月の起源と進化

倉本　圭

2016年1月8日

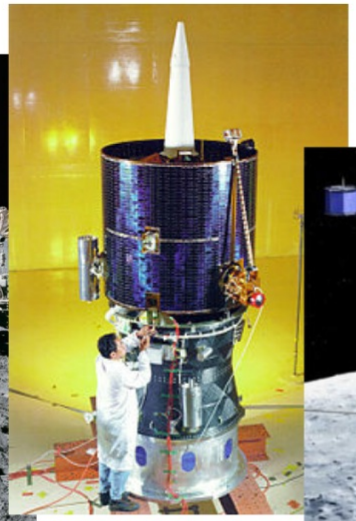
CPS探査ミッション立案スクール2015

アウトライン

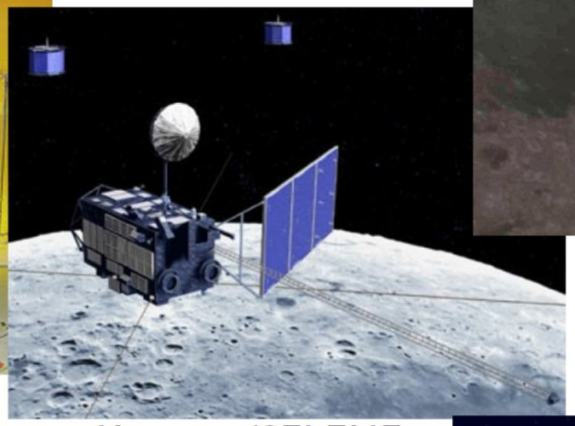
- 月の重要性
- 月の性質
- 月の軌道進化
- アポロ計画の科学知見
- マグマオーシャンモデル
- 巨大衝突仮説
- 月の衝突史
- 月のグローバルマッピングと月の熱化学進化論
- 月の深部

Missions to the Moon

Apollo (USA, 1969-71)

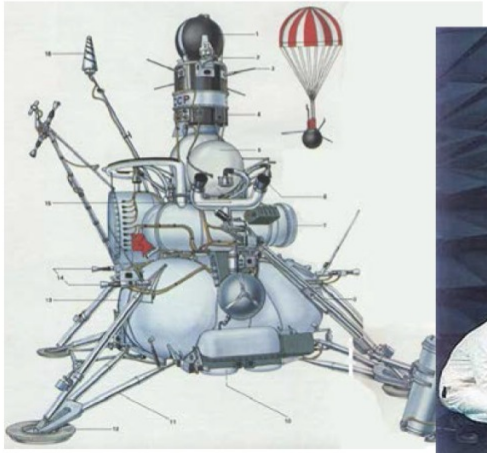


Lunar Prospector
(USA, 1998-99)



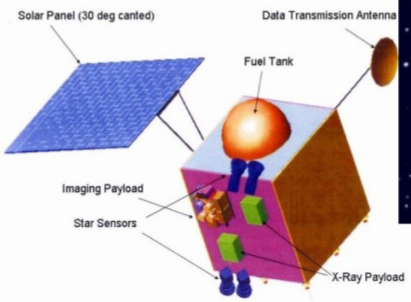
Lunar Reconnaissance
Orbiter (LRO)
(USA, 2009-on going)

Kaguya/SELENE
(Japan, 2007-09)

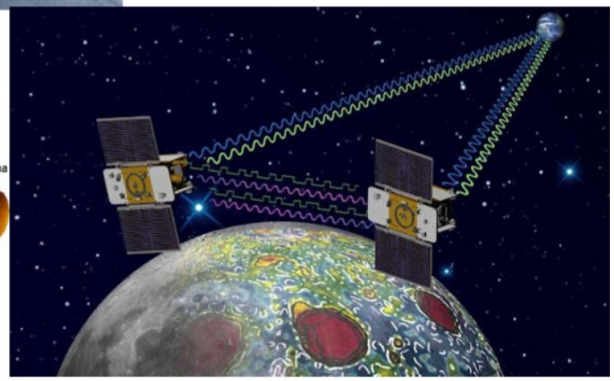


Luna (USSR, 1959-76)

Clementine
(USA, 1994)



Chandrayaan-1
(India, 2008-09)



Gravity Recovery and
Interior Laboratory (GRAIL)
(USA, 2011-12)

鎌田俊一作成

月の科学的重要性

- 惑星の起源
  - 集積過程、衝突、分化
- 惑星の進化
  - 熱史、火成活動、テクトニクス
- 太陽系の歴史の記録媒体
  - 古い衝突地形が保存されている
  - 小天体のフラックス進化
- 地球との共形成と共進化
  - 年代学、潮汐進化

かぐやの撮像したアリスタルコスクレーター周辺

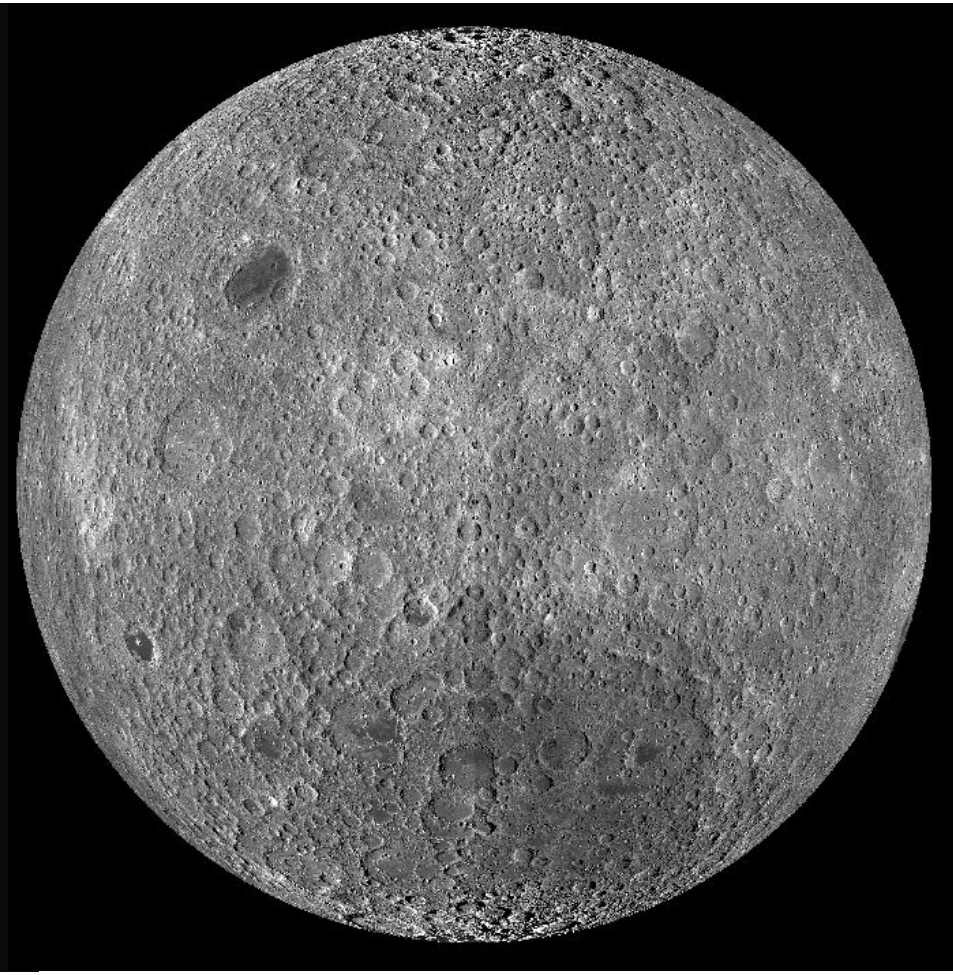
惑星と太陽系の形成と進化の理解に直結

月の物理的性質
「大質量」、「低密度」

- 質量 $1.23\times10^{-2}\ M_E$
  - 対母惑星質量比＝太陽系最大
  - 巨大氷衛星≒$10^{-4}\ M_J$
- 平均半径 1737.1 km, 密度 3.35 g/cm^3
  - c.f. 地球の非圧縮平均密度 4 g/cm^3
  - 金属鉄の核がないかあっても小さい (c.f. MOI=0.394MR^2)
- 軌道半径 38.44×10^4 km≒$60R_E$,周期 27.32 d
- 軌道角運動量 ~5×地球自転角運動量
  - 巨大氷衛星 ~10^{-3} 母惑星自転角運動量

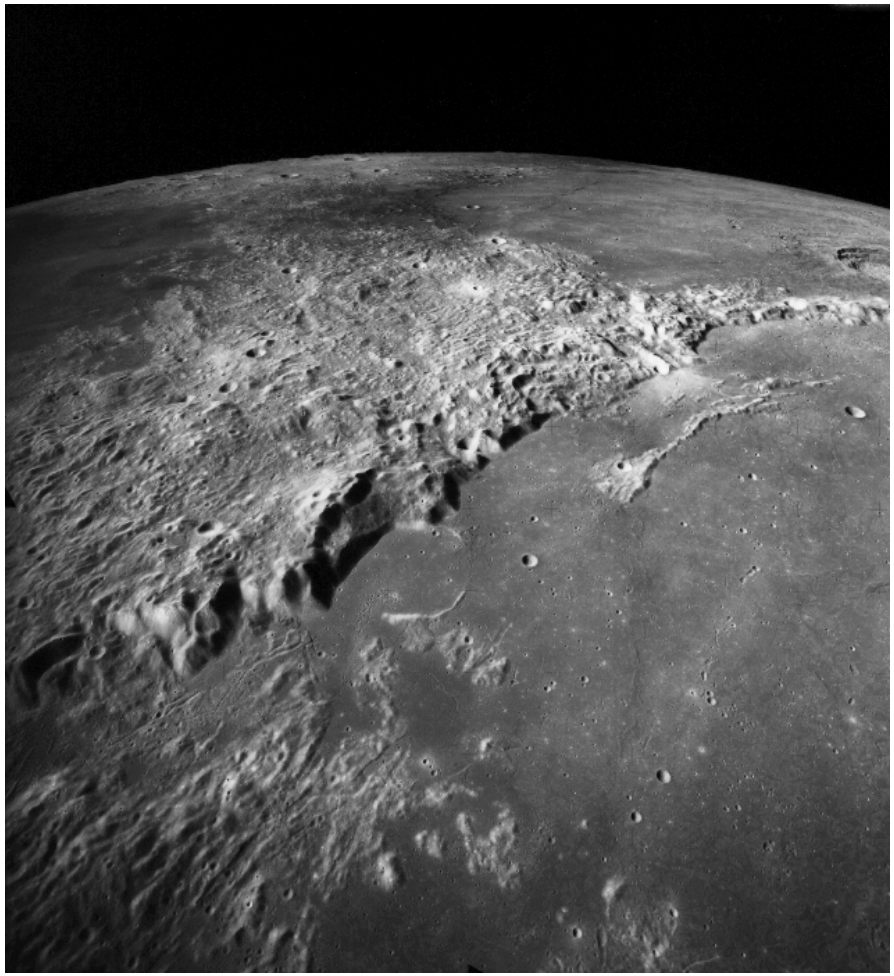
月の起源は難問

月の表側と裏側



平坦でアルベドの低い海が月表面の約2割を占める. 海は表側に多い.

海と高地



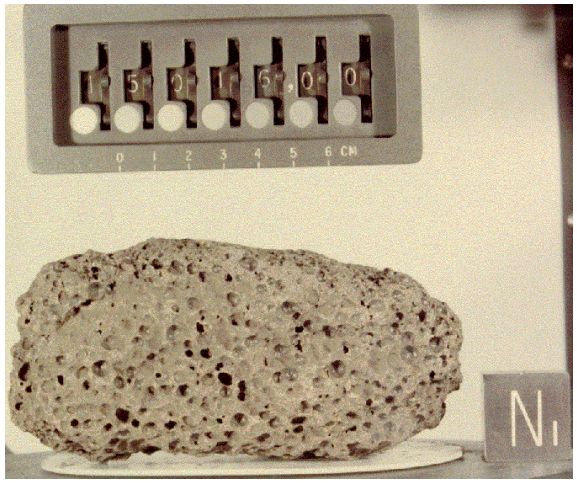
月の主要な岩石タイプ

高地

- 斜長岩
  - $CaAl_2Si_2O_8$に富む
- KREEP

海

- 玄武岩

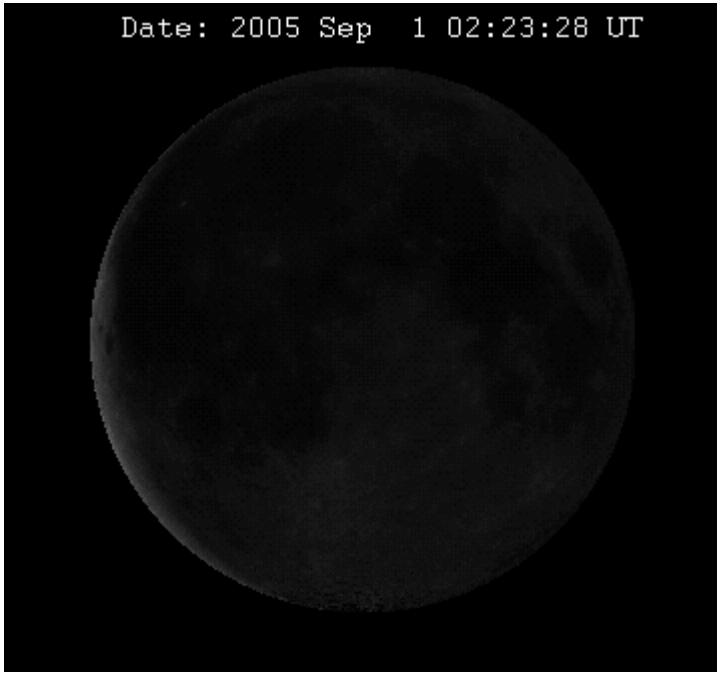


月の科学(selenology)の黎明

- Galileo (1610) 木星の衛星（「月」）の発見
  - 太陽系の正しい天体力学的構造の理解へ
- 17世紀後半から19世紀：著名な天文学者が月の軌道進化について考察（日食の記録と理論）
  - 潮汐力による月軌道の拡大
- 19世紀後半から20世紀初頭：古典的起源論
  - Darwin (1877) 月の起源の分裂説
  - Roche (1873) 共成長説
  - See (1909) 捕獲説

月の食の記録

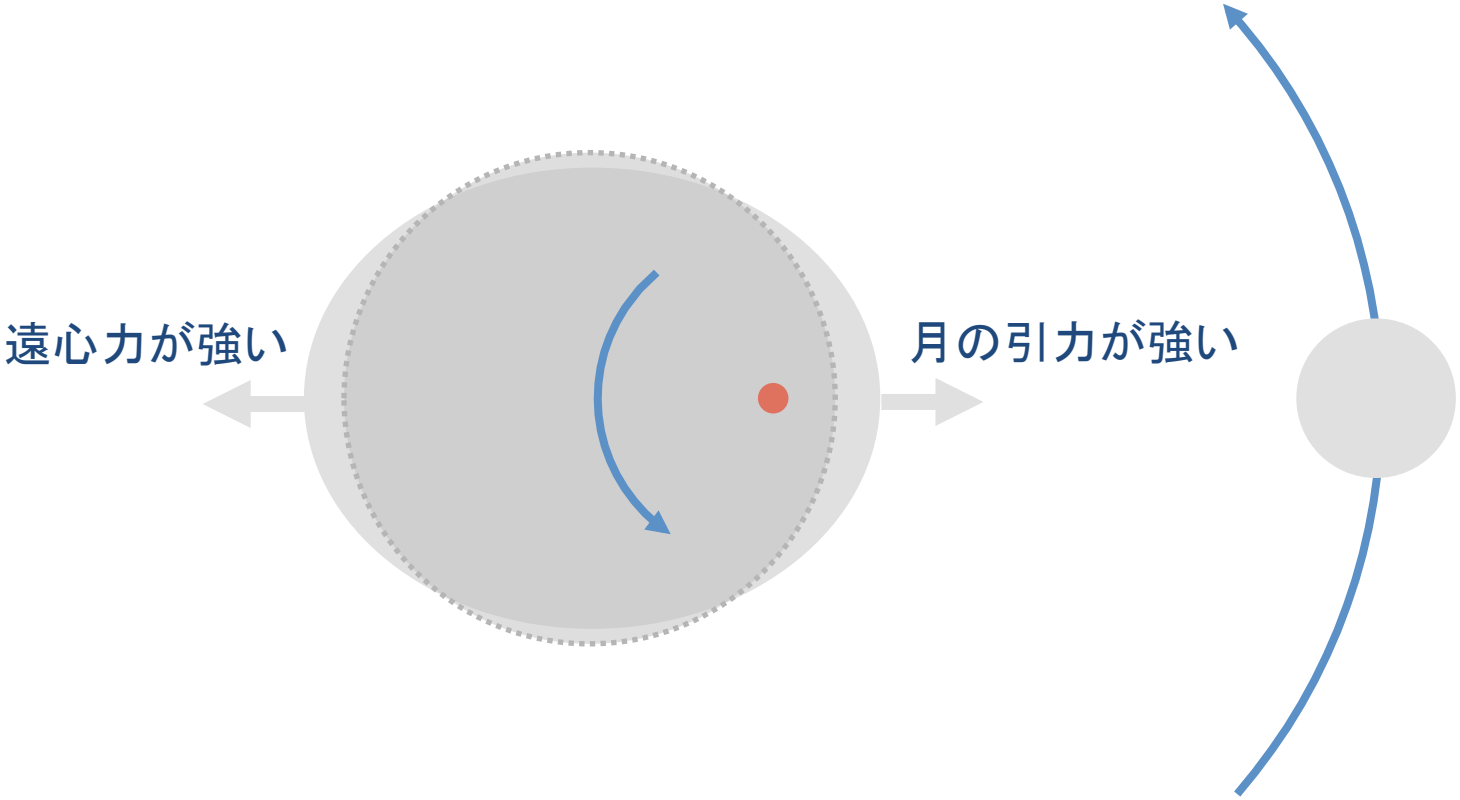
- 食は太陽と地球が直線上に並んだときに発生
- その間隔は月の満ち欠けの周期（平均=29.5306日）の倍数
- １６世紀 (Tycho)の記録を９世紀(Albategnius)の記録と比べると、満ち欠けの周期がわずかに短かかった
  - 見かけ上、月は、地球をより早く回るようになっている
  - １世紀あたり約１０秒角
  - Richard Dunthorne が確認 (1749)
- これを「月の永年加速」という



月の永年加速の原因

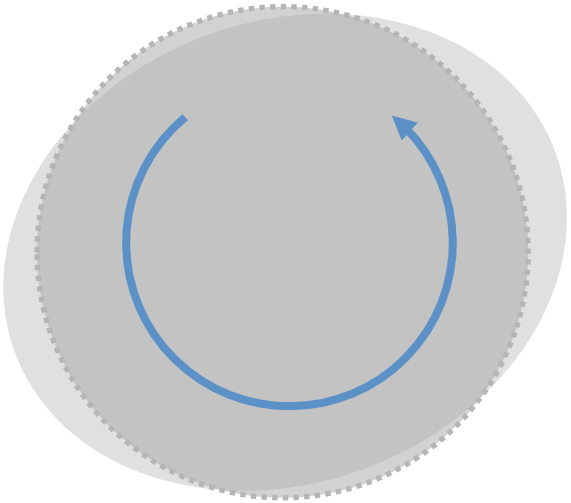
- １９世紀後半まで、月の加速は説明がつかなかった
  - 太陽の重力の効果などいろいろ検討されたが失敗
  - 大学者が説明できたと勘違い（Laplaceの計算ミス）したこともあった
- 月の見かけの加速は、実は地球（潮汐力）に原因があった (Delaunay, 1865)
  - しかも月の公転はむしろ徐々に遅くなっていることが判明

潮汐の仕組みと月の加速

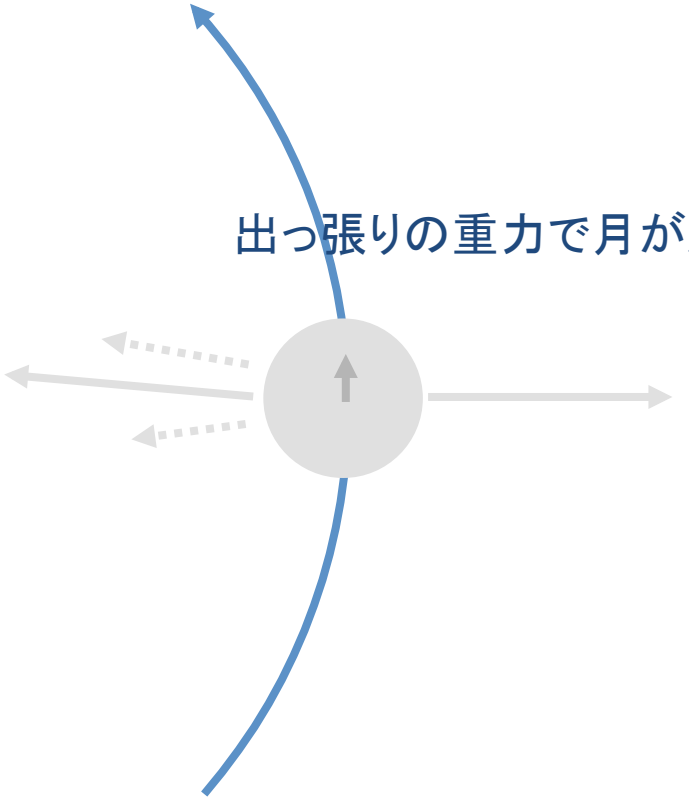


潮汐の仕組みと月の加速

自転の影響で出っ張りが先行

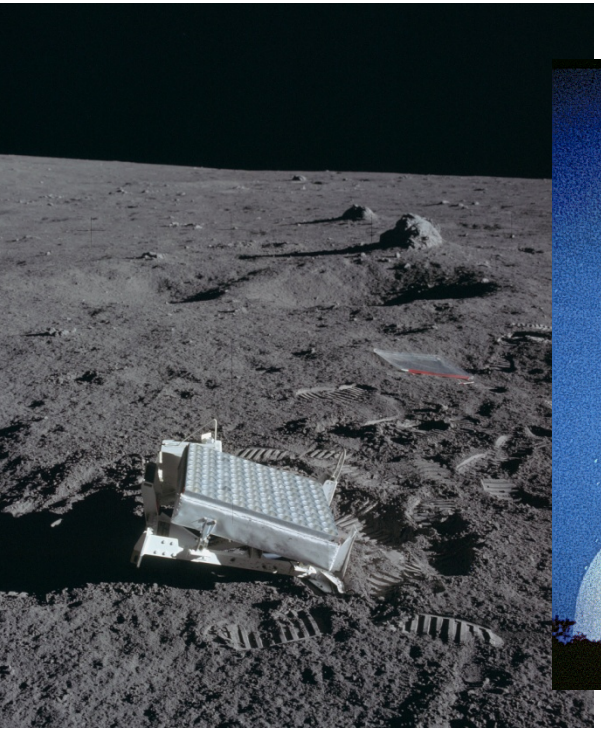


出っ張りの重力で月が加速

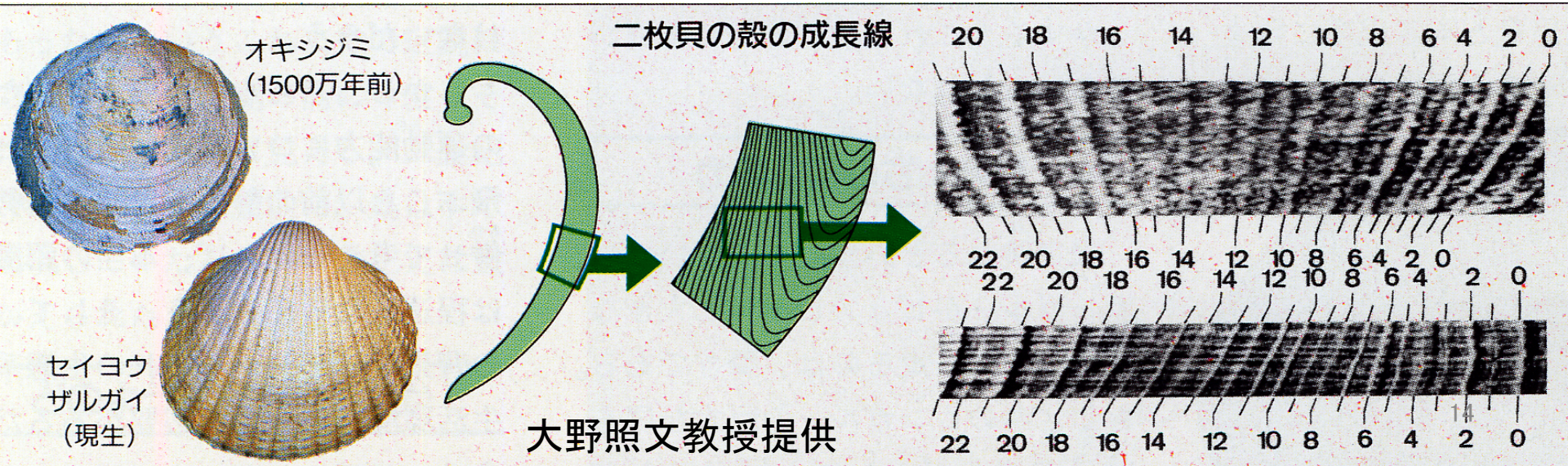


加速すると月は地球から遠ざかる
公転周期は伸びる
一方で、月を加速した分、地球の自転は減速→
一日の長さが伸びるために、見かけ上月の公転が加速する

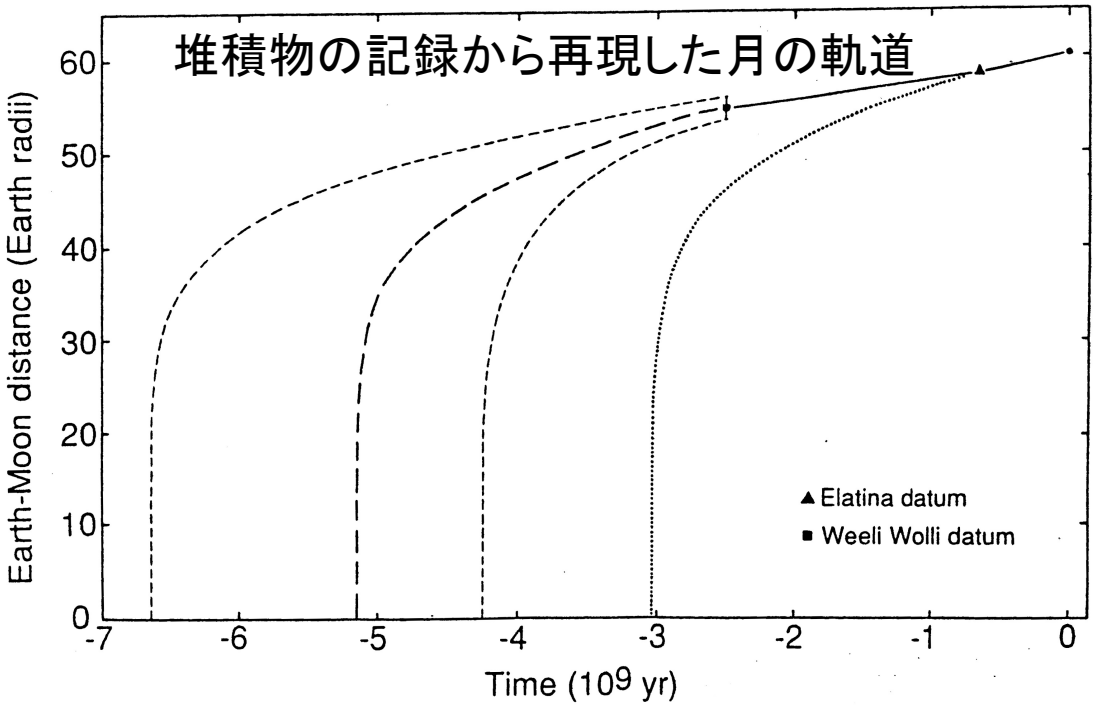
月の軌道膨張証拠



- 現在は年間3cm遠ざかっている
  - アポロ計画で設置した反射板を使ったレーザー距離測定
- 化石からも裏付け



地球に寄り添っていた月



- 45億年前に月は
  地球に接近していた

- 古典的月の起源論は、月が地球に寄り添っていたことを仮定
  - Darwin (1877) 月の起源の分裂説
  - Roche (1873) 共成長説
  - See (1909) 捕獲説
- 当時は月の詳しいデータがなく優劣がつかなかった

アポロ計画直前の月の理解

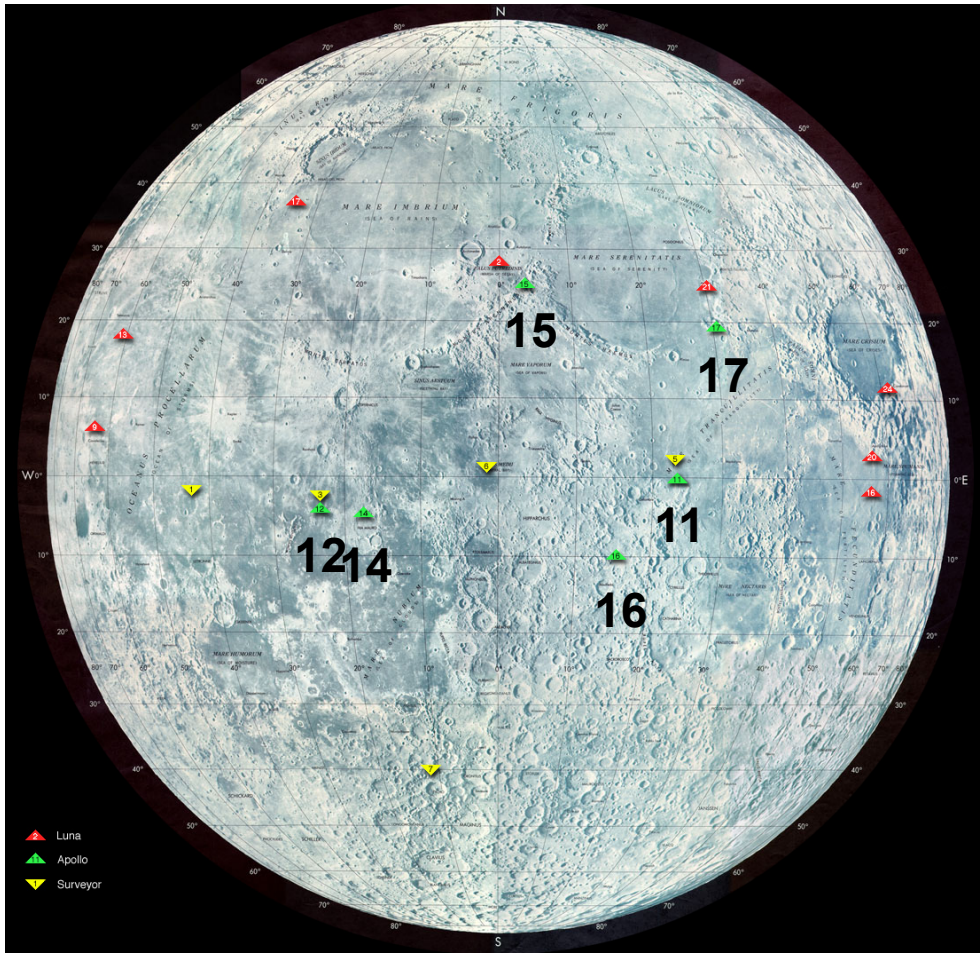
- Urey (1952)「月は冷たく未分化な始原天体である」
  - 月に行けば、変質していない地球や惑星の材料物質が手に入る
  - 当時の太陽系起源論は「ちりあくた説」（冷たい惑星の起源）が有力視
  - 捕獲説に基づく
  - 間違っていた仮説だったが，有人月探査への強力な動機の一つになった
- クレーターの成因も衝突説と火山説で論争
  - 東大 竹内均v.s.京大 宮本正太郎

月の理解の進展
アポロ計画

- アポロ計画 1969-72
  有人月探査
- 採取試料に基づく月の物質科学と地質学

  総重量約400kgの試料

  着陸点は安全性の高い「海」が主だが，「高地」の試料も取得

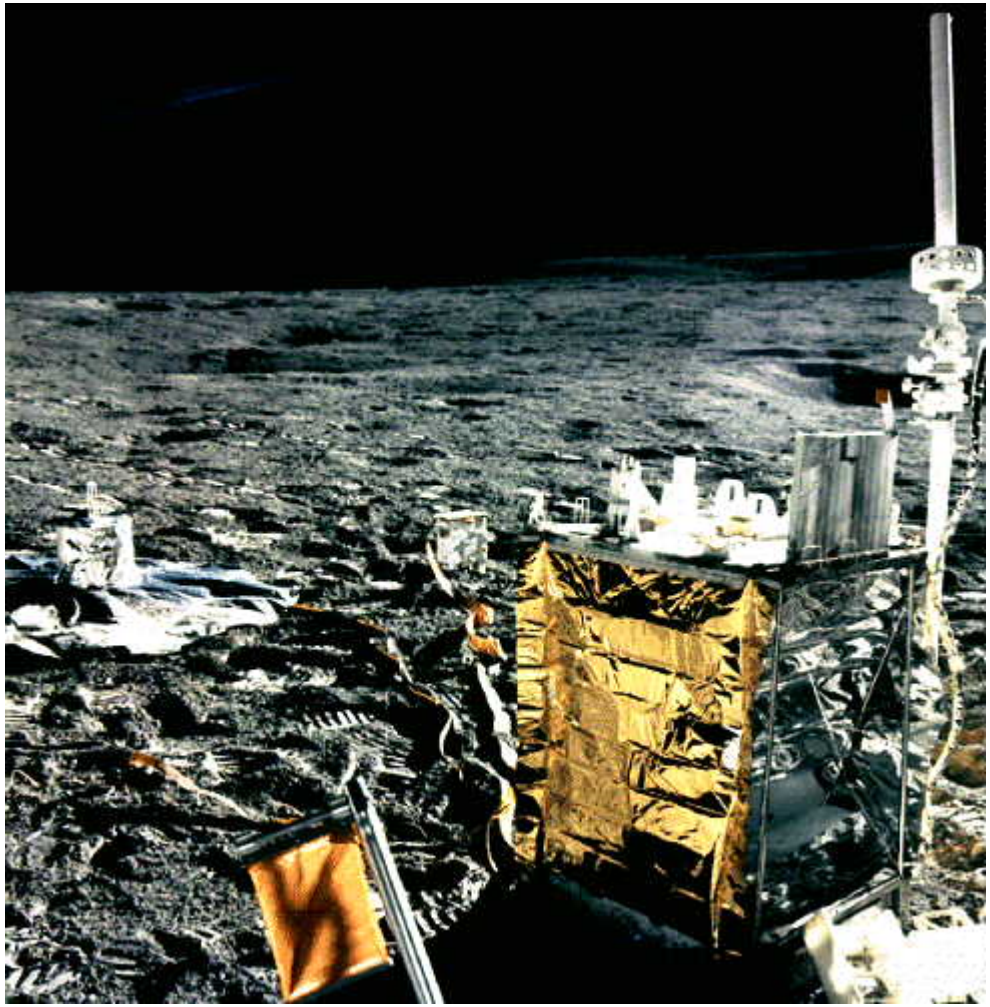


月の理解の進展
アポロ計画

- アポロ計画 1969-72
  有人月探査
- 採取試料に基づく月の物質科学と地質学
- その場実測に基づく月の地球物理学

  Apollo Lunar Surface Experiments Package

  熱流量・月震・磁場・レーザー反射鏡・重力・希薄大気・荷電粒子・隕石衝突



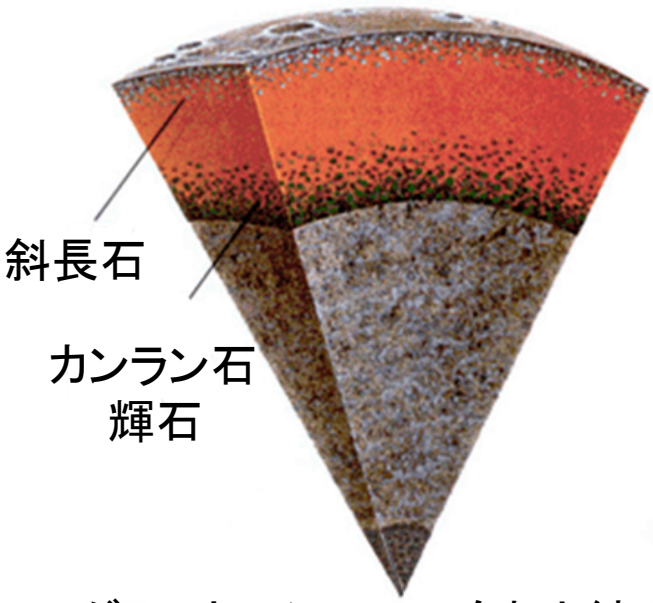
アポロ計画のもたらした月の理解の刷新

- マグマ・オーシャン理論の確立
  - 冷たい月の起源から熱い月の起源へ
  - 地球の初期進化論にも大きな影響
- クレーター形成の理解の確立
  - 衝突起源と実証
  - ちりあくた説から微惑星仮説へ：現代の惑星形成論への突破口
  - 地質過程としての天体衝突の理解
- 太陽系年代学への貢献
  - 太陽系史の参照点
  - 惑星地形の年代推定法（クレーター年代学）を提供

アポロで構築された月の理解は “Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets”, Basaltic Volcanism Study Project , 1981 によくまとまっている

マグマオーシャン理論

- 月は初期に大規模に溶け、その冷却過程で結晶分化作用が起こることによって斜長岩地殻が形成したとする月分化の標準モデル
- 主な根拠 (e.g., Warren, 1985)
  1. 月全体が厚い斜長岩地殻に覆われている
  2. 高地の岩石の結晶化年代が44億年前以前
  3. 玄武岩　(沈んだ鉱物が再融解し生じるとする)　が斜長岩と相補的な元素濃度パターンを持つ
  4. 理論から予想される液相濃集元素に著しく富む試料が存在
     - KREEP岩 : カリ・希土類・リンに富む岩石。熱源元素 (K, U, Th) に富む



マグマ・オーシャンの冷却と結晶分化により、斜長岩の地殻、かんらん石・輝石のマントルが形成される。地殻・マントルの境界には液相を好む元素が集まる Taylor (1994)

月で提唱されたマグマオーシャンの概念(惑星の熱い起源論)は一般化され、地球型惑星をはじめ固体天体に広く適用されるようになっている

マグマオーシャンモデル

根拠 (Warren, 1985, Ann. Rev. Earth Planet. Sci.)

- 月全体が厚い斜長岩で覆われている
  - 推定厚 55-75 km (Toksöz 1979)
    - 地震学・測地学
    - 月体積の約1割
    - 海の玄武岩はせいぜい厚さ2-3km
  - 斜長岩は（超）苦鉄質マグマの結晶分化作用で生じる

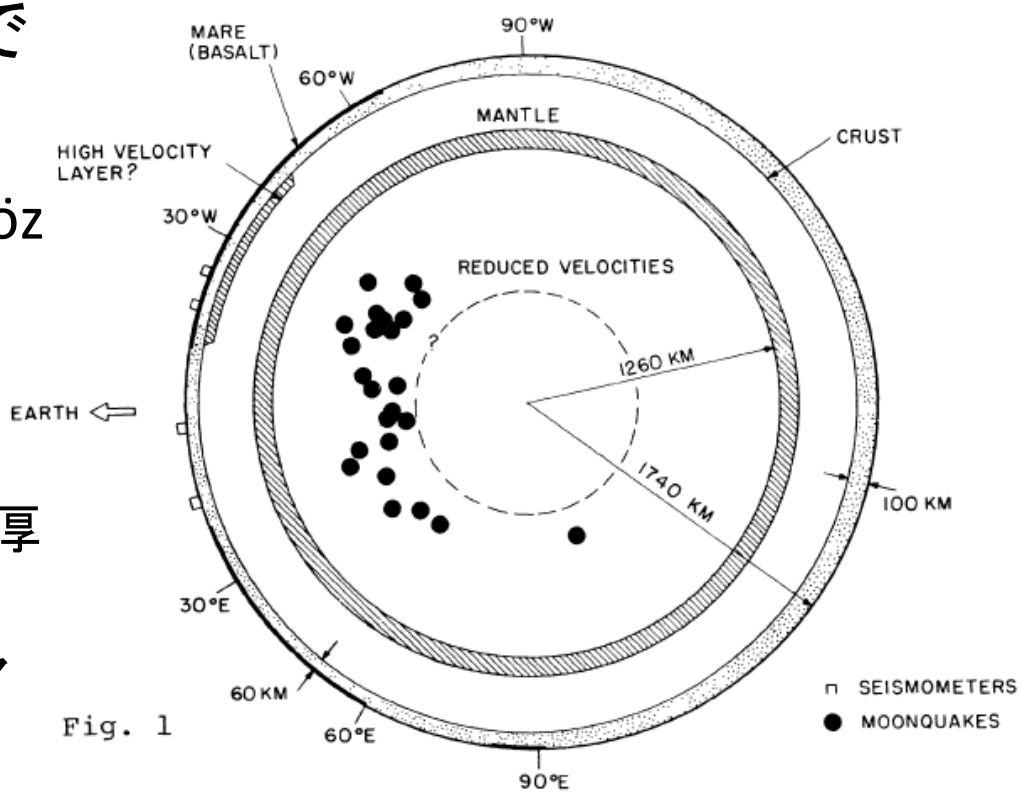


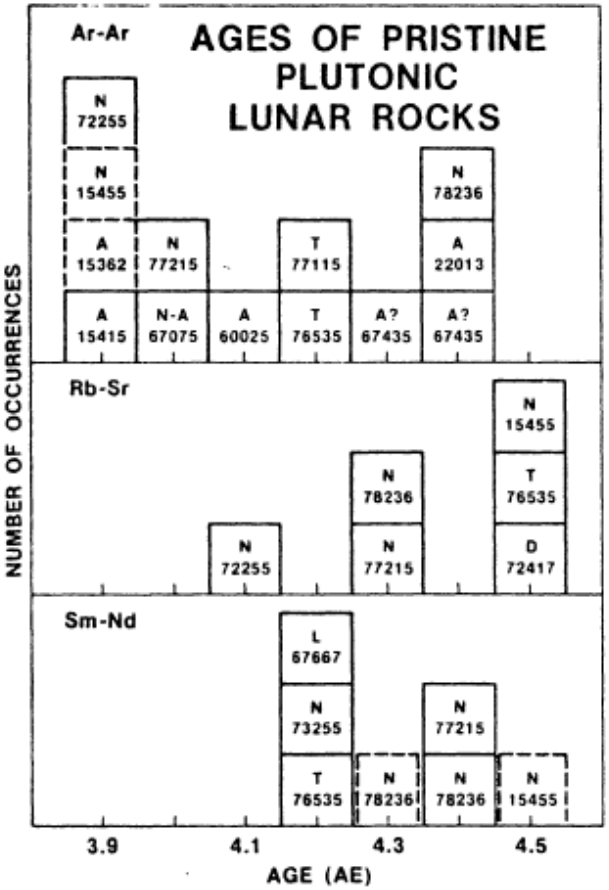
Fig. 1

Goins et al. (1979)

マグマオーシャンモデル

根拠 (Warren, 1985, Ann. Rev. Earth Planet. Sci.)

- 高地の岩石は古い
  - “Pristine Rocks” (衝撃変成を逃れた試料)の結晶化年代は44億年前以前
  - 月が融解していた時期は短い，つまり月全球が一斉に融けていたことを示唆する
  - ただし閉鎖性のもっとも低いAr-Ar年代は少し若い



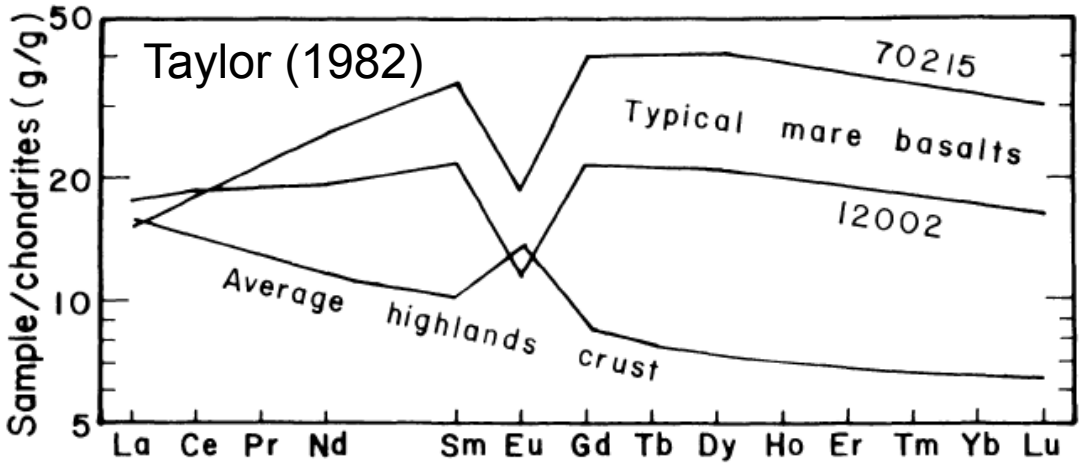
Nyquist (1982)

マグマオーシャンモデル

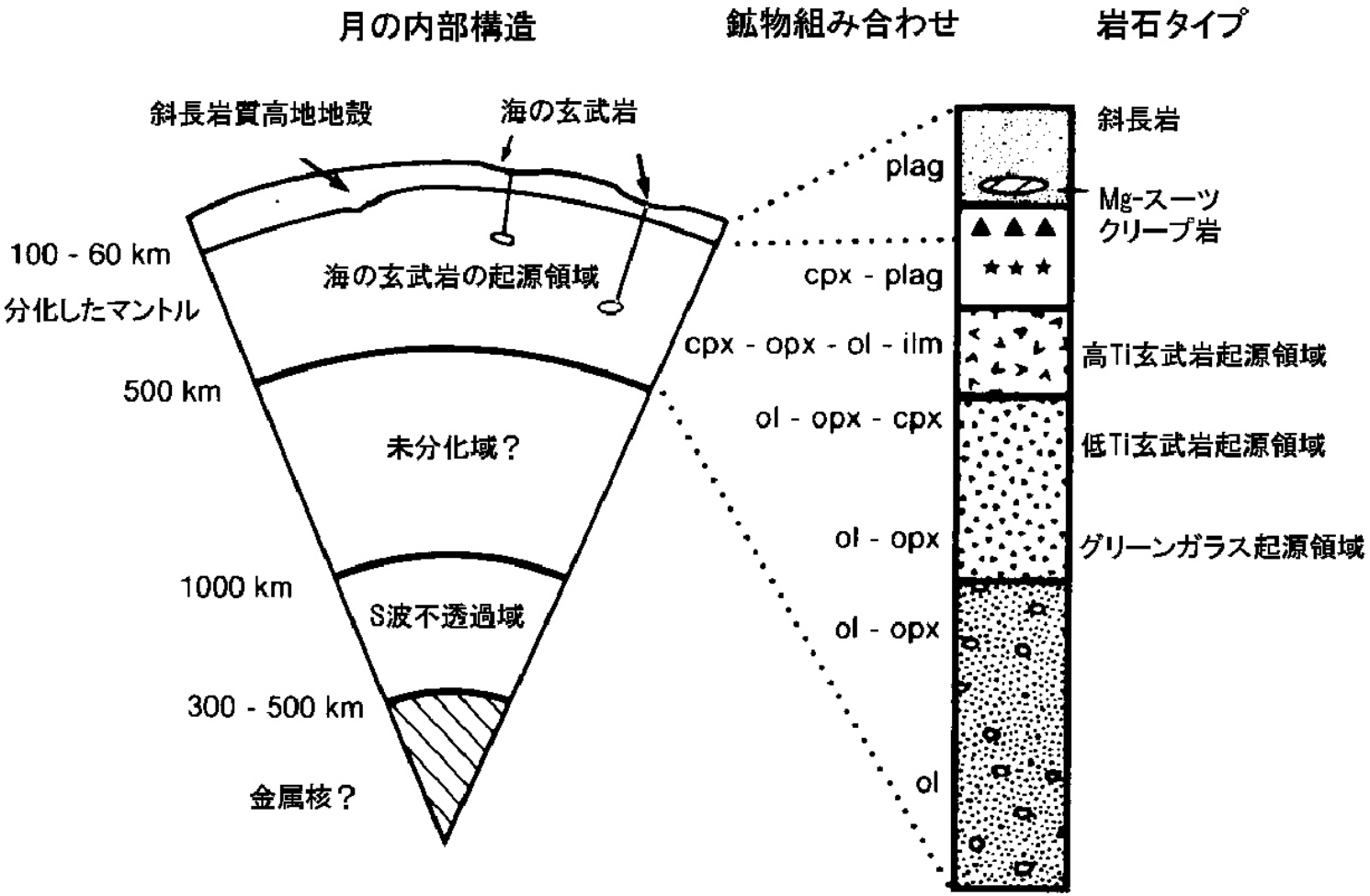
根拠 (Warren, 1985, Ann. Rev. Earth Planet. Sci.)

- 相補的なEu異常の存在
  - 希土類元素：難揮発性かつ親石性の元素→月のケイ酸塩全体では隕石と同じ相対存在度
  - 高地の斜長岩と海の玄武岩で相補的なEu異常
- KREEP岩の存在とその端成分の組成均質性

- 希土類元素はマグマとケイ酸塩鉱物が共存したときに，マグマに分配されやすい非調和元素
- ただしEuは2価の陽イオンになりやすく，調和性が高い



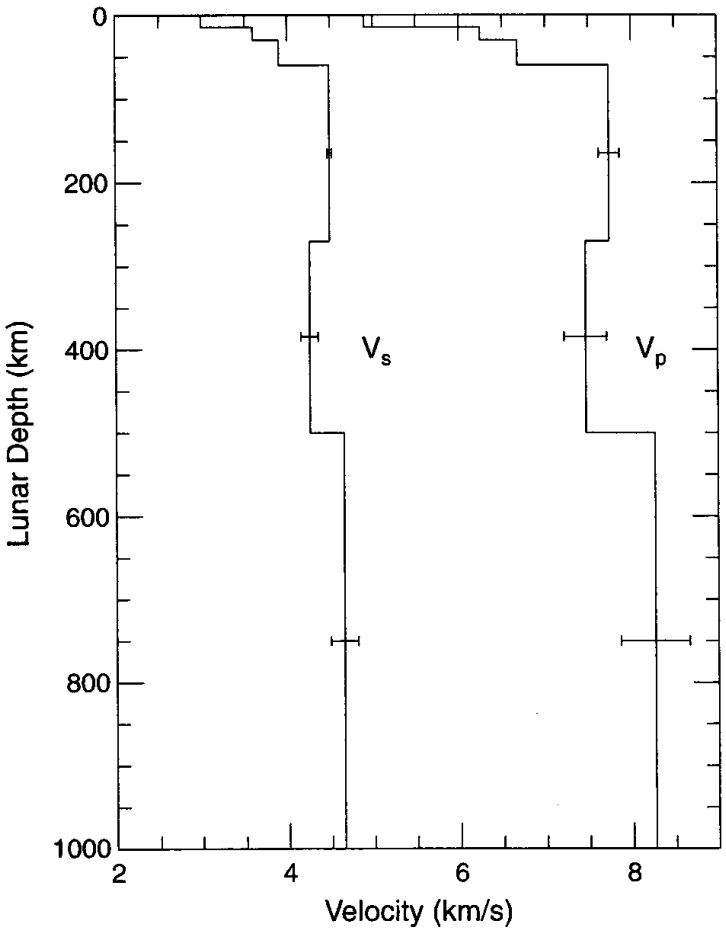
（古典的）月マグマオーシャンモデルが予想する月内部構造



Taylorらによるコンパイル, BVSP(1981)

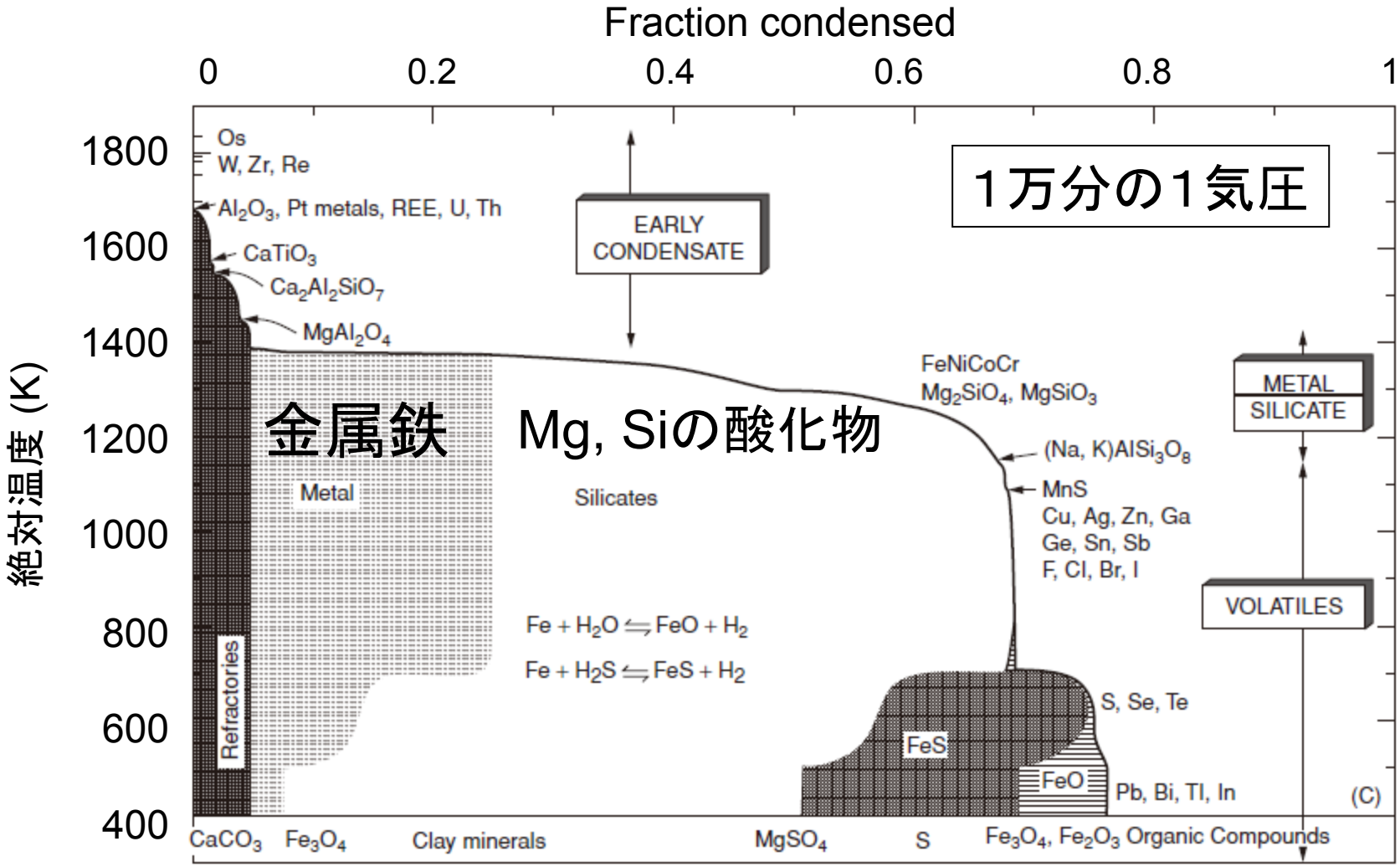
マグマオーシャンの規模？

- 従来の推定値=深さ500km
  - 地震学　(Nakamura, 1983)
  - 海の玄武岩の起源領域の深度推定：複相飽和の仮定
  - より深部は未分化？
- 月は難揮発性元素に著しく富んでいることになる
  - Ca, Al, Uなどの濃度が地球の地殻・マントルの倍
  - 月の材料物質は蒸発残渣？
- 実際にはこれらの推定は極めて不確定
  - 巨大衝突説は初期の全融解を示唆する



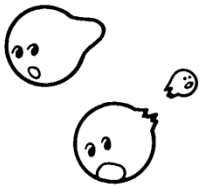
Nakamura 1983

太陽組成ガスからの元素凝縮系列

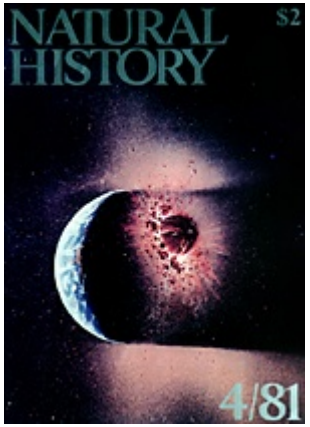


Morgan and Anders (1980)

月の起源論



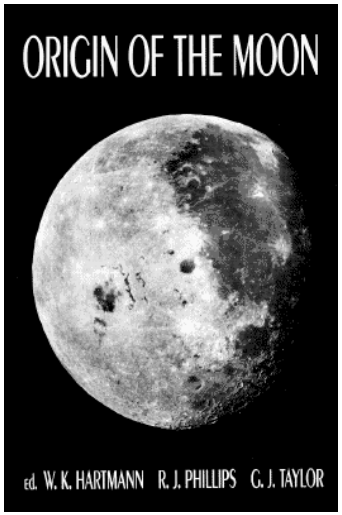
- 古典的起源論
  分裂説・捕獲説・共成長説
- 探査データは分裂説を支持，しかし力学的問題が残った
- 90年代の惑星集積シミュレーションの発展を受けて，巨大衝突説が標準理論に



Hartmann (1981)

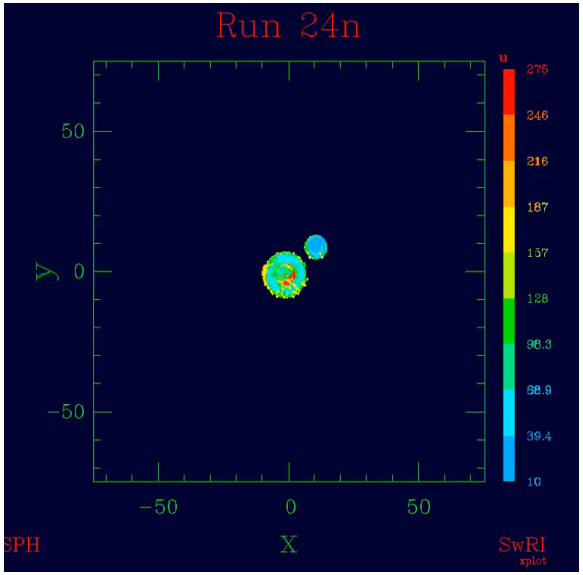
巨大衝突説の登場

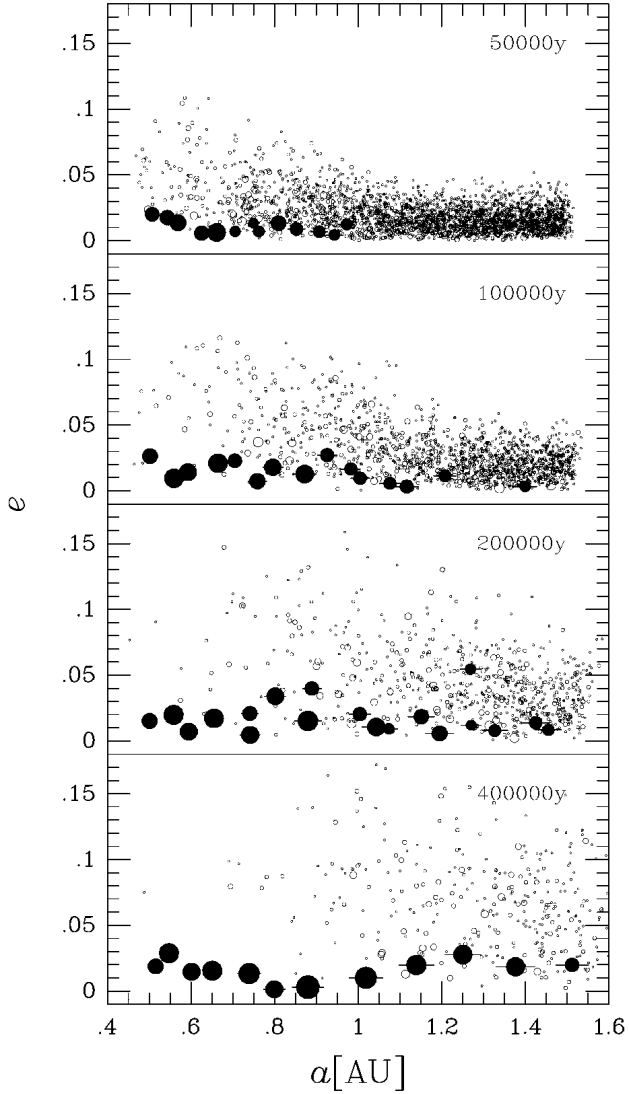
- 1984 国際会議 “Origin of the Moon” at Kona, Hawaii
- 巨大衝突説(Hartman　1979)が標準理論として歩みだした
- 月の起源の制約: 月の力学的特徴と化学的特徴
  - 特に、地球の自転角運動量の約5倍もの軌道角運動量を持つこと、金属核が欠損していること
  - 古典的月起源説（捕獲説、分裂説、兄弟説）では説明困難
  - 原始地球への原始惑星の衝突を仮定すれば説明可



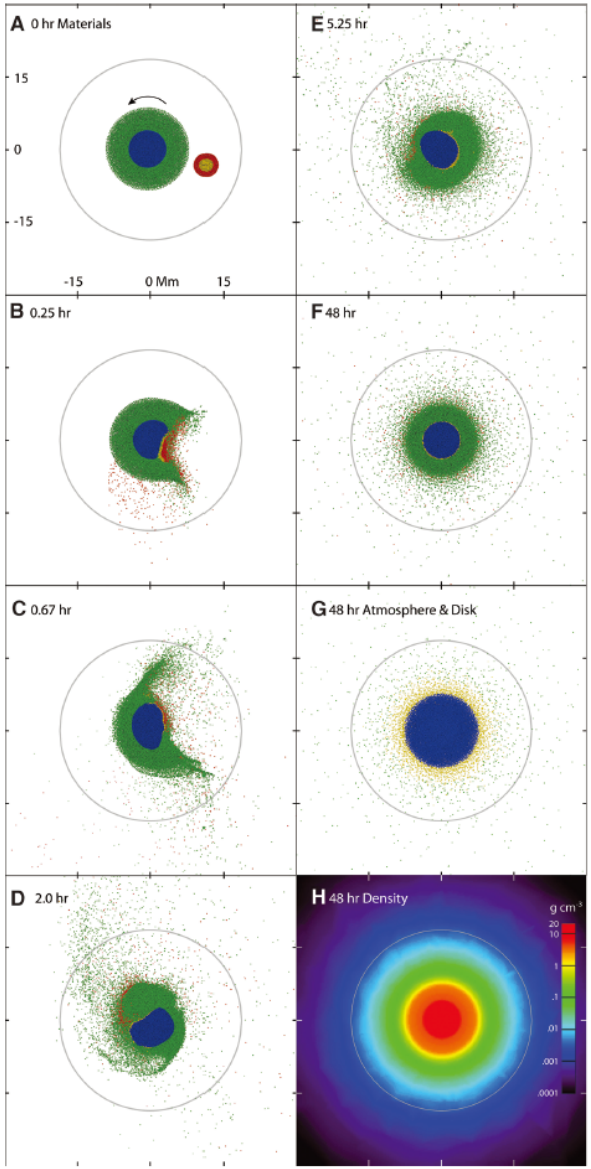
巨大衝突説の理論的根拠

- 原始地球と原始惑星の相互衝突の理論 (Benz and Cameron 1986,87,…)
  - 主にマントル物質が衝突後の原始地球軌道上に放出され、周地球破片円盤を形成する条件が存在する
- 周地球破片円盤からの衛星集積の理論 (Ida et al., 1997)
  - 周地球破片円盤から月が一つ形成される条件が存在する
- 地球型惑星の集積過程 (Kokubo and Ida, 2002)
  - 微惑星から月・火星サイズの原始惑星が多数形成され、これらがさらに巨大衝突を繰り返し、最終的な原始惑星が形成される
  - 巨大衝突は普遍的な過程である

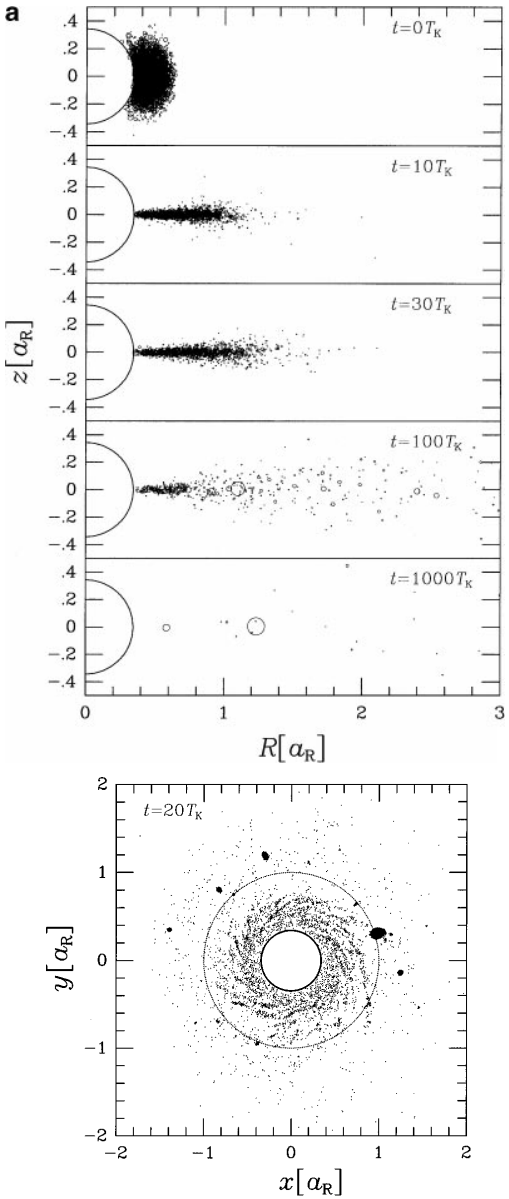




地球型惑星領域での微惑星集積のN体計算。寡占的成長により、原始惑星が多数成長する。Kokubo and Ida (2002)



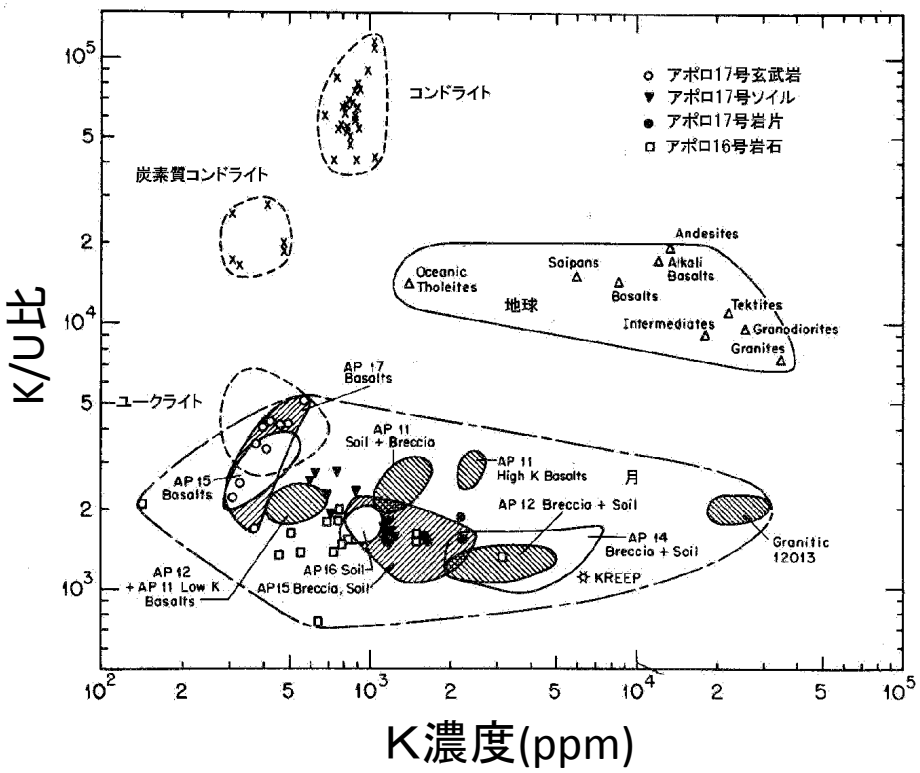
最近の巨大衝突SPH計算。自転を考慮。Cuk and Stewart (2012)



周地球円盤からの月集積のN体計算。Kokubo and Ida (2002)

巨大衝突の月材料物質への影響

- 月の金属核欠損
  - 惑星の外側の物質の方が、破片として放出されやすいことで説明できる
- 揮発性物質の損失も説明
  - 巨大衝突時の昇温は、単純な見積もりでは10^4Kにもなる
  - 月や地球が始原的隕石に比べ揮発性成分に乏しいのは、巨大衝突時の昇温による蒸発と散逸のためと解釈できる
  - MgやSiも蒸発で一部失われ、それゆえ月は相対的にAlやCaなどの難揮発性物質に富むとする主張もある



揮発性元素Kと難揮発元素U濃度の相関。月はコンドライト隕石や地球に比べてK/U比が低く、材料物質から揮発性元素が失われたことを示唆する。

月の起源論：成績表

TABLE 3. A "Report Card": The Author's Opinion of How Well Five Models of Lunar Origin Satisfy Seven Constraints.*

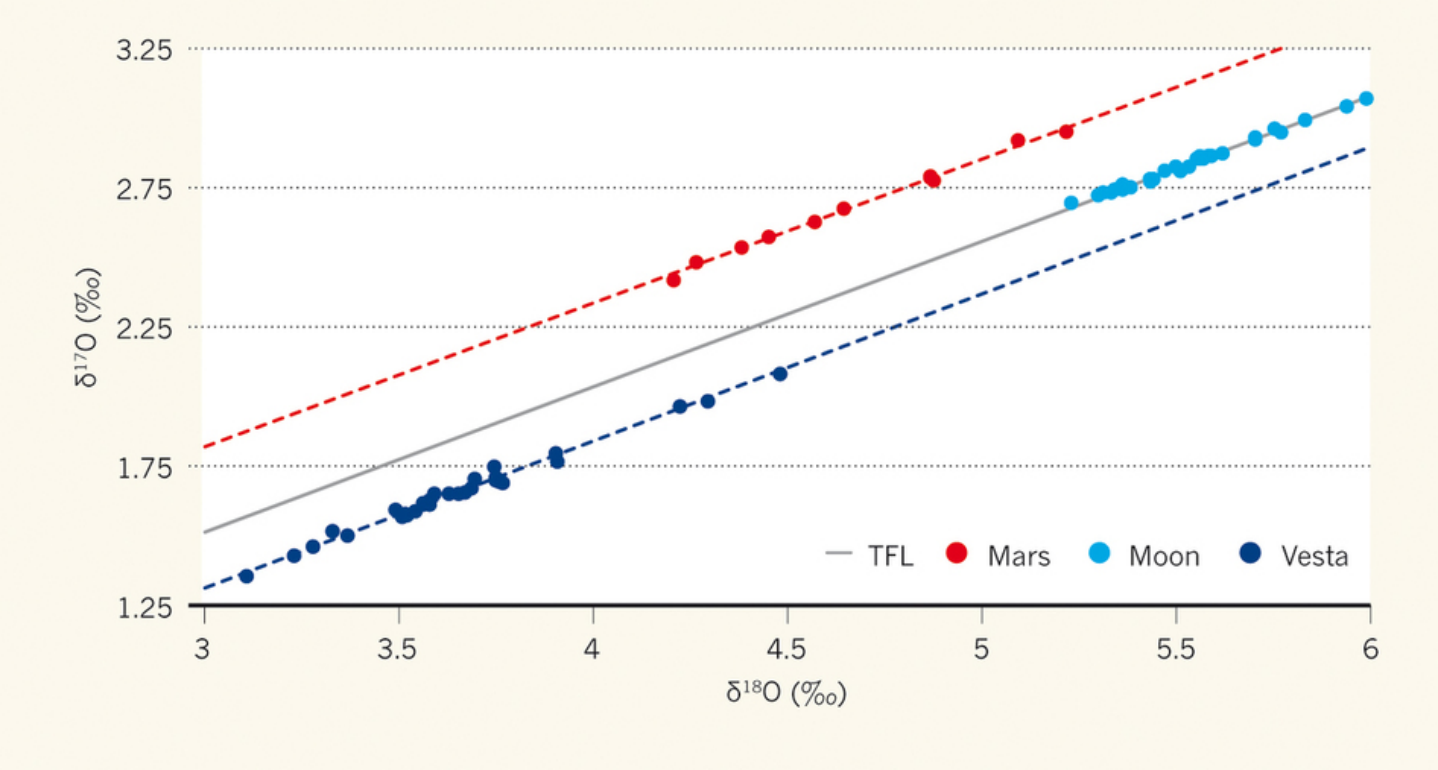
	Intact Capture	Coaccretion	Earth Fission	Collisional Ejection	Disintegra-tive Capture
Lunar mass	B	B	D	I	B
Earth-Moon angular momentum	C	F	F	B	C
Volatile element depletion	C	C	B	B	C
Fe depletion	F	D	A	I	B
Oxygen isotopes	B	A	A	B	B
(Similarity of mantle trace element patterns)	(C)	(D)	(A)	(C)	(C)
Magma ocean	D	C	A	A	B
Physical plausibility	D–	C	F	I	F

**For readers unfamiliar with the U.S. educational system: A is the best grade; F (failing) is the worst; I (incomplete) means all assignments have not been completed and a grade cannot yet be awarded.*

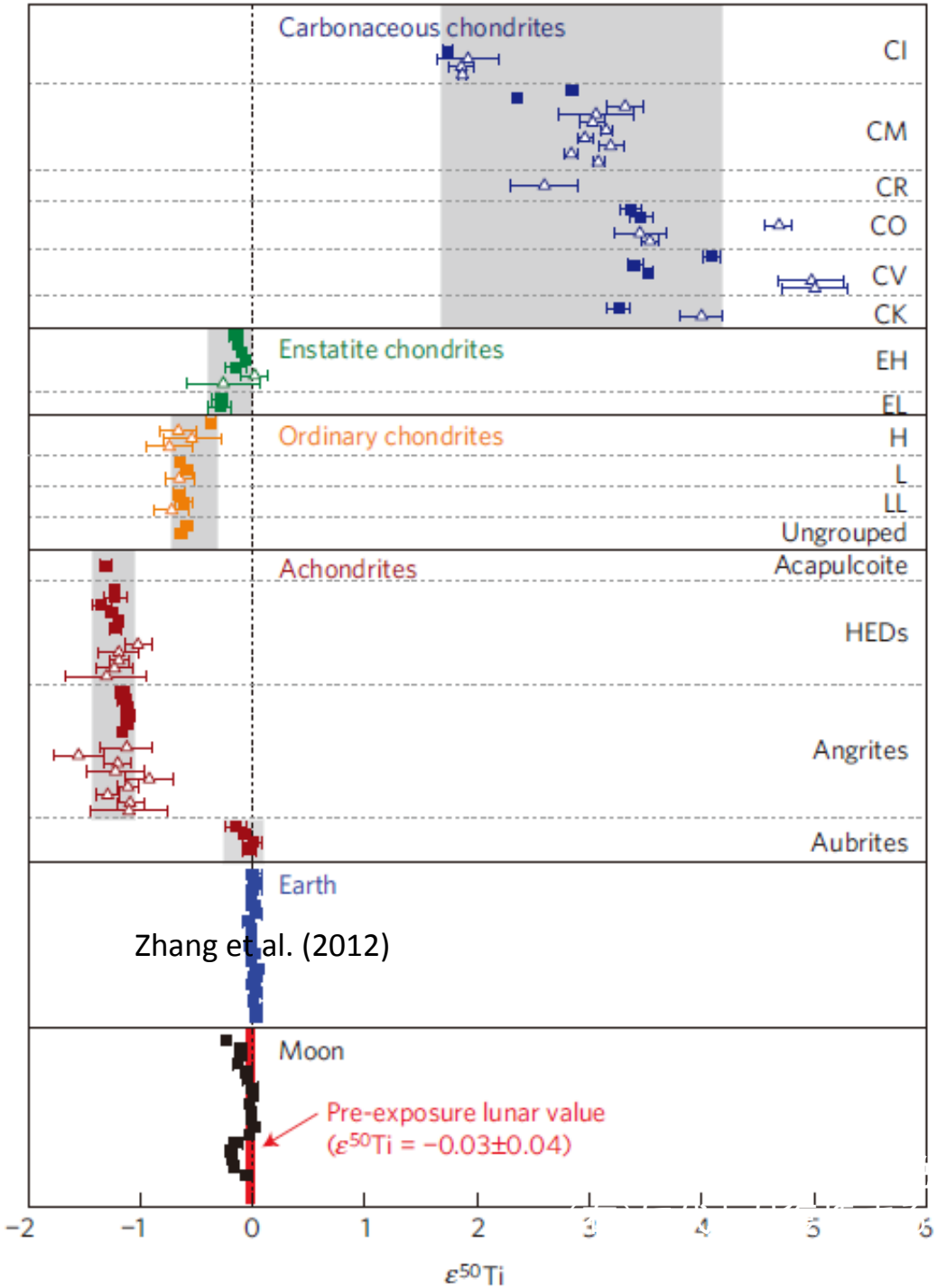
Wood (1986)に加筆

巨大衝突説の欠点?

- 月物質は主にimpactorに由来する
- しかし月岩石の元素同位体比は地球物質に酷似 (Clayton and Mayeda, 1996, ...)



Canup 2015



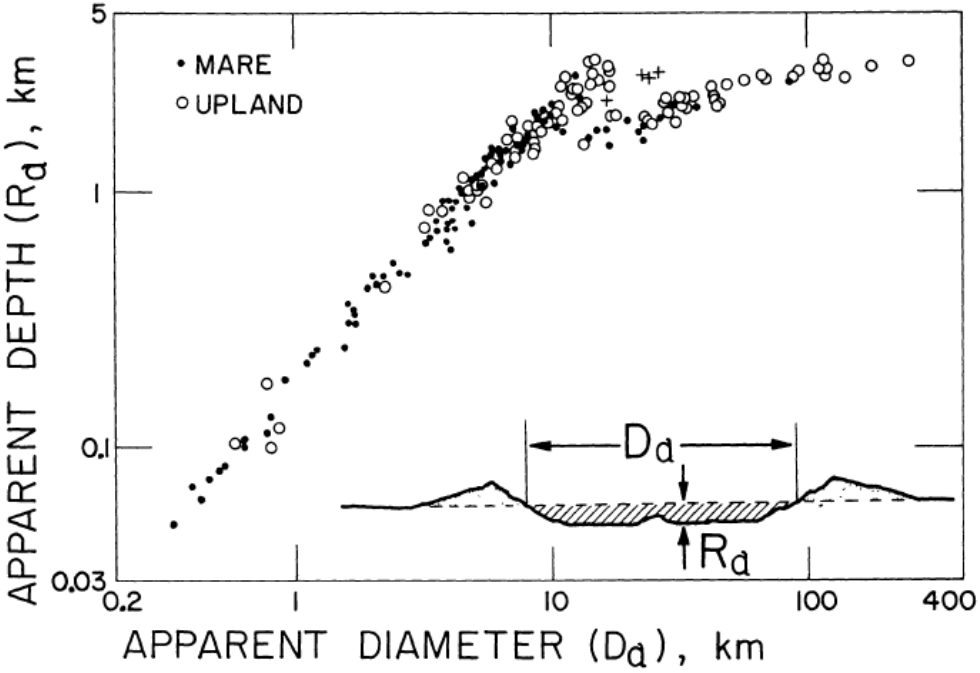
Zhang et al. (2012)

月の進化:衝突史

月クレーターの衝突起源の証拠

- 衝撃変成鉱物・衝撃変成岩体の存在
- 半径・深さ関係にスケーリング則
- 爆発的噴火を引き起こす揮発性成分の欠乏

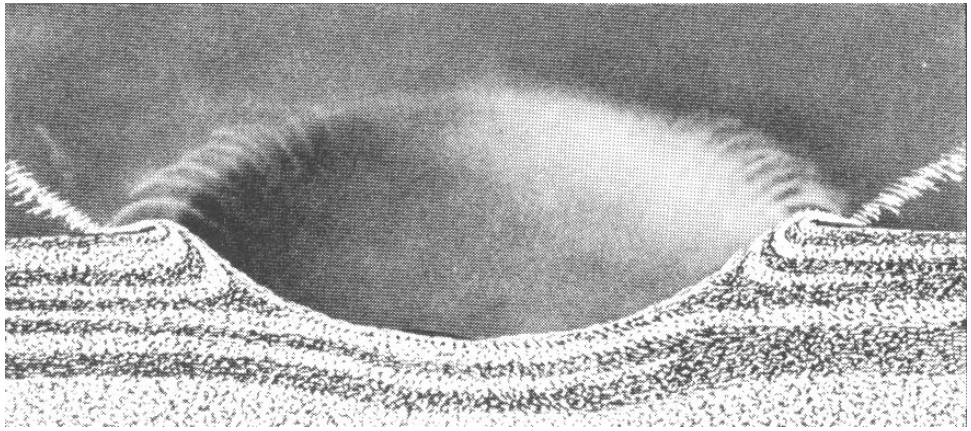
月岩石試料の大半は粉砕された岩石が固着した角礫岩



Pike (1977)

衝突クレーター形成の物理

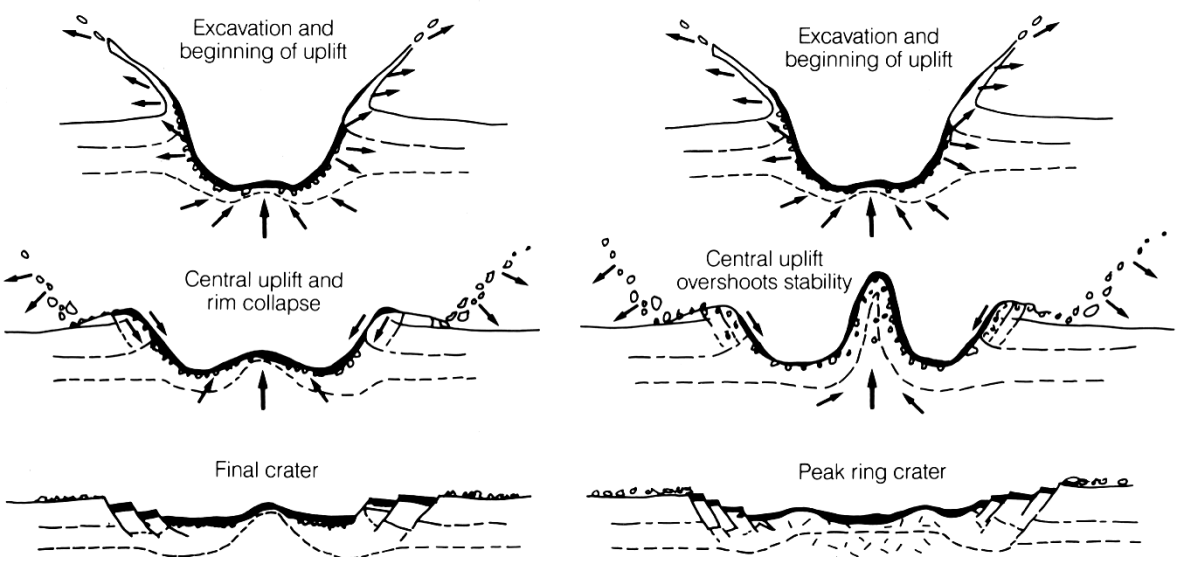
- 発生応力が標的物質の弾性限界を超過
- 圧縮・掘削・変形の順にクレーター形成が進行. このとき標的物質が流体的にふるまうため標的の物性値の詳細に依存しないサイズ・深さスケーリング則が生じる



Gault (1968)

衝突クレーターの重要性

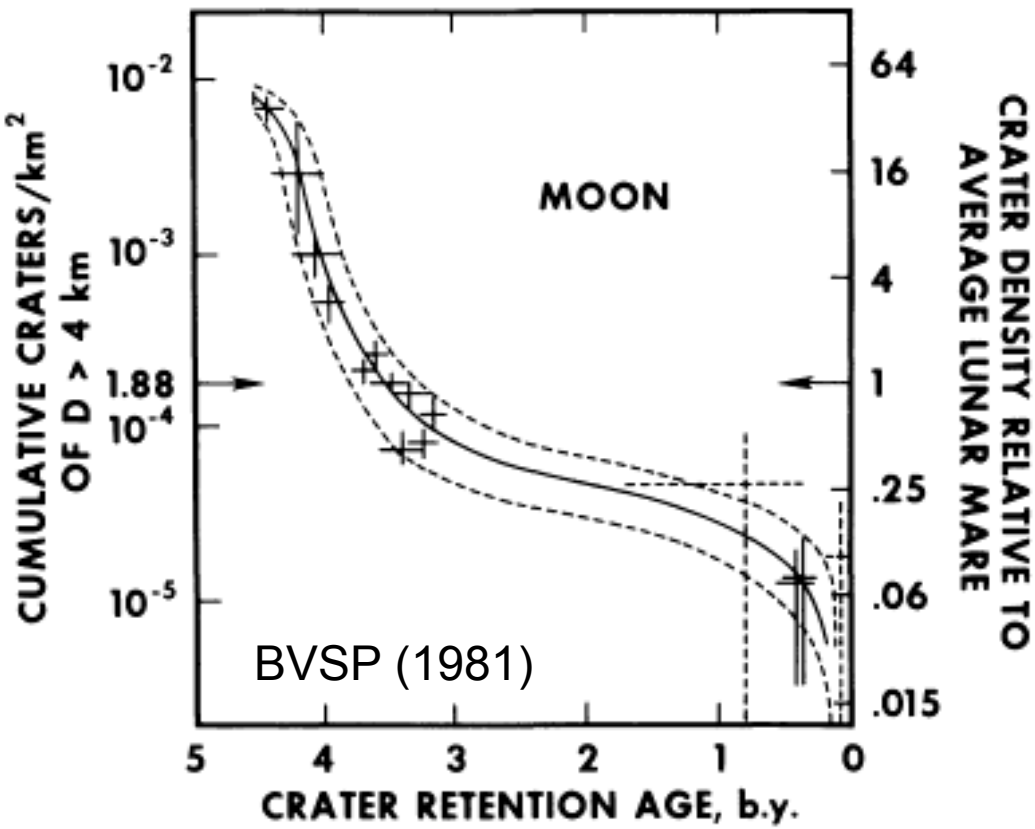
- 衝突エネルギー・天体フラックス・サイズ分布の評価
  - e.g. Chyba and Sagan (1992, Nature) 初期地球へのフラックスを見積もり，前生物学的化学進化への影響を評価
- 地下を覗く窓としての利用（特に中央丘）
  - ただし大規模クレーター形成については不明な点が残る

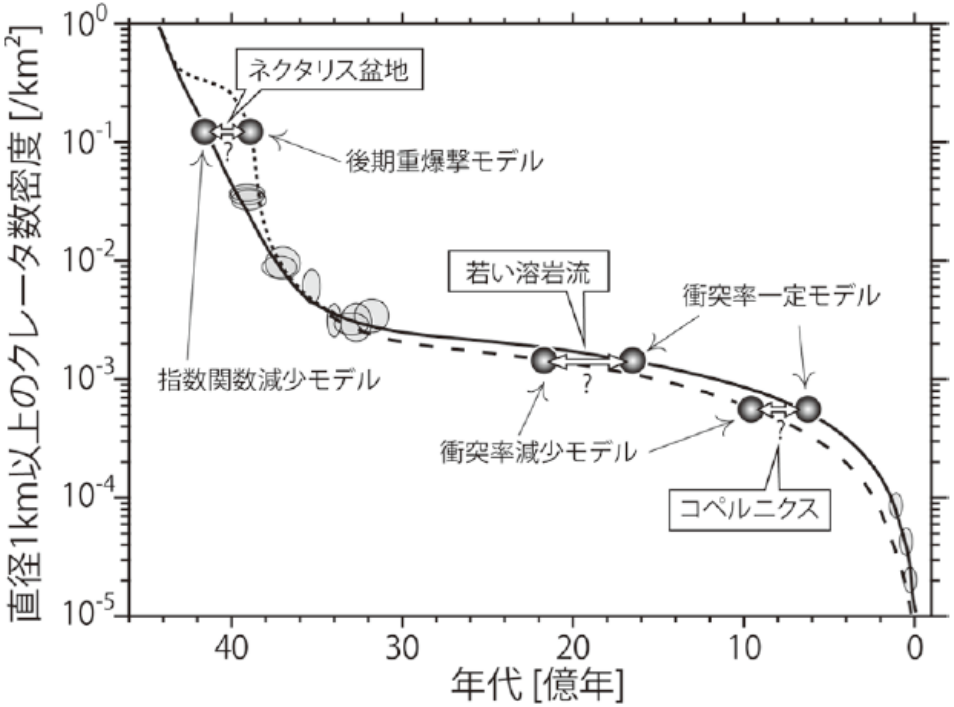


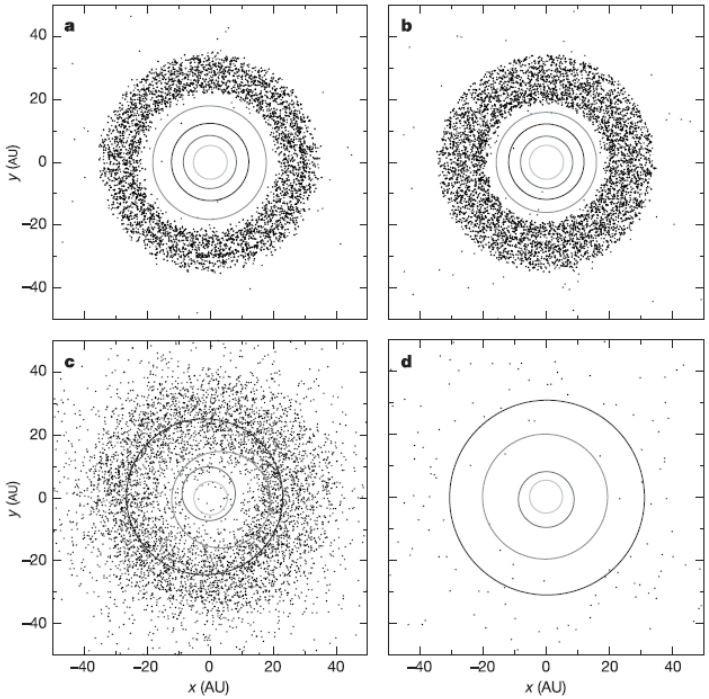
Melosh (1990)

クレーター年代学

- クレーター数密度と基盤岩の結晶化年代に相関
- 基盤岩の年代を知らなくても、クレーター数密度から地形形成年代が推定できる
- 約35～40億年前までは高フラックス
  - 隕石重爆撃
  - 衝突フラックスは単調減少？それとも大激変 (Tera et al., 1974)？

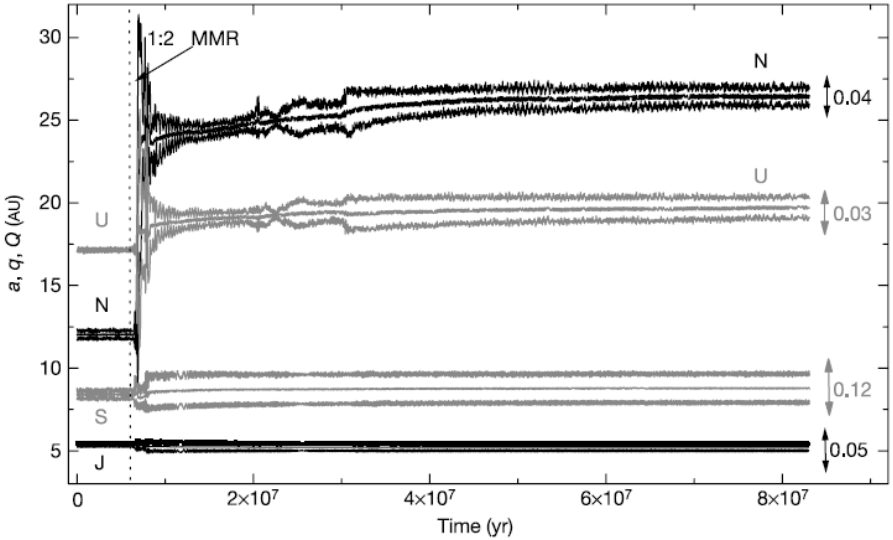






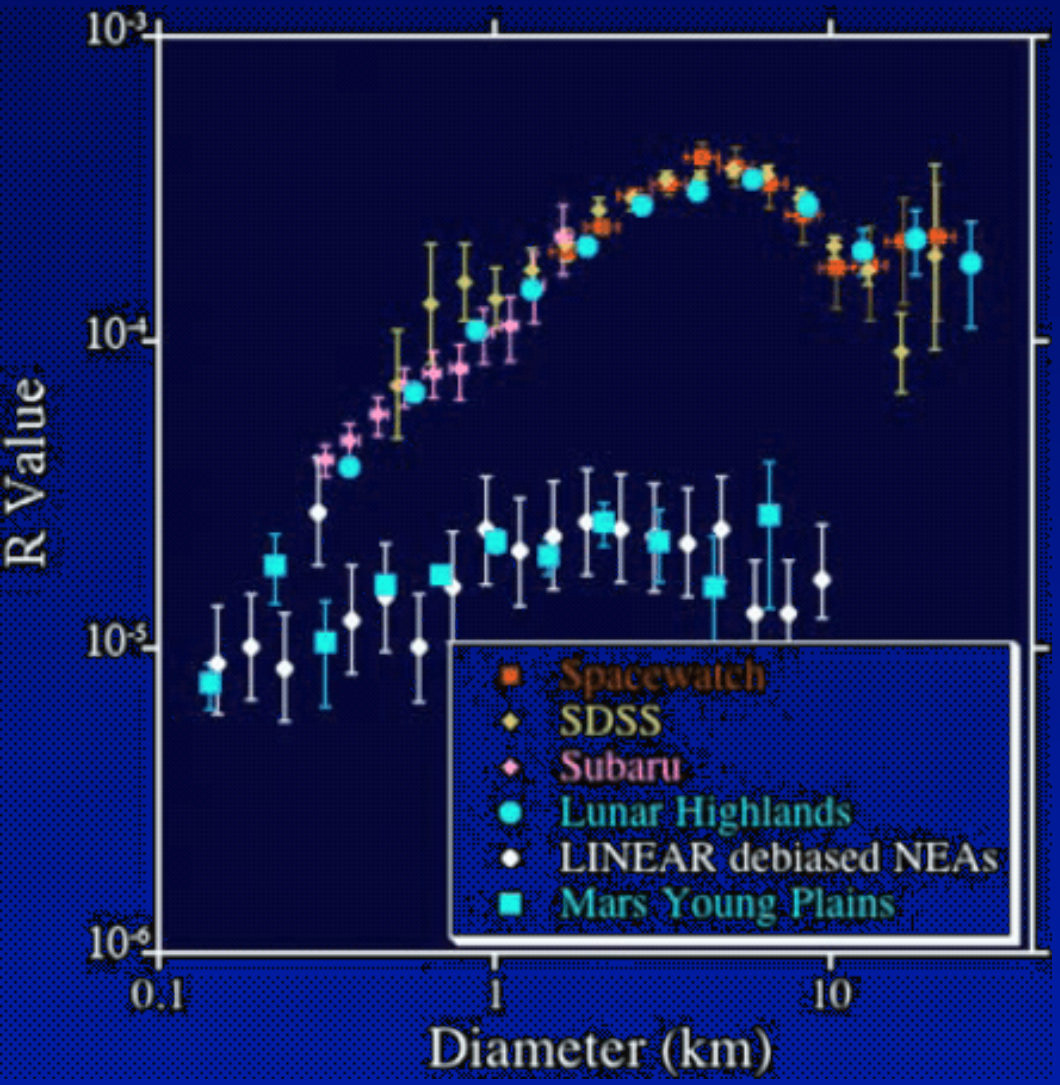
衝突率の現時点での不確定性 (長他，2012)

- 後期重爆撃の誘因として惑星大移動が有望
- 月衝突史=小天体フラックス変遷の解明は、太陽系広域の初期ダイナミクスの理解の鍵



惑星大移動のシミュレーション例
Gomes et al. 2005; Tsiganis et al. 2005

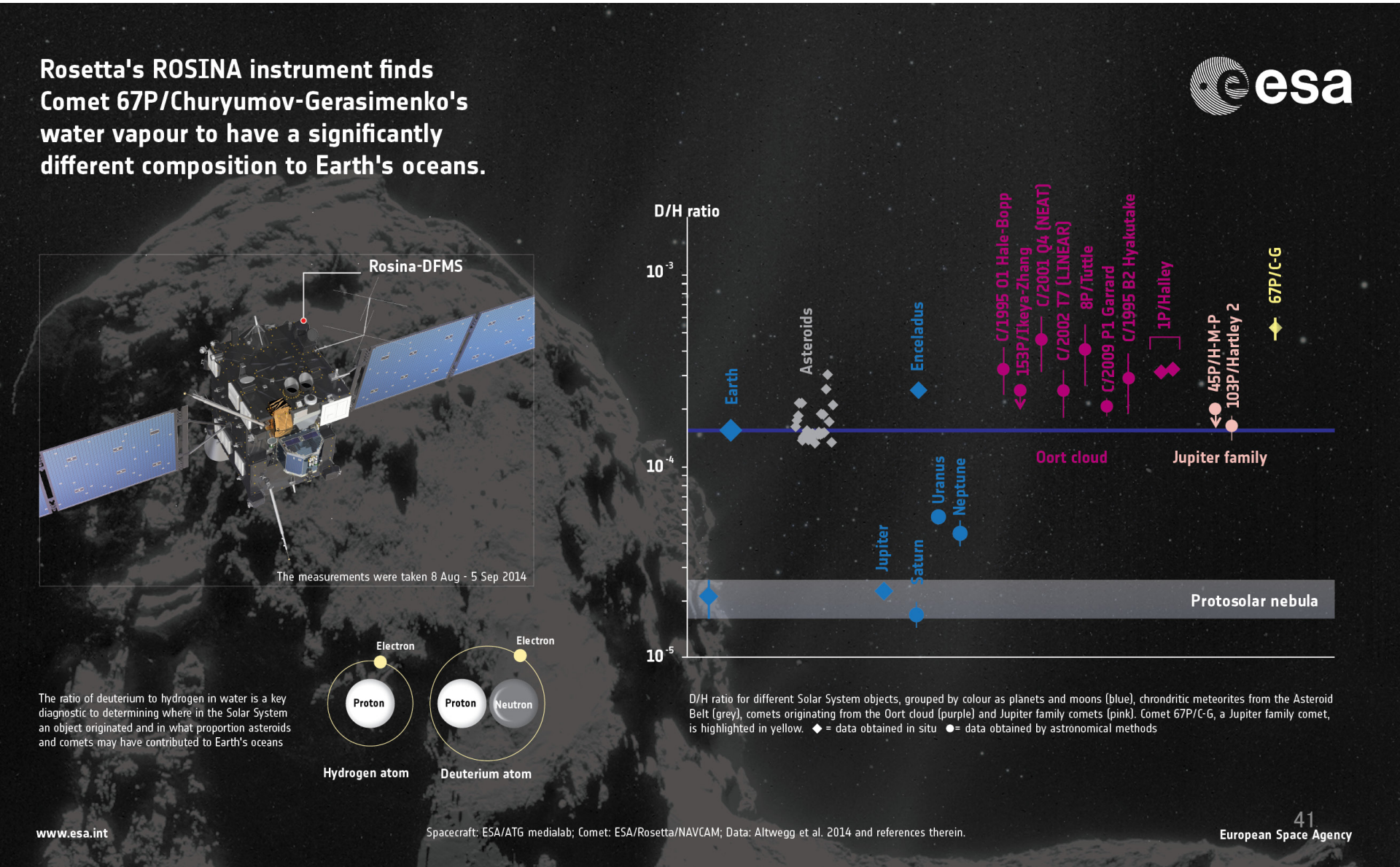
重爆撃天体は
メインベルト小惑星らしい



Strom, Malhotra, Ito et al (2005)

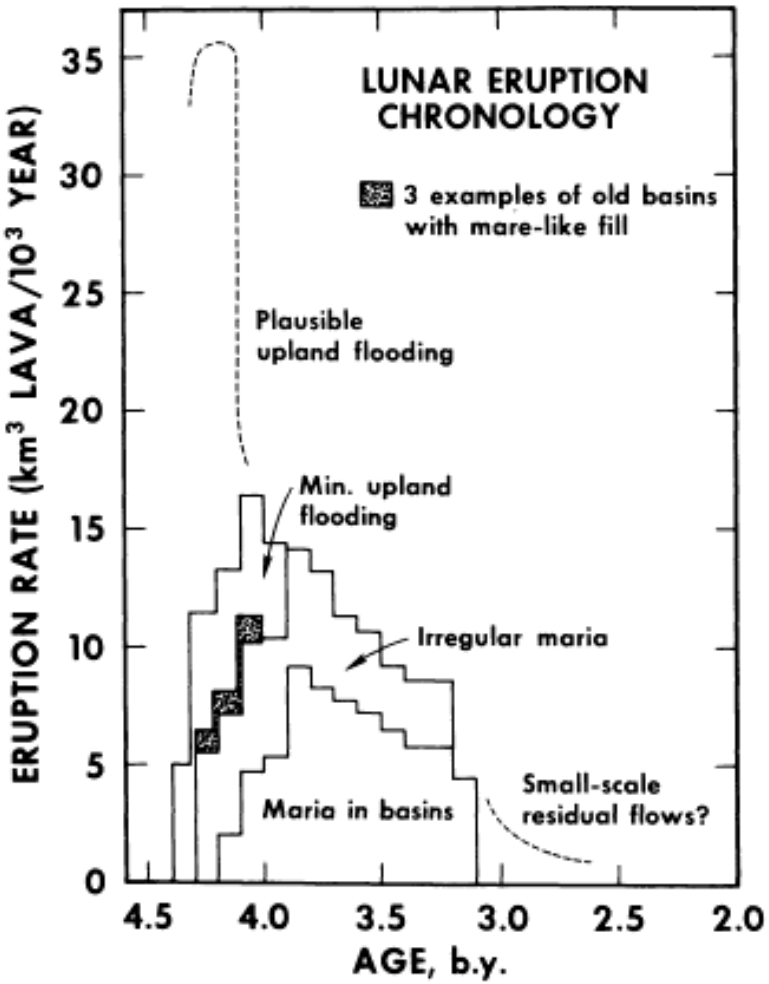
- 古い地域と新しい地域ではクレーターのサイズ頻度分布がまったく違う
  - 内惑星に共通した特徴
- 古い地域のクレータサイズ頻度分布は小惑星のサイズ分布と合致
  - 小惑星をサイズによらず満遍なく散乱させた過程があるはず＝惑星大移動
- 新しい地域は近地球小惑星のサイズ分布と合致する
  - 小さな小惑星が選択的に散乱されている＝ヤーコフスキー効果（日射が原因で起こる長期的軌道進化）

地球海水のD/H比は彗星よりも隕石（メインベルト小惑星）に近い



月の熱進化

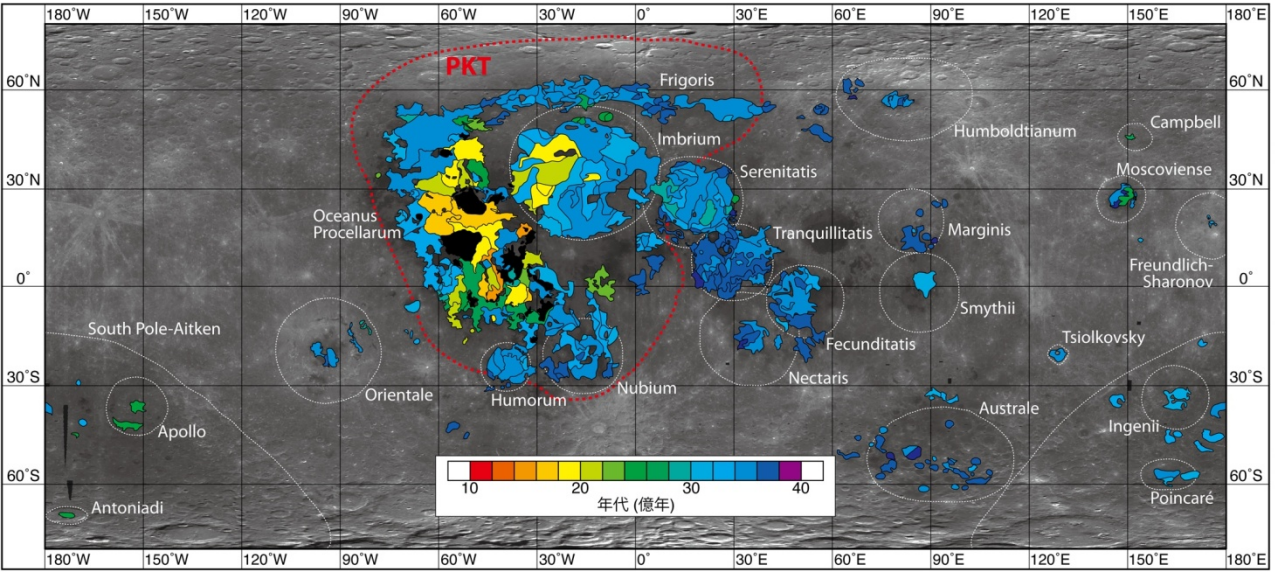
- 高地の岩石：44-45億年前
  - 4456±40 Maが結晶化年代の最古記録 (Norman et al., 2003)
  - 月はこれより前にできた
  - 衝撃変成年代を示すと考えられるAr-Ar年代は39-40億年前に集中(Nyquist, 1982など)
- 海の玄武岩：29～39億年前に集中

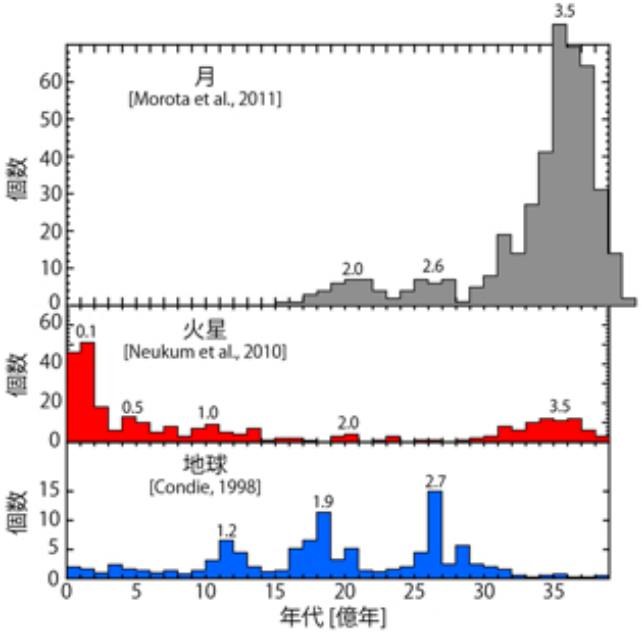


BVSP (1981)

月のマグマ噴出史

- 海の溶岩流にクレータ年代学を適用すると、月の玄武岩マグマ噴出は35億、26億、20億年前にピークを持つ
- 月は単調に冷えたのではない
- 深部に熱源が存在するはず





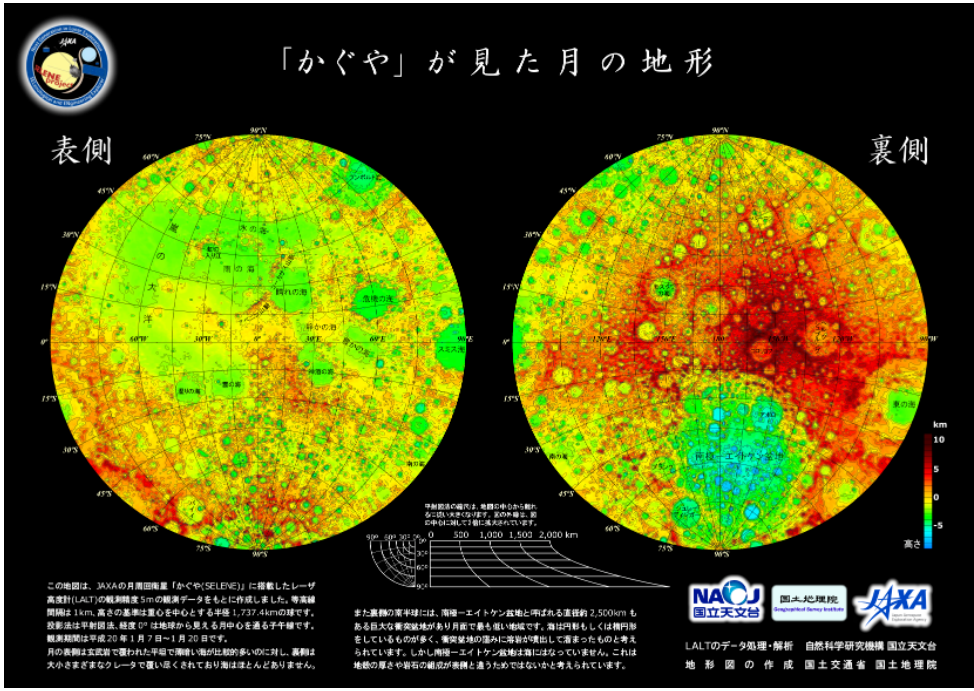
海の溶岩の噴出年代：Morota et al. (2011)

全球マッピングと月熱史

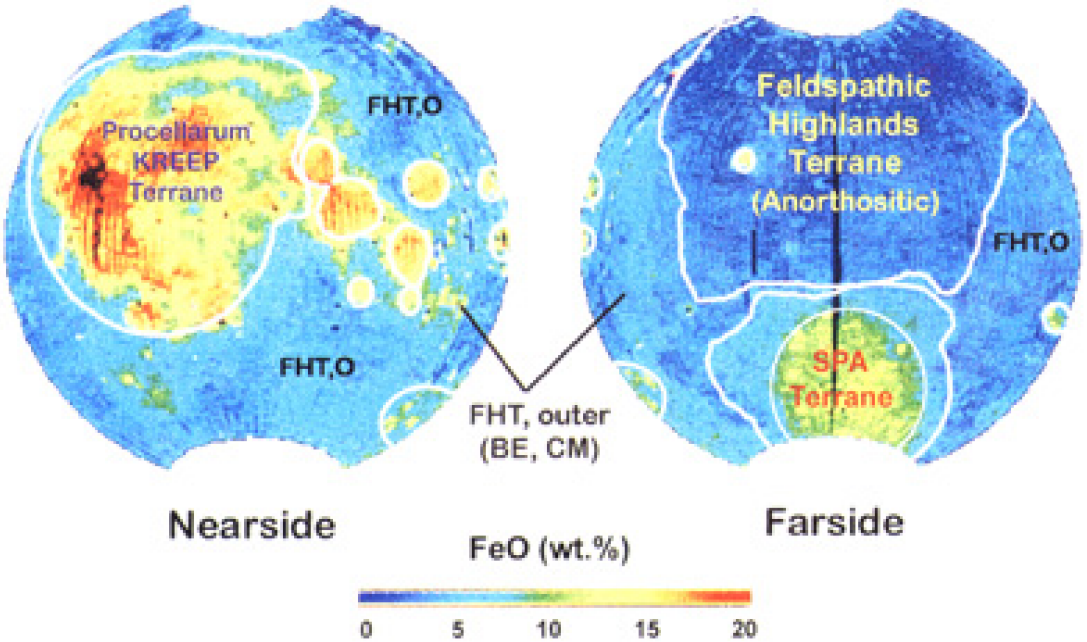
- Clementine (1994), Lunar Prospector (98-99), Kaguya (07-09), …
  - アポロではなされなかった地形・表面組成・重力の全球マップを作成

重要な成果

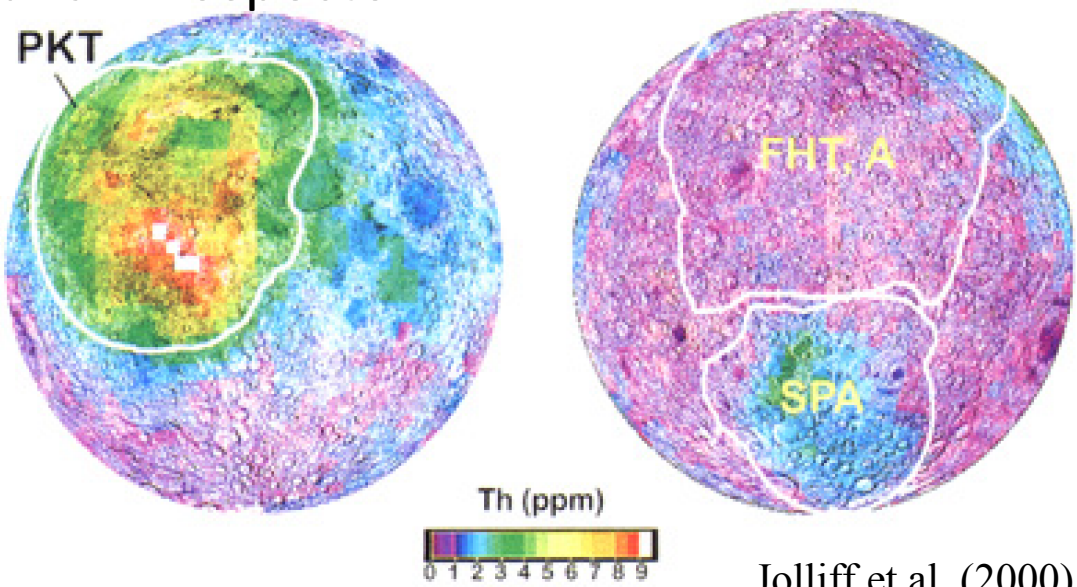
- 三大地質区の発見
- 裏側の重力場から表裏非対称性の「根深さ」を証明
- 月の化学成層の再考を促す新データ
- 海の火成活動史の精細化



Clementine



Lunar Prospector



Jolliff et al. (2000)

三大地質区

PKT (嵐の大洋周辺)

- Th濃度大
- マグマオーシャン残渣濃集
- 海の火山活動が活発

SPA (裏側南極巨大クレータ周辺):

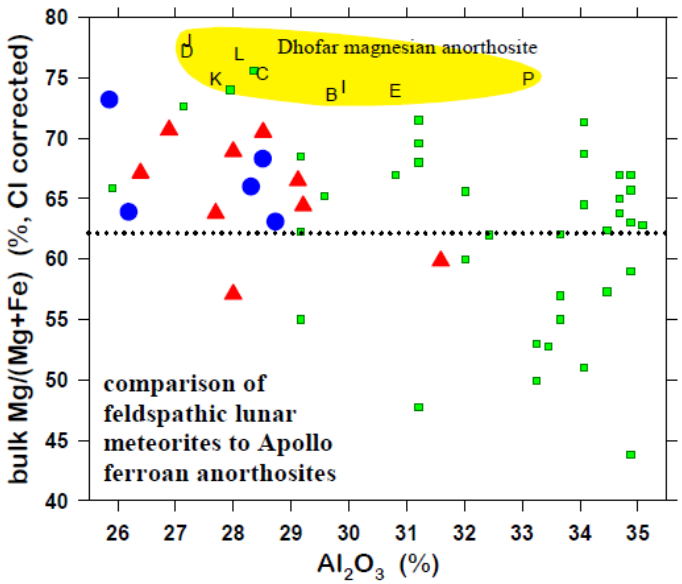
- PKTよりFe・Th乏しいが輝石とかんらん石に富む
- 巨大隕石衝突により地殻とマントルが混合？

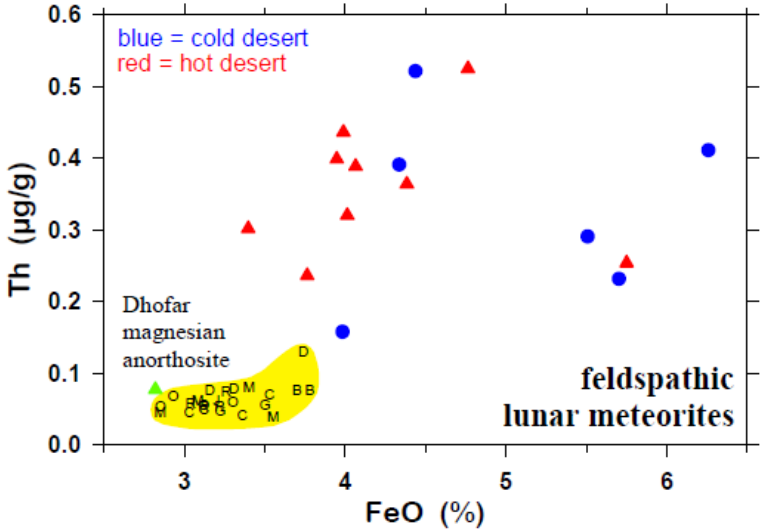
FHT (PKTとSPA以外):

- 斜長岩地殻が分布
- 従来の「高地」に相当

月隕石も新たな地質区の存在を示唆

- これまで約100個 (総重量≒32kg) 発見
  - アポロ試料の組成多様性からはみ出すものが見つかっている
- Mgに富み、Thに欠乏した斜長岩が存在
  - 裏側の地殻の破片と思われる



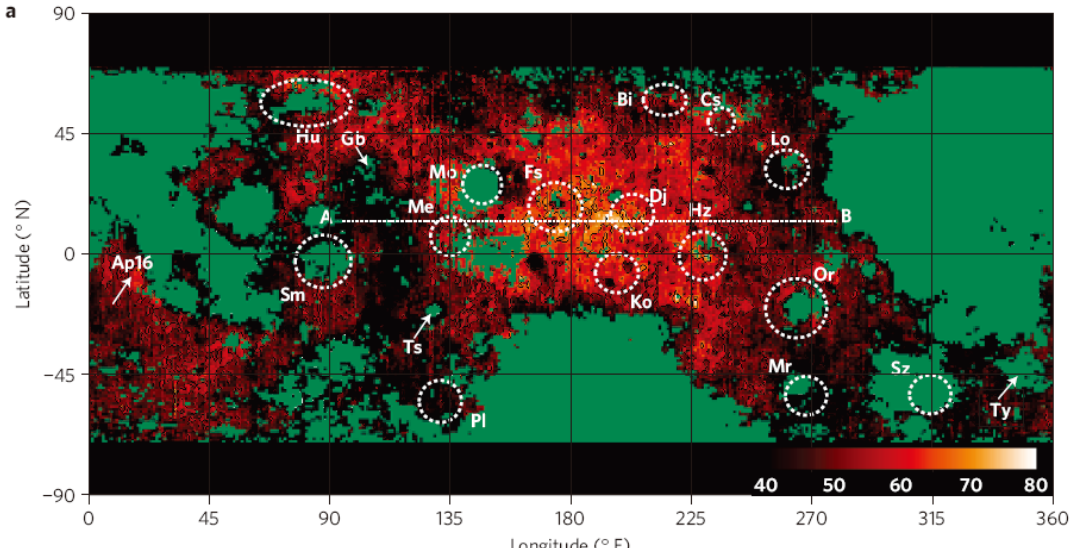


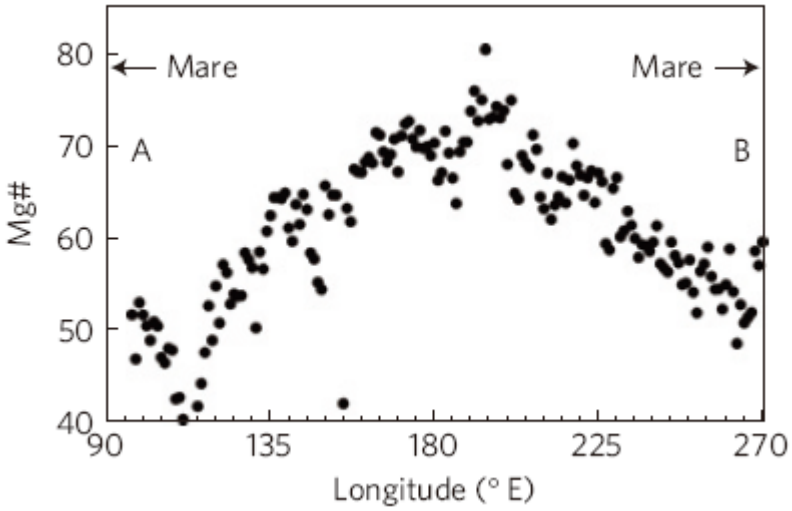
Korotev (2006)

月の斜長岩地殻の組成勾配

Mg#=Mg/(Mg+Fe)

- ほぼ真裏に向かって苦鉄質鉱物のMg#が増加
  - かぐや分光マッピング
- 斜長岩地殻は裏側から成長したことを示唆

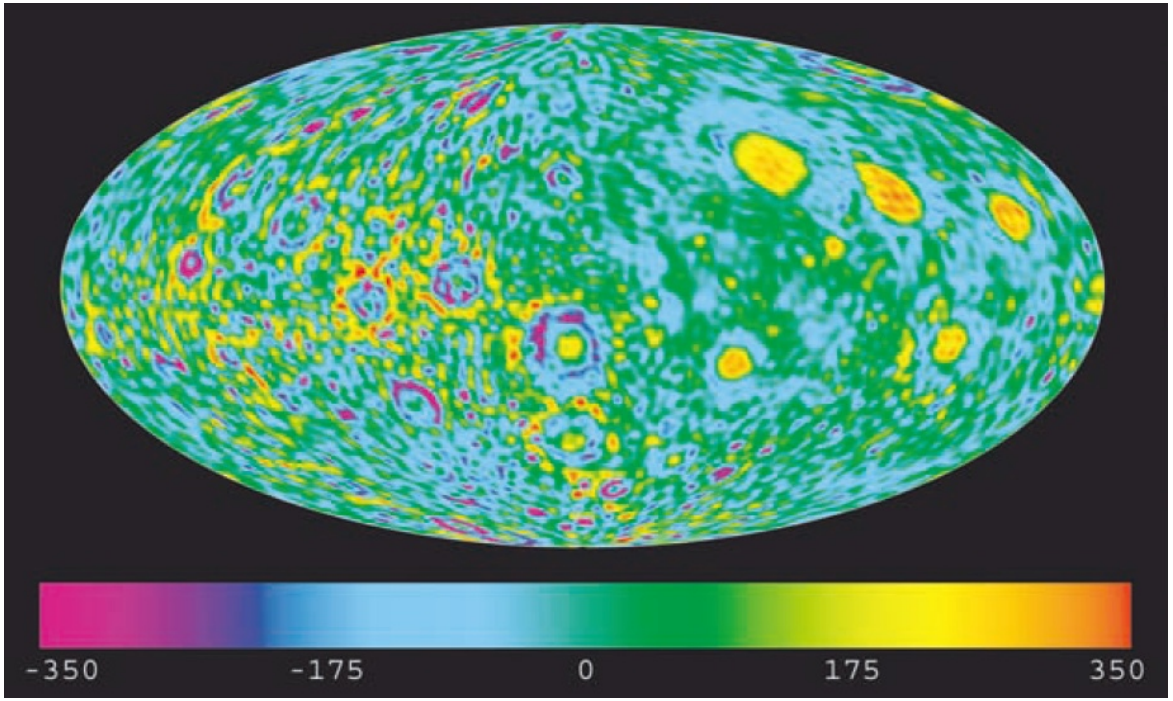




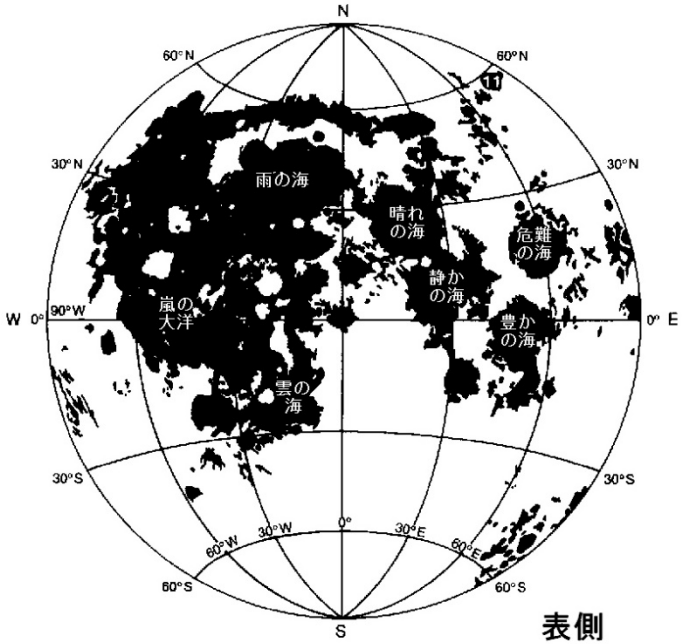
Ohtake et al. (2012) Nature GeoSci.

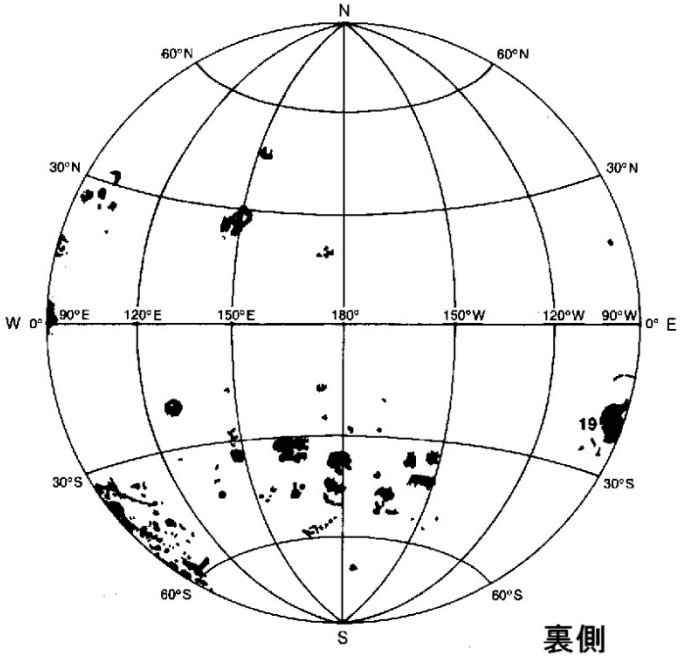
裏側の重力場と月の二分性

- リレー衛星を用いたKaguya探査で初めて明らかに
- 月の裏側はクレーター形成後のアイソスタシー回復弱→急速に冷却



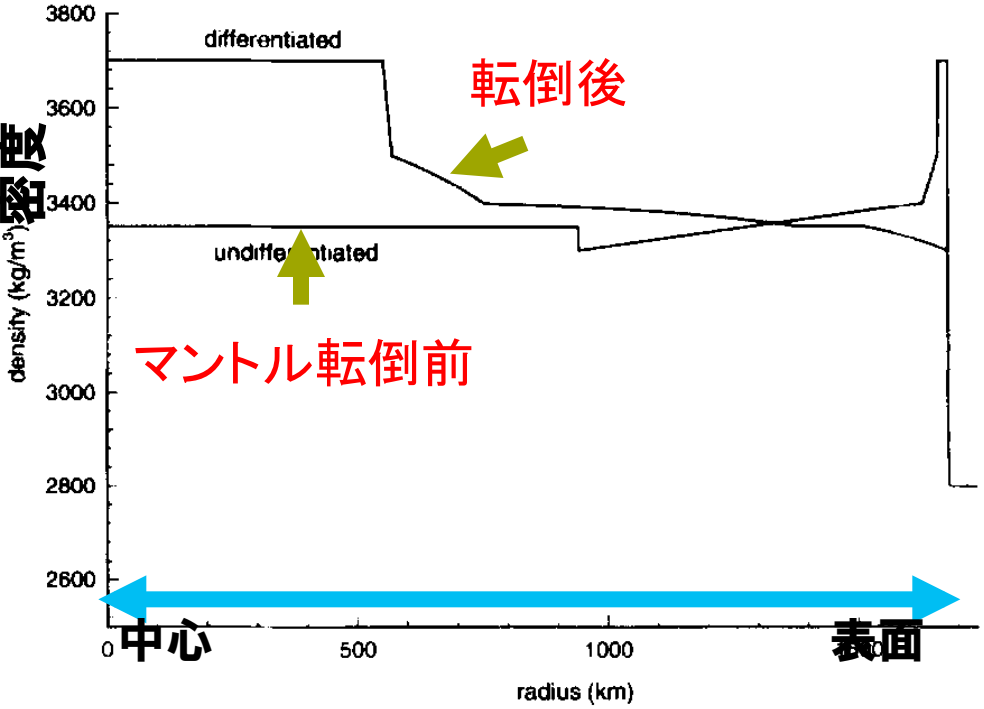
月のフリーエア異常地図：Namiki et al. (2009) Science

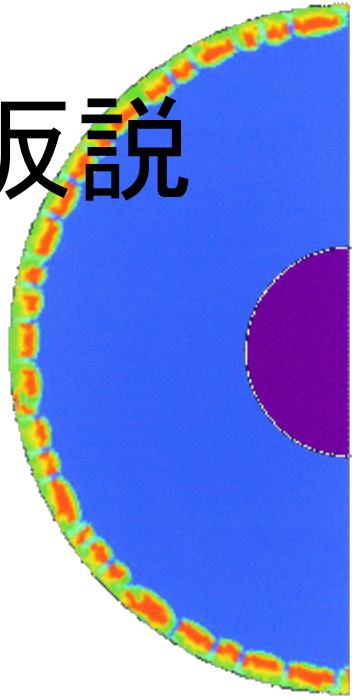




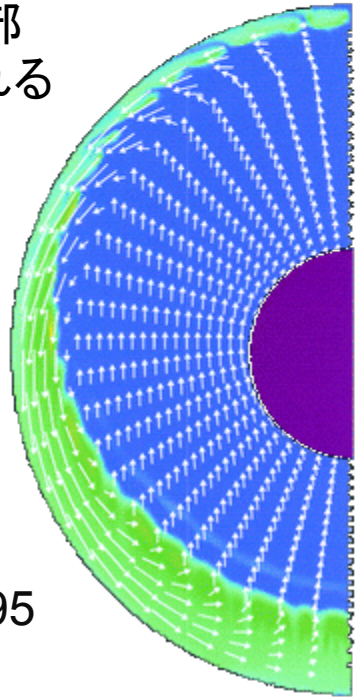
月初期進化のマントル転倒仮説

- マグマオーシャンの沈積岩は上ほど重い
- 月のマントルは転倒
- 斜長岩地殻・熱源元素分布の表裏非対称を作る
- 海の玄武岩の噴出を数億年間ほど遅らせる
- 海の玄武岩の深い溶融深度（400-600km）と調和

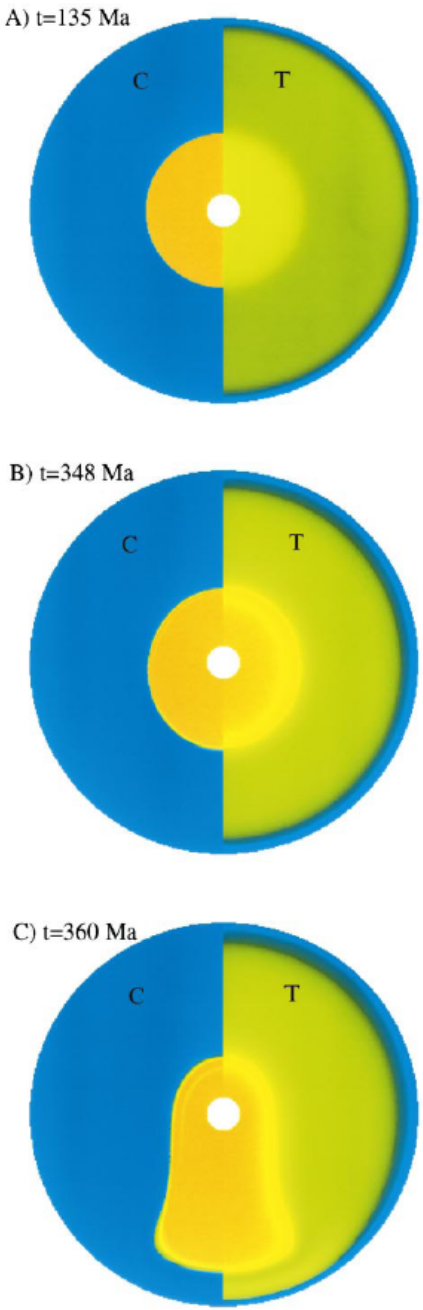




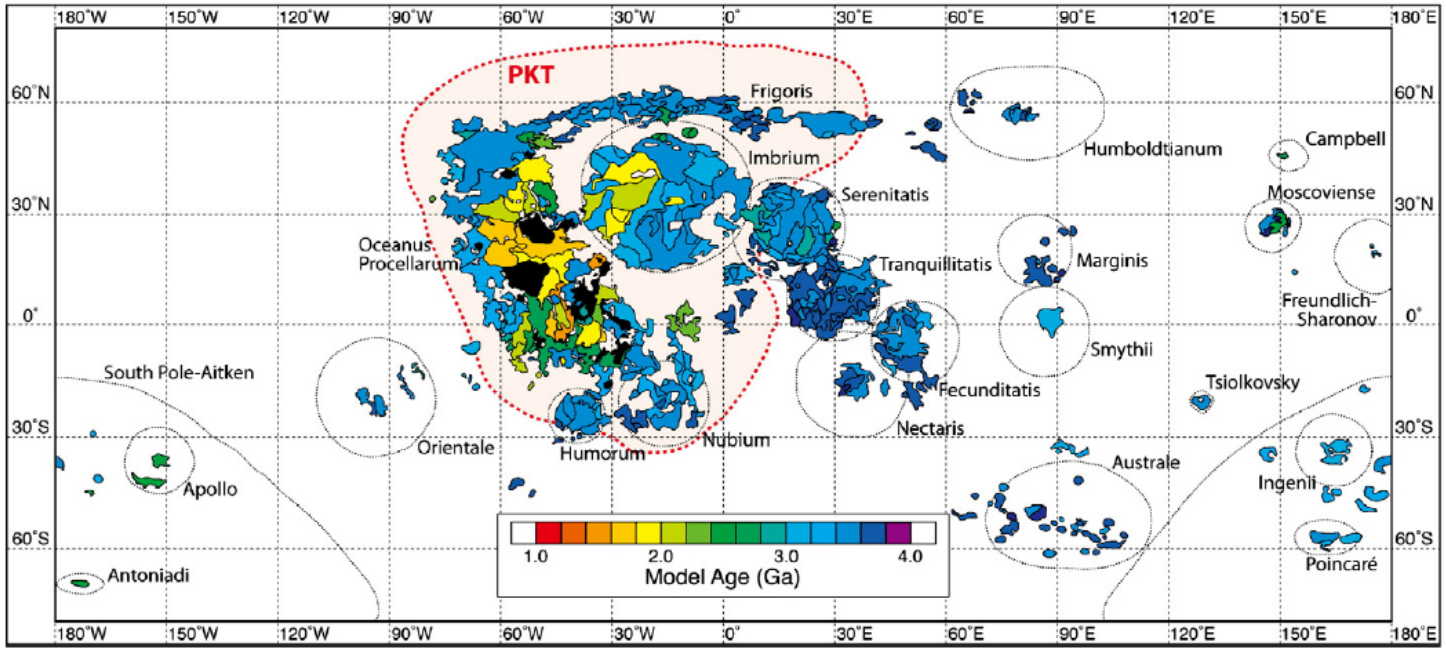
Mgに富む鉱物が地殻底部に存在することが予想される



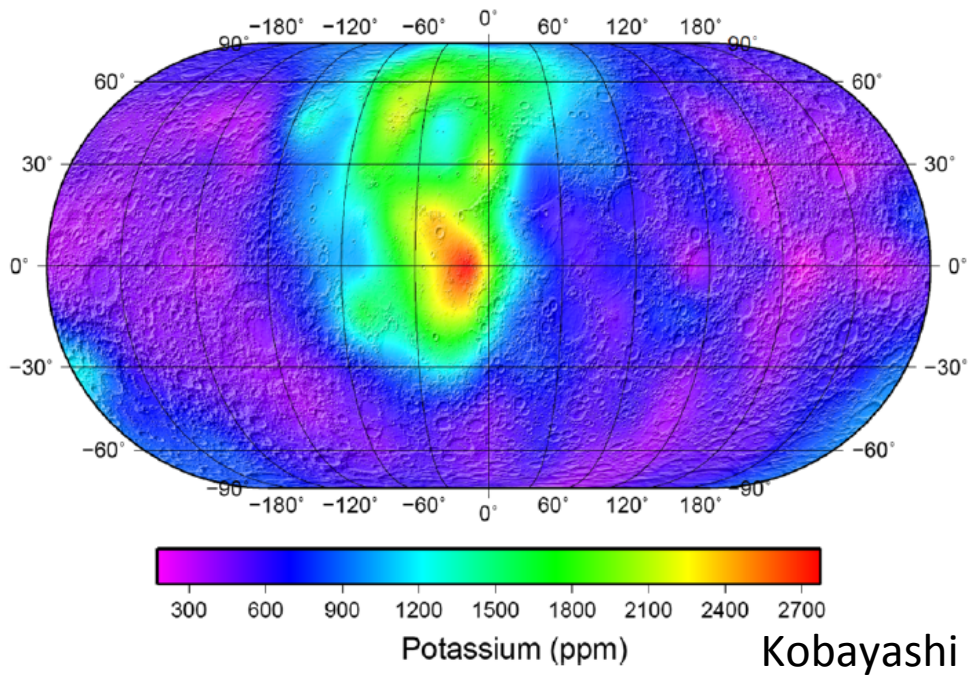
Hess and Parmentier 1995
Permentier et al., 2002



Zhong et al. (2000)

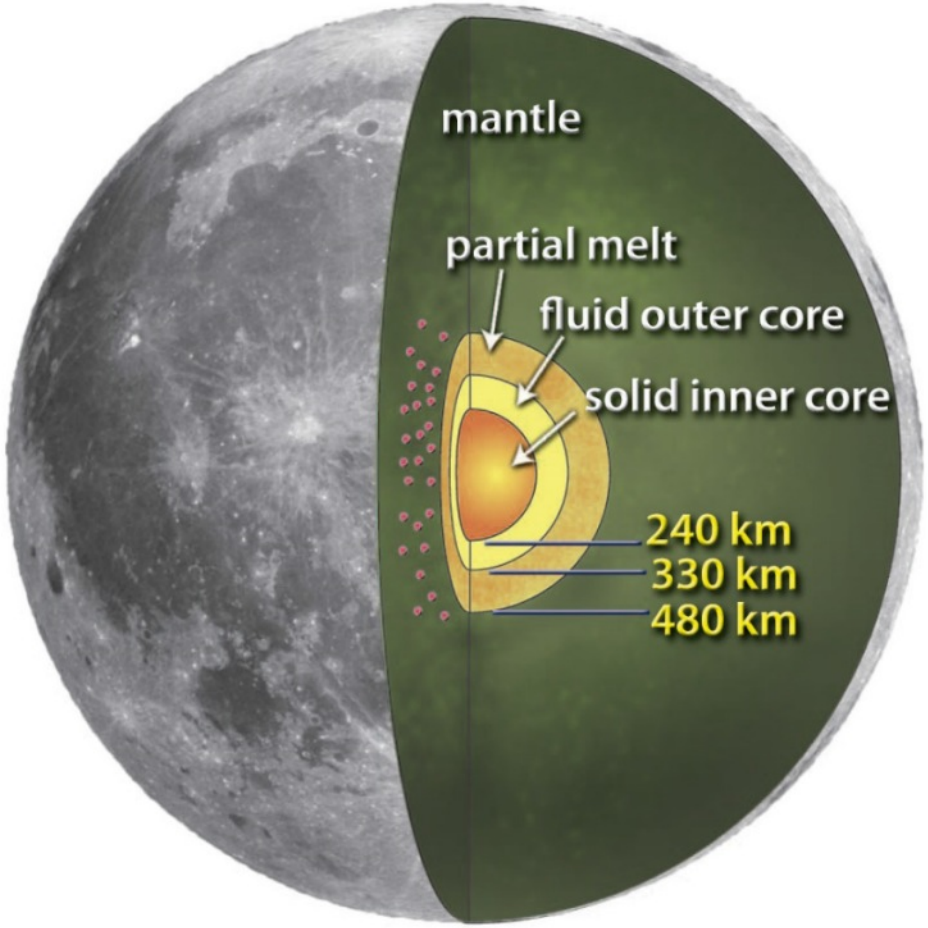


Morota et al. (2011)



Kobayashi et al. (2010)

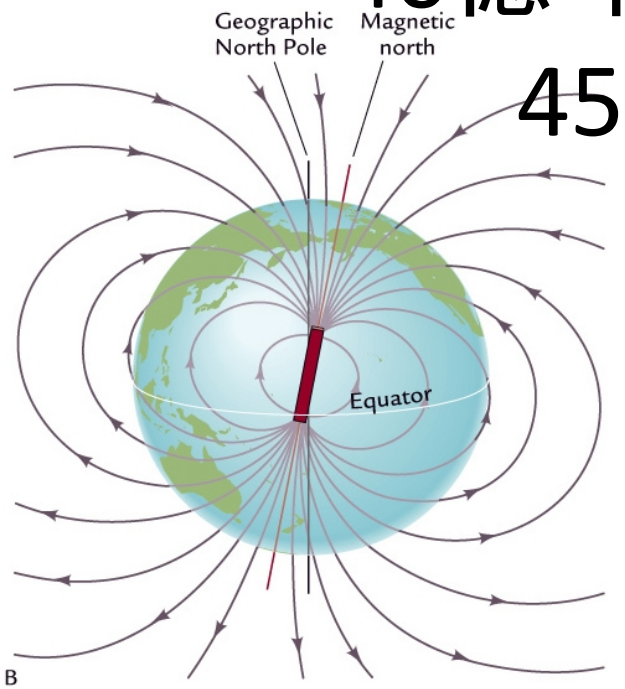
月の核

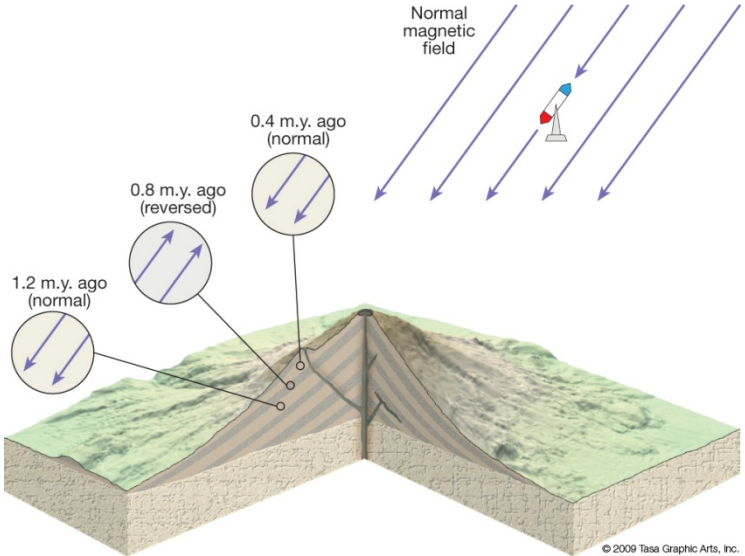


Weder et al. (2011)

- 深発月震、地震波減衰
  - 岩石マントルの部分融解? (東・片山，2015)
  - マントル転倒仮説と調和的
- 金属核の有無、物質、物理状態については制約に乏しい
- 月地殻残留磁化
  - 衝突誘起説もあるが、中心核ダイナモの可能性もある
  - プルーム上昇による核ダイナモの一時起動？

40億年前の月の自転軸は45度傾いていた？

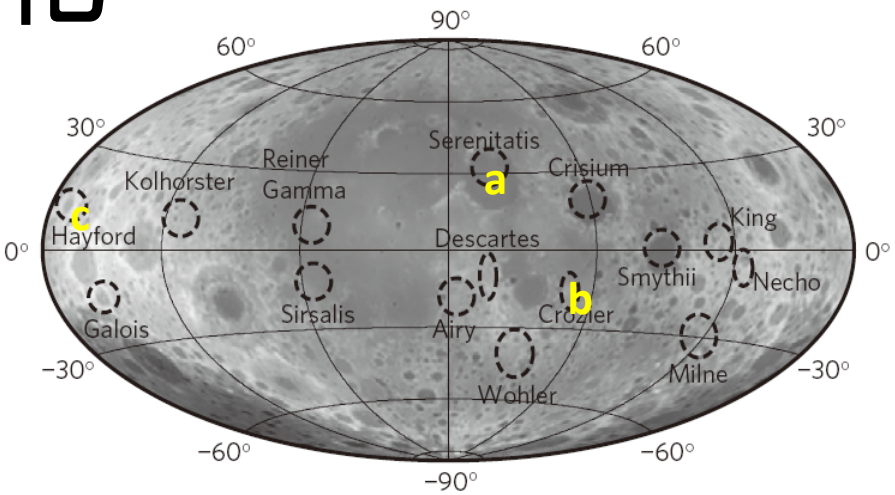


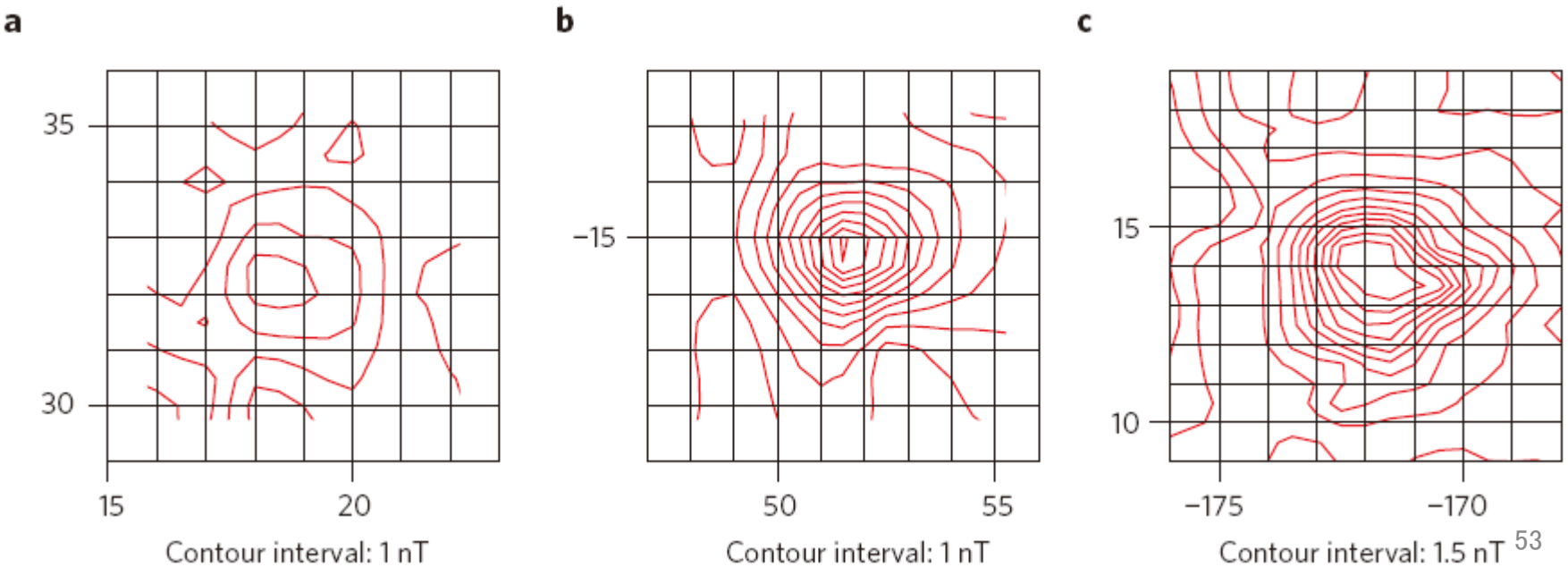


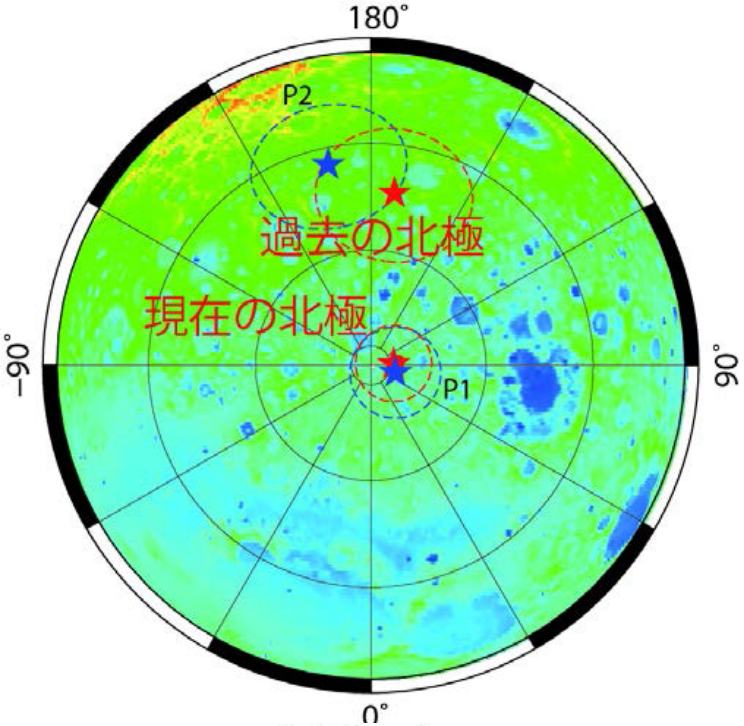
かぐやとルナ・プロスペクタの観測データから過去の月の磁場を突き止めた

月の地殻残留磁化

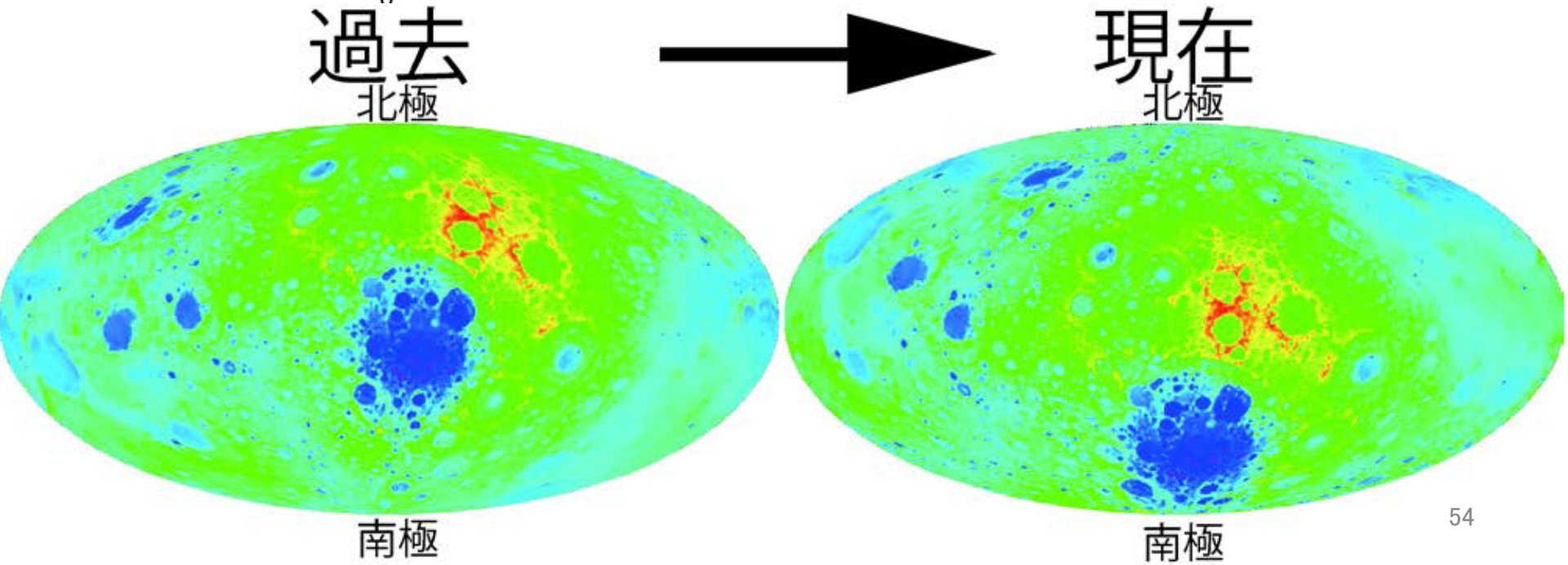
- 古い衝突盆地の磁場は月中心双極子磁場による磁化で説明できる
  - かぐや磁力計データ
  - Takahashi et al. (2014)
  - 核ダイナモを示唆







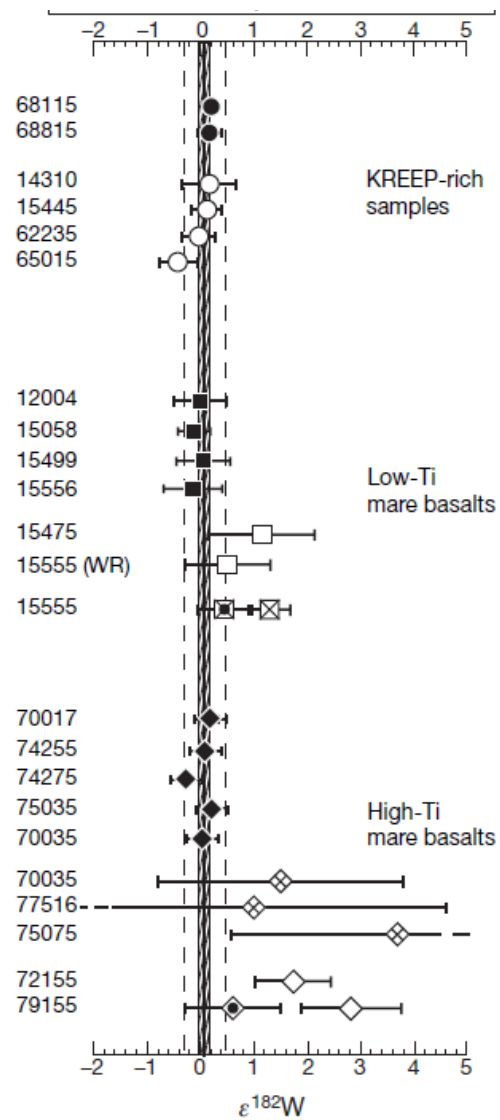
- 約40億年前に極移動が起きたことが示唆される
- 理由は不明
  - 巨大衝突盆地の形成
  - 地殻の水平移動
  - 外力の作用



月の核形成

- ^{182}Hf-^{182}W法による核形成年代の推定
  - 90年代後半からトライ
  - 一時期，月は地球よりも古い，とするデータも発表された

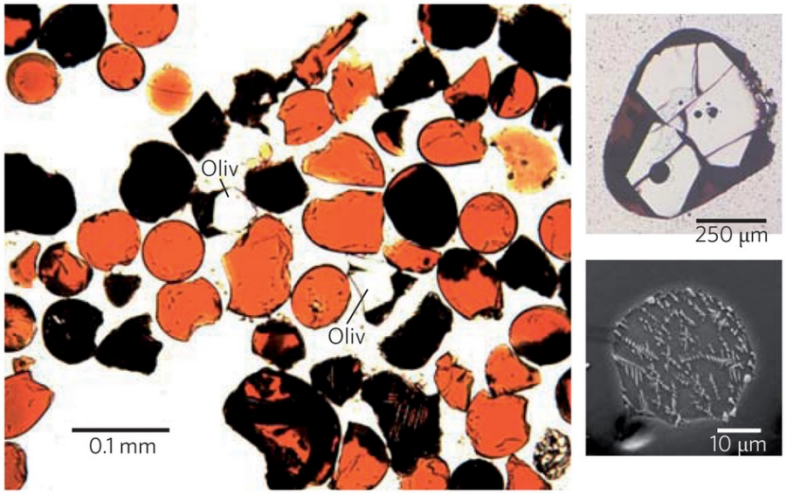
  Touboul et al (2007) 地球マントルと月でW同位体は同一．両者の核形成は太陽系形成から約6千万年後
- 解釈に不確定要素が残っていることに注意
  - 初期太陽系での^{182}Hf存在度の一様性の仮定はどこまで正しいか
  - 物質の付加等、コア形成以外の過程でW同位体比が変わる可能性

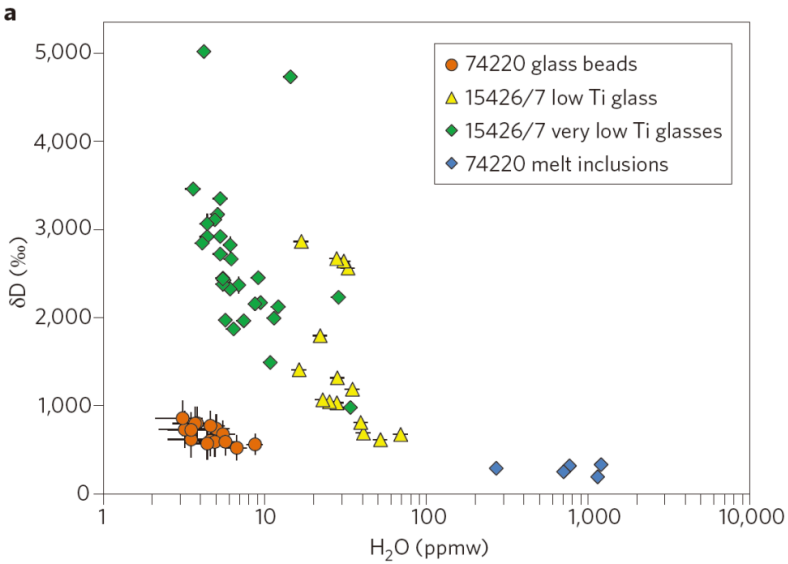


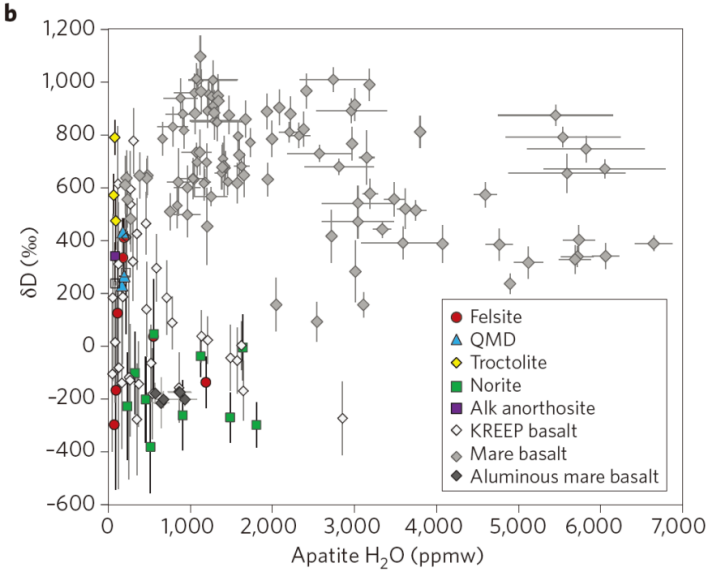
$$\varepsilon_W = \{^{182}W/^{184}W_{sample} - ^{182}W/^{184}W_{standard} - 1\} \times 10^4$$

月深部の水

- アポロ月試料・月隕石の精密分析
- 深部起源火山ガラスからのH_2Oの検出
  - Alberto et al (2008)
  - 月深部マントルは地球の枯渇マントル並みに水分を含む
- 同位体も地球マントルに近い
  - Robinson and Taylor (2014)







まとめ

月の起源と進化の時系列

- 巨大衝突と月集積 45億年前
- マグマオーシャンの形成と分化 45億年前
- 重爆撃・大激変（？）～40億年前
- 海の火成活動 40億～20億年前

潮汐進化

重要な仮説と未知要素

- 巨大衝突仮説：地球との同位体相似性の起源、物質分別
- マグマオーシャン仮説：深さ、化学組成、分化過程
- 大激変・惑星大移動仮説：タイミング、衝突天体の起源
- マントル転倒仮説：熱源分布、月深部物質・物理状態