

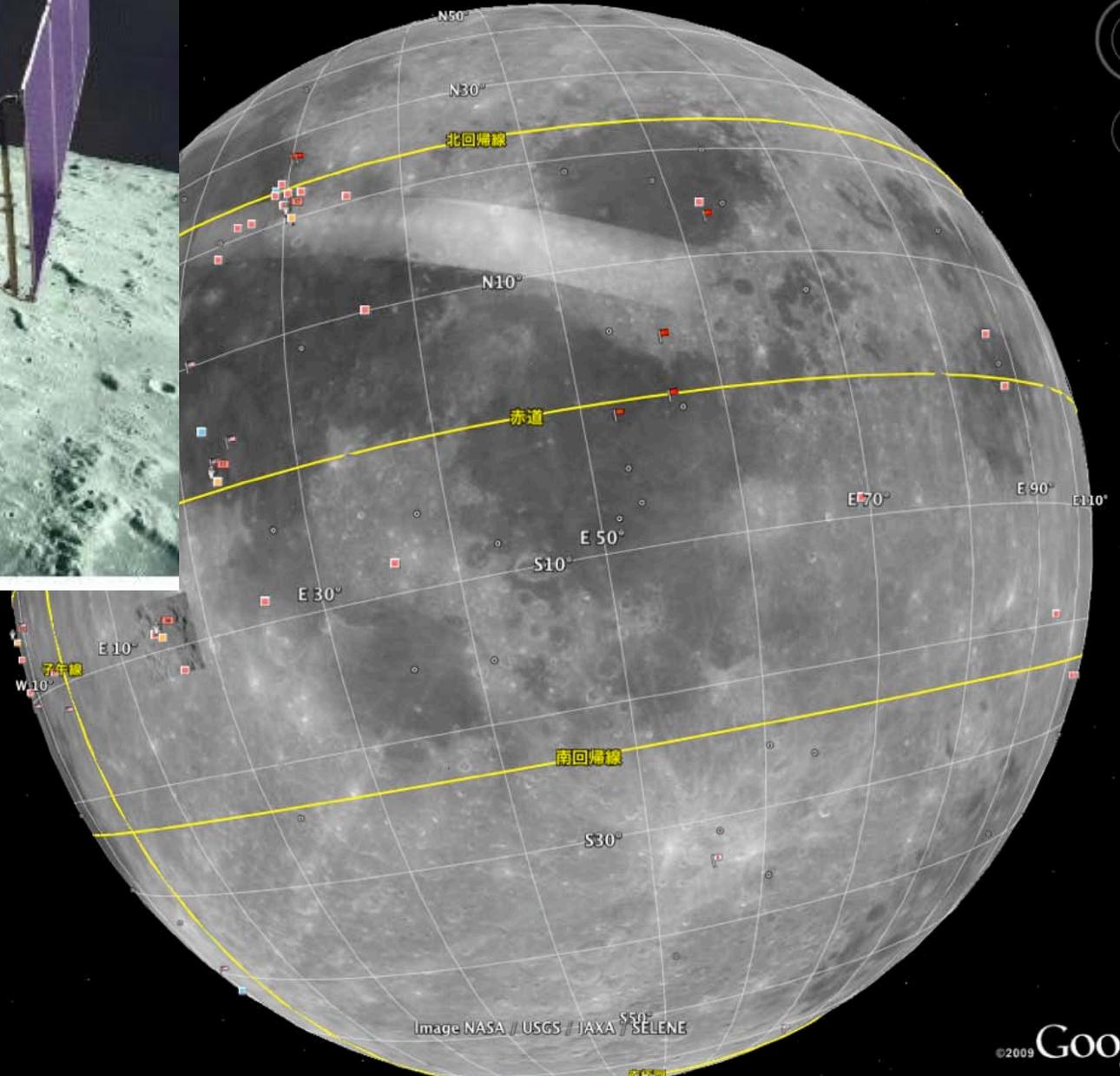
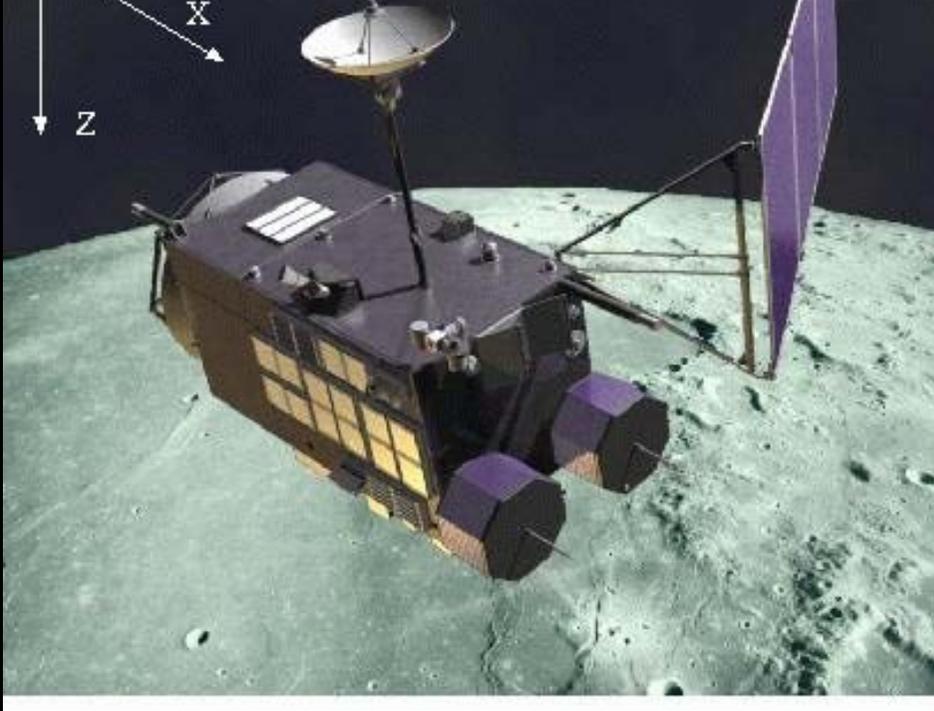
# Global Survey of Mantle Origin of Olivine on the Moon

～月マントル物質を探せ！～

山本 聡 (国立環境研究所・地球環境研究センター)

昨年度のお仕事

# 月周回衛星「かぐや」搭載スペクトルプロファイラ



19°13'55.24" S 72°05'50.64" E 標高 -3438 フィート

©2009 Google

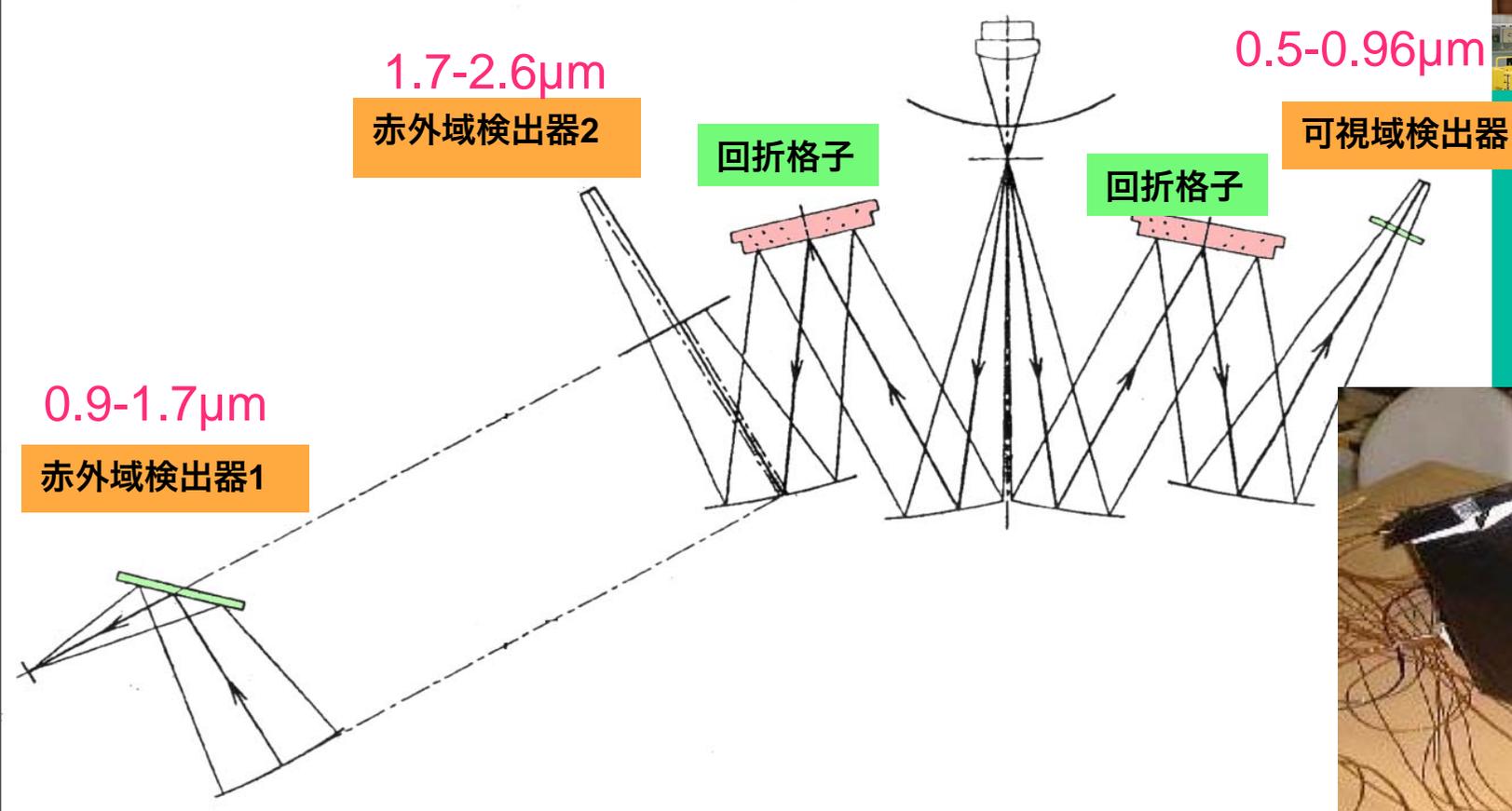
高度 1378.20 マイル

# Lunar Imager/Spectrometer (LISM) & Spectral Profiler

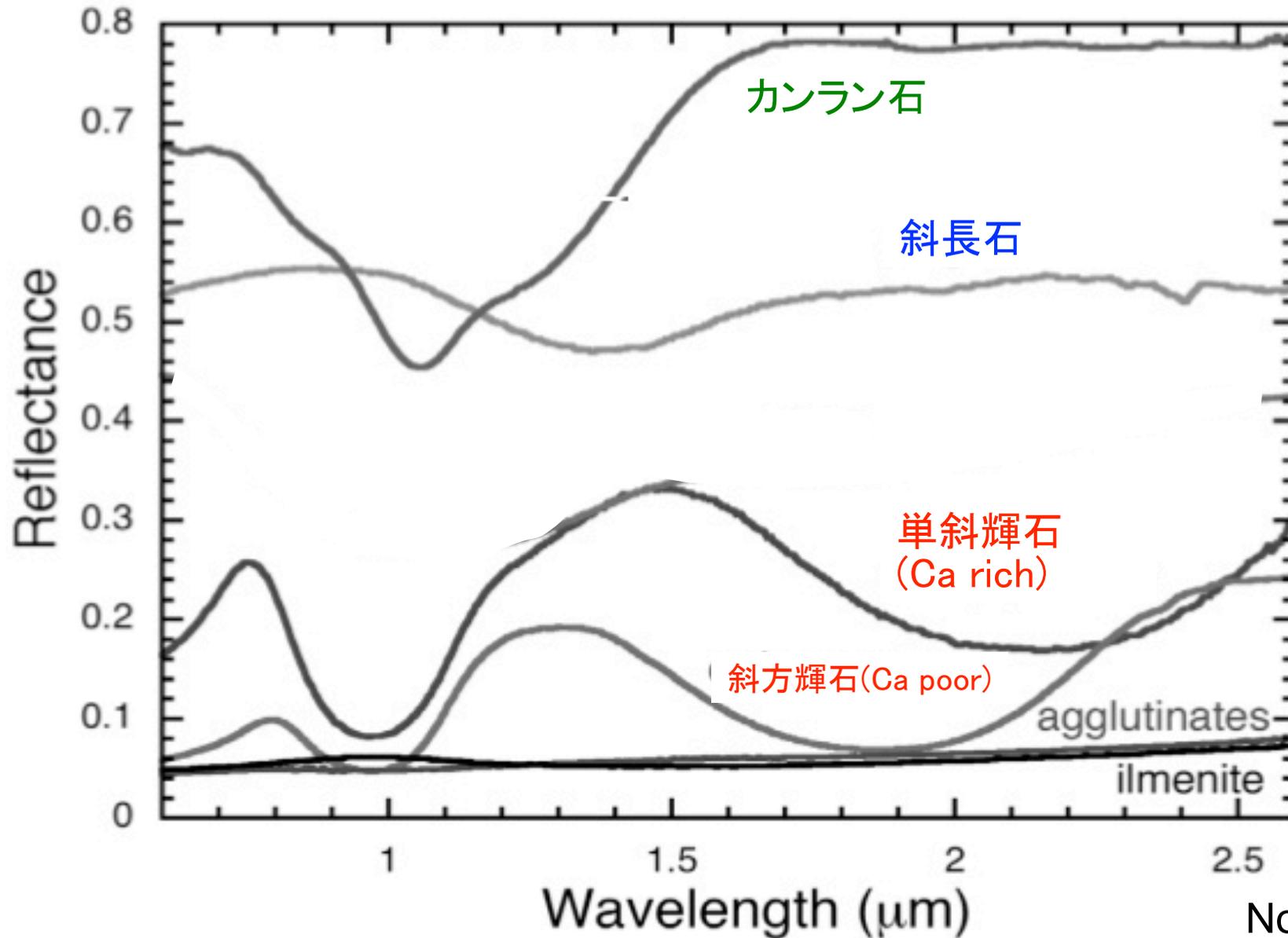
onboard Selenological and Engineering Explorer (SELENE)/Kaguya

## スペクトルプロファイラ

- ・ 0.5-2.6 $\mu\text{m}$ 連続波長スペクトル
- ・ スペクトル分解能: 6-8 nm
- ・ 全スペクトル数: 6800万点以上
- ・ 観測視野: 200~500 m  $\times$  500 m

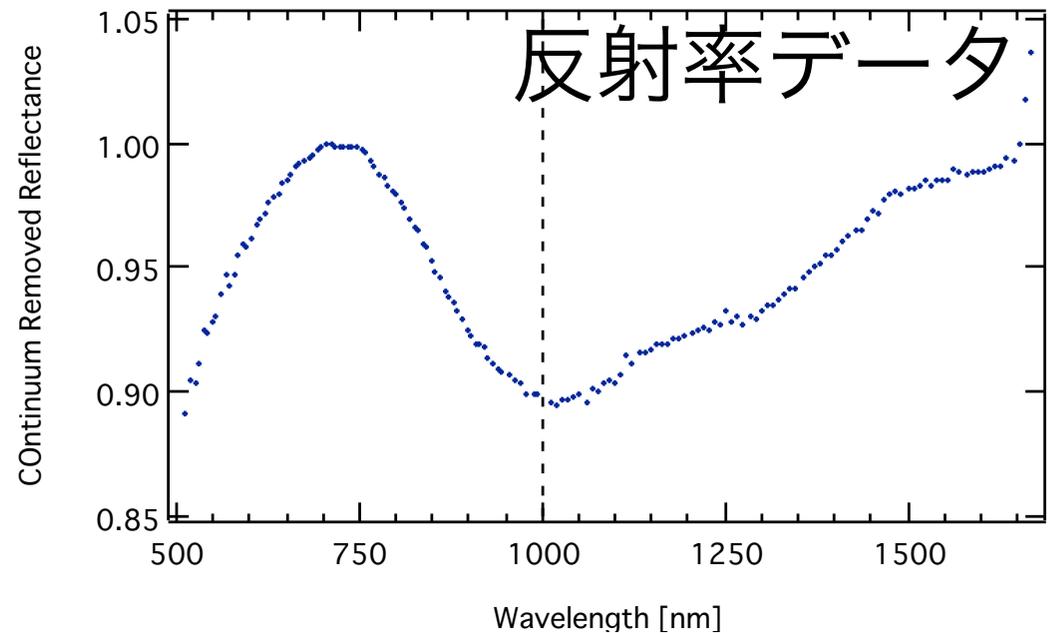
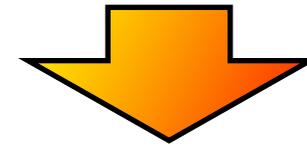
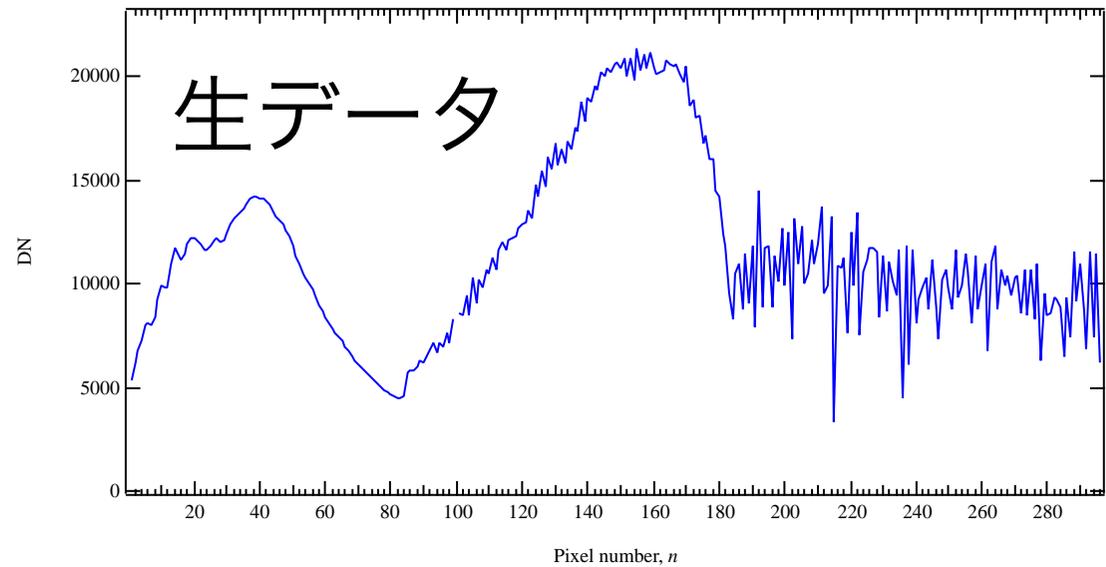
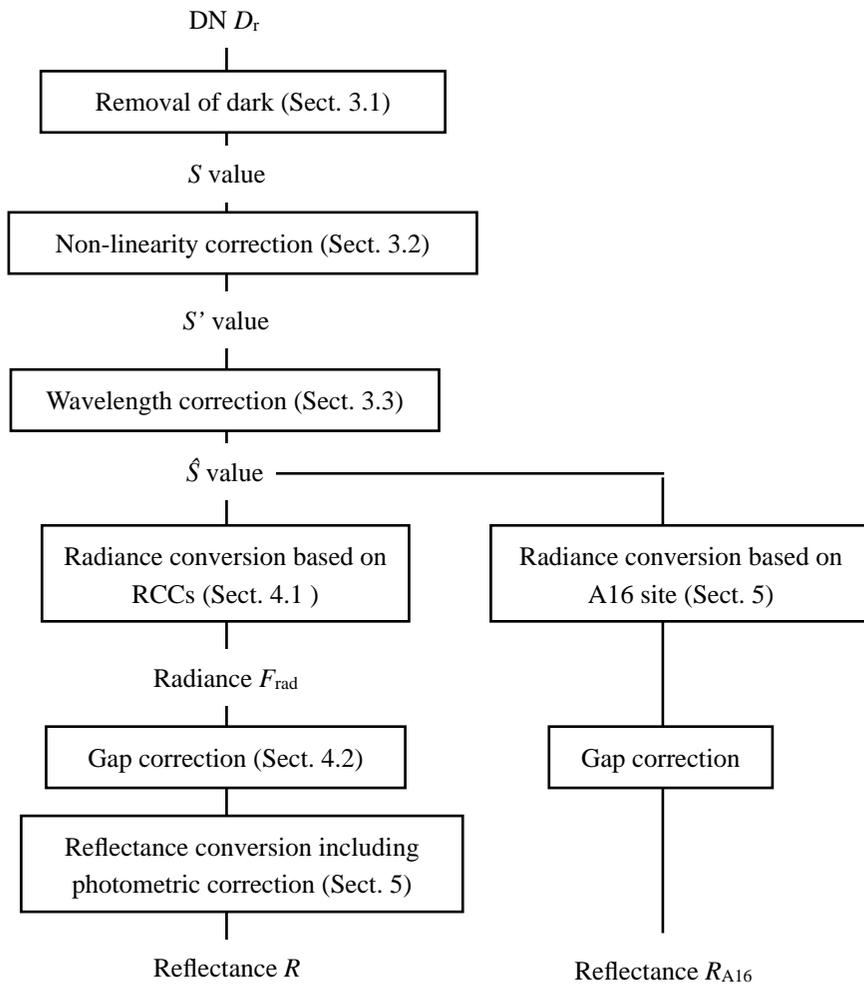


# 月主要鉱物の可視近赤外スペクトル



最終目標：月の鉱物マップ

# 公開プロダクトへむけて解析



6800万以上のスペクトル  
データに対して自動的に解析  
するプログラムの作成

# グローバルサーベイソフトの開発：SP in C

## SP in C の特徴

- ・ SOAC (SELENE Operaton and Analysis Center @相模原)でLevel 2B,2Cを作成するプログラム (RGC) を基に作成

①全自動プログラム

②全観測データに対応

→様々な観測条件、全観測モード

③高速化：半周回(約1万点) → ~15秒

☆全データ処理時間→~1日

+

- ・ 特定スペクトルだけをピックアップする関数

処理の流れ

SP L2Aデータ

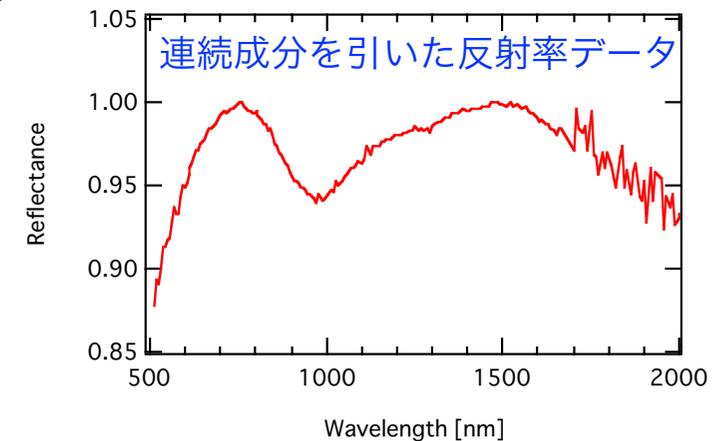


幾何補正

- ・ 暗電流、波長ずれ校正、非線形補正



反射率 (輝度値) 変換、測定機器間補正

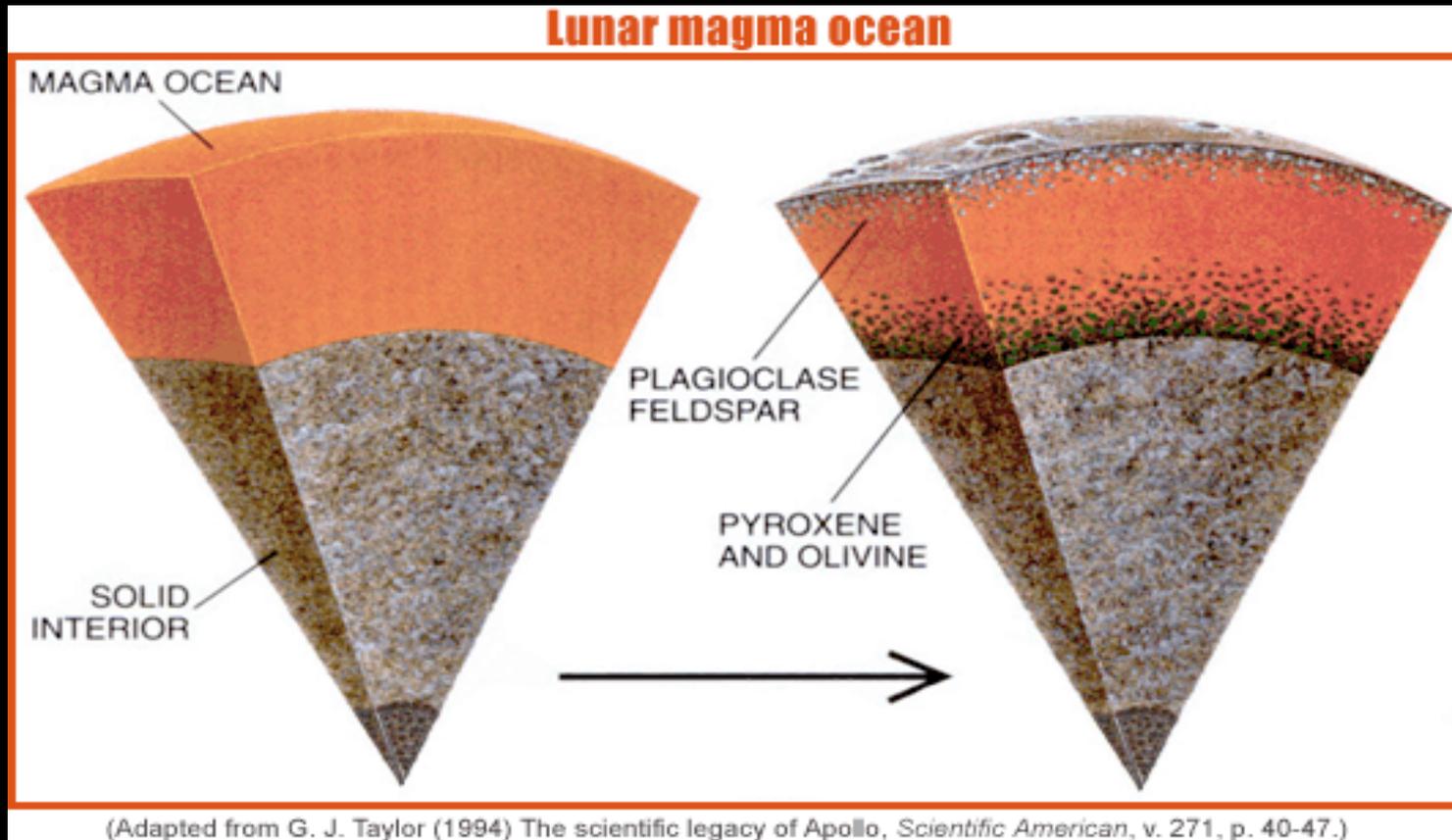


特定スペクトル

月マントル物質を探せ!

# 月マントル物質を探せ!

- 月の起源と進化：月マグマオーシャンシナリオ



組成分布やその構造・進化についてわかっていない部分が多い

# 月マントル物質を探せ!

・月の起源と進化：月マグマオーシャンシナリオ  
月マントルの主要物質と考えられる

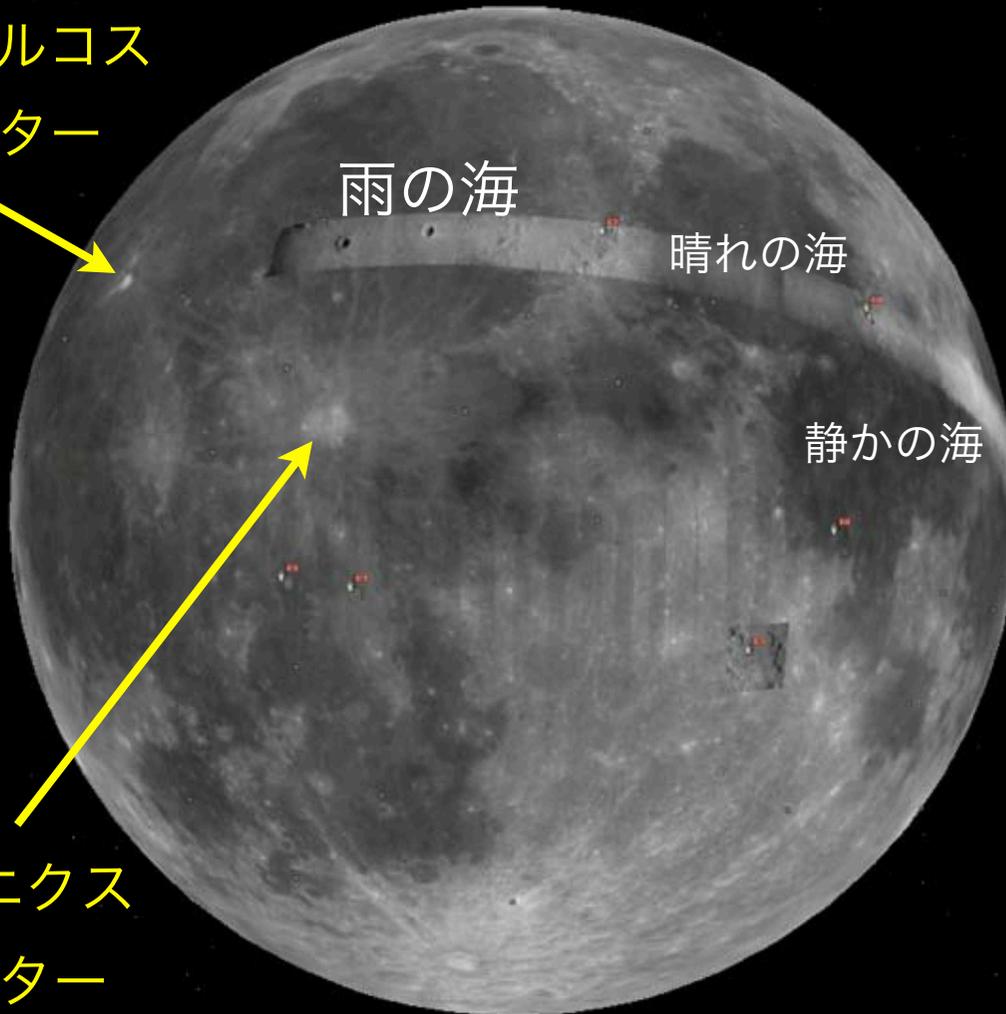
**カンラン石分布**に関する情報が少ない

- ① 地上望遠鏡による発見: コペルニクスおよびアリストアルコスクレータ  
(e.g., Pieters, 1982; Lucey et al. 1986; Pinet et al. 1993)

# 月マントル物質を探せ!

- ① 地上望遠鏡による発見: コペルニクスおよびアリストアルコスクレーター  
(e.g., Pieters, 1982; Lucey et al. 1986; Pinet et al. 1993)

アリストアルコス  
クレーター



連続波長データ  
観測点が表側のみ  
観測点がまばら

コペルニクス  
クレーター

Image NASA / USGS / JAXA / SELENE

©2009 Google

3°00'28.11" N 4°55'08.51" W 標高 -637 メートル

高度 3116.00 キロメートル

# 月マントル物質を探せ!

・月の起源と進化：月マグマオーシャンシナリオ  
月マントルの主要物質と考えられる

**カンラン石分布**に関する情報が少ない

① 地上望遠鏡による発見: コペルニクスおよびアリストアルコスクレータ  
(e.g., Pieters, 1982; Lucey et al. 1986; Pinet et al. 1993)

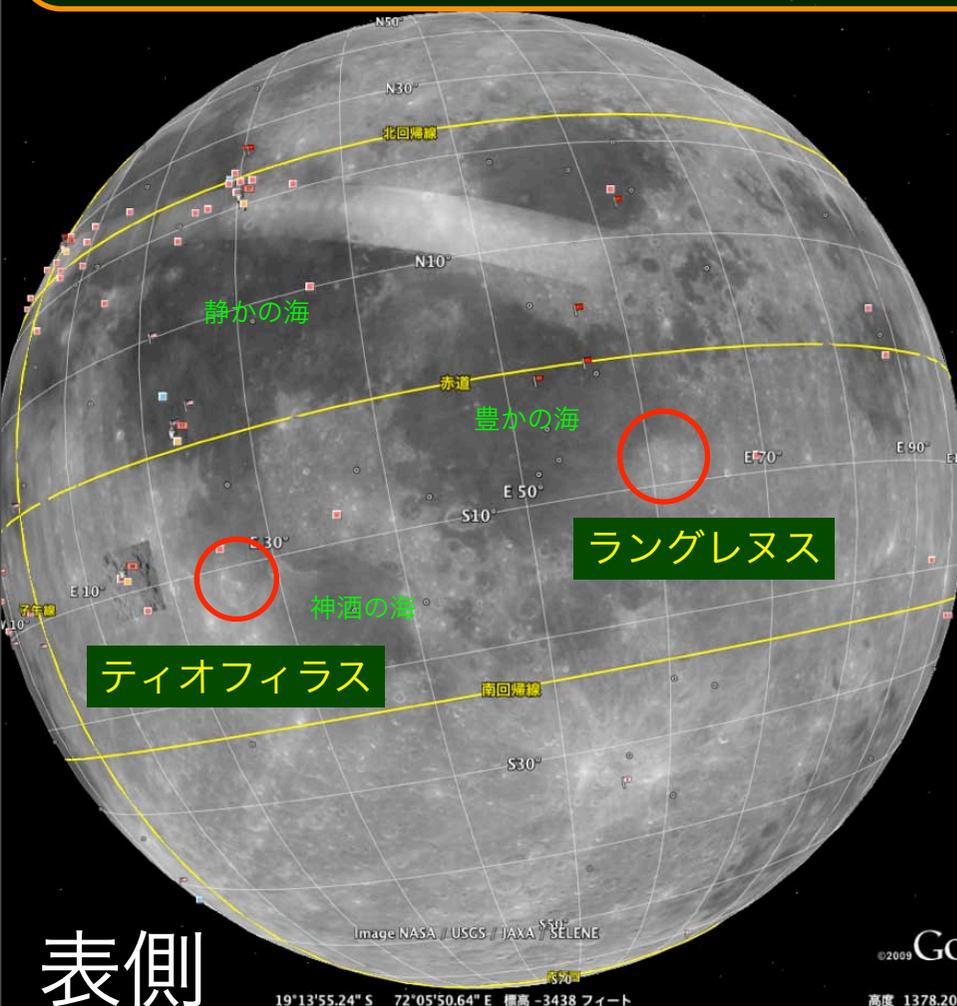
観測点が表側のみ&観測点がまばら

# クレメンタインUV/VIS観測 (Tompkins & Pieters 1999; Peiters et al. 2001)

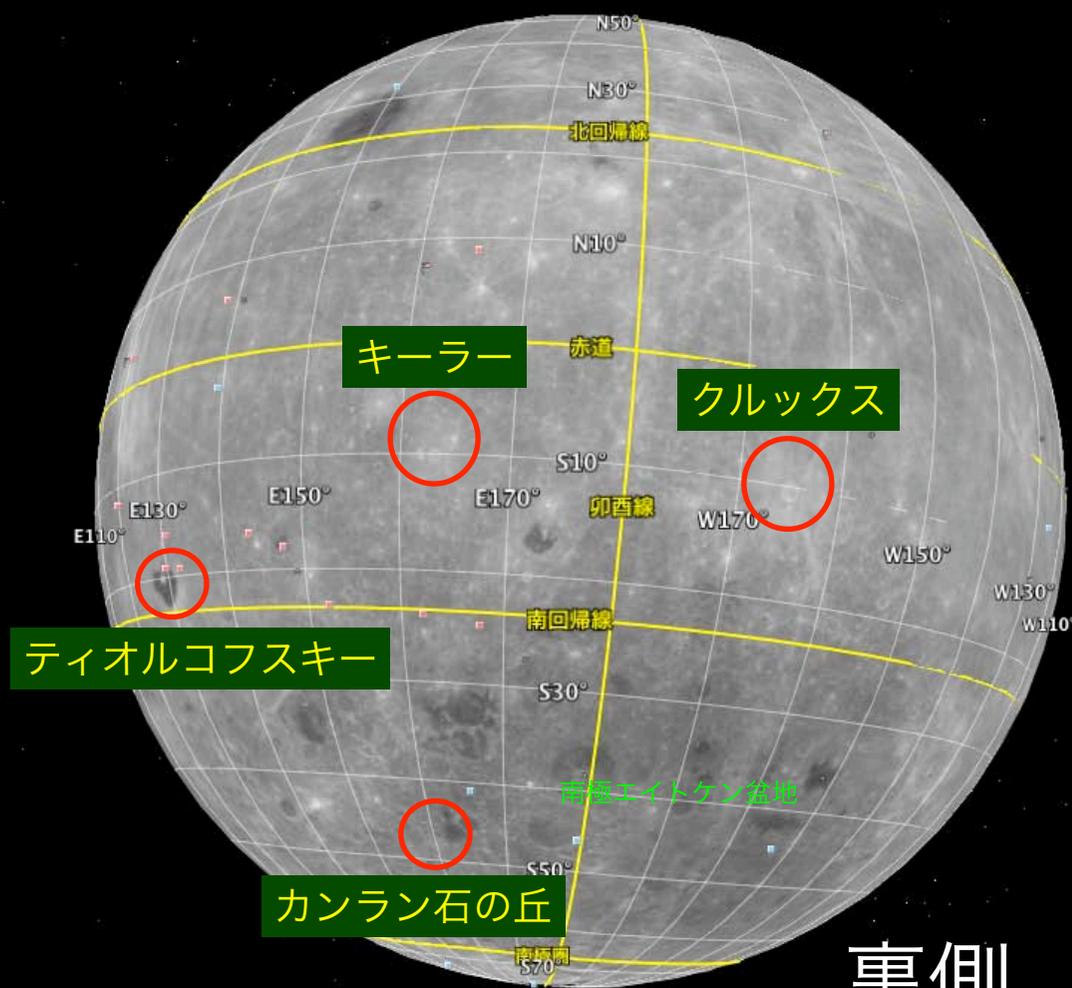
☆カンラン石が支配的領域

- ・ 5つのクレーター
- ・ 南極エイトケン盆地の丘

- ① ツィオルコフスキー
- ② ラングレヌス
- ③ テオフィラス
- ④ クルックス
- ⑤ キーラー
- ⑥ カンラン石の丘 (南極エイトケン盆地)



表側



裏側

# クレメンタインUV/VIS観測 (Tompkins & Pieters 1999; Peiters et al. 2001)

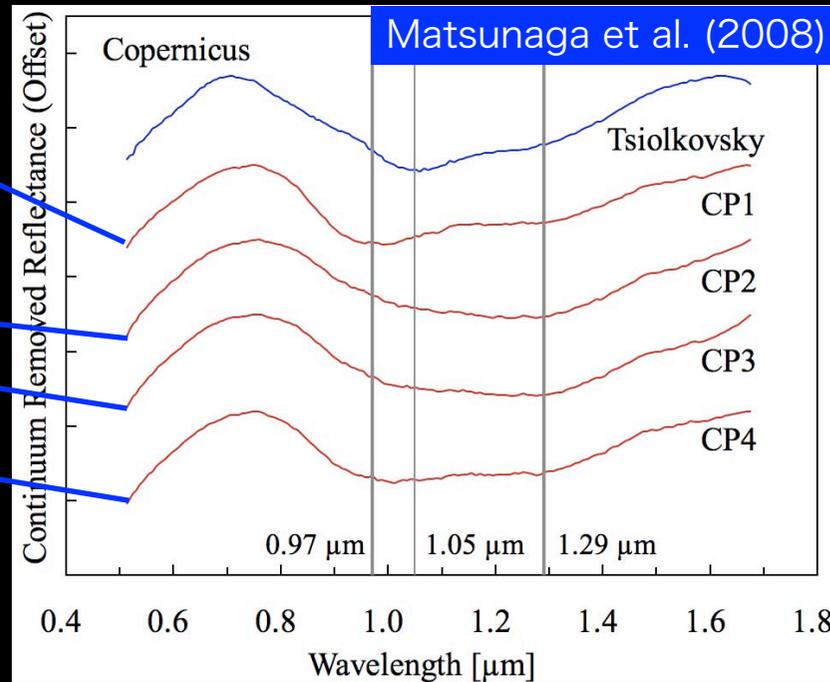
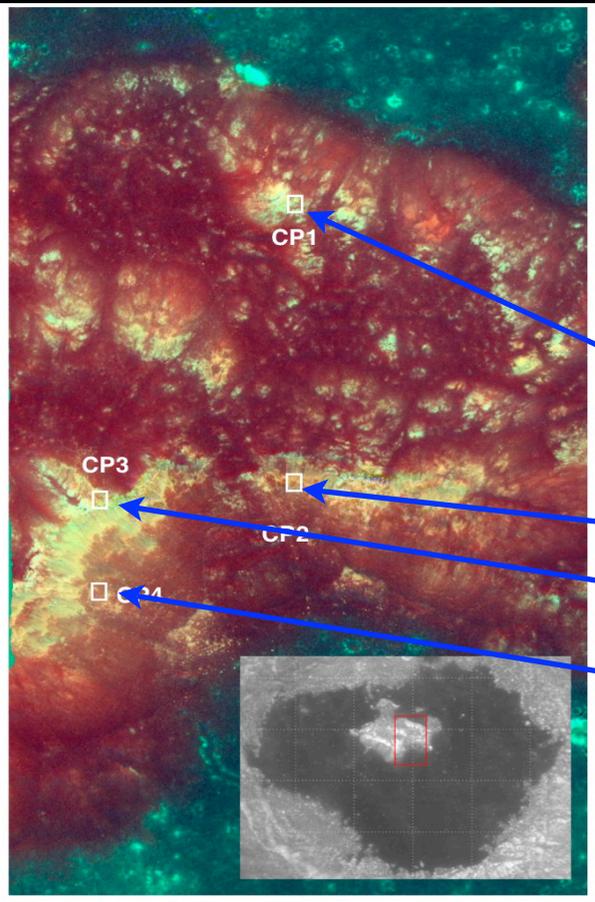
☆カンラン石が支配的領域

- ・ 5つのクレーター
- ・ 南極エイトケン盆地の丘

- ① ツィオルコフスキー
- ② ラングレヌス
- ③ テオフィラス
- ④ クルックス
- ⑤ キーラー
- ⑥ カンラン石の丘 (南極エイトケン盆地)

## スペクトルプロファイルによる再調査 (Matsunaga et al. 2008)

ツィオルコフスキーについて調べてみると



# クレメンタインUV/VIS観測 (Tompkins & Pieters 1999; Peiters et al. 2001)

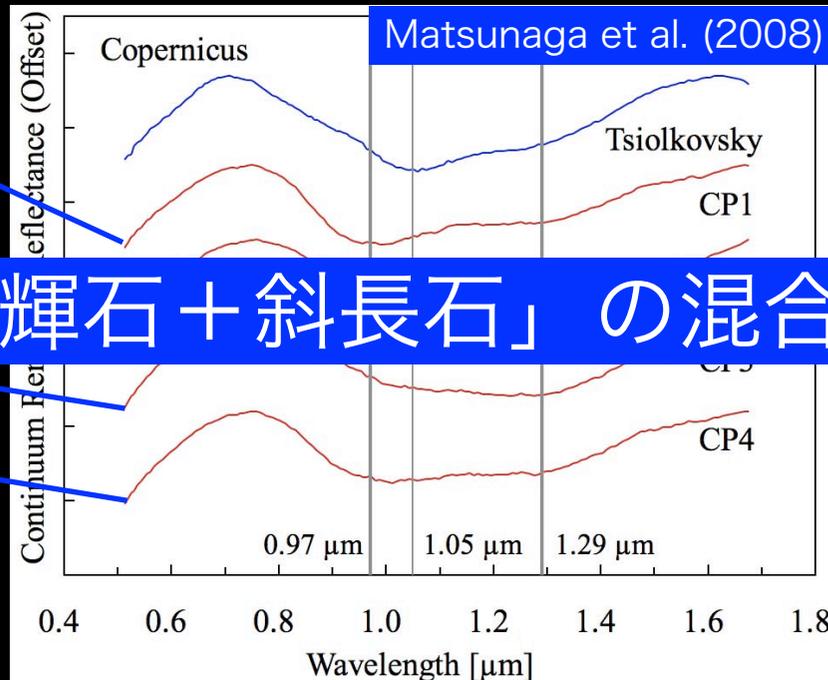
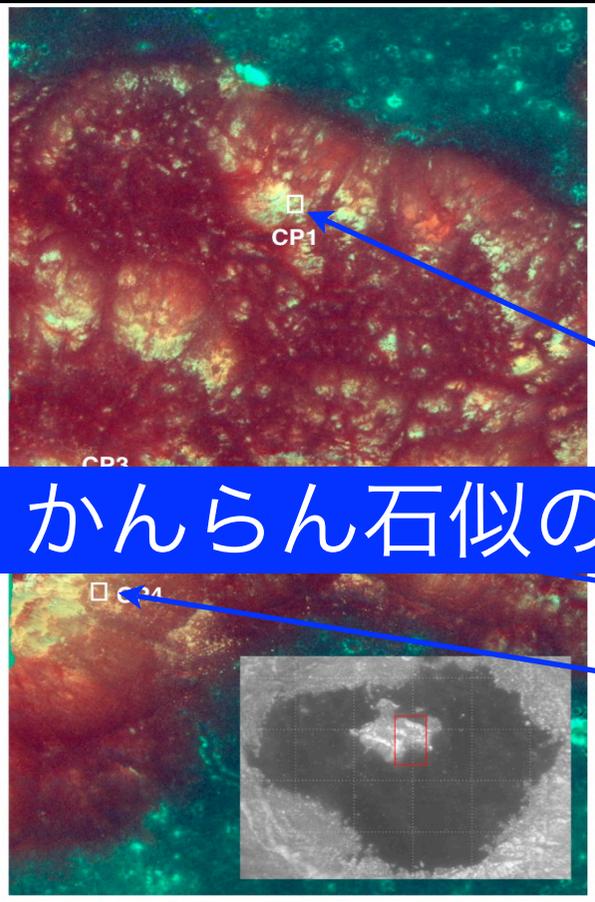
☆カンラン石が支配的領域

- ・ 5つのクレーター
- ・ 南極エイトケン盆地の丘

- ① ツィオルコフスキー
- ② ラングレヌス
- ③ テオフィラス
- ④ クルックス
- ⑤ キーラー
- ⑥ カンラン石の丘 (南極エイトケン盆地)

## スペクトルプロファイルによる再調査 (Matsunaga et al. 2008)

ツィオルコフスキーについて調べてみると



かんらん石似の「輝石+斜長石」の混合スペクトル

# クレメンティンUV/VIS観測 (Tompkins & Pieters 1999; Peiters et al. 2001)

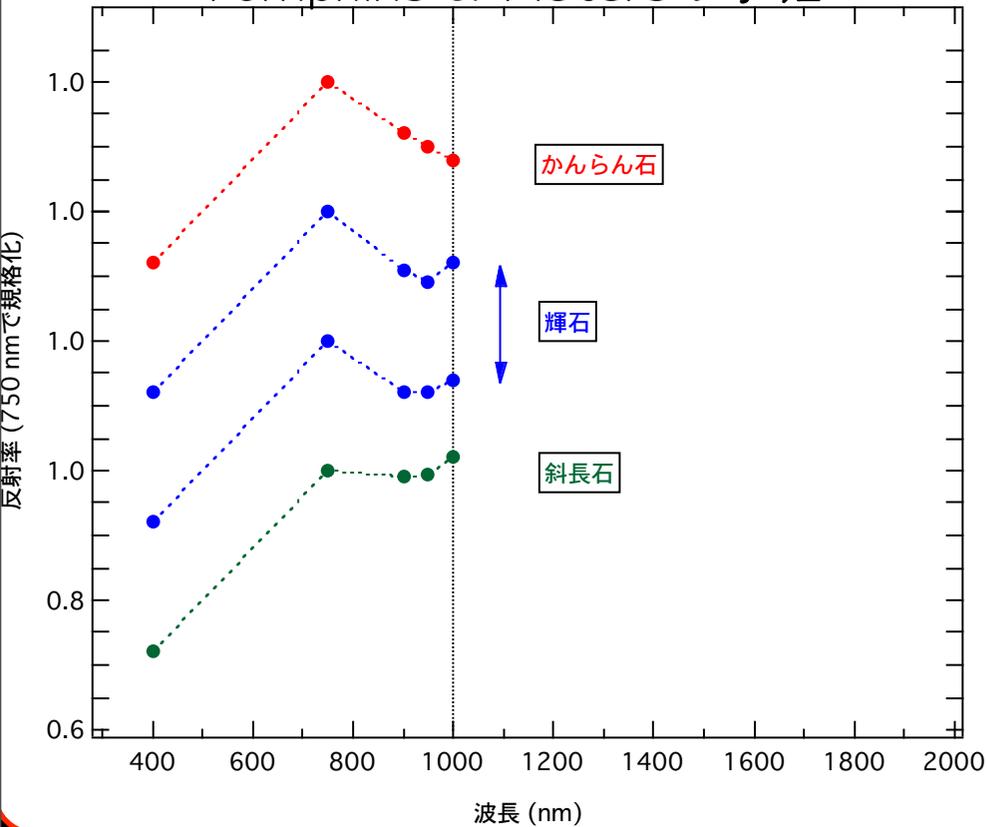
☆カンラン石が支配的領域

- ・ 5つのクレーター
- ・ 南極エイトケン盆地の丘

- ① ツィオルコフスキー
- ② ラングレヌス
- ③ テオフィラス
- ④ クルックス
- ⑤ キーラー
- ⑥ カンラン石の丘 (南極エイトケン盆地)

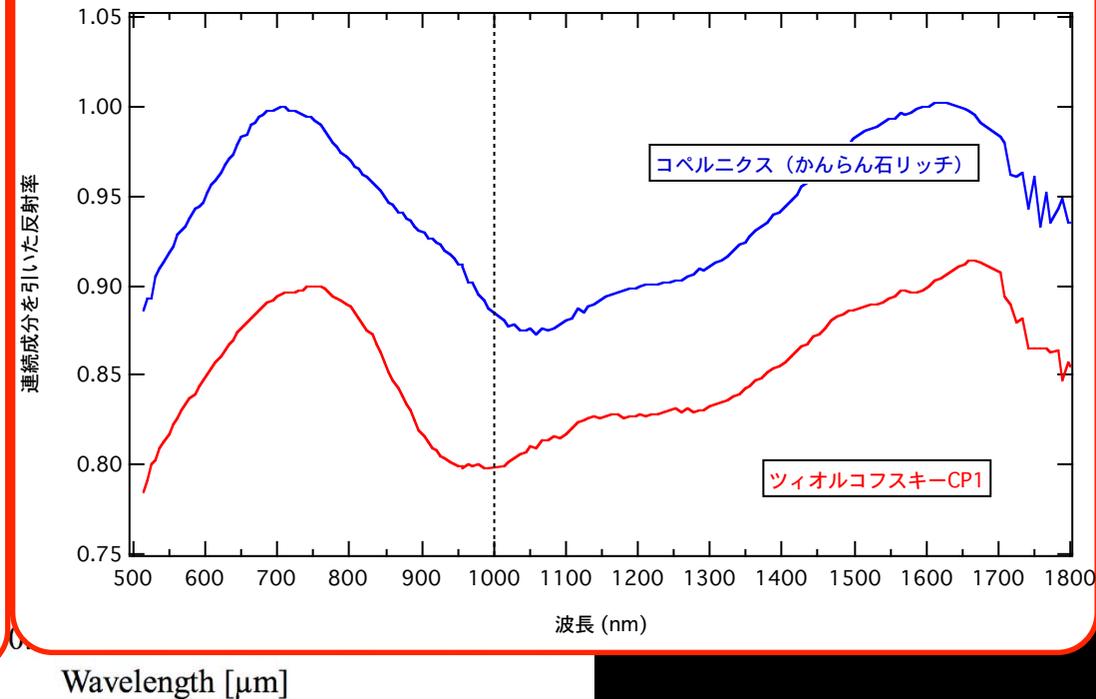
## スペクトルプロファイルによる再調査 (Matsunaga et al. 2008)

Tompkins & Pietersの手法



## ツィオルコフスキーについて調べてみると

### SPデータ



# 月マントル物質を探せ!

① 地上望遠鏡による観測：2箇所

観測点が表側のみ&観測点がまばら

② 探査機Clementine搭載のUVVISカメラ: 6箇所

カンラン石を本当に検知したのか・・・?

# 月マントル物質を探せ!

① 地上望遠鏡による観測：2箇所

観測点が表側のみ&観測点がまばら

② 探査機Clementine搭載のUVVISカメラ: 6箇所

カンラン石を本当に検知したのか・・・?

## 重要ポイント

- ・  $1\mu\text{m}$ バンドをカバーする連続波長反射率データ
- ・ 全球サーベイ

# 本研究

## Lunar Imager/Spectrometer and Spectral Profiler

onboard Selenological and Engineering Explorer (SELENE)/Kaguya

### スペクトルプロファイラ

- ・ 0.5-2.6 $\mu$ m連続波長スペクトル
- ・ スペクトル分解能: 6-8 nm
- ・ 全スペクトル数: 6800万点以上
- ・ 観測視野: 200~500 m  $\times$  500 m



全データを用いたグローバルサーベイ

本研究：

月面上のカンラン石全球分布が明らかになった！

# グローバルサーベイソフトの開発：SP in C

## SP in C の特徴

- ・ SOAC (SELENE Operaton and Analysis Center @相模原)でLevel 2B,2Cを作成するプログラム (RGC) を基に作成

①全自動プログラム

②全観測データに対応

→様々な観測条件、全観測モード

③高速化：半周回(約1万点) → ~15秒

☆全データ処理時間→~1日

+

- ・ 特定スペクトルだけをピックアップする関数

処理の流れ

SP L2Aデータ

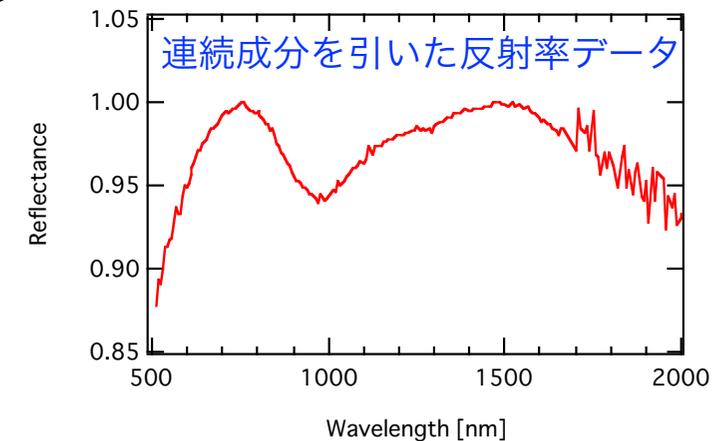


幾何補正

- ・ 暗電流、波長ずれ校正、非線形補正



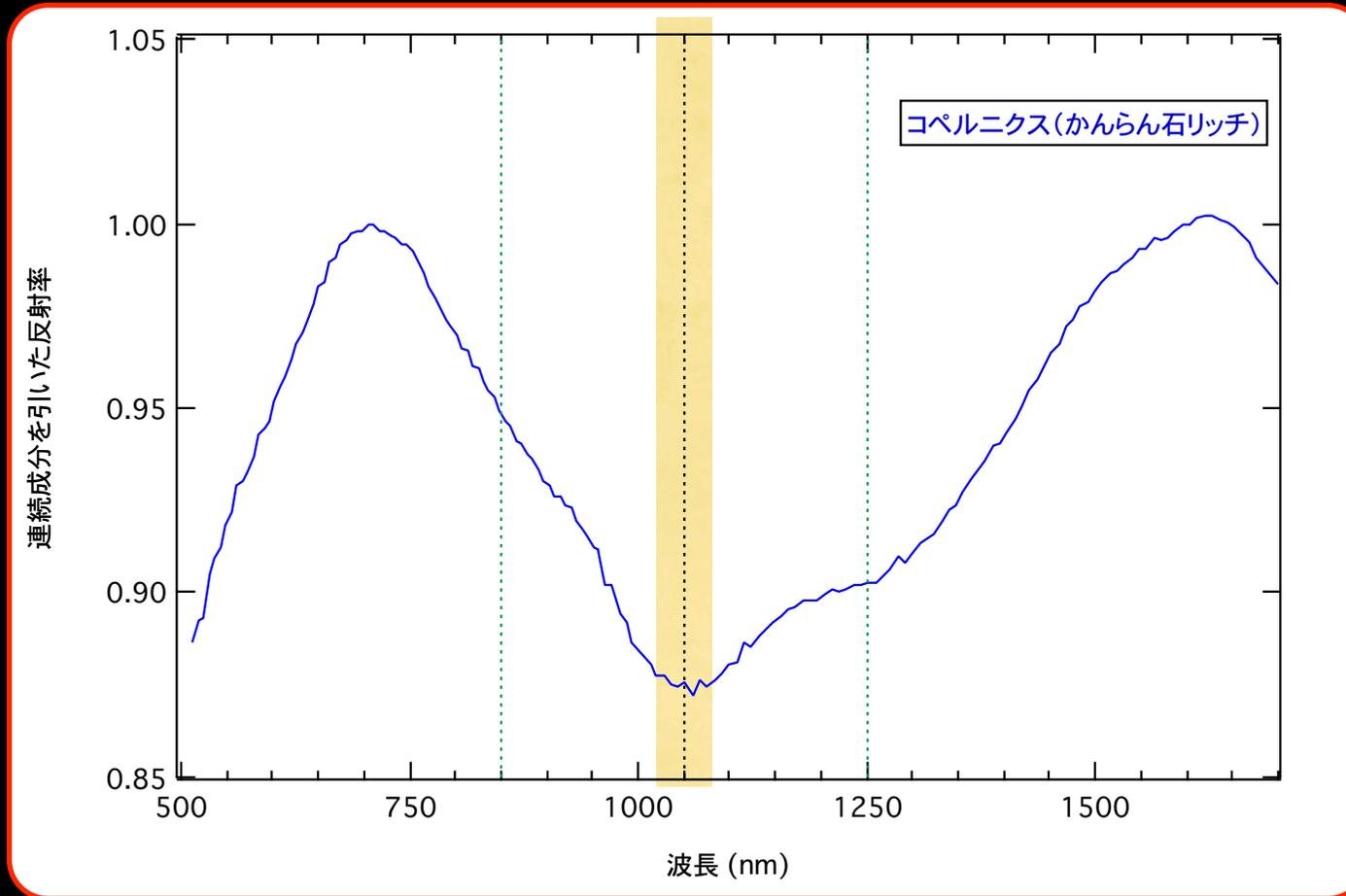
反射率 (輝度値) 変換、測定機器間補正



特定スペクトル

# カンラン石スペクトル検知プログラム

## SP in Cによるカンラン石スペクトル探しアルゴリズム



吸収の一番深い波長が  
 $1.05 \pm 0.03 \mu\text{m}$ に来るかどうか？

# カンラン石スペクトル検知プログラム

全球に応用すると・・・？



68,773,722 points → 245個に絞り込まれる

全スペクトル数 → 68,773,722 !

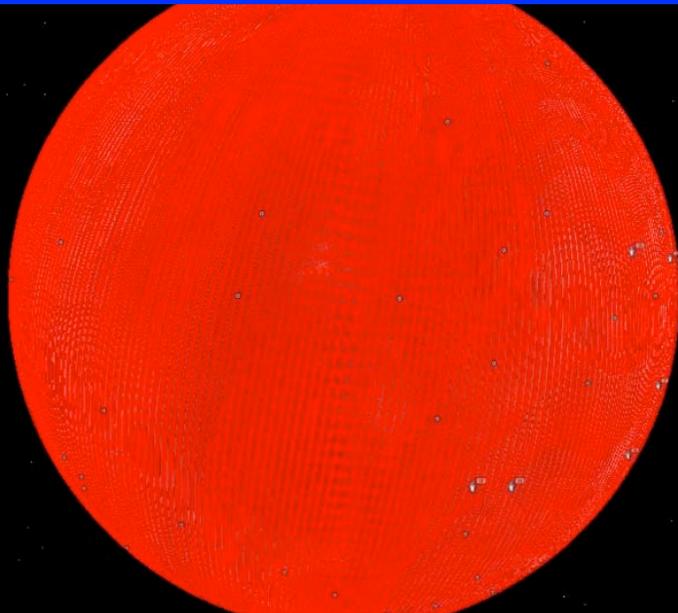
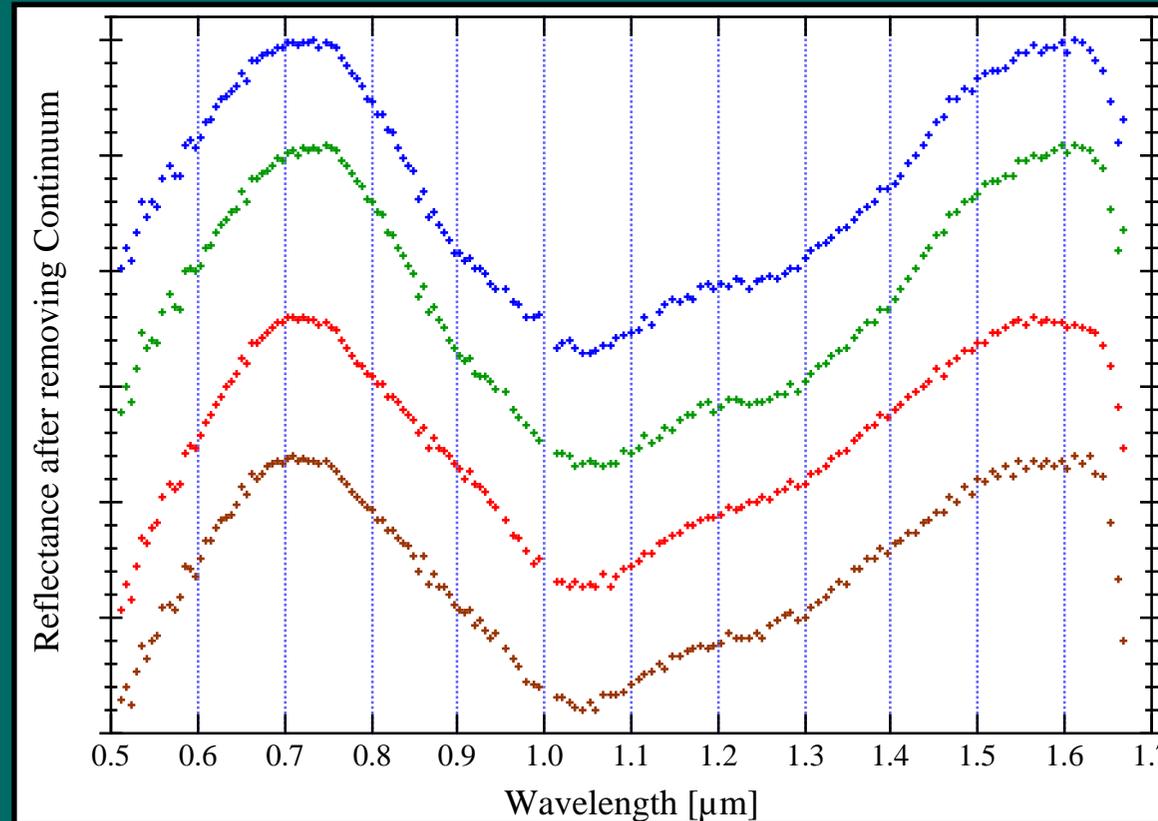


Image NASA / USGS / JAXA / SELENE

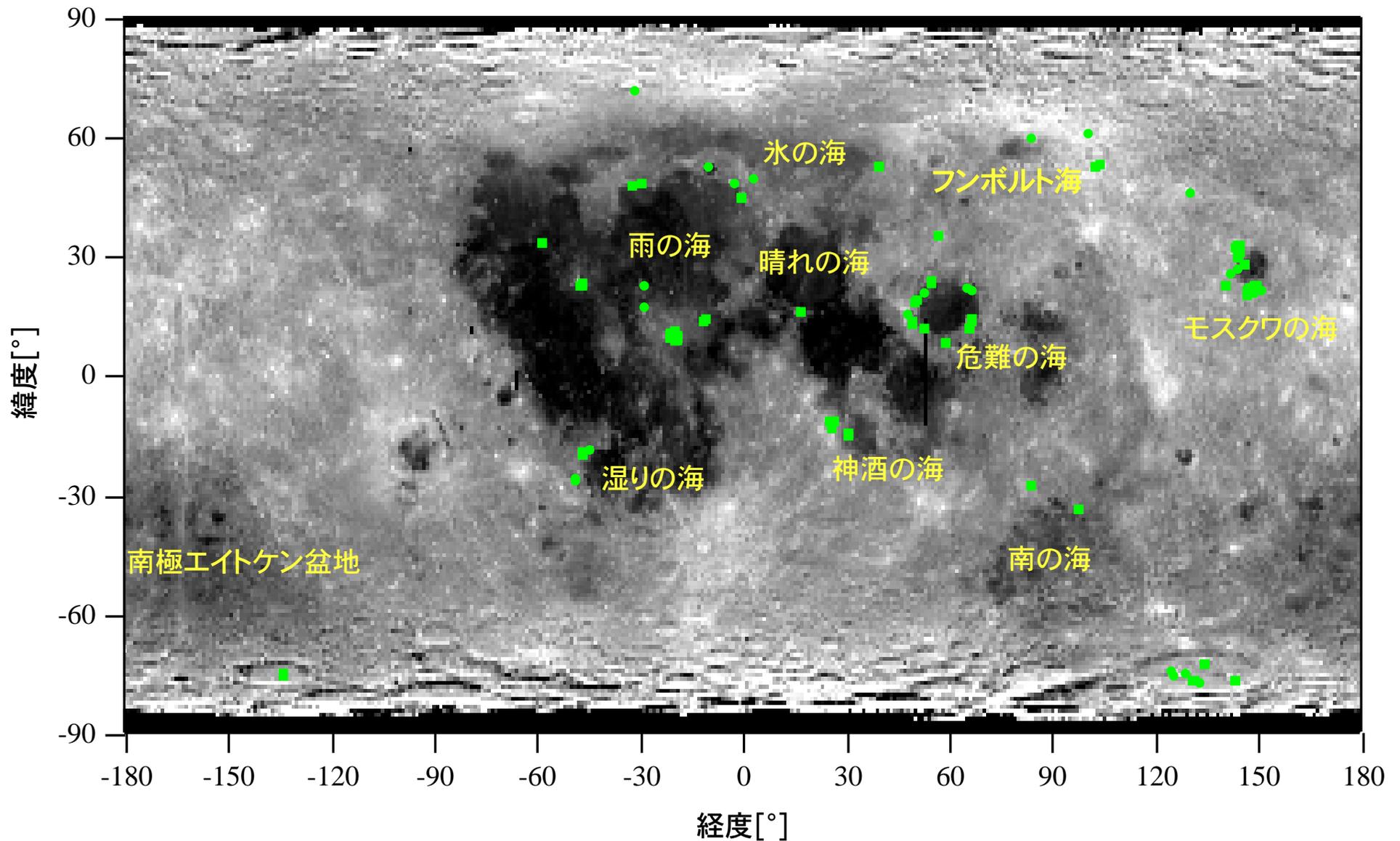
©2005 Google

20°54'06.43" N 44°27'00.30" W 標高 -1509 メートル 高度 2774.22 キロメートル



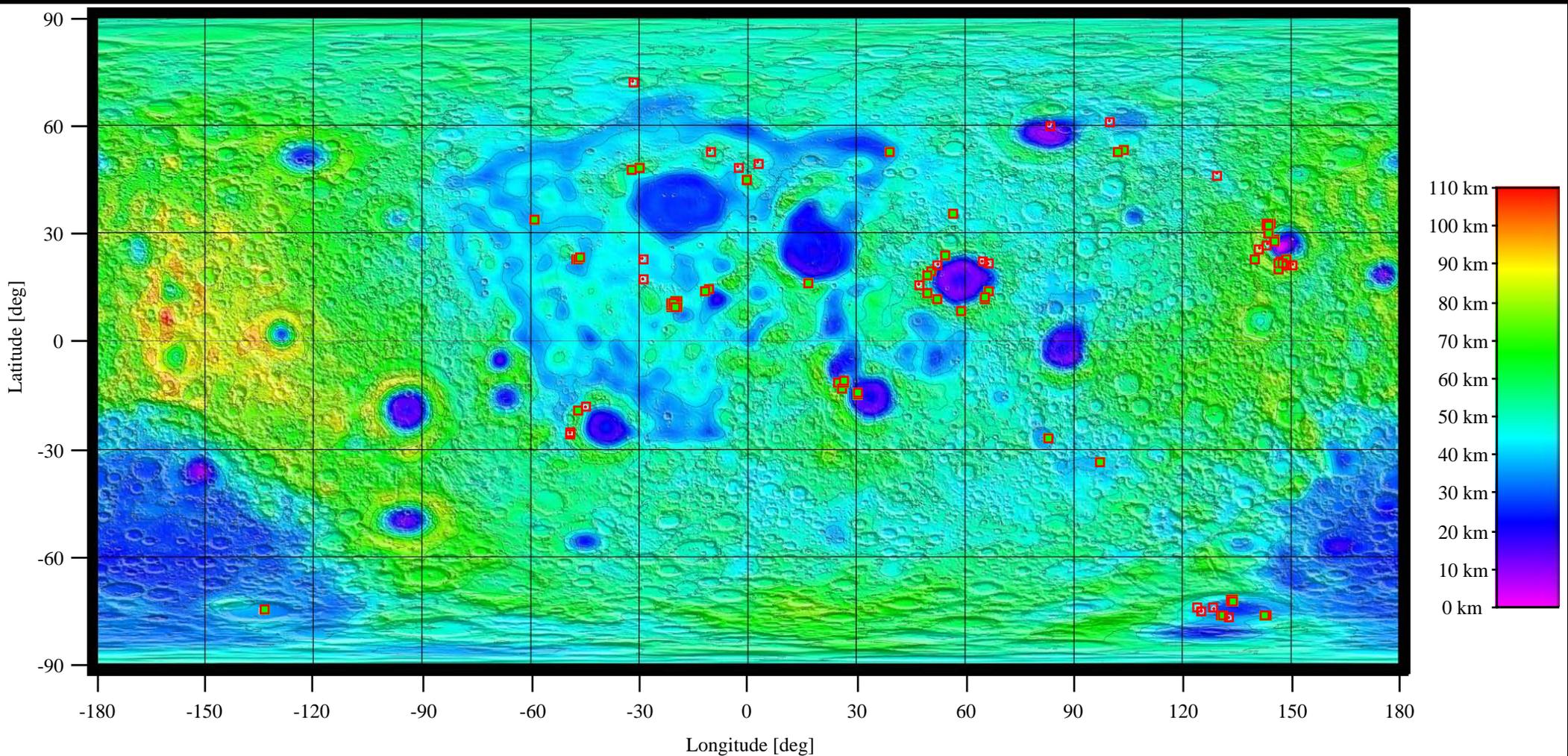
綺麗なカンラン石バンドを示す: 0.85, 1.05, 1.25  $\mu\text{m}$  !

# 月面上のカンラン石に富むスペクトルを持つ場所 (245点)



- ・月の表側に集中
- ・裏側ではモスクワの海および南極エイトケン盆地近傍に存在

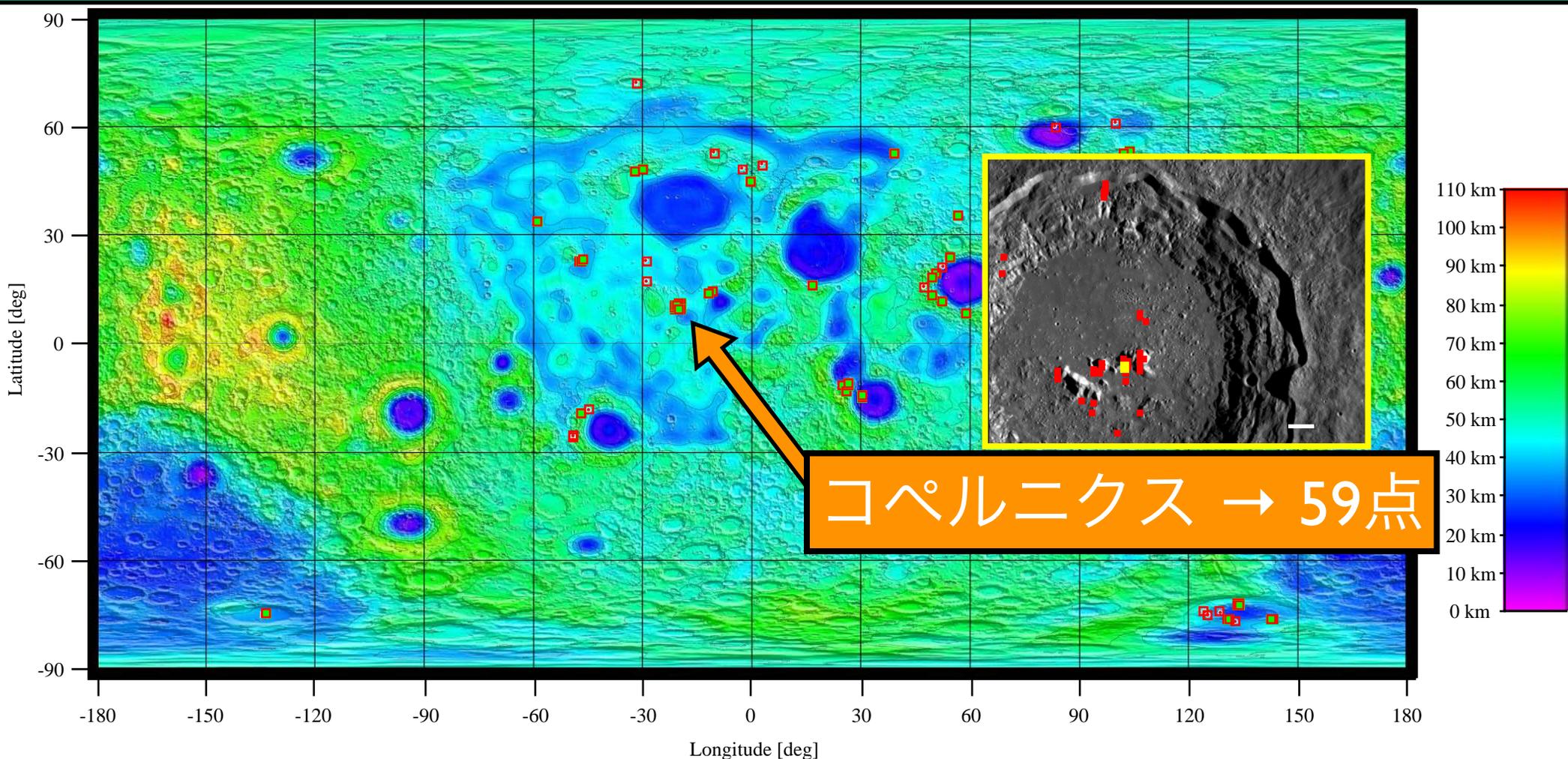
# 月面上のカンラン石に富むスペクトルを持つ場所 (245点)



背景地図: かぐやによって求められた地殻厚さ分布  
(SELENE gravity and a topographic model by Araki et al. 2009 Namiki et al. 2009)

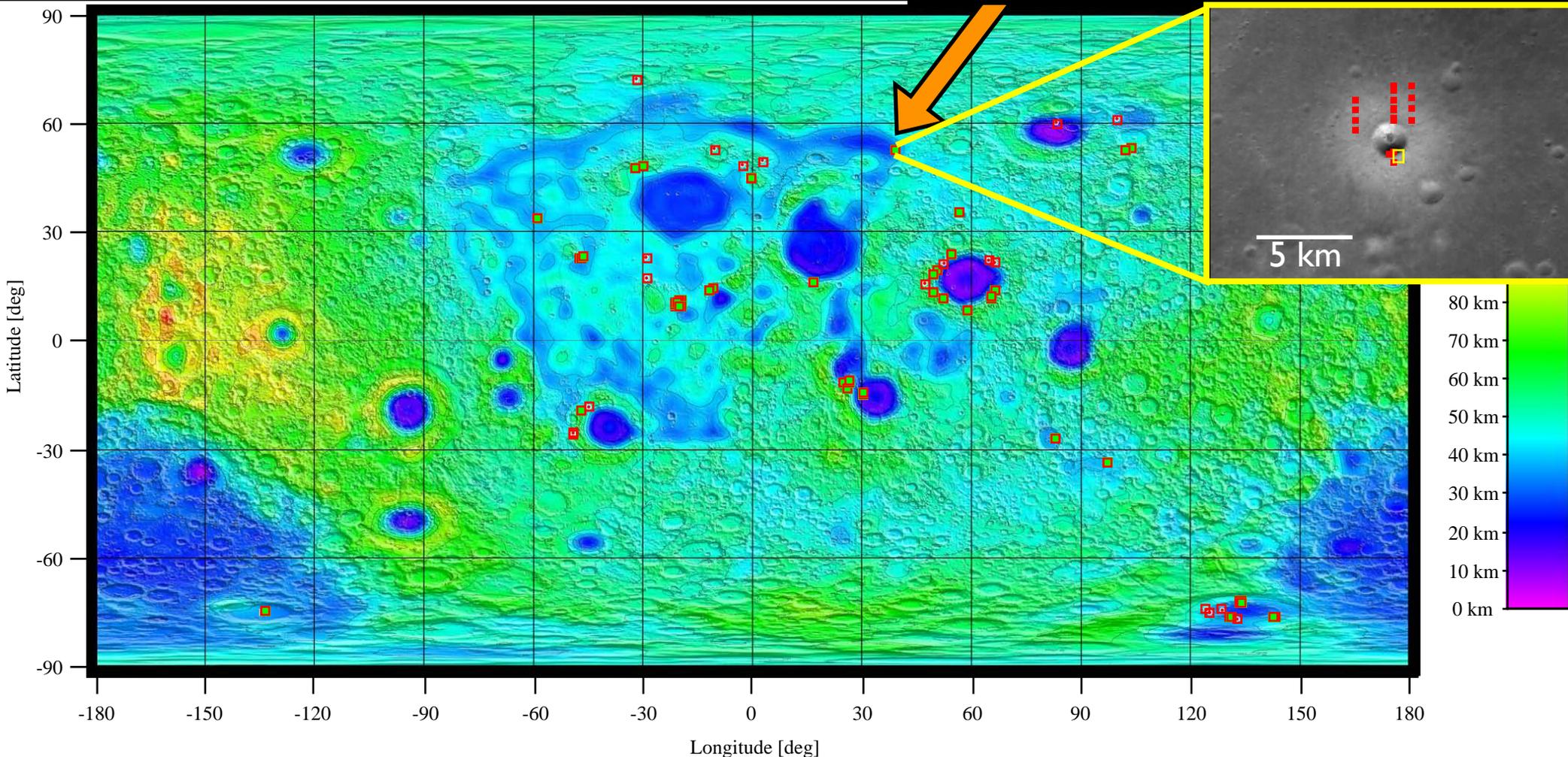
- 地殻厚の薄いところの集中
- 裏側の高地領域には見つからない

# 月面上のカンラン石に富むスペクトルを持つ場所 (245点)



背景地図: かぐやによって求められた地殻厚さ分布  
(SELENE gravity and a topographic model by Araki et al. 2009 Namiki et al. 2009)

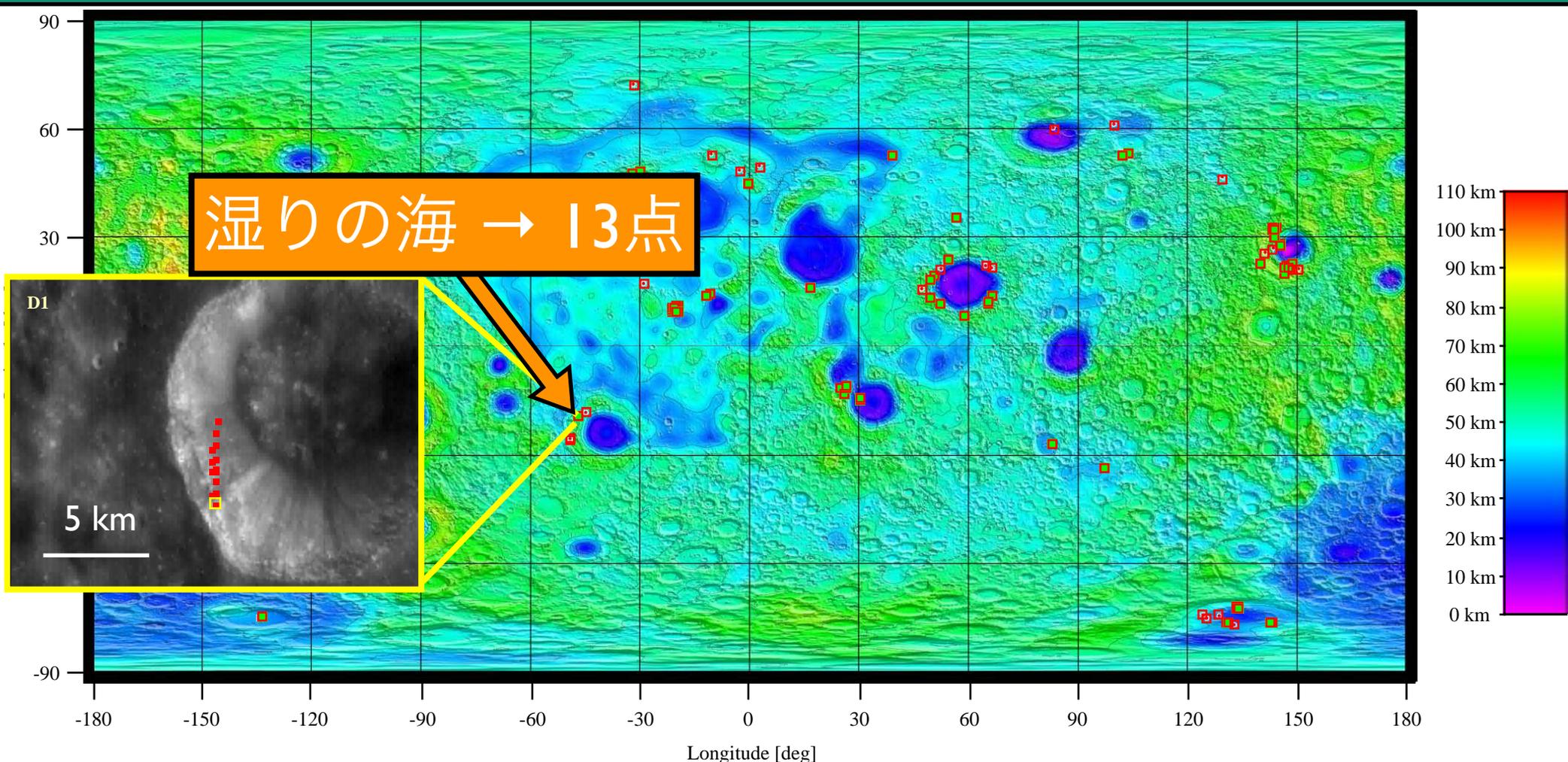
・カンラン石に富む場所 → 新しいクレーターなどの特定の場所に限定



背景地図: かぐやによって求められた地殻厚さ分布  
(SELENE gravity and a topographic model by Araki et al. 2009 Namiki et al. 2009)

- ・カンラン石に富む場所 → 新しいクレーターなどの特定の場所に限定  
→ クレータ内壁、がけ崩れ構造、新しいクレータ周り

# 月面上のカンラン石に富むスペクトルを持つ場所 (245点)

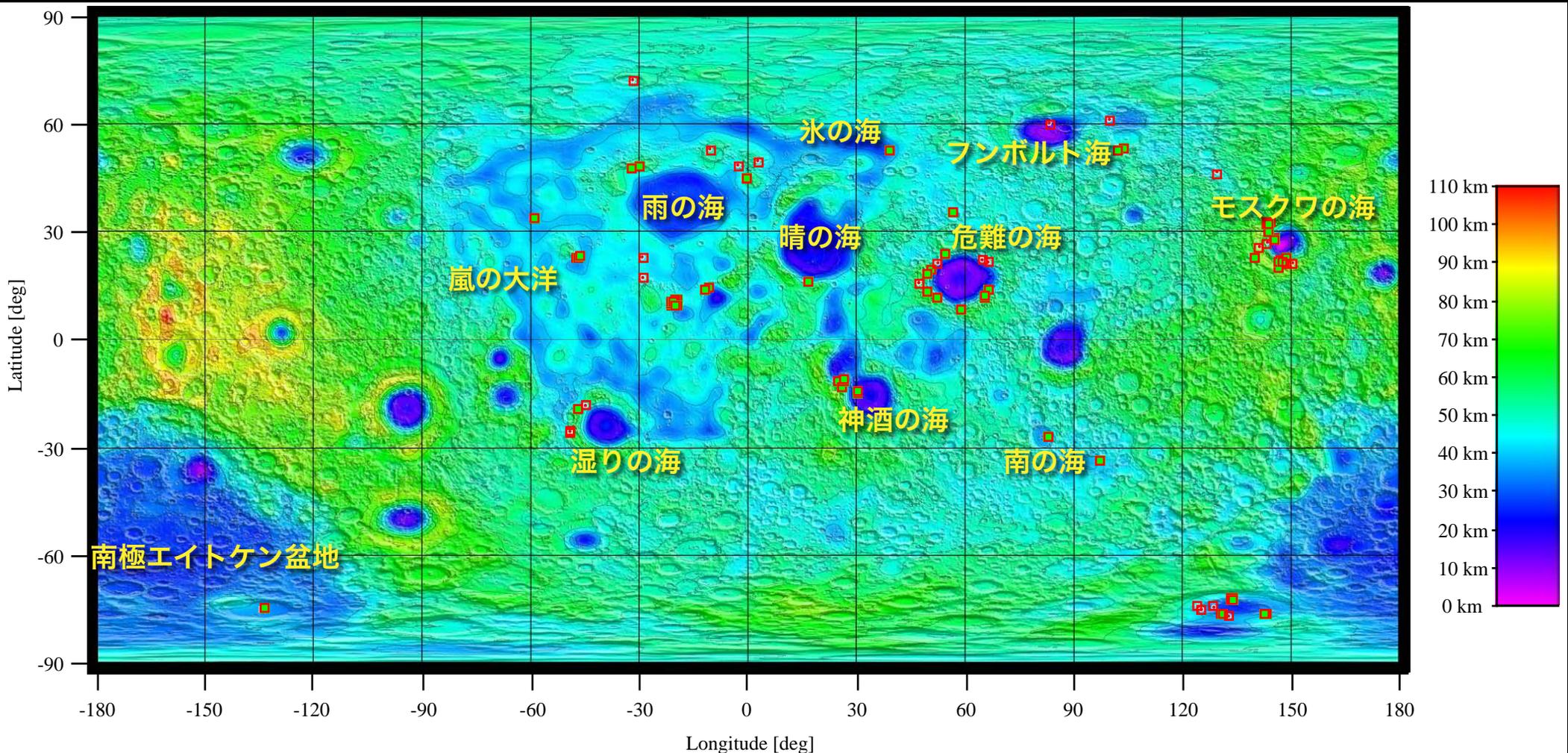


背景地図: かぐやによって求められた地殻厚さ分布  
(SELENE gravity and a topographic model by Araki et al. 2009 Namiki et al. 2009)

- ・カンラン石に富む場所 → 新しいクレーターなどの特定の場所に限定  
→ クレータ内壁、がけ崩れ構造、新しいクレータ周り

☆ **245**点のカンラン石の富む場所 → **34**箇所の特定領域に分類

# 月面上のカンラン石に富むスペクトルを持つ場所 (245点)



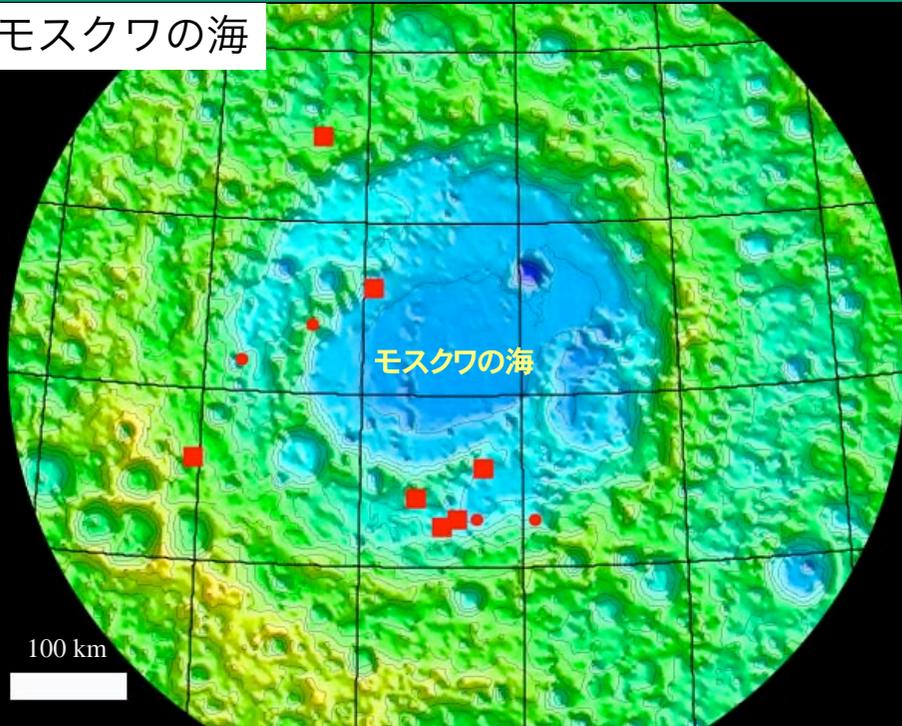
背景地図: かぐやによって求められた地殻厚さ分布  
(SELENE gravity and a topographic model by Araki et al. 2009 Namiki et al. 2009)

オリビンに富む領域

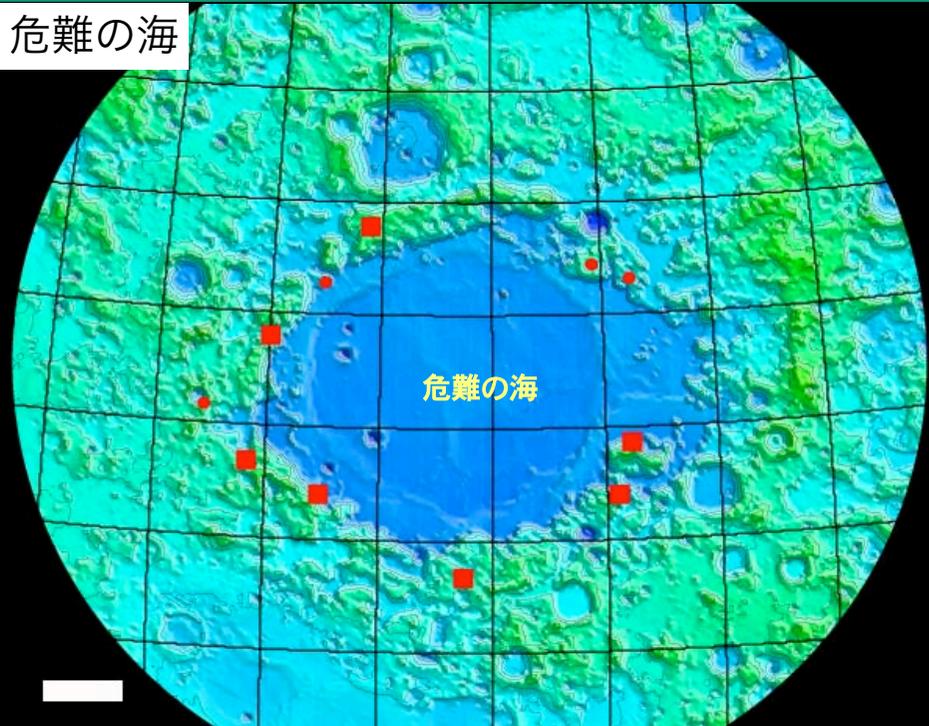
→ 地殻厚の薄い衝突盆地周辺に限られる

# 衝突盆地周りの分布

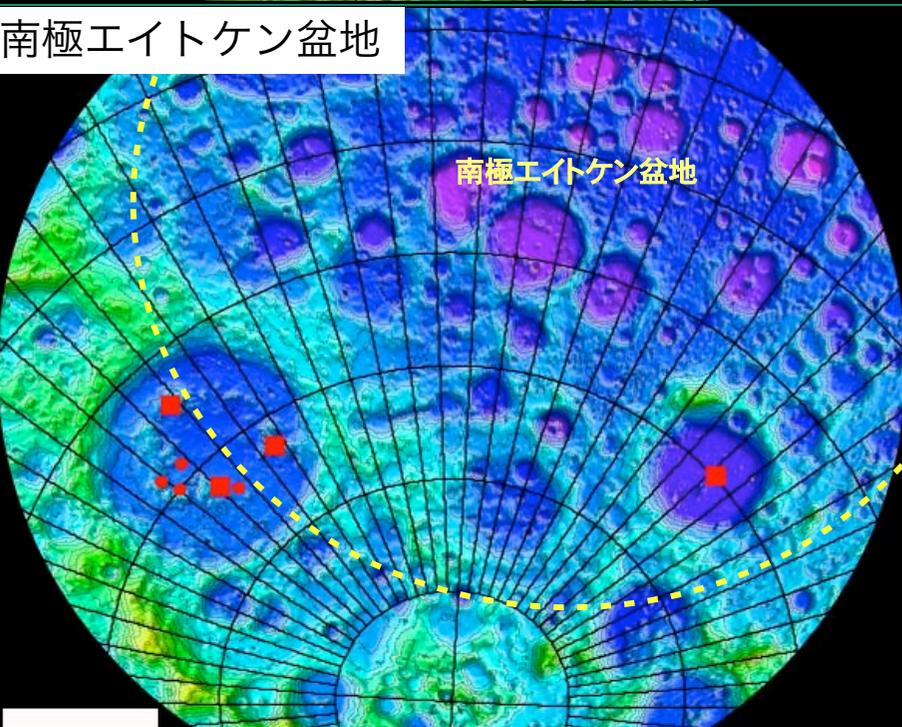
モスクワの海



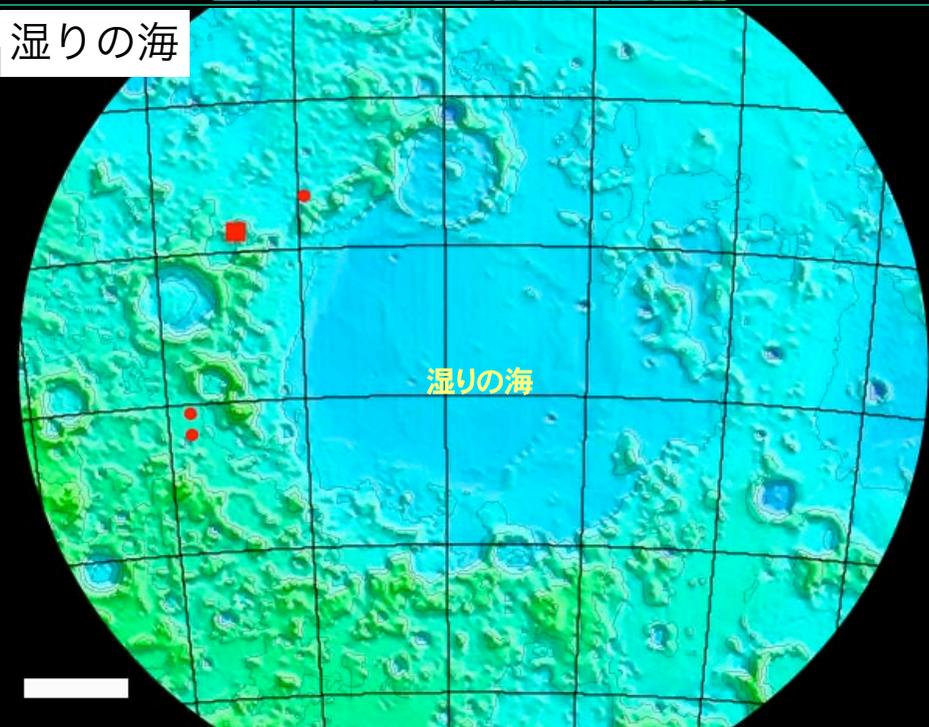
危難の海



南極エイトケン盆地

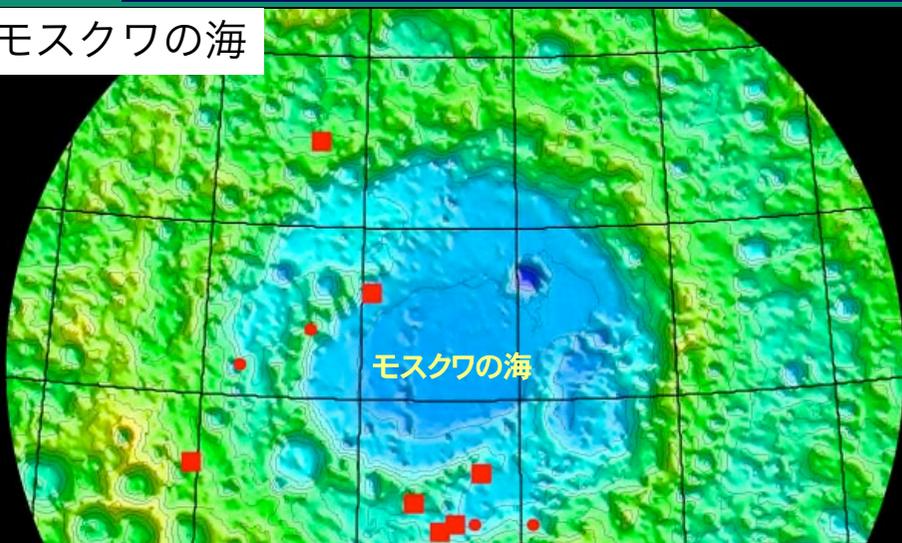


湿りの海

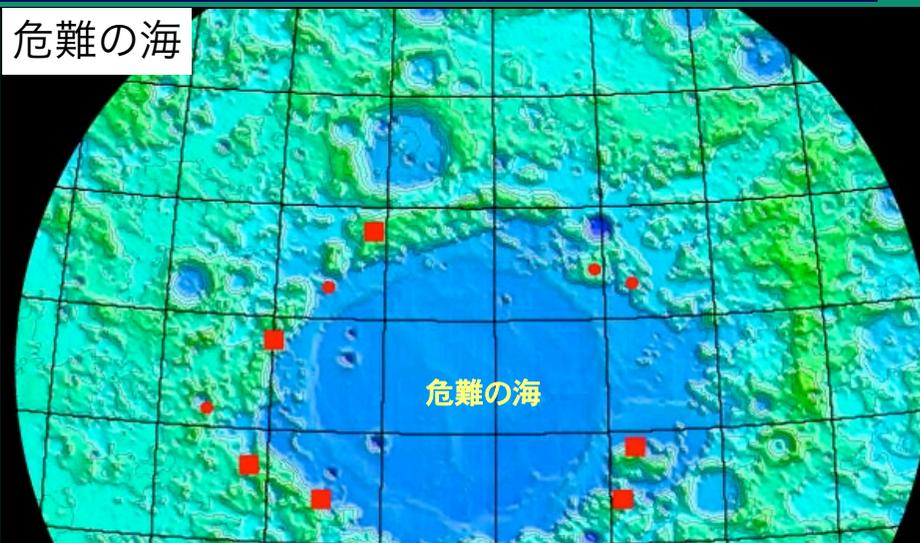


# 衝突盆地周りの分布

モスクワの海

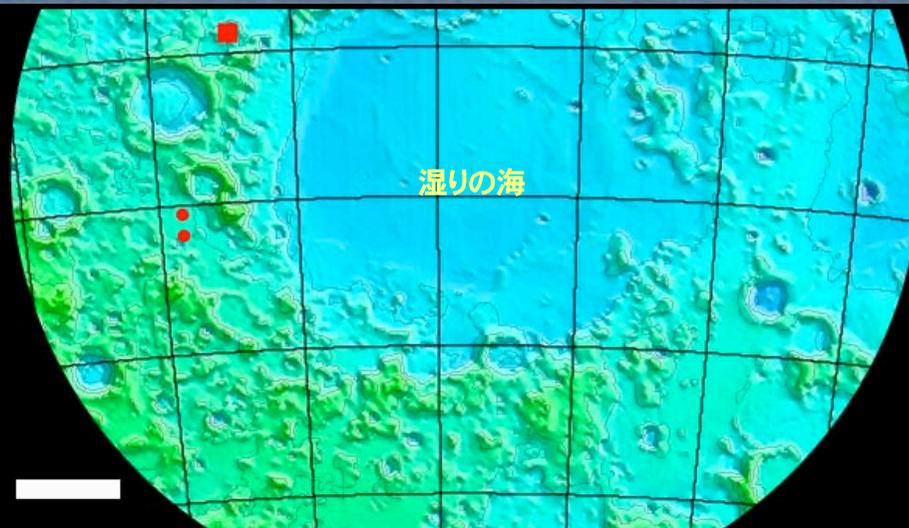
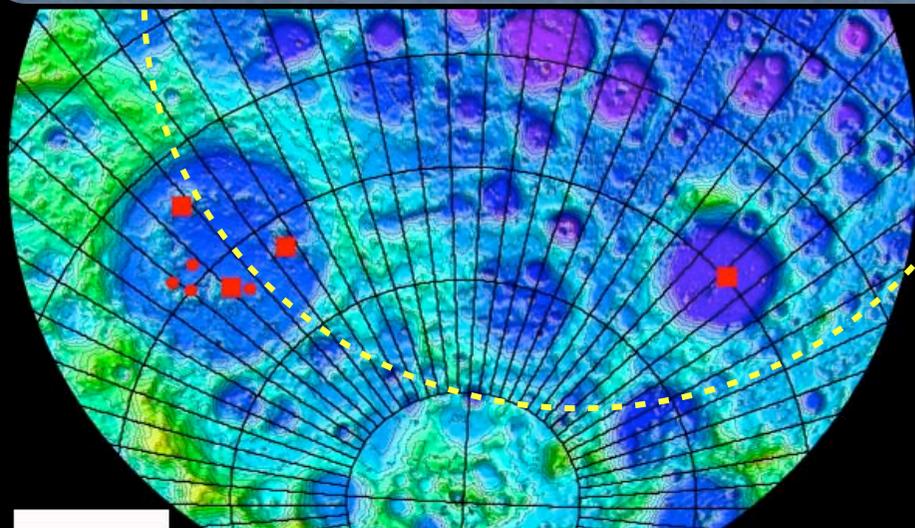


危難の海

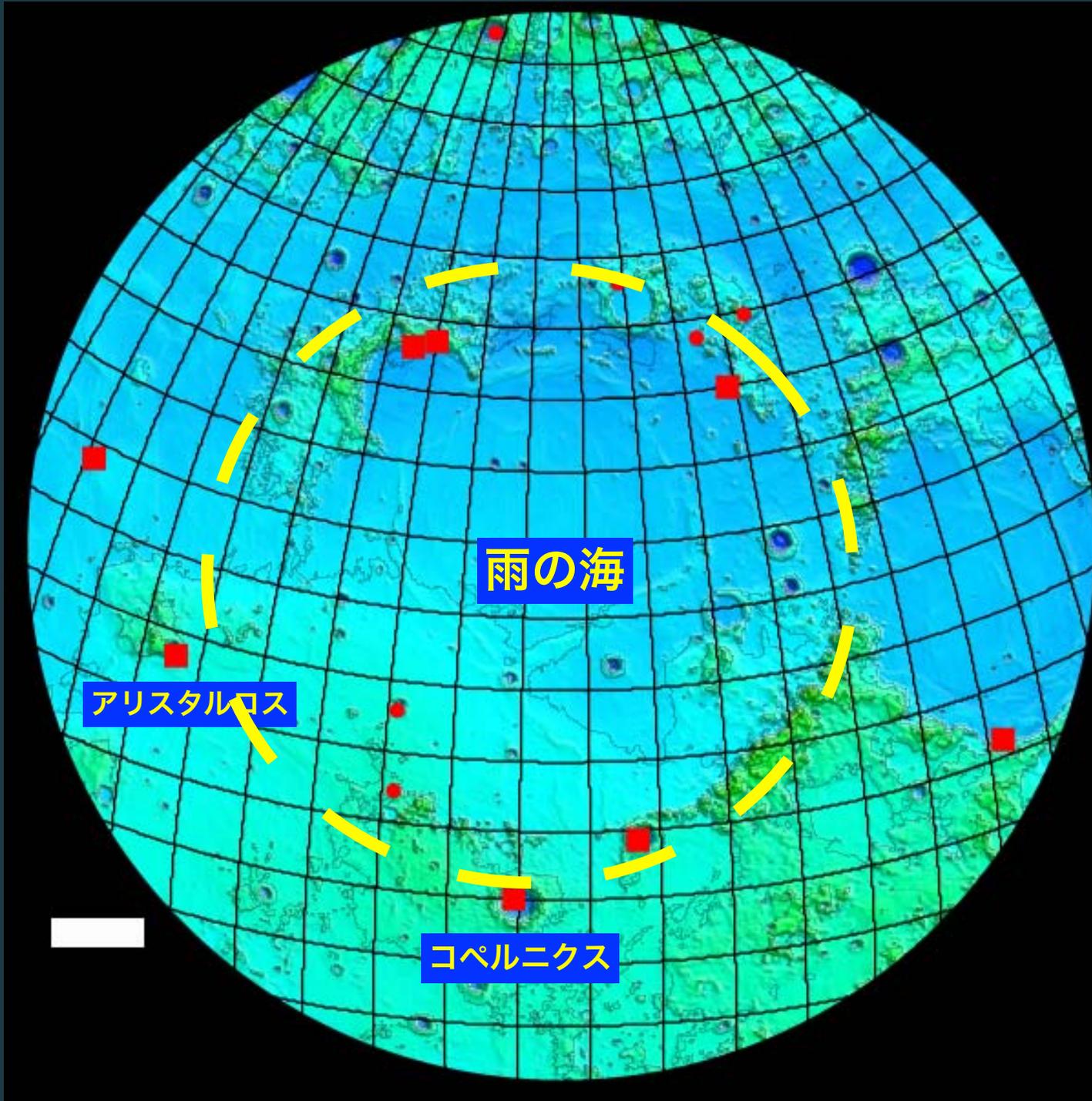


大きな特徴：衝突盆地周辺の円環領域にのみ分布

- ・ 盆地中央の海領域にない
- ・ リムから離れた領域にも無い

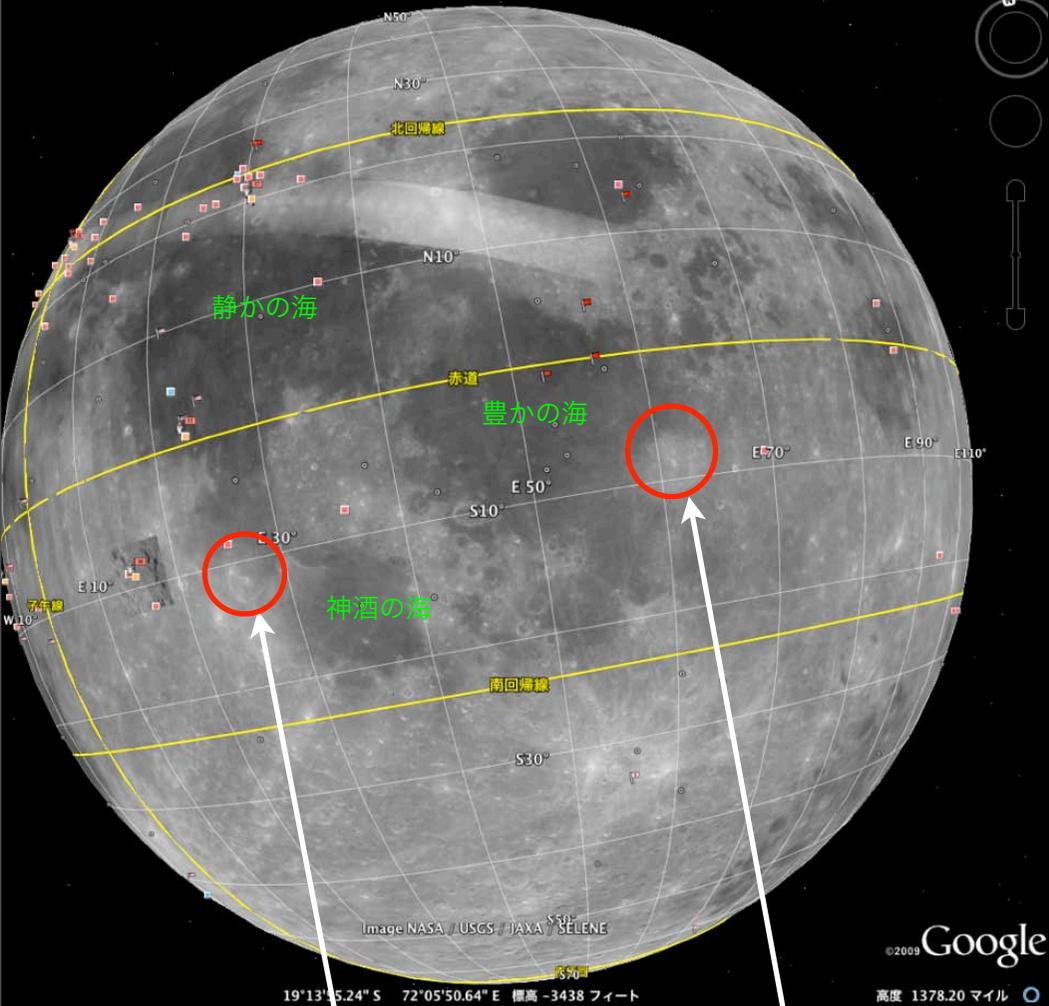


# 衝突盆地周りの分布



# クレメンタインの報告は？

表側

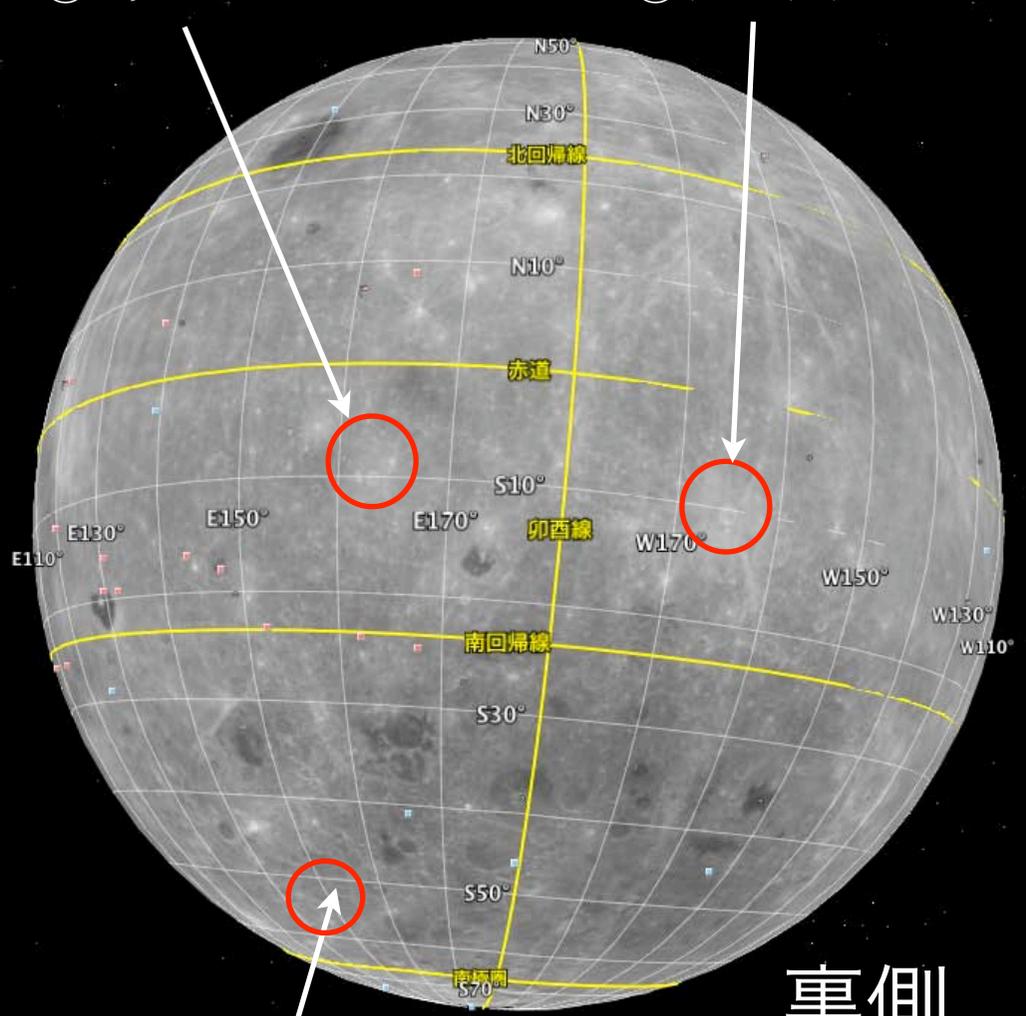


④テオフィラス

①ラングレヌス

②キラー

③クルックス

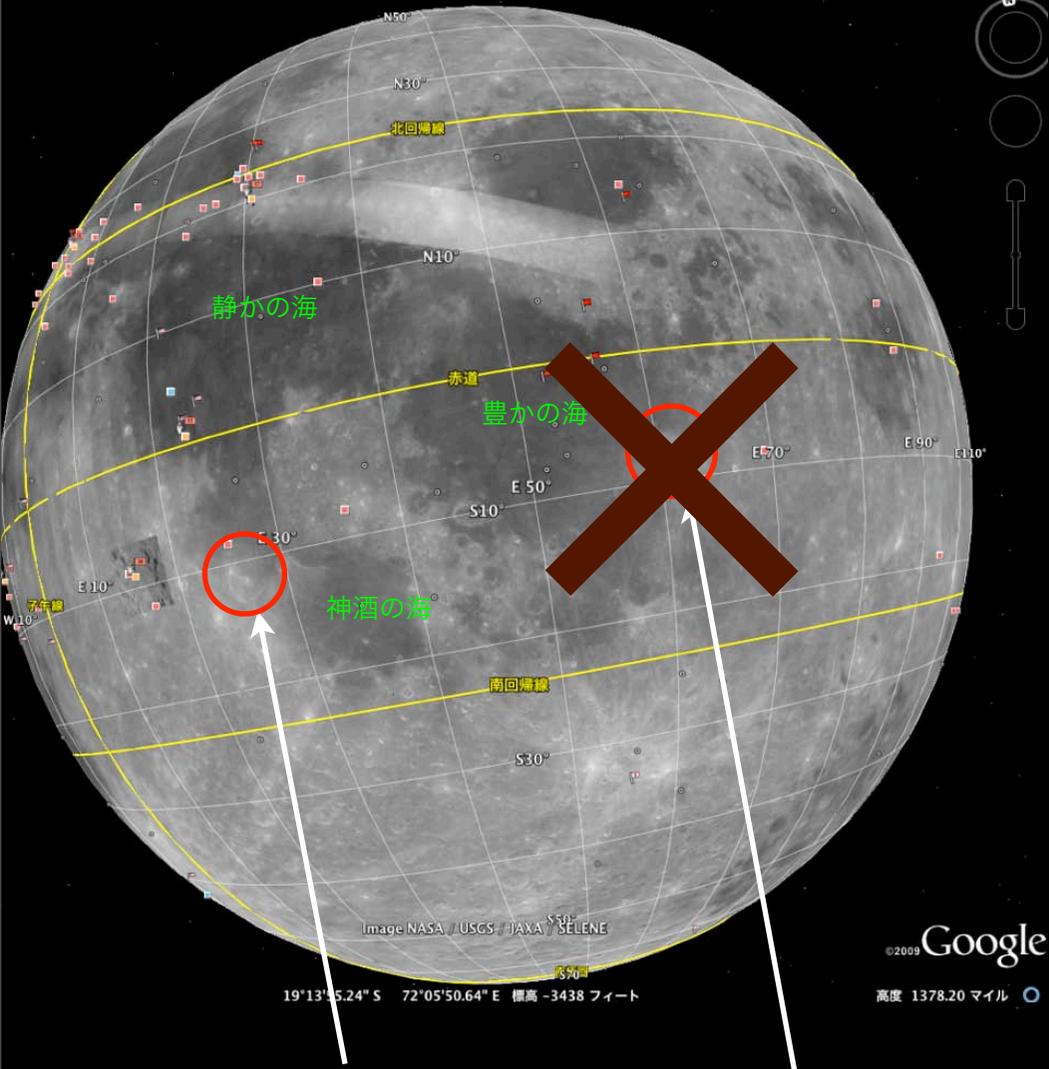


裏側

⑤カンラン石の丘

# クレメンタインの報告は？

表側

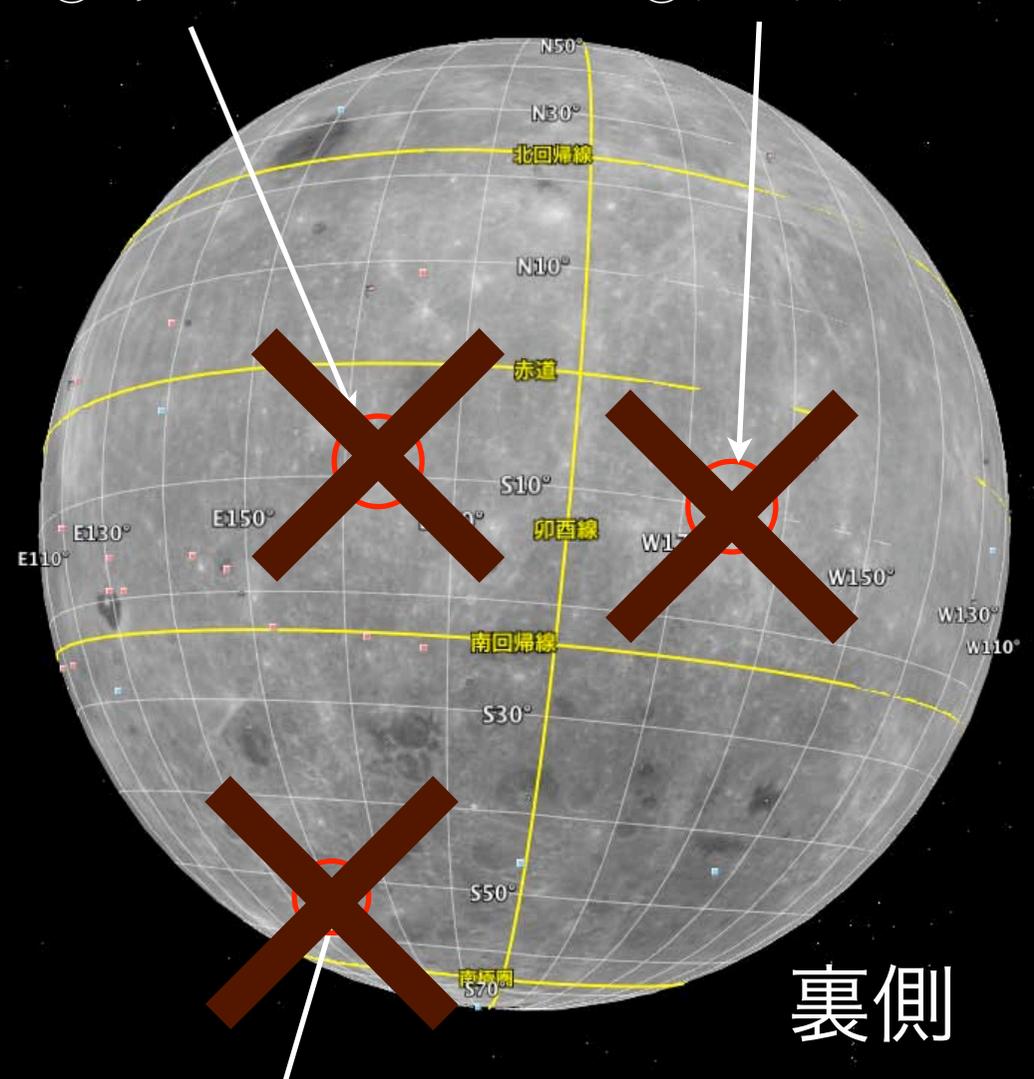


④テオフィラス

①ラングレヌス

② キーラー

③クルックス



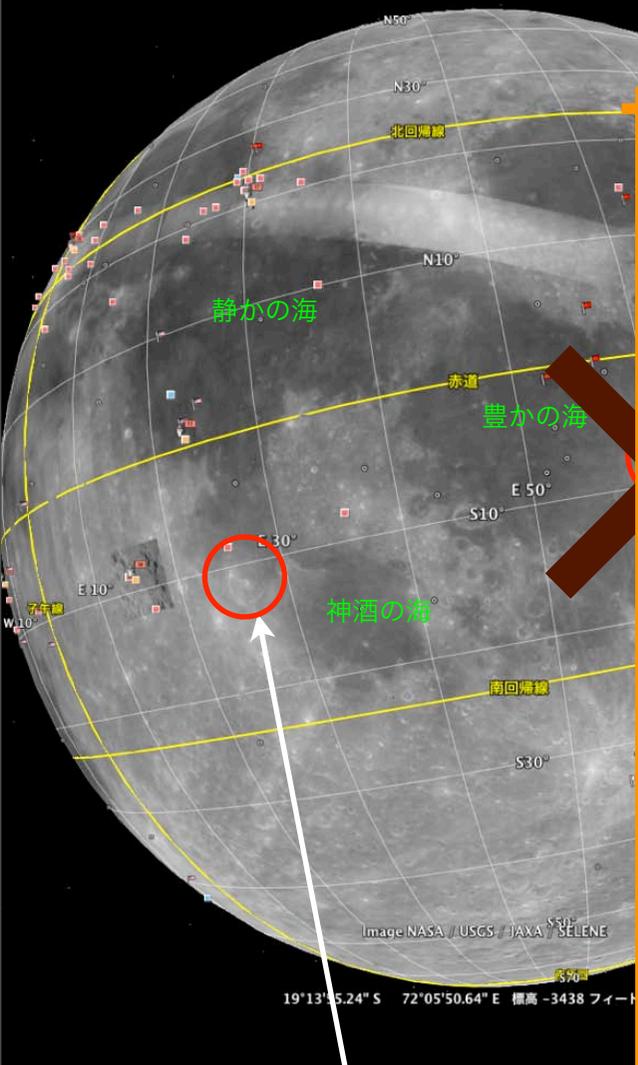
⑤カンラン石の丘

裏側

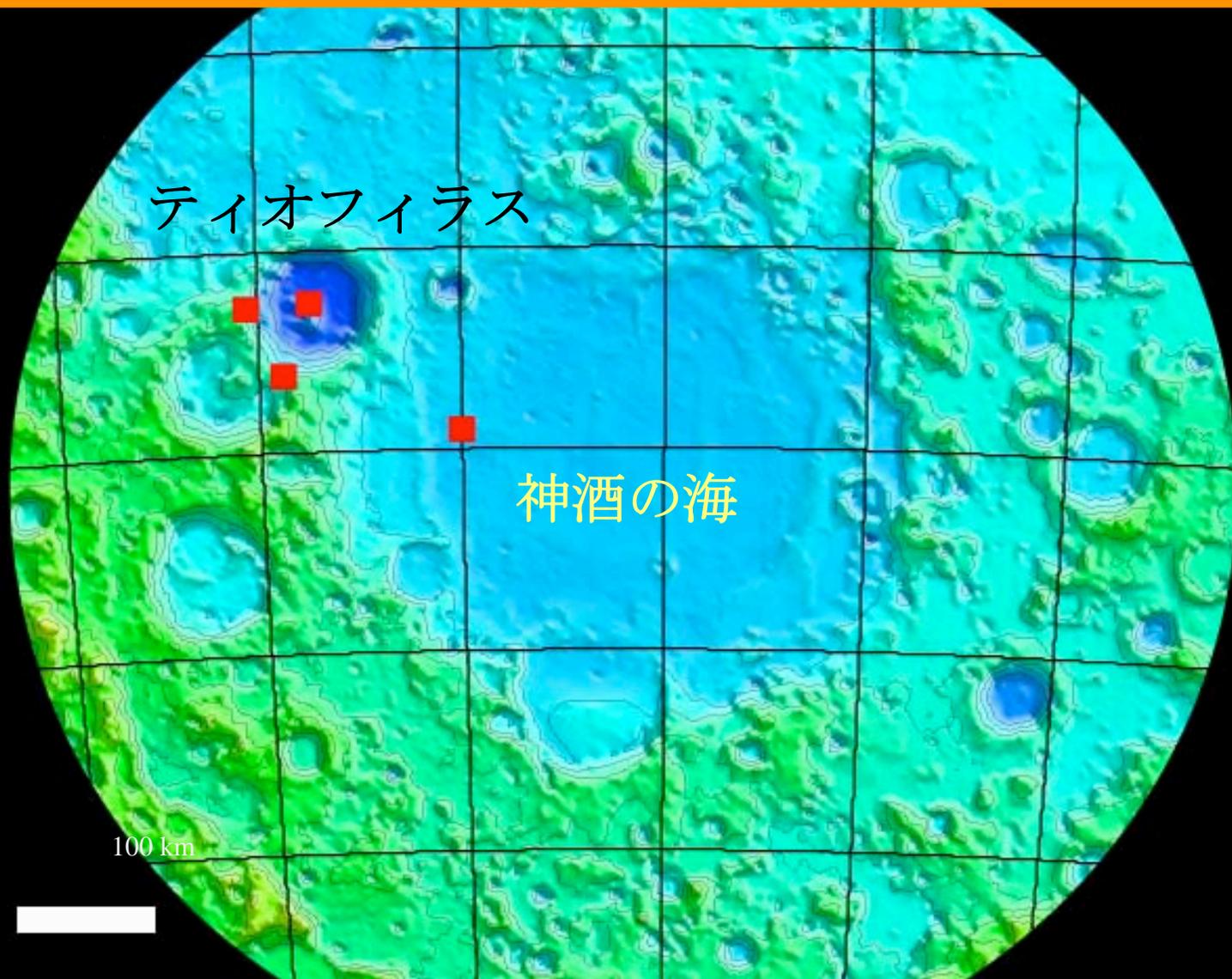
# クレメンタインの報告は？

表側

ティオフィラスでの中央丘およびリムで検知  
→神酒の海の周辺に位置する



④テオフィラス



# 月面上の全球カンラン石分布

- ・ 地殻厚が薄い衝突盆地の縁周辺に分布

No mare region !

No far from the rim !

No FHT region with thicker crust !



この分布を作るメカニズムは何か？

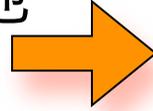
衝突盆地形成による月上部マントルの掘削

# 月面上の全球オリビン分布

## 上部マントル掘削の可能性

カンラン石領域を持つ衝突盆地

→ 直径 1000 km クラス



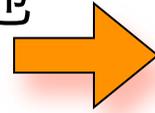
掘削深さは ~100 km

# 月面上の全球オリビン分布

## 上部マントル掘削の可能性

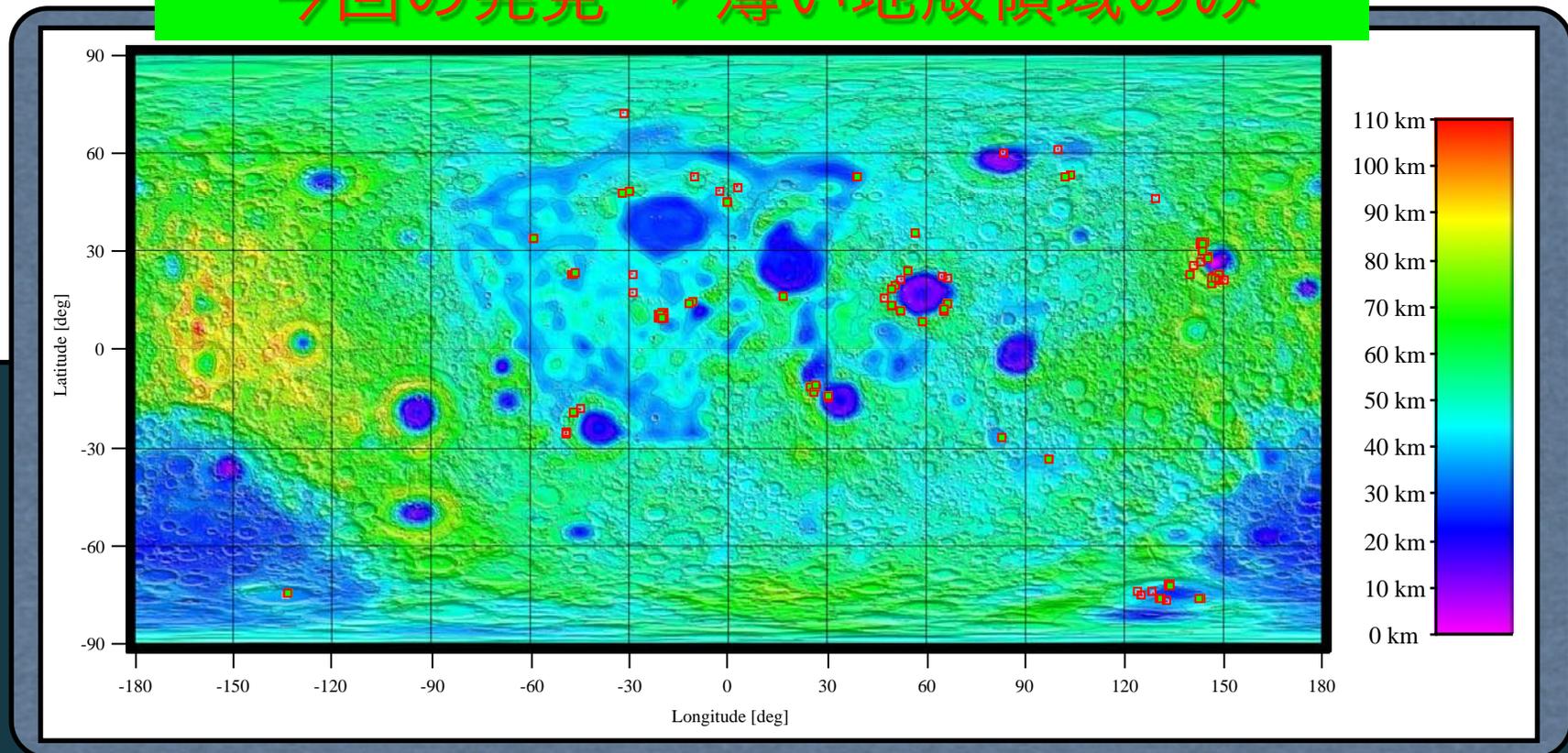
カンラン石領域を持つ衝突盆地

→ 直径 1000 km クラス



掘削深さは ~100 km

今回の発見 → 薄い地殻領域のみ

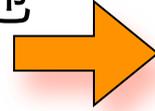


# 月面上の全球オリビン分布

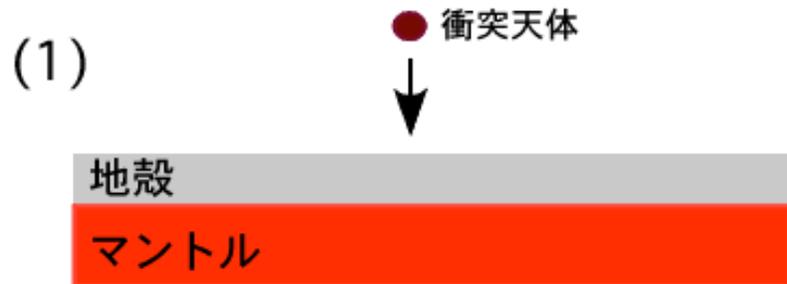
## 上部マントル掘削の可能性

カンラン石領域を持つ衝突盆地

→ 直径 1000 km クラス



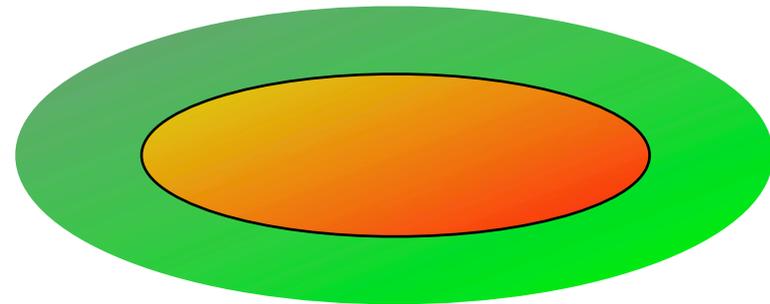
掘削深さは ~100 km



① マントル物質 → 縁領域へ堆積

② 中央領域：溶岩または衝突溶融物  
によって隠される

盆地周辺の円環分布を形成

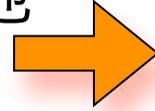


# 月面上の全球オリビン分布

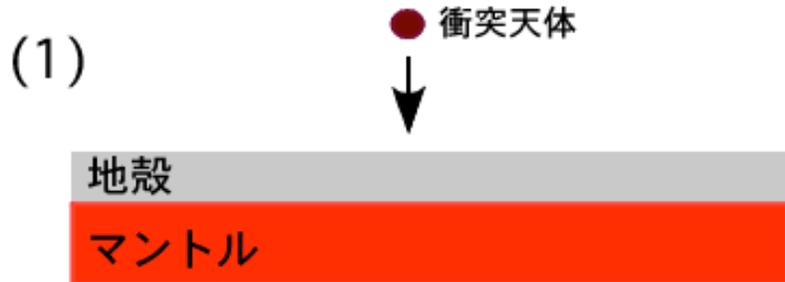
## 上部マントル掘削の可能性

カンラン石領域を持つ衝突盆地

→直径 1000 km クラス



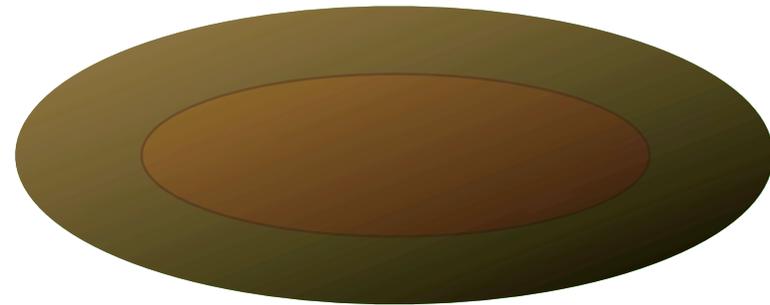
掘削深さは ~100 km



① マントル物質 → 縁領域へ堆積

② 中央領域：溶岩または衝突溶融物  
によって隠される

盆地周辺の円環分布を形成

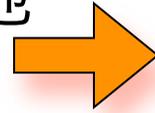


# 月面上の全球オリビン分布

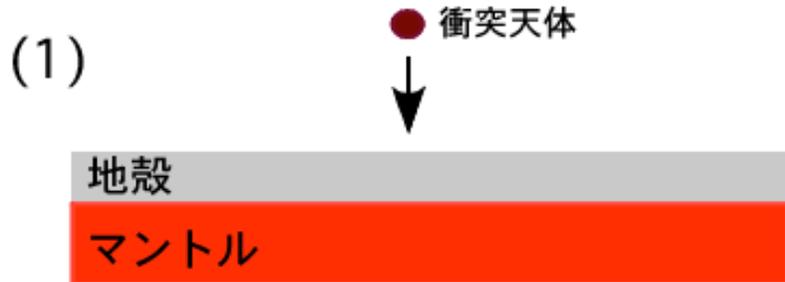
## 上部マントル掘削の可能性

カンラン石領域を持つ衝突盆地

→直径 1000 km クラス



掘削深さは ~100 km

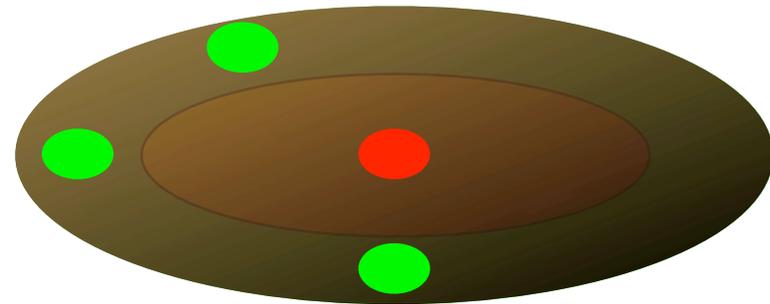


① マントル物質 → 縁領域へ堆積

② 中央領域：溶岩または衝突溶融物  
によって隠される



盆地周辺の円環分布を形成



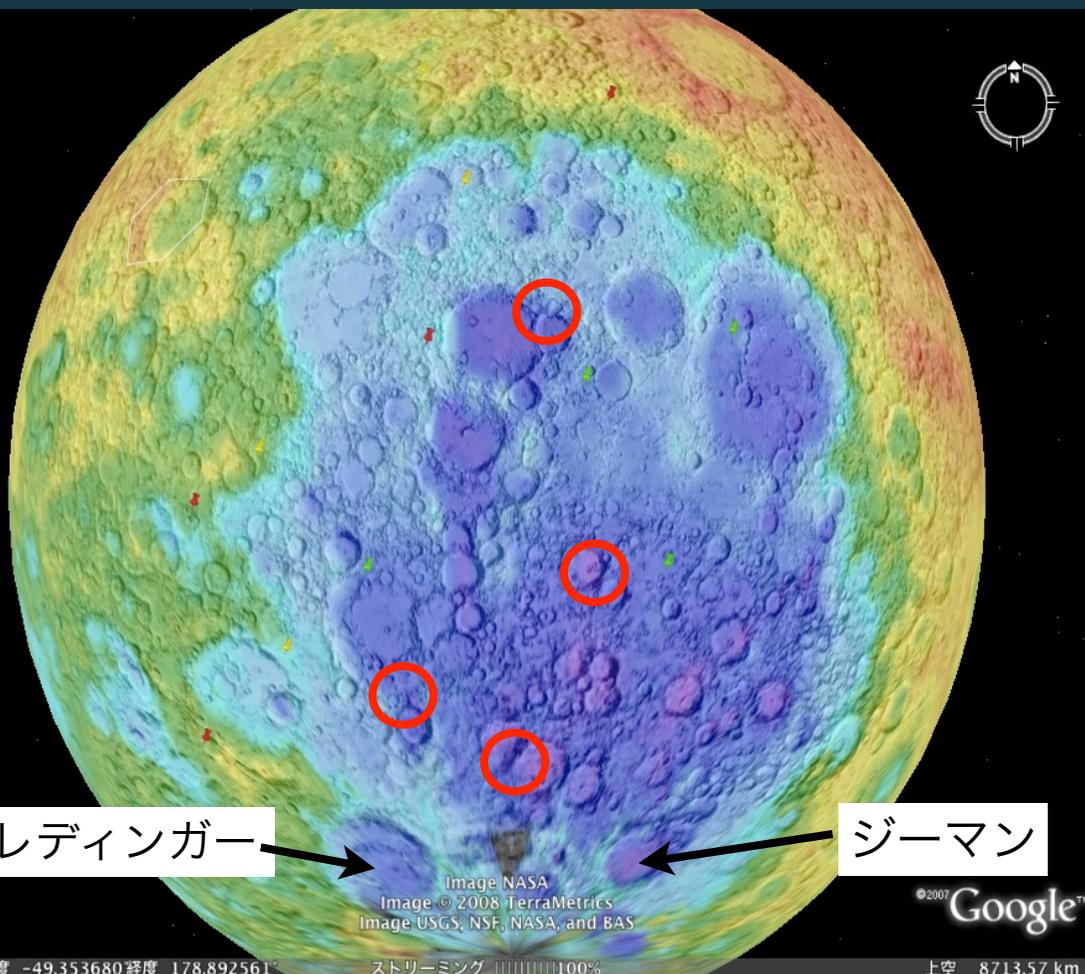


# 南極エイトケン盆地

月で最大の衝突盆地

(2600km)

従来マントル物質  
が見つからないの  
が謎であった



シュレディンガー

ジーマン

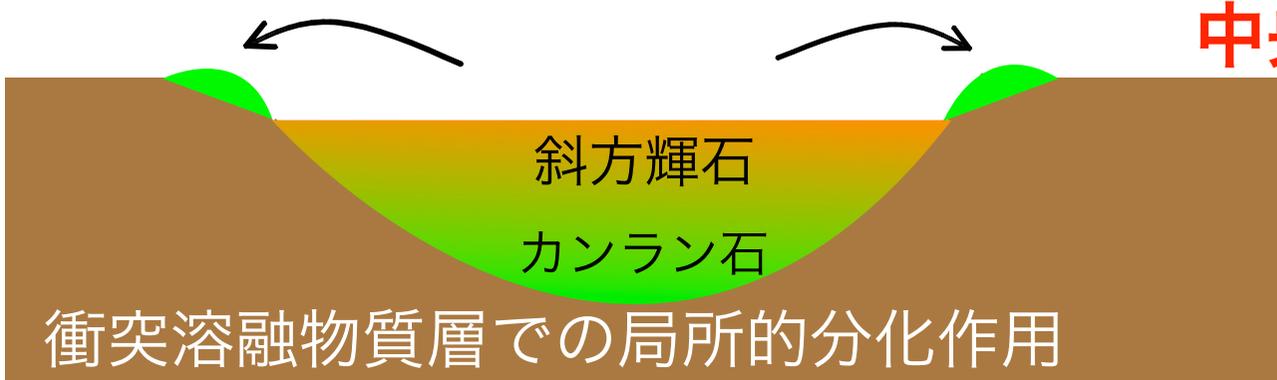
Image NASA  
Image © 2008 TerraMetrics  
Image USGS, NSF, NASA, and BAS

©2007 Google™

ポイント 緯度 -49.353680 経度 178.892561° ストリーミング 100% 上空 8713.57 km

## 南極エイトケン盆地サーベイ (Nakamura et al. 2009)

中央部での広範囲に及ぶ  
斜方輝石層の発見



斜方輝石

カンラン石

衝突溶融物質層での局所的分化作用

# 過去のモデル：下部地殻起源説

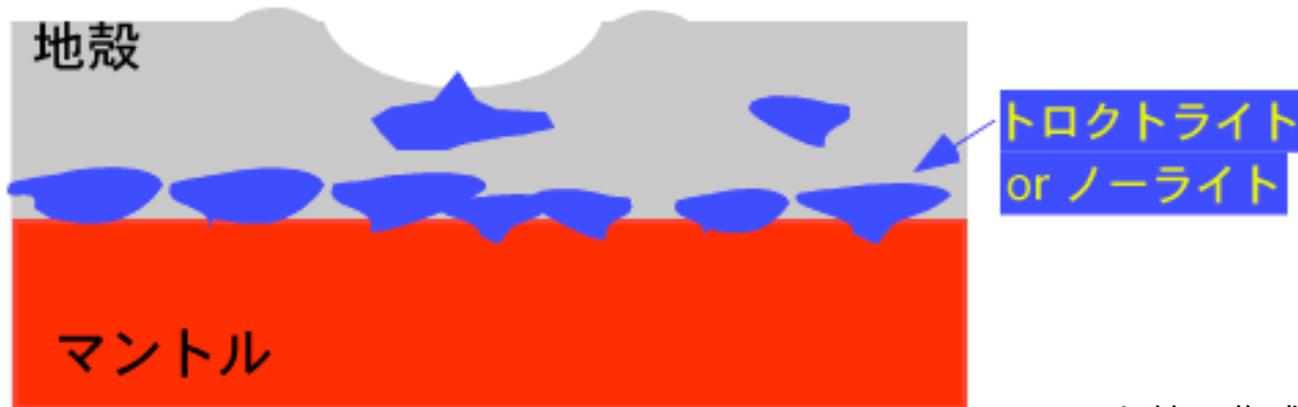
過去に見つかっていたカンラン石を持つクレーター

→~100 kmサイズ (掘削深さ~10 km)

→マントルまでは到底掘削しない

## 下部地殻起源説

コペルニクス  
クレーター



Pieters & Wilhelm (1985)を基に作成

下部地殻に存在する  
と考えられるMgに富む  
深成岩体を掘削

トロクトル岩 (トロクトライト) : カンラン石と斜長石からなる岩石

# 過去のモデル：下部地殻起源説

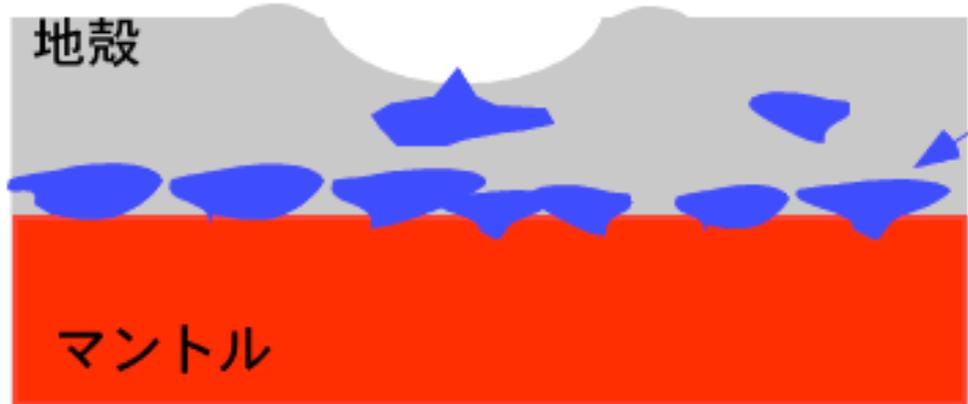
過去に見つかっていたカンラン石を持つクレーター

→ ~100 km サイズ (掘削深さ ~10 km)

→ マントルまでは到底掘削しない

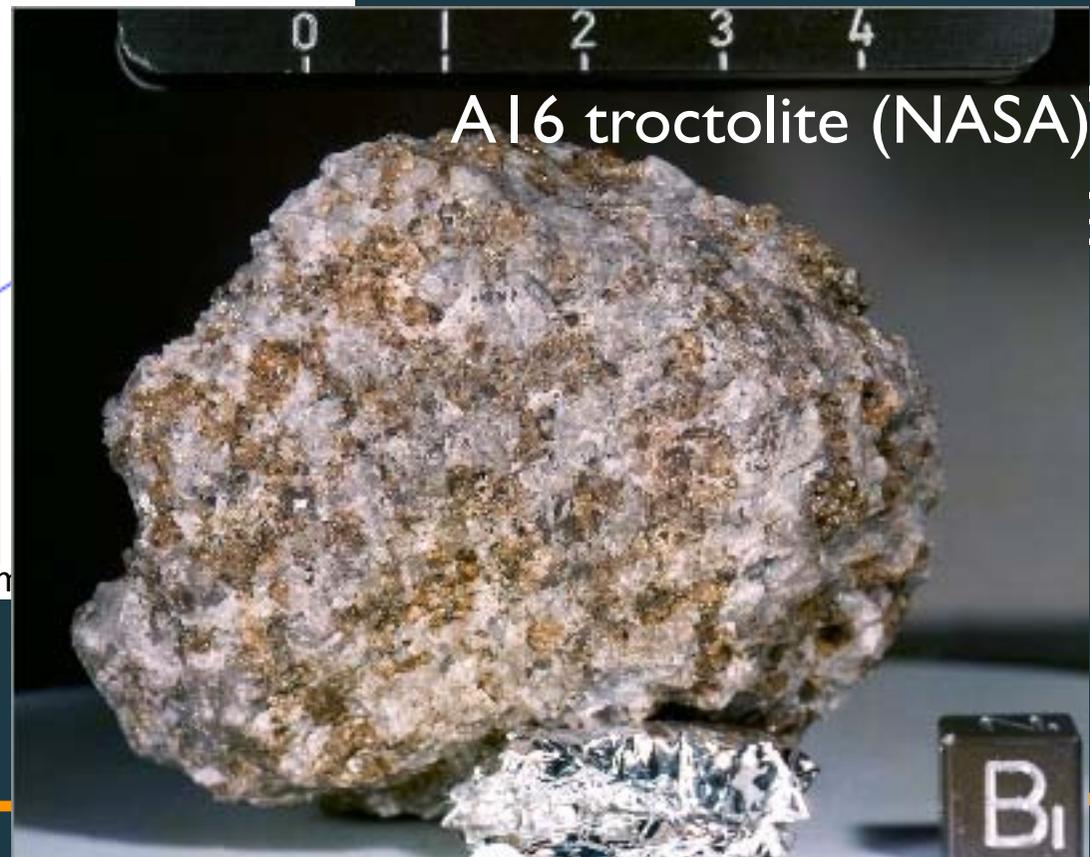
## 下部地殻起源説

コペルニクス  
クレーター



Pieters & Wilhelm

トロクトル岩 (トロクトライト)



# スペクトルモデル計算

## ①上部マントル起源

→ダンカンラン岩 (**ダナイト**) : カンラン石が90%以上

## ②下部地殻に貫入したMgに富む岩石

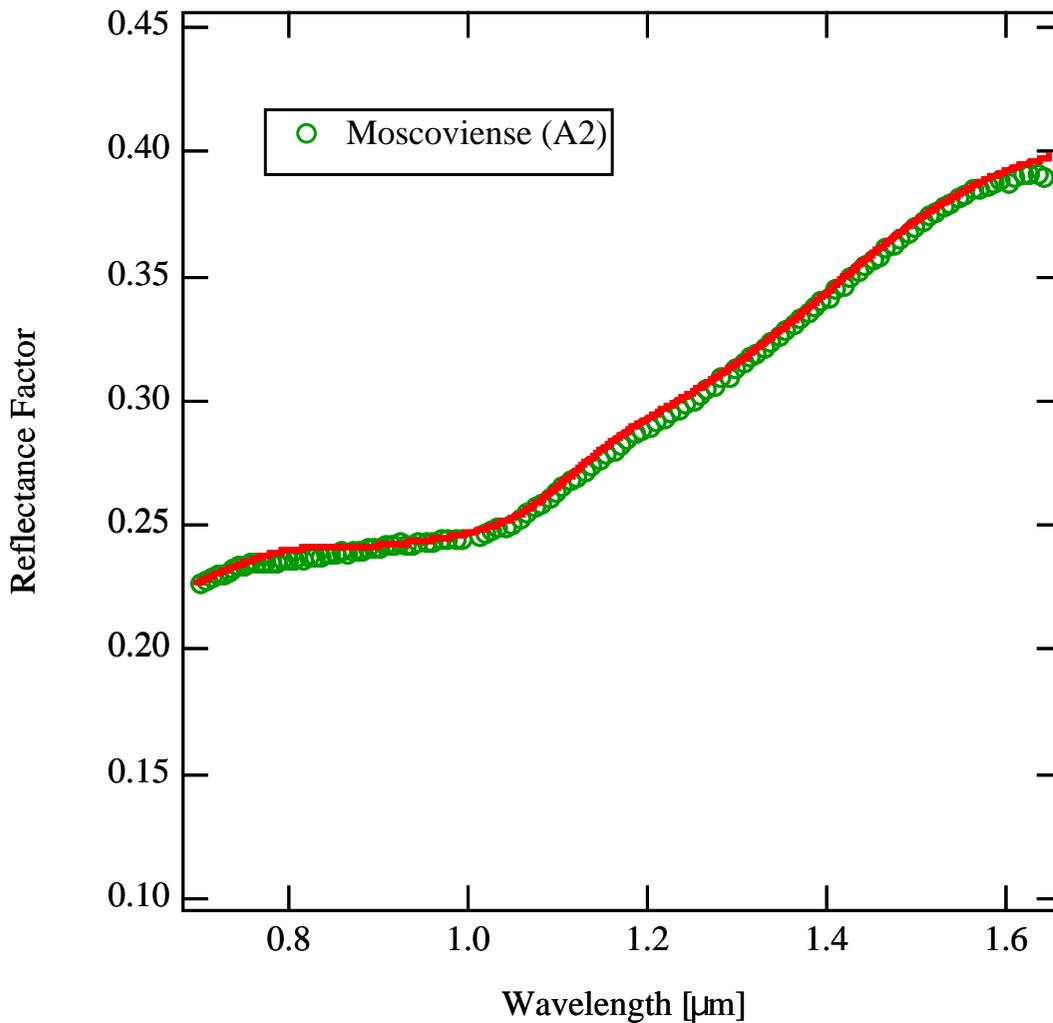
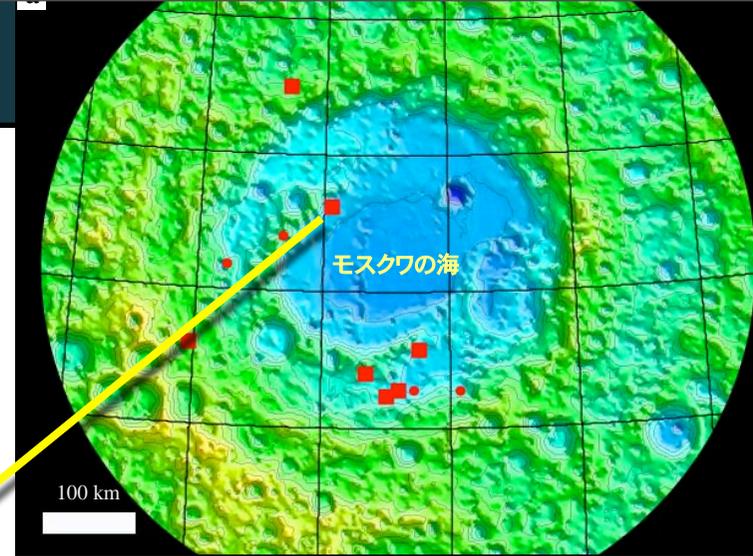
→トロクトル岩 (**トロクトライト**) : カンラン石と斜長石からなる岩石

多重散乱理論モデル (線形スペクトルモデル) (Hapke 2001; Lucey 2004)

- 実験室スペクトルを基にして、各鉱物の光学定数を化学組成ごとに導出
- 微小鉄の生成による宇宙風化を模擬
- 各鉱物がレゴリスとして混合→HAPKE の放射輸送モデルからスペクトル計算

# スペクトルモデル計算

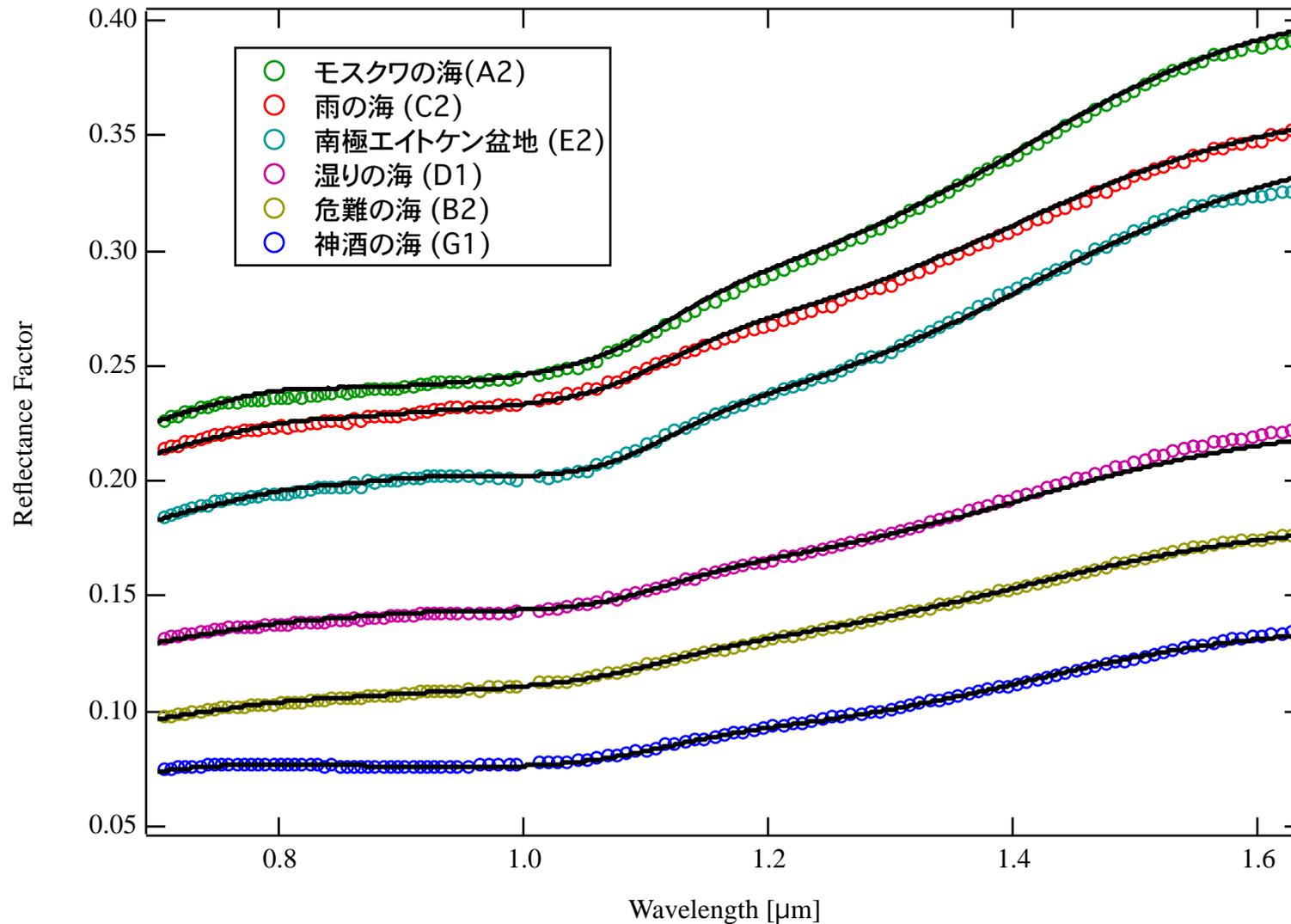
## ダナイトモデル



カンラン石バンドや反射率  
絶対値をよく説明出来る

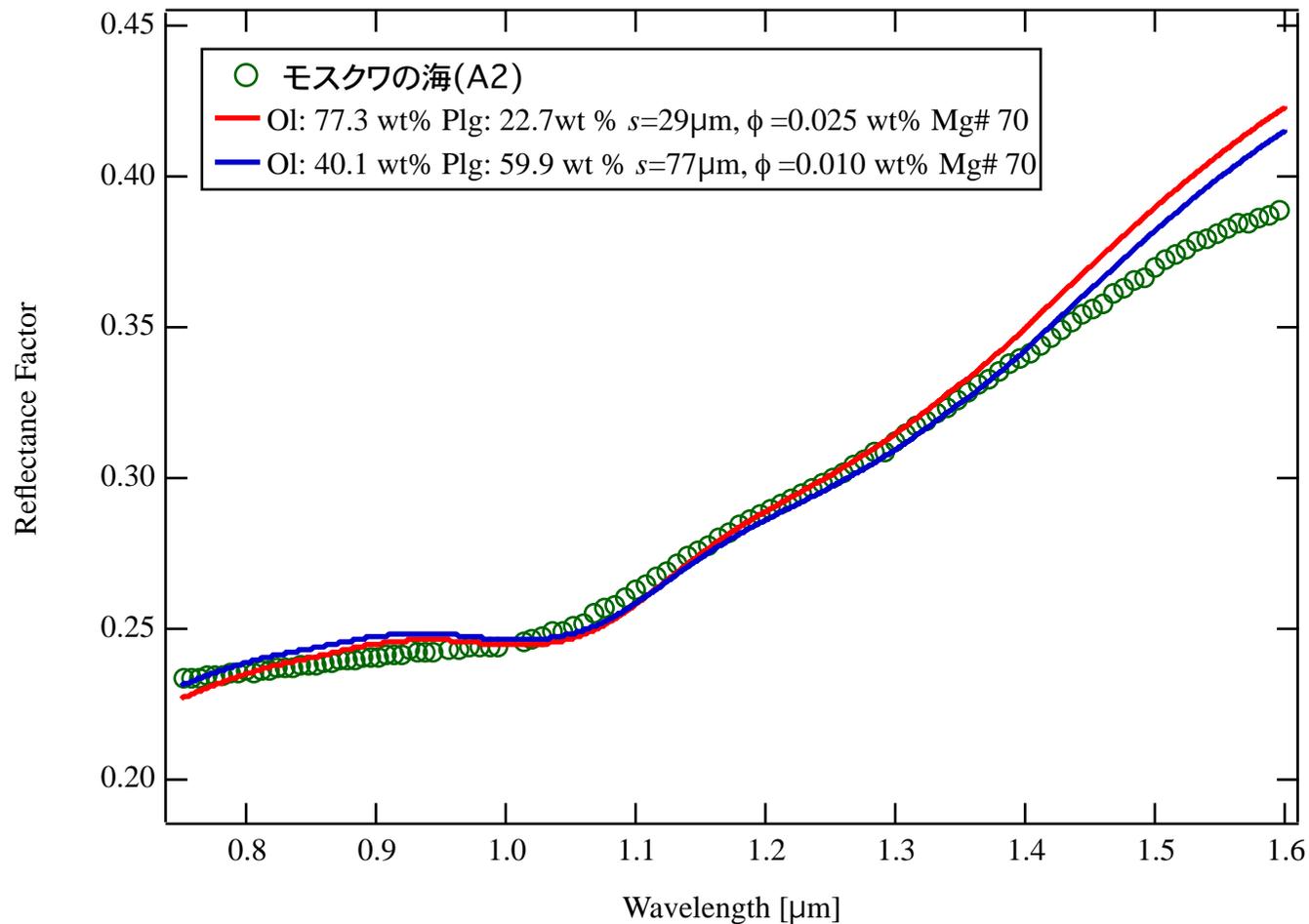
# スペクトルモデル計算

他の領域でもダナイトモデルで再現ができる



# スペクトルモデル計算

## トロクトライトモデル カンラン石+斜長石



絶対値と吸収バンドを同時に再現できない

# 結論

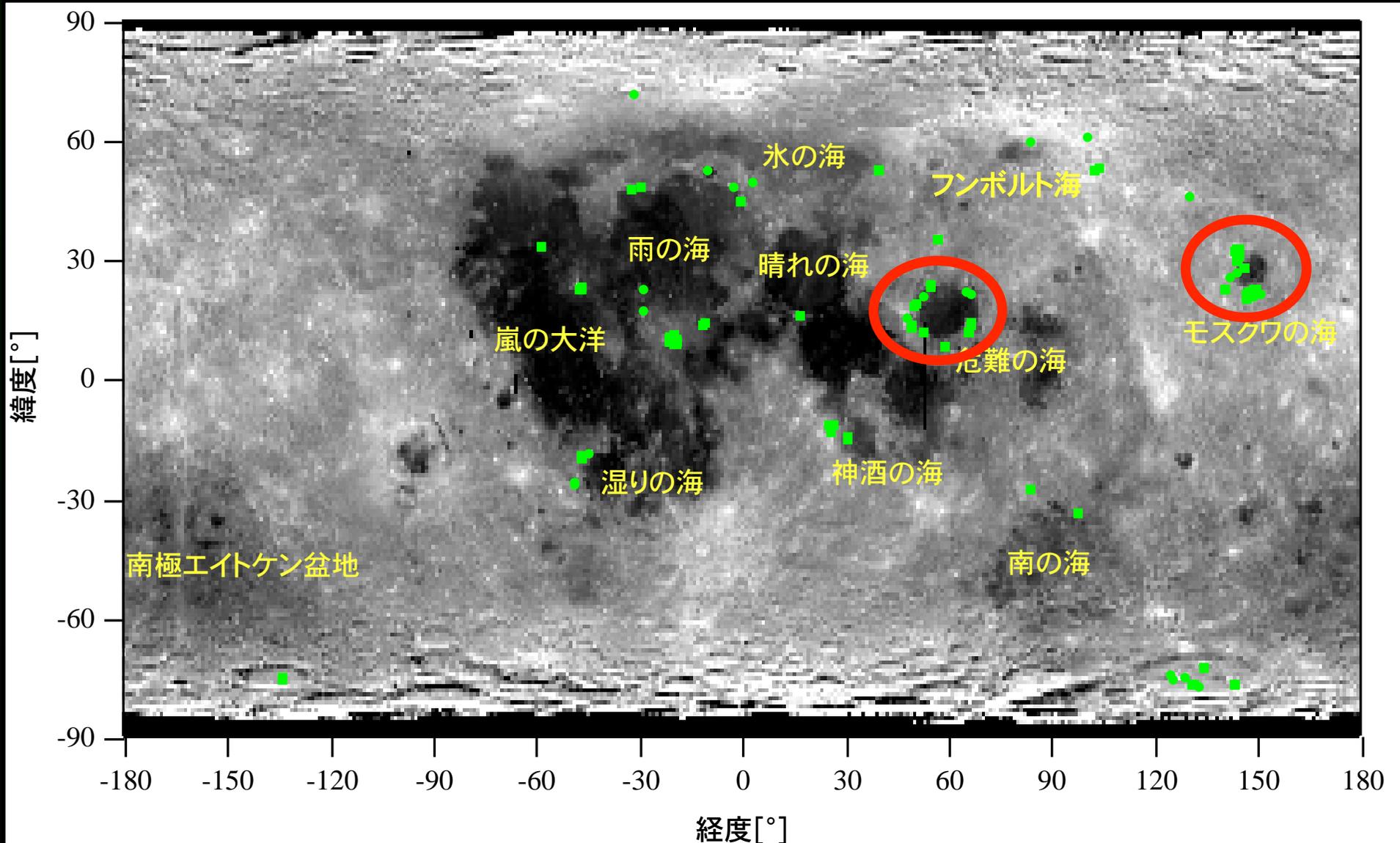
スペクトル解析は、マントル起源を支持



- ・ 今回見つかったカンラン石に富む領域の物質  
→ 衝突盆地掘削によるマントル物質

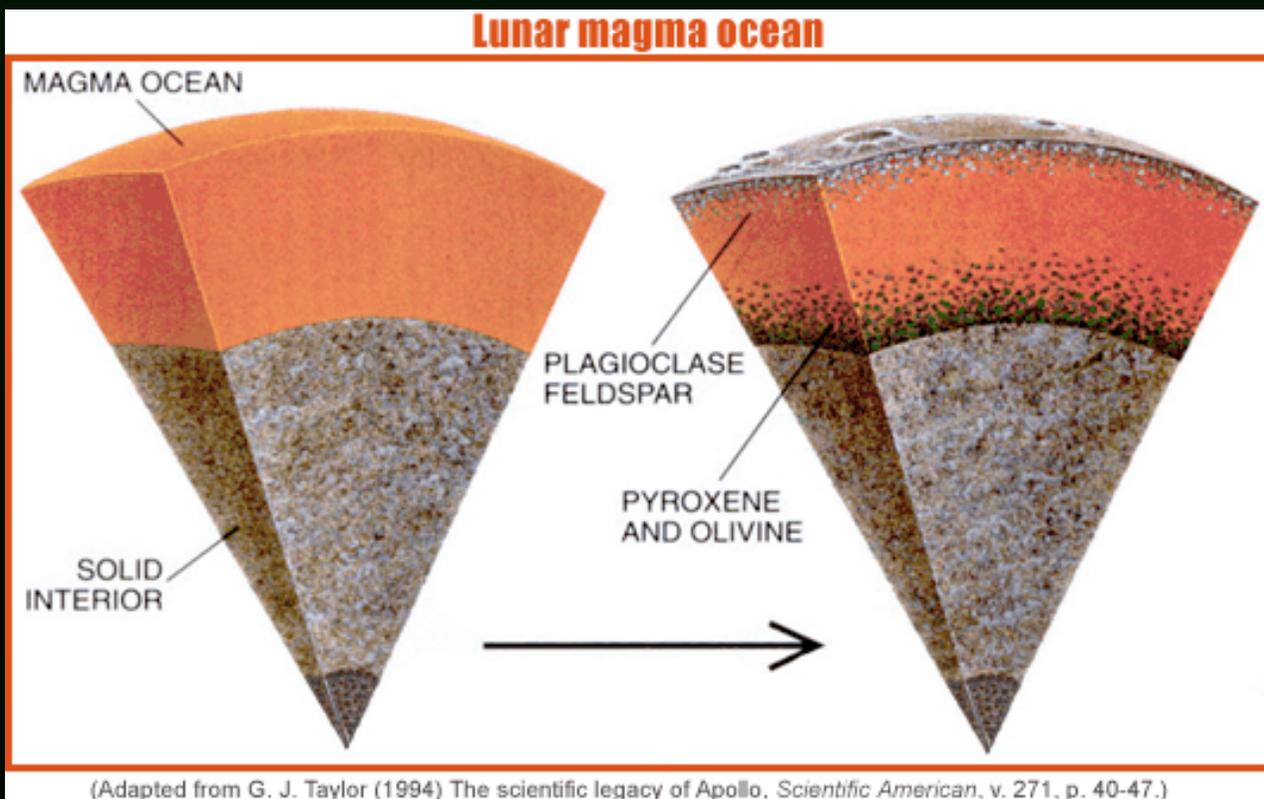
# 今回の発見の意義

モスクワの海、危難の海でトリウム濃集がみつからない



# 今回の発見の意義

モスクワの海、危難の海でトリウム濃集がみつからない



斜長石

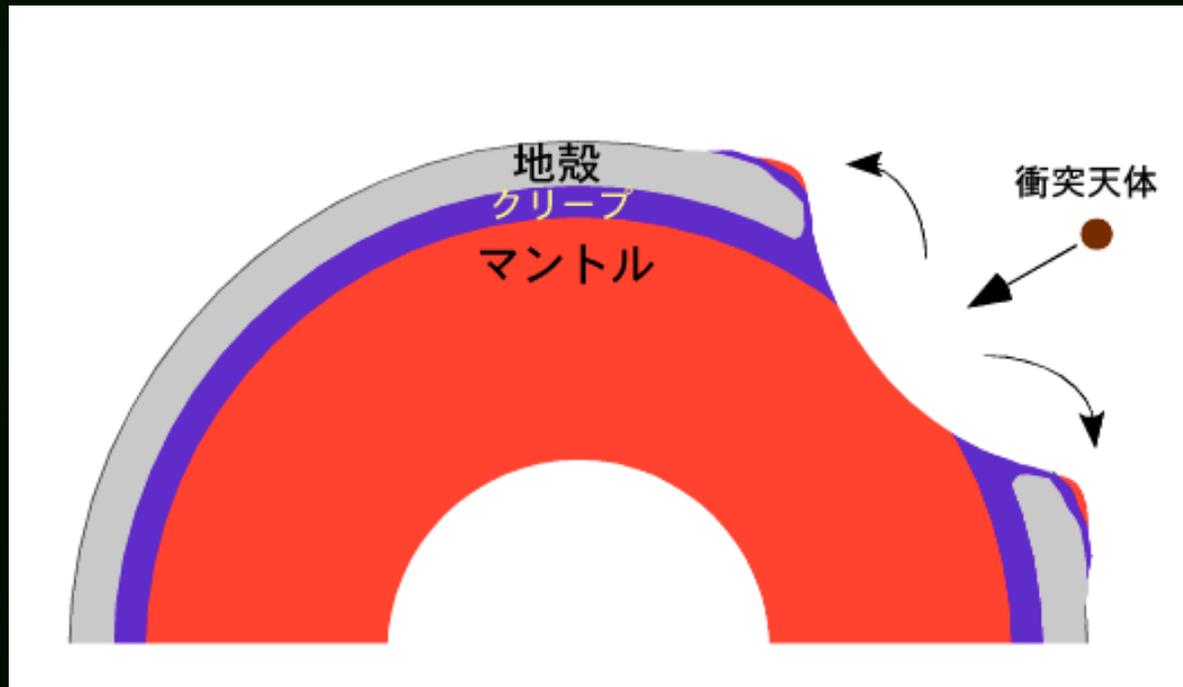
クリープ

カンラン石

クリープ (KREEP) : 液相濃集元素 (マグマ冷却過程で結晶中に取り込まれず、液相に濃集する元素。トリウムは代表。)

# 今回の発見の意義

モスクワの海、危難の海でトリウム濃集がみつからない



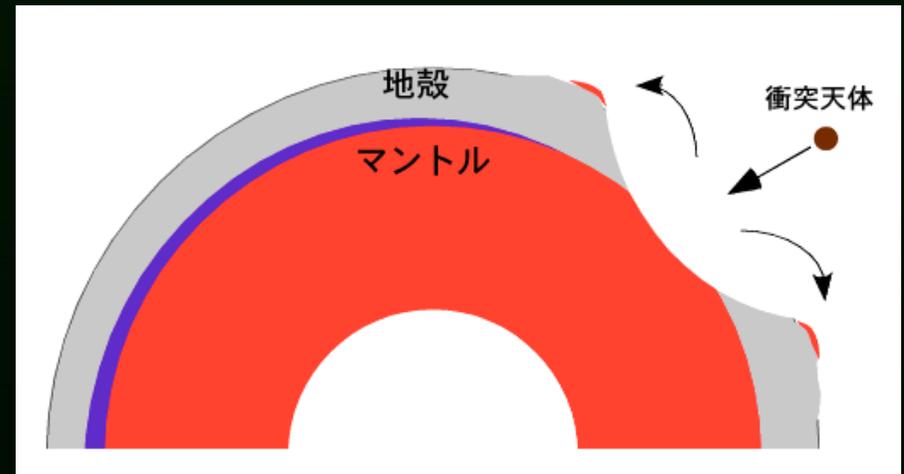
クリープ (KREEP) : 液相濃集元素 (マグマ冷却過程で結晶中に取り込まれず、液相に濃集する元素。トリウムは代表。)

# 今回の発見の意義

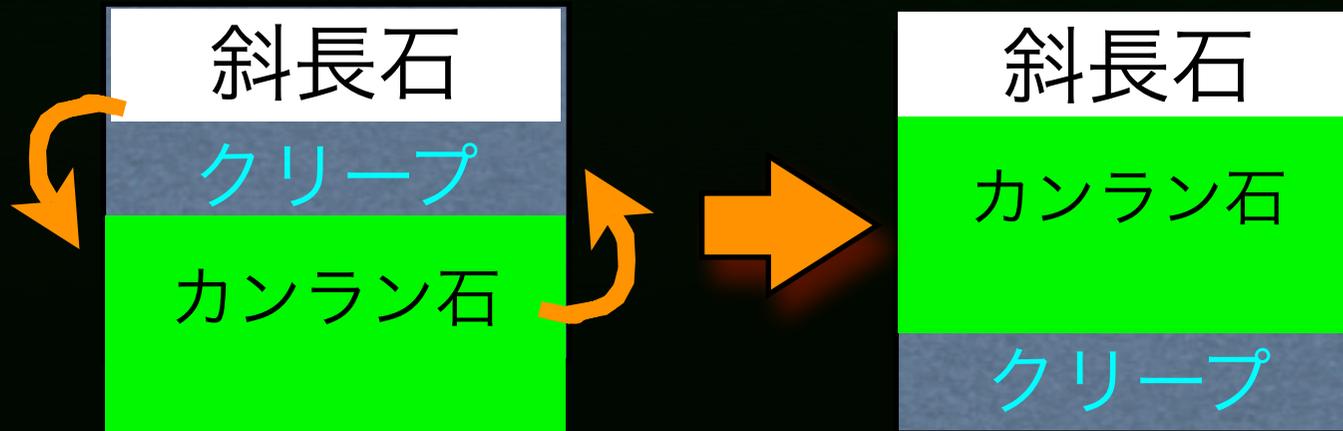
モスクワの海、危難の海でトリウム濃集がみつからない

これらの盆地が形成された時には、すでにKREEPはどこかへ移動してなくなっていた？

(1) 全部表(PKT)に移動した？

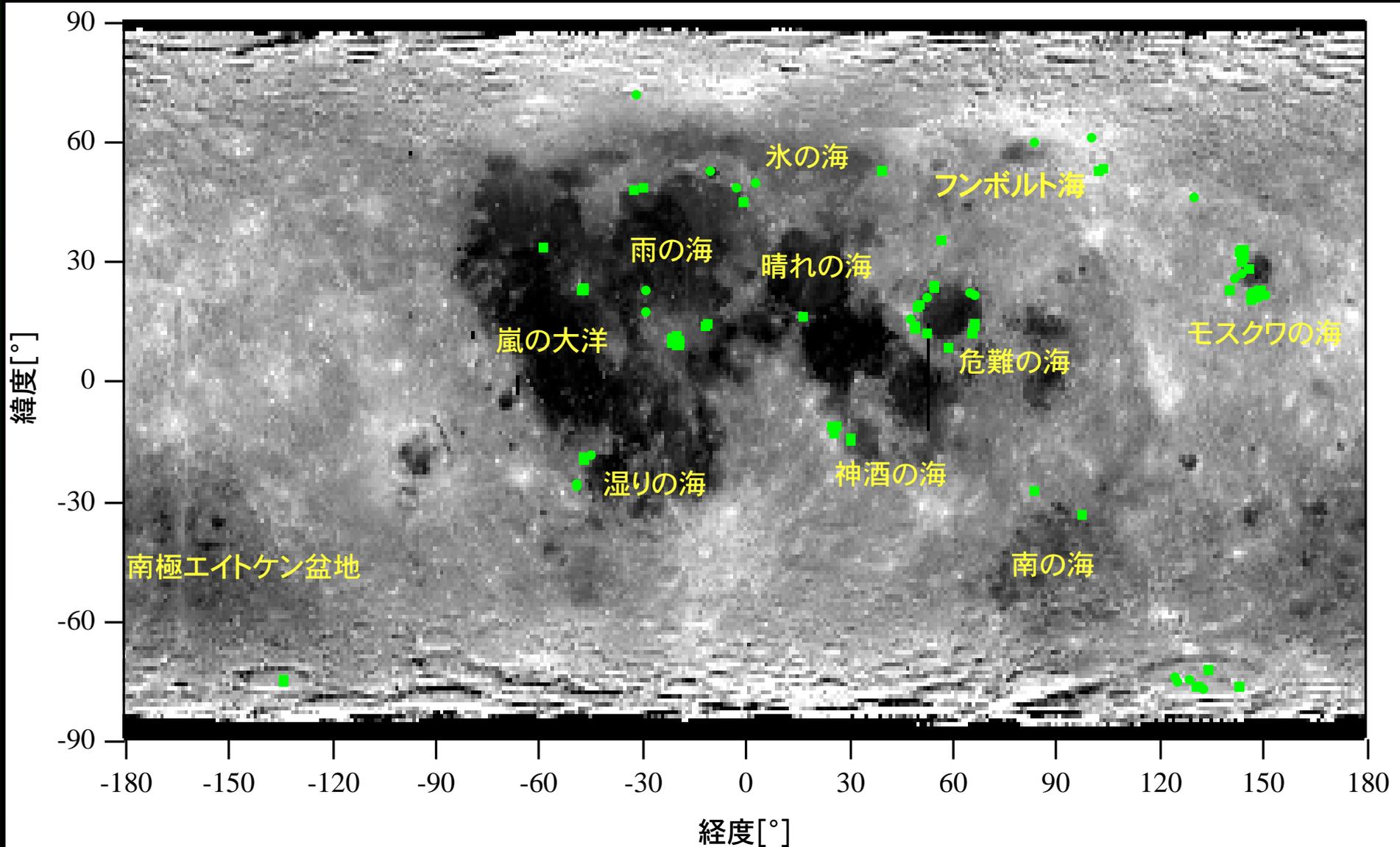


(2) マントルオーバーターンで下に潜った？



# 今回の発見の意義

なにより、データそのものが大量の貴重な情報を持っている



終り