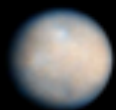


Differentiation of the Moon's Magma Sea and Vesta's Magma Ocean

Ryosuke NAKAMURA(AIST)

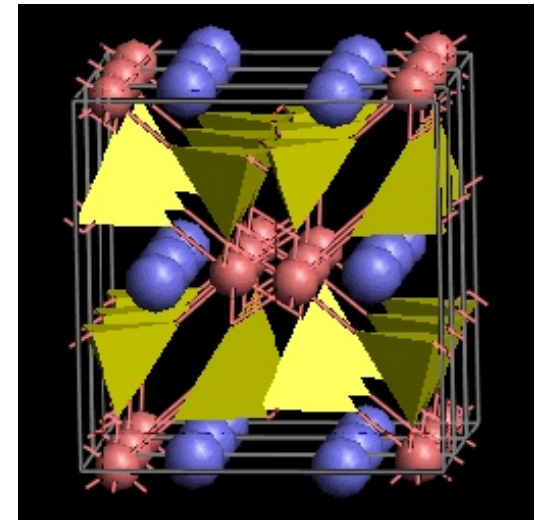
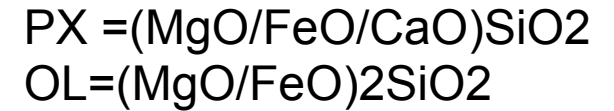
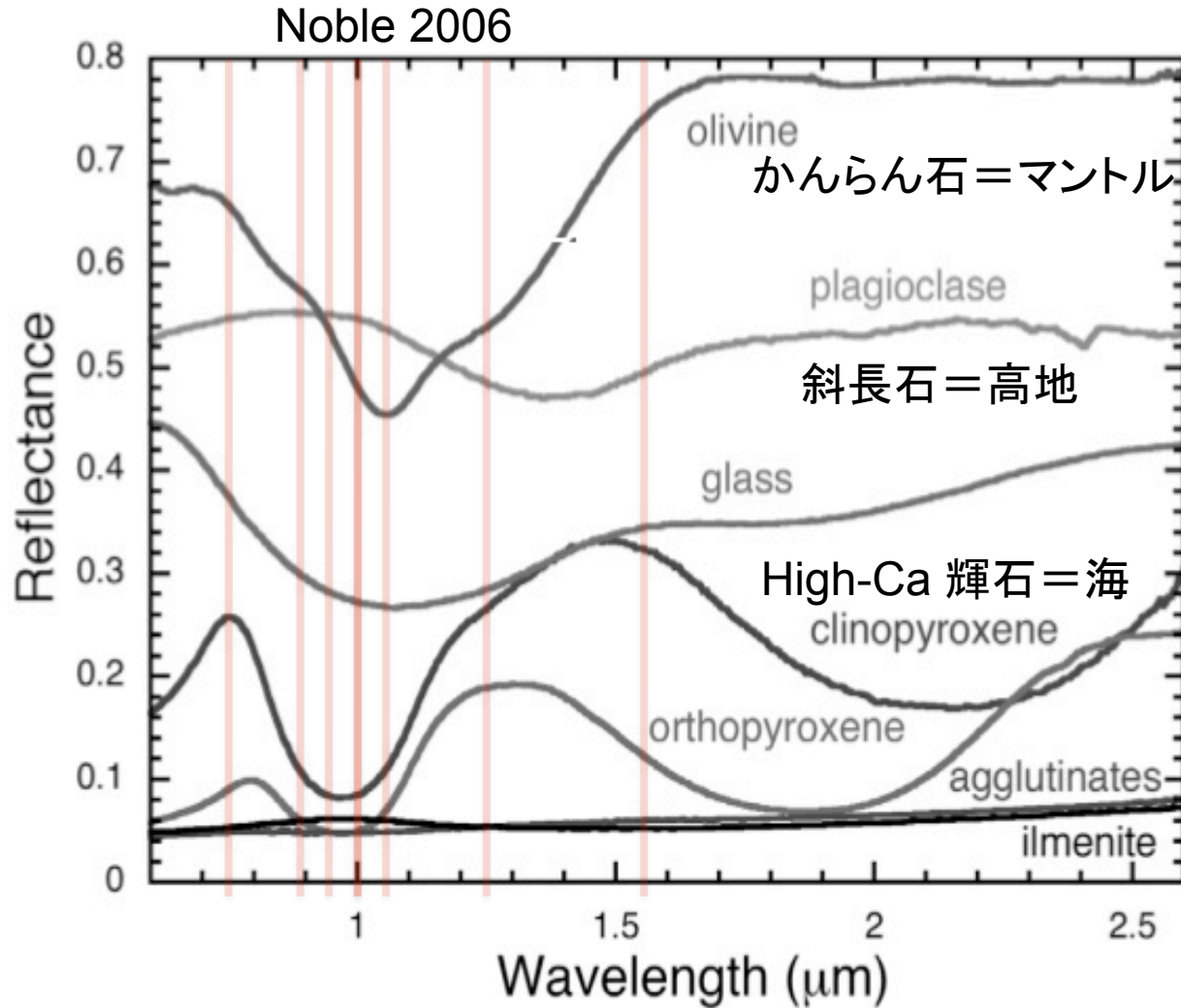


小惑星 Ceres
(Vesta はこの半分の大きさ)

固体惑星／小惑星の起原と進化

- もともとのバルク組成
 - より具体的にはMg/Fe/Si 比
 - 微惑星の組成～円盤の場所ごとの違い？
- 分化の度合い
 - マグマオーシャンの深さ
 - 核の有無
 - 熱進化のサイズ／組成(同位体)依存性
- 一番割合の大きなマントル組成を可視／赤外線スペクトルから探りたい

Visible-Near-infrared spectra of lunar minerals



1.2 μm = Fe in M1 (red)
1/2 μm = Fe in M2 (blue)

KAGUYA SP: Continuous spectra between 500 ~ 2500 nm (500m/pixel)
KAGUYA MI: Multiband (=9) images with 20m/pixel spatial resolution

Short central wavelengths = Mg-rich Low Ca pyroxene

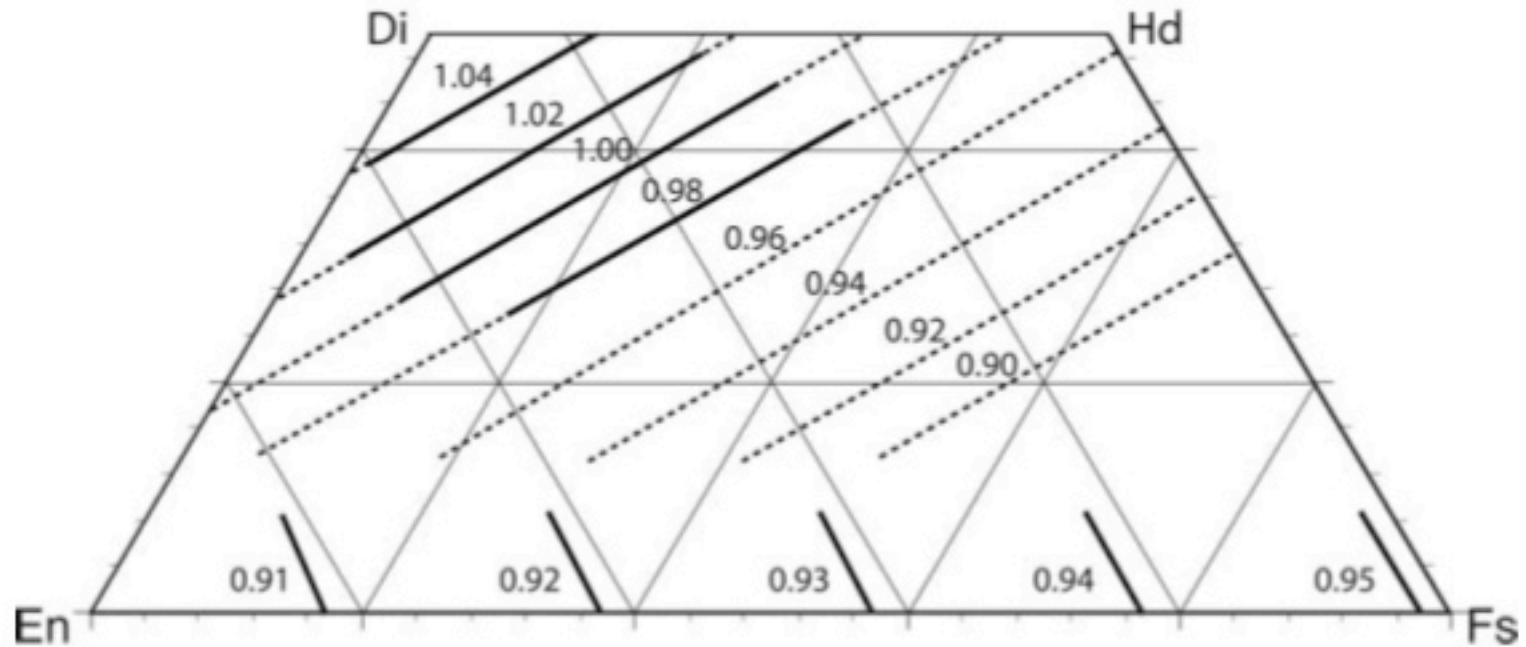


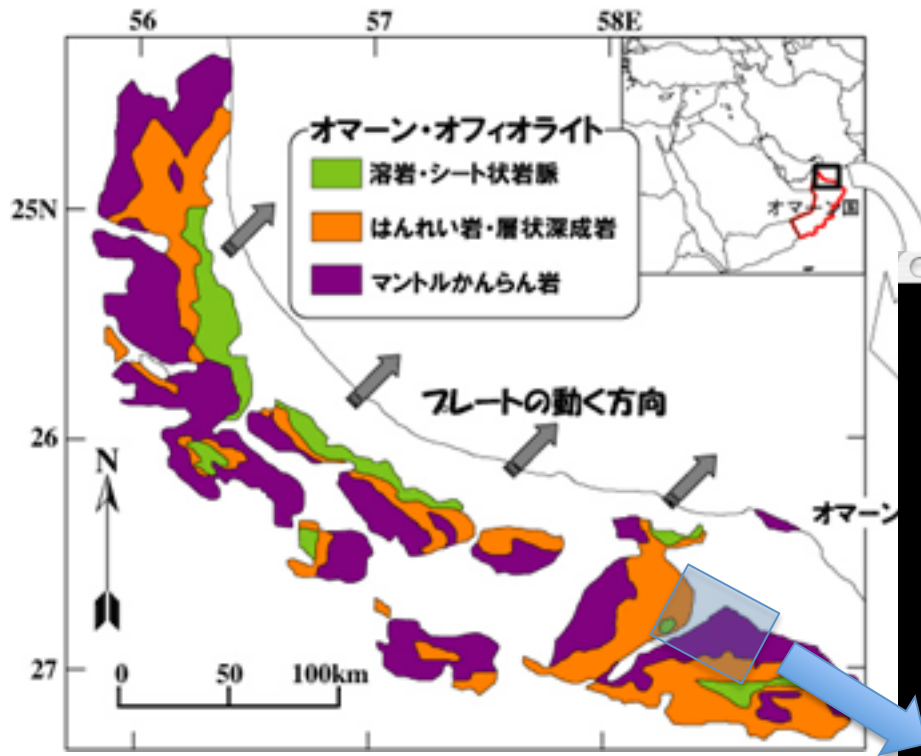
Figure 8. Contours show the variation of the position of the 1 μm in the pyroxene compositional space. Dashed lines indicate areas of low confidence due to a lack of data.

各鉱物のスペクトル特徴

- 斜長石
 - 1.2um あたりに弱い吸収がある
- かんらん石
 - 2um吸収がない
 - 1um 吸収の中心波長は約1.05 um
 - 1.25にも弱い吸収がある
- 輝石
 - 2um吸収がある
 - カルシウムが多いと吸収帯の中心波長が長くなる
 - カルシウムが少ない場合は、Mg/Fe 比が高いほど中心波長が短くなる

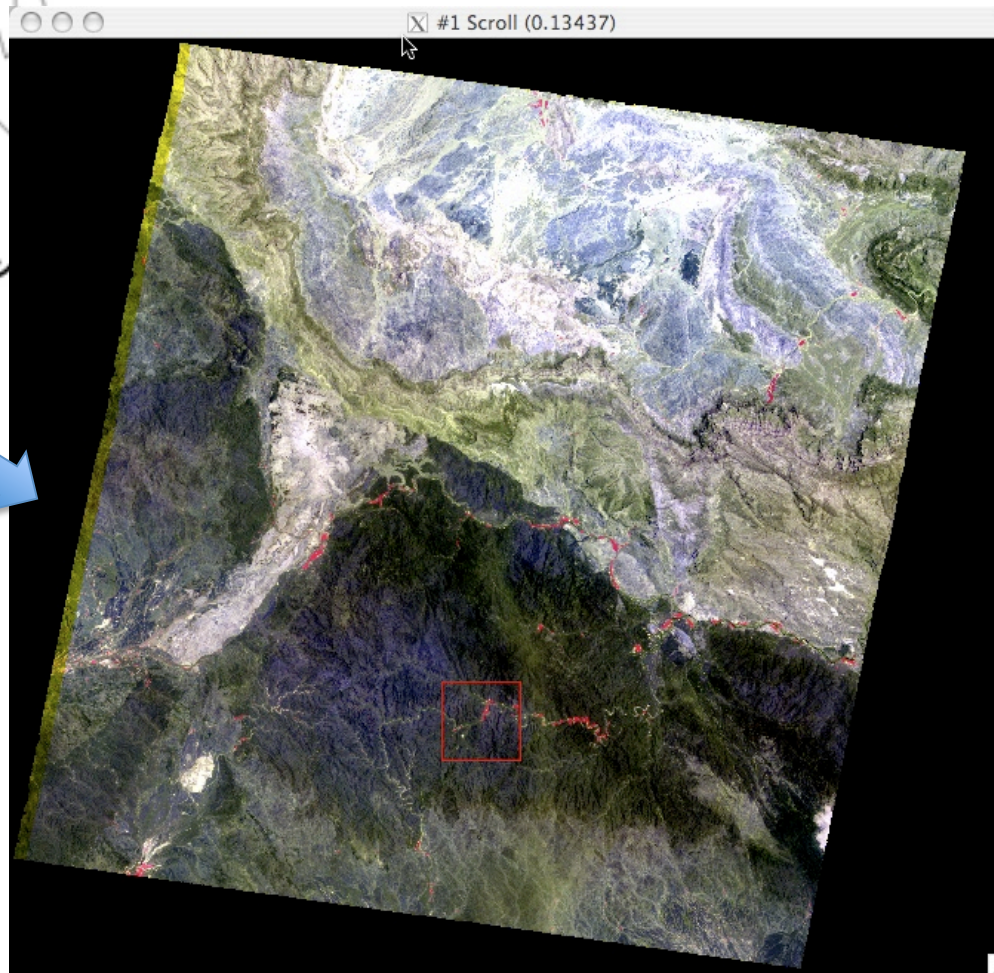
リモートセンシングで地殻の下にある マントルが見える？

- 地球
 - 大陸移動によって地表に絞りだされたマントル～オフィオライト
- 小惑星ベスタ
 - ベスタから来たと考えられているDiogenite隕石はマントル起原？
 - DAWN の最新結果レビュー
- 月
 - 巨大盆地の下に露出？
 - 「かぐや」のスペクトル／画像解析結果紹介



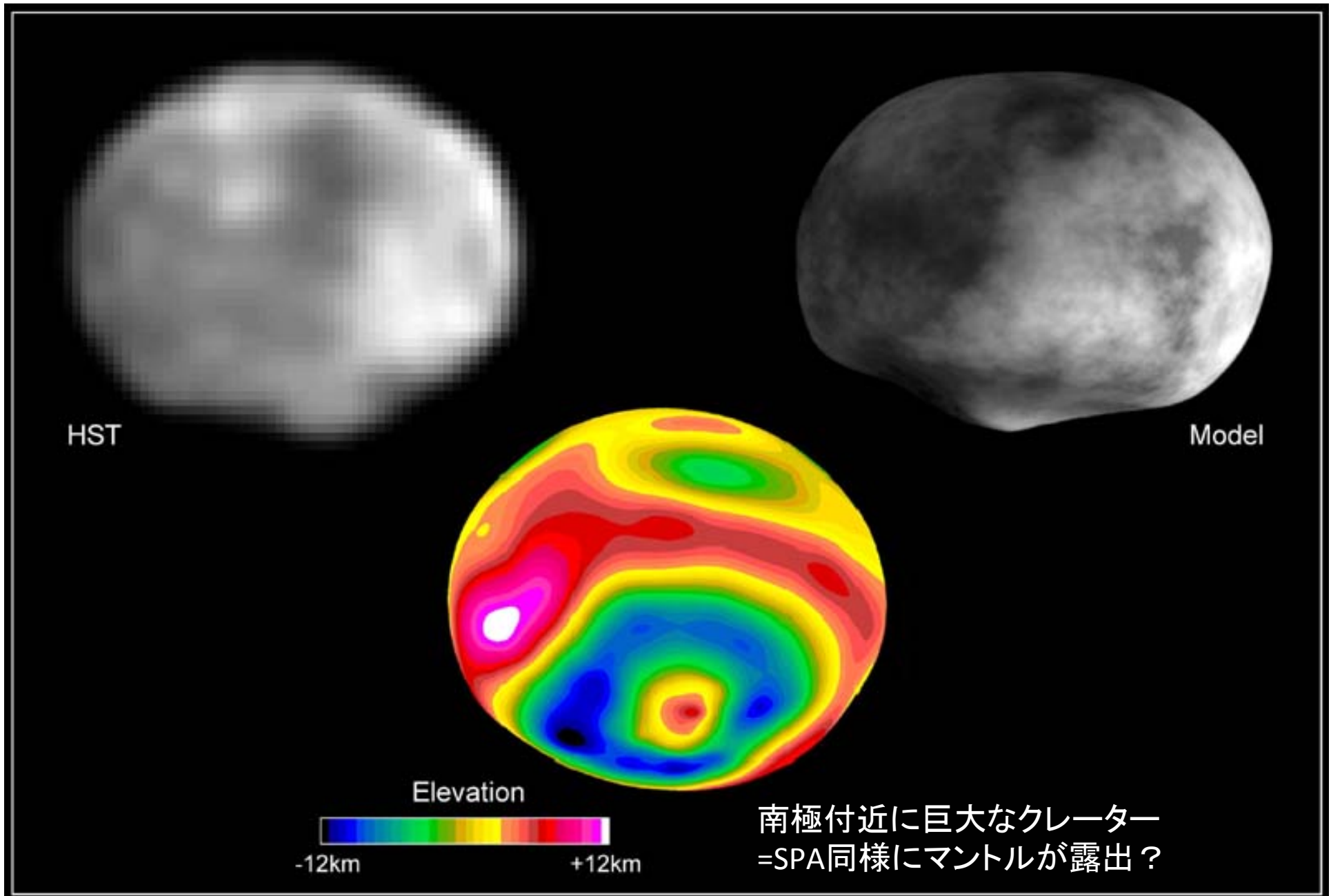
http://dips11.akita-u.ac.jp/odoroki/odoroki_nakami.html

オマーン オフィオライト

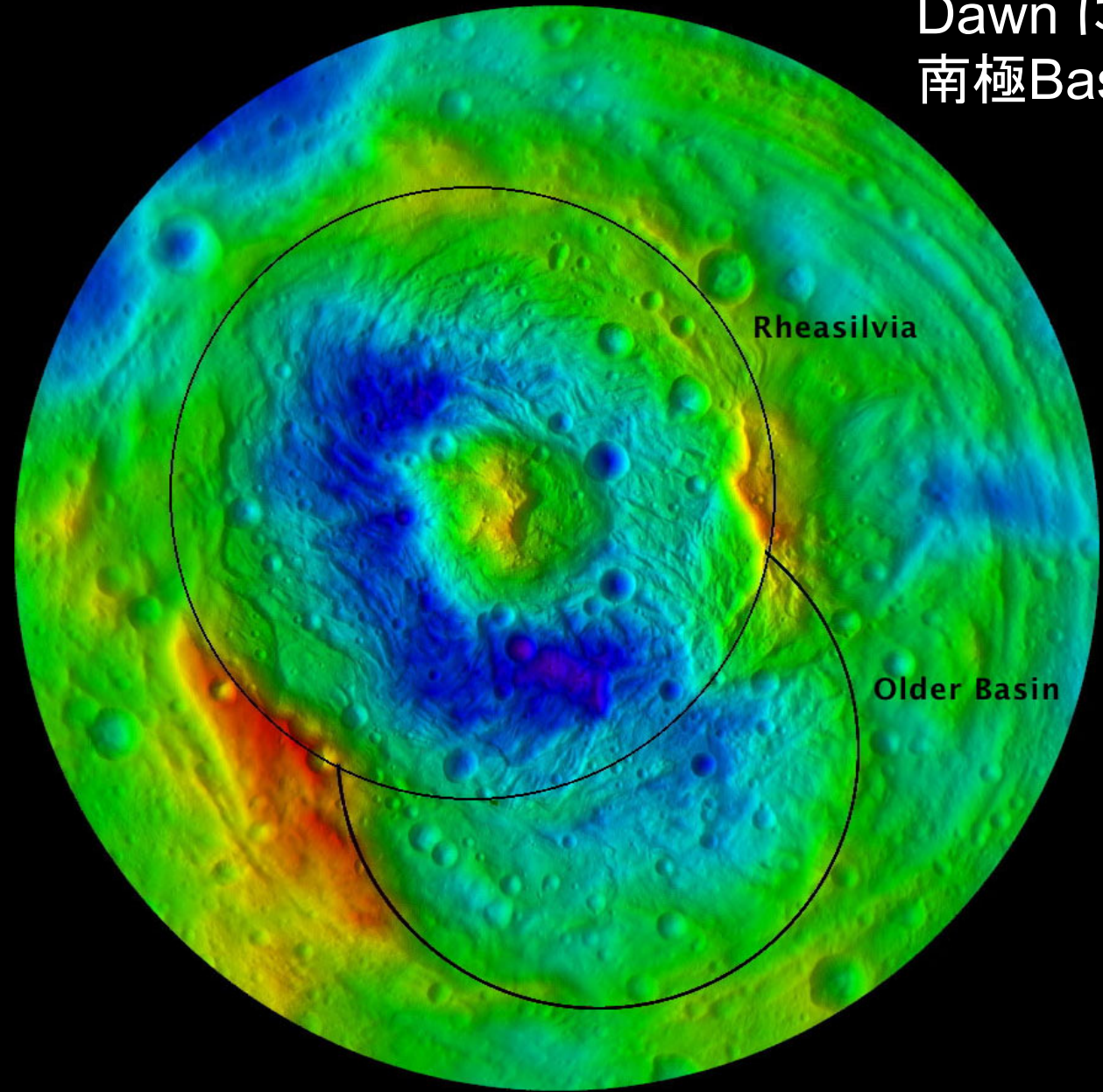


衛星画像上で、かんらん岩(マントル)が
明るさの違いから明瞭に識別できる

Hubble Space telescope による小惑星 Vesta (~500km) の画像



Dawn による
南極Basin マップ



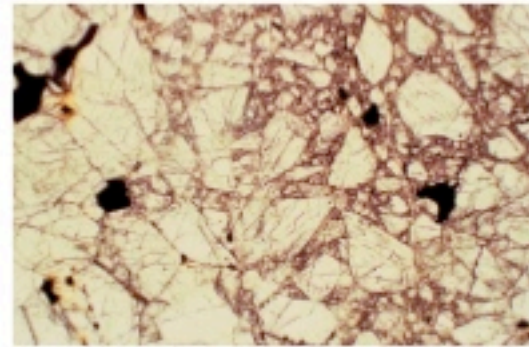
Colorized shaded-relief map showing identification of older 375-kilometer-wide impact basin beneath more recent Rheasilvia impact structure

Vesta 起原と考えられている HED 隕石

ダイオジェナイト



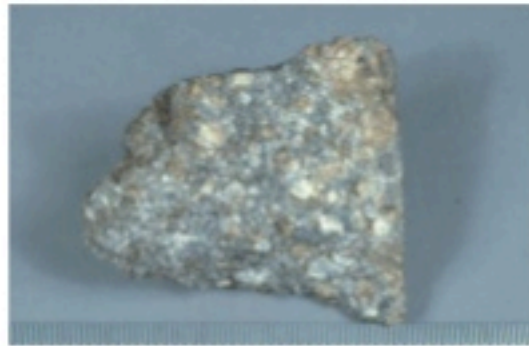
ジョンズタウン隕石。ニューヨーク自然史博物館所蔵（故マーティン・プリンツ博士の好意による）。右下のスケールは 30cm。



ジョンズタウン・ダイオジェナイト (D) の岩石薄片写真。横幅 6.6 ミリメートル。

低カルシウム輝石に
富むマントル物質

ユークライト

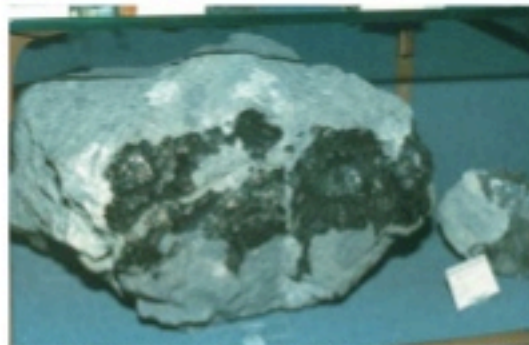


ムア・カウンティ隕石。ニューヨーク自然史博物館所蔵（故マーティン・プリンツ博士の好意による）。スケールの1目盛は 1mm。

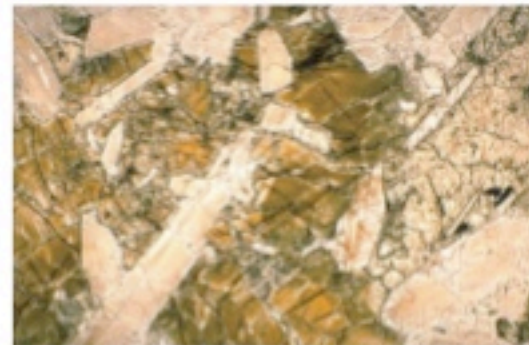


ムア・カウンティ隕石ユークライトの岩石薄片写真。横幅 6.6 ミリメートル。偏光で撮ったため色がついて見える。

地殻に相当する
物質（斜長石＋
低カルシウム輝石）



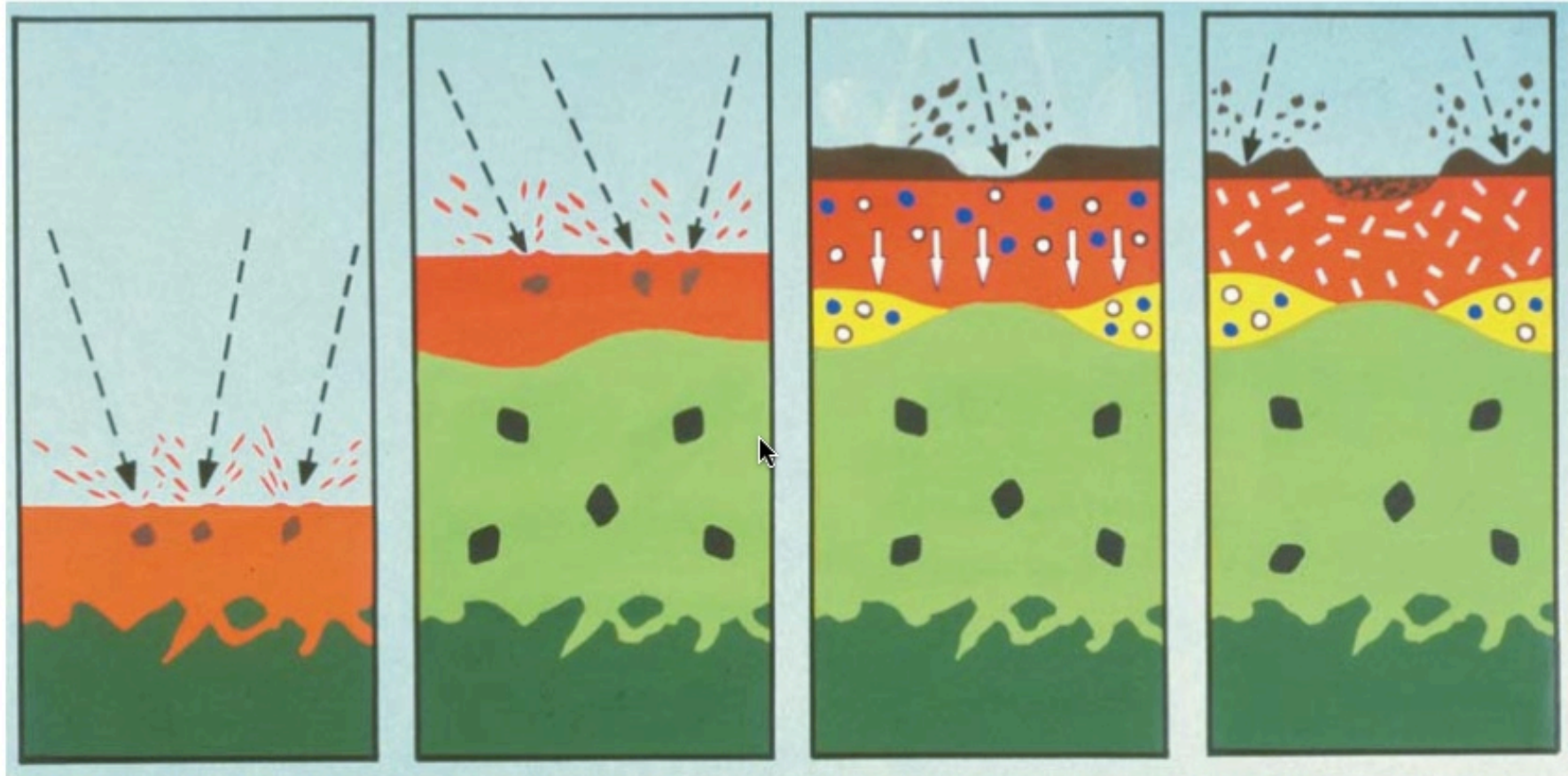
ジュビナス隕石。フランス国立自然史博物館所蔵（故ゴール・ベラス博士の好意による）。スケールは最上段の隕石とはほぼ同じ。



ジュビナス・ユークライトの岩石薄片写真。茶色の鉱物はピジョン輝石。

武田「惑星物質進化」より

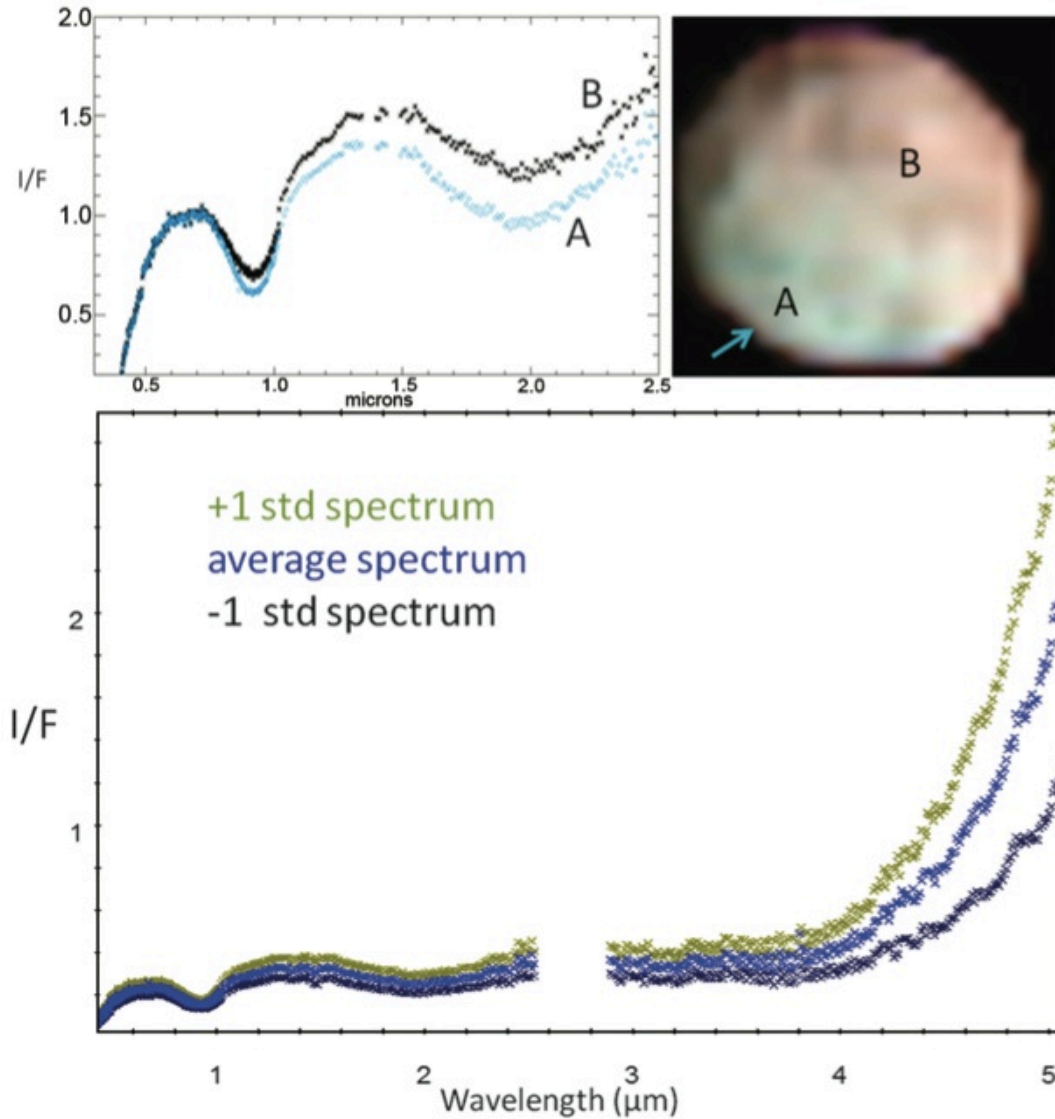
Vesta 上のマグマオーシャン



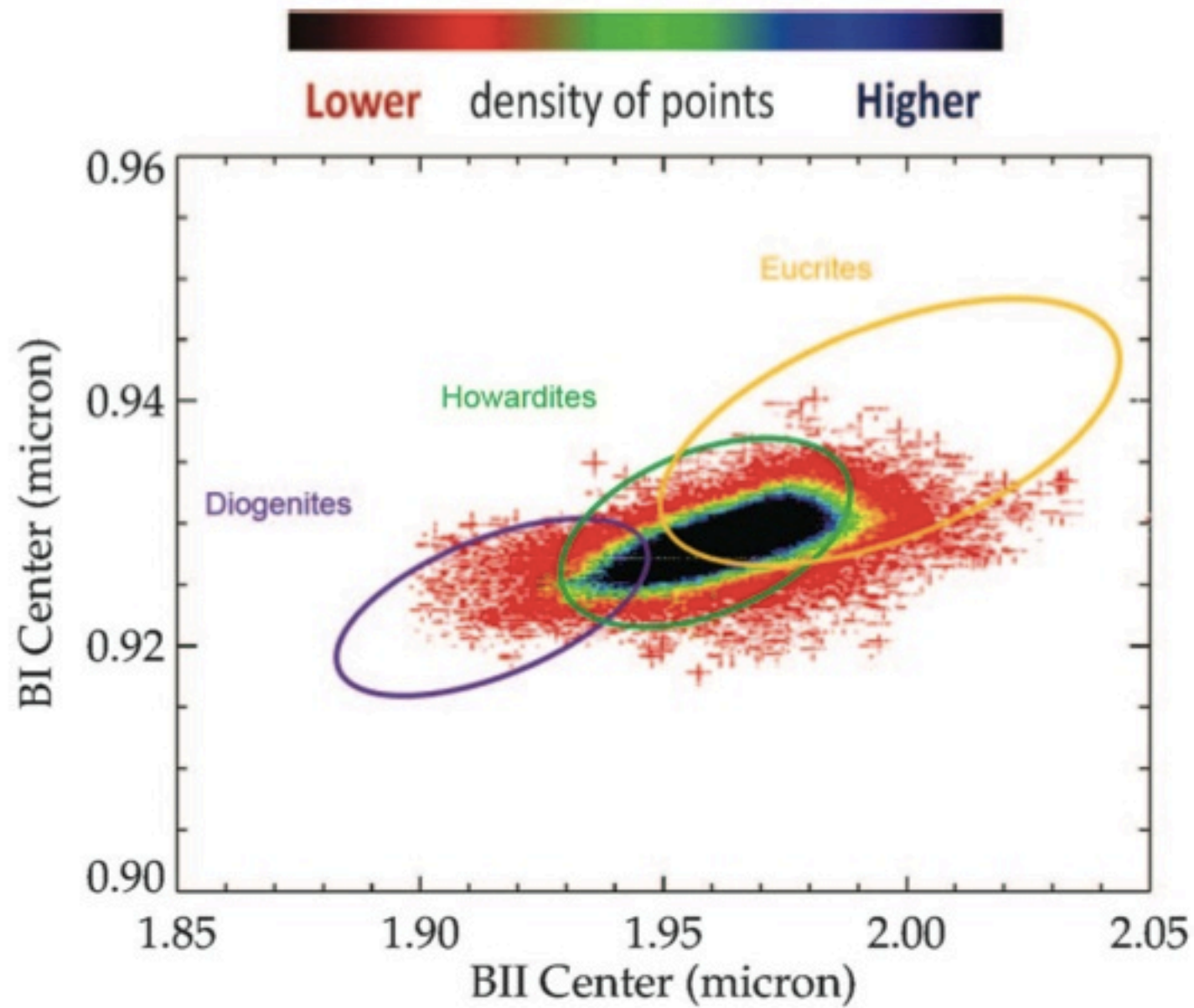
HED 隕石母天体地殻がマグマ大洋から形成されるモデル。緑色はダイオジェナイト、黄色は集積岩ユークライト、赤色はユークライト。黒色は溶岩。

武田「惑星物質進化」より

かんらん石は南極の巨大盆地の中にも
露出しておらず、低カルシウム輝石が遍在



De Sanctis et al. 2012

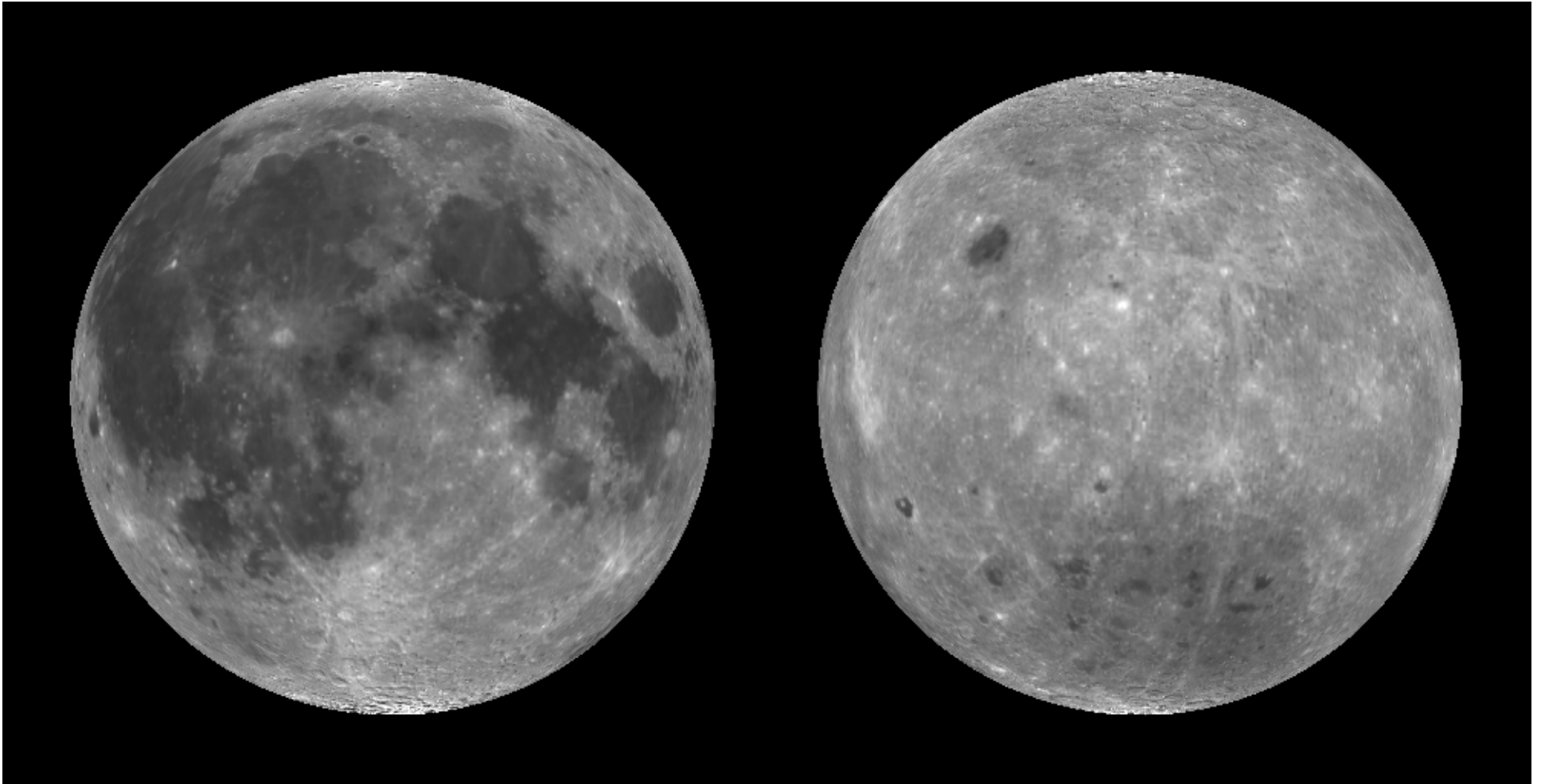


De Sanctis et al. 2012

Dawnのまとめ

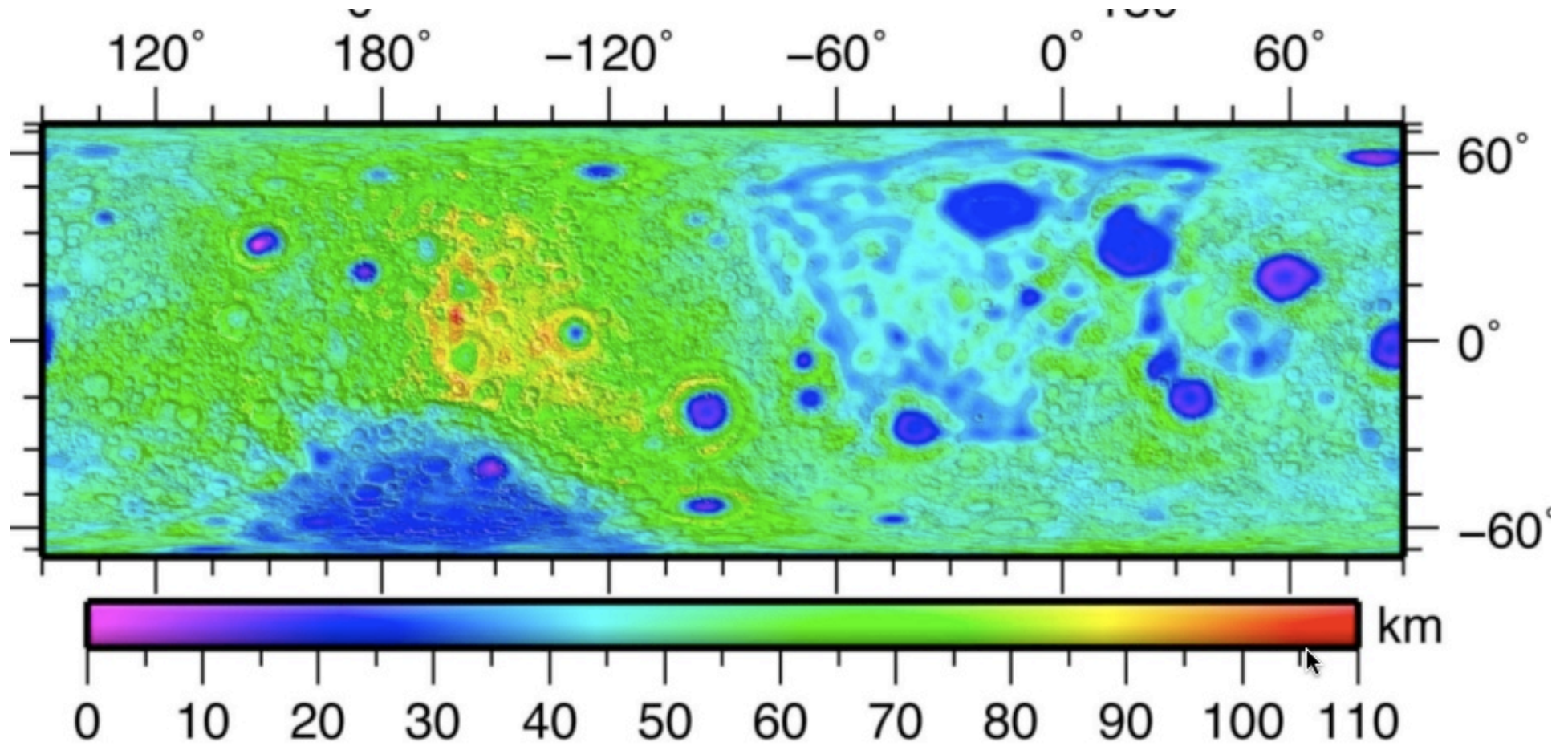
- Vesta 表面は、マグマオーシャンから晶出したと思われる低カルシウム輝石 (LCP) で覆われている
- 南極の巨大盆地はダイオジェナイト (LCPが支配的), その他のところはユークライト (LCP + 斜長石) に相当する物質で構成されている
- かんらん石 (マントル) や、高カルシウム輝石 (~月の海を構成する玄武岩) は発見されなかった
 - 直径の半分を越える南極クレーターでも、内部のかんらん石マントルには届いていない? Or そもそもの組成が地球や月とは違う?
 - 月の海のような火成活動はなかった?

月の表裏二分性



明るくて凸凹な＝高地
暗くて平らな場所＝海

Crustal thickness map by KAGUYA



Ishihara et al. 2009

マグマオーシャンからの晶出による月マントル+地殻構造
 (一番下にかんらん石、その上に輝石、一番上に斜長石)

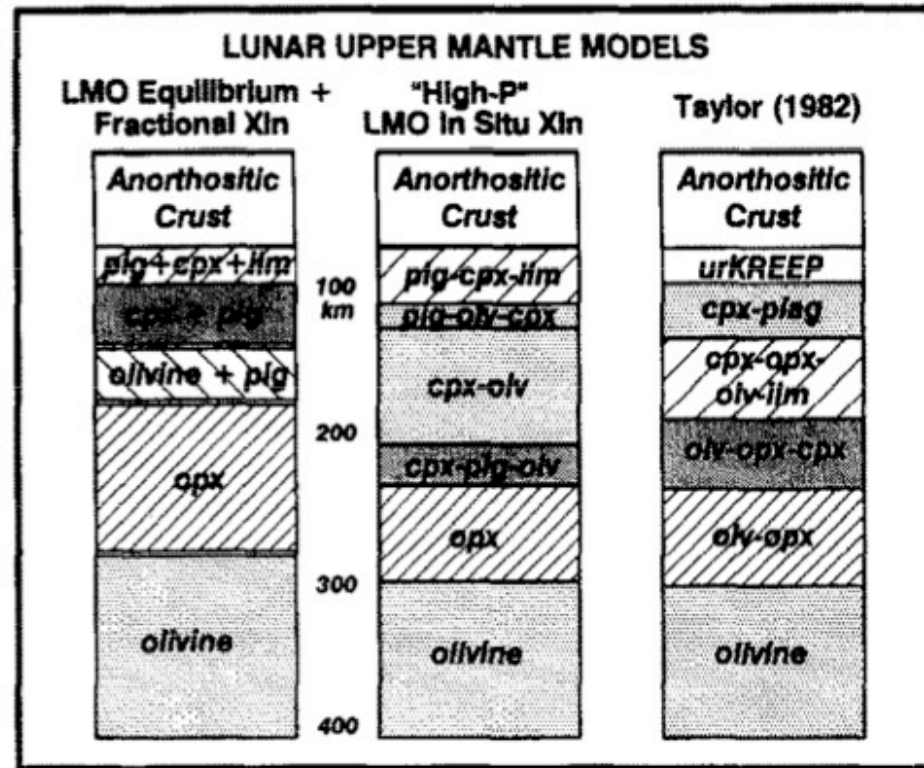
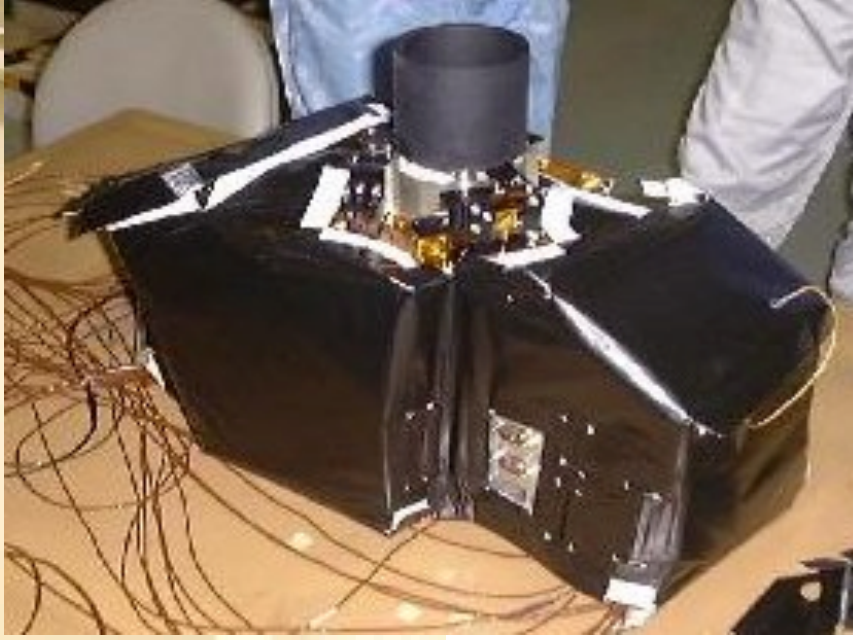
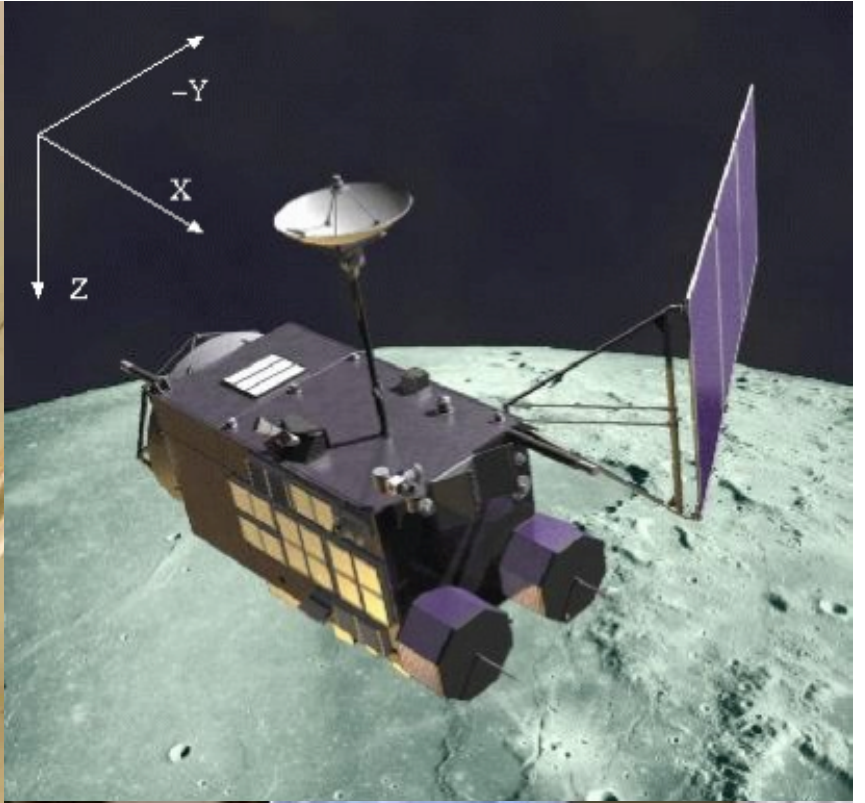


FIG. 2. Comparison of the lunar upper mantle presented in this paper with others presented recently (SNYDER et al., 1991a,b; TAYLOR, 1982). Abbreviations (used throughout diagrams): cpx = clinopyroxene, ilm = ilmenite, olv = olivine, opx = orthopyroxene, pig = pigeonite, and plag = plagioclase.

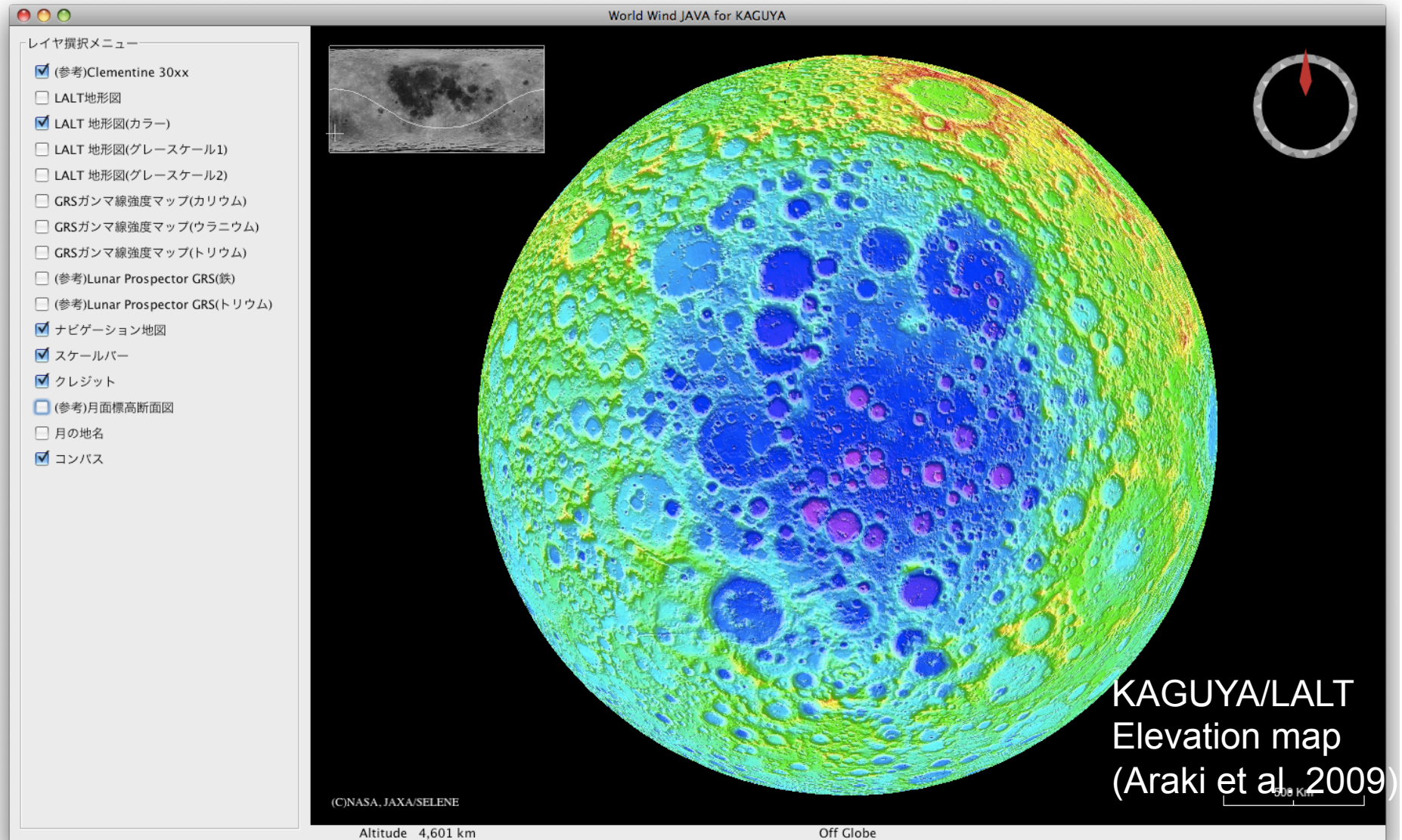
Spectral Profiler (SP)

- One of the first spaceborne spectrometers for the lunar exploration
- Spectral range: 500 - 2600 nm
- Spectral resolution: 6 - 8 nm
- S/N: > 2500
- Footprint: 500 x 500 m
- Over 6×10^7 points
- Global coverage

全球スペクトルデータからマントル(かんらん石)を探す！



South Pole-Aitken = one of the biggest impact structure in the Solar system



月面でもっとも深いところまで掘れているはずの衝突跡

地核は吹き飛ばされ、マントル起原の大量のインパクトメルトが形成される

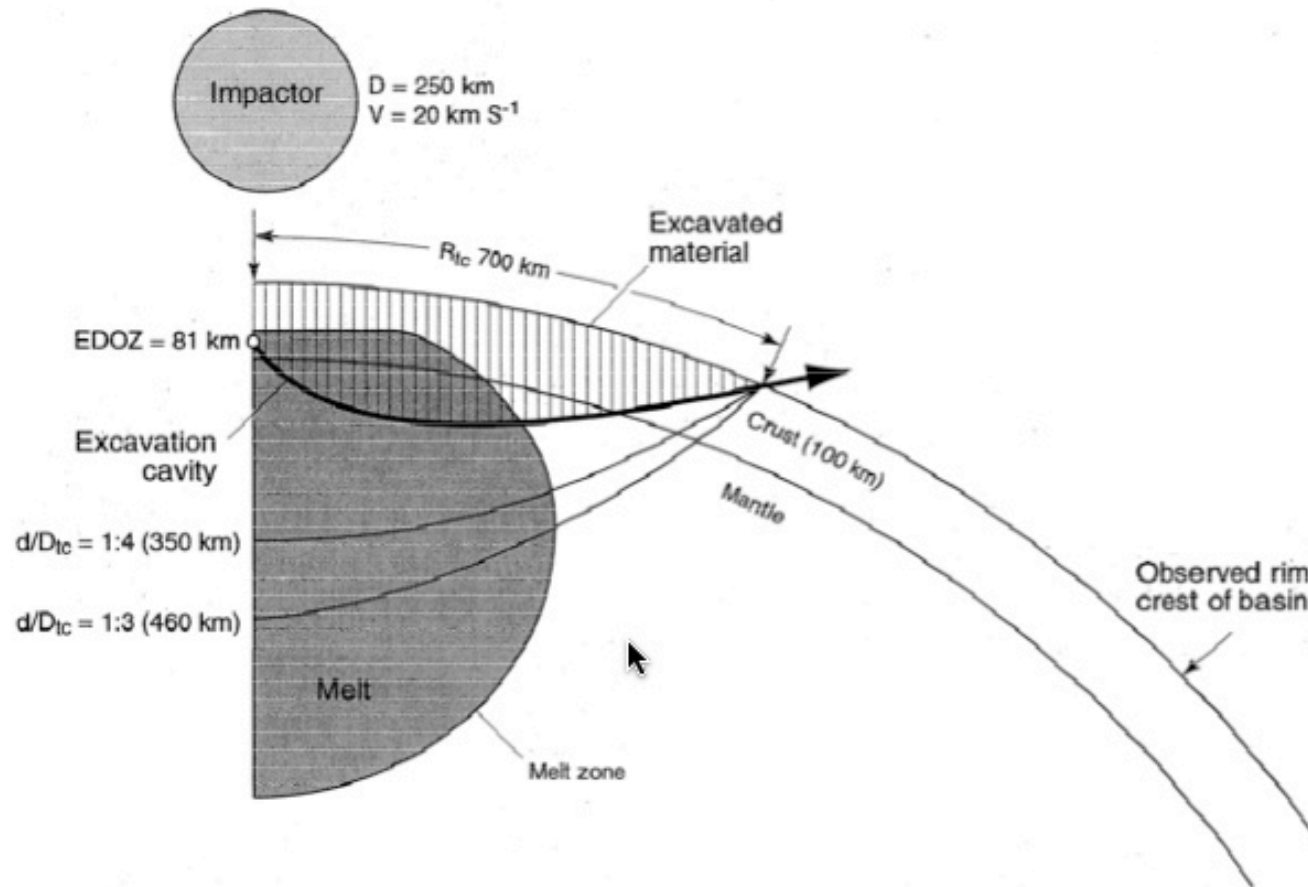


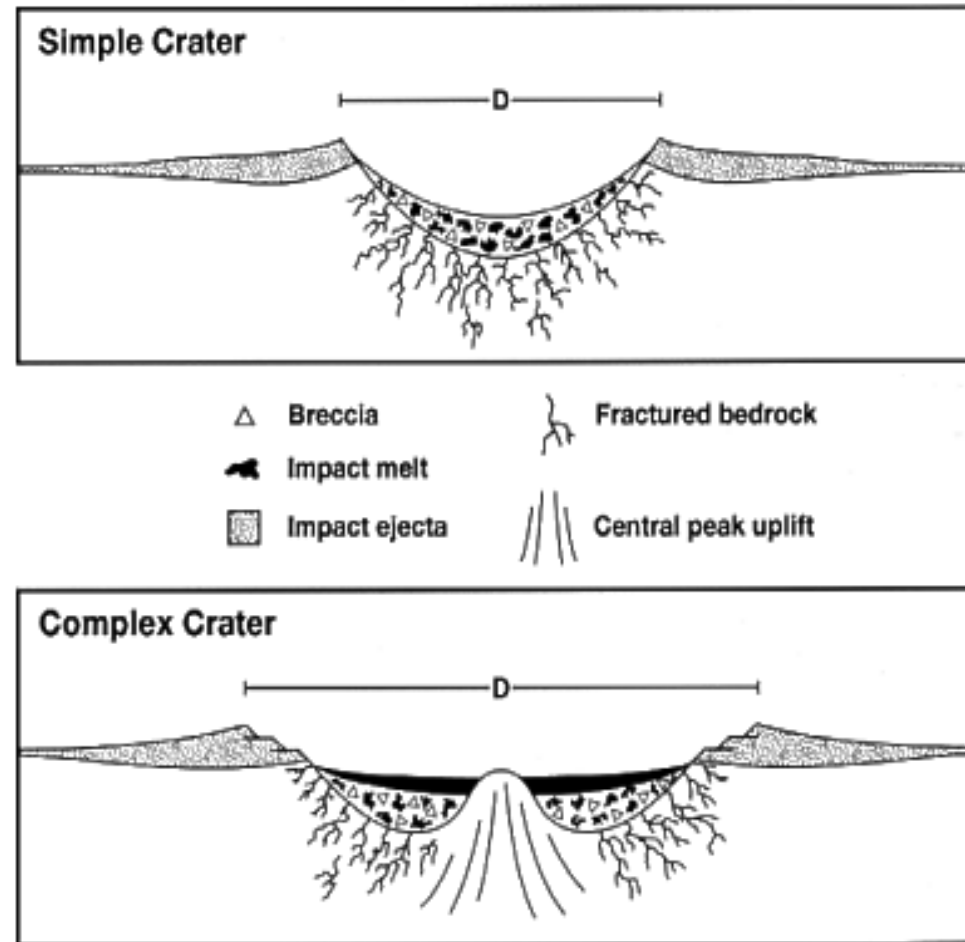
Figure 3. Schematic (to relative scale) showing the relations between Moon, impactor, transient and excavation cavities, and shock melted zone for the SPA basin. Impact was modeled assuming a 500 km diameter, chondrite planetoid impactor. Dimensions of various features are estimated using cratering model of Cintala and Grieve [1994]; two different transient cavity bottoms are shown, based on differing depth/diameter ratios of 1:3 and 1:4. Note that the zone of shock melt extends deeply into the Moon and is of nearly pure mantle composition, in contrast to observed basin floor composition, which appears to be a 50:50 mixture of mantle and lower crust.

クレーターの内壁や中央丘に露出している可能性が高い

サイズ 小



大



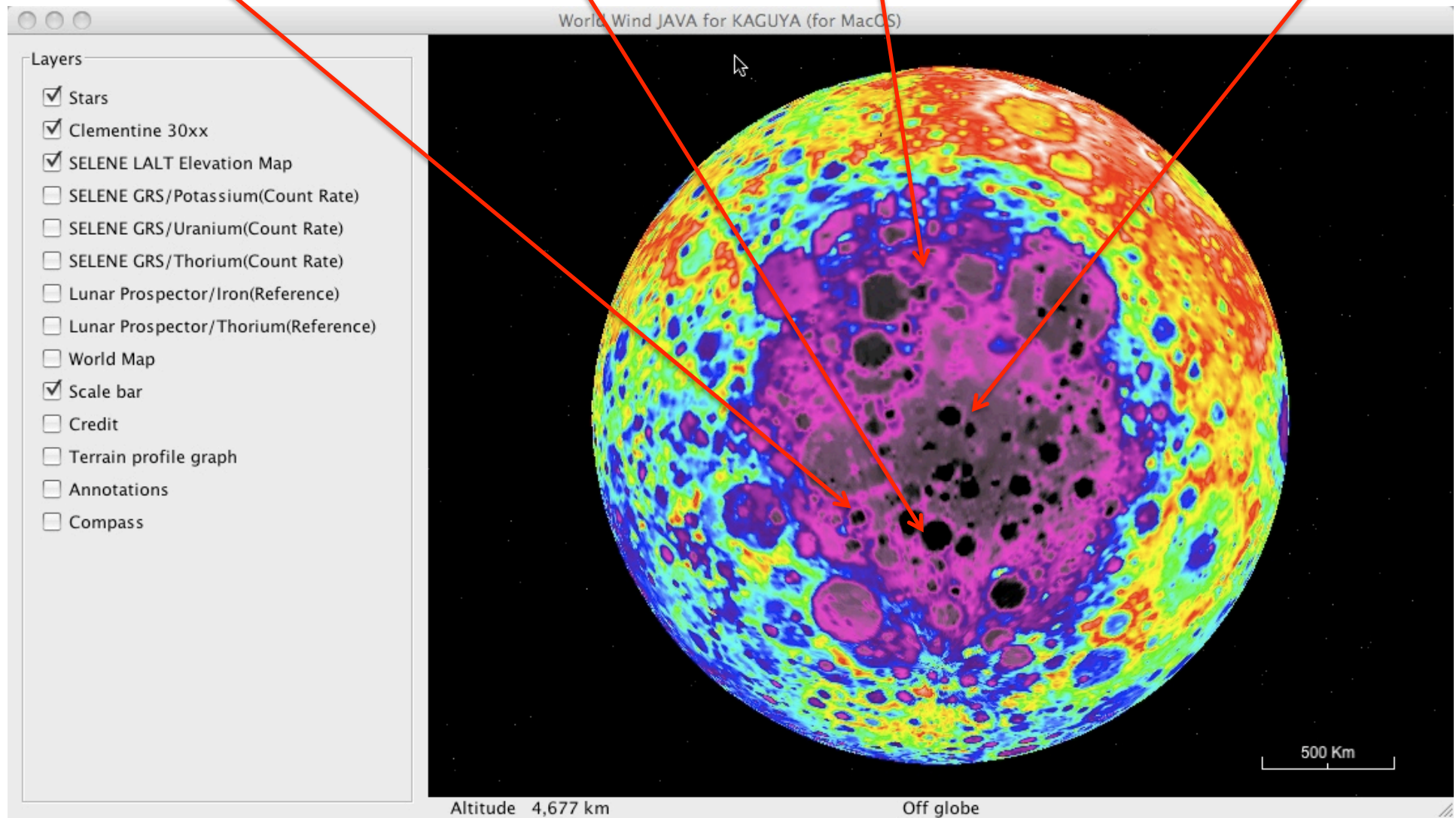
比較的大きな (>100km) のサイズのクレーターを狙う

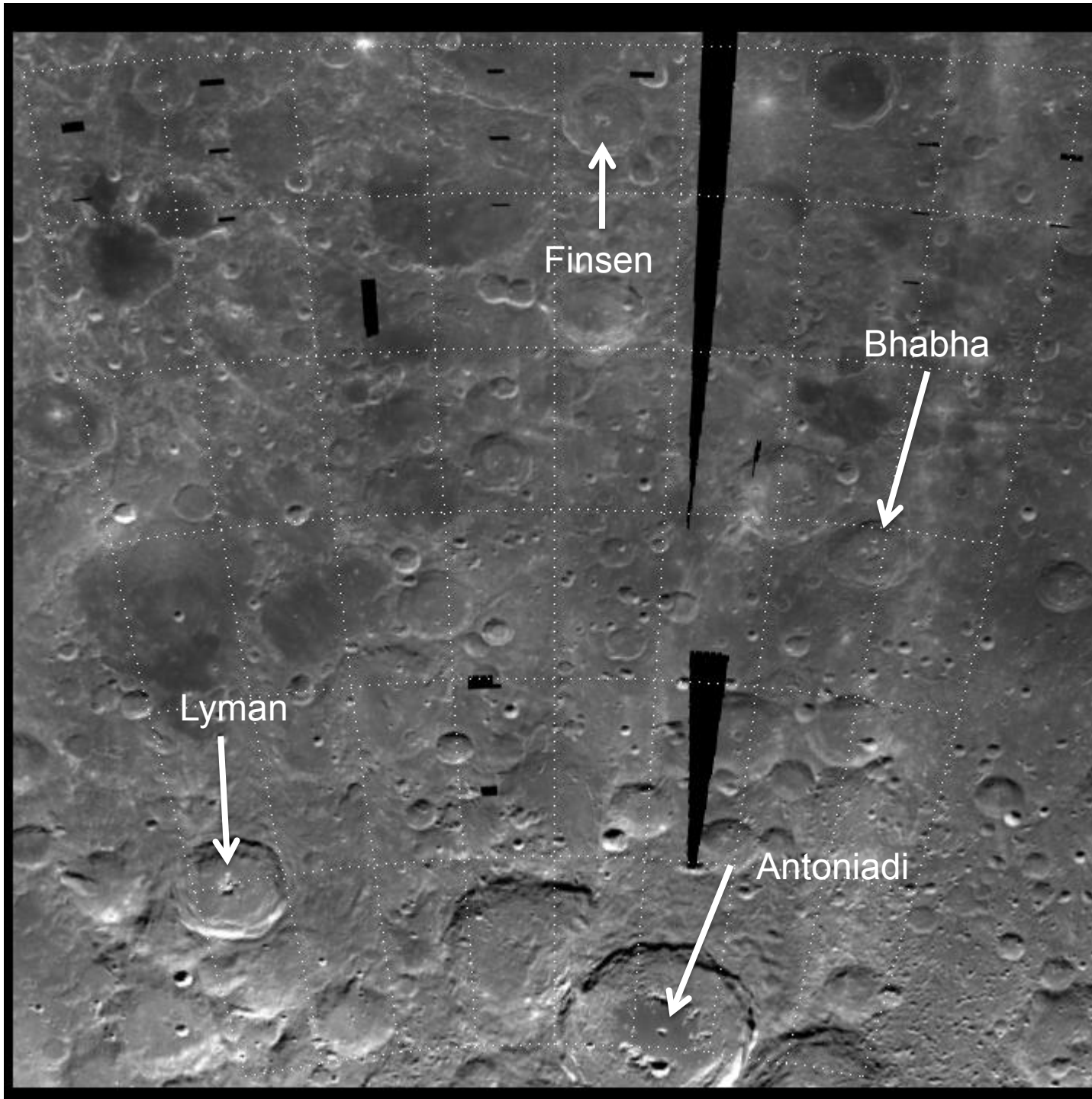
Lyman

Antoniadi

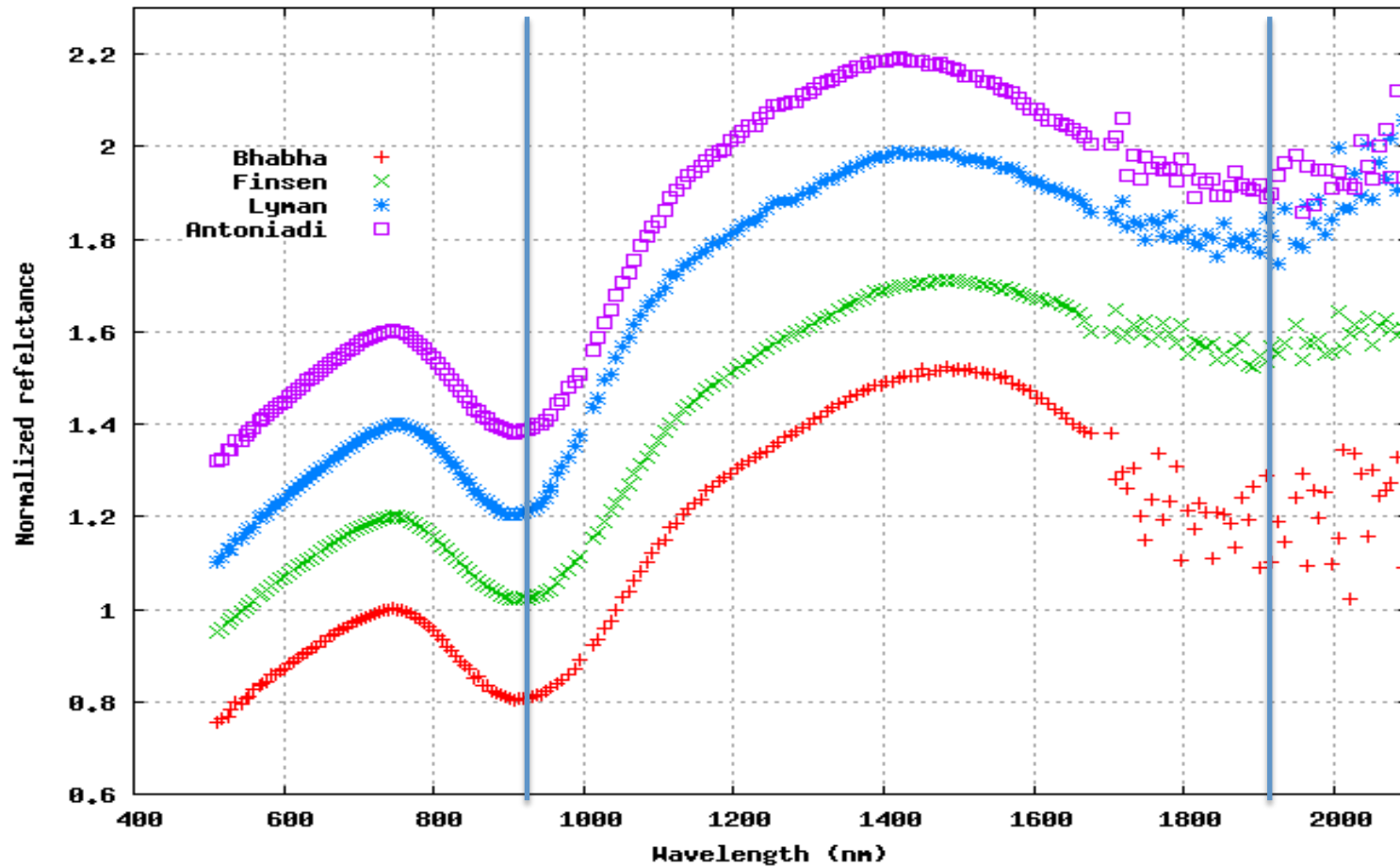
Finsen

Bhabha

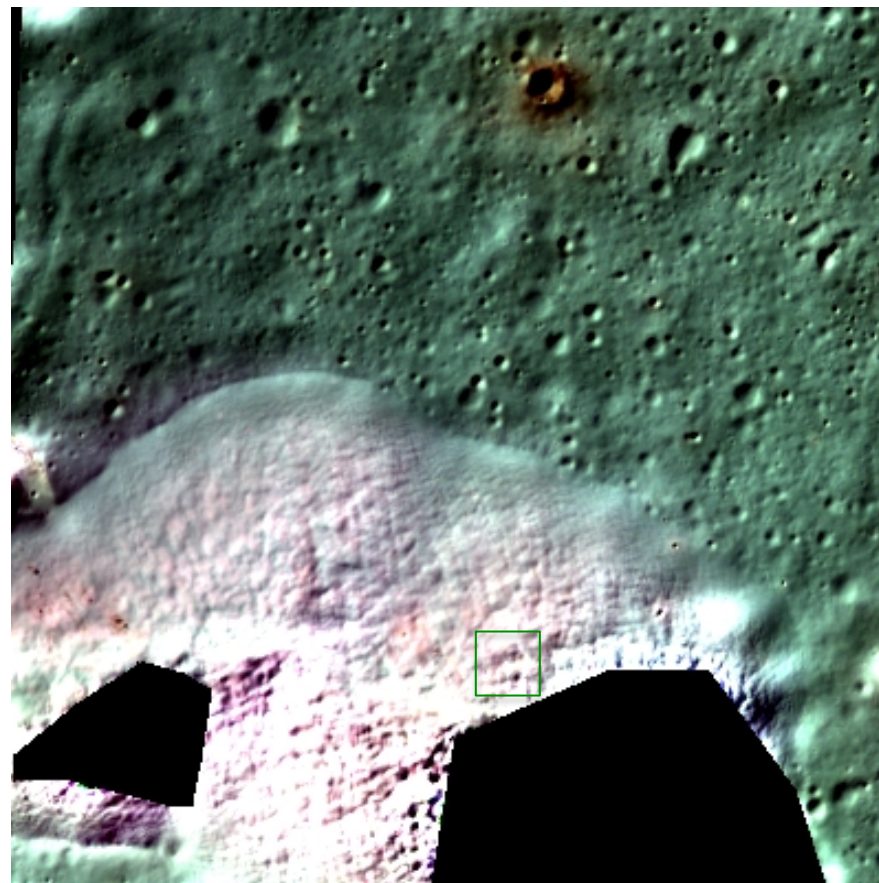
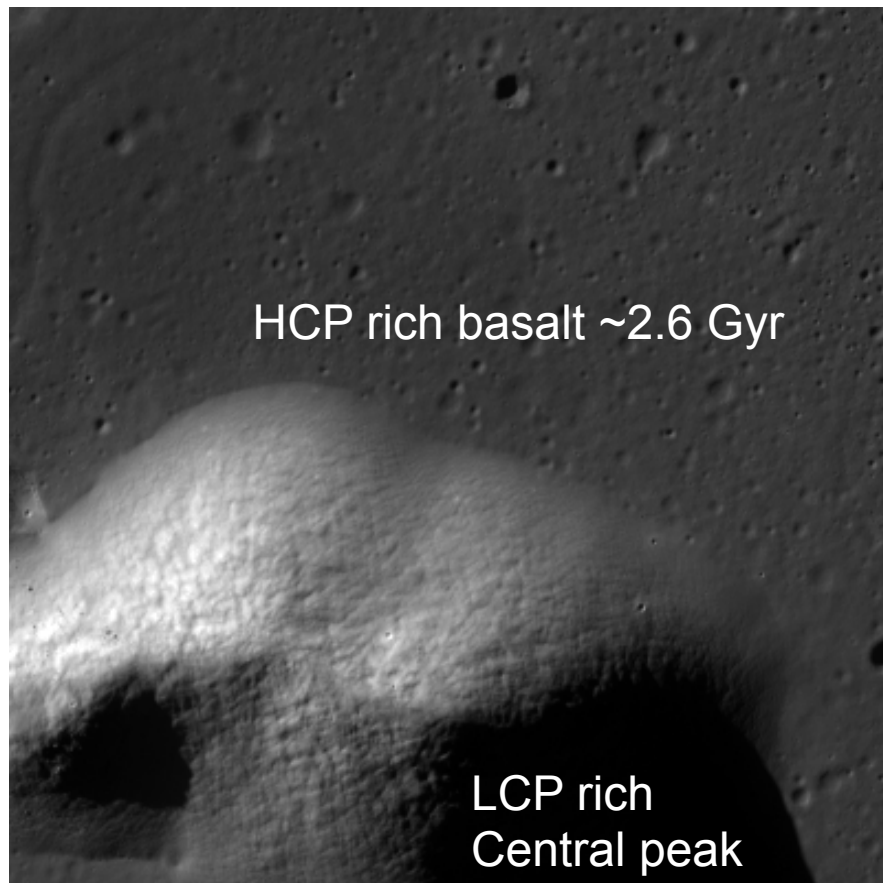




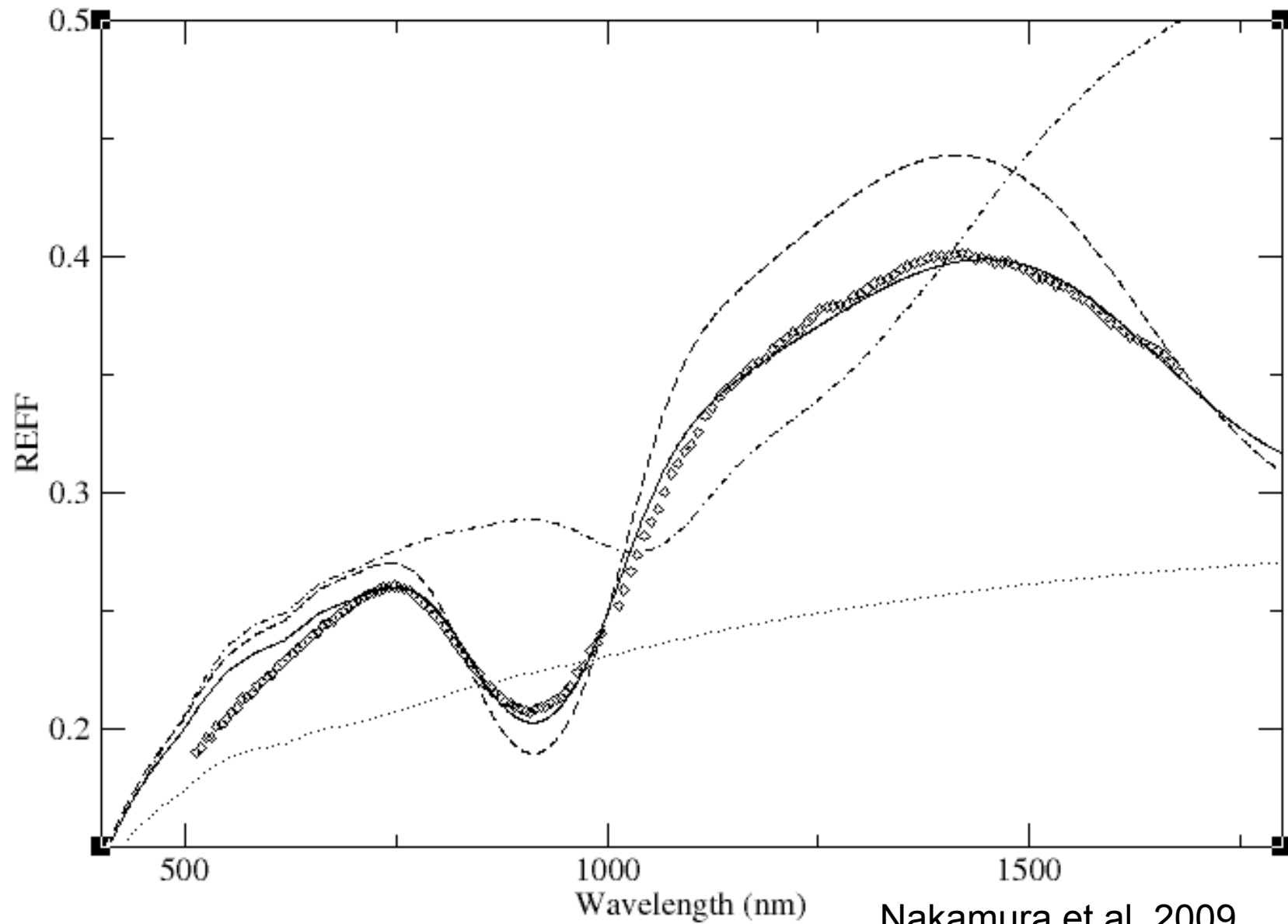
かんらん石(OI)は、どの中央丘にも見つからない
→すべて低カルシウム輝石(LCP)が支配的



MI で見た Antoniadi クレーターの中央丘



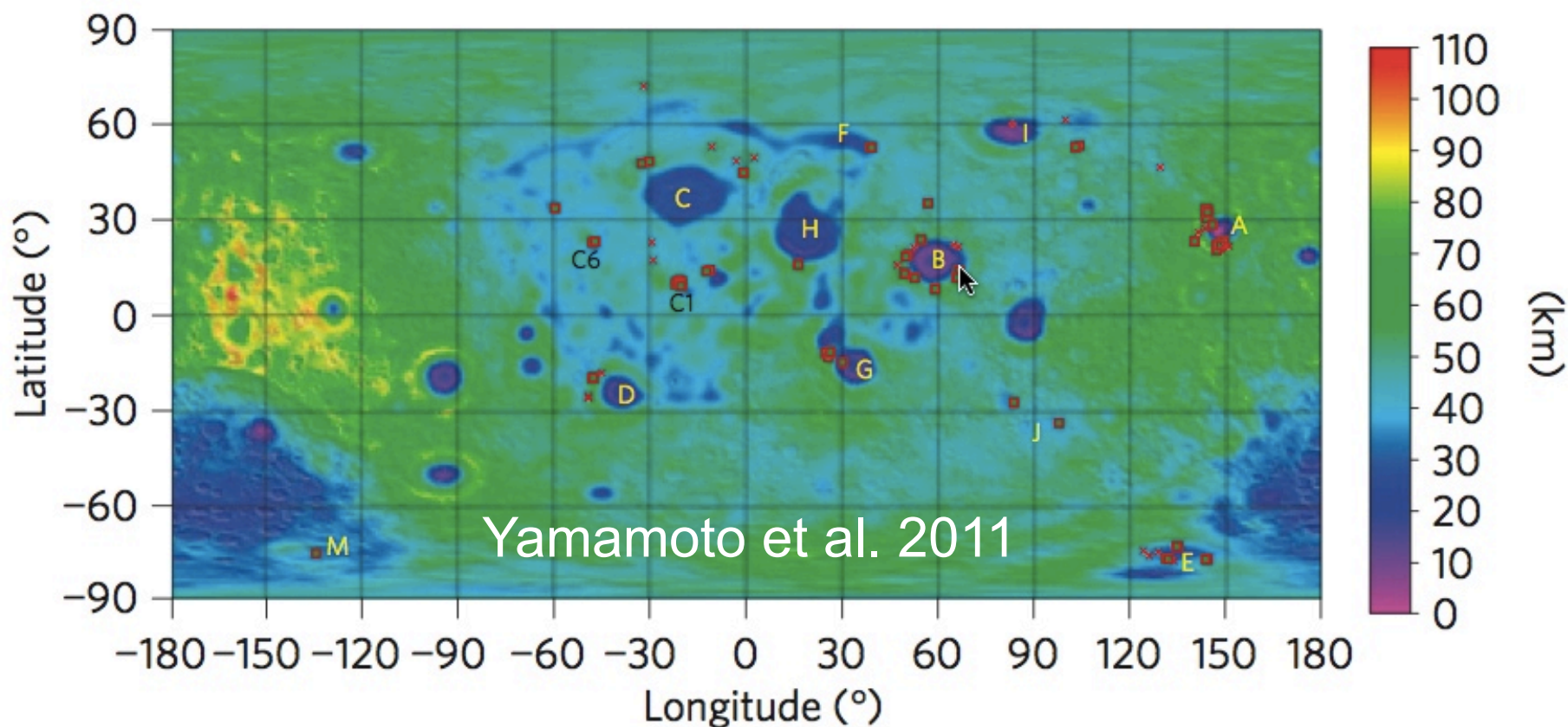
モデル計算による観測スペクトルの再現
Mg-rich LCP+OI+agglutiate



南極エイトケン盆地サーベイ

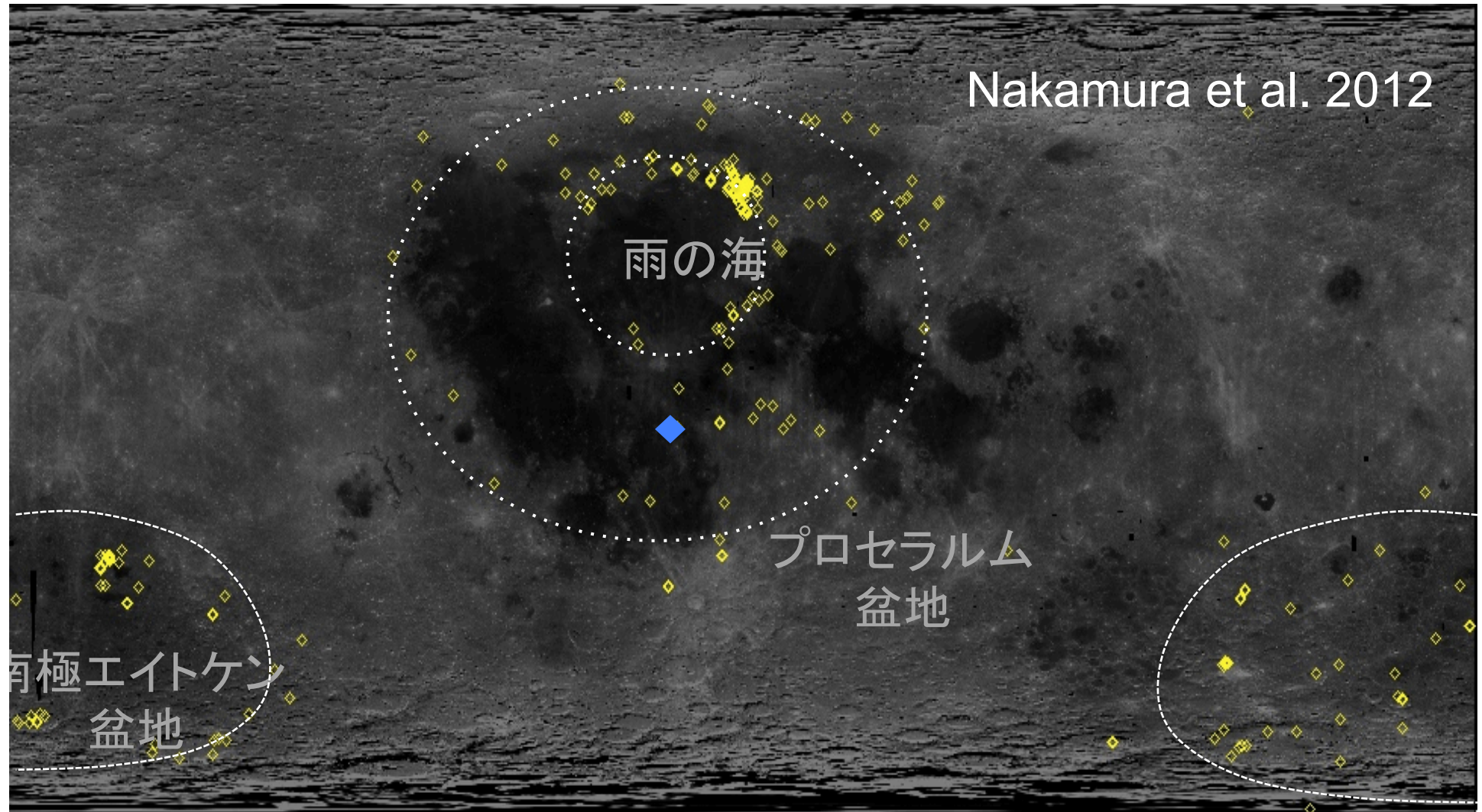
- マントル由来と期待されるかんらん石は大規模には露出していない
- むしろ低カルシウム輝石に富んでいる(>30%)
- かんらん石が出ているところはないのか？
- 他の巨大衝突盆地では？

SP全球かんらん石サーベイ結果



モスクワの海(A), 危難の海(B)などの
比較的小さな海の周囲にも露出

低カルシウム輝石(LCP)の分布



3つの巨大衝突盆地に集中

かぐやサーベイの結果

- 比較的小さい衝突盆地にかんらん石
- 巨大盆地は低カルシウム輝石(LCP)
- 普通に考えると、むしろ逆では？
 - マグマオーシャンからは、最初にかんらん石が晶出し底に沈み、その後にLCPが晶出するから(19枚目のスライド)

どう解釈したらよいのか？

1 月は全溶融状態で形成されたので、かんらん石層はもっと深いところがあり、巨大盆地でも掘り返せていない

- Vesta と同じパターン？
- 観測したかんらん石はマントル起原ではなく、下部地殻起原

2 マントルオーバーターンが起こった？

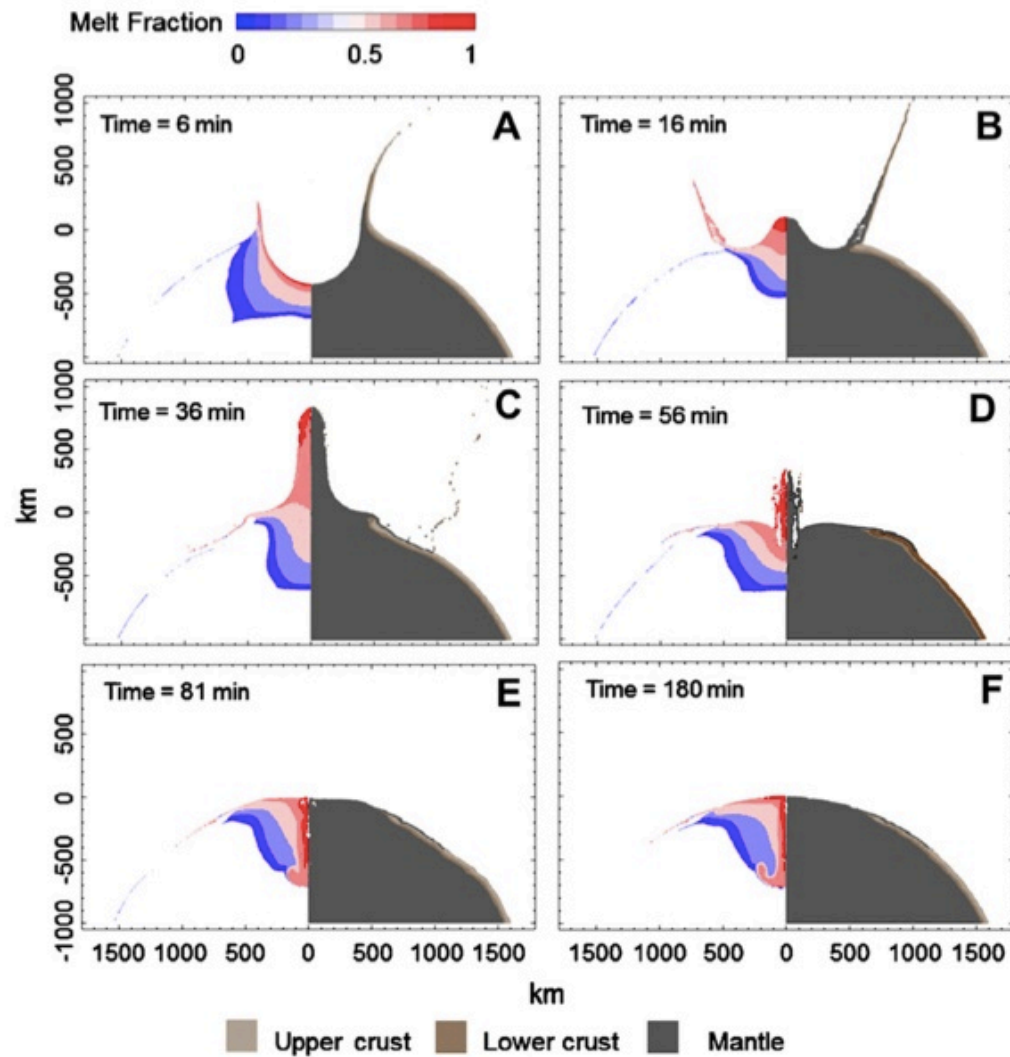
- あとから晶出するものほど鉄の割合が多く密度が高いため上下がひっくりかえる(～マントルオーバーターン)
- そうするとかんらん石が上に来て、LCPが下に潜る

3つめの解釈

- Vesta のマグマオーシャンと、Procellarum や SPA で形成されたマグマシーは同規模
- 月マグマオーシャンからではなく、このマグマシーの分化によってLCP層が形成された？

SPA の形成シミュレーション例 → 大規模なメルトプールの形成

R.W.K. Potter et al./Icarus 220 (2012) 730–743



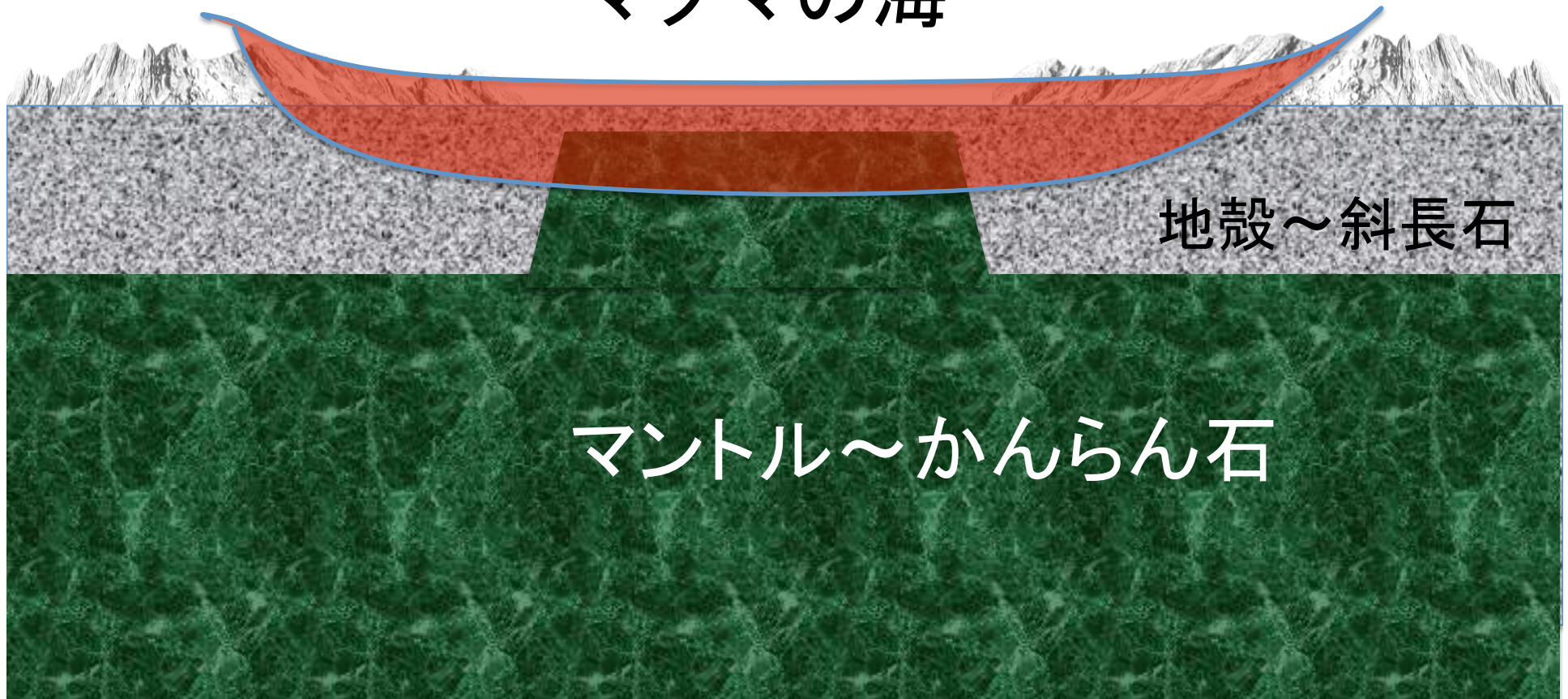
巨大衝突によって形成されたマグマシーも分化するはず



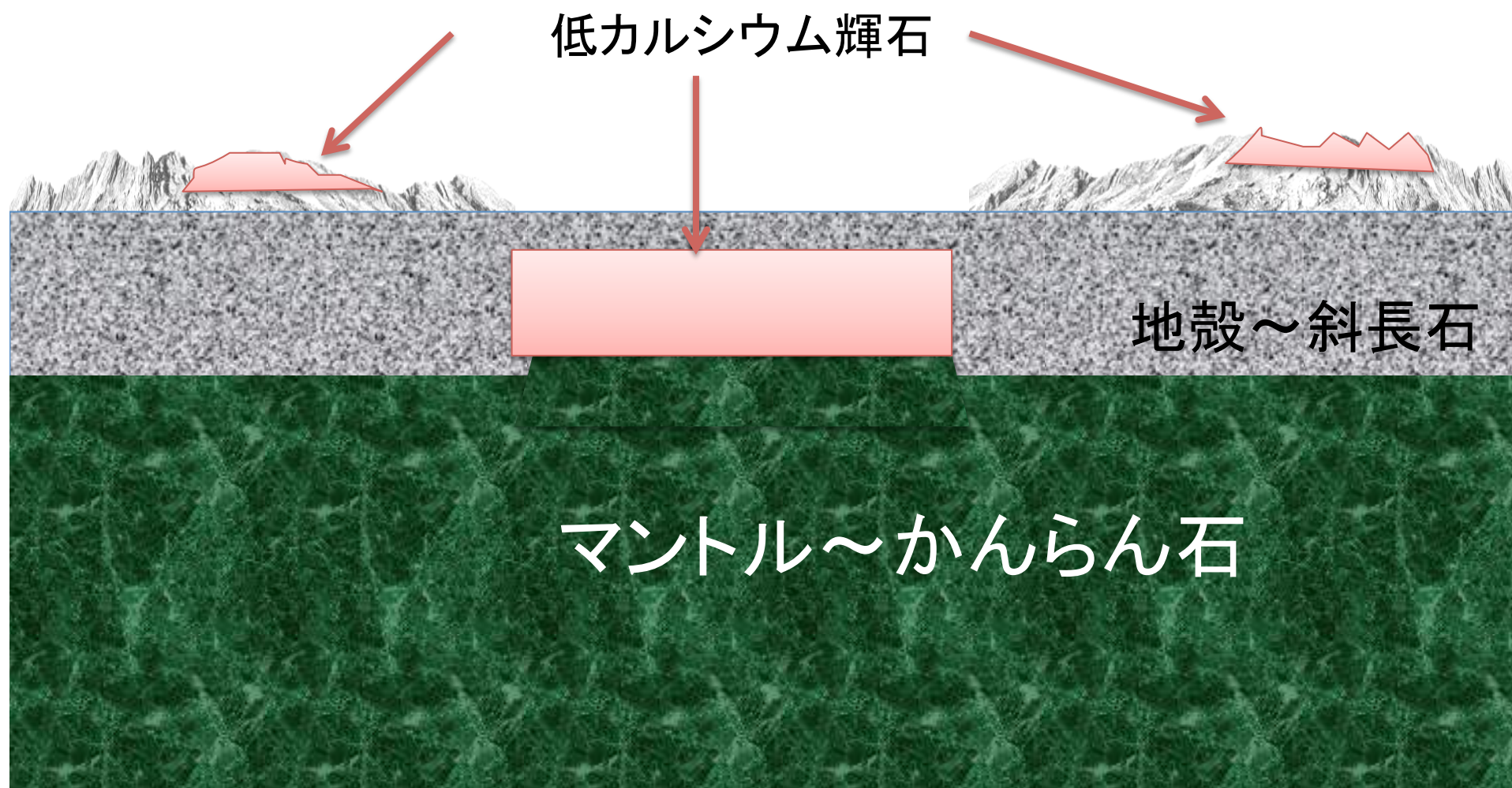
巨大衝突直後の状態



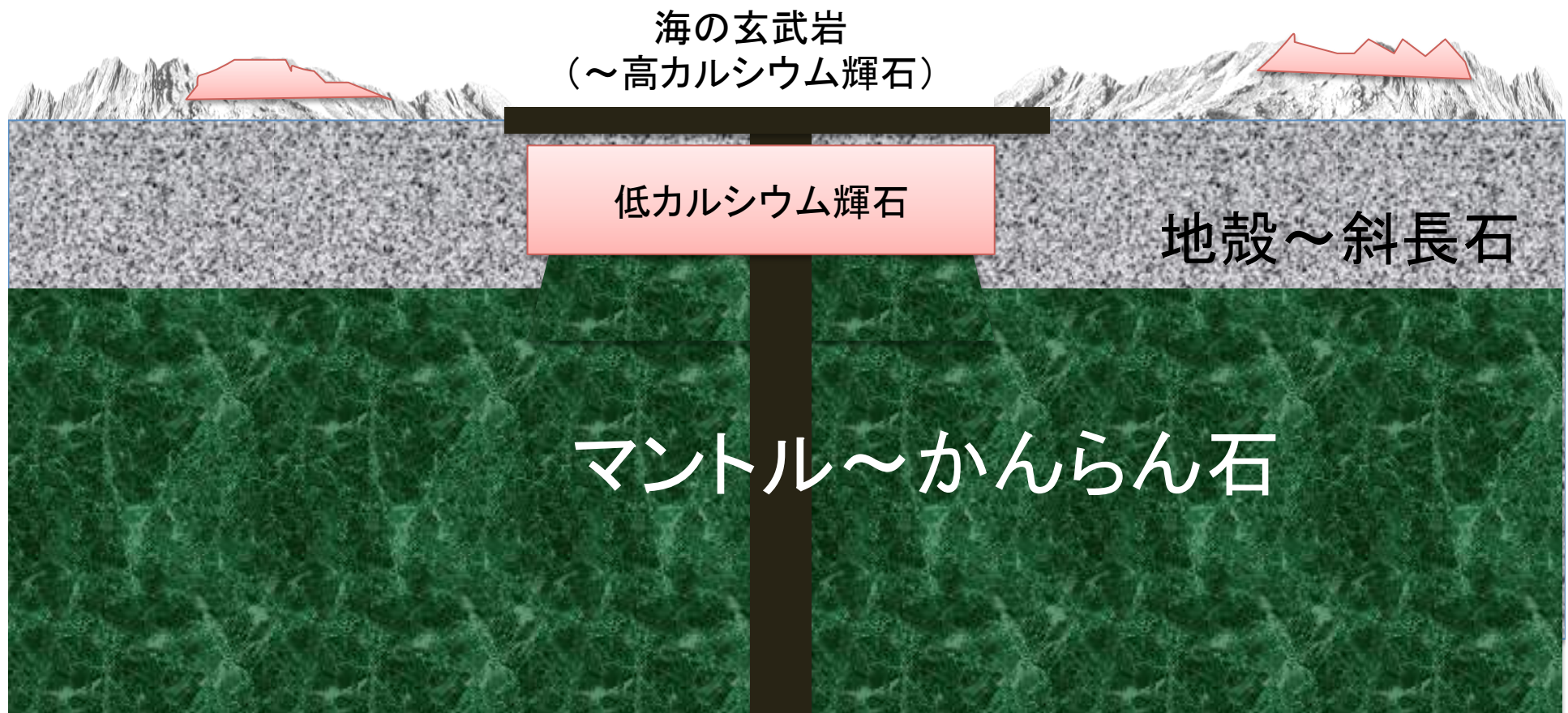
マグマの海



溶岩の海が冷えて固まる際、低カルシウム輝石が支配的な層（～Diogenite）が形成され、その上に輝石＋斜長石層（～Howardite）が晶出？ → Vesta と共通のプロセス



数億年後に噴出した溶岩が衝突盆地を埋めて海を形成



まとめ

- 月の低カルシウム輝石の起原
 - 衝突溶融物の再固結過程で形成 = Vesta のマグマオーシャンと共通のプロセス？
 - マグマオーシャンから直接固化したものがオーバーターンで深いところへ移動し、巨大衝突によって掘り起こされた？
- 月のかんらん石の起原
 - 産状からマントル起原(ダナイト)であると考えられるが、下部地殻(トロクトライト)である可能性も否定できない
 - Vesta での不在 → 組成への制約