# 月の海の組成・地形解析からみた月マントルの熱進化史

○加藤 伸祐[1]　諸田 智克[1]　山口 靖[1]　渡邊 誠一郎[1]　大嶽 久志[2]　大竹 真紀子[2]

[1] 名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻　[2]宇宙航空研究開発機構

## 要旨 Abstract

月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の熱的進化過程、マントルの組成と構造については未だによく分かっていない。卒業研究では月の海の玄武岩組成と年代の関係を調査し、その結果から月の火成活動は約 23 億年前に火成活動のマグマソースが変化していることが分かった。また、約 23 億年前以降の火成活動は選択的に高いチタン含有量を持つため、本研究では、約 23 億年以降の火成活動はコアーマントル境界領域に存在した Ti リッチ層に起源を持つスーパーホットプルームによる火成活動であることを提唱している。修士研究ではスーパーホットプルーム仮説についてスーパーホットプルームの地形学的痕跡の探索と、その地形を用いたスーパーホットプルームに関する物理量の推定を行ってきた。

## 研究背景 Introduction

固体惑星の形成と進化の体系的な理解に向けて、地球型惑星の小型端成分である月の初期進化を理解することは重要である。月のマグマオーシャンからの固化過程やマントルオーバーターンなどのその後の進化過程に関してはよく分かっていない。

マグマオーシャンの固化 マントル、地殻、イルメナイト層の形成 → イルメナイト層の重力不安定によるマントルオーバーターン → 減圧溶融による上部マントルの再溶融

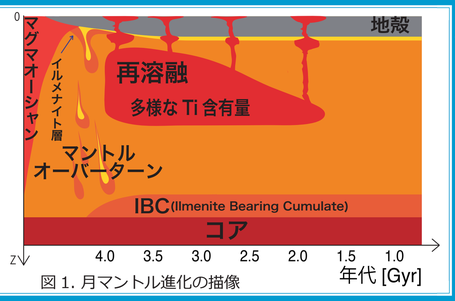



図 1. 月マントル進化の描像

## マグマ組成と噴出年代の関係 Composition

### ①海の玄武岩の噴出年代の特徴

全球的活動（約 40 から 25 億年前）

↓

一部の領域の活動（約 25 億年前以降）

<PKT 外側の海>
- 約 35 億年前にピーク
- 約 25 億年前まで継続

<PKT 内側の海>
- 約 35 億年前にピーク
- 15 億年前まで継続
- 約 20 億年前にもピーク

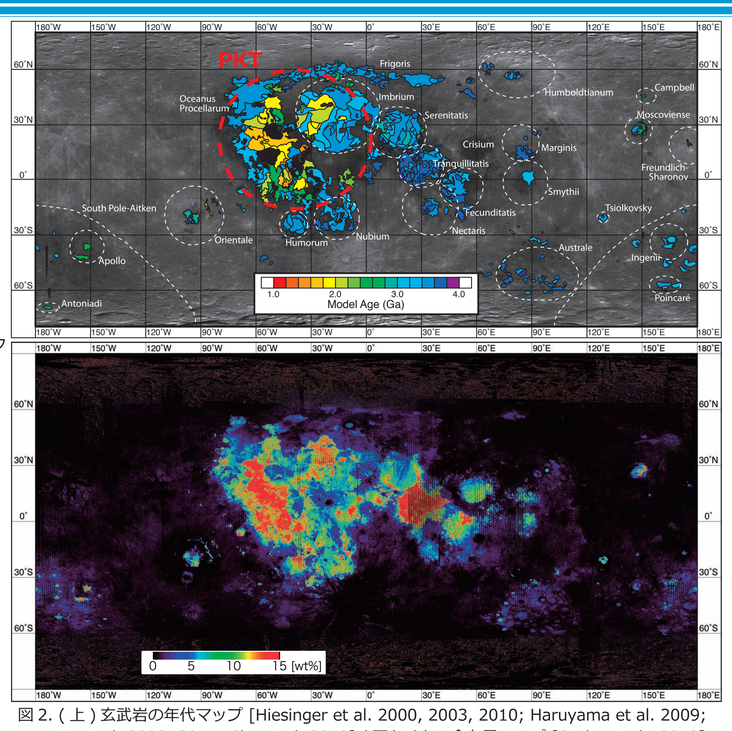



図 2. ( 上 ) 玄武岩の年代マップ [Hiesinger et al. 2000, 2003, 2010; Haruyama et al. 2009; Morota et al. 2009, 2011; Cho et al. 2012] ( 下 ) チタン含有量マップ [Otake et al., 2012]

### ②玄武岩組成の時間変化

約 40 億年から 25 億年前
… 一定の値で推移している

23 億年前以降
… チタン含有量が急激に増加

23 億年の前後でチタン含有量の平均値に有意な差
→マグマソースの変化を示唆

23 億年以前の火成活動を Phase-1
23 億年以降の火成活動を Phase-2 と呼ぶ

それぞれの火成活動の特徴は表 1

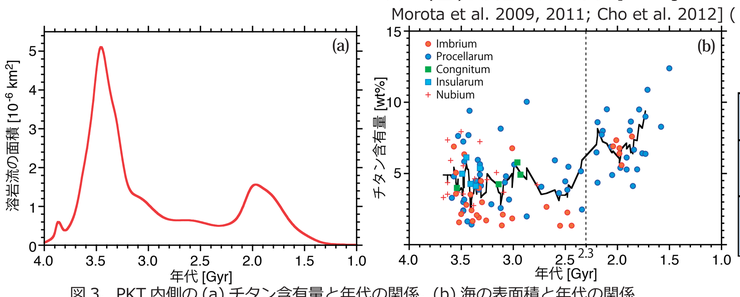



図 3. PKT 内側の (a) チタン含有量と年代の関係, (b) 海の表面積と年代の関係

| | Phase-1 | Phase-2 |
|---|---|---|
| チタン含有量 | 多様 (~4 wt%) | 高い (~7 wt%) |
| 活動の分布 | 全球的 | PKTに集中 |
| 活動の期間 | 約35億年前にピーク 約25億年前まで継続 | 約20億年前にピーク |

表 1. Phase-1, Phase-2 火成活動の特徴

## ホットプルーム仮説 Hot plume hypothesis

### ①ホットプルーム仮説の根拠

Phase-2 の火成活動の特徴をまとめると

(1) 2 度目の火成活動のピークに対応

(2) 選択的にチタン含有量が高い

(3) 一部の地域に限定されている

### ②マントル進化のシナリオ

1．マントルオーバーターン [e.g., Hess and Parmentier, 1995; Ringwood and Kesson, 1976] による月深部へのチタンと熱源元素の濃集

2．上部マントルの再溶融による Phase-1 の全球的な火成活動 ( マントルオーバーターンによって Low-Ti マントルが上昇して減圧融解，上部マントルは撹拌され不均一に )

3．コアの加熱 [e.g. de Vries et al., 2010, Zhang et al., 2013] で起こったホットプルームによる Phase-2 の High-Ti な火成活動

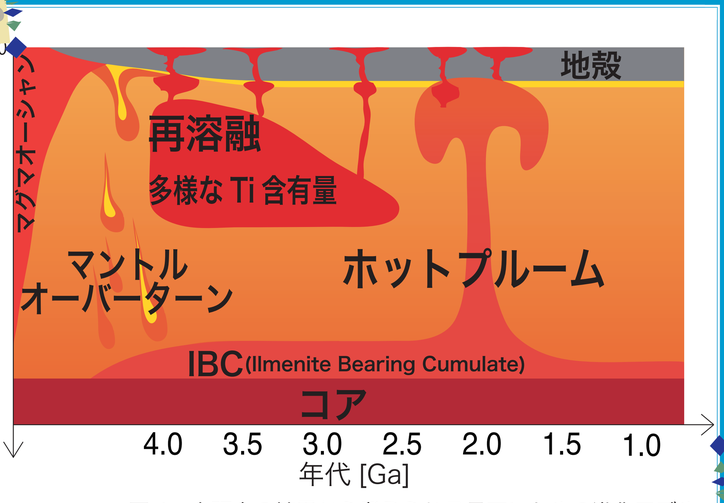



図 4. 本研究の結果から考えられる月マントルの進化モデル

本解析の詳細は
日本惑星科学会 学会誌「遊星人」Vol.22, No.4, 194-199 を参照

### ③検討すべき課題

☆イルメナイト問題
- コアーマントル境界からの High-Ti マントルの上昇
- Phase-2 火成活動の High-Ti 玄武岩の存在

→
- ホットプルームは上のマントルよりも重い High-Ti マントルが上昇できるほど高温
- Phase-2 のマグマ (High-Ti, 密度 2900～2950, リキダス温度 1500～1600℃) は Phase-1 のマグマ (Low-Ti, 密度 2900～2950, リキダス温度 1200～1300℃) よりも高温

ホットプルームの温度や物理量を推定するために地形データから検証を行う
→　プルームの規模や温度は？
→　プルームの有効弾性厚への影響は？

**目的**　チタン含有量の変化から見えてきたホットプルーム仮説を作業仮説とし、この仮説を地形解析によって検証する

## 地形学的特徴とプルーム物理量の推定 Topography

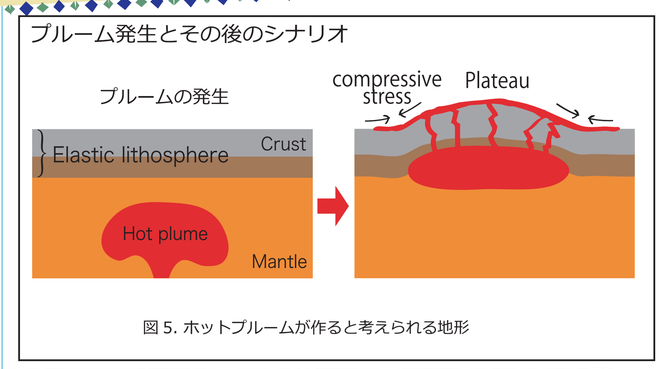



図 5. ホットプルームが作ると考えられる地形

### ①地形的盛り上がりの調査

「かぐや」による地形データ [Araki et al., 2009]
と
セレノイド ( 月ジオイド ) データ [Matsumoto et al., 2010]
の差を計算

↓

PKT の中心で台地状の地形が観測された ( 図 6)

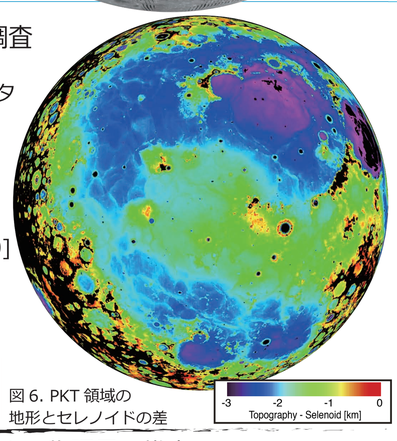



図 6. PKT 領域の地形とセレノイドの差

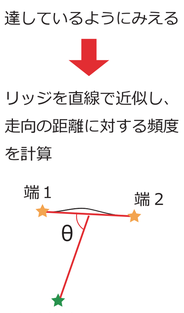
### ②リッジの分布と台地状地形の関係

プルームによる台地状地形の形成し、その圧縮応力場でリッジが形成 → 台地状地形の位置と関係？

台地状地形の上付近でリッジが台地に沿って発達しているようにみえる

↓

リッジを直線で近似し、走向の距離に対する頻度を計算



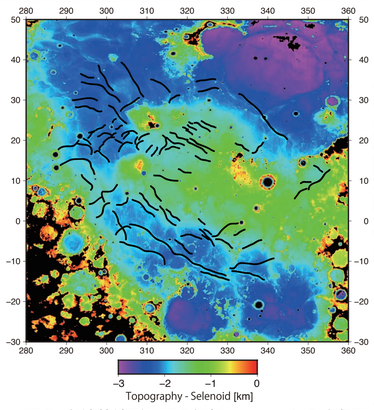




図 7. 台地状地形周辺の解析したリッジの分布図

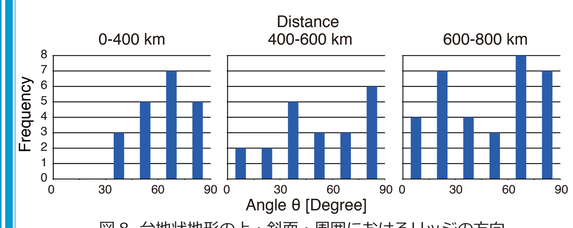



図 8. 台地状地形の上・斜面・周囲におけるリッジの方向

### ③弾性球殻モデルによるプルームの物理量の推定

Solomon and Head, (1979) は海の荷重から有効弾性厚を推定　→　本研究ではプルームに適用

内部が完全流体で満たされている、厚さ T，ヤング率 E，ポアソン比vの弾性球殻 ( リソスフェア ) にプルームを模擬した半径 d の円盤状の荷重を与えた時の変形を考える

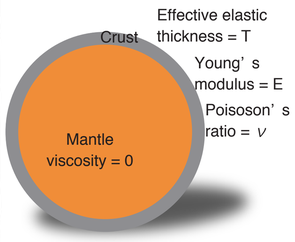



図 9. 弾性球殻モデル

釣り合いは
浮力　=　位置エネルギー　+　弾性エネルギー

弾性球殻の変形 w の基礎方程式

$$\nabla^4 w + \frac{1}{l^4} w = \frac{q}{D} \qquad \text{Brotchie (1971)}$$

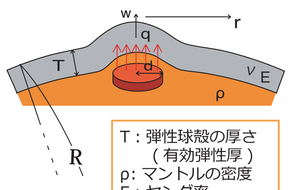
$$D = \left(\frac{ET^3}{12(1-\upsilon^2)}\right) \qquad l = \left(\frac{D}{\frac{ET}{R^2}+\rho g}\right)^{1/4}$$

D…剛性率
l…特徴長さ

この方程式の解はケルビン関数を用いて以下のように書ける

プルーム直上　$w = \frac{q}{(ET/R^2+\rho g)}(dKer'dBerx - dKei'dBeix + 1)$

プルーム外側　$w = \frac{qd}{(ET/R^2+\rho g)}(Ber'dKerx - Bei'dKeix)$




T：弾性球殻の厚さ ( 有効弾性厚 )
ρ: マントルの密度
E：ヤング率
R：月半径
d：プルームの半径
q：浮力の大きさ

図 10. プルームのモデルとパラメータ

台地状地形の中心から 5km ごとに 800km までの円周方向の平均標高を計算しプロファイルを算出

有効弾性厚、プルームの半径、浮力の大きさを変えて w を計算し観測データとの残差二乗和を計算

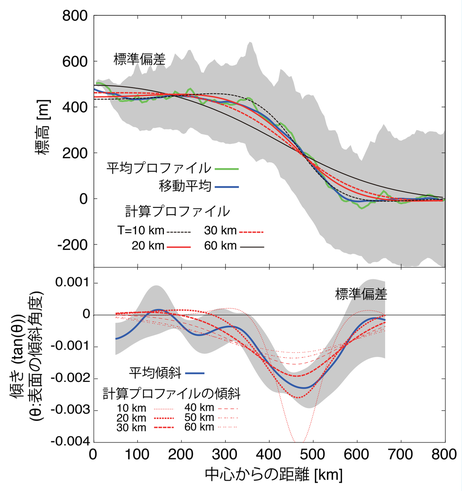



図 11. (a) 平均プロファイルとフィッティング結果 , (b) 平均傾斜と計算プロファイルの傾斜

これらの結果から有効弾性厚が 20-30km の時に最もよく地形を説明することがわかった

### ④地殻厚との比較

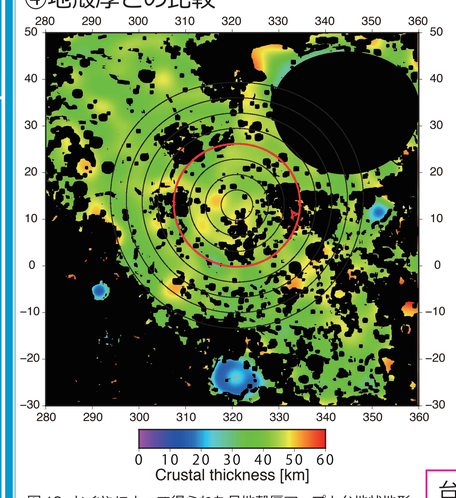



図 12. かぐやによって得られた月地殻厚マップと台地状地形

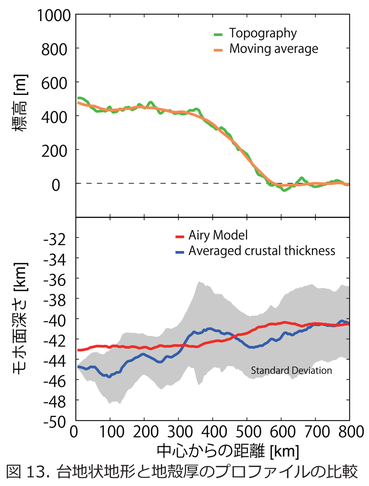



図 13. 台地状地形と地殻厚のプロファイルの比較

台地状地形の下はどちらかと言えばアイソスタシー的だが、短波長な変動も見える

## 地形解析についての考察 Discussion

Mare Imbrium 形成期 (~3.0Ga) の有効弾性厚は 50-75 km と見積もられた [Solomon and Head, 1978]

これに対して薄い有効弾性厚はプルームによる熱で有効弾性厚が一時的に薄くなったことと調和的である

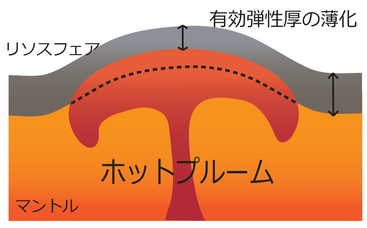



図 14. プルームモデルとリソスフェアの薄化

### 考慮すべき事項

(1) 実際のモホ面形状はプルーム仮説を支持していない

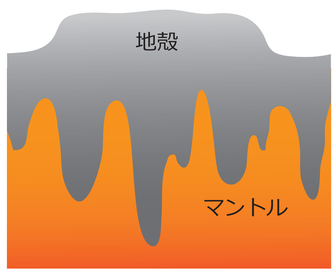



図 15. プルームモデルとリソスフェアの薄化

(2) プルームの浮力による応力場を計算するとリッジのパターンと一致しない

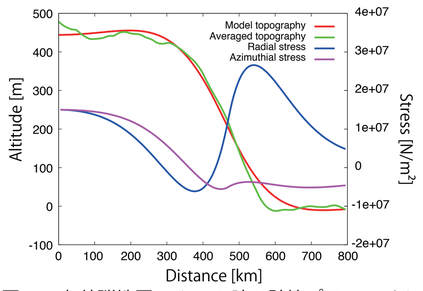



図 16. 有効弾性厚 20km の時の計算プロファイル・応力 ( 半径・円周方向 )

現段階でプルーム仮説はこれらの問題が未解明であるため、仮説の検証には至っていない
今回のモデルが非常に単純であり、粘弾性による時間発展の効果や、プルーム上昇後のマグマ分化などの効果を考慮する必要がある

## 引用文献 References

[1] Hess, P.C. and Parmentier, E.M.,1995, Earth Planet. Sci. Lett. 134, 501. [2] Hiesinger, H. et al., 2000, J. Geophys. Res. 105, 29239, doi:10.1029/2000JE001244. [3] Hiesinger, H. et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, 5065. doi:10.1029/2002JE001985. [4] Hiesinger, H. et al., 2010, J. Geophys. Res. 115, E03003. doi:10.1029/2009JE003380. [5] Haruyama, J. et al., 2009, Science 323, 905–908. doi:10.1126/science.1163382. [6] Morota, T. et al., 2009, Geophys. Res. Lett. 36, L21202. doi:10.1029/2009GL040472. [7] Morota, T. et al. 2011, Earth Planet. Sci. Lett. 302, 255, doi:10.1016/j.epsl.2010.12.028. [8] Cho, Y. et al., 2012, Geophys. Res. Lett. 39, L11203. doi:10.1029/2012GL051838. [9] Otake, H. et al., 2012, 43rd LPSC, abstract# 1905. [10] de Vries, J. et al., 2010, Earth Planet. Sci. Lett. 292, 139. [11] Zhang, N. et al., 2013, J. Geophys. Res. 118, 1789–1804. [12] Ringwood, A. E. & Kesson, S. E., 1976, Proc. Lunar Sci. Conf. 7, 1697–1722. [13] 加藤ほか , 2013, 日本惑星科学会誌・遊星人 , Vol.22, No.4, 194-199. [14]Solomon, S. C., & Head, J. W.,1979, J. Geophys. Res. 84, 1667-1682. [15]Brotchie, J. F., 1971, Modern Geology. 3, 15-23

## まとめ Conclusion

✓火成活動の変化
Phase-2 火成活動の特徴　(1) 高いチタン含有量　(2) 約 20 億年前にピーク　(3) 火成活動の領域が限定
→　ホットプルーム仮説の提唱

✓ホットプルームのような活動が起こったのなら，その活動の痕跡が地形に残されているはずである
→　地形とセレノイドの差をとってみると，PKT の中心に台地状地形が観測された
リッジのパターンも台地に沿っているようにみえる

✓観測された台地状地形を上手く説明するリソスフェアの有効弾性厚を推定した

✓地殻厚データとの比較では台地の下がどちらかと言うとアイソスタシー的であることが分かった

組成解析によって月の火成活動は前期と後期でマグマソースが異なることが示唆されたが、そのメカニズムの解明にはまだ至っていない