



月周回衛星「かぐや」で得られた 成果と今後の月探査

宇宙航空研究開発機構(JAXA)

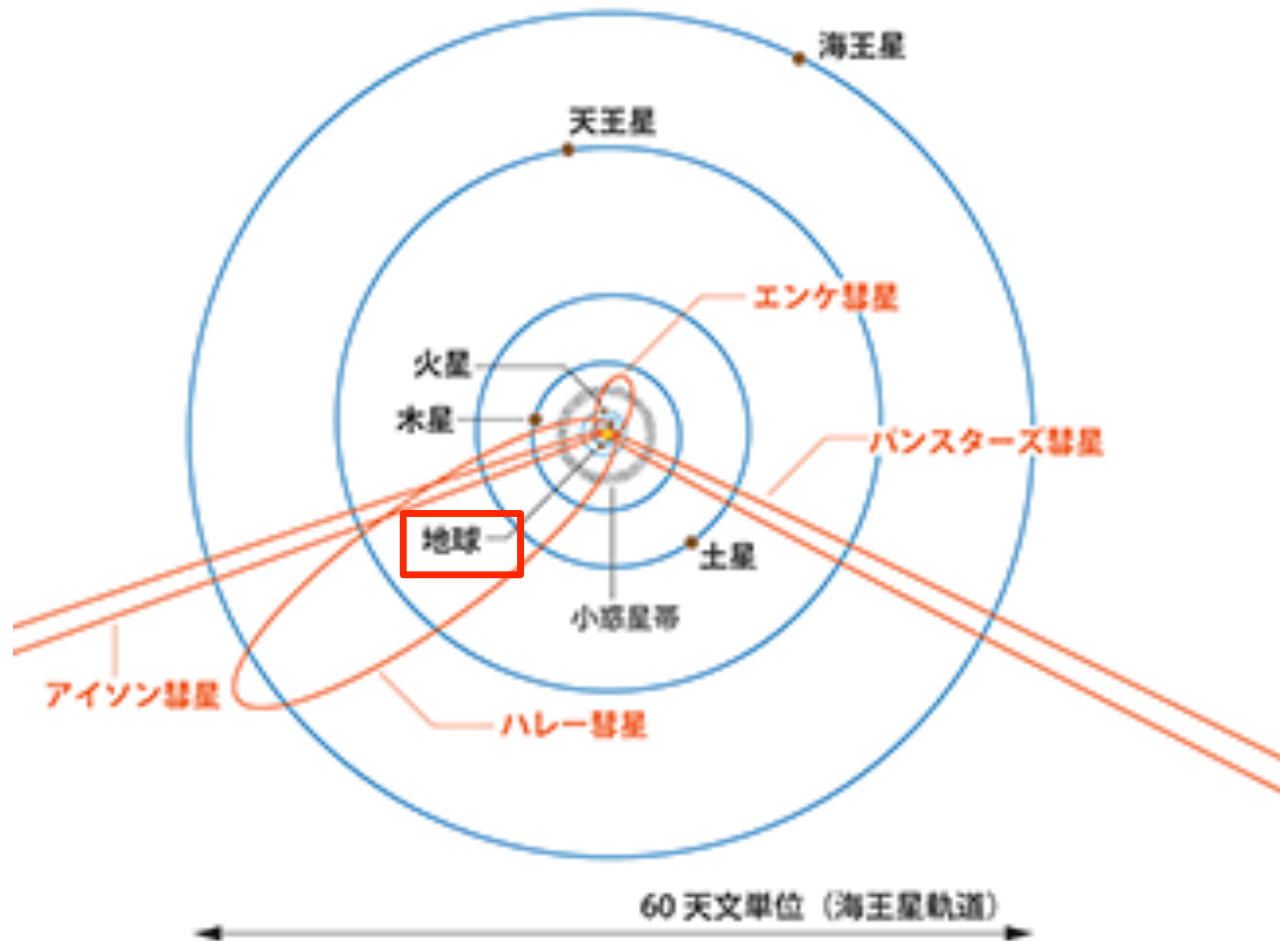
大竹真紀子(おおたけ まきこ)

本日の目次



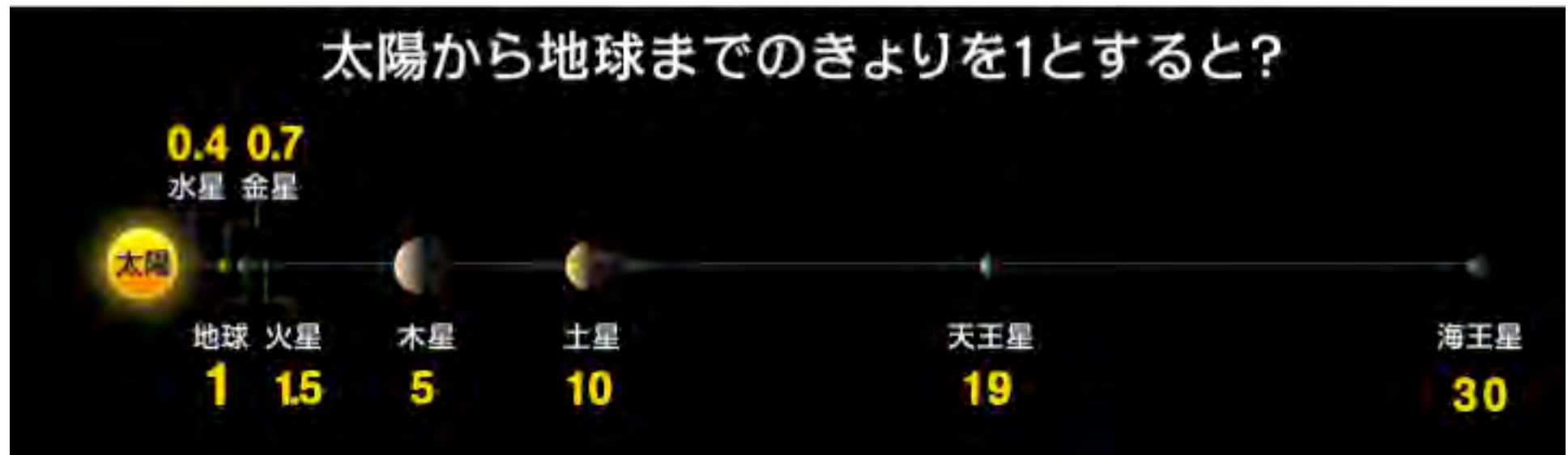
- ① 太陽系の構造と形成過程
- ② 地球と月の違いと形成過程
- ③ 月周回衛星「かぐや」による成果
- ④ 今後の月・惑星探査

① 太陽系の構造



太陽系天体の軌道概略図(国立天文台)

① 太陽系の構造

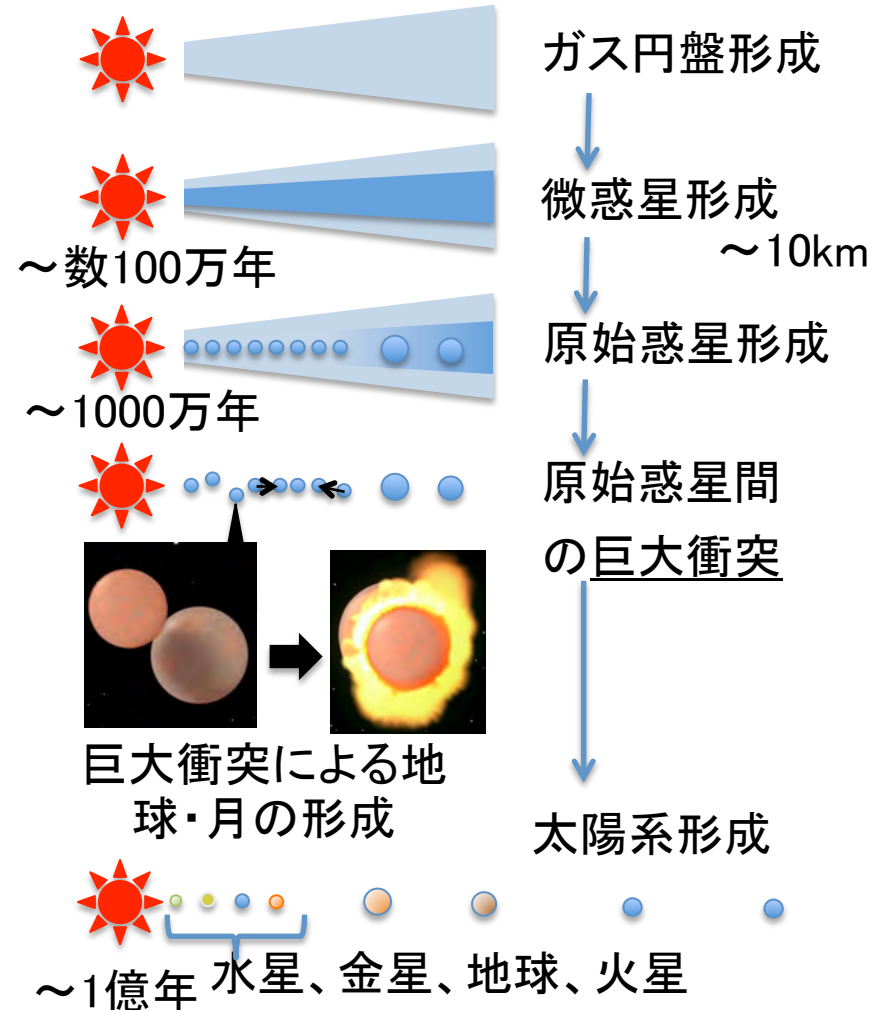


(<http://www.kids.isas.jaxa.jp/zukan/solarsystem/solarsystem01.html>)

① 太陽系の成り立ち



太陽系の形成モデル

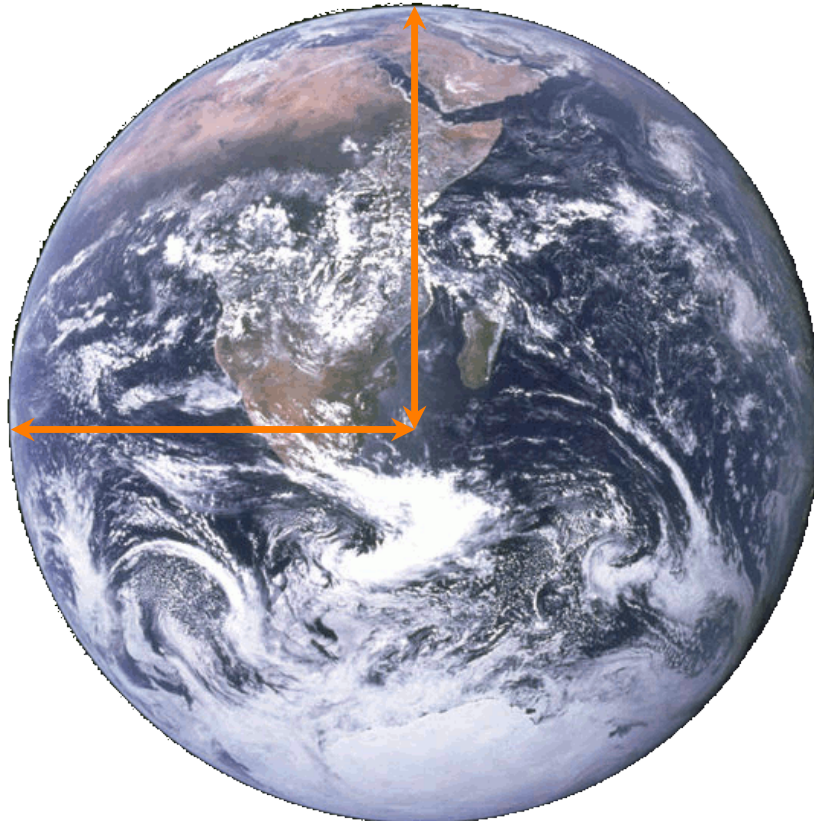


(岩波講座, 地球惑星科学1, 地球惑星科学入門から改定)

②地球と月の違い: 大きさ

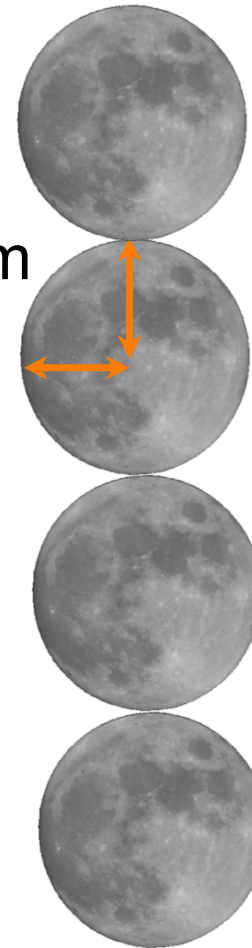


6400 km



地球

1740 km



月

②地球と月の違い: 大気と海

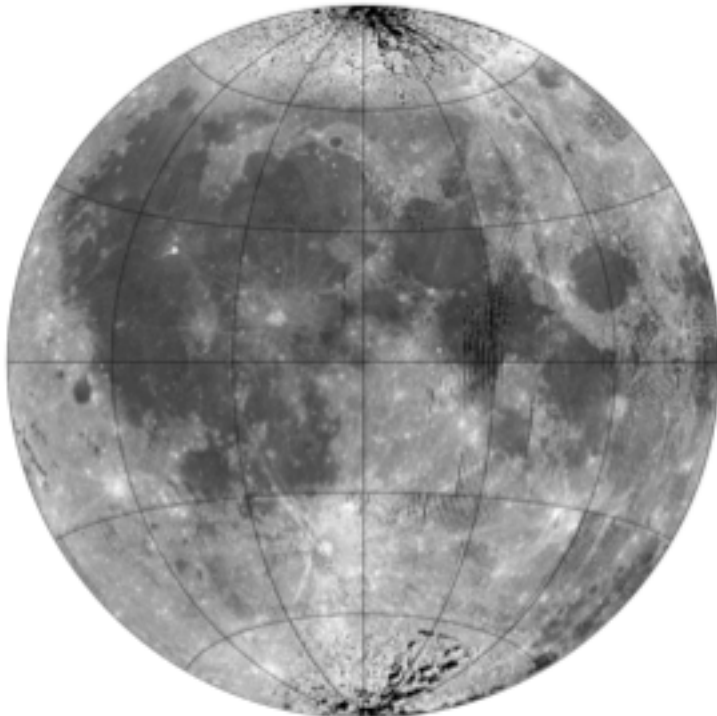


地球
大気・海あり

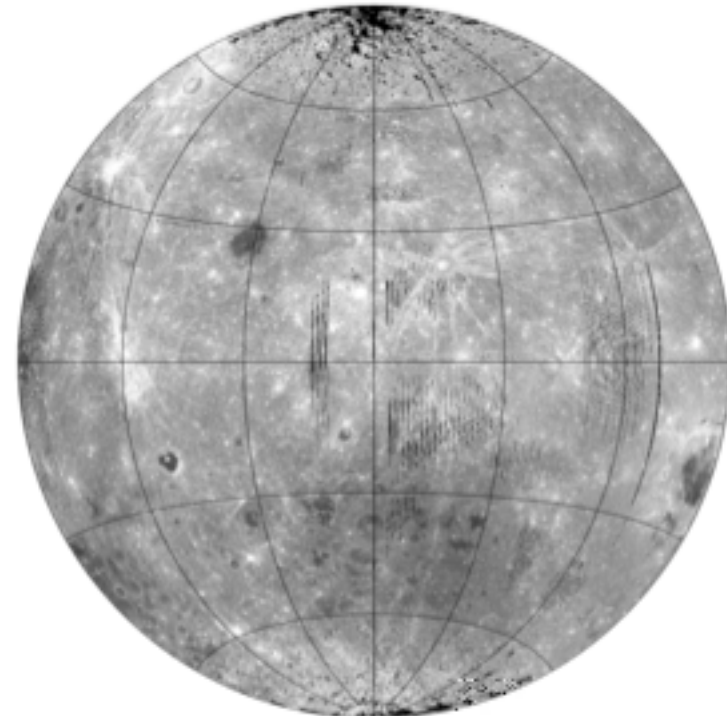


月
(地球のような)
大気・海なし

②地球と月の違い: 表面



月の表



月の裏

月の表面は暗い領域(うさぎの模様)と明るい領域から成り立っている

月面：暗い領域のできかた



火山の噴出で、
どろどろの熱いマグマ



Hawaii Pu`u`O`oの噴火
(アメリカ地質調査所)

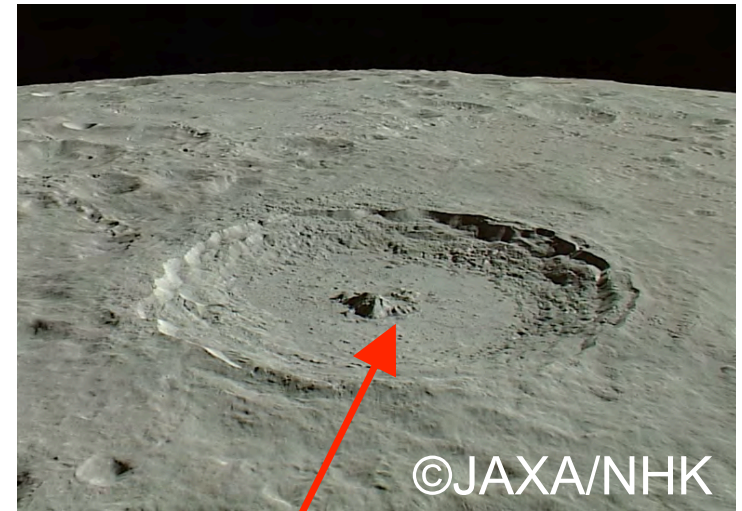
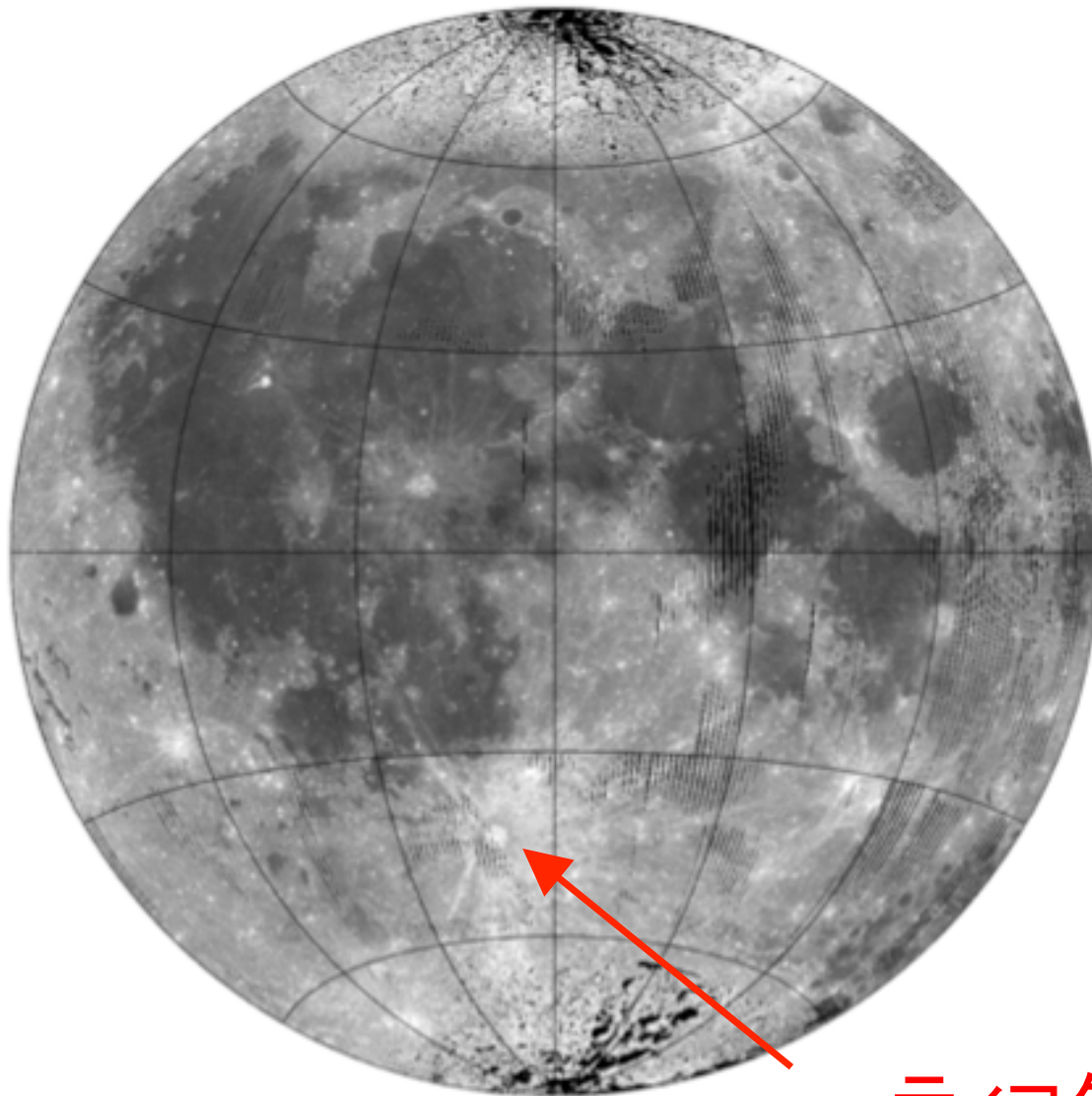
②地球と月の違い: 表面



- 月の表面には凹凸があり、丸い穴は、空から大きな天体が落ちて衝突してできたもので「クレータ」と呼ばれる



月のクレーターの例：ティコクレーター



ティコクレーター

地球にもクレーターがある！



- 有名なのはメキシコのチチュルブ隕石孔
約6550万年前にできたクレーターのあと
- この出来事で、恐竜が絶滅したのではない
かと考えられています



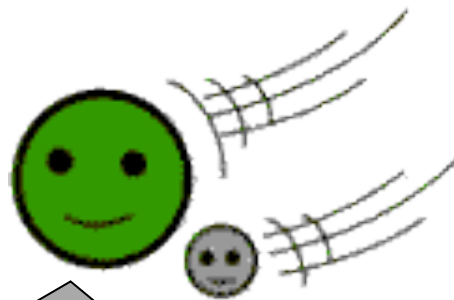
隕石衝突の証拠の分布
(Schulte他, Science, 2010)

②地球と月の形成過程

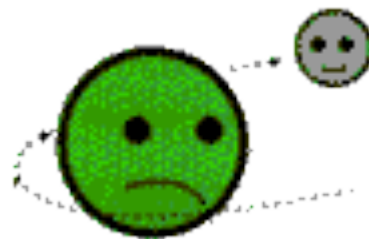


•地球は約46億年前に小さな岩とか石の固まりが合体をくりかえし、だんだん大きくなってできました。

→しかし、地球の周りをまわっている月がどうやってできたのか、月の形成過程はまだはっきりとわかっていません。これまで4つの説が考えられてきました。



①兄弟【ふたご】
地球と同じときに同じところで岩とか石が合体してできた。



②他人【つかまえた】
月が別のところからとんできて、地球につかまった。

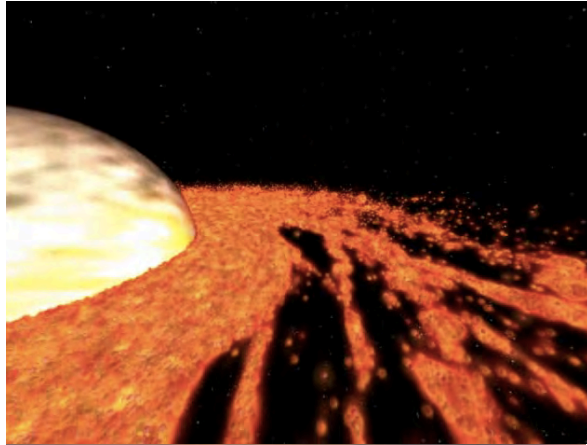


③親子【わかれた】
地球がはやいスピードでまわっていてちぎれてとびだしてできた。



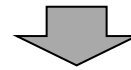
④巨大衝突【ぶつかった】
大きな石のかたまりが地球にぶつかってとびちった力ケラがあつまった。

巨大衝突説を確かめる



(シミュレーション: Robin. M. Canup, 武田隆顕 映像: 武田隆顕 写真: 国立天文台・天文情報センター)

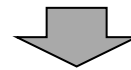
巨大衝突がおけると



衝突により“破片”ができ、
それが集まって円盤になる



円盤から破片が集まって月ができる
このとき月は非常に高温になる



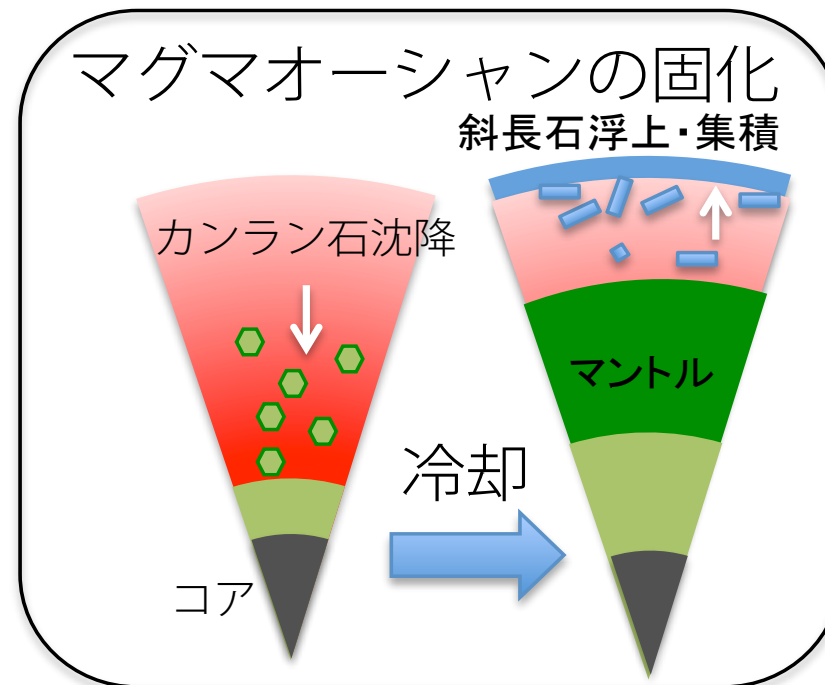
月の表面は誕生直後に
溶けていたはず。。

本当に月はとけていたのか？

月面：明るい領域の作り方



地殻：月形成の直後にマグマの海(マグマオーシャン)が冷えて固まり、最後に白い鉱物(斜長石)がマグマから浮き上がって地殻を作る



月探査の歴史

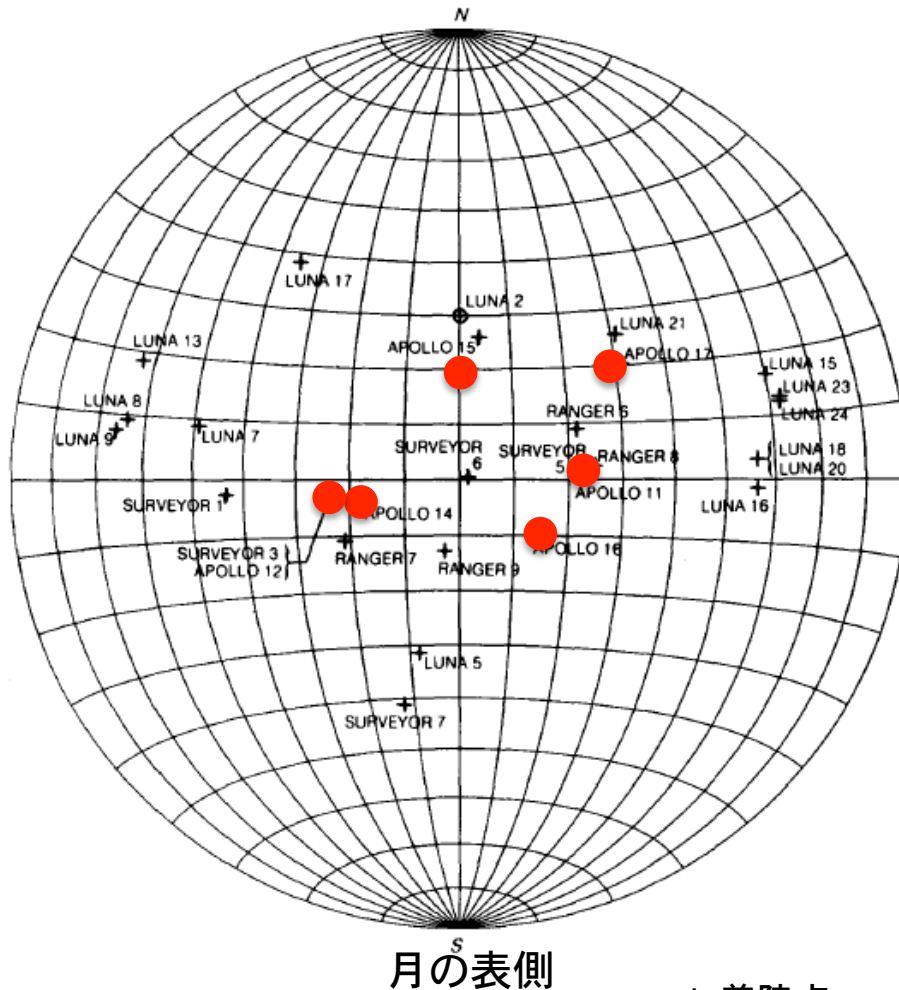


ミッション名	打ち上げ日	国名	探査手法	帰還試料重量(kg)	備考
ルナ2号	1959/9	旧ソ連	周回		月に命中、人類史上初めて他の天体に到達した人工物体
ルナ・オービタ5号	1967/8	アメリカ	周回		成功1～5号で月表面の99%を写真に納める
アポロ11号	1969/7	アメリカ	着陸	21.6	初の人類月着陸
アポロ12号	1969/11	アメリカ	着陸	34.3	
ルナ16号	1970/9	旧ソ連	着陸		豊かの海に着陸、遠隔操作で月の土壌を地球に持ち帰るのに成功
ルナ17号	1970/11	旧ソ連	着陸		8輪の無人月面車ルノホート1号を月面に降ろし、10km走る
アポロ14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」)

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



(Heiken et al., Lunar Source Book, 1991から改定)

+ 着陸点

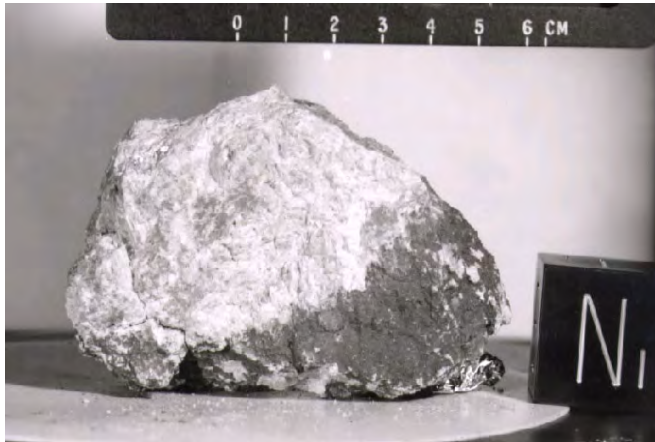
● アポロによる試料採取点

- 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



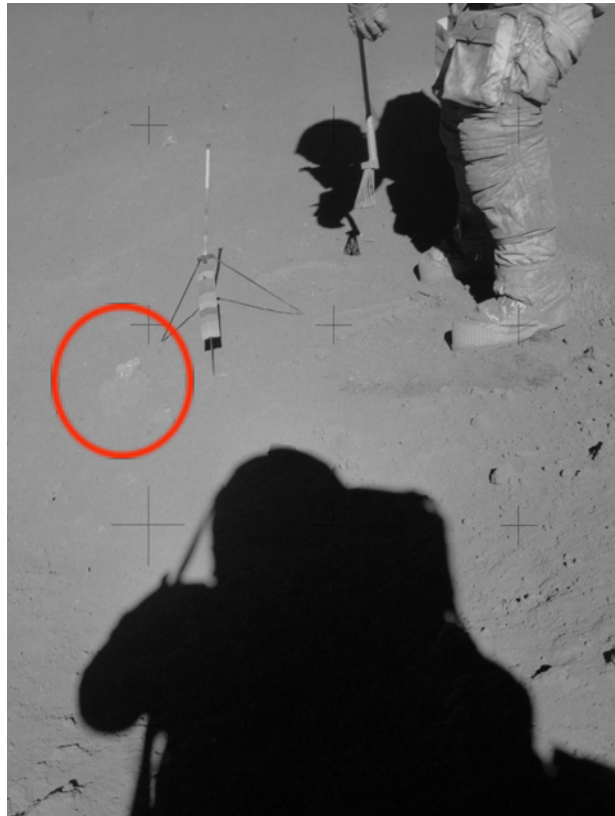
斜長岩 試料番号:15415

NASA# S71-44990



試料番号:15415 薄片写真
(画像の幅が3mmに相当)

NASA# S71-5263



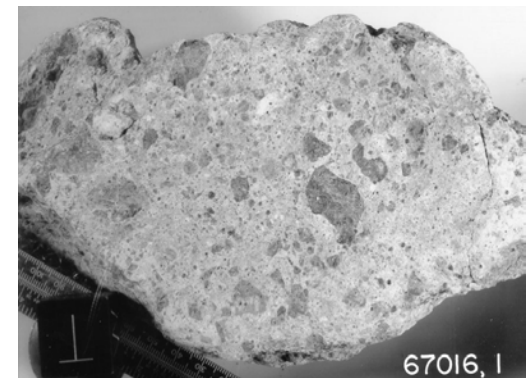
採取される前の15415

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.

③ 月周回衛星「かぐや」による成果

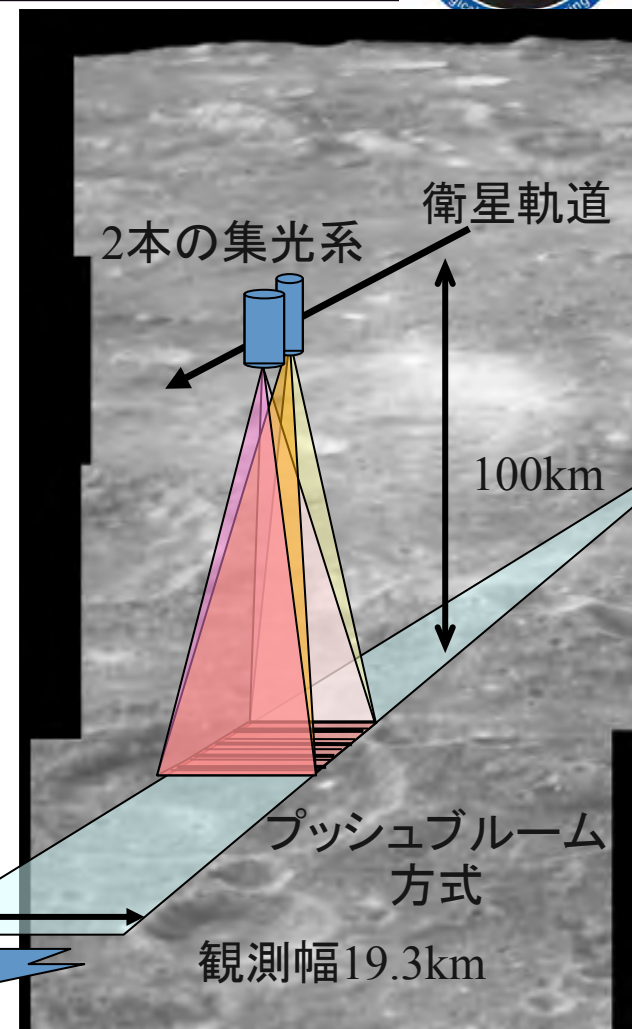
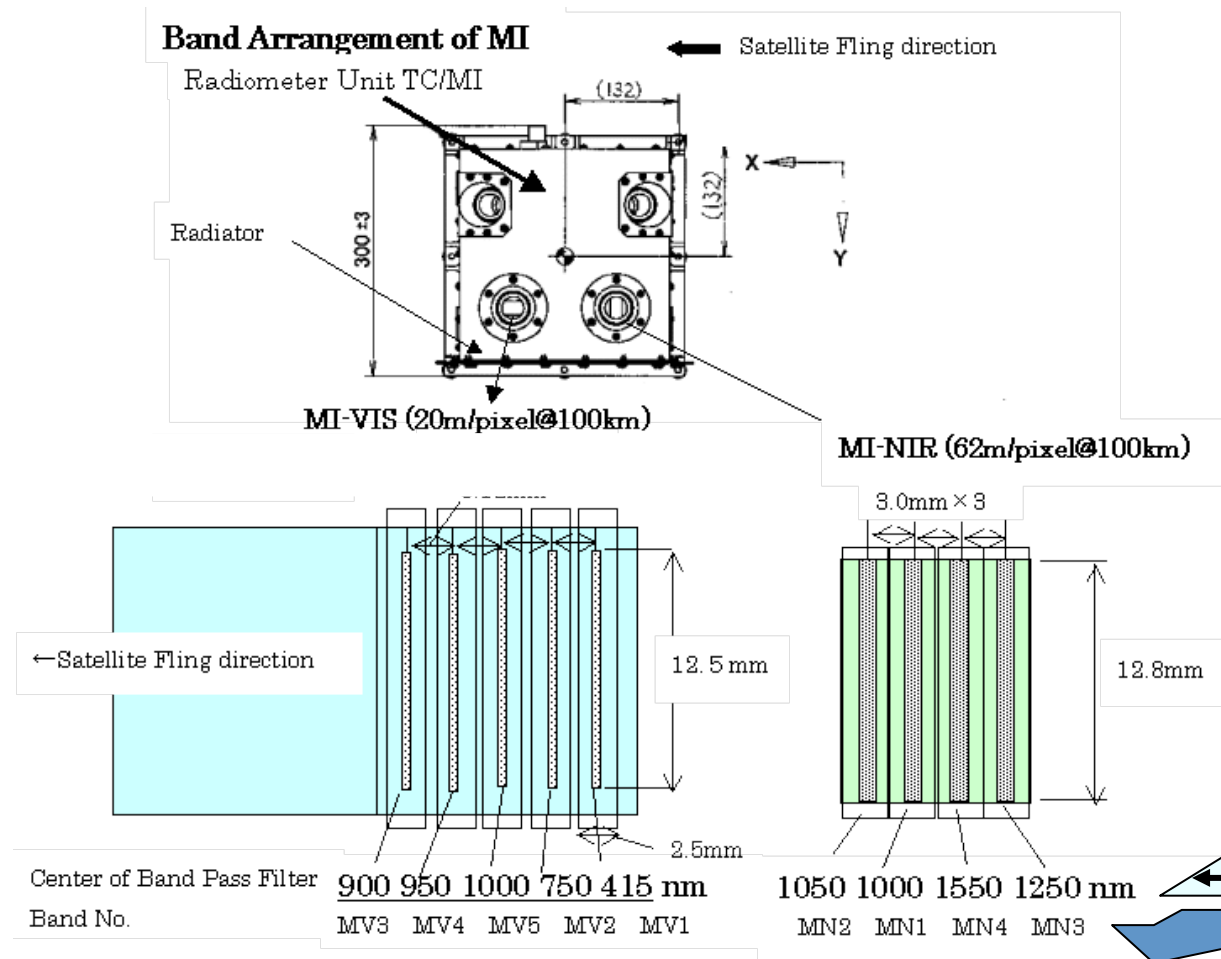


かぐや概要

- 衛星の構成：主衛星：かぐや 子衛星：おきな、おうな
- ミッションの期間：通常ミッション18ヶ月
- 軌道：高度100 km極円軌道（月の南北方向に周回）
- 重量：合計 3020 kg（燃料含む）
観測機器（14機器）：約300 kg
- 2007. 9. 14に種子島より打ち上げ、2009. 6に月にかえる。。
- 月の全球観測
化学組成、3次元地形情報、重力場、磁場、月環境の観測
- 将来の月探査に向けた技術の開発
月軌道への投入、軌道修正、地上との通信
- 社会的な貢献ハイビジョンテレビによる地球の出/入り、月表面の放映、



マルチバンドイメージャ(MI)のデザイン



観測波長=可視域: 415, 750, 900, 950, 1000 nm

近赤外域: 1000, 1050, 1250, 1550 nm

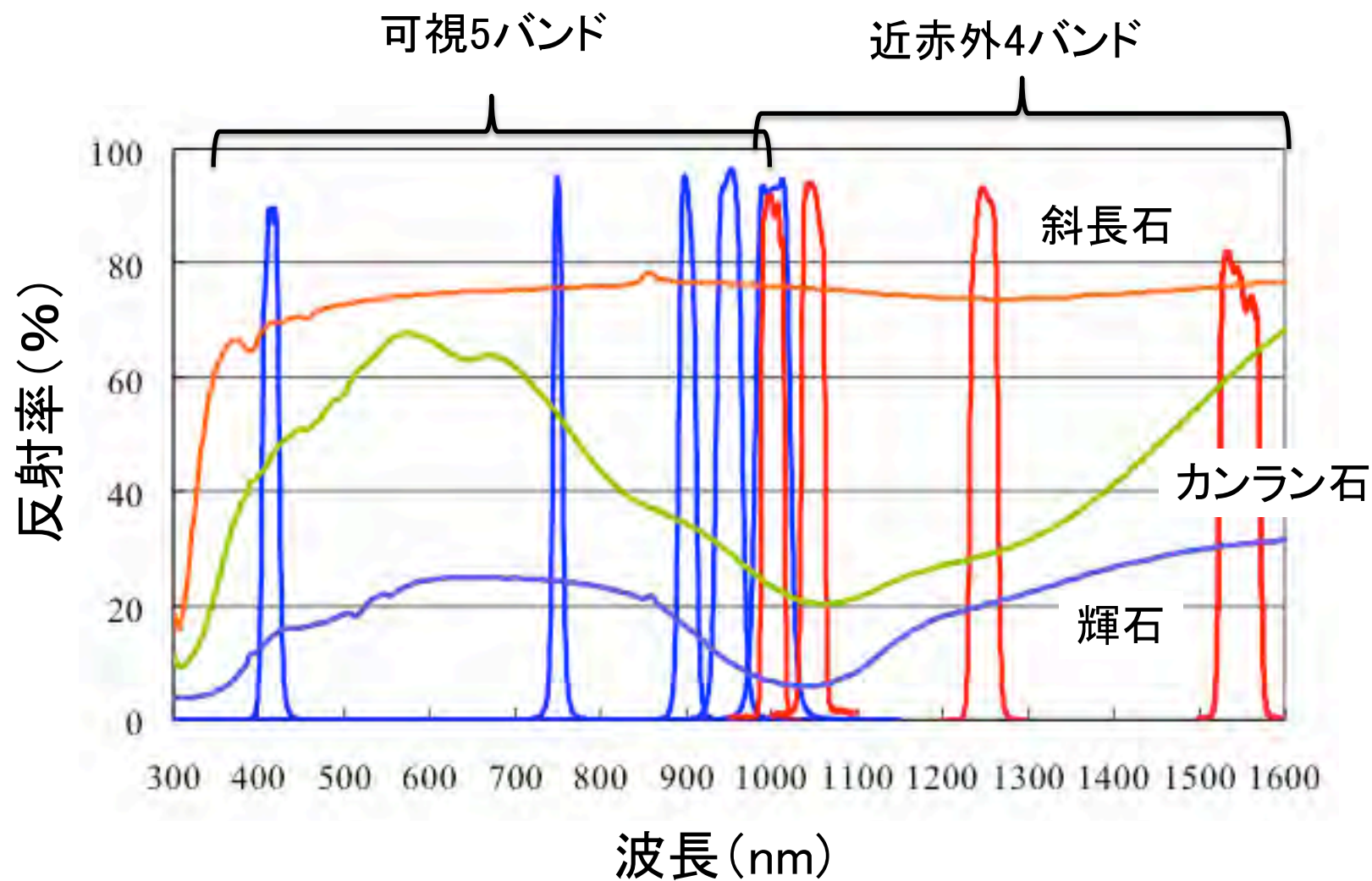
空間分解能= VIS: 20m, NIR: 62m

DPCM (loss-less) 圧縮

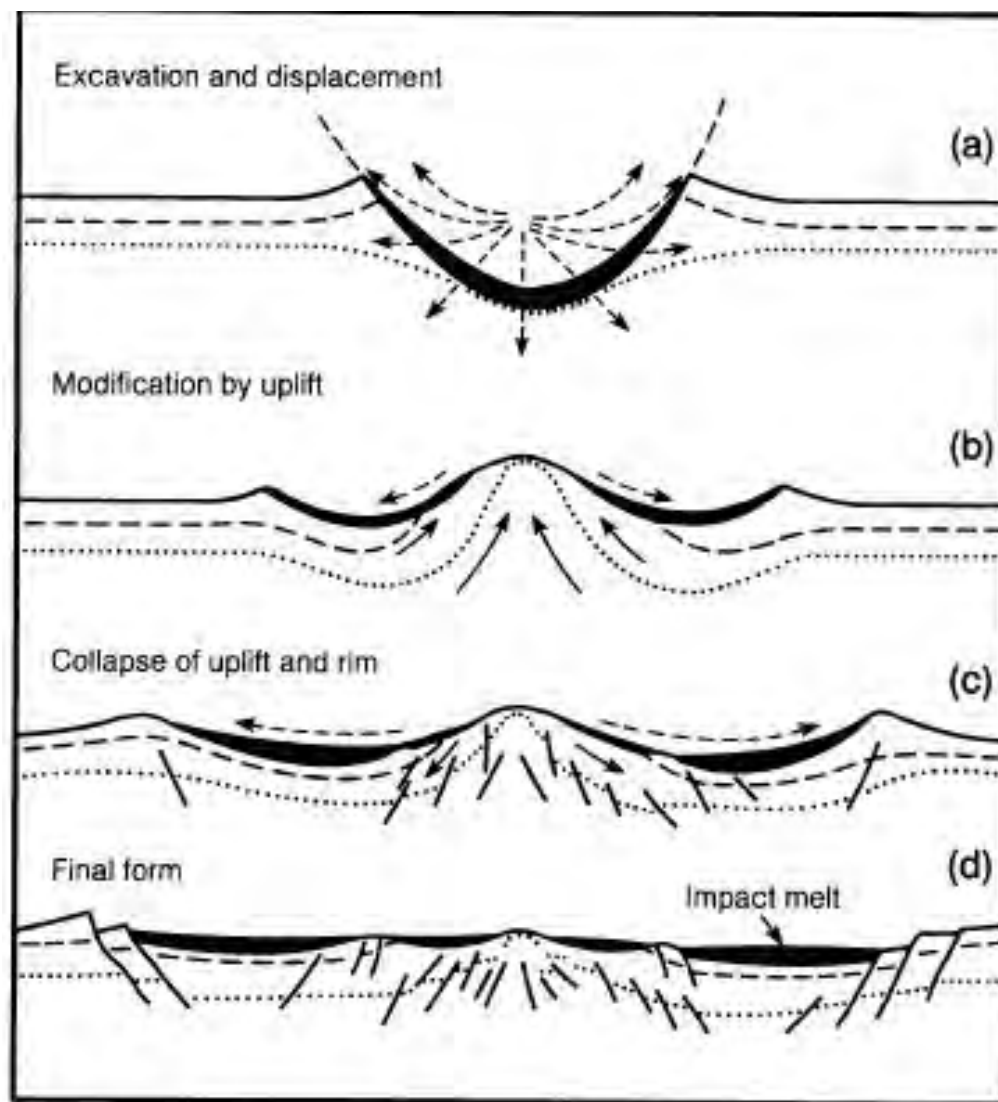
かぐやが月へ行くまでの道のり



MI 観測波長と月鉱物の反射スペクトル



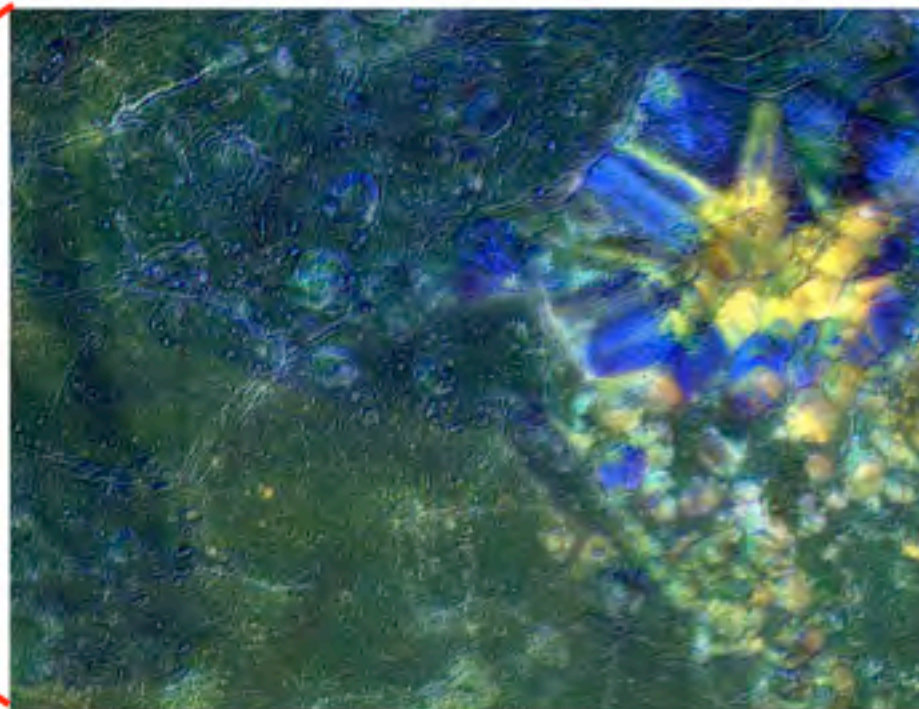
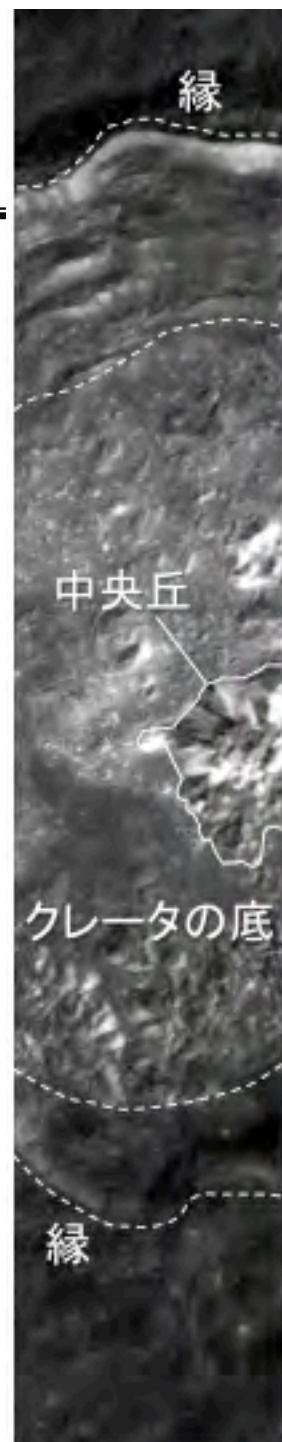
クレータの中央丘を調査する



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

かぐやの成果①

青い石はこれまでに知られていなかった特殊な岩石（純粋な斜長岩）！

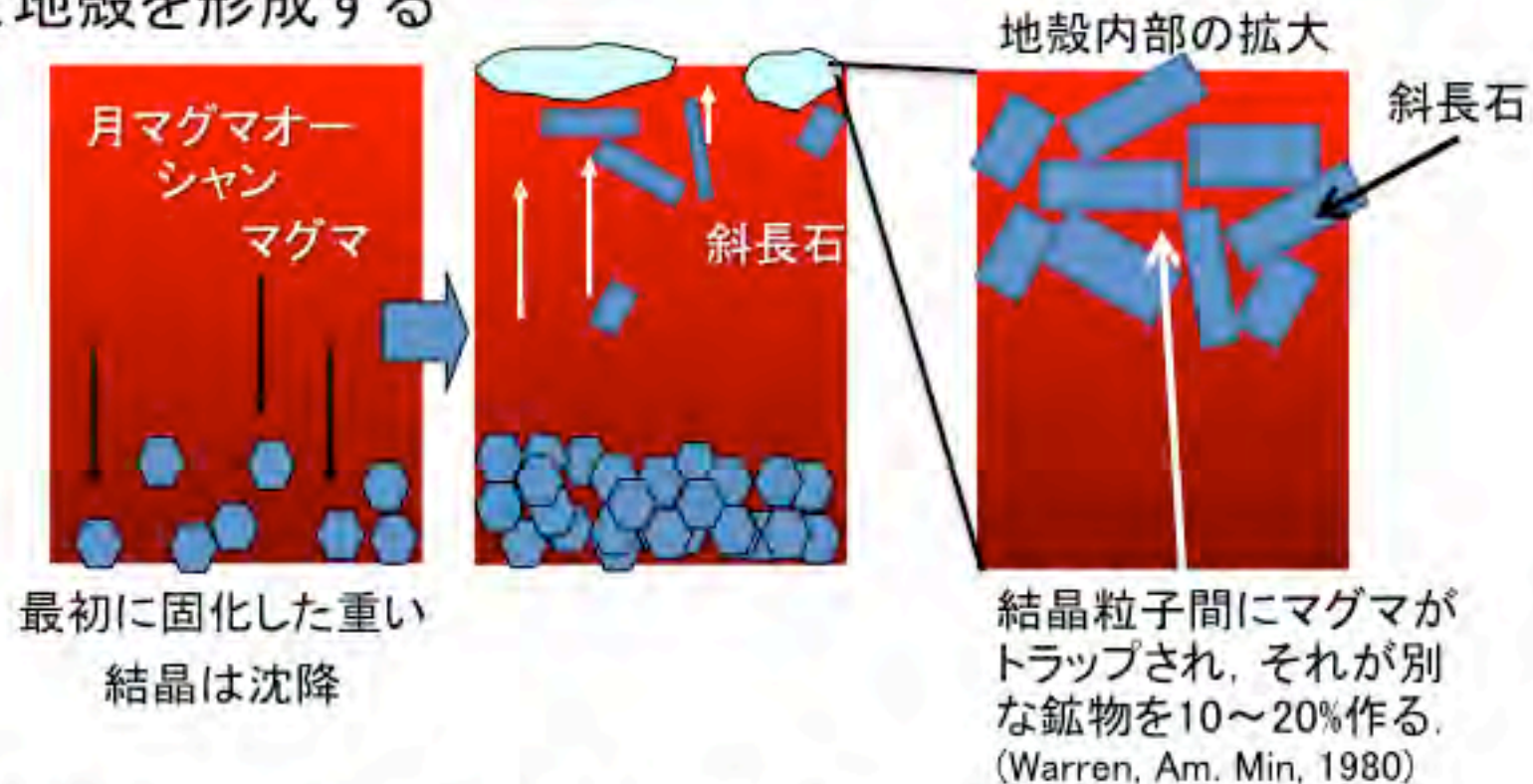


なぜ純粋な斜長岩が面白いのか？



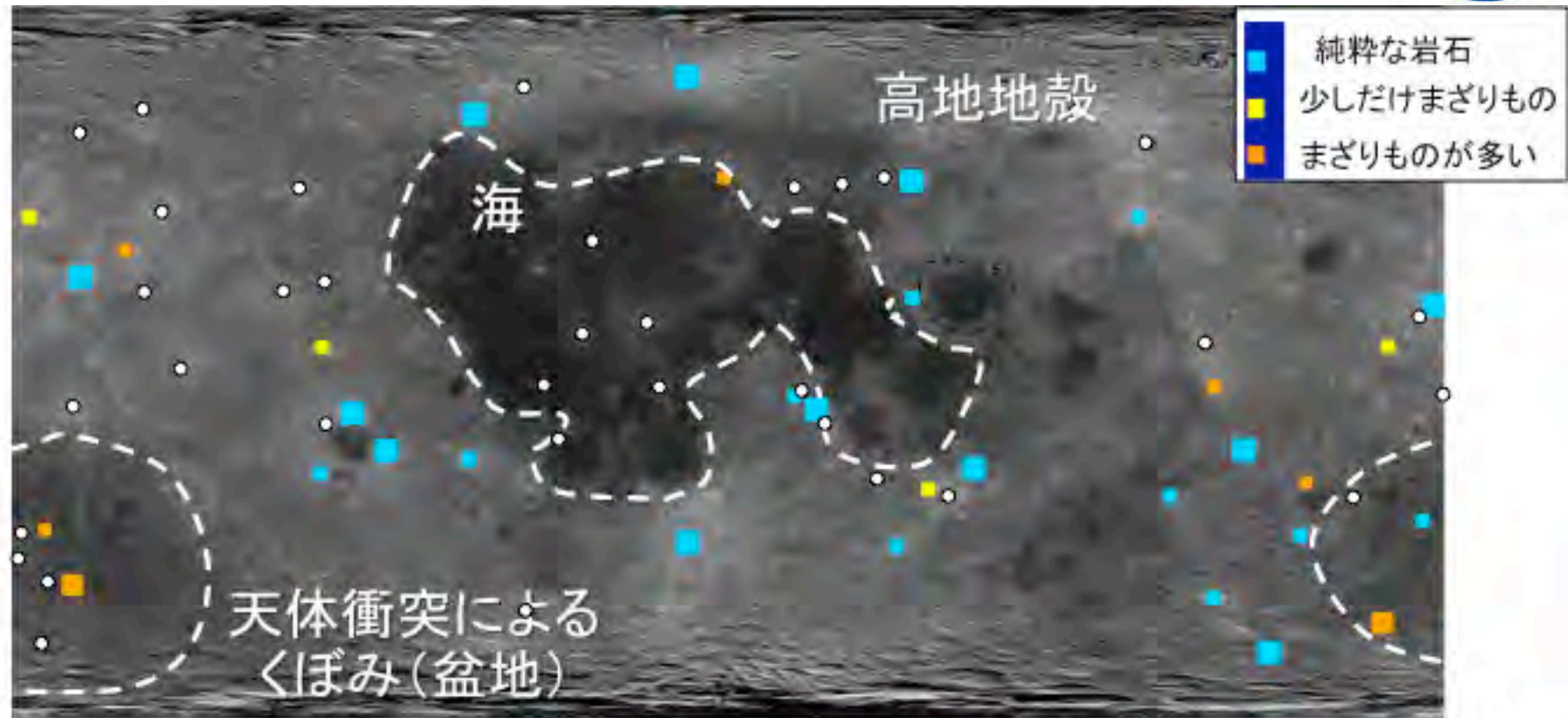
従来の地殻形成モデル(概念図)

斜長石が結晶化するとマグマより軽いため浮上、集積して地殻を形成する



⇒結晶粒子間にトラップされるマグマを抜くことは簡単でなく、ほぼ100%に近い純粋な斜長岩を大量に作るのは困難

月全球を調べた結果

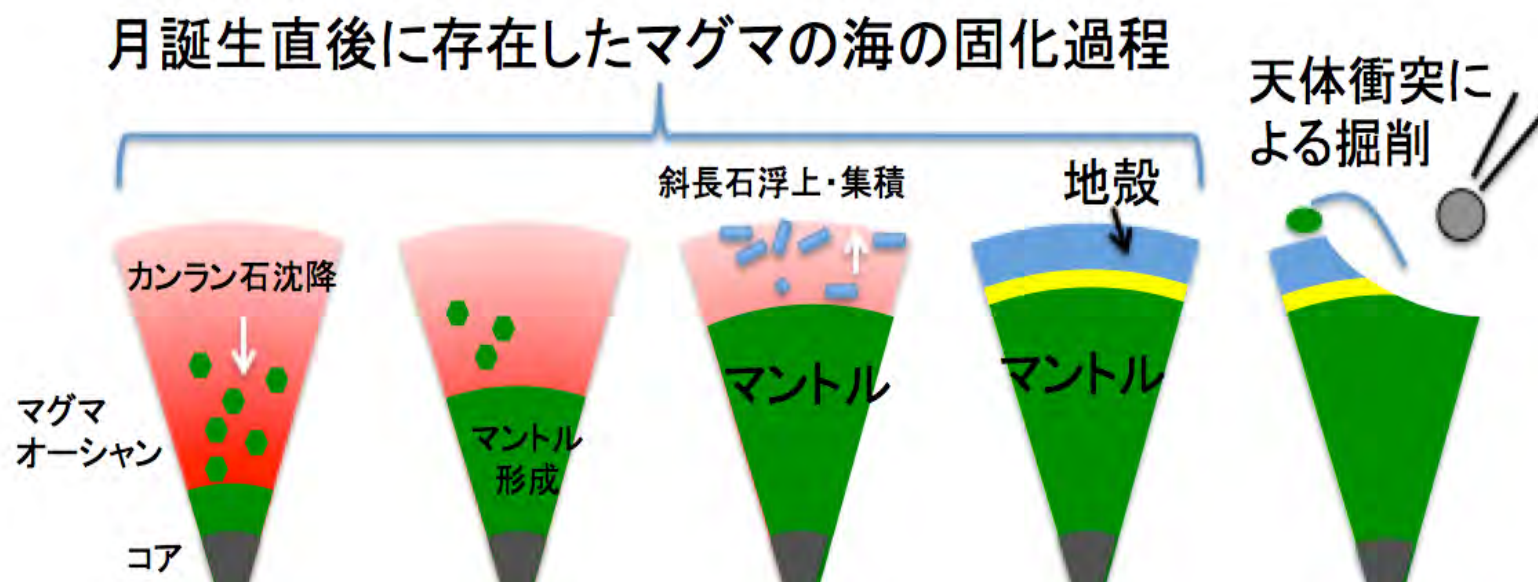


従来月試料からの推定値(80-90%斜長石)に比べて格段に斜長石(ほぼ100%)の多い、**純粋な斜長岩が全球に分布** (Ohtake他,Nature, 2009)



- 月の表面が昔溶けていた(マグマオーシャン)の証拠
- 地殻形成過程の理解必要

斜長岩の形成とマグマオーシャン

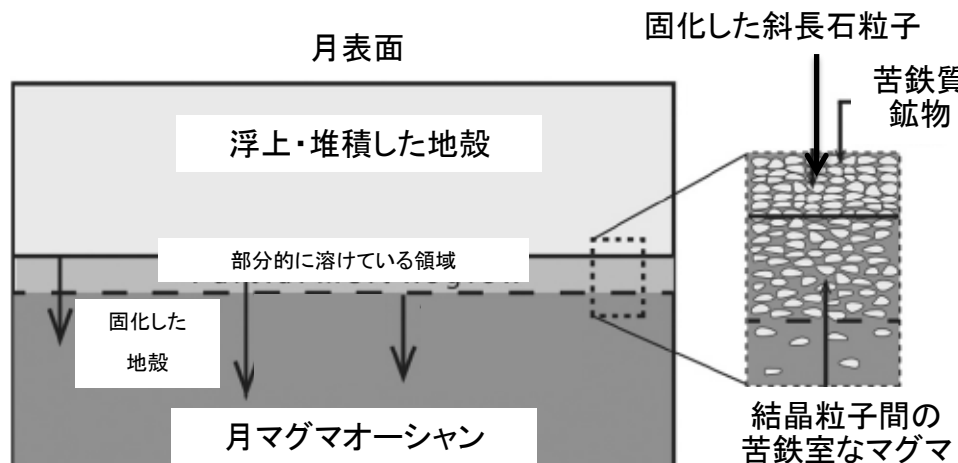


青い色の岩石(純粋な斜長岩)が月全球に普遍的に存在



月の表面が溶けていなければ(マグマオーシャンが無ければ)このような岩石は作れない！

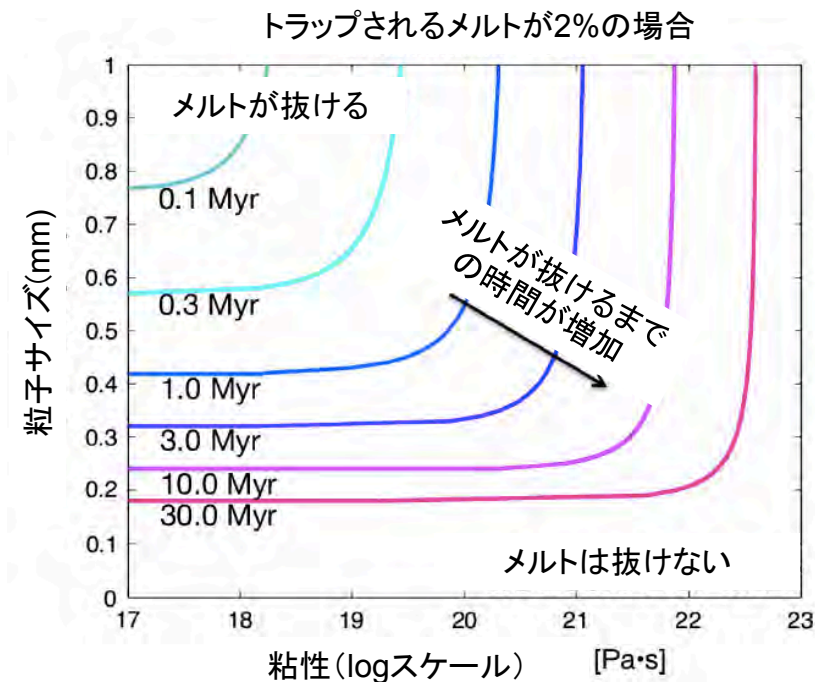
純粋な斜長岩のできかた



マグマオーシャンからの斜長石の浮上をモデル化し、シミュレーションすると、ある程度広い物理条件においてマグマが効率的に抜けることで純粋な斜長岩ができ、これが観測事実ともよく合致。

(Piskorz & Stevenson, Icarus, 2014から改定)

純粋な斜長岩ができる結晶の
粒子サイズやマグマの粘性



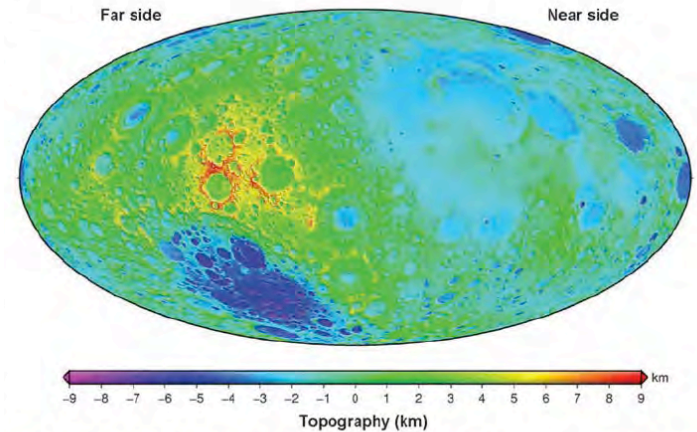
かぐやの成果②月の二分性



裏側

表側

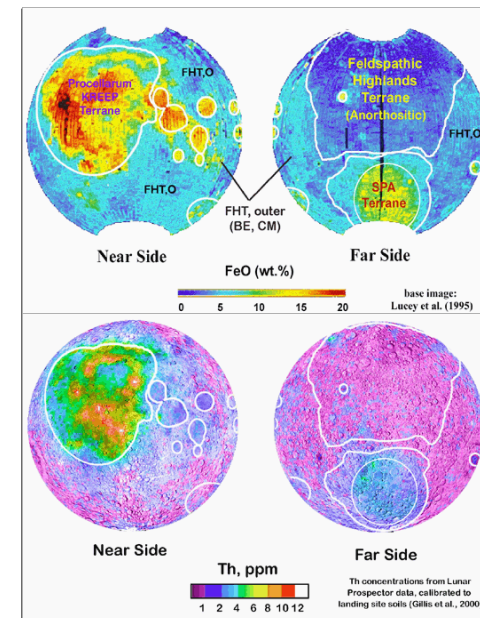
裏側



(Araki他, Science, 2009)

これまでの観測では月の表裏の二分性の成因がマグマオーシャンと関係するのかどうか解らない

→地殻がどこから先に固まったのかを調べて二分性の成因を知る



(Jollif他, JGR, 2000)

地殻はどこから固まったのか？



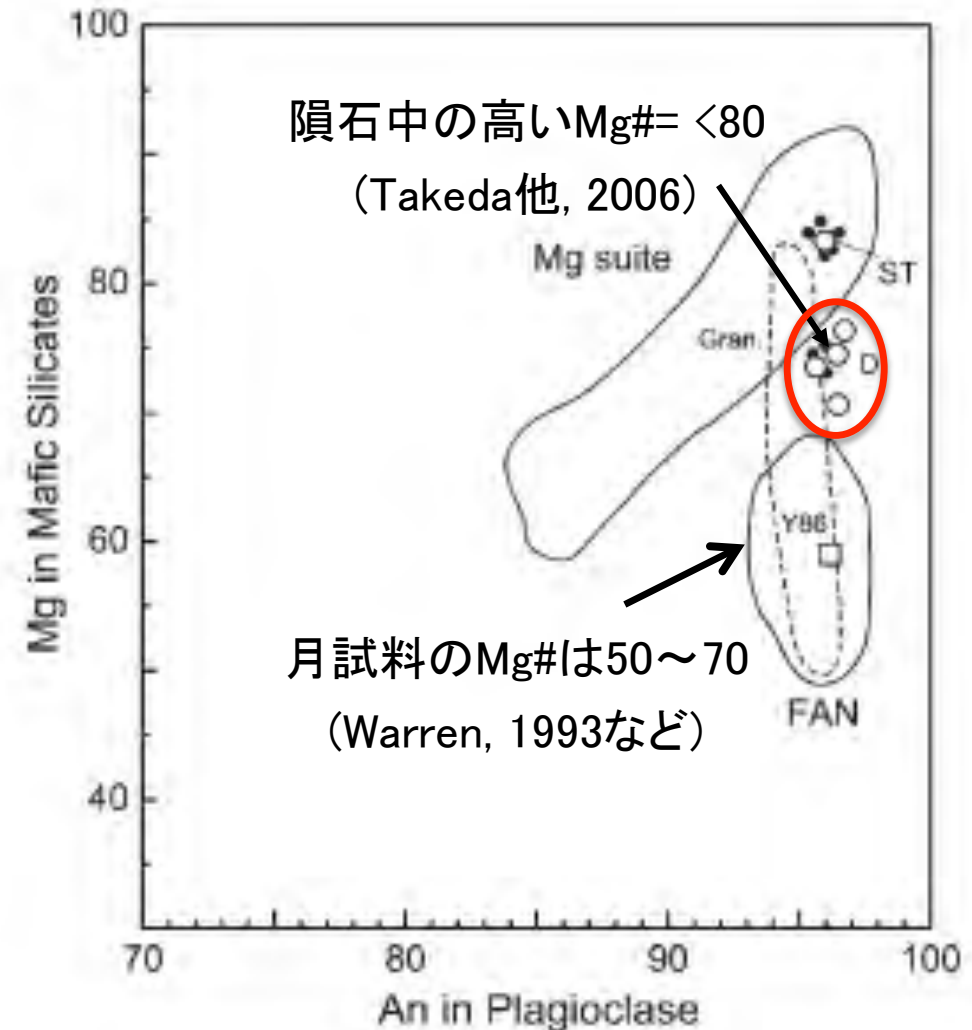
$Mg\# = Mg / (Fe + Mg)$ (モル%)

マグマの分化過程を反映

=どこが先に固まったのか

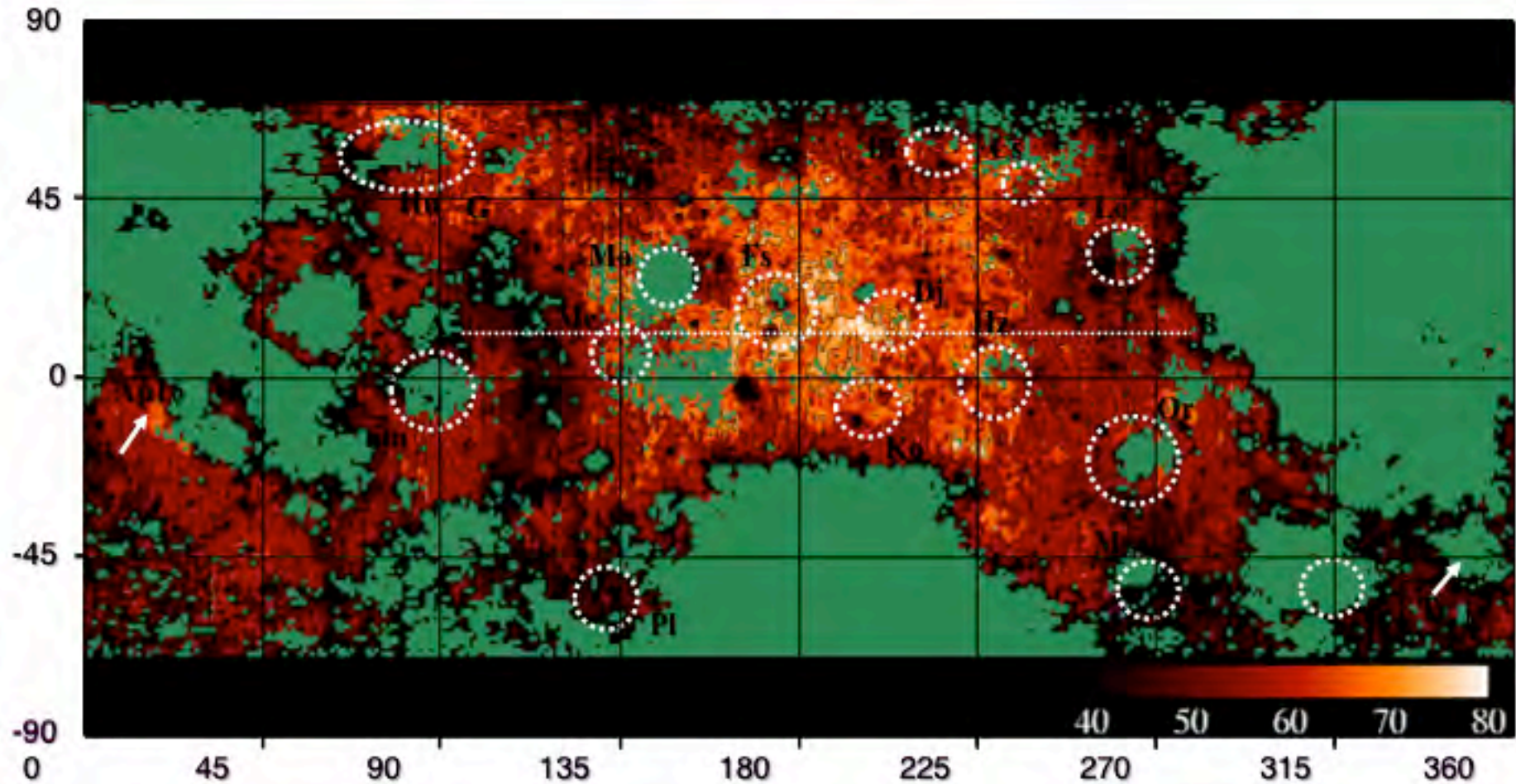
月の高地物質は、アポロ試料の分析値から低いMg#が言われていた。ただし、アポロ試料は表側ごく限られた領域からしか採取されていない。

よって本研究では、月全球の高地地殻物質のMg#推定とその分布を調べる



(Warren, Am Min., 1993から改定)

苦鉄質鉱物のMg#マップ



(Ohtake他, NatGeosci., 2012から改定)

- ・表と裏で異なるMg#
- ・裏側でMg#が最大(～80)

表と裏のMg#比較

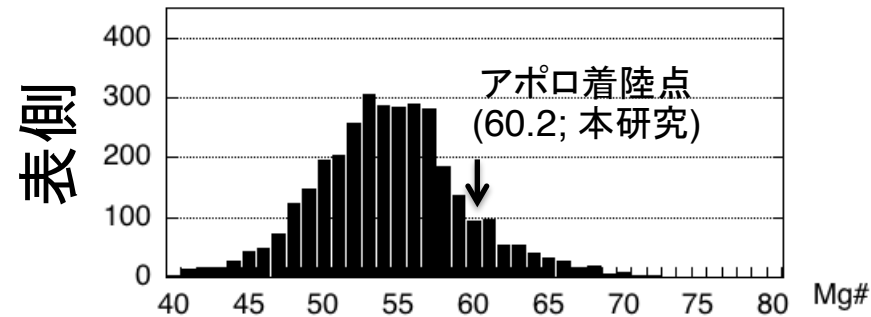
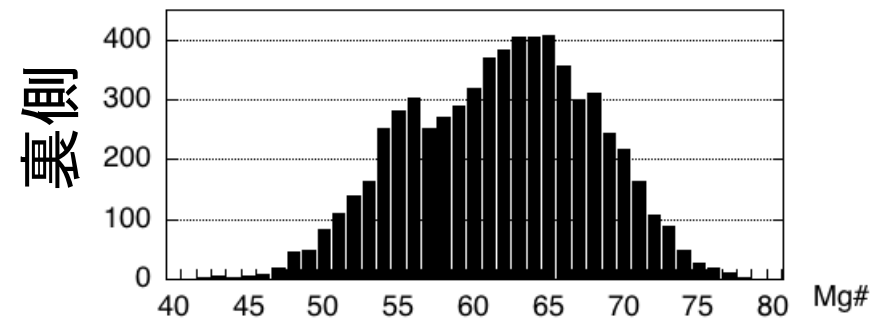
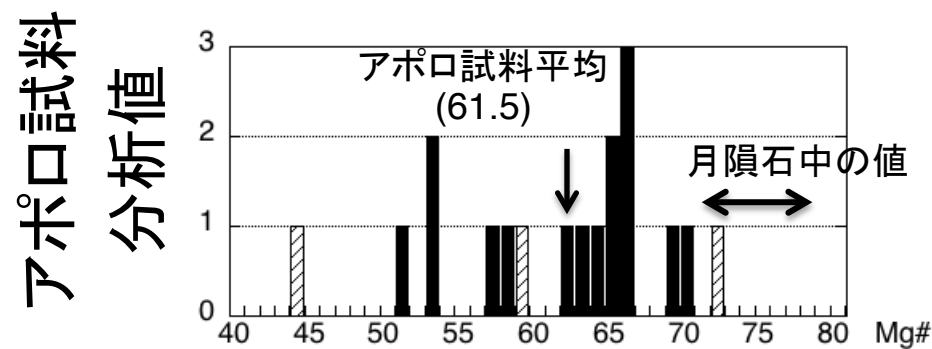


表: 30~70
平均 54.9



裏: 40~80
平均 62.2



(Ohtake他, NatGeosci.,
2012から改定)

裏に高いMg#がある原因



- ~~溶岩流がまざった？~~
溶岩流のMg#は低いため説明がつかない
- ~~深部(マントル)物質がまざった？~~
苦鉄質鉱物量が少ないので考えづらい
- ~~外来性の裏物質？~~
Mg#連続性から、都合のよい値説明は困難
- ~~地殻形成後に変質してしまった？~~
全球規模でのMg#の傾向を説明困難
- マグマオーシャンの
固化過程に関係？

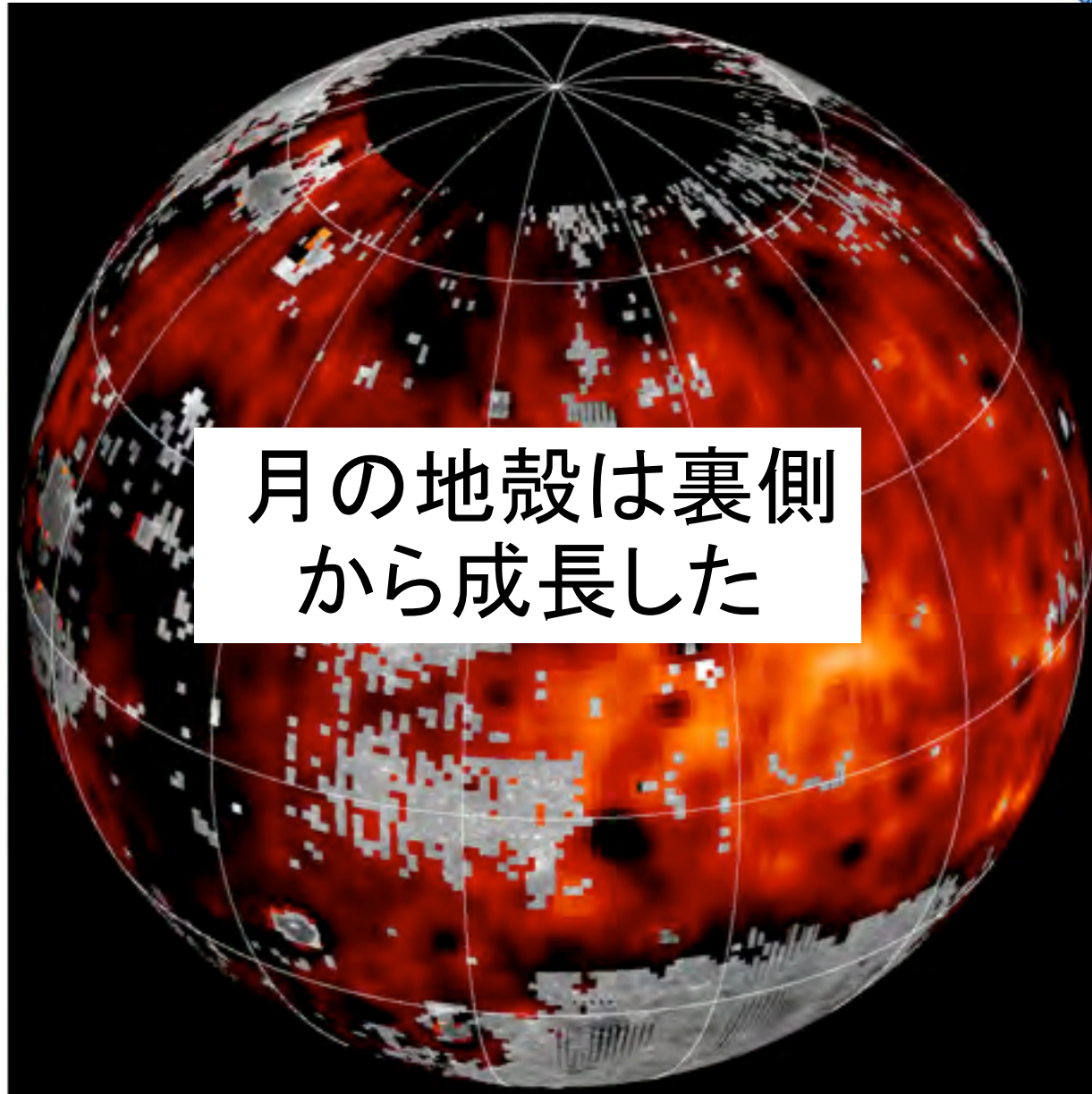
二分性の研究：マグマオーシャンのあと、 月はどこから固まったのか？



「かぐや」分光
データによる鉄と
マグネシウムの比
の地図

Mg/(Mg+Fe)モル比

赤い色ほど先に
かたまった場所



月の地殻は裏側
から成長した

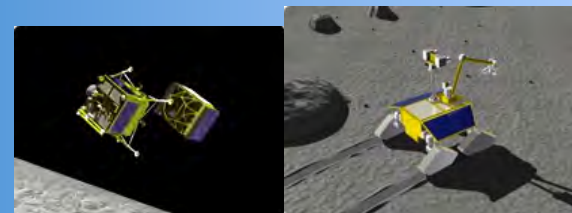


④ 今後の月・惑星探査 「宇宙における生命居住環境の理解」に向けて

＜現在の生命の居住範囲＞

我々の太陽系に地球以外に生命が存在するのか：生命が存在する可能性がある「火星探査」や「木星探査」によるエウロパ、ガニメデなど衛星の観測が有利

＜生命を育む環境 (固体天体)の誕生＞



地球のような環境をもつ惑星誕生の条件・頻度を調べる：惑星を形成する過程の初期の情報は「小惑星探査」が後期の情報は「月探査」が有利

地球古地質、生物分野による過去の生命居住環境の調査・生命発生過程の研究

＜生命起源物質＞

有機物の起源を調べる：太陽系形成時のままに近い有機物を調べる「小惑星探査」が有利

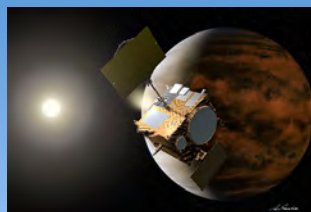


宇宙における生命居住環境の理解

- ・我々の住む地球の(遠い)将来の姿
- ・我々以外の太陽系に生命の居住が可能な天体が存在する条件・確率の調査

天文観測による太陽系外の生命を育む環境を持つ惑星の探索

＜生命を育む環境(水・大気)の進化＞



生命を育む環境のうち水・大気の進化を調べる：大気を今も持つ「金星探査」や「火星探査」が有効

＜生命を育む環境(地殻)の形成＞

生命を育む環境(地殻)がどのように形成されたのかを調べる：地球と同じように進化していて、かつ進化途中の情報を多く残す「月探査」が有利

* 水色のハッチは惑星探査でアプローチする項目