

Lunar Science Book, Chapter 3: Lunar Magma Ocean

(今後の月探査に資するサイエンスブック作成に向けた活動：3章
マグマオーシャン)

Makiko Ohtake¹, Hiroshi Nagaoka², Chikatoshi Honda³

¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanazawa 252-5210, Japan

²Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku,
Tokyo 169-8555, Japan

³Research Center for Advanced Information Science and Technology, The University of Aizu,
Tsuruga, Ikkimachi, Aizuwakamatsu, Fukushima 965-8580, Japan

ABSTRACT

In this year, we started to make up the science book (SB) for lunar exploration, in order to marshal significance of lunar science and exploration, and proceed with the preparations of instrumental development for future explorations. In this presentation, our actions in this project are introduced.

First, scientific results of recent remote sensing observations by e.g., KAGUYA (SELENE) and the remaining key problems are presented. Secondly, future observation targets are discussed to reveal those key problems. By the comparison of the remote sensing data to cumulative results obtained by the analysis of lunar samples before now, we focus on the differences between them, and aim to pick out action items of future lunar explorations.

今後の月探査に資するサイエンスブック作成に向けた活動： 3章マグマオーシャン

大竹真紀子¹，長岡央^{2*}，本田親寿³

¹宇宙研・太陽系科学研究系、²早稲田大・理工研、³会津大・コンピュータ理工学部

第49回月・惑星シンポジウム(7/20～7/21, 宇宙科学研究所)

7月21日(木) AM

3章要旨

3章での課題は「マグマオーシャン」について

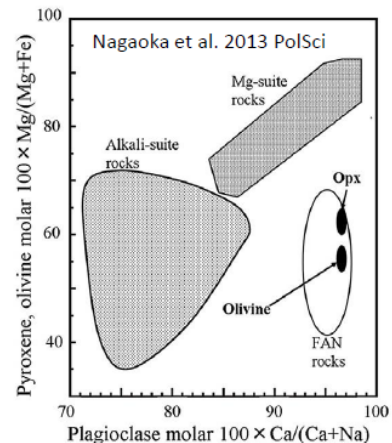
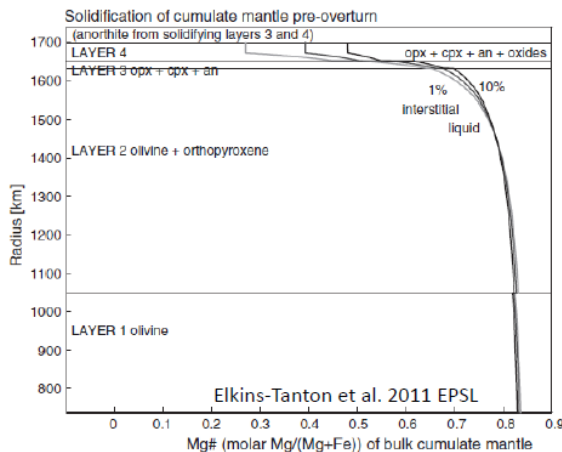
- 「かぐや」など近年の探査データを用いた研究を中心に、最新の研究成果と残された重要課題を整理
- 探査データとこれまでに蓄積されてきた月試料の分析結果とを比較し、両者の間での矛盾点に着目して今後の課題を抽出
- 課題の解決に必要な今後の観測項目について議論

目次

- 3.1 マグマオーシャンの初期条件と冷却・分化モデル (5p)
- 3.2 『かぐや』探査機観測による知見
 - 3.2.1 地殻構造と組成 (15p)
 - 3.2.2 マントル構造と組成 (5p)
 - 3.2.3 「かぐや」探査機観測の成果と試料分析の対比 (5p)
- 3.3 残された課題 (3p)
- 3.4 太陽系科学への貢献(CHASEに関連させ, 他の天体研究との関連) (3p)
- 3.5 課題解決のための探査項目とその実現性 (10p)
- Total ~46 page

3.1 マグマオーシャンの初期条件と冷却・分化モデル

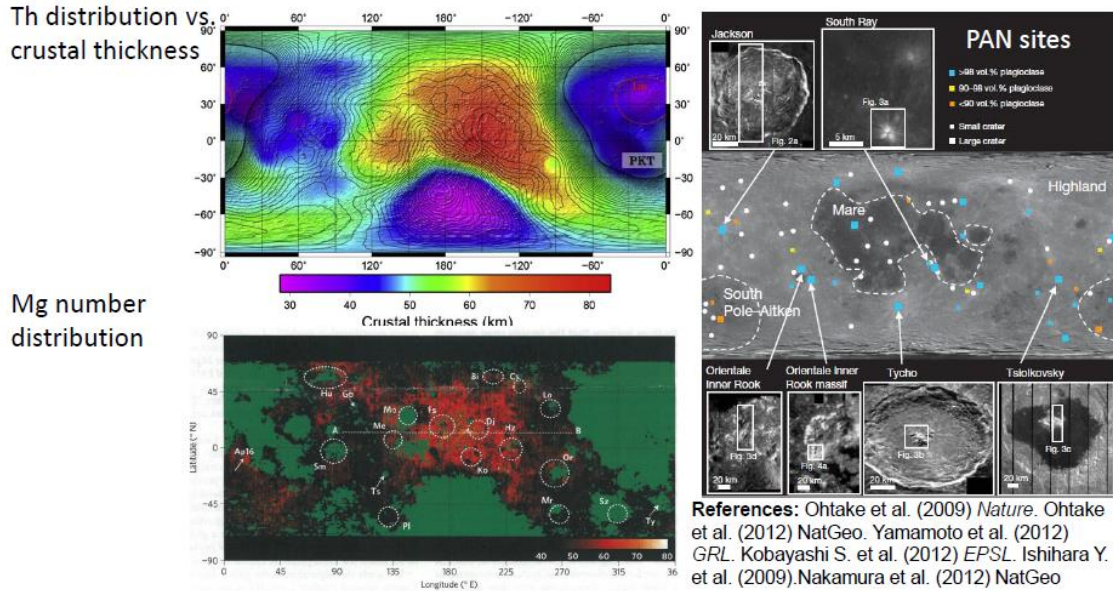
- あらすじ: かぐや以前までの先行研究をもとにした基礎情報のレビュー
- 先行研究にあるマグマオーシャンの初期組成・温度・圧力(深さ), 冷却・分化モデルをまとめる
- ⇒ベーシックな月構造(マントル組成・成層構造, 地殻形成, マントルオーバーターン, KREEP濃集など)を記述



3.2 『かぐや』等探査機観測による知見

3.2.1 地殻構造と組成

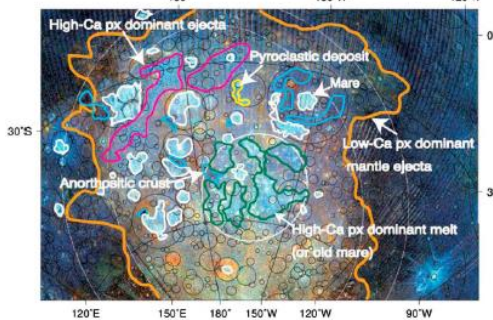
- あらすじ: かぐや観測による可視・近赤外分光, ガンマ線分光による地殻組成に対する新しい知見 (PAN, Low-Ca pyroxene, Mg#分布, Th分布など) をまとめる
⇒ 新たな観測値がマグマオーシャンの従来の理解をどう変えるのかを記述



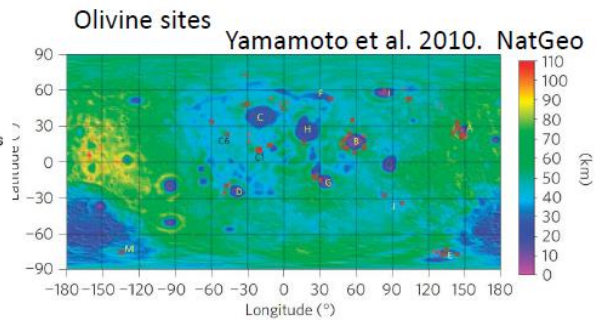
3.2.2 マントル構造と組成

- あらすじ: かぐや観測による
 - 1) コアマントル境界の溶融証拠 (Harada et al. 2014)
 - 2) カンラン石の分布 (Yamamoto et al. 2010)
 - 3) SPAの地質ユニットとマントル組成推定 (Ohtake et al. 2014 + α)
 などの新しい知見をまとめる
- それらがマグマオーシャンの従来の理解をどう変えるのかを記述

Geological research for SPA



Ohtake et al. 2014. *GRL*



3.2.3 「かぐや」等探査機観測の成果と試料分析の対比

- あらすじ: 探査により得られた新しい知見と、月試料(アポロ試料, 月隕石)分析による知見の整合性, 矛盾について記述する.
 - 1) PANやカンラン石組成の既存月試料中の存在度, 組成
 - 2) 重力場による地殻厚に対して試料推定の地殻固化深度
 - 3) 試料中の揮発性元素分析の結果 など

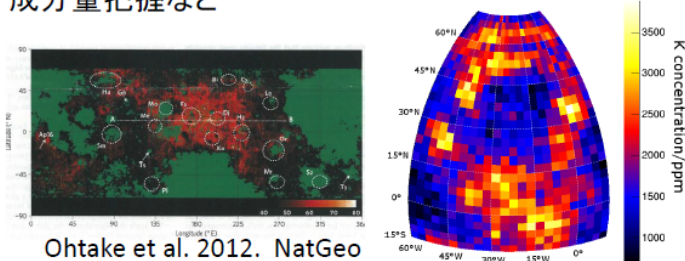
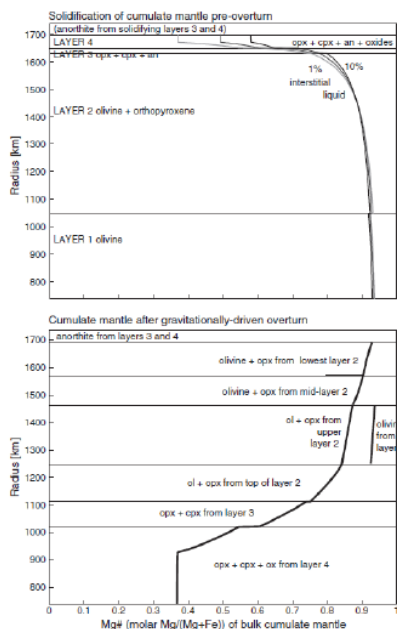
- ★非常に特徴的な月隕石群: Dhofar 489群とNorthwest Africa 773群
- 月裏側高地 (Lowest Th abundance, highest Mg number; 初期地殻?) 起源 (Takeda et al. 2006. EPSL)
- Dhofar 489群中のPure anorthositeの存在 (Nagaoka et al. 2014. EPS)
- カンラン石が半分近くをしめる斑レイ岩の起源 (Fagan et al. 2014. GCA; Nagaoka et al 2015. EPS)

- ★月試料中の揮発性元素含有量
- アポロ斜長石中の揮発性元素量2.7ppm⇒マグマオーシャン中に320ppm(Hui et al. 2011. Nat Geo)
- KREEPライクな斑レイ岩 (NWA 773群) 中の水素量

3.3 残された課題

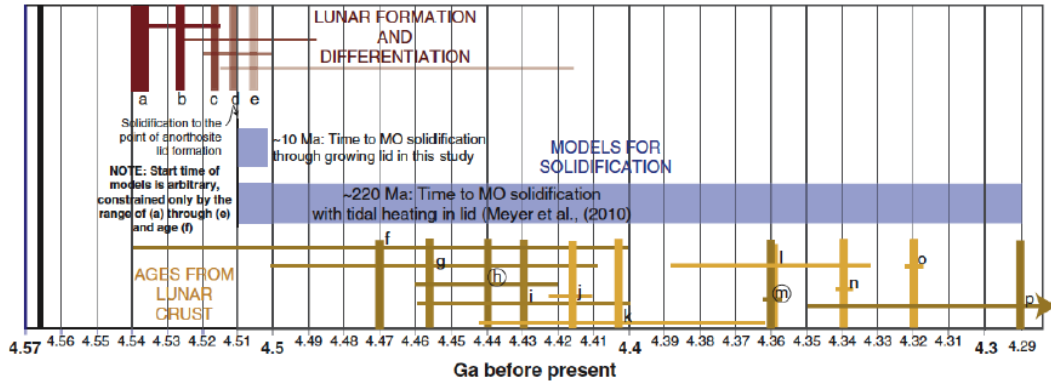
- あらすじ: 前節までの情報をもとにマグマオーシャンの初期条件と冷却・分化過程に関して残された重要な課題を抽出.
 - 1) マントル組成の直接的な観測やマントル層構造の把握
 - 2) 地殻端成分(裏側高地, KREEP濃集域など)の試料回収と分析
 - 3) 初期斜長岩地殻の固化年代・組成(ϵ Nd値, Mg#, Th,REE量など)
 - 4) 月バルク組成中の難揮発性元素量(Al, Ca, Thなど)
 - 5) クレータ年代学の高精度化, マントル中の揮発性成分量把握など

Elkins-Tanton et al. 2011 EPSL



初期地殻の固化年代の矛盾

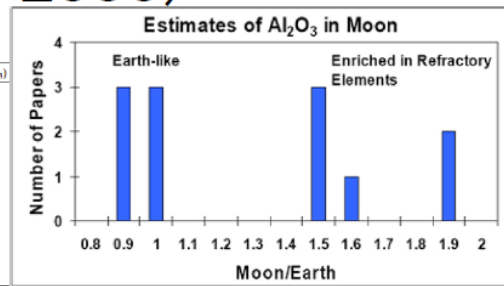
L.T. Elkins-Tanton et al. / Earth and Planetary Science Letters 304 (2011) 326–336



地球対月の難揮発性元素量 (Taylor et al. 2006)

Table 1
Compilation of estimates of the bulk Moon abundances of elements focused on in this paper

	Th ($\mu\text{g/g}$)	Moon/Earth (Th)	Al_2O_3 (wt%)	Moon/Earth (Al_2O_3)
This work	0.11	1.5	6	1.5
Warren (2005)	0.071	1.0	3.87	1.0
Lognonné et al. (2003)	0.11	1.5	6.4	1.6
Jolliff et al. (2000b)	0.142	1.9	—	—
Kaskov and Kronrod (1998) ^a	—	—	6.1	1.5
O'Neill (1991)	0.068	0.9	3.9	1.0
Maeller et al. (1988)	—	—	3.7–7.3	0.9–1.8
Ringswood et al. (1987)	—	—	3.72	0.9
Jones and Delano (1989)	—	—	3.7	0.9
Wänke and Dreibus (1982)	0.072	1.0	3.76	0.9
Taylor (1982)	0.125	1.7	6.0	1.5
Morgan et al. (1978)	0.145	1.9	7.58	1.9
Earth ^b	0.075	—	4.0	—



(G. J. Taylor, Univ. of Hawaii.)

Table. Compilation of estimates of the bulk Moon abundances of elements by layer models (Taylor et al., 2006)

	Th (ppm)	Moon/Earth (Th)	Al_2O_3 (wt%)	Moon/Earth (Al_2O_3)
Taylor et al. (2006)	0.11	1.5	6	1.5
Warren (2005)	0.071	1	3.87	1
Jolliff et al. (2000)	0.142	1.9	-	-

3.4 太陽系科学への貢献(CHASEに関連させ、他の天体研究との関連)

- あらすじ: かぐや成果の太陽系科学(CHASE⇒Continuous Habitable Solar system Environment)への貢献についてまとめる
- 1) 月と地球のバルク組成比較による巨大衝突による物質(揮発性・難揮発性成分, 主要元素, 同位体など)分配の理解
- 2) 地球固化過程理解への貢献(地球と月の違いを含む)
- 3) マントル・地殻構造と組成を地球・火星・水星と比較することによる惑星多様性の成因理解への貢献
- 4) 揮発性成分の起源:どのタイミングで月に供給されたものなのか?その供給源は?

3.5 課題解決のための探査項目とその実現性

- あらすじ: 3. 3章で示した残された課題の解決に向けて、重要な探査項目(観測項目と必要な精度)を、来る10年検討、その後探査提案検討(ペネトレータ, サンプルリターンなど)をもとに記述.
- 例1. 月裏側の始原的組成地殻からの斜長岩回収:
- -- 斜長石の形状・サイズ⇒マグマオーシャンから浮上する条件などを制約
 - -- 含まれるカンラン石、斜方輝石の組成(Mg#やREE量など)やそのモダル量⇒母マグマ組成へ帰結
 - -- 同位体組成(固化年代、 ϵ Nd値)⇒結晶化のタイミング
- 例2. 地殻深部 or マントル物質露出の可能性が高いSPAなど盆地への着陸探査、回収:
- -- 鉱物のモダル量⇒カンラン石+斜方輝石(マントル) or カンラン石+斜長石(地殻深部)
 - -- カンラン石、斜方輝石の組成(Mg#やREE量など)⇒マントル物質のMg#組成からマントルの層構造を、オーバーターンの有無を、検証
 - -- マントル中の難揮発性元素(Al, Ca, Th)量の把握
 - -- 同位体組成(固化年代、 ϵ Nd値)⇒マグマオーシャンのタイミング

まとめ

- 3章ではマグマオーシャンに着目
- かくや観測に基づく新たな知見をレビューし、従来のマグマオーシャンモデルにどのような影響を与えたかについて述べる
- 以上と昨今の試料研究等の比較から新たな課題はなにかを浮き彫りにする
- その課題を解決する探査とその実現可能性について本文で議論