

## 特集「月から始まる地球惑星進化学」

# 総括

岡田 達明<sup>1</sup>

### 1 経緯と「月」の諸事情

今回、日本惑星科学会誌『遊星人』のご好意により、「月から始まる地球惑星進化学」を特集することになった。これは、2005年度・地球惑星科学関連学会合同大会（開催地：幕張）における同名のセッションの中からトピックスをピックアップしたものである。月や地球型惑星の形成・進化過程に関する最新の話題や考察、レビューなどの7編の論文（今号掲載分は5編）から構成される。企画開始から原稿締め切りまでが短期間であったこともあり、議論が不十分な点もあると思うが、多少でも読者の研究のきっかけとなれば、本特集の役割を果たしたと考えている。

そもそも、なぜ今、月なのか？

月は現在、科学的にHOTであり、しかも日本を含む諸外国が今後10～15年間に多数の月周回・着陸機を送り込む予定であり、月の研究を進展させる絶好のチャンスである。

アポロ・ルナの実現は月科学に多大なる進展と結実をもたらした[1]。そのデータは今から30年以上前に得られたものだ。当時の低い観測技術と赤道域に限られた観測範囲、表側の赤道域など数箇所から持ち帰った試料の分析により、月（というよりも惑星）の研究が本格的にスタートした。時代が経て1990年代になり、2機の月周回衛星クレメンタイン、ルナー・プロスペクタが送られた。両衛星の観測機器は現代の技術からすれば旧式・低性能であるが、月全球の探査によって、アポロ・ルナ時代の局所的情報に基づく知見から脱却

し、月に対する概念、特に進化過程に対する見方を大きく変えつつある。以来、新しい視点での月の研究が活発に行われている[2]。

また、これまで月隕石が30個以上回収され、物質科学的にも研究が大いに進展している。特に、アポロ・ルナ試料が表側の赤道付近に集中しているのと対照的に、全球から満遍なく取得されており[3]、月地殻の形成過程や火山活動について新たな知見をもたらしている。

以前から月は、比較惑星学の標本的役割をもっている。天体サイズが小さいために進化が初期段階で終焉し、過去の状態を現在に留めていると考えられることなどが理由である。また、地球-月系の形成過程を理解するための貴重な情報源でもある。最近の太陽系形成理論や数値シミュレーション、系外太陽系の観測などから太陽系進化モデルの精度が向上している。一方、隕石や宇宙塵の分析が進み、それらが融合して新しい太陽系観が出来上がりつつある[4]。月や地球をはじめとした地球型惑星の統一的、系統的な理解を太陽系進化の中に位置づけて進める時期にきている。月は過去の情報の豊富さ、今後の探査計画、および比較的単純と考えられる内部構造から、格好の研究対象といえるだろう。

今、まさに月探査の時代が始まろうとしている。日本は月周回探査機セレーネ[5]を2007年に打ち上げる予定である。また、ベネトレータを用いた先進的な内部構造探査の技術を確立しつつある[6]。着陸を含めた次期月探査の検討も進めている[7]。世界的にも月探査は目白押しである。インドは2007年を目指し、月

1. 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

周回衛星Chandrayaan-1を開発中である。中国も「周・着・還」構想、即ち2007年頃に周回衛星「嫦娥（月に住む仙女）1号」、続いて2020年頃までに着陸やサンプルリターンを行い、有人につなげる国家戦略を掲げている。米国の新宇宙政策では、2008年に周回機（LRO）、続いて着陸機を次々に送り、2015から2020年に「人類の月への帰還」を目指す。欧州は現在、欧州宇宙機関（ESA）のSMART-1[8]が月を周回中であり、その観測データは近々公開される。また、イタリアを中心に、月周回・着陸機の構想を進めている。

こういう時代の中で、われわれ科学者は、月の科学を新たな視点で再検討、再構築し、今後入手される観測データを有意義に使い、さらに次の探査での観測内容・機器ヘリクエストするという循環を形成してゆく

ことが大切である。また、月の研究にとどまらず、地球型惑星、そして太陽系の研究に展開してゆくべきものである。今回の特集号は、こうした試みの最初の一歩となり、今後の研究の進展に少しでもお役に立てば幸いである。

## 2 合同大会「月」セッション

合同大会では例年、「月」セッションを開催してきた。当初はセレーネの立ち上げにあたり、月科学の整理、各観測機器による科学観測提案、各観測機器チーム間の相互理解を進め、総合的な科学に発展される目的があった。発表内容は、月科学の最新の話題の他に、月探査での具体的な観測目標の設定、観測機器・解析

表1：2005年度「月」セッション発表内容（氏名の\*は招待講演）

	申請者名	タイトル
AM1	三浦保範	地球における巨大衝突を示す物的証拠
	古市勝久	SELENE 搭載 $\alpha$ 線検出器 (ARD) による科学
	斉藤靖之	月内部熱構造の構築
	佐伯和人	月面画像分光望遠鏡 ALIS の性能評価と運用計画
	児玉信介	ALIS データによる月の海の玄武岩の組成分布
	斉藤貴美子	分光望遠鏡による月面絶対輝度の推定法の検証
	荒井朋子	月隕石 Yamato983885 中の KREEP 玄武岩
AM2	諸田智克	クレータ生成率不均質と月の進化
	佐々木貴教	Reconsideration of Hf-W chronometry: Implications for Moon-forming giant impact.
	岡田達明*	水星：還元的環境で形成された惑星
	佐々木晶*	火星、水星、金星の火山活動 — 月との比較
	並木則行*	線形安定性理論による金星リソスフェア不安定性の評価と惑星冷却メカニズムの考察
押上祥子	Magellan SAR 画像輝度から指定される金星の溶岩チャンネル Baltis Vallis の横断地形プロフィール	
PM1	杉原孝充*	月の初期進化：固体惑星初期進化過程の研究手法
	大竹真紀子*	Geochemical Relationship of the Moon and Earth
	大谷栄治*	地球の含水マグマオーシャンと月のマグマオーシャン：地球と月の地殻の起源
	山口亮*	月と分化した小惑星地殻の初期進化
ポ ス タ ー	沼川広太	月の地震波トモグラフィ
	板垣義法	深発月震震源における潮汐応力主軸方向とイベント発生との関連性
	小川和律	月面地質 X 線分析用 CNT-FE 小型 X 線管球の基礎開発
	熊本 篤	Electromagnetic compatibility (EMC) performance of Lunar Radar Sounder (LRS) on board the SELENE spacecraft
	春山純一	SELENE 搭載地形カメラのハードウェアとソフトウェアの開発状況ならびにデータ解析準備について
	出村裕英	数値地形学 DTM 上でのクレータ自動認識
	平田 成	Tycho 周辺の物質分布
	平田 成	Tycho 周囲の二次クレータ分布
	尾張厚史	月面の鉱物・化学組成分析のための輝石の可視 / 近赤外反射スペクトル測定
	今村雄一郎	ベガによる大気補正手法を用いた月面絶対放射輝度の推定

法の開発が中心を占めた。これは、惑星探査に直接関与する研究者にとって重要な発表機会の受け皿であり、また当初の目的も持ち続けている。しかし、より広範囲な分野の研究者を集めて議論する目的で、2005年度は趣向を変え、「月の起源・進化過程を比較惑星学的に捉え、月限定ではなく地球型惑星としての一般的な理解を進める」ことをテーマに掲げた。そのために、7件の招待講演を設定した。

今回は5月22日に3セッション分の時間割当てを頂き、17件の口頭発表、10件のポスター発表を行った(表1参照)。ここで、招待講演を除く20件の内訳は月の科学:8件、月に関連した科学:2件、室内実験:1件、月の地上観測とその開発:4件、月探査機搭載機器と解析法:5件である。ちなみに聴衆は午前中が50~70名、午後が70~80名であった。惑星科学関連の別セッションと同時進行であった割には上々であったと考えている。

### 3 今回の特集の概要

今回の特集では、「月」セッションの7件の招待講演うち5件をトピックスとして紹介する(残り2件は次号の予定)。詳細は各論文を読んで頂くとして、ポイントのみ列挙する。

杉原[9]は、月のマグマオーシャンの固結過程とそれに伴う斜長岩地殻の形成過程を再検討した。マグマオーシャン中で、深さ方向の圧力勾配(断熱温度勾配)が結晶化温度(リキダス)の勾配と異なることに注目し、斜長石が安定的に結晶化する深さとそれに至るまでの結晶分別のモデルを提案した。固体惑星の進化過程において、天体サイズの重要性として、圧力効果による内部物質構造の形成やその後の進化過程への影響を指摘している。

大竹[10]は、新しく発見された月隕石に含まれる新種の月地殻岩石(Mg#が高い斜長岩質)の露出する位置を、月探査機による月面反射スペクトルデータとガンマ線観測データから推定した。また、月地殻上層のMg#を見積もる(67-70前後)ことで、月のバルク

のMg#の推定を試みた。

大谷[11]は、月と地球の地殻形成において、マンツルの含水量の果たす役割を論じた。大谷らの実験[12]によると、含水マグマは低圧下で体積の圧力依存性が大きい。斜長岩地殻の形成には月のような無水条件が必要であり、逆に地球のような含水条件ではSiO<sub>2</sub>に富む大陸地殻が発達しやすいと主張している。また、月が無水かつFeOに富み、難揮発性元素に富む組成は、巨大衝突による月形成によって説明できるとしている。

武谷・並木[13]は、地球と金星のリソスフェアの安定性とその直下に形成される2次対流の時間・空間規模をマンツルの含水量による粘性の違いで説明した。それは地球の中央海嶺近傍で見られる重力異常やリソスフェアのFlatteningの特徴と一致する。同モデルを金星に適用すると、乾燥した金星では高粘性のため対流の時間・空間規模が大きくなるが、それが金星特の大規模地形の成因となっている可能性を指摘している。

佐々木[14]は、各地球型惑星に見られる火山活動の特徴を相互比較して、各惑星の形成・進化過程の違いを論じている。

山口・武田[15]は、月の帰還試料や月隕石と、小惑星ベスタ起源とされるHED隕石の比較から、天体サイズの違いによる熱変成作用や火成活動の継続期間、冷却の時間スケールの違いによる内部進化の違い、地殻形成過程の違いについて議論している。また、隕石重爆撃が月だけでなく普遍的に起きた可能性を提案している。

岡田[16]は、水星形成モデルと観測事実を説明する解として、水星が還元的環境で還元的材料物質が選択集積を経て形成されたと主張した。水星軌道域でEコンドライトが形成可能という最新のIDPの研究[17]からも支持される。また、火星マンツル組成がHコンドライト的[18]という結果を受けて、原始太陽系の新たな酸化還元状態マップを提示した。各惑星の典型的な材料物質を提示したほか、選択集積が普遍的である可能性を指摘した。

## 4 議論

月や地球型惑星の起源・進化過程について、統一的に議論されるべき点は多々あるが、今回で特に重要な点を以下にまとめてみた。

### (1) 天体サイズ依存性

惑星の進化は冷却過程である。熱変成や火山活動の期間や、冷却のタイムスケールなどの熱史は天体サイズに依存する。実際、惑星表面に残るクレータ分布を比較したとき、小惑星、月と水星、火星、金星と地球の順に年代が若くなる。実際、ベスタ起源とされるHED隕石、月の石や月隕石、火星隕石、地球の石の平均的な形成年代を比較しても同じ傾向を示す。山口・武田[15]は特に、ベスタがユークライト地殻を形成するとした場合、生成期間がCAI形成時期から長くて1千万年以内と極めて短期間に限定されるとしている。これは月地殻に比べても短い。

杉原[9]はさらに、初期進化におけるマグマオーシャン固結過程への圧力効果の影響を指摘する。マグマオーシャン形成時に、天体サイズによる圧力勾配の違いによって結晶化する深さや組成が違い、結果として形成される内部物質構造に影響が出るはずである。

### (2) 酸化還元状態

天体サイズ以外でも、材料物質の酸化還元状態による影響は大きい。岡田[16]は水星に観測される高い密度、高い表面反射率を説明するには、水星が還元的環境化において、還元的物質が選択集積を経て形成されたと指摘する。最近のIDPの研究[17]、惑星マントル物質の研究[18]を加えて、原始太陽系の酸化還元状態の分布を再考した。議論の簡単化のために金属鉄とSiの比と、Mg#の日心距離分布に着目した。現在の惑星のそれらの推定値、また小惑星スペクトル型における分布をよく再現する。さらに、材料物質の酸化還元状態と、金属鉄濃集のための選択集積過程が普遍的に

起きた可能性も指摘する。

酸化還元状態の違いが生じる原因は、原始太陽系の水安定性とも密接に関連する。内側の惑星の水星、金星が比較的Dry、地球はWet、火星もWetである。月はDryだが、大谷[11]はその理由を巨大衝突による月形成を仮定することで解釈可能としている。

Mg#は内部の部分溶融や火山活動の特徴を決める重要なパラメータであり、地球物理学的にはマントル密度を決める要因であり、内部構造や地殻の厚さ分布の推定に必須な最重要パラメータである。杉原[9]、大竹[10]は月表面の典型的なMg#を求めている。大竹は特に月隕石とリモートセンシングの結果を合わせて月のMg#の推定を試みている。地球のMg#=89に比べて月は小さいが、その理由については言及していない。大谷[11]は、より外側起源の火星的組成をもつ原始惑星の巨大衝突によって説明できるとした。また、岡田[16]は、月ではかつて火成活動が見られたが、月よりも大きい水星で火山活動が乏しい原因をMg#の違いのためとしている。

### (3) 含水量

(2)にも関連するが、マントルのWet/Dryによって惑星の地殻形成、またはテクトニクスとして表面地形に現れる特徴について、大谷[11]が月と地球の関係、武谷・並木[13]が地球と金星の関係について議論した。大谷[11]は物質科学的側面から、大谷らによる高温高圧実験の結果[12]を交えて、月がDryであるために、結晶化した斜長石がマグマオーシャンよりも軽くなり、浮遊できる。月では斜長岩質の地殻形成があり得るが、Wetな地球では結晶の方が高密度になるため起こりえないとした。但し、このような単純な地殻形成は難しいという杉原[9]の指摘もある。

武谷・並木[13]は、地球と金星のマントルの本質的な違いがWet/Dryにあるとして、その結果として生じる粘性率の違いに注目した。地球では低粘性のために150～300kmの小規模な2次対流が生じるが、金星では高粘性のためにその空間・時間規模が大きく、数

100kmから数1000kmになる。それが金星特有の大規模地形を形成した原因かもしれないことを指摘する重要な結論を導いている。

なお、双子惑星と呼ばれる地球と金星でWet/Dryの違いが生じた理由については言及していない。地球のプレート運動による物質循環によって地球内部に水が供給されたのか[19]、原始太陽系の氷安定境界からの距離の違いにより、揮発性成分の供給量が地球に多く、金星に少なかったためかもしれない。

以上、半分お話的に議論を進めたが、今回はあくまでも地球型惑星の起源・進化過程を理解するというよりも、問題を整理し、議論のきっかけを提供することを目的とする。その意味では、有意義なセッションを組めたと考えている。

## 5 将来にむけて

今回みてきたように、月や地球型惑星の形成・進化過程には系統的に俯瞰することで見てくる特徴もあり、今後のより充実した研究を期待するところである。一方、今後は月探査をはじめとした惑星探査が活発に行われる。これまでの惑星の特徴を知る偵察的な探査が多かったが、今後は具体的なテーマを掲げたより高精度の探査を目指す。セレーネは現在、2007年の打

ち上げを目指して準備中である。セレーネは打ち上げ後しばらく後にデータが全面公開される。表2に、セレーネの固体惑星科学関連の主要観測テーマを挙げる。これを機に月の科学を考察し、日本発のデータの解析に参加してみても如何だろうか。また、個別の観測機器による結果のほか、複数の観測機器によるデータを総合して分かる科学テーマも重要であり、新しい視点での解釈が期待される。

また、将来の月探査計画について、検討が始まっている。何を目的し、どのような探査を行うべきであるかを、今回のような月や地球型惑星の形成・進化過程の考察を深めながら考えていく必要がある。

## 6 おわりに

今回の特集では、月や地球型惑星について問題を整理し、議論するきっかけとして大変有意義であったと考えている。セレーネの打ち上げも近づいているが、その科学テーマの再考、複数機器にまたがる科学の実現にむけて、「セレーネ小研究会」を2～3ヶ月に1回の割合で開催している。惑星科学MLにも流しており、参加は自由なので、皆様の参加と建設的な議論を期待したい。

今回の特集を行う機会を与えて頂いた遊星人編集長

表2：セレーネに搭載される観測機器とその特徴、観測対象

観測対象	機 器	特 徴
元素組成	蛍光 X 線分光計	主要元素 (Mg, Al, Si 等) の分布. 20km 分解能
	ガンマ線分光計	主要元素, 放射性元素, 揮発性元素. 100km 分解能
鉱物組成	多色カメラ	可視近赤外域の9バンドの撮像. 20-60m 解像度
	可視近赤外分光計	0.5-2.6 $\mu$ m の連続分光. 500m 間隔.
地形地質構造	地形カメラ	解像度 10m の立体カメラ
	レーザサウンダー	HF(5MHz) のエコーによる地下構造探査. 宇宙電波.
	レーザ高度計	Nd:YAG レーザによる距離計測. 誤差 5m. 1 秒周期.
重力場	$\Delta$ VLBI 電波源	S-band $\times$ 3, X-band $\times$ 1 の送信機. VRAD2 衛星
	リレー衛星	主衛星を含め 4way ドップラー計測. 裏側も計測.
磁場	磁力計	3 軸. 0.5nT 分解能. 12 m のマスト先端に取り付け.
月周辺環境	粒子観測器	高エネルギー粒子, $\alpha$ 線の観測
	プラズマ観測器	月周辺のイオン, 電子計測
	電波科学	S/X バンド送信を用い, 月電離圏の探査
地球電離圏	プラズマ撮像装置	XUV と可視での地球プラズマ, オーロラ撮像
地球 (広報)	ハイビジョン TV	広報用高精度撮像カメラ

の倉本圭さん，編集幹事の田中秀和さん，多忙の中で快く引き受けて頂いた執筆者の皆様，建設的なコメントを頂いた査読者の皆様に深く感謝する。

## 参考文献

- [1] Lunar Sourcebook, 1991, eds. Heiken, G. et al.
- [2] Joliff B.L., et al., 2000, J. Geophys. Res. 105E2, 4197.
- [3] Korotev, R.L., 2003, Geochim. Cosmochim. Act, 67, 4895.
- [4] 坂本尚義・倉本圭, 1997, 科学, 68, 637.
- [5] Sasaki, S. et al., 2003, Adv. Space Res. 31, 2335.
- [6] Mizutani, H. et al., 2000, ESA-SP402, 107.
- [7] Okada, T., et al., 2005, Adv. Space Res., in press.
- [8] Foing, B.H., et al., 2001, Earth, Moon and Planets, 85/86, 523.
- [9] 杉原孝充, 2005, this issue., pp.92.
- [10] 大竹真紀子, 2005, 遊星人 (投稿中) .
- [11] 大谷栄治, 2005, this issue, pp.108.
- [12] Sakamaki, T., et al., 2005, submitted to Nature.
- [13] 武谷賢・並木則行, 2005, this issue, pp.113.
- [14] 佐々木晶, 2005, 遊星人 (投稿中) .
- [15] 山口亮・武田弘, 2005, this issue, pp.102.
- [16] 岡田達明, 2005, this issue, pp.127.
- [17] Ebel, D. and Alexander, C., 2005, Lunar Planet. Sci., 36, #1797.
- [18] Agee, C.B. and Draper, D.S., 2005, Lunar Planet. Sci., 36, #1434.
- [19] Murakami, M., et al., 2002, Science 295, 1885.



図：月を周回するセレーネのイメージ図