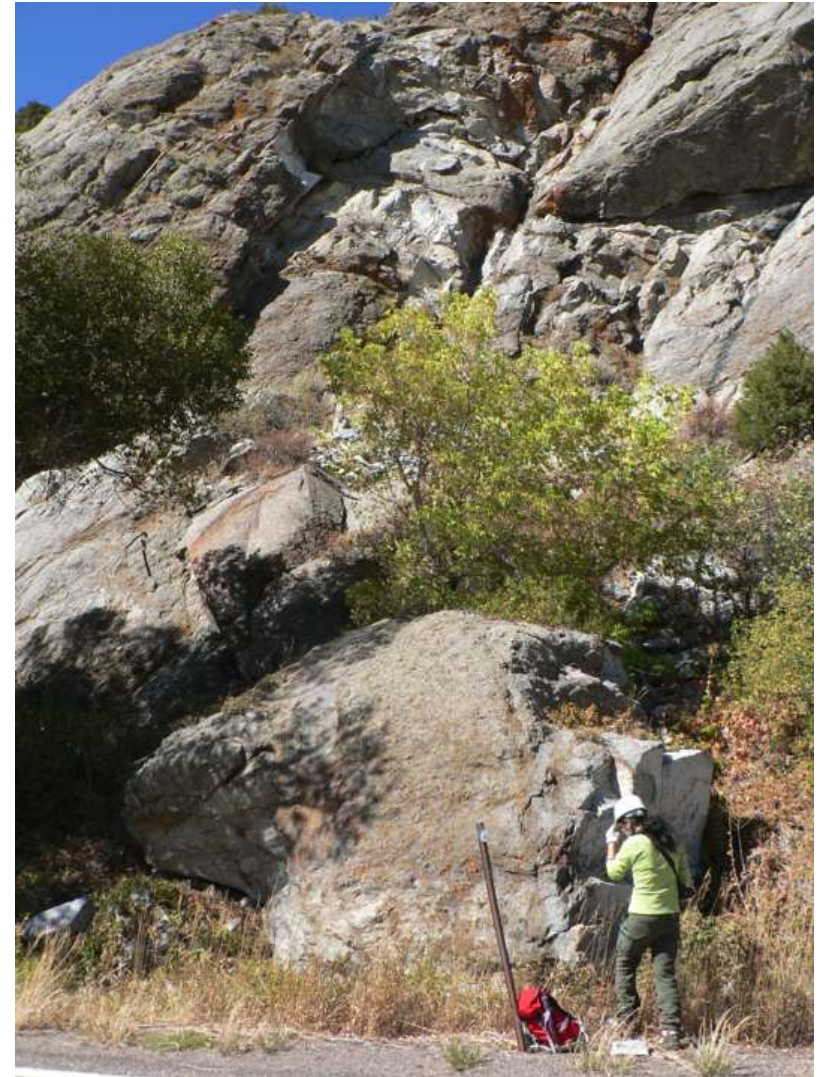


# 白いところ（高地）は斜長岩（白く軽い岩石）



アポロ16号試料 スケールはcm

写真提供: NASA



斜長岩でできた山、米国ワイオミング州  
ポーマウンテン Poemountain, WY, USA 26

# 黒いところ（海）は玄武岩（黒く重い岩石）



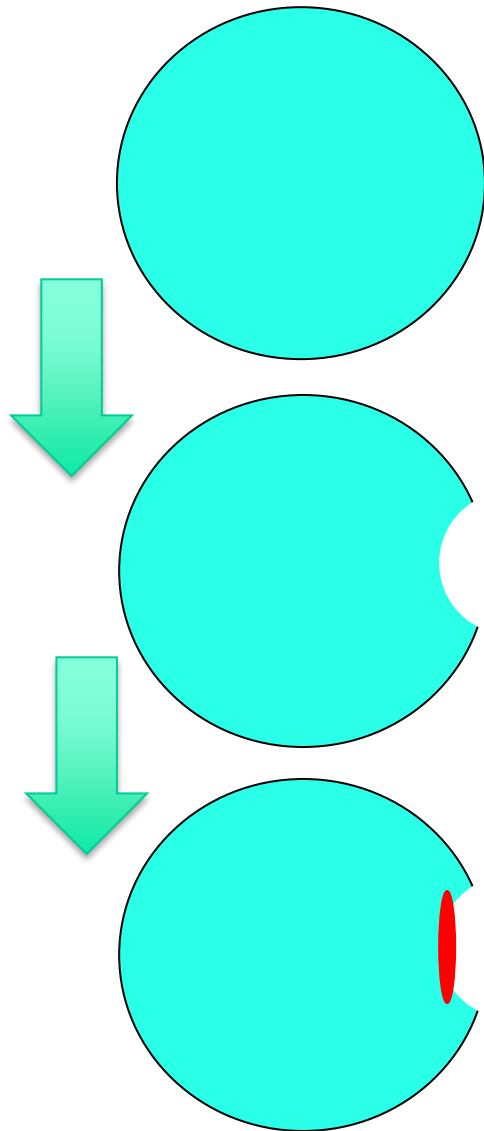
クパイアナハ(ハワイ)の溶岩湖  
直径約100m



プウオオ(ハワイ)の溶岩噴泉  
高さ450m

# 高地と海の形成

## Highland and mare formation



斜長岩が浮いて  
高地(白い岩石)  
を形成

巨大クレーター  
の生成

1～十数億年後に  
溶岩が流れ出て  
海(黒い岩石)  
を形成

高地 Highland

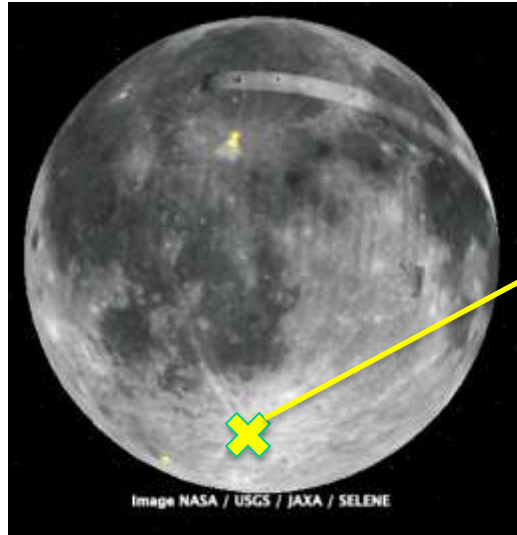


海 Mare

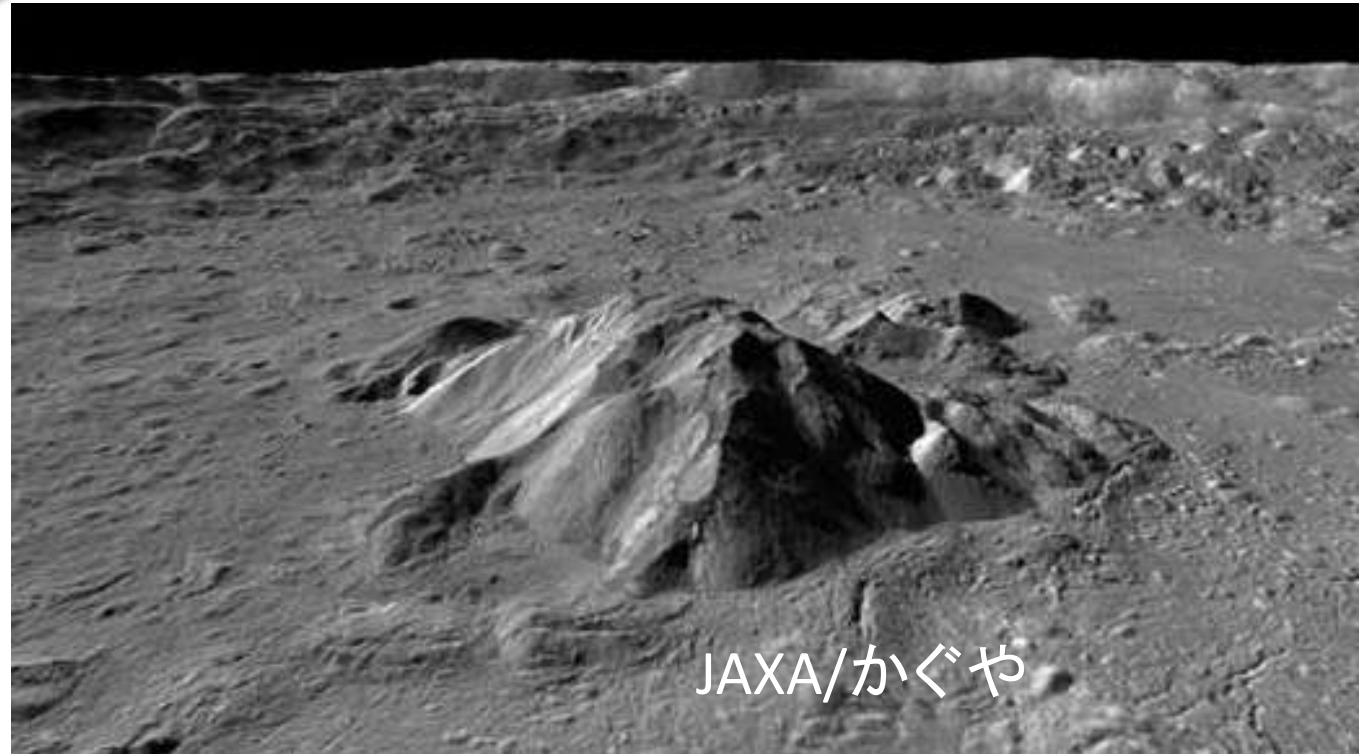


# チコクレーター中央丘 Tycho central peak

地下深部の覗き穴



Google/NASA/USGS/JAXA/SELENE



チコクレーター内部の標高 2.5 km の中央丘  
5-30 km の深部から来た岩石があるとされる



牛乳のスロー撮影

# 月面の物質と環境に関する調査

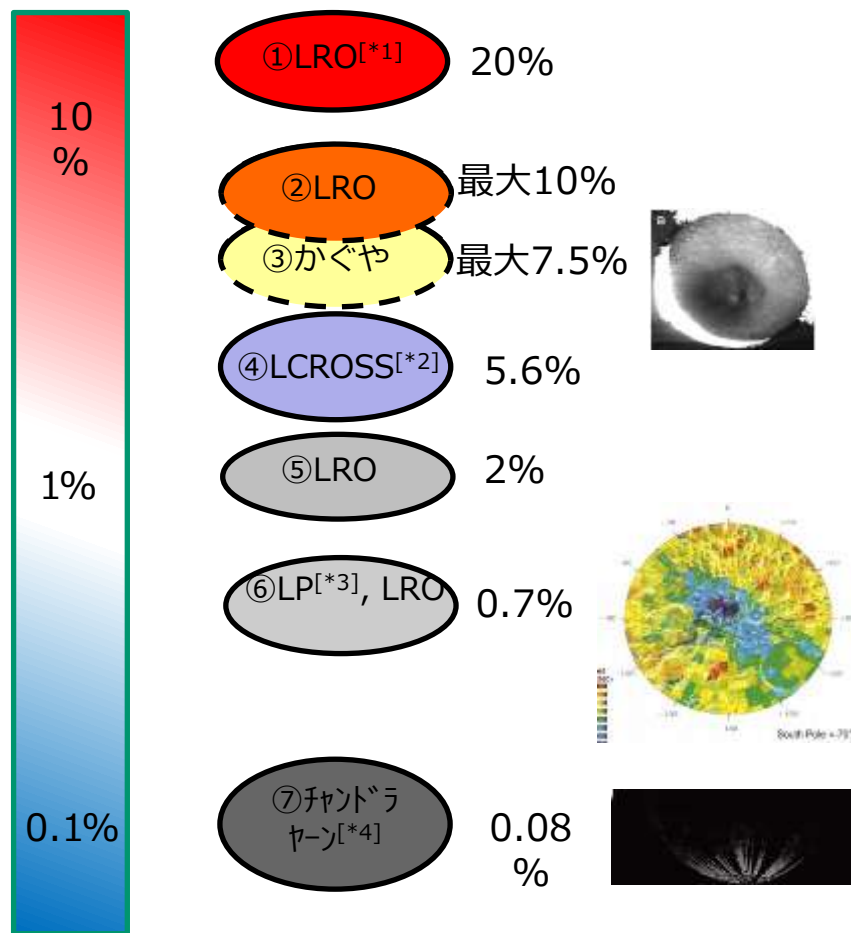
代表的探査機(シリーズ)	国	探査内容
Luna 	旧ソ連 ～1976	リモートセンシング サンプルリターン(16号,20号,24号 計325g)
アポロ 	米国 ～1972	リモートセンシング+着陸探査+サンプルリターン 381.7kg
クレメンタイン 	米国 1994	リモートセンシング(物質、地形)
ルナ プロスペクタ 	米国 ～1999	リモートセンシング(物質)
かぐや 	日本 ～2009	リモートセンシング(物質、地形)
チャンドラ ヤーン 	インド ～2009	リモートセンシング(物質、地形、放射線) 2016年 2号で着陸探査を予定
LRO/LCROSS 	米国 2009～	リモートセンシング(物質、地形、放射線、温度) インパクトタ(LCROSS)による水氷探査
嫦娥 	中国 2007～	リモートセンシング(1号、2号:物質、地形、太陽風)、着陸探査(3号:物質、地下構造、天文観測)、2017年に5号でサンプルリターンを予定
LADEE 	米国 ～2014	月大気・ダストの軌道上観測

# 月の表面物質の利用可能性一覽

	資源	存在形態	主な存在場所	主な抽出方法	存在量等	利用可能性
①	水氷	氷、土壤に吸着？	永久影および極域の低温領域？	加熱	由来諸説あり 0.1-20wt%	×～◎ 存在量/質による(不明)。
②	揮発性物質	土壤に吸着	全球(極地域の永久影が高濃度)	加熱	太陽風由来等 H:10-120ppm C:20-280ppm N:10-160ppm	×～○ 存在量/質による(推定量有)。
③	酸素	金属・シリコン等の酸化物	全球(土壤はケイ素や金属の酸化物がほとんど)	還元 熔融電気分解	土壤の40wt%	○ 手法確立済み規模の問題
④	金属	金属酸化物等	全球(鉄は海が多い)	還元	Si: >20wt% Fe: >10wt%	△ プロセスが確定していない
⑤	バルク土壤	表面～10m(場所による)	全球	直接利用	普遍的に存在	◎
⑥	放射性燃料	表層～	表側の海の中低緯度	化学処理	U: <3ppm Th: <10ppm	×～○(濃集場所が発見されれば) 地球のU鉱石0.05～0.2%
⑦	希土類(REE)	表層～	PKTと呼ばれる地域	酸やアルカリによる処理	REEの最高濃度 La: 217ppm(アポロ) 平均は地球の地殻より少ない	×
⑧	白金族などのレアメタル	単体金属もしくは合金	濃集地は不明	王水や酸による溶解と沈殿分離	土壤に数～数十ppb程度	×
⑨	ヘリウム3	土壤に吸着	海が多い	加熱	太陽風由来 <0.05ppm	×

# 極域の水氷に関する知識

月極域には過去長期間にわたって彗星・小惑星・太陽風によりもたらされた水氷(あるいは水素)が保存されていると考えられている。水氷の存在の有無について下記のようにリモートセンシング観測データに基づく多くの研究が報告されているが、観測波長・データ解析手法により結果が異なることや、データの解釈において意見が分かれるなど理由から、**量、分布、形態(塊、吸着など)について決定的な結論はまだ得られていない。**



- ① シャクルトンクレーター内は太陽風による月表面の変化が小さいか、又は水氷が存在 (Zuber et al., 2012)
- ② 永久影領域に水氷が存在 (Thomson et al., 2012)
- ③ シャクルトンクレーター (南極の永久影) 内の地表に大量の氷は存在しない (Haruyama et al., 2009)
- ④ 飛翔体の衝突による放出物を観測 (Colaprete et al., 2010)
- ⑤ 表層に水の霜が存在 (Gladstone et al., 2012)
- ⑥ 極域の永久影領域に水氷または水素が存在 (Miller et al., 2012)
- ⑦ 高緯度地域にOH基と水が存在 (Pieters et al., 2009)

[\*1] Lunar Reconnaissance Orbiter (米国, 2009年打上)

[\*2] Lunar CRater Observation and Sensing Satellite (米国, 2009年打上)

[\*3] Lunar Prospector (米国, 1998年打上)

[\*4] Chandrayaan-1 (インド, 2008年打上)

月南極域の水氷の質量比率 (推定値)