

月の地質

大竹真紀子

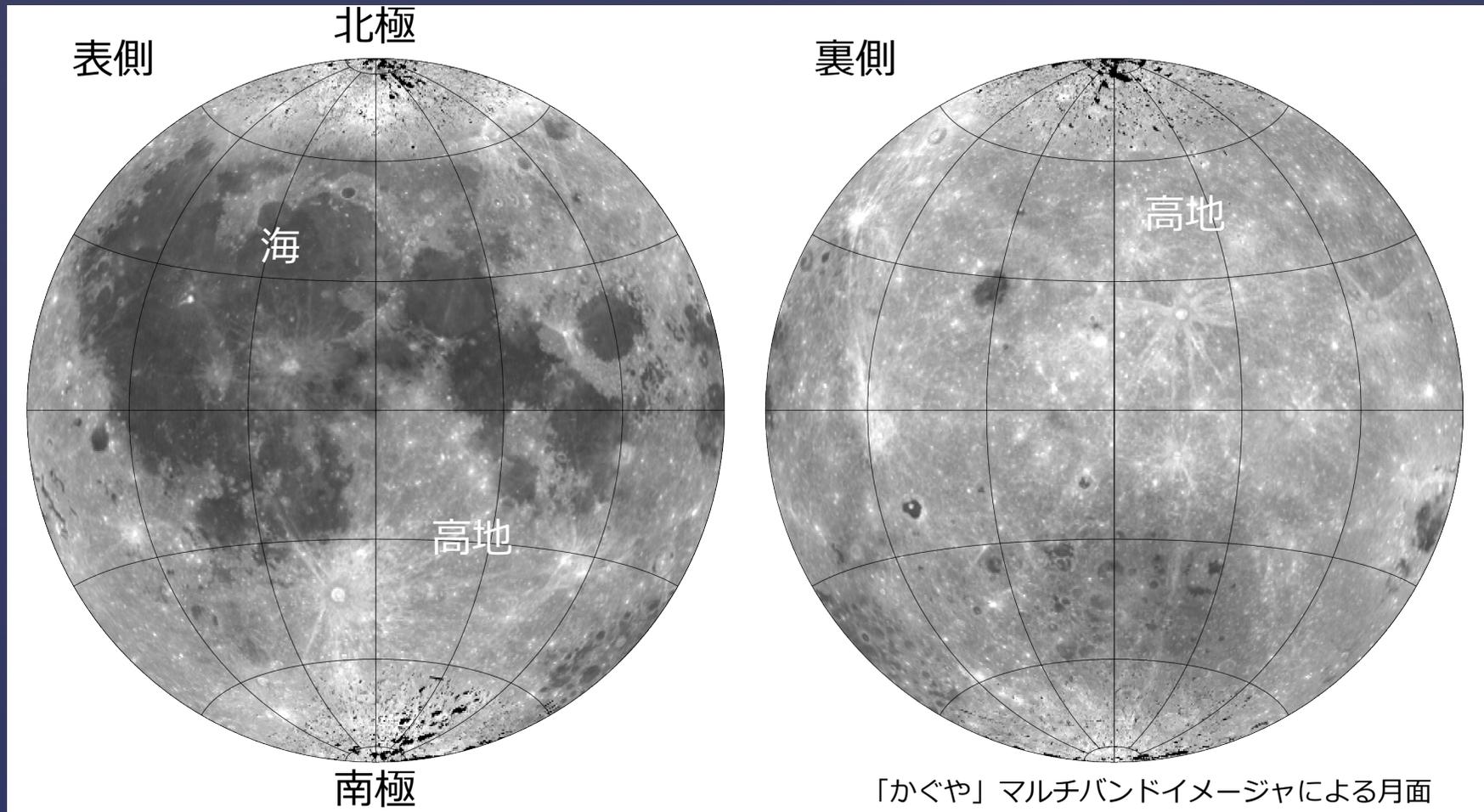
(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)

もくじ

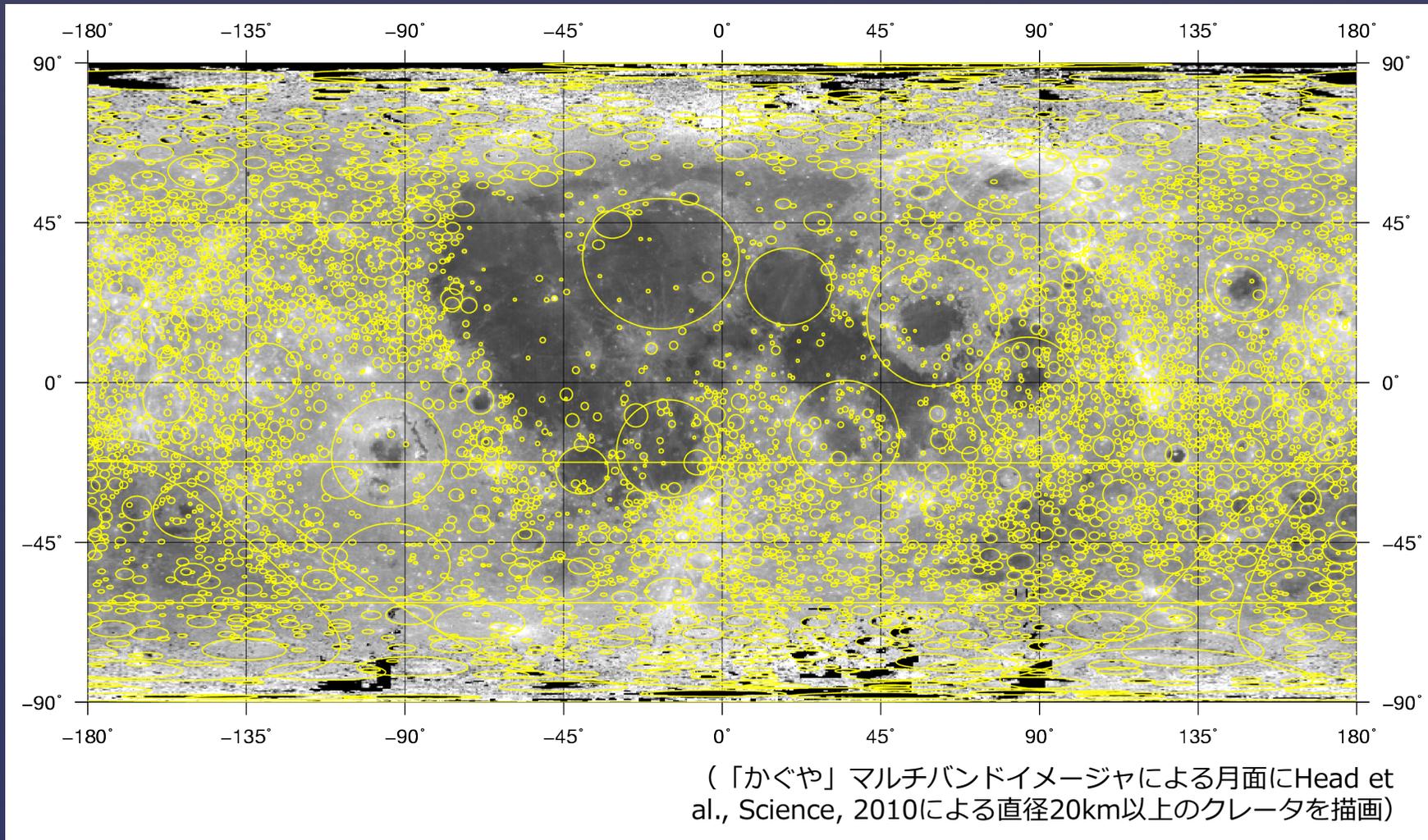
1. はじめに
2. これまでの月地質研究の成果
 - ・ 月試料による成果
 - ・ リモートセンシングによる成果
 - ・ 統合した現状理解
3. 月地質に残された科学課題
4. 月科学以外の観点からの地質
 - ・ 月の資源利用
 - ・ 月面環境利用

1. はじめに：海と高地

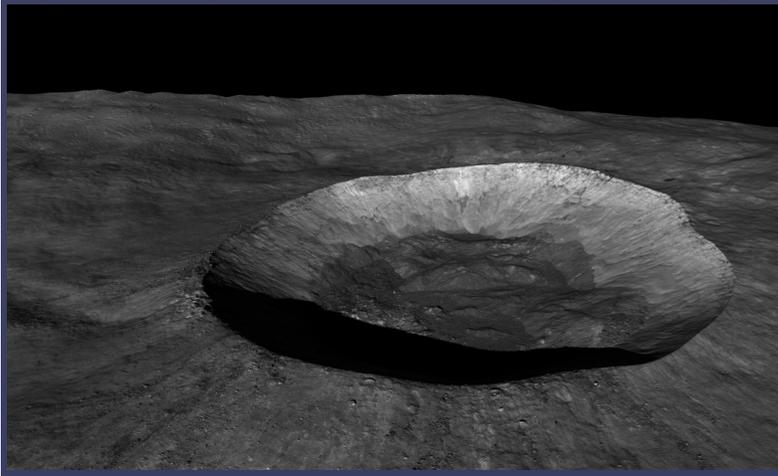
月の表面には反射率が高く白く見える領域と、反射率が低く黒く見える領域がある。これらは標高が高い地域と低い地域に対応し、高地と海と呼ばれている。月の海は月全球の約17%の面積を占めており、その大部分は月の表側に集中している



クレータの分布



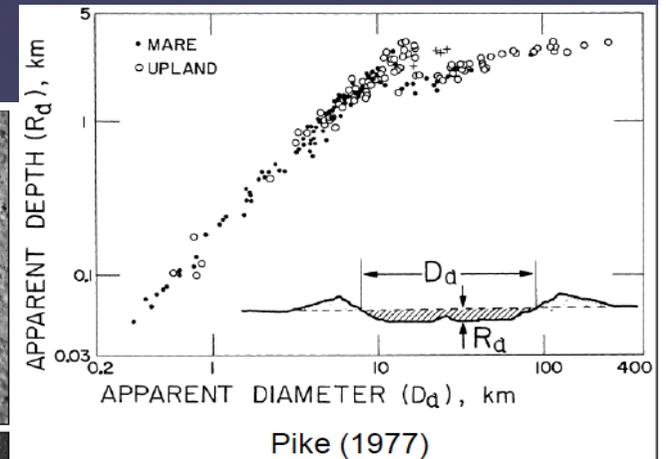
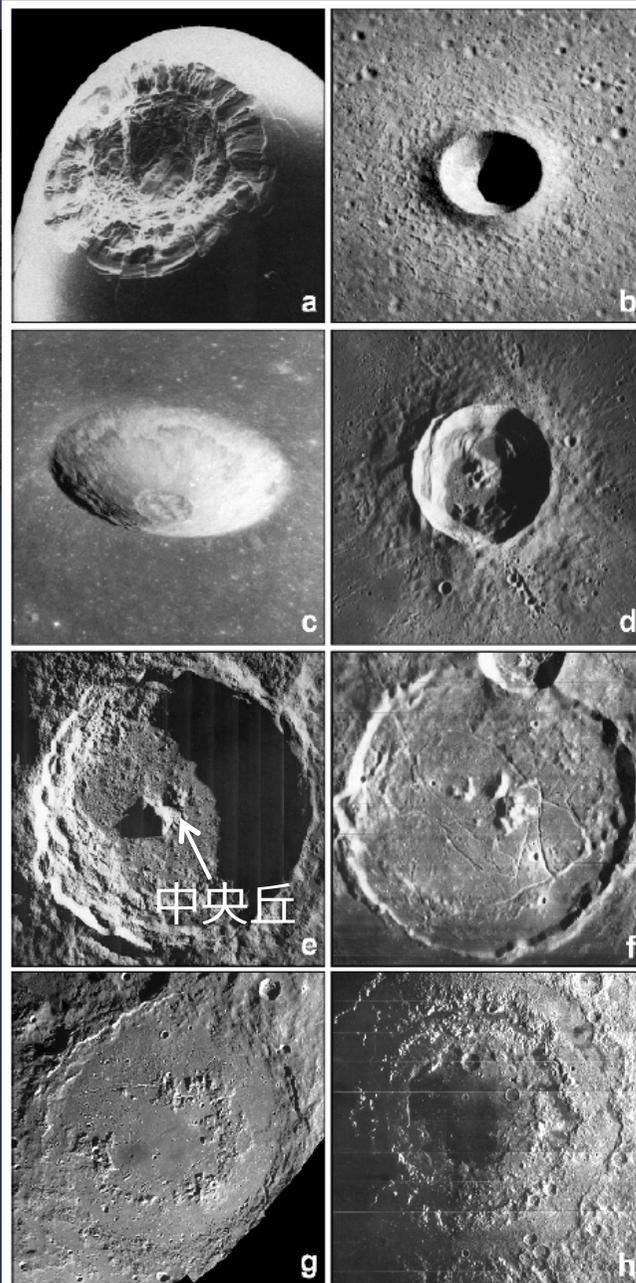
クレータの形状



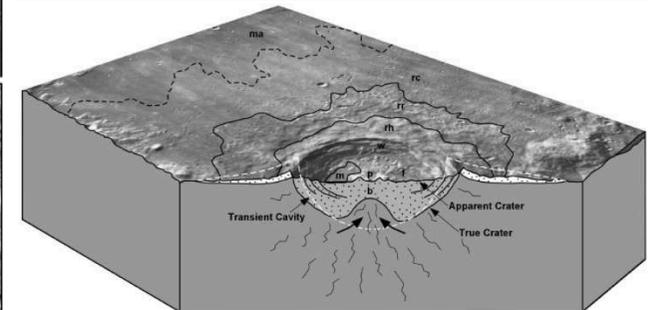
『かぐや』地形カメラによるクレータ画像
(ジョルダーノ・ブルーノ, 直径22km)

クレータサイズによる形状の違い
大きくなるに従って
simpleクレータ → complexクレータ
→ basinへと変化する

- (a) micro crater on a lunar glass spherule (<1 mm)
 - (b) bowlshaped crater (Linn., 2.5 km)
 - (c) transitional crater (Taruntius, 8.5 km)
 - (d) complex crater (Euler, 28 km)
 - (e) central peak crater (Tycho, 85 km)
 - (f) floor-fractured crater (Gassendi, 110 km)
 - (g) central peak ring basin (Schr.dinger, 320 km)
 - (h) multi-ringed basin (Orientale, 930 km)
- (Hiesinger and Head, in New Views of the Moon, pp1-81, 2006)



↑ 経験的にクレータの直径と深さなど、各パラメータの関係式が得られている

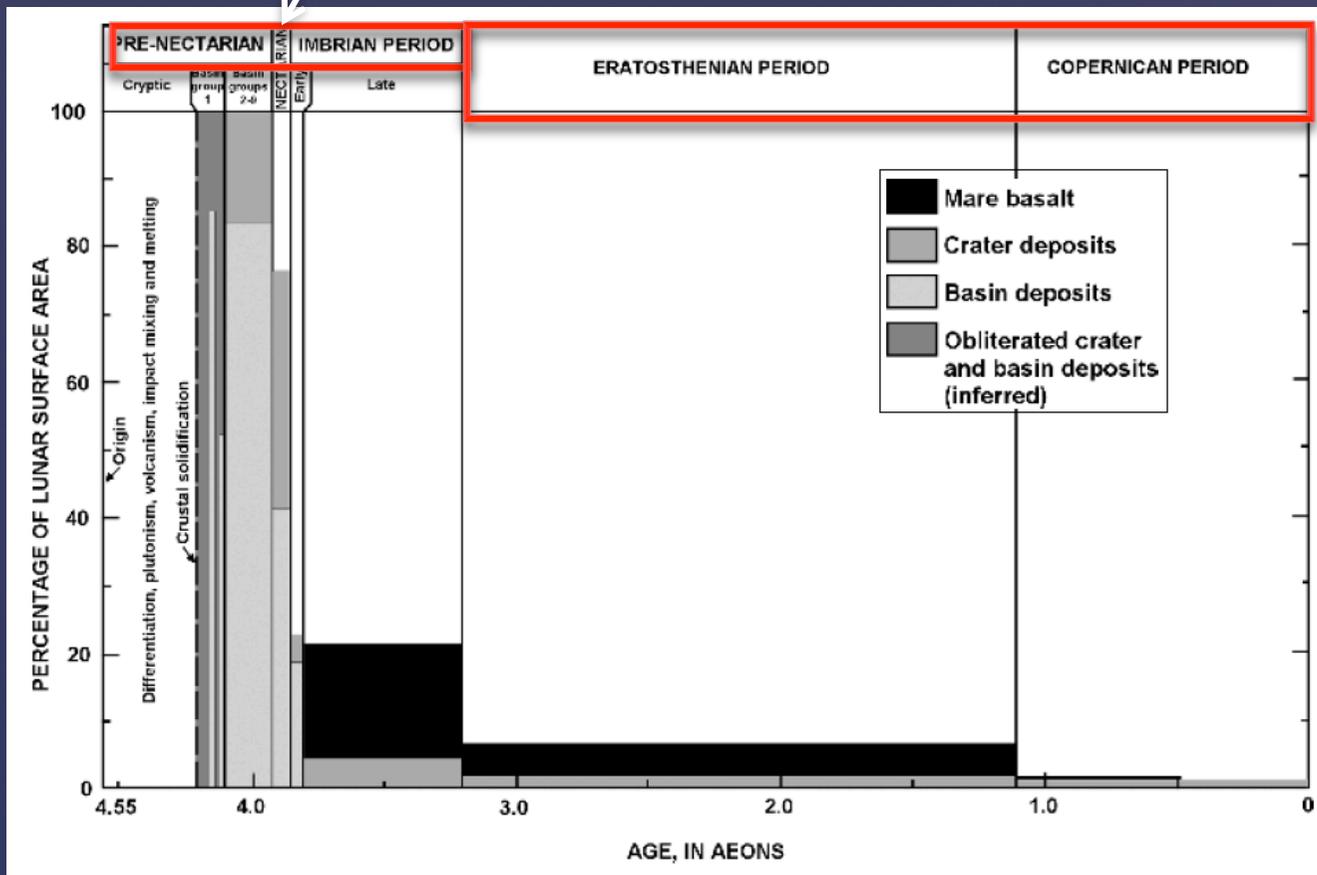


↑ Complexクレータの中央に地下岩石が隆起・露出した丘ができ、この部分の観測は地下を見る“窓”として重要
(Hiesinger and Head, in New Views of the Moon, pp1-81, 2006)

月の地質年代区分と露出面積

- 各時代の代表的クレータ・盆地の名前から5つに区分されている
- Pre-Nectarianの詳細は不明（最大の盆地の形成年代も不明）

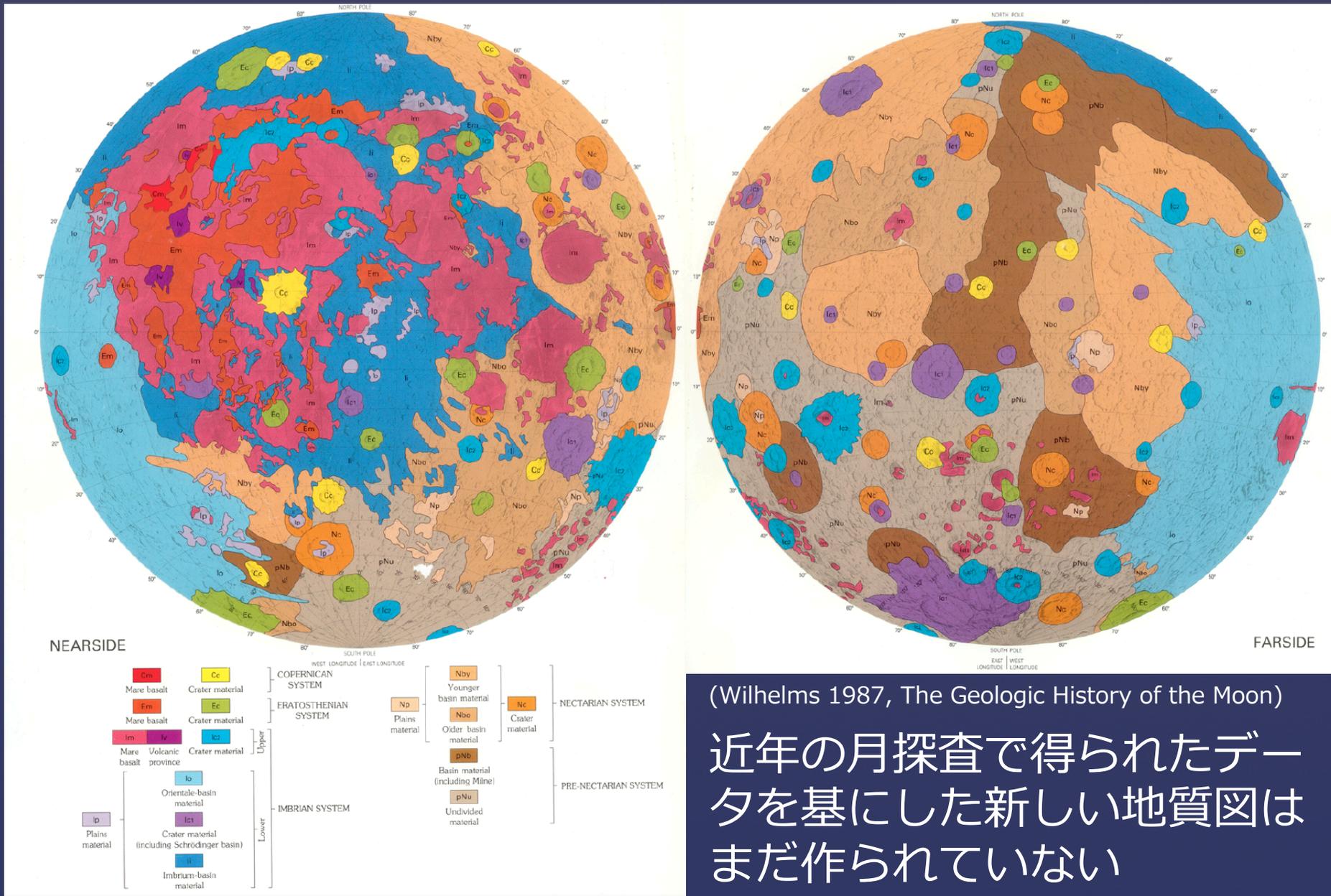
プレネクタリアン / ネクタリアン / インブリアン / エラトステネシアン / コペルニカン



* 各区分の区切りとなる年代は研究者によって異なるので注意

(Courtesy of the U. S. Geological Survey, after Wilhelms 1987, The Geologic History of the Moon, Fig. 14.3, p. 277)

これまでに作られた月の地質図



(Wilhelms 1987, The Geologic History of the Moon)

近年の月探査で得られたデータを基にした新しい地質図はまだ作られていない

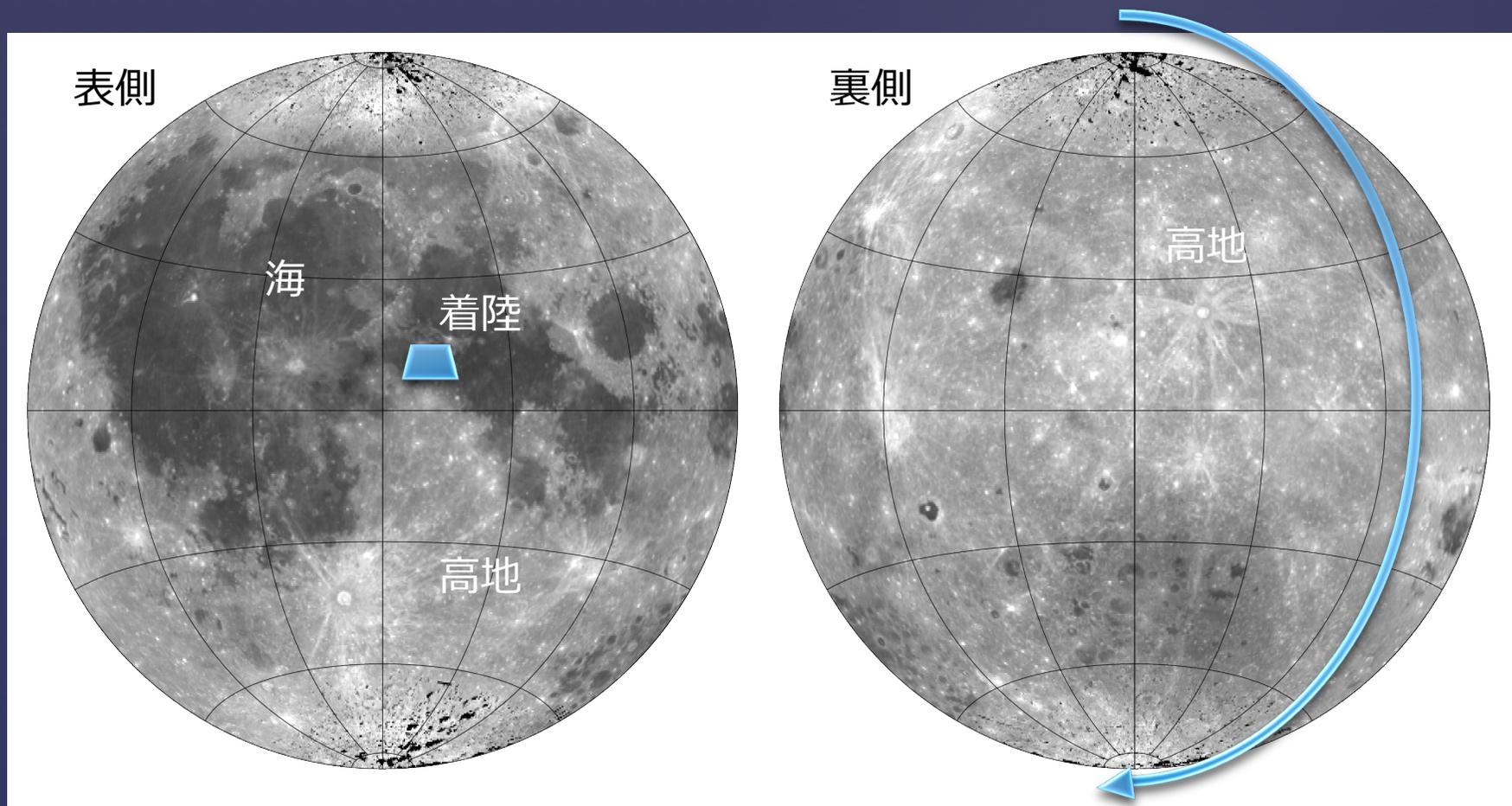
月の主要鉱物・岩石

1. 鉱物名とその意味:月面に存在する主要鉱物は斜長石/輝石/かんらん石/イルメナイト
 - 斜長石 (Al,Ca,Na,Si,Oからなる鉱物: plagioclase)
 - 斜長石の中でもCaが多く含まれる物をanorthiteと呼ぶ
 - 輝石 (Fe,Mg,Ca,Si,Oからなる鉱物: pyroxene)
 - Fe/Mg/Caの含有量比がさまざまな情報を含む
 - かんらん石 (Fe,Mg,Si,Oからなる鉱物: olivine)
 - Fe/Mg/Caの含有量比がさまざまな情報を含む
 - イルメナイト (Ti,Fe,Oからなる鉱物) : マグマオーシャン固化の最終段階で結晶化、また溶岩中にも多く含まれる場合あり
2. 岩石名:鉱物と岩石の違い : 鉱物が集まったものが岩石
 - 含まれる鉱物の種類と量比、科学組成などに応じて名前がつく
 - 斜長岩 (anorthosite) : 斜長石が90%以上含まれる岩石を斜長岩と呼ぶ(広義には90%以下でも) 月の初期地殻は斜長岩で構成されている
 - 玄武岩 (basalt) : マントルが溶融してできたマグマが表面に噴出し、冷却固化したものの

2. これまでの月地質研究の成果

着陸探査と周回探査の違い

着陸探査：1箇所，その場観測 and/or サンプルリターン
周回探査：リモートセンシング，全球観測が可能，空間分解能に制約



「かぐや」マルチバンドイメージャによる月面

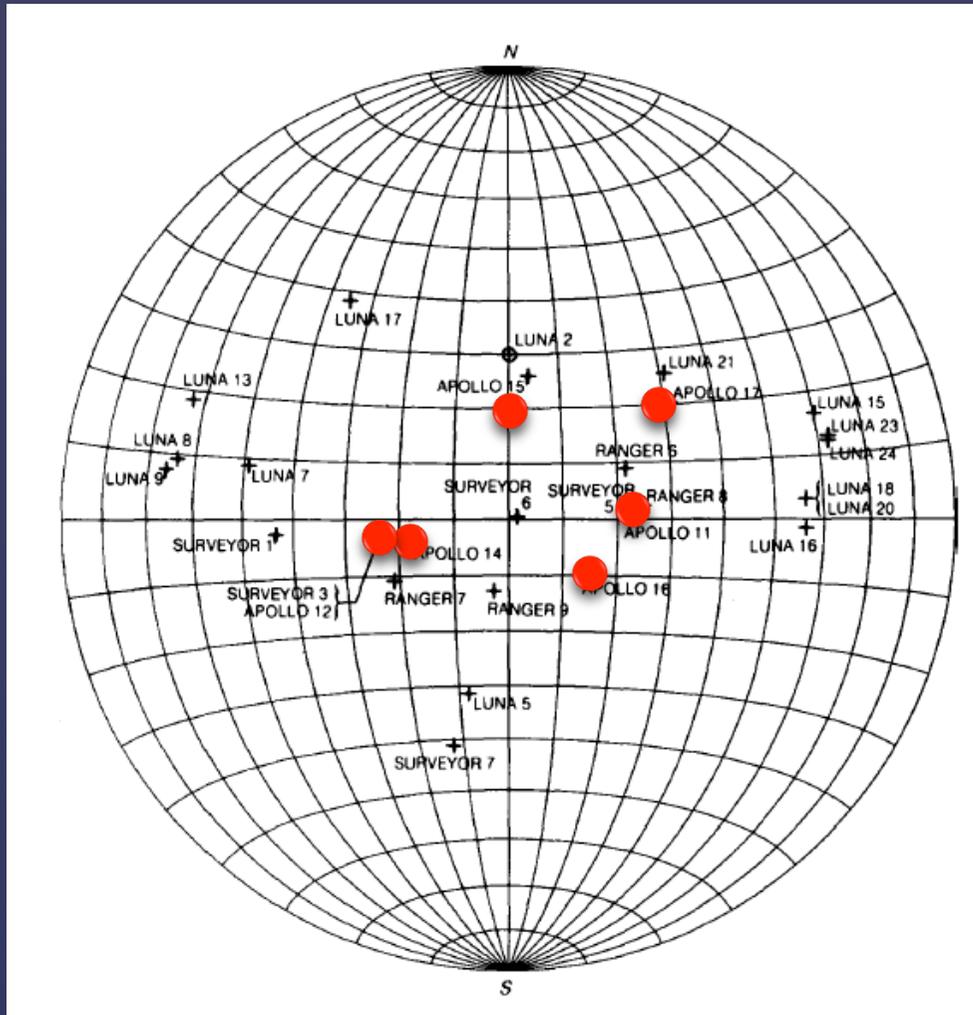
月探査の歴史

ミッション名	打ち上げ日	国名	探査手法	帰還試料重量(kg)	備考
ルナ2号	1959/9	旧ソ連	周回		月に命中、人類史上初めて他の天体に到達した人工物体
ルナ・オービタ5号	1967/8	アメリカ	周回		成功1～5号で月表面の99%を写真に納める
アポロ11号	1969/7	アメリカ	着陸	21.6	初の人類月着陸
アポロ12号	1969/11	アメリカ	着陸	34.3	
ルナ16号	1970/9	旧ソ連	着陸		豊かの海に着陸、遠隔操作で月の土壌を地球に持ち帰るのに成功
ルナ17号	1970/11	旧ソ連	着陸		8輪の無人月面車ルノホート1号を月面に降ろし、10km走る
アポロ14号	1971/1	アメリカ	着陸	42.3	
アポロ15号	1971/7	アメリカ	着陸	77.3	初めて月面移動車が使われる
ルナ20号	1972/2	旧ソ連	着陸		50gの標本を持ち帰る
アポロ16号	1972/4	アメリカ	着陸	95.7	ケイリー高原に着陸
アポロ17号	1972/12	アメリカ	着陸	110.5	最初の地質学者の宇宙飛行士
ルナ24号	1976/8	旧ソ連	着陸		170gの標本を持ち帰る
ひてん・はごろも	1990/1	日本	周回		日本最初の月探査衛星。月のスイング・バイ技術など工学実験を実施
クレメンタイン	1994/1	アメリカ	周回		
ルナ・プロスペクター	1998/1	アメリカ	周回		
スマート1	2003/9	ESA	周回		
かぐや	2007/9	日本	周回		月周回探査機として最多の14種の観測機器を搭載
嫦娥1号	2007/10	中国	周回		
チャンドラヤーン1号	2008/10	インド	周回		
ルナ・リコネサンス・オービタ	2009/6	アメリカ	周回		
嫦娥2号	2010/10	中国	周回		
グレイル	2011/9	アメリカ	周回		
ラディー	2013/9	アメリカ	周回		月大気と塵環境の探査
嫦娥3号	2013/12	中国	着陸		月面に軟着陸、月面探査機（無人月面車の「玉兔号」）

合計約400kgの試料

月試料による成果

月探査の着陸点とアポロによる試料採取点



月の表側

+ 着陸点
● アポロによる試料採取点

- 月試料にはアポロなど着陸探査による帰還試料と月隕石とがある
- これまでの月探査の着陸点は月の表側のみに限られている
- 帰還試料の中で最も広く研究に用いられているアポロ試料は、表側のしかもごく一部の領域からのみの採取

月帰還試料の例 (1)



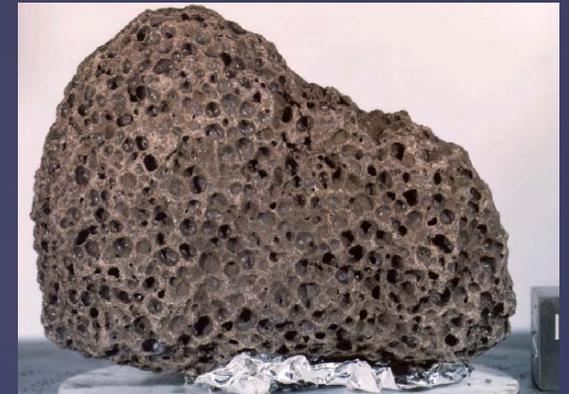
斜長岩 試料番号 : 15415
NASA# S71-44990



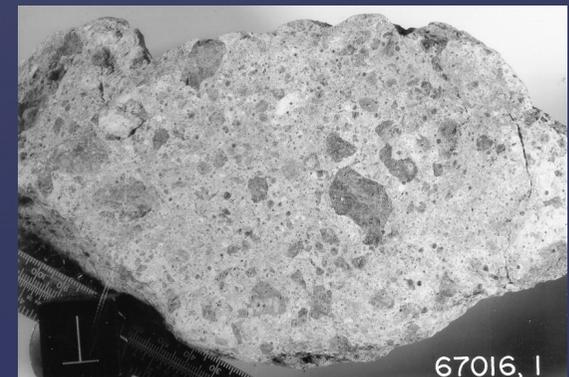
試料番号 : 15415 薄片写真
(画像の幅が3mmに相当)
NASA# S71-5263



採取される前の15415
NASA AS15-90-12227HR



玄武岩 試料番号15016
NASA# S71-46632



礫岩 試料番号67016
NASA # S81-26050

- 月面に存在する岩石の多くは岩石が破碎されてできた礫岩。少数だけ破碎や溶融を受けた痕跡がない岩石が存在する。

月帰還試料の例 (2)

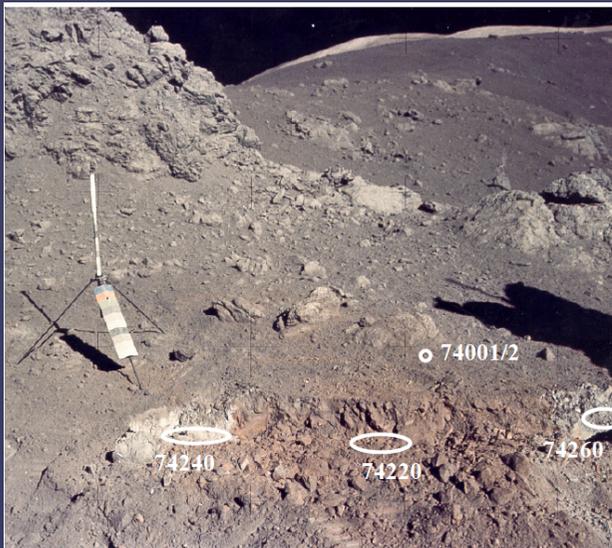


Figure 1: Photo of trench dug into orange soil at rim of Shorty Crater, Apollo 17. NASA AS17-137-20990 (see map and sketch, figures 21, 22).

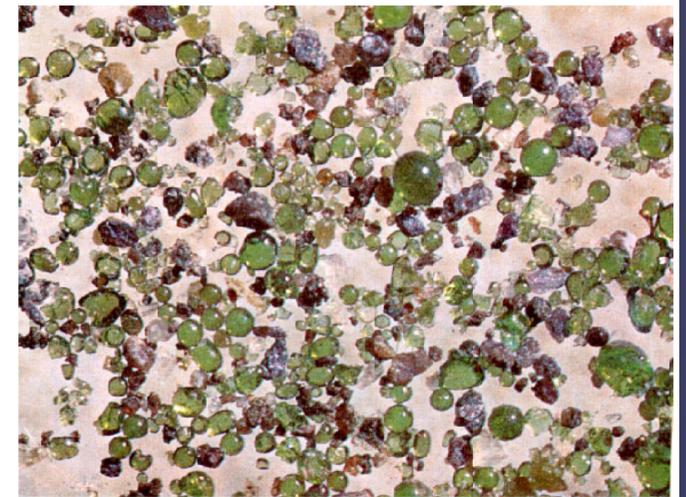
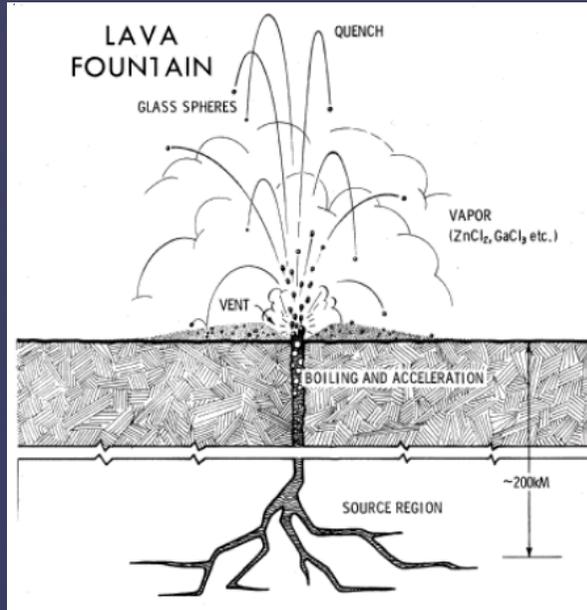


Figure 2: Example of green glass beads in 15401. Beads are 40-250 microns. From Carusi et al. (1972).

グリーンガラス 15401
(Carusi et al., in The Apollo 15 lunar samples, 1972)

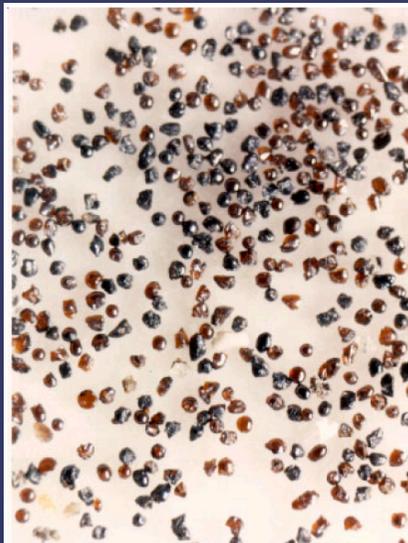


Figure 2: Sieved and washed fraction of orange soil, 74220. Particle size is 100 microns. NASA#S73-15085.



Figure 4: Photomicrograph of thin section of 74220 illustrating orange glass beads and broken fragments. The orange glass partially crystallizes olivine needles with fine ilmenite margins. Large bead in this photo is ~ 1 mm. NASA#S79-27295.

オレンジガラス 74220

(Meyer et al., Proc. 6th Lunar Sci. Conf., 1673-1699, 1975)

- 揮発性成分に富むマグマが勢い良く月面に噴出して急冷することにより、ガラス粒子ができる
- マグマに含まれるチタンの量によってオレンジやグリーンに見える
- このようなガラス中に以前考えられていたのに比べて多くの揮発性成分が見つかり(Saal et al., Nature, 2008), 近年注目されている

月表層の状態

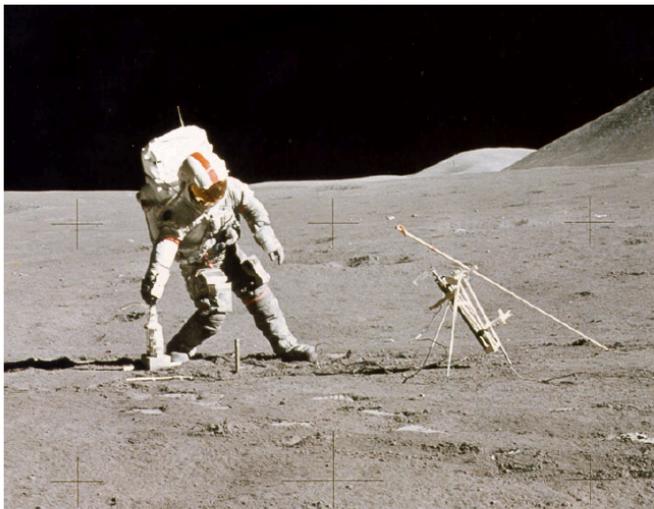


Figure 1: Photo of the Apollo 15 CDR setting up a deep drill. Drilling and extraction on the moon was very difficult and must have caused significant heating. Unless dark drill segments were immediately placed in the shade they would have been substantially heated. NASA photo AS15-87-11847.

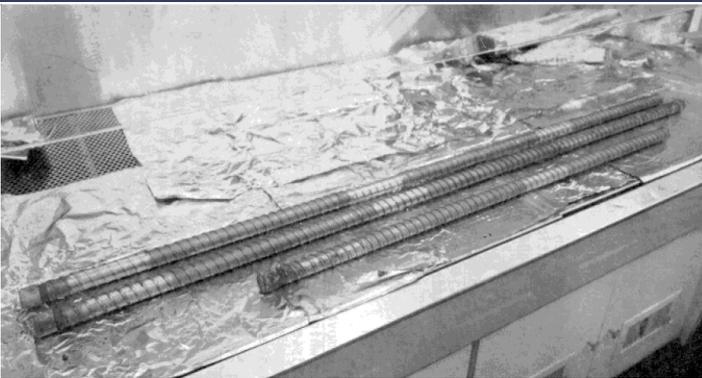
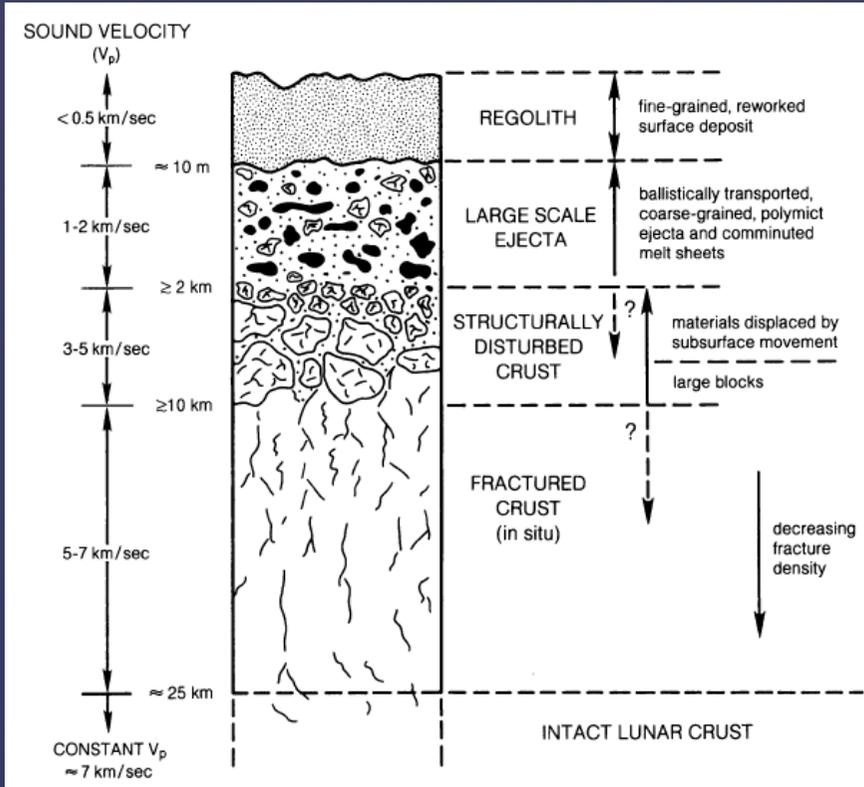


Figure 4: Photo of Apollo 17 drill string as it was brought to Lunar Receiving Laboratory clean bench. Note the ends were capped on the moon. This is figure 13 in Duke and Nagle 1974.

上：宇宙飛行士による月面ドリルコア採取
 下：地球の試料取り扱い設備に持ち帰られたドリルコア試料
 (<http://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/A17drill.pdf>)



水平 & 深さ方向
 の物質混合層

概念的な地殻断面構造

(Heiken et al., in Lunar Source Book, 1991)

- 表層のほとんどは“レゴリス”と呼ばれる細粒粒子で覆われている（粒子サイズの平均は0.1mm前後）
- レゴリス層の中やその下に天体衝突による破碎や溶融，攪拌を受けた物質が混合されて存在する

月試料の化学組成 (例)

	斜長岩 (62236)	高チタン 玄武岩 (70215)	低チタン 玄武岩 (12064)	超低チタン 玄武岩 (7008,356)
斜長石	85	29	39.1	31.1
輝石	11	42	55.4	60.0
かんらん石	4	7	-	5.3
不透明鉱物	-	18	-	1.0

*斜長岩はWarren and Wasson (1978), 玄武岩は表の左からLonghi et al. (1974), Neal et al. (1994), Vaniman and Papike (1977) による。玄武岩はチタンの含有量によって高チタン, 低チタン, 超低チタン玄武岩に分類される。ここで示す超低チタン玄武岩は研磨薄片内の岩石片の値。()の中はアポロの試料番号。

	斜長岩 (15415)	高チタン 玄武岩 (70215)	低チタン 玄武岩 (12064)
SiO ₂	44.5	37.8	46.3
TiO ₂	0.020	13	4
Al ₂ O ₃	35.6	8.8	10.7
Cr ₂ O ₃	0.003	0.41	0.37
FeO	0.21	19.7	19.9
MnO	0.006	0.27	0.27
MgO	0.26	8.4	6.5
CaO	20.4	10.7	11.8
Na ₂ O	0.36	0.36	0.28
K ₂ O	0.015	0.05	0.07
P ₂ O ₅	0.009	-	-
Total	101.4	99.49	100.19

*斜長岩はRyder (1985), 玄武岩はBVSP(1981)のコンパイルデータから

月試料による成果

A) マグマオーシャン仮説の確立

- 斜長岩地殻の発見によるマグマオーシャン仮説の確立
- 巨大衝突による月(惑星)形成説を支持

B) 月(太陽系)約45億年の年代軸の確立

- 試料の放射性年代によって、月の地殻形成など天体進化にとって重要なイベントの年代を決定
- クレーター年代学に年代数値を与えることで月(太陽系)の歴史に年代軸を提供

A) マグマオーシャン仮説の確立

-斜長岩地殻の発見によるマグマオーシャン仮説の確立
アポロ以前月は冷たく/熱く生まれたという2説あった

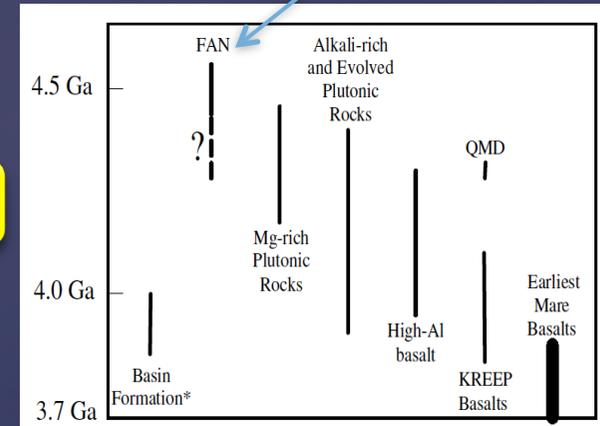
斜長岩の年代

アポロ試料から

- 月面の白い領域は斜長岩で出来ている
- 月全体が厚い斜長岩で覆われている
厚さ55-75 km (地震学より)
- アポロ試料から斜長岩地殻は古い (~44億年)

サンプル
リターン

その場観測



(Shearer et al., in New Views of the Moon, pp1-81, 2006)
データはShearer and Papike (1999より)

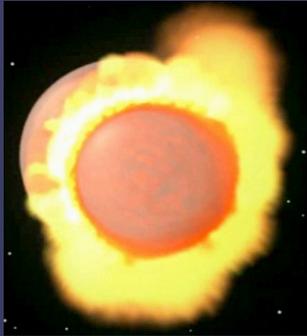
- このような斜長岩地殻を作るには大量のマグマが必要であり, 月の形成直後は表面全体がマグマで覆われていたとするマグマオーシャン仮説が確立した
- 現在では, 月だけでなく地球にもマグマオーシャンがあったと考えられる

サンプル
リターン

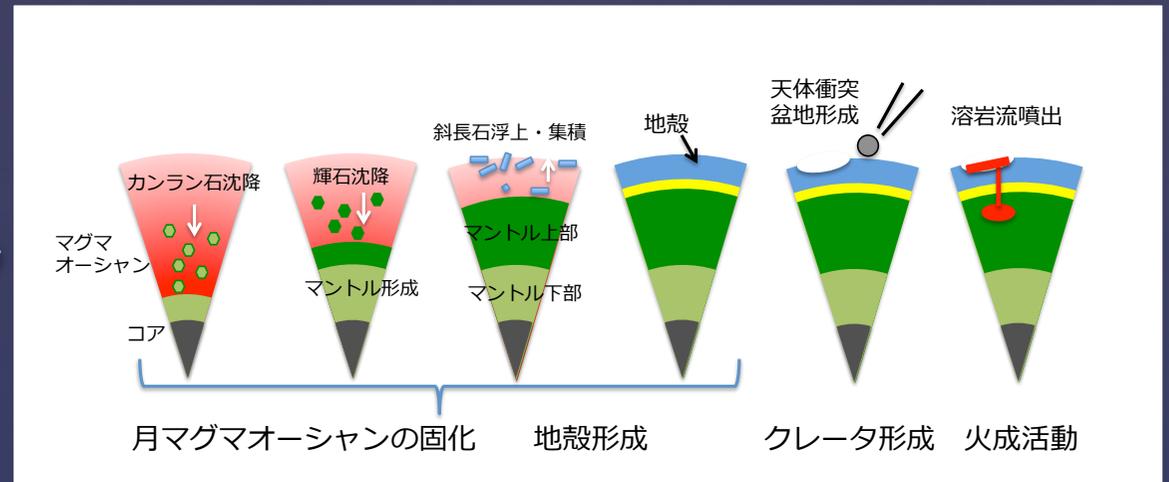
マグマオーシャン仮説

巨大衝突

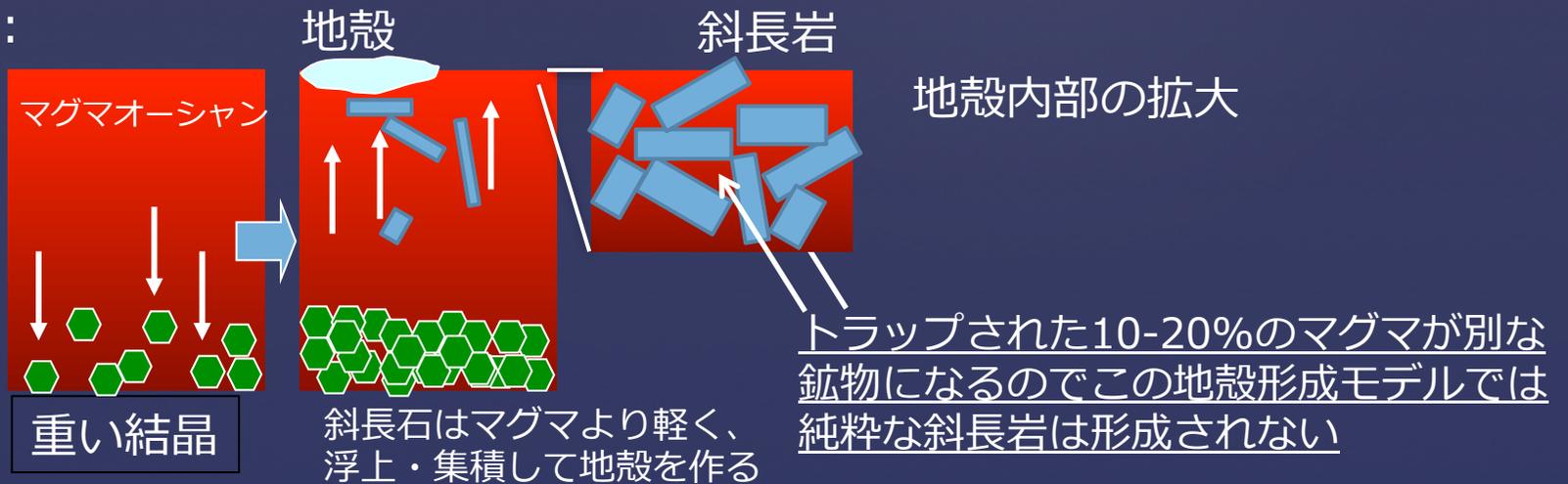
月の形成



マグマオーシャンの形成と固化



<地殻の形成過程：
「かぐや」以前>



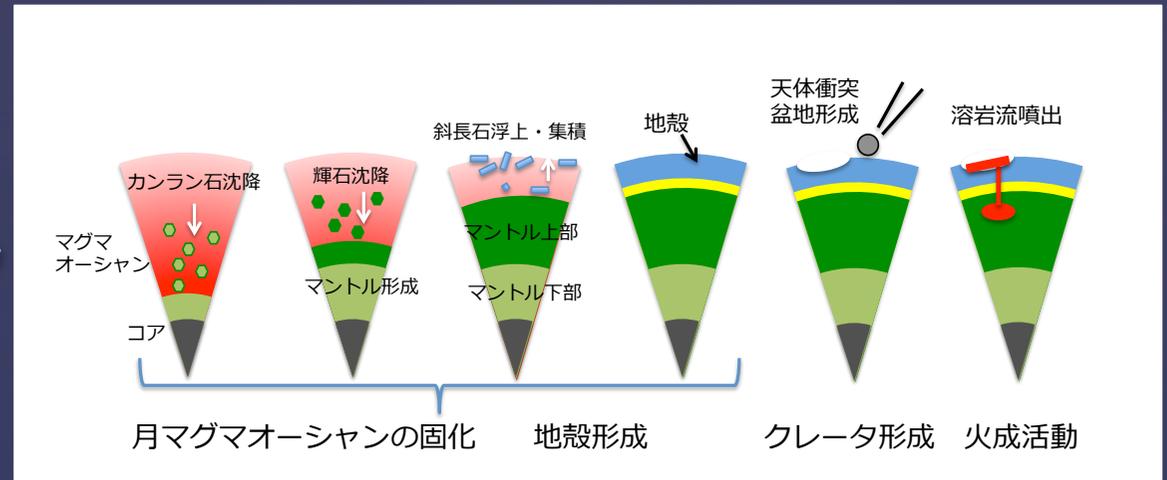
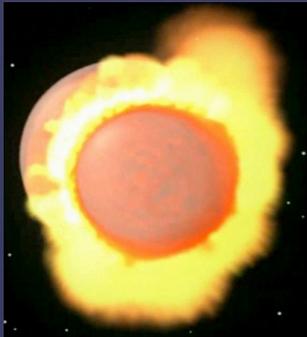
- 巨大衝突により月が形成した場合，集積時に高温となりマグマオーシャンができることから，マグマオーシャンの存在は巨大衝突仮説と整合する

B) 月(太陽系)約45億年の年代軸の確立

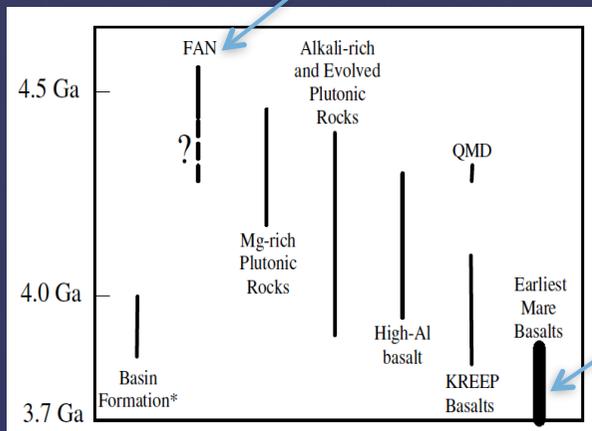
マグマオーシャンの形成と固化

巨大衝突

月の形成



斜長岩の年代 = 地殻形成



玄武岩の年代 = 火成活動の始まり

マグマオーシャンの固化 (地殻形成), 火成活動の時期など天体進化にとって重要なイベントの年代を決定

(Shearer et al., in New Views of the Moon, pp1-81, 2006)
データはShearer and Papike (1999より)

B) 月(太陽系)約45億年の年代軸の確立

月は昔のことを覚えているから...

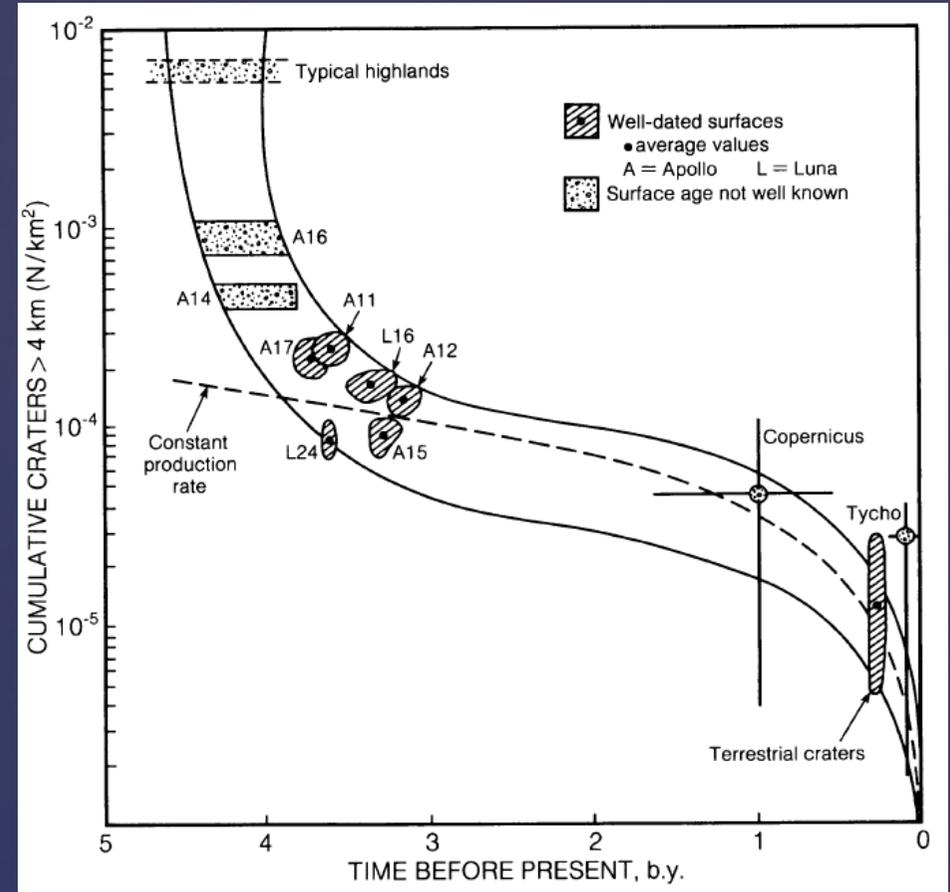
-アポロ月試料の分析から **サンプルリターン** 衝突による溶融物の年代を算出

-月面の衝突フラックス **リモセン**

これにより、クレーター年代学が可能になった。この手法は火星など他の天体にも用いられている

サンプルリターン **リモセン** 両者の融合

クレーター年代学：
クレーター数密度と該当領域の年代の係を用い、数密度からある領域の形成年代を推定する



(Heiken et al., in Lunar Source Book, 1991)

リモートセンシングによる成果：月探査の歴史

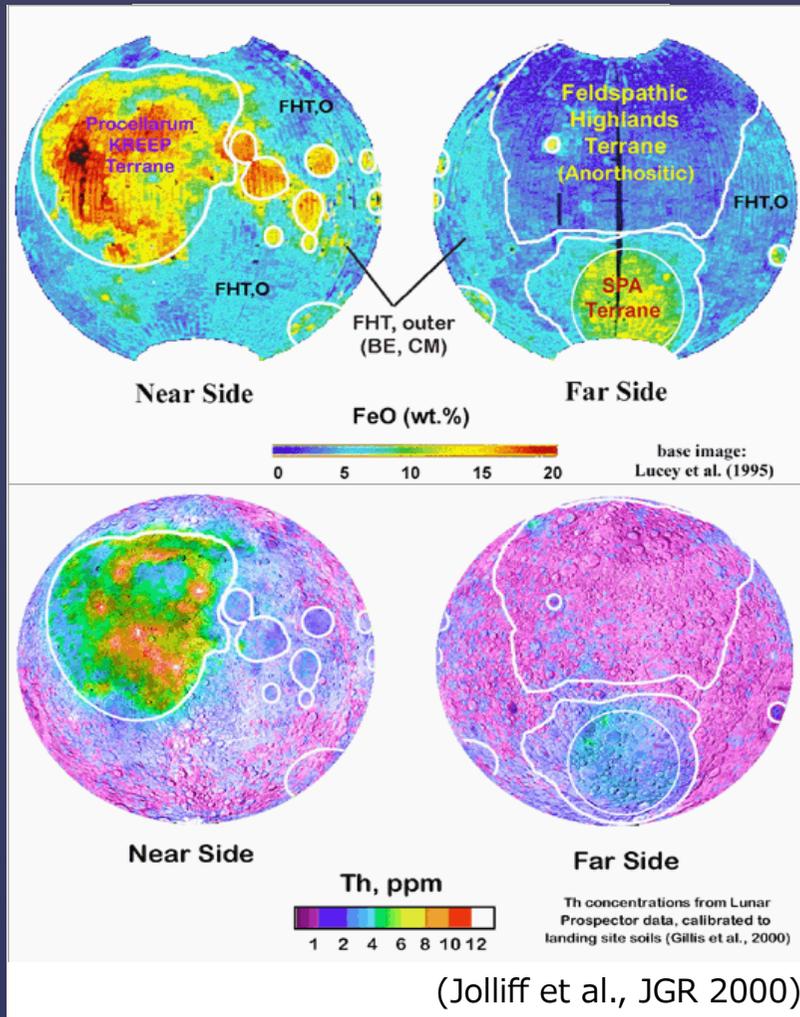
ミッション名	打ち上げ日	国名	探査手法	帰還試料重量(kg)	備考
ルナ2号	1959/9	旧ソ連	周回		月に命中、人類史上初めて他の天体に到達した人工物体
ルナ・オービタ5号	1967/8	アメリカ	周回		成功1～5号で月表面の99%を写真に納める
アポロ11号	1969/7	アメリカ	着陸	21.6	初の人類月着陸
アポロ12号	1969/11	アメリカ	着陸	34.3	
ルナ16号	1970/9	旧ソ連	着陸		豊かの海に着陸、遠隔操作で月の土壌を地球に持ち帰るのに成功
ルナ17号	1970/11	旧ソ連	着陸		8輪の無人月面車ルノホート1号を月面に降ろし、10km走る
アポロ14号	1971/1	アメリカ	着陸	42.3	
アポロ15号	1971/7	アメリカ	着陸	77.3	初めて月面移動車が使われる
ルナ20号	1972/2	旧ソ連	着陸		50gの標本を持ち帰る
アポロ16号	1972/4	アメリカ	着陸	95.7	ケイリー高原に着陸
アポロ17号	1972/12	アメリカ	着陸	110.5	最初の地質学者の宇宙飛行士
ルナ24号	1976/8	旧ソ連	着陸		170gの標本を持ち帰る
ひてん・はごろも	1990/1	日本	周回		日本最初の月探査衛星。月のスイング・バイ技術など工学実験を実施
クレメンタイン	1994/1	アメリカ	周回		
ルナ・プロスペクター	1998/1	アメリカ	周回		
スマート1	2003/9	ESA	周回		
かぐや	2007/9	日本	周回		月周回探査機として最多の14種の観測機器を搭載
嫦娥1号	2007/10	中国	周回		
チャンドラヤーン1号	2008/10	インド	周回		
ルナ・リコネサンス・オービタ	2009/6	アメリカ	周回		
嫦娥2号	2010/10	中国	周回		
グレイル	2011/9	アメリカ	周回		
ラディー	2013/9	アメリカ	周回		月大気と塵環境の探査
嫦娥3号	2013/12	中国	着陸		月面に軟着陸、月面探査機（無人月面車の「玉兔号」）

1990年代以降多くの月周回観測によって月全球のデータが得られるようになった

主なリモートセンシングによる月面観測項目

- 月面モノクロ観測（立体視による地形観測）
- ガンマ線観測（表面の元素組成観測）
- X線観測（表面の元素組成観測）
- 月面反射分光観測（表面の鉱物，岩石観測）
- レーザ高度計観測（レーザ照射による表面地形観測）
- 重力場観測
- 磁場観測

リモートセンシングによる成果

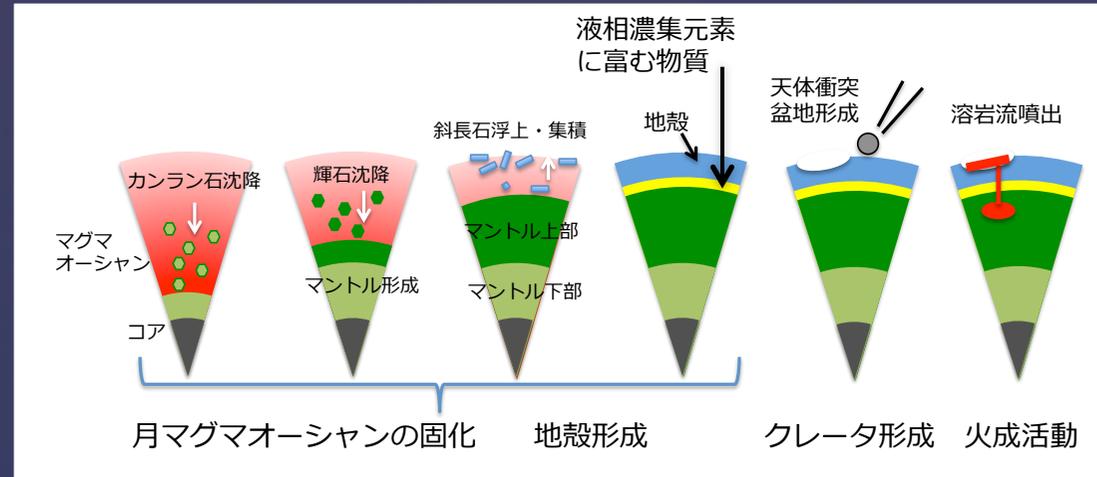
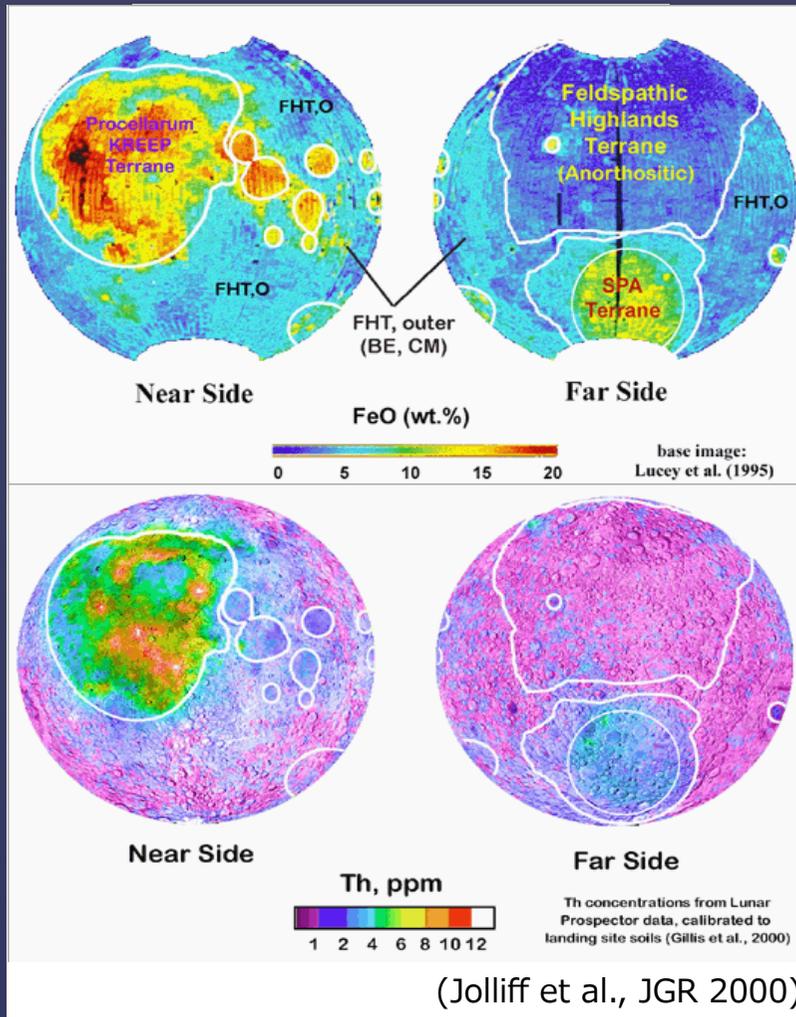


-望遠鏡観測や、アポロ計画による試料分析などから1980年代までは月を大きく高地と海に分け、表と裏での高地と海の面積比の違いを二分性として理解

-その後リモートセンシングデータにより、鉄やトリウムなどの元素濃度を元に月面を3つの性質の異なる領域に分けて理解する提案

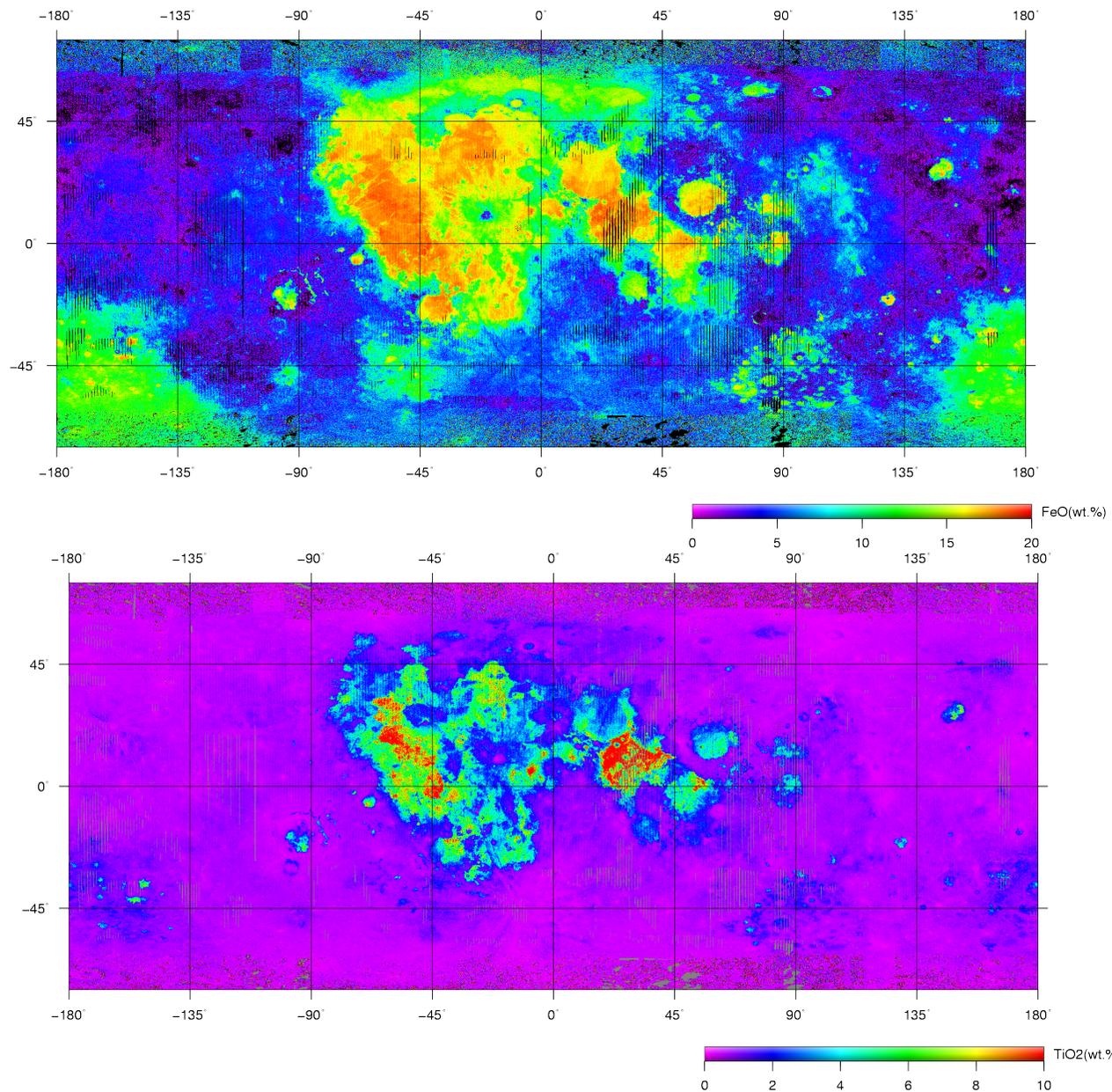
- 1) Procellarum KREEP Terrane (PKT ; 嵐の大洋KREEP地塊)
- 2) Feldspathic Highland Terrane (FHT ; 長石質高地地塊)
- 3) South Pole-Aitken Terrane (SPAT ; 南極エイトケン盆地地塊)

3つの性質の異なる領域：その解釈



- 1) Procellarum KREEP Terrane (PKT ; 嵐の大洋KREEP地塊)
= 液相濃集元素に富む領域
- 2) Feldspathic Highland Terrane (FHT ; 長石質高地地塊)
= 原始地殻
- 3) South Pole-Aitken Terrane (SPAT ; 南極エイトケン盆地地塊)
= 溶岩流の噴出してない衝突盆地

海領域の鉄, チタン量



海の領域はチタンや鉄の量によってタイプ分けされ, またクレータカウンティングによる噴出年代によって組成と年代との関係が研究されている

「かぐや」マルチバンドイメージャデータを使った鉄, チタン量

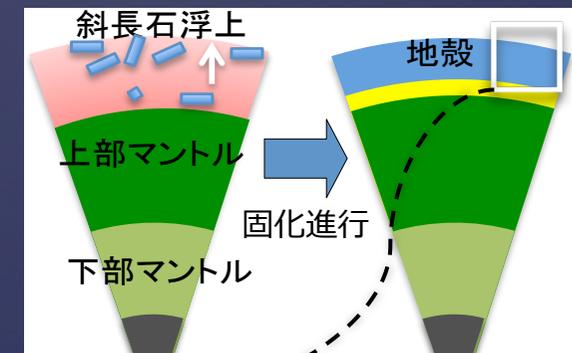
(式はOtake et al., LPSC abst., 2012より)

高地の研究：純粋な斜長岩*の発見(1)

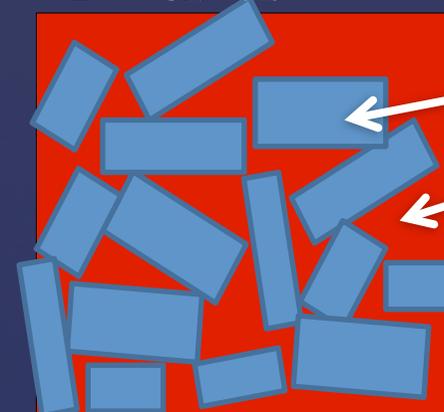
<背景・課題>

①巨大衝突の証拠は残っているのか？

- ・ 巨大衝突で形成すると月は必然的に高温になり全球がマグマオーシャン（溶融層）に覆われる→これが巨大衝突の証拠になり得る
- ・ マグマ中で斜長石が結晶化し浮上・集積して初期地殻が形成する
そのため、斜長岩地殻は大規模マグマの証拠
→全球に斜長岩地殻があれば巨大衝突の証拠だが、試料採取されていない場所については、従来直接証拠はなかった



地殻の拡大図



斜長石結晶粒子

斜長石の隙間にトラップされたマグマから他の鉱物が10-20%程度形成するため、純粋になることは不可能

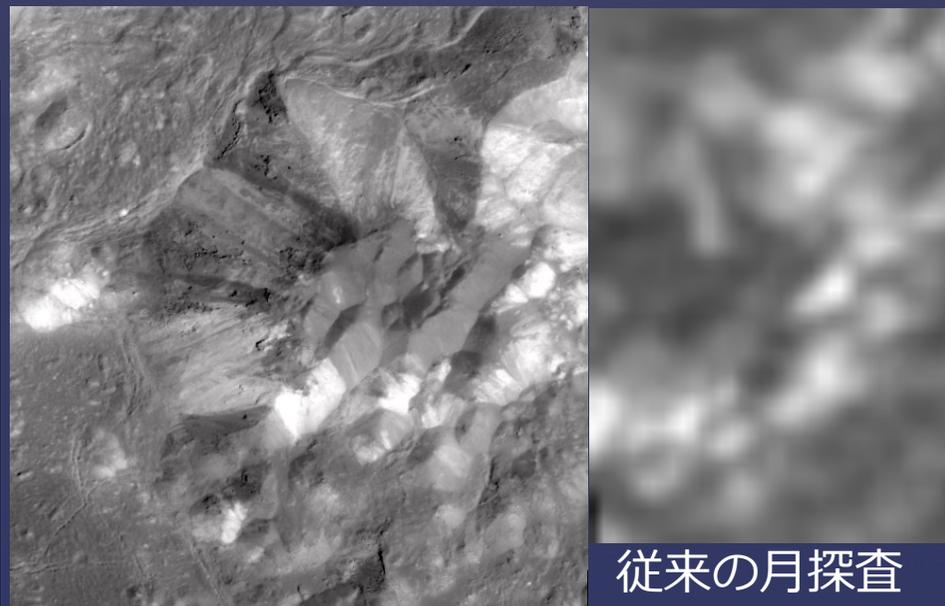
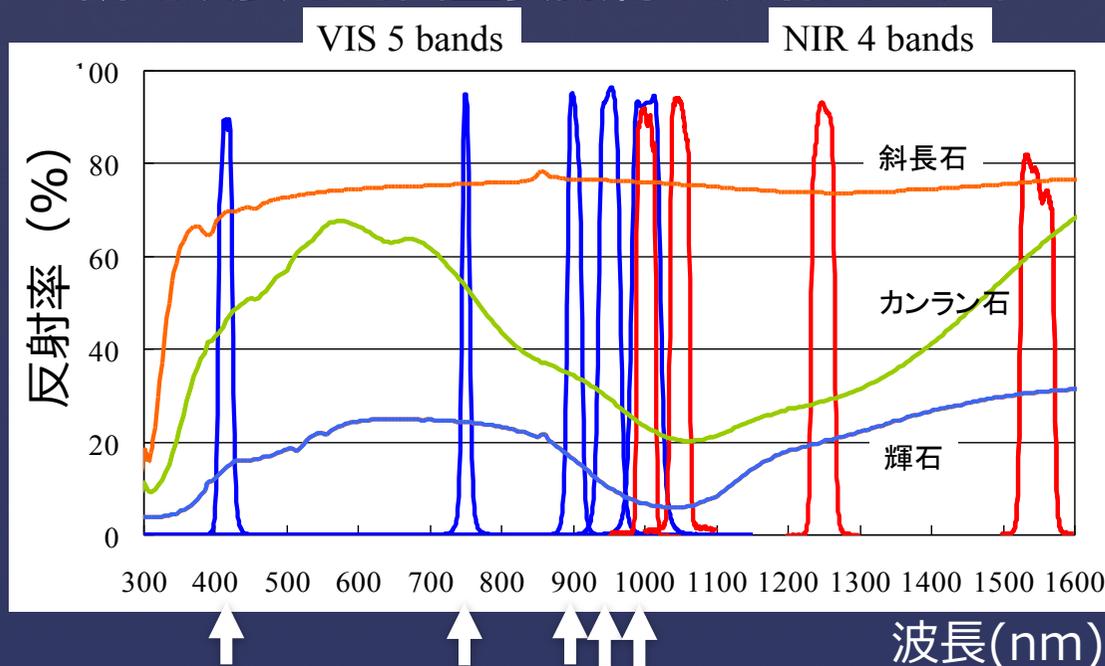
* 斜長石 (Al, Ca, Si, Oからなる鉱物) の含有量が100%に近い斜長岩 (鉱物が集まったものが岩石、斜長石が90%以上含まれる岩石を斜長岩と呼ぶ)

純粋な斜長岩の発見 (2)

「かぐや」の分光画像（マルチバンドイメージャ：MI）では従来の月探査データに比べて以下の点が有利

- 1) 観測波長帯が長い(1550nmまで) → 主要鉱物吸収帯をカバーする
- 2) 1桁高い空間分解能 (20m/pixel)

MI観測波長と月面主要鉱物の反射スペクトル



従来の月探査

「かぐや」マルチバンドイメージャ

「かぐや」以前の観測波長：鉱物の吸収帯をカバーできていない

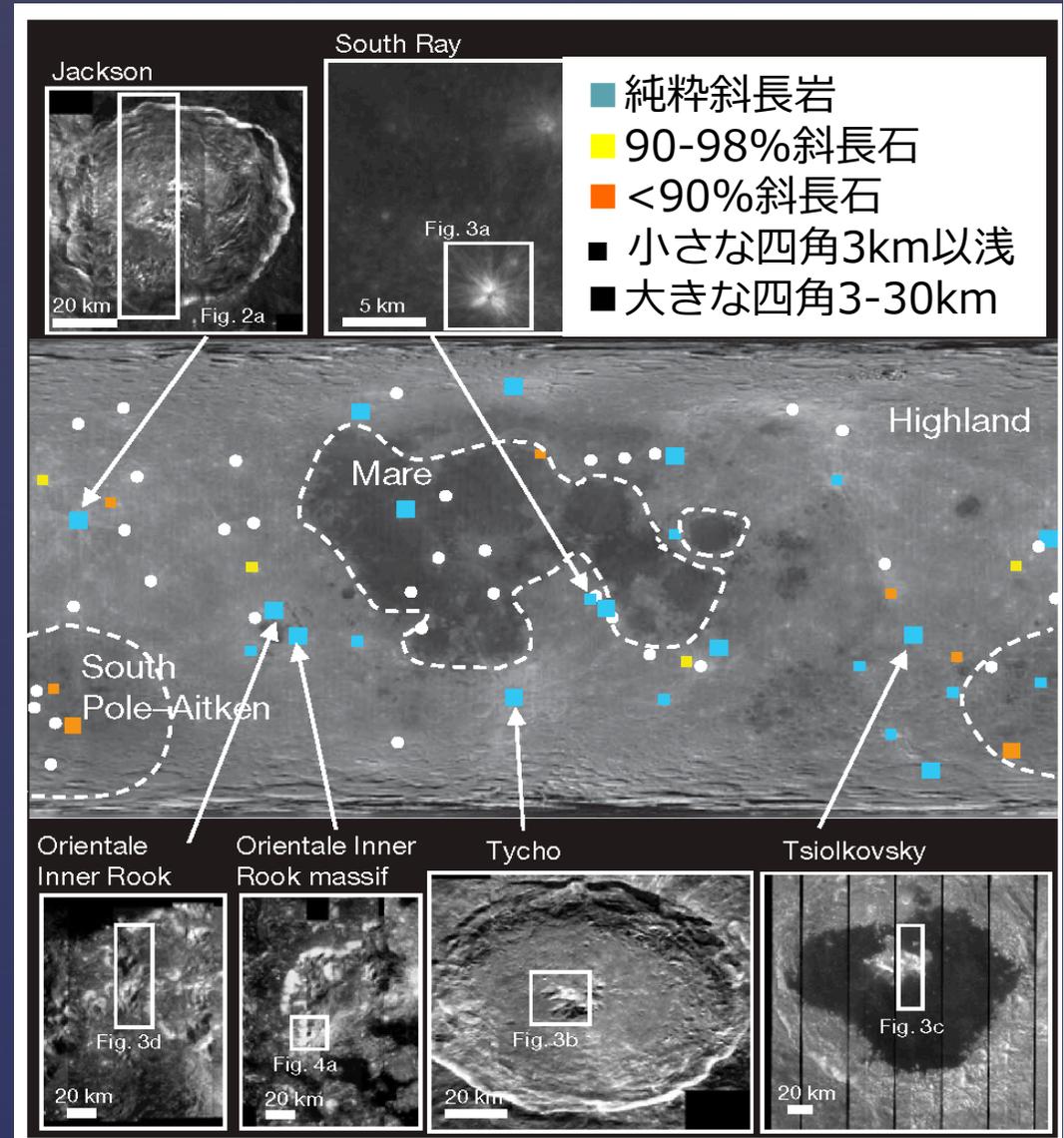
純粋な斜長岩の発見 (3)

<「かぐや」による成果>

•従来月試料からの推定値
(80-90%斜長石)に比べて格段に
斜長石 (ほぼ100%)の多い、**純粋
な斜長岩が存在**

•**純粋な斜長岩が全球に分布**
深さ3~30kmの混合の少ない地殻
本体が露出する場所には、必ず純
粋な斜長岩がある(高地の大きい四
角は全て■)

→マグマオーシャンの証拠
→地殻形成過程の理解必要



地殻形成過程の二分性発見 (1)

<背景・課題>

②マグマオーシャンの固化は一様か？

③二分性の成因は？

・従来の観測で月の表と裏で特性が異なる二分性が指摘されて来たが成因（特にマグマオーシャンとの関連）は不明

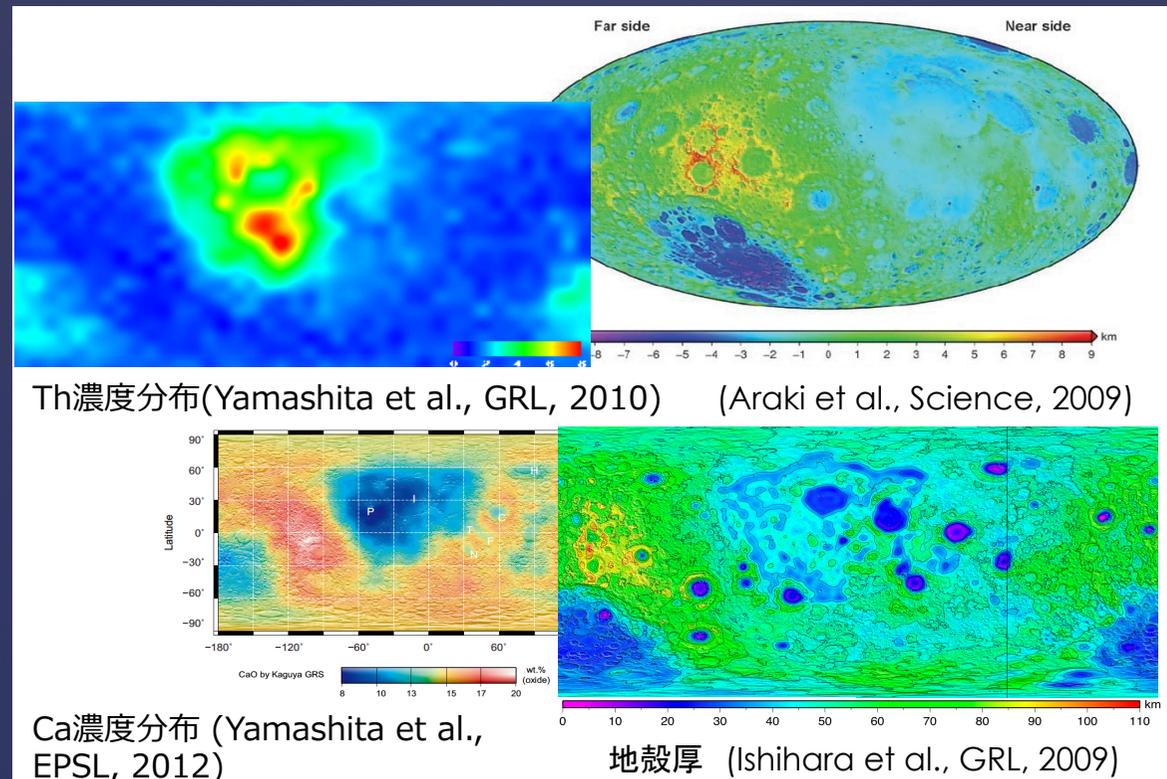
→調査にはマグマの固化順序を示す

時計が必要でMg#*を使う

<二分性の種類>

- 地形
- 火成活動量
- 化学組成(Fe量など)
- 地殻厚さ

*Mg# = $Mg / (Fe + Mg)$ モル%
地殻中の輝石 (Fe, Mg, Caを含む鉱物)
のMg#からマグマの固化順序
がわかる→マグマから初期に固化:Mg#は高い
マグマ固化が進む:Mg#は低下

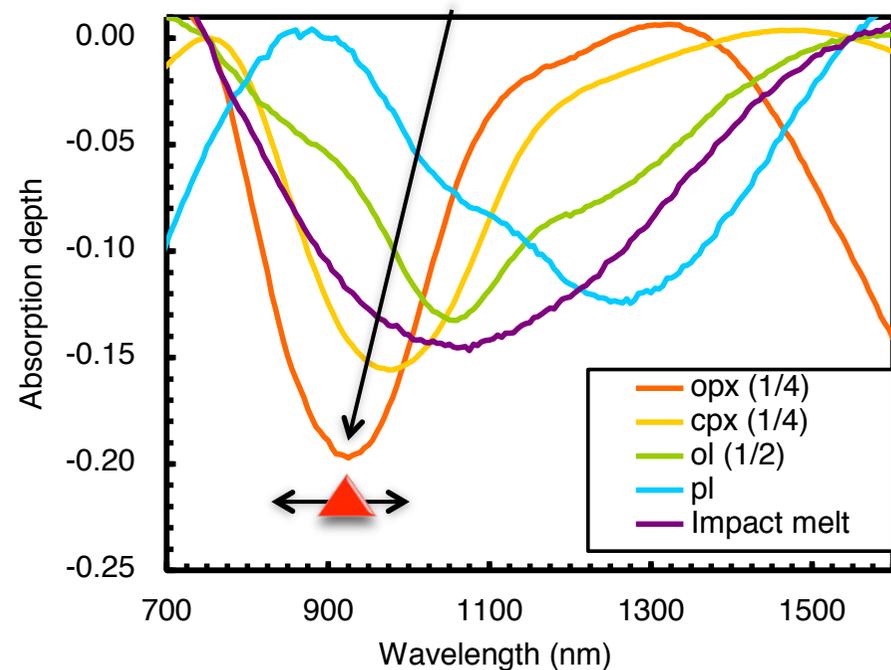
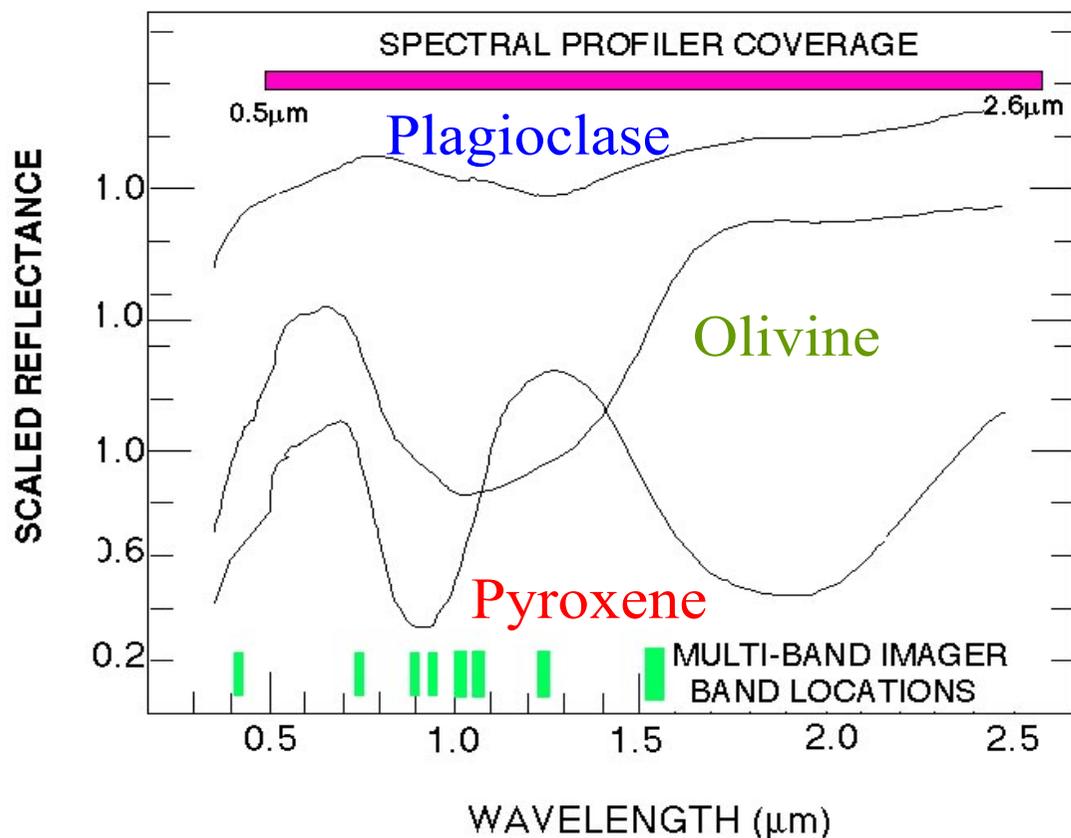


地殻形成過程の二分性発見 (2)

従来には無かった高いS/Nの連続分光スペクトル (スペクトルプロファイラ : SP) → これにより、月面の主要鉱物の1つである輝石*の中のMg/Fe比を測定可能

*輝石 : Ca, Mg, Fe, Si, Oからなる鉱物

吸収中心 : Mg/Feが高いほど短波長へ移動



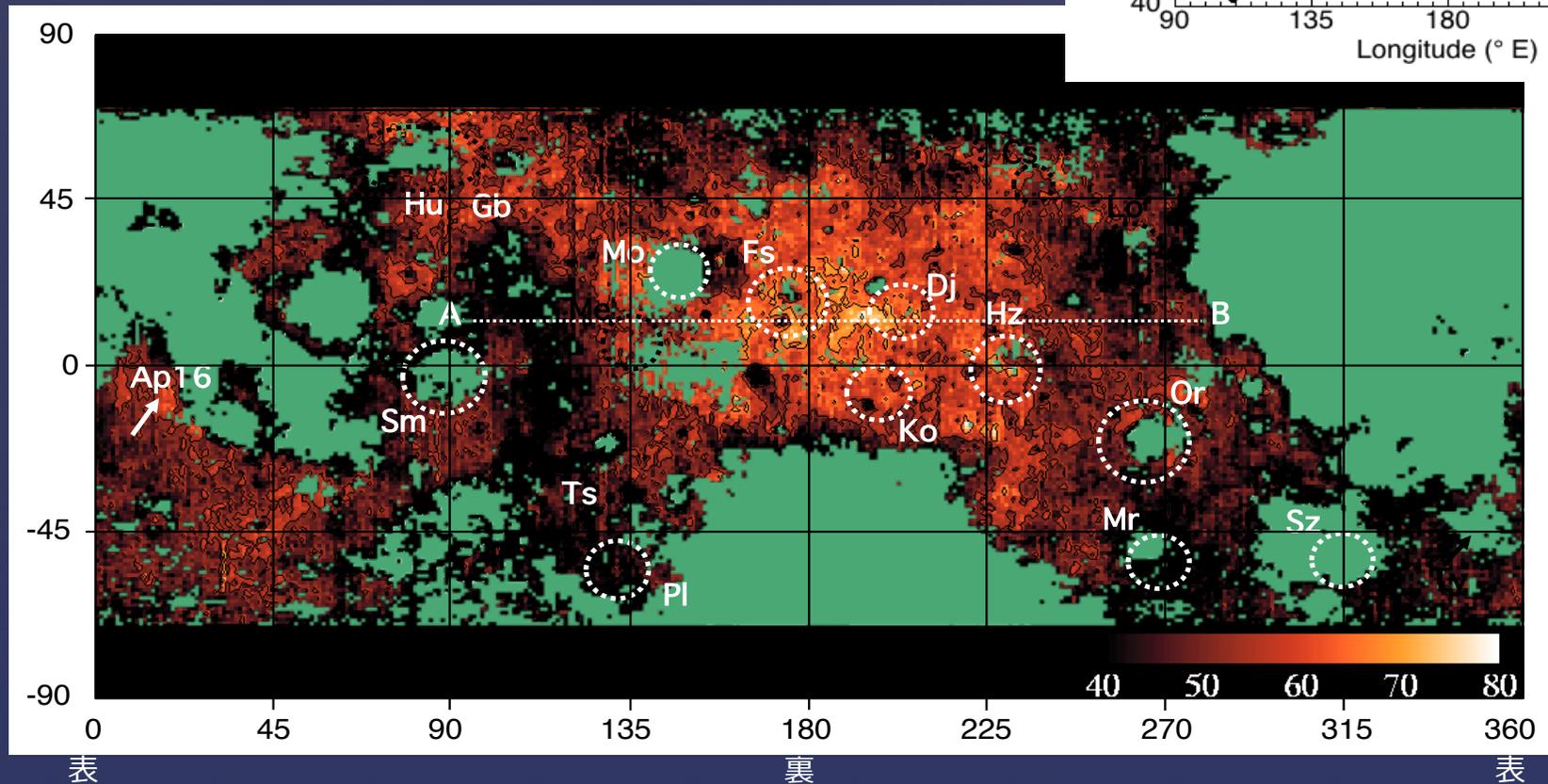
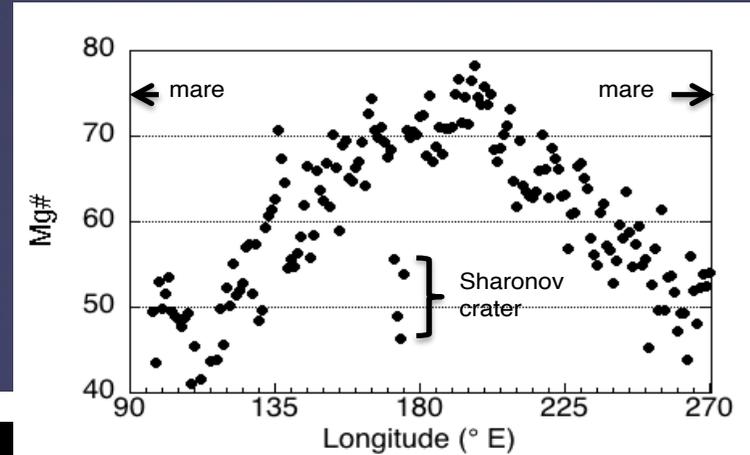
地殻形成過程の二分性発見 (3)

＜「かぐや」による成果＞

地殻のMg#分布に二分性

- ・裏側が高く最大80(従来推定より高い)
- ・表側に向けて連続的に減少

→裏側の地殻が先に固化形成した

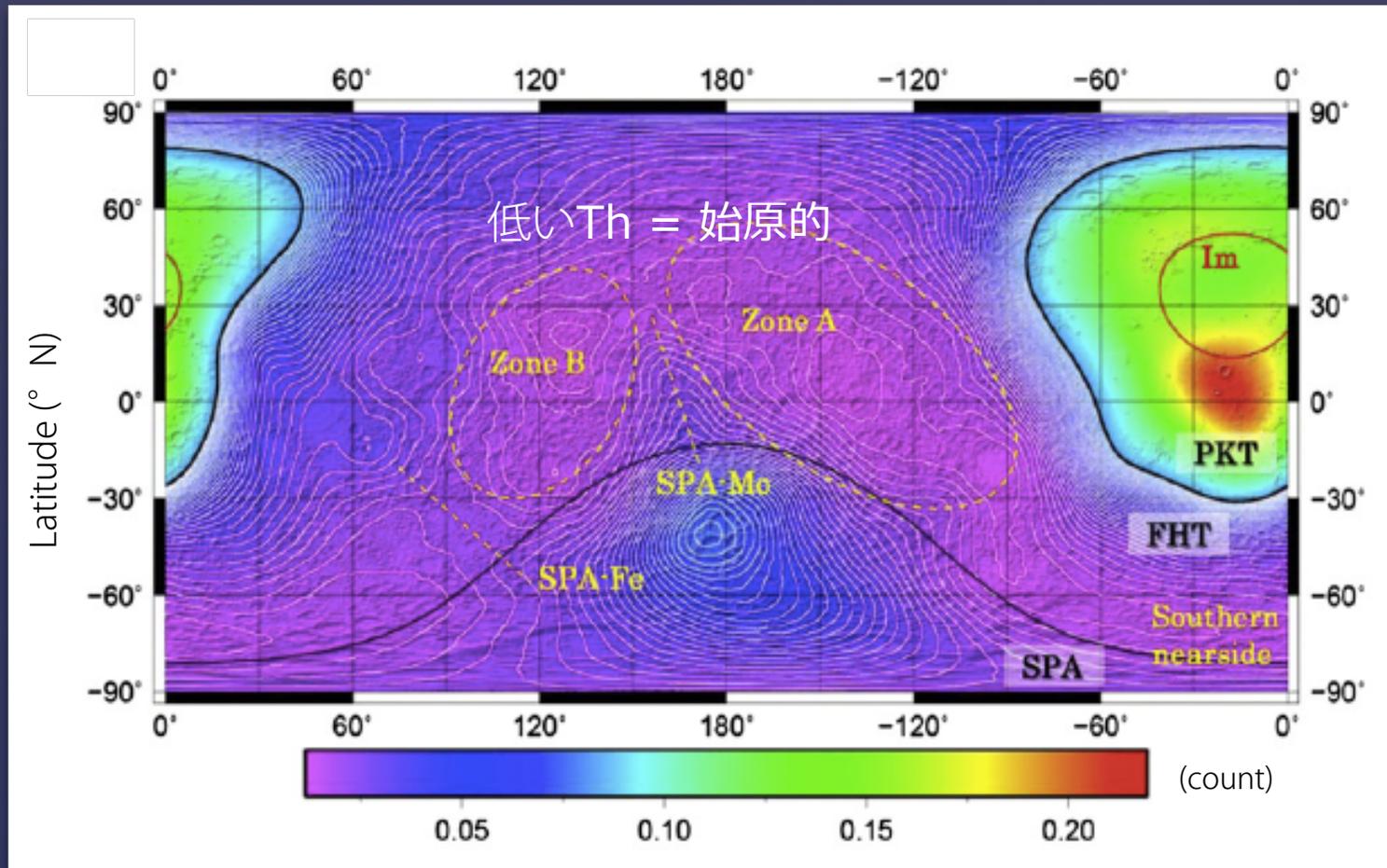


* 緑は海領域

(Ohtake et al., Nature Geoscience, 2012)

地殻形成過程の二分性発見 (4)

「かぐや」ガンマ線観測による月面のTh 濃度
地殻は裏側でTh濃度が低い→先に固化形成したことを示す



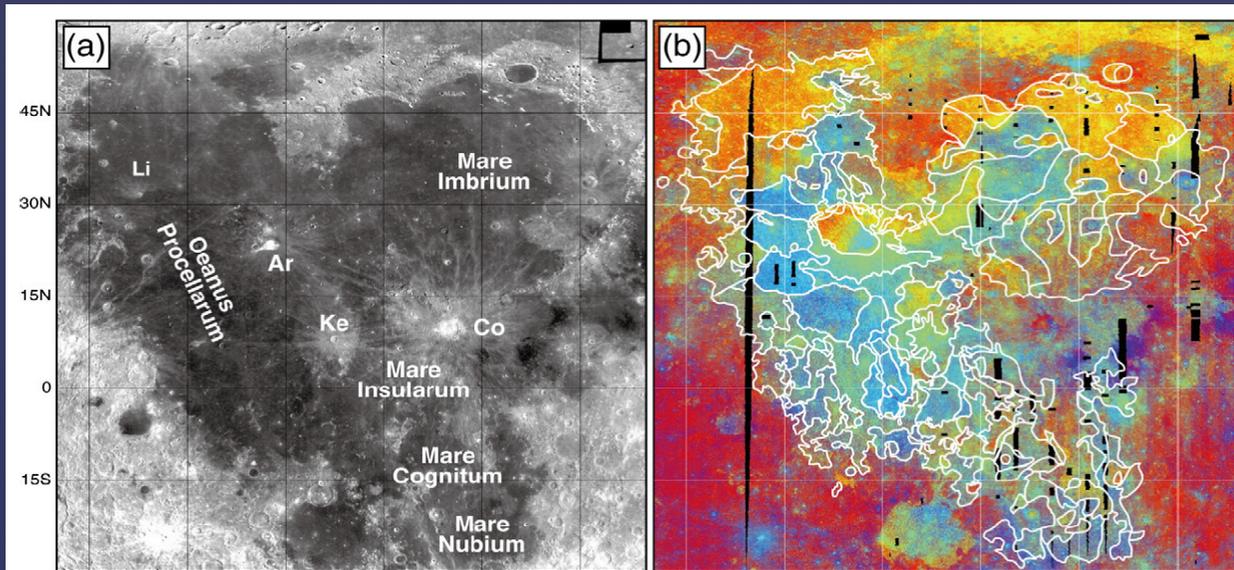
(Kobayashi et al., EPSL, 2012)

海の研究： 若い火成活動活発期の発見 (1)

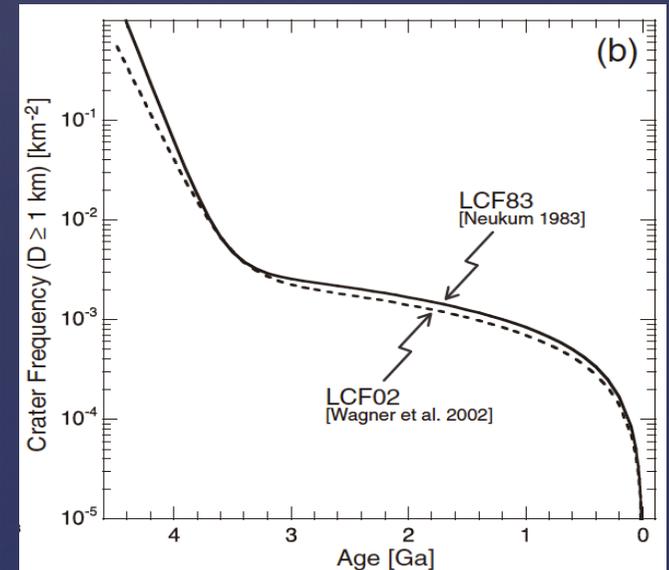
<背景と課題>

②マントル溶融と火成活動がいつ起こったのか？

- ・ 溶岩はマントルが溶融してマグマを形成しそれが噴出したもの
 - ・ 火成活動から月の熱史を探るためには溶岩流の噴出年代と噴出量の関係を明らかにする必要がある
- クレータカウンティング手法を用いる



表側の海領域単バンド画像 溶岩流の区分け図

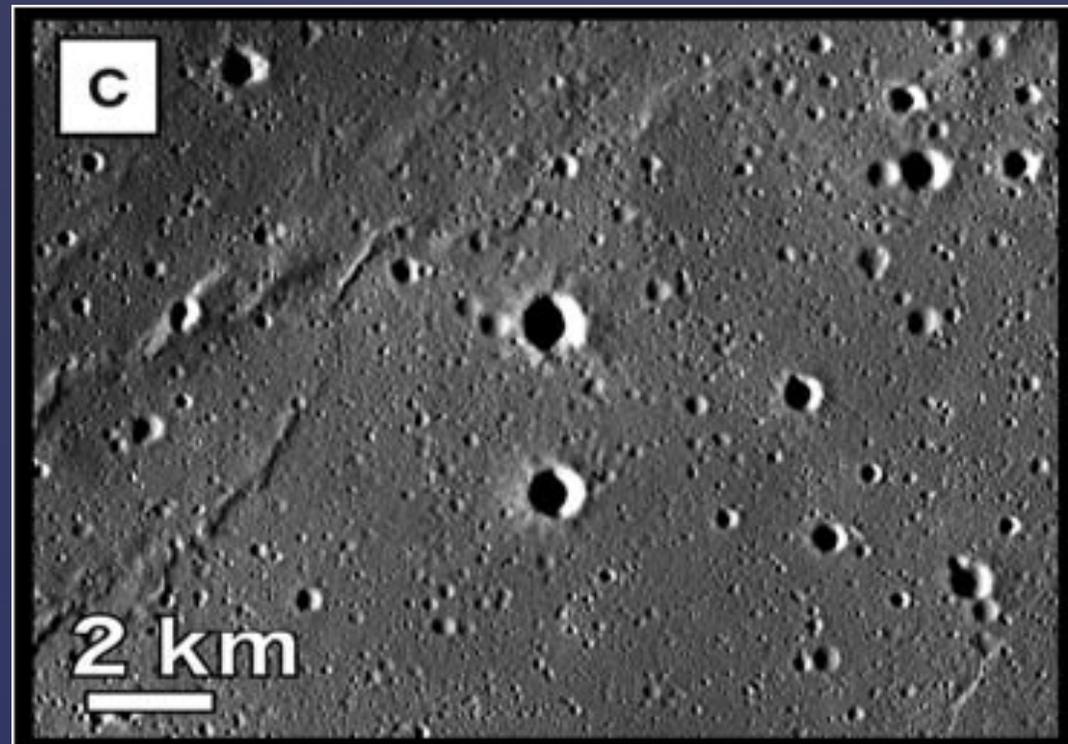
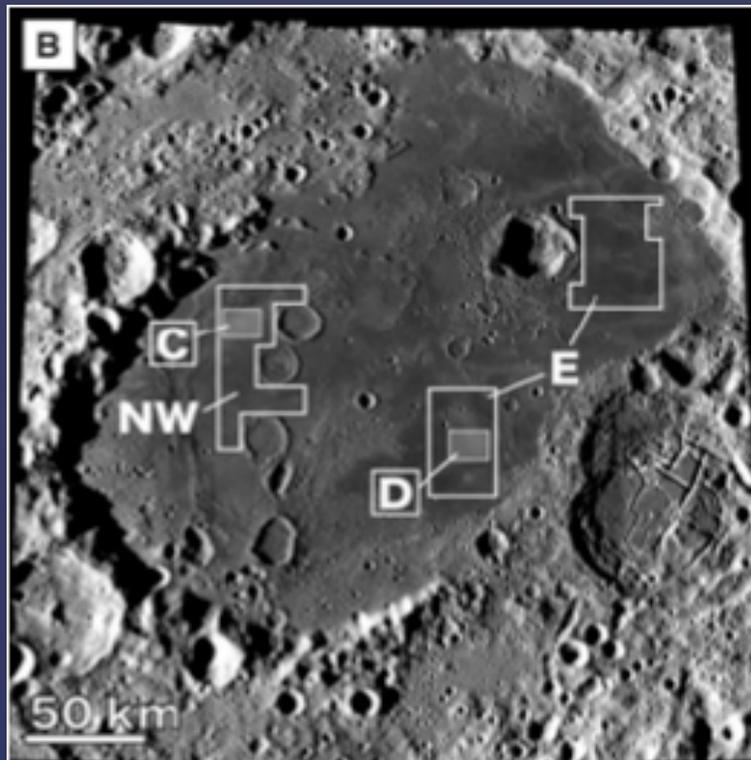


年代とクレータ個数密度の関係

(Morota et al., EPSL, 2011)

若い火成活動活発期の発見 (2)

「かぐや」の地形カメラは従来の月探査データに比べて高い空間解像度(10m/pixel)で全球データを取得
また、クレータカウンティングに適した観測条件(太陽高度)での観測を実施



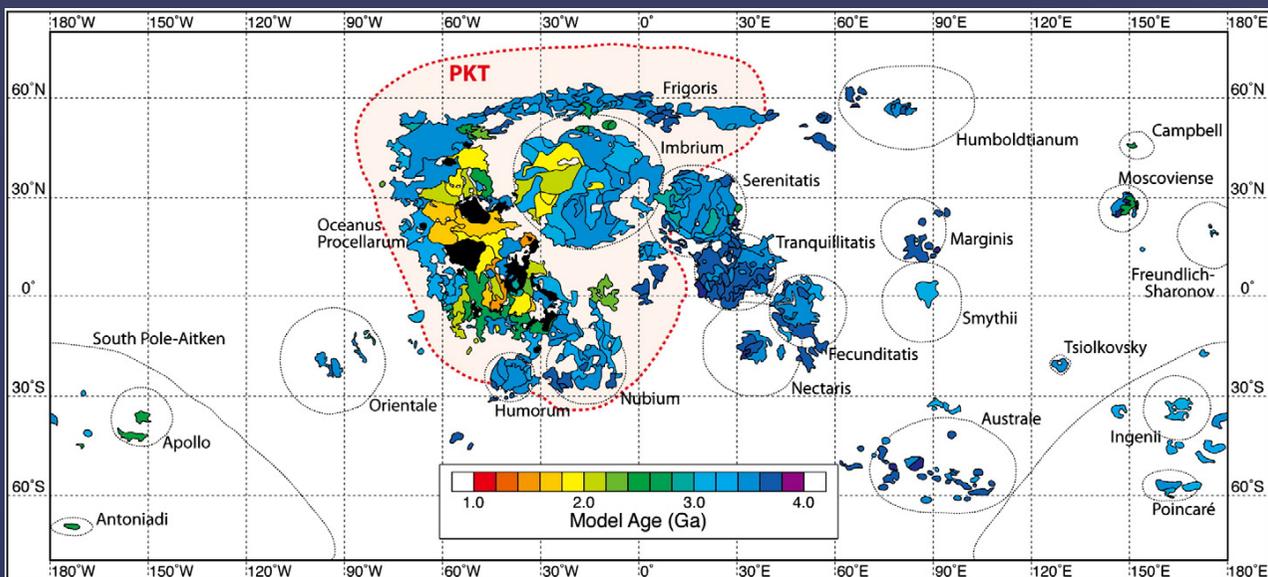
(Haruyama et al., Science, 2009)

若い火成活動活発期の発見 (3)

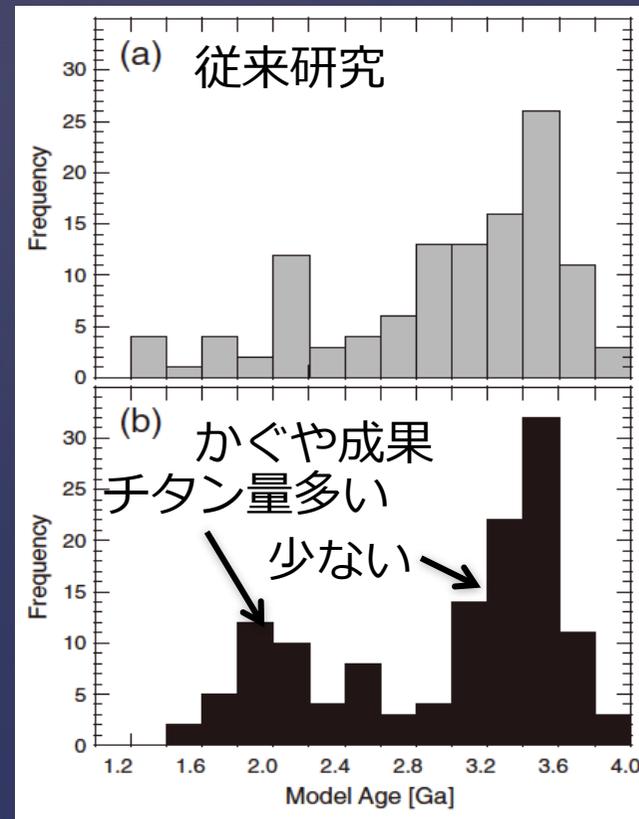
＜「かぐや」による成果＞

- ・ 約20億年前を中心とする若い活発な火成活動期を発見
 - ・ 古い時期溶岩流はチタン含有量少、若い方では多い
- 2つの活動が活発な時期とそれぞれ異なる
マンタル溶融過程が必要

青は古く
赤は若い



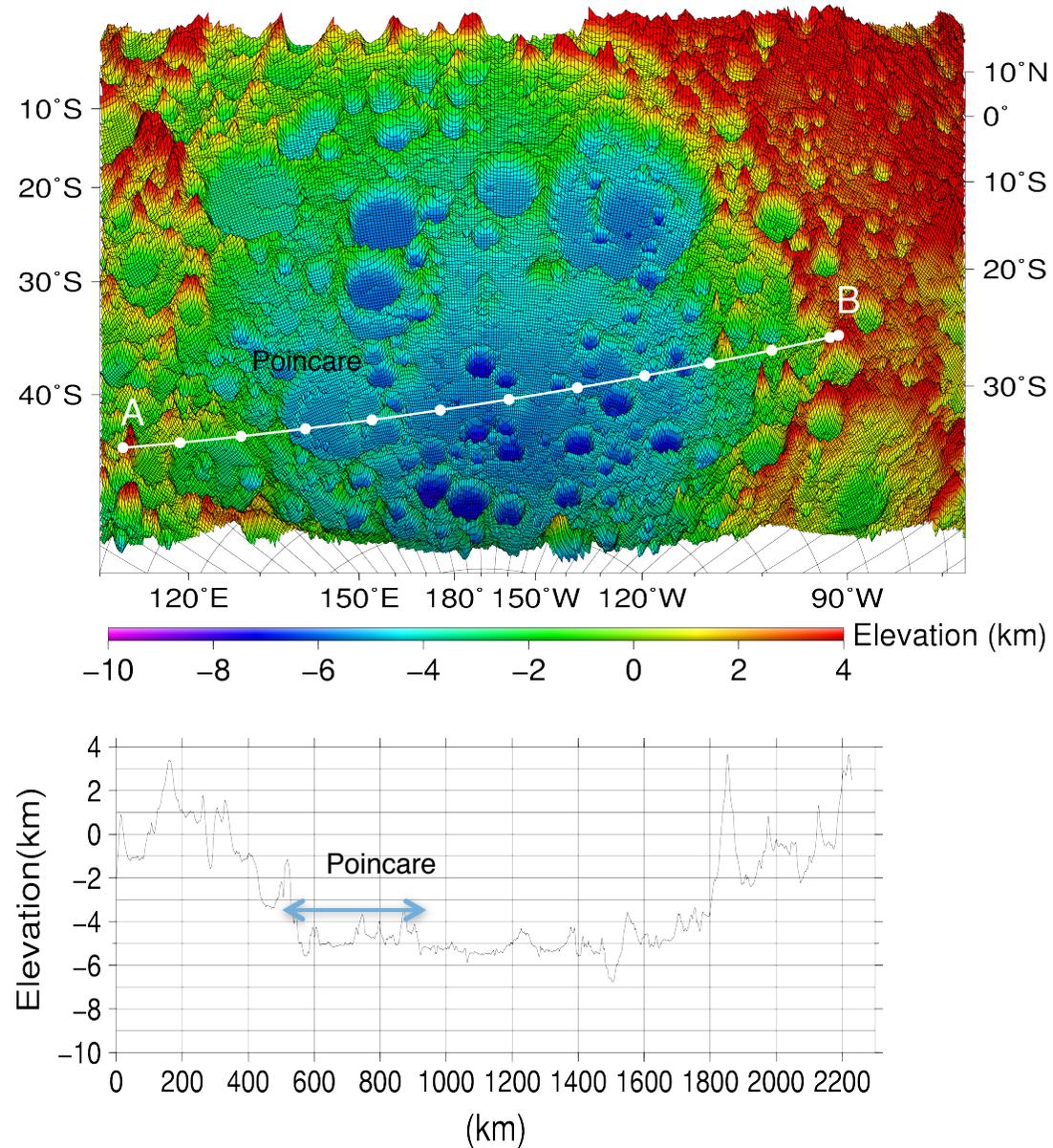
裏 表 裏
溶岩流の年代マップ



溶岩流年代と噴出頻度

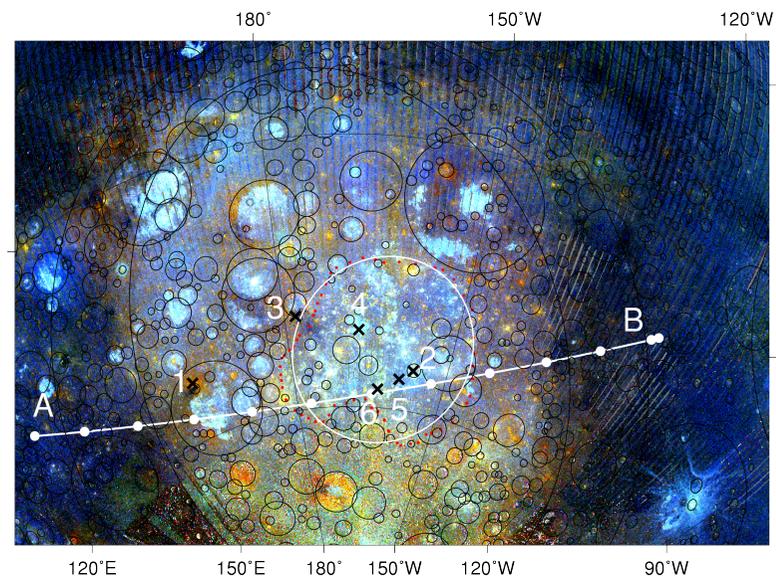
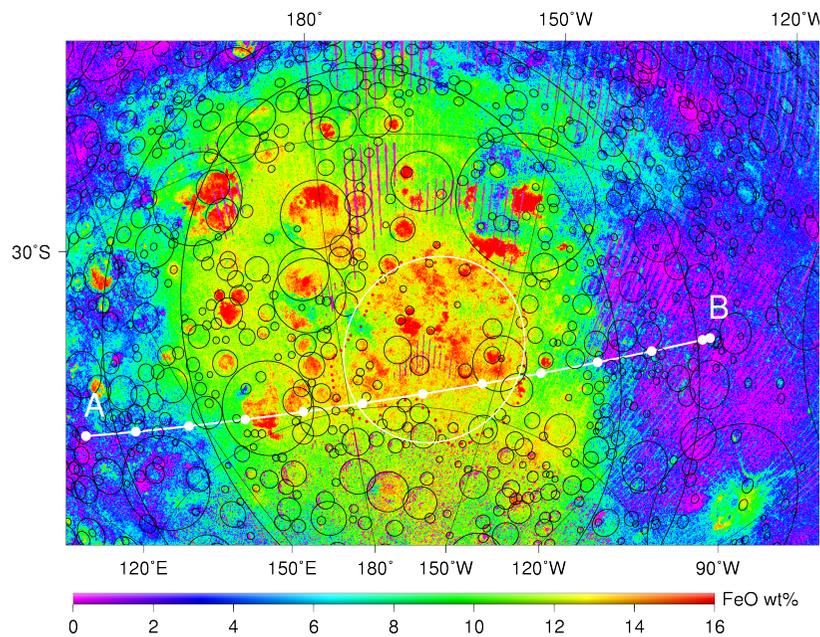
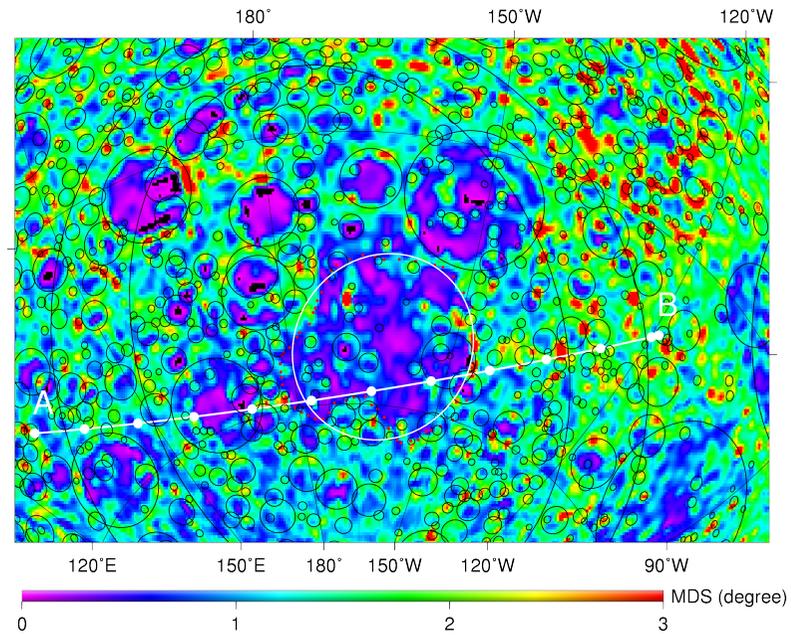
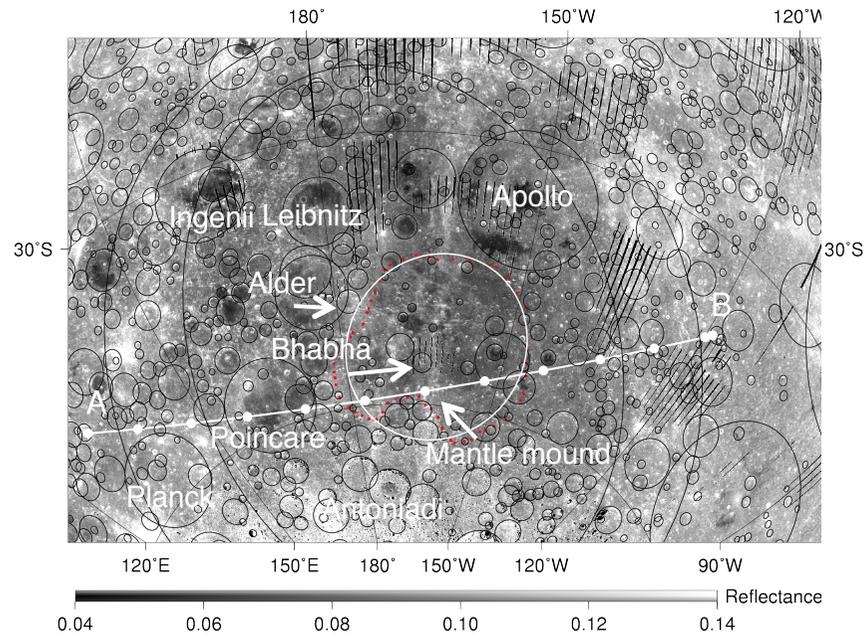
(Morota et al., EPSL, 2011)

SPA盆地内の地質(1)



(Ohtake et al., GRL,
2014から改定)

SPA盆地内の地質(2)

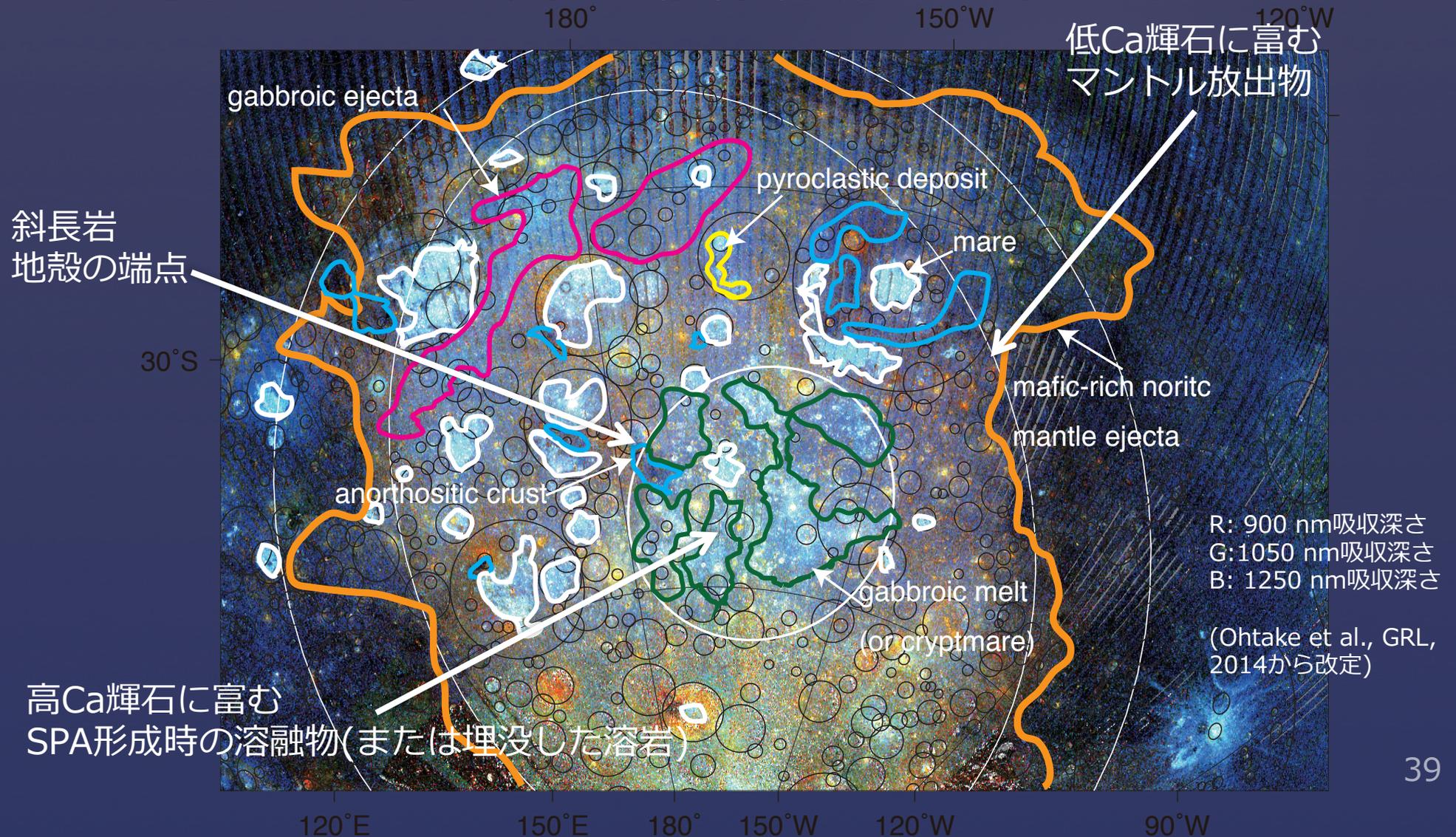


R:900 G1050 B:1250

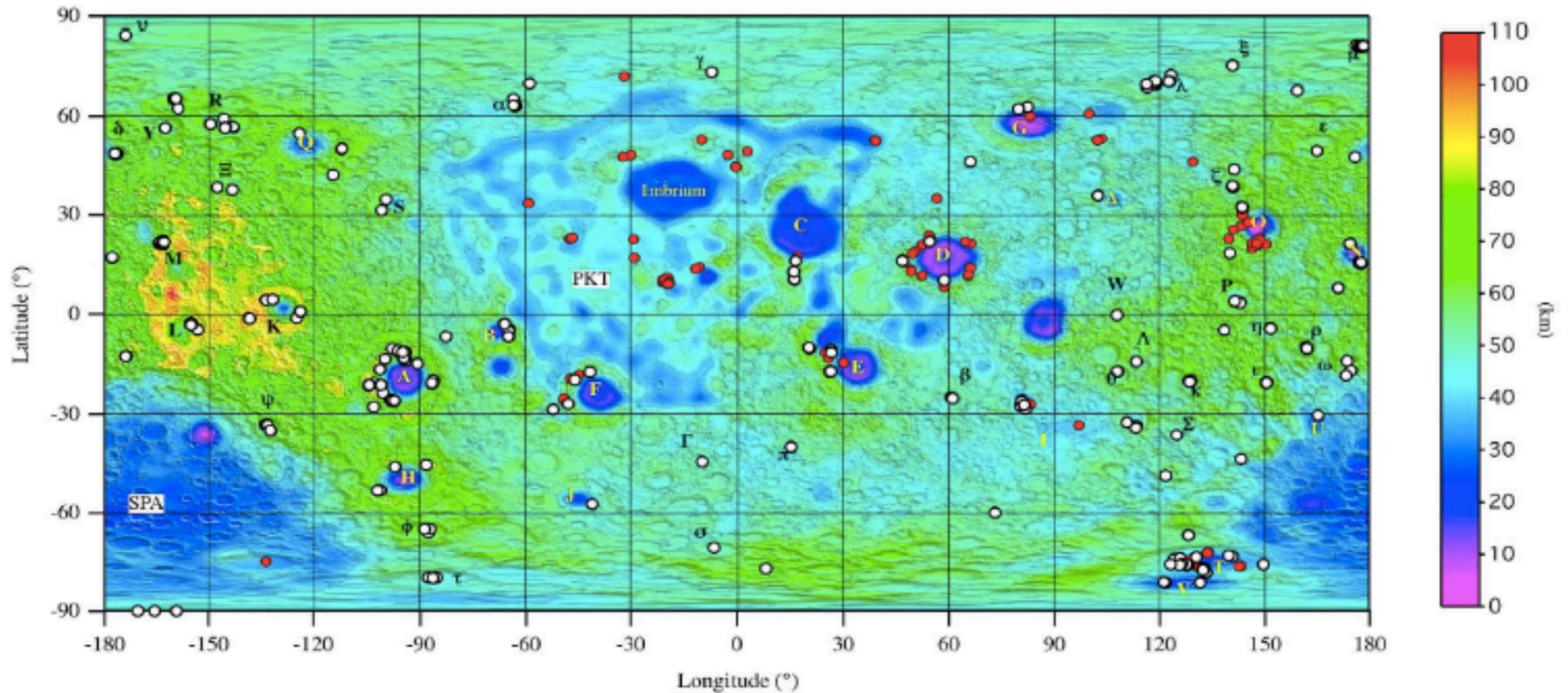
(Ohtake et al., GRL, 2014から改定)

SPA盆地内の地質(3)

- マントル物質と推定される岩相（低Ca-輝石に富む）が存在
- 盆地中央に盆地形成時の溶融物滞留領域が見つかる



純粋な斜長岩とカンラン石（マントル物質）の分布

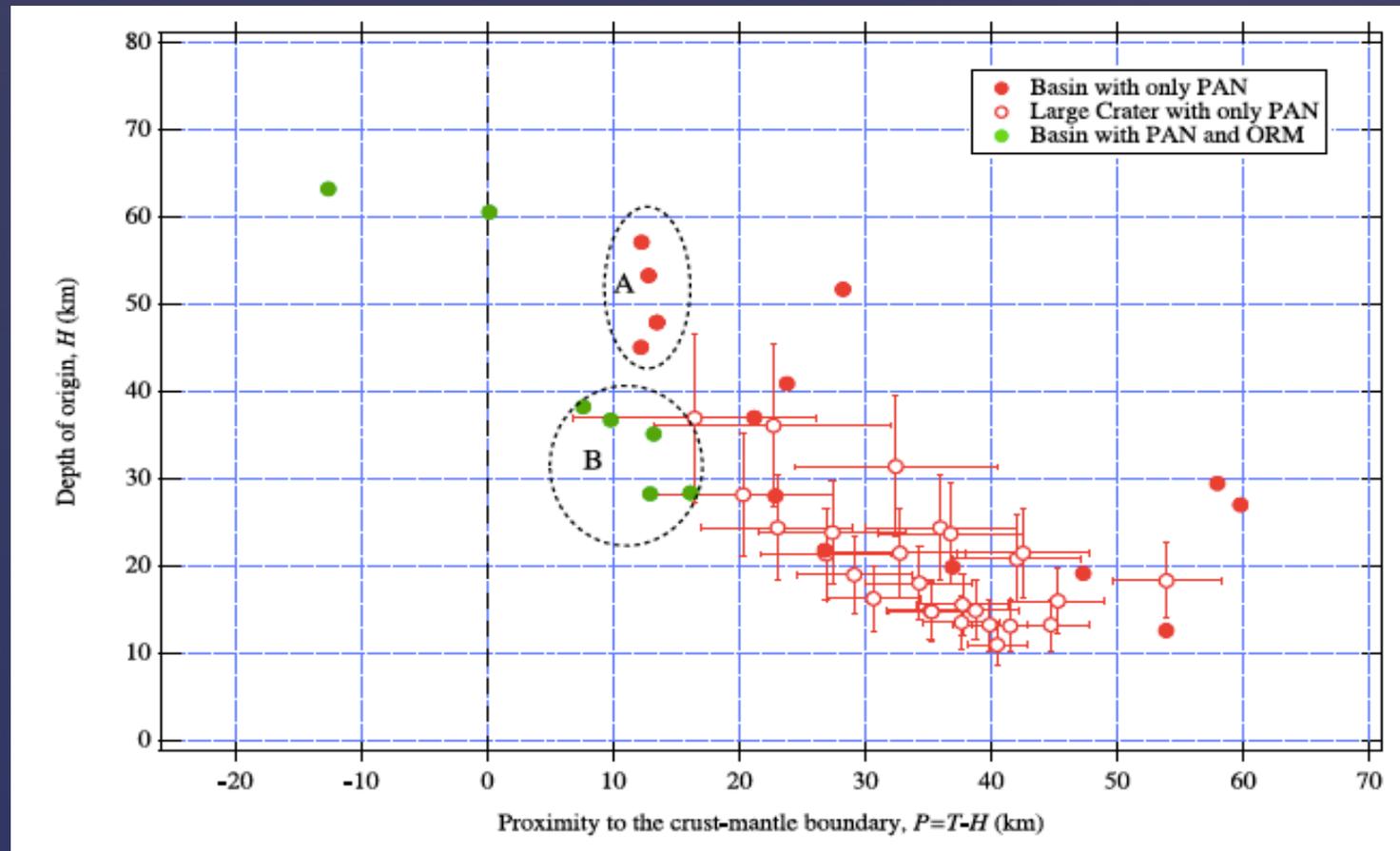


- 純粋な斜長岩
- カンラン石にとむ地域

(Yamamoto et al., GRL, 2012)

純粋な斜長岩とカンラン石の分布から解ること

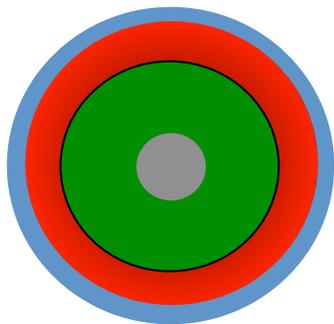
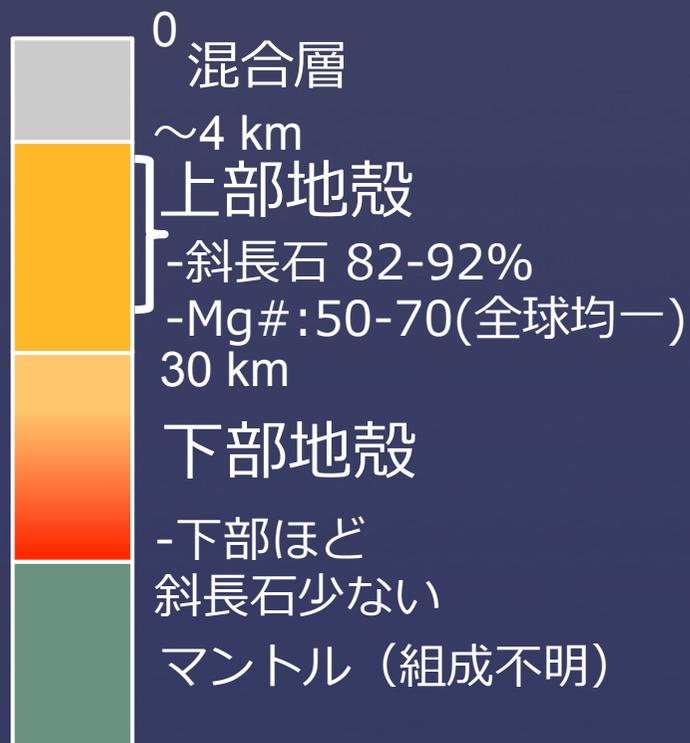
- 純粋な斜長岩からなる地殻が数十kmに渡って存在する
- 表側では純粋な斜長岩層の下にカンラン石に富む下部地殻が存在する可能性あり（裏側には見られない）



(Yamamoto et al.,
GRL, 2012)

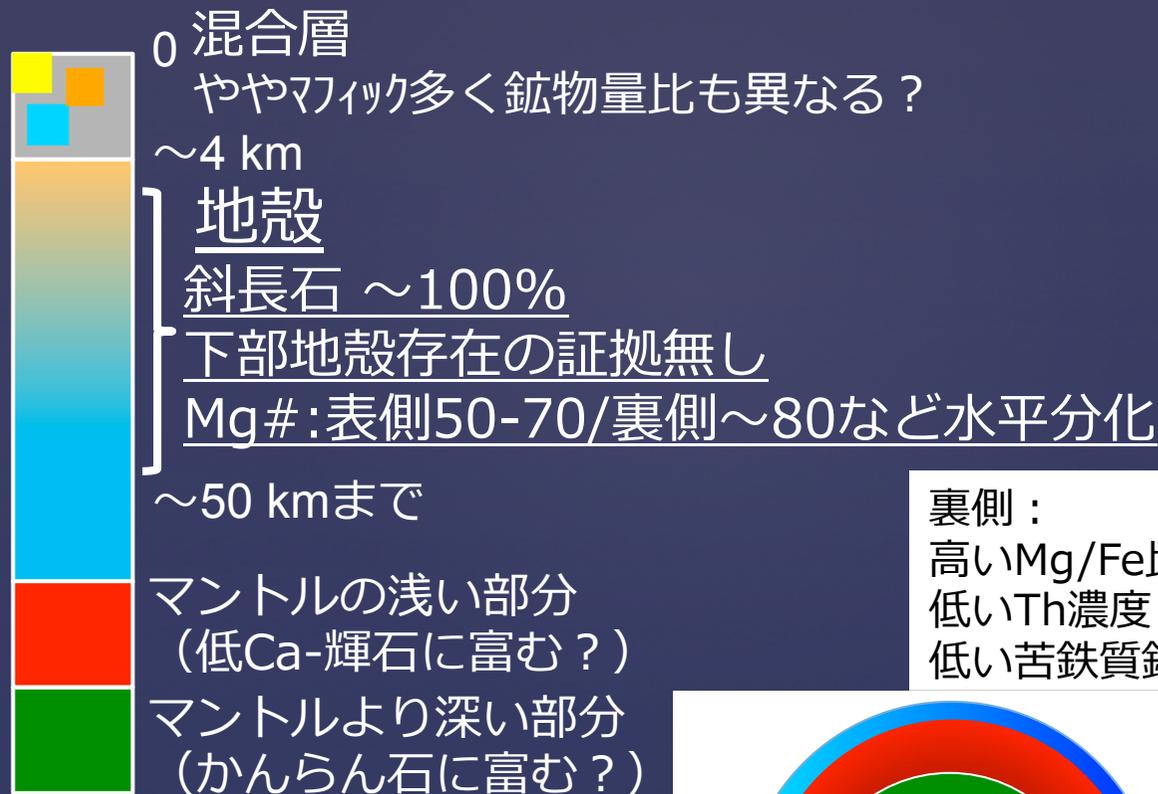
「かぐや」成果をもとに構築した新しい月の地質

従来

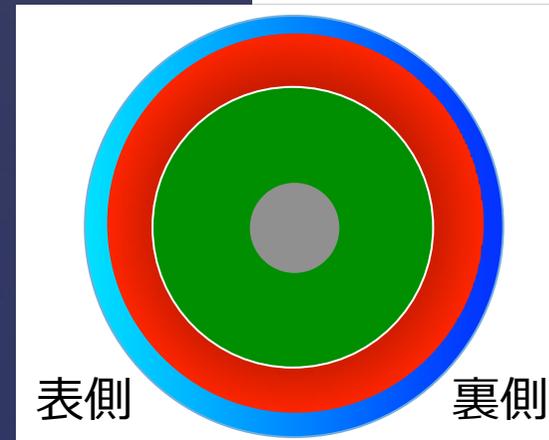


対照的な地殻・内部構造

新しい地殻の構造



裏側：
高いMg/Fe比
低いTh濃度
低い苦鉄質鉍物量



非対称な地殻・内部構造

3. 月地質に残された科学課題

月の地殻の理解：現状の課題

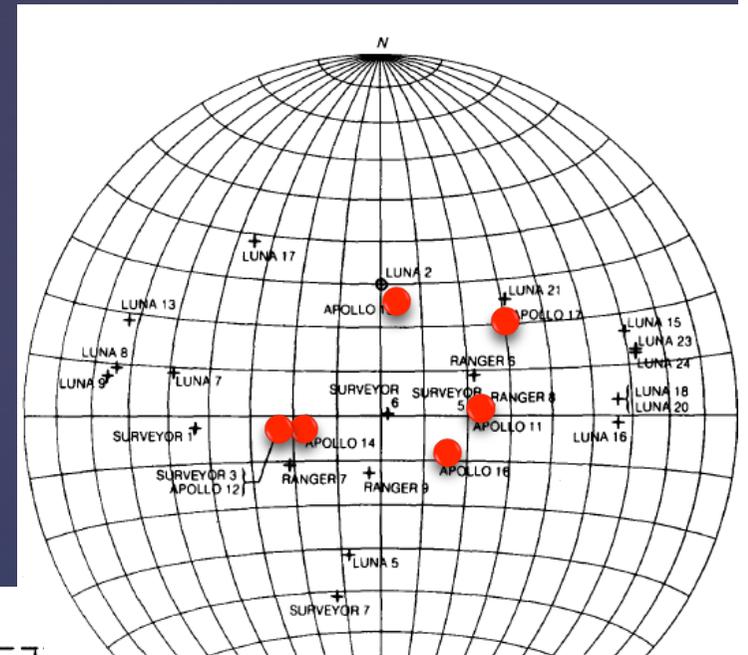
従来の月リターン試料の限界

- ・ 採取領域の狭さ(表側のごく一部領域)
- ・ 水平・垂直方向にどこから来たのか不明
(表層の混合層からの採取)

→今後の探査では

- ・ 混合層の下にある地殻本体の試料採取
- ・ 未採取領域からの試料

アポロによる試料採取地域

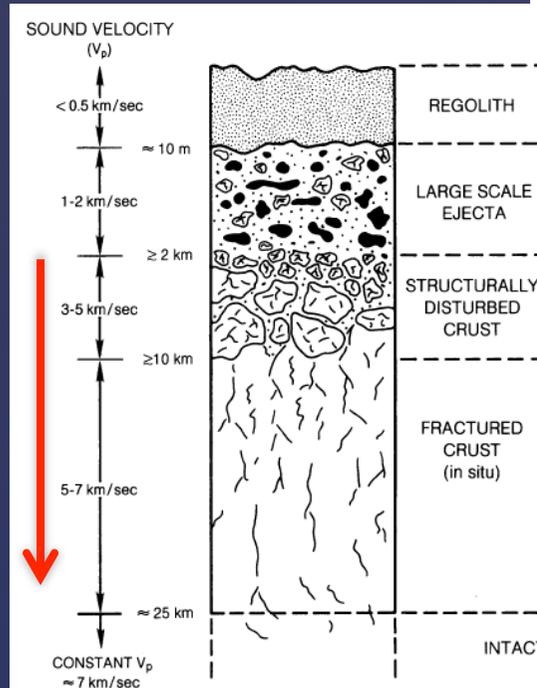


月の表側

水平方向 & 深さ方向
の物質混合層

地殻本体の化学組成や組織が
保存されている深さ(> 2 km)
からの試料が必要

→地殻本体試料の入手には
中央丘の探査が有効

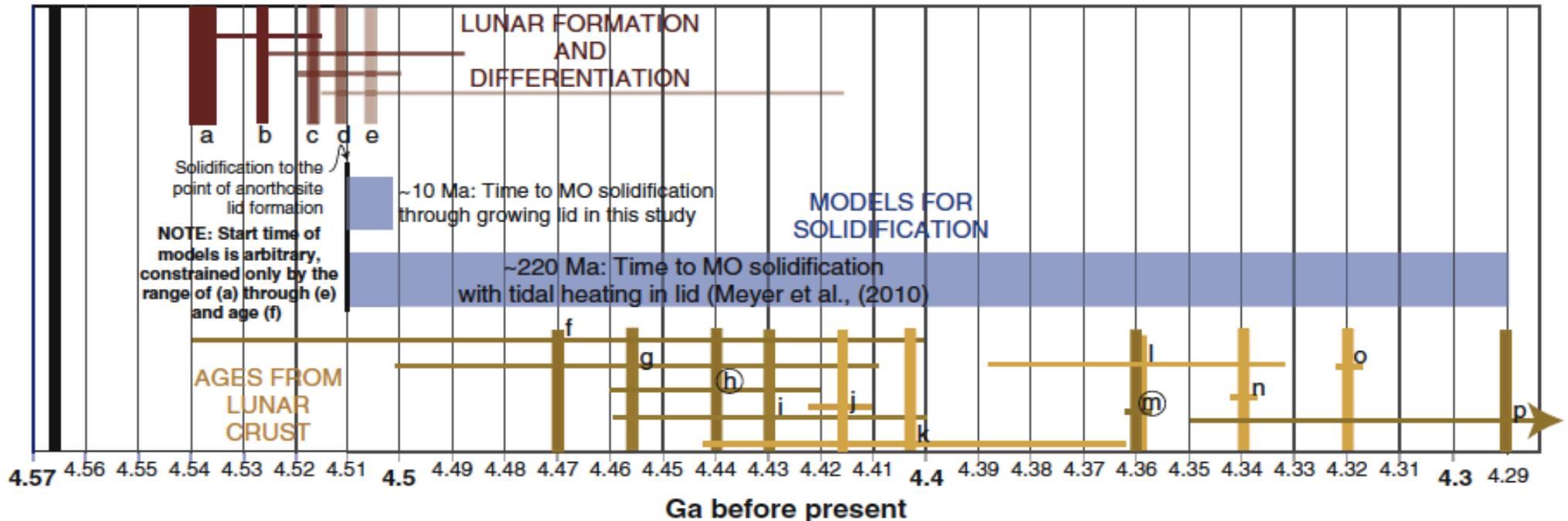


概念的な地殻断面構造
(Heiken et al., in Lunar Source
Book, 1991)

月マグマオーシャンの固化年代の謎(1)

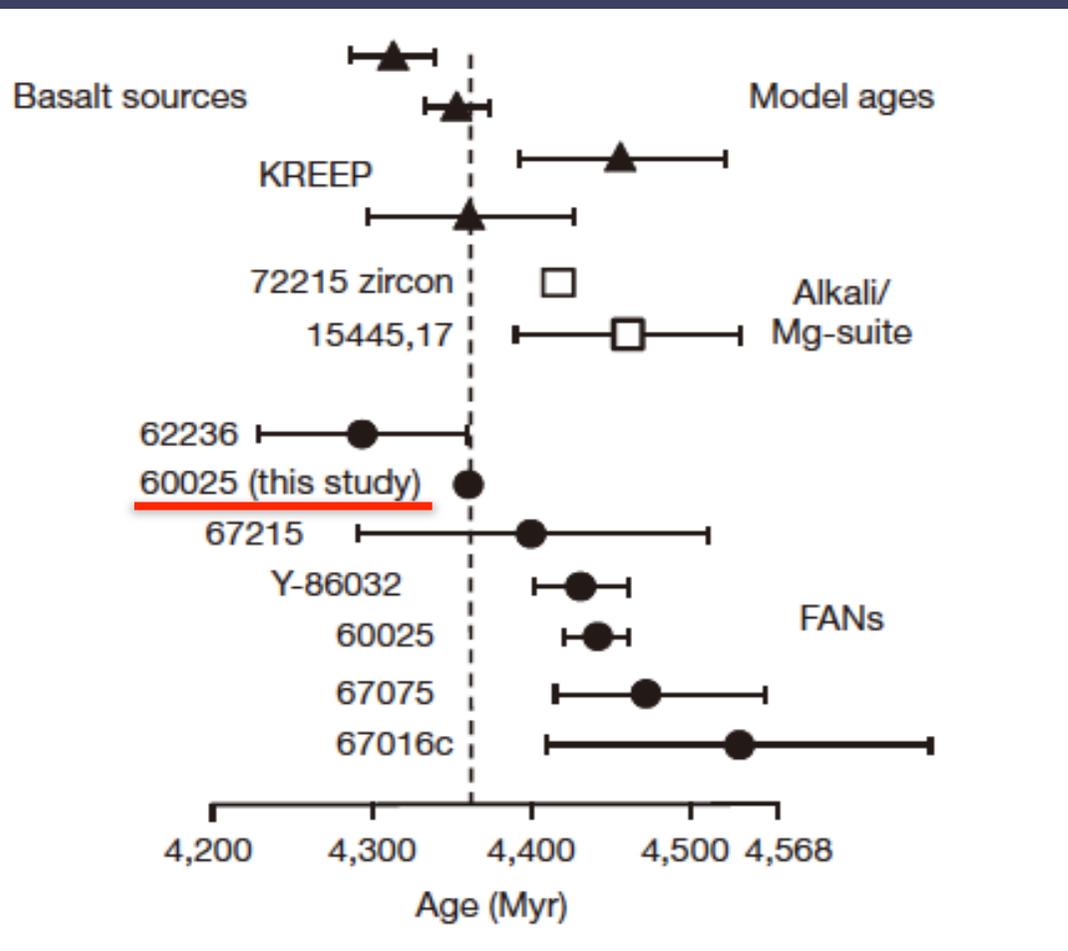
- マグマオーシャンの固化の数値シミュレーションから推定される値に比べて月高地試料の年代に幅がありすぎる

月試料の年代のコンパイル



(Elkins-Tanton, EPSL, 2011)

月マグマオーシャンの固化年代の謎 (2)



(Borg et al., Nature, 2011)

これまで“最も典型的な地殻”とされてきた月表側試料の年代が非常に若い（若すぎる）ことが報告された

→この試料（表の地殻）は
-初期でなく2次地殻か？
-マグマオーシャン自体無かった可能性も？

→裏側地殻の年代測定の意義。
表側地殻が裏よりも後に形成したと考えれば、2次地殻等複雑な事を考えなくてよい、のかもしれない？

今後の課題と解明に必要な情報

必要な情報

今後の課題

目指すべき惑星科学
の2大テーマ

太陽系力学進化の理解

巨大衝突仮説の検証

巨大惑星移動の検証

小天体の衝突破壊・軌道進化過程の復元

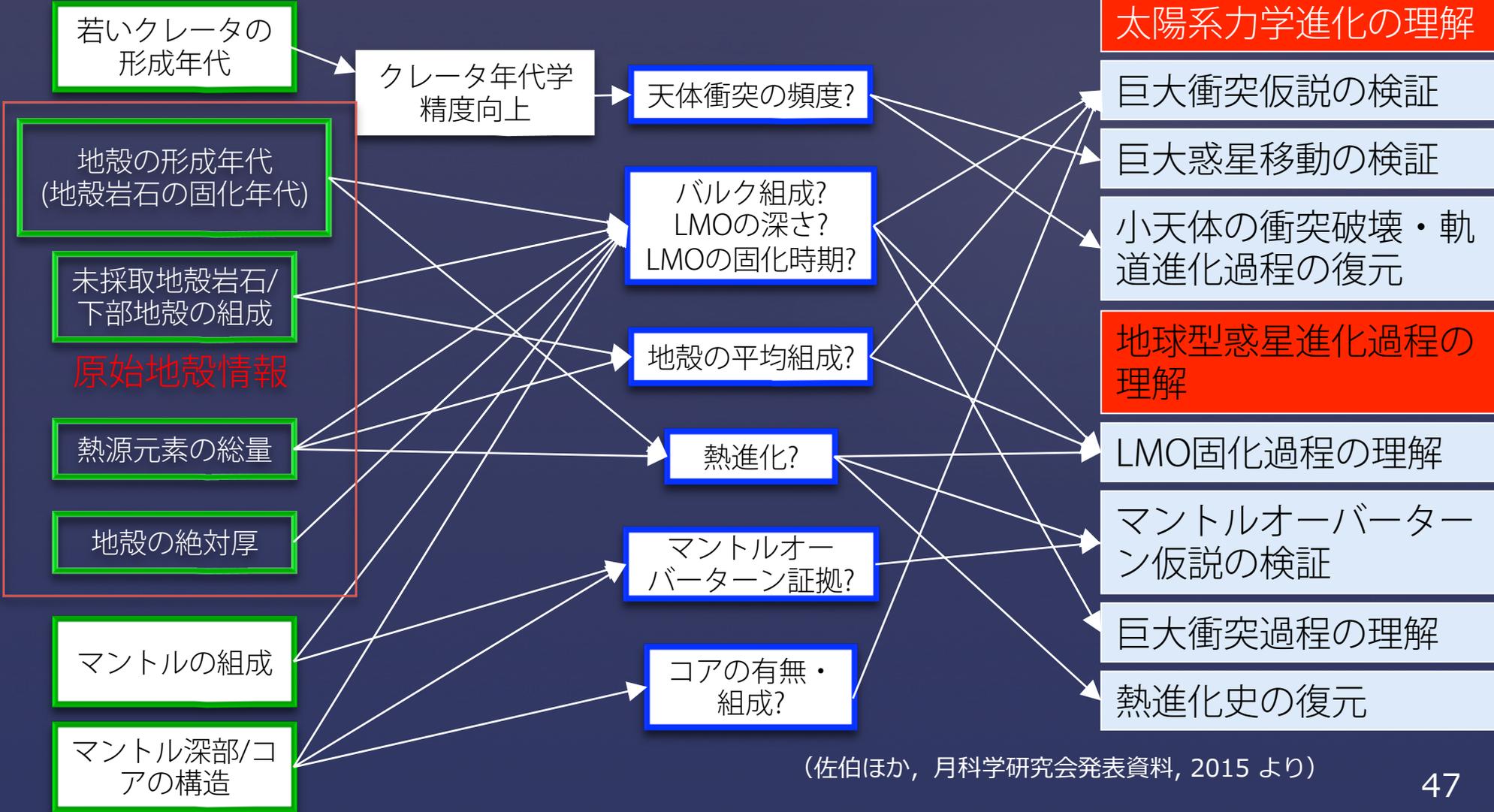
地球型惑星進化過程の理解

LMO固化過程の理解

マントルオーバーターン仮説の検証

巨大衝突過程の理解

熱進化史の復元



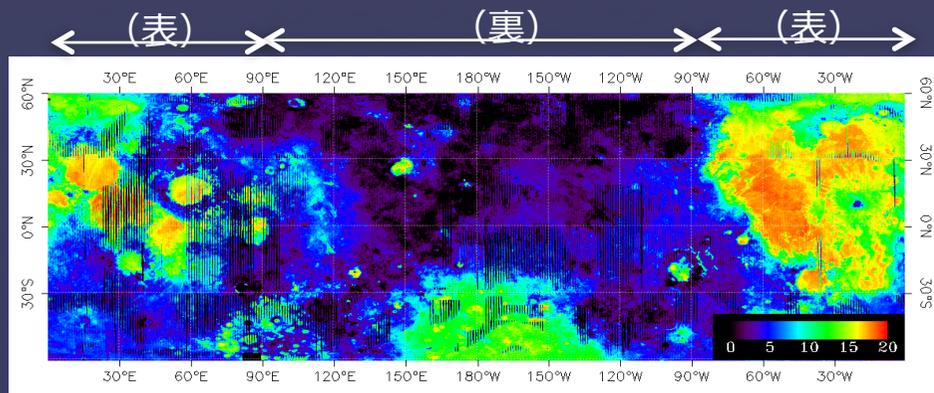
(佐伯ほか, 月科学研究会発表資料, 2015 より)

*地殻構造が決まらないと無理

4. 月科学以外の観点からの地質

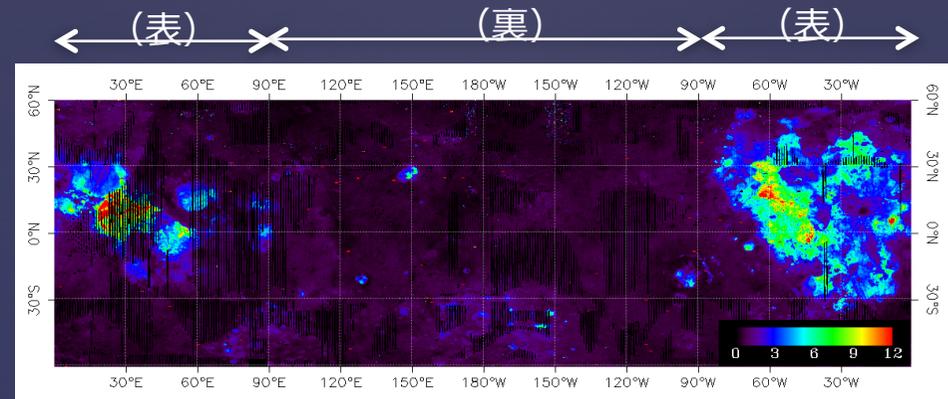
資源となり得る月物質の分布 (1/2)

「かぐや」によって得られた分布図



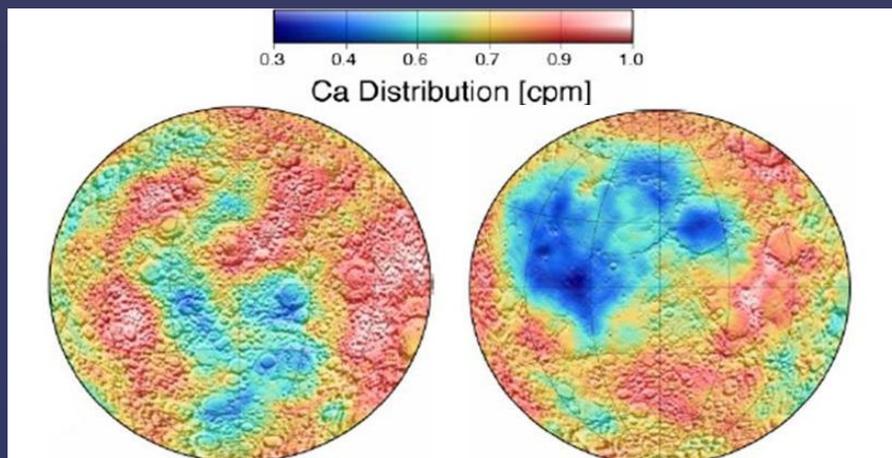
鉄

(Otake et al., 43rd LPSC, 2012)



チタン

(Otake et al., 43rd LPSC, 2012)

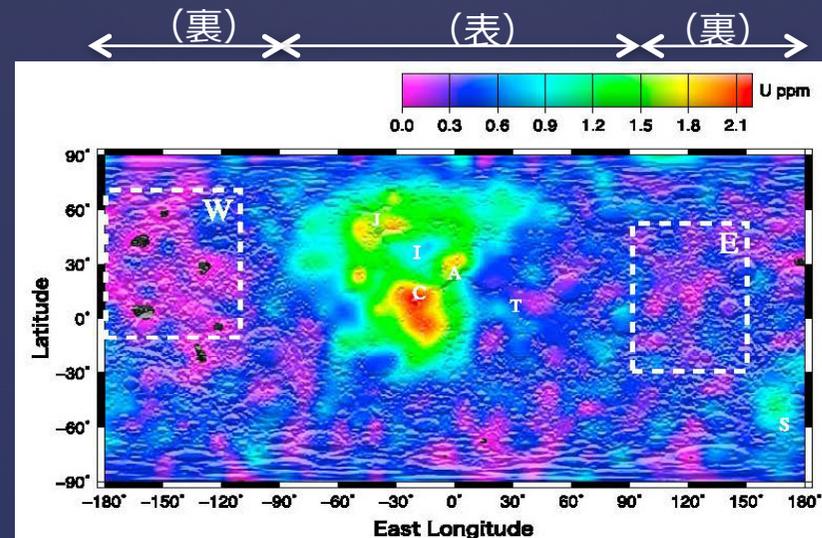


(裏)

カルシウム

(表)

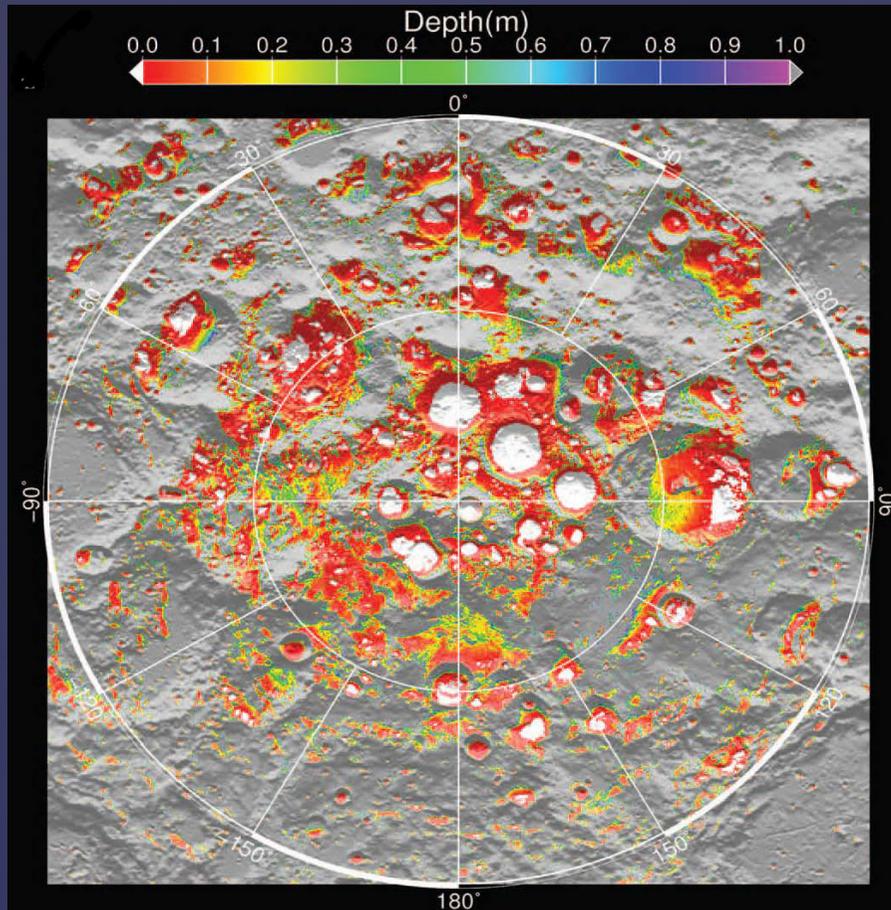
(Yamashita et al., EPSL, 2012)



ウラン

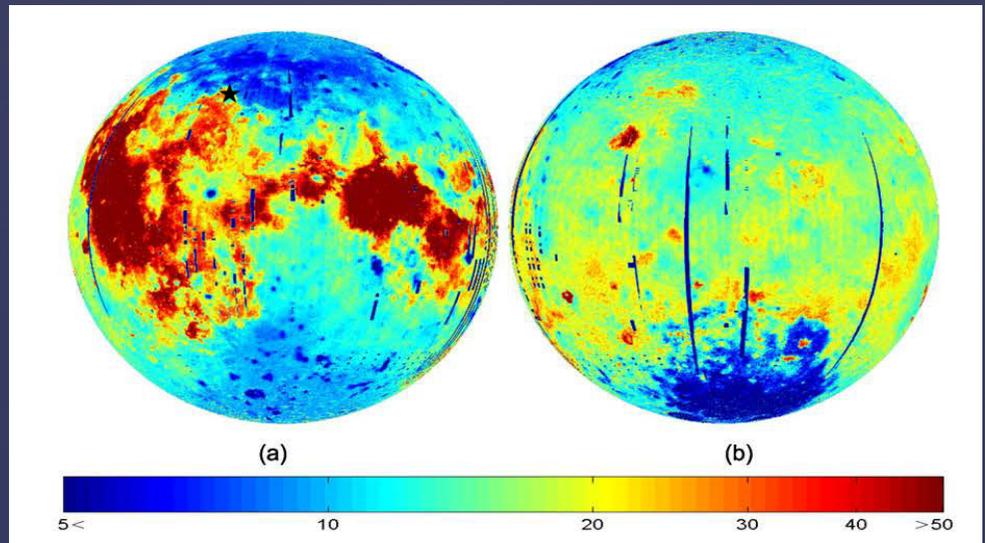
(Yamashita et al., GRL, 2010)

資源となり得る月物質の分布 (2/2)



南極域で氷が分布する深さ
(米国LRO衛星の観測データを用いたシミュレーション結果。外側の円が南緯80度)

(Paige et al., Science, 2010)



ヘリウム3の分布
(嫦娥1号等の観測データを用いたシミュレーション結果。地下レゴリス層も含む。月表側の★は嫦娥3号の着陸地点)

(Fa et al., Icarus, 2007)

月の資源を考える上での留意点

“資源”とは何か？

- 資源となり得る物質が分布していること、と資源が有る（資源として利用価値がある）こと、は全く別のこと
- 物質は、コストや輸送の手間など、さまざまな観点で利用する価値がある場合に初めて“資源”と言える
- 月の資源としてこれまで考えられているのは、地球に持ち帰って使うための資源ではなく、月面活動で使うための資源、や火星探査に持っていくための資源

月面環境利用

- 地球（電波・光源など）からの遮蔽
→月裏側への月面天文台建設
- 永久日照・永久影など条件（温度，日照等）の利用
→太陽電池による電力確保

ただし．．．月裏側や極域の地質については帰還試料がないことや，極域ではリモートセンシングによる観測が困難であるために不明な点も多い

おわり