

## 特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

# 海盆のテクトニクスと火成活動

並木則行<sup>1</sup>

## 1. 第四回月の起源研究会について

### 1.1 研究会の概要

本特集号は平成10年8月3～4日に文部省宇宙科学研究所で行われた「第四回月の起源研究会：物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」からの抄録である。この研究会の目的は、第一に、固体地球・惑星科学の立場から日本の月探査の科学目標について再検討することである。ルナーA、セレーネという日本の二つの月探査計画では、それぞれの探査機に複数の観測機器が搭載される。個々の観測機器の観測目標については従来もいくつかの機会でも議論されている。そこで本研究会では特に、複数の観測データを総合し、“ルナーA、セレーネという計画全体、あるいは日本の月・惑星探査計画全体でどれだけの成果が挙げられるか”を検討することを目的とした。

第二の目的は、本研究会を通じて固体地球・惑星科学のコミュニティー内の情報交換を促進することである。各観測機器グループ間で、観測精度、運用計画、期待される成果等についての連絡を図ることはこれまでもいくつかのグループ間で行われている。本研究会ではさらに、観測グループと理論・実験的惑星科学研究者が、新しい研究分野の模索や観測計画提案を通じてより緊密に連携していくための一助となることを目指した。それと同時に、地球観測の研究者による講演を依頼し、地球観測の経験とノウハウを月探査へ活かすこと

を目的とした。

本研究会では、観測目標ではなく、科学目標を重視する立場から「海盆のテクトニクスと火成活動の関連」、「二分性 (dichotomy) の構造と形成」[1]、「鉄のコアの観測可能性について」[2] という3つのテーマによってセッションを分けた。まず、司会者がそれぞれのセッションのテーマと関連する観測計画について説明し、次にそのテーマに特に関係の深い観測計画グループから講演を頂いた。そして、惑星科学・天文学の分野で理論・実験的研究を進める研究者からコメントを頂き、さらに地震学、火山学、実験岩石学などの地球科学の各分野でご活躍中の方々にも講演を依頼した(表1)。講演者各氏から講演要旨を頂き、まとめたものが本特集号である。

### 1.2 月の起源と進化を制約する3つのエポック

米国と旧ソヴィエトの行った一連の月探査、特にアポロ計画、ルナ計画によるサンプルリターンは月の起源と進化の解明に多大な貢献をした。それと同時に、惑星探査時代以前には想像もつかなかったような多くの謎をもたらした [3]。これらの未解決の問題を整理する上で、月の歴史上とりわけ重要と考えられる3つのエポックに着目することができる。それは (a) 46億年前の月の誕生、(b) 46～43億年前の原始地殻の形成、(c) 39～32億年前の海の玄武岩溶岩の噴出である。ここで (a)、(b)、(c) は仮に年代順に並べたが、年代の

<sup>1</sup> 九州大学理学部地球惑星科学科

若いほど地質学的証拠は増え、観測データをもとにそれぞれのエポックで起こった諸現象を説明することが容易になる。特に (c) 海の玄武岩溶岩の噴出がほぼ32億年前に終了してからは、月面上ではクレーターの形成以外に目立った活動もなく平穏な時代が過ぎたと考えられる。逆に年代が古くなるとクレーター形成率が急激に増大するため、39億年以前の明瞭な地質現象を写真から判読することは困難である。従って (b) 原始地殻の形成を探るためには、多重スペクトル画像やガンマ線、X線観測データを駆使して鉱物組成、元素分布の地図を作成し、丁寧にその形成過程を解きほぐしていく必要がある。また (a) 月の誕生については、月面上にはほとんどその痕跡が残されておらず、リモートセンシングによる二次元的なグローバルマッピングから直接的証拠を得ることは不可能である。月の内部構造、とりわけコア・マントル・地殻といった大局的構造を明らかにする必要がある、地震探査、磁場観測、重力探査に期待するほ

かない。

本研究会では、これら3つのエポックに対応して、(c)「海盆のテクトニクスと火成活動の関連」、(b)「二分性 (dichotomy) の構造と形成」、(a)「鉄のコアの観測可能性について」という3つのセッションを設けた。本特集号では観測データが多く、比較的議論が容易な「海盆のテクトニクスと火成活動の関連」から順番に、時間を遡って議論することにする。

## 2. 月の海の研究の意義と未解決の問題

海の形成・進化の研究はアポロ計画の主要な目的の一つであった。アポロの着陸地点選定のために、ルナオービターにより何枚のも月の海の高分解能写真が撮影され、地上からの分光観測とあわせて海の地質図が、アポロ11号の月面着陸以前に作成されている (例えば、図1) [4]。またアポロ計画によるサンプルリターンは月の物質科学を著し

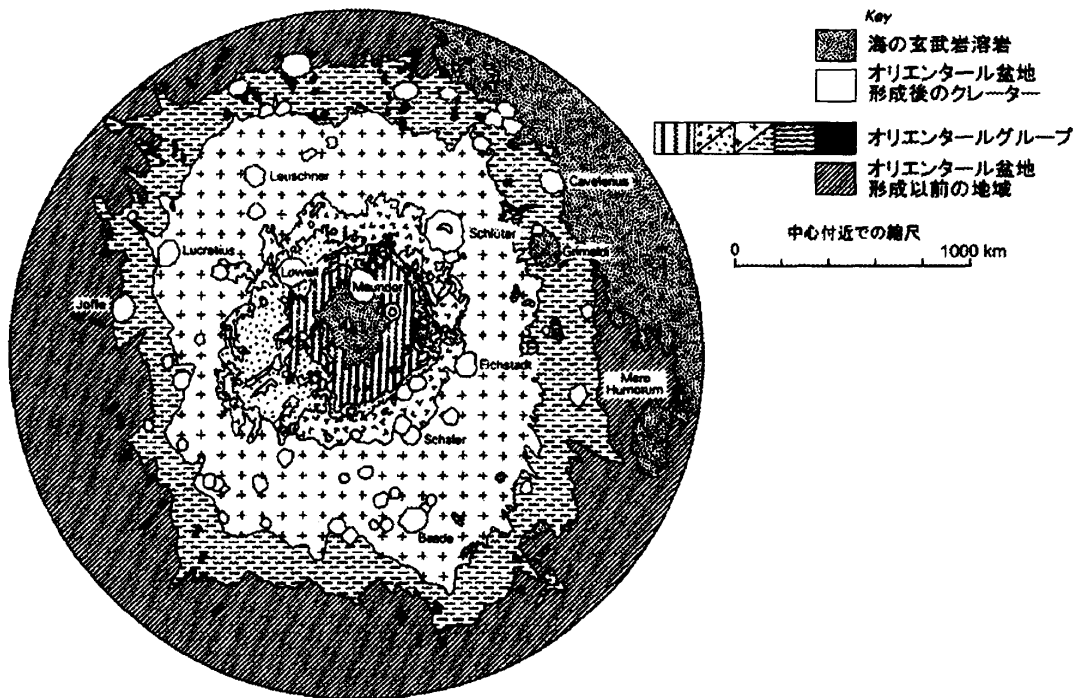


図1. オリエンタル盆地の地質図。[4]を改訂。

く前進させ、現在では月のグローバルな火成活動の歴史が詳しく分かっている [3]。こうした研究成果は、あたかも月の地質学がすでに終了し、今更あらためて月探査を行って、月の海のテクトニクスや火成活動を研究する意味はほとんど無いのかのような印象を与える。しかし、実際には月の海にはまだまだ数多くの未解決な問題が残されている。日本の月探査、ルナーAやセレーネはこうした問題に光をあて、月の起源と進化の解明に重大なヒントを与えてくれると期待される。

## 2.1 月の海の鉛直構造

### (地形カメラとレーダサウンダー)

アポロ計画、そしてその後のクレメンタイン計画、ルナプロスペクター計画でも踏み込むことのできなかつた問題に、月地殻の鉛直構造を探るという問題がある。アポロ計画での地震波探査は観測点数と観測点のネットワークの広さが限られているため、地殻の内部構造まで決定する事はできなかつた。またアポロ、クレメンタイン、そしてルナプロスペクター計画による詳細な重力場測定は、内部構造の制約に大変有用ではあるが、あくまでも内部構造モデルに対する依存性が強く、観測データからインバージョンによって、地殻内部構造を「決定」する事はできない [5]。地球観測の経験から類推すれば、地質学者自身がフィールドに出ない限り、リモートセンシングの観測データのみから内部構造を推定することは困難な問題である。

ルナーAとセレーネ計画では、高分解能地形カメラとレーダサウンダーによってこの難問に挑む。良く知られているように、探査機による月の撮像はアポロ計画以前から行われている。しかし、ルナーA搭載のカメラとセレーネの地形カメラはクレメンタイン計画のマルチスペクトル画像に比べて数倍以上空間分解能がよい。しかも、アポロや

ルナーオービターの高分解能写真撮影でカバーしきれなかつた月全面の撮像を行う。これにより、月の表面をくまなく精査し、ステレオ視によって三次元画像解析を行う予定である。例えば、溶岩流末端部の比高が10~60 mと高く、ルナーオービターの低解像度写真でも解析が可能であったインプリウム盆地では、溶岩流の分布や流れの向きを調べ挙げてゆくことで、火成活動の規模や様態の時間変化が研究されている [6]。ルナーAとセレーネの高分解能画像からは、従来の二次元画像解析では確認できなかつた比高10 m程度の海の溶岩流周縁部が明らかにされると期待されている。従って、インプリウム盆地に用いられたのと同様な手法が他の海についても適用できるだろう。また、ステレオ画像と地形図を駆使して、海とその周辺部に分布する地溝、リッジ、断層の詳細な地形を調べることが可能となれば、海のテクトニクス研究は大きく前進する。

レーダサウンダーはリモートセンシングとしては稀な、直接地下構造を探査する観測機器である。サウンダーはアポロ計画でも周回船に搭載され、観測を行っている [7]。しかし、月面での地形による散乱効果が強く、地下構造が解析されたのは、隣接軌道がある2周回分、それも海の上だけである [7]。セレーネ計画では、高分解能地形カメラのステレオ画像から作成される地形モデルを使って、地形による散乱効果を反射波から除去し、月全球での地下構造探査を目指している。実現すれば、これまで情報の無かつた地殻内部構造について新しいデータが得られることになり、画期的な成果が期待されている。これらの地形カメラによる月面地形モデルとレーダサウンダーによる地下構造探査とを併用する事で、初めて月の地下構造が理解され、海の構造発達史に強い制約を与えることができるかと期待される [8, 9]。

### 3. 海盆のテクトニクスと火成活動の関連

月の海の分布は月の表側に、しかも巨大衝突盆地に集中している。このことは月の海の火成活動が衝突盆地の形成に伴う割れ目・断層システムにコントロールされていることを強く示唆する。実際にオリエンタル盆地内での溶岩流の分布をみると、コルディレラ山脈や外ルーク山脈（ともにオリエンタル盆地の多重リングの一部と考えられている）の麓に溶岩が染みだしているようである（図2）。また、盆地の南東部には円環状にアルベドの低い物質が分布していることが確認される（図2中の白い矢印）。このアルベドの暗い物質は、オリエンタル盆地より古い衝突が形成した割れ目に沿ってマグマが上昇した証拠と考えられる[10]。同様の観察は衝突盆地だけでなく、底に割れ目を持つクレーター（Floor-fractured crater）にも見ることができる[11]。直径 100 km 以上のクレータ

には、地形緩和とともにクレーターの底にひび割れがはいり、そこから火山性物質が噴出したと考えられるものがいくつか見ついている（図3）。これらの観察は、地下のマグマ溜まりで出口を求めていた溶岩が地殻内部の割れ目に沿って噴出したことを示唆している。従って、盆地や大型クレーターの形成と地形緩和に伴うテクトニクスがその後の火成活動の様式を支配したのではないかと推測される。

現存のデータではこれ以上詳細な、あるいは定量的な議論は望めないが、ルナーAやセレーネ計画により地殻内部の鉛直構造、とくに断層システムや岩脈の可視化が進めば、テクトニクスと火成活動の関連やその変遷史が明らかにされるのではないかと期待される。一方、間接的な観測・研究から現状のデータ不足を補完することも可能である。第一に海の内部に見られる他の火山地形の解析が海の火成活動の歴史にいかなる制約条件を与えるかが考慮されなければならない。一例として、

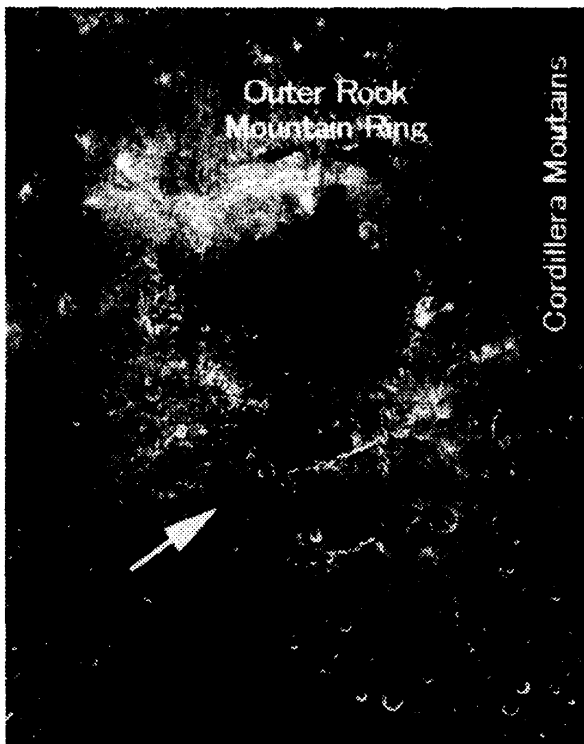


図2. オリエンタル盆地のクレメンタイン合成画像。

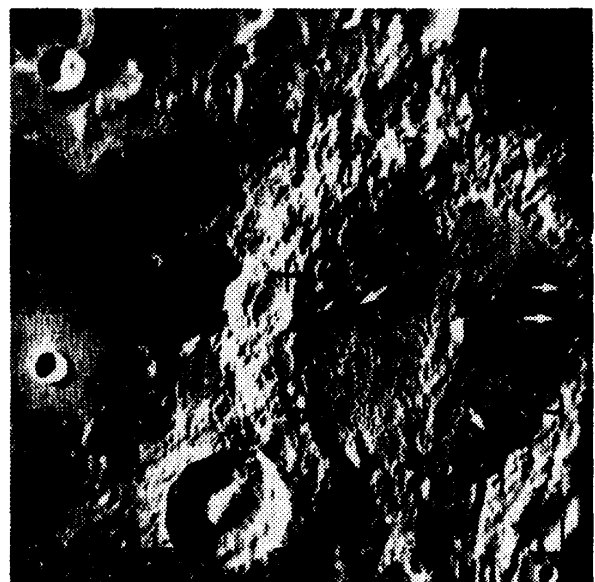


図3 アルフォンザスクレーター（直径108km、図の中心は13.4S, 4.8W、レンジャー9号撮影）。クレーター内部の割れ目に沿って吹き出したアルベドの暗い火山性物質（4ヶ所）が白い矢印で示されている。

研究会で小松は蛇行谷の様態と分布を紹介し、惑星での類似地形との比較からその起源について考察した(表1)。講演では蛇行谷を形成した溶岩の噴出量と組成について議論が行われ、小松は鉄、チタンの含有量の増加が粘性を下げる効果があることを指摘した上で、クレメンタイン画像の解析を示唆した。また、地球との類推からコマチアイト組成の可能性も考慮されるべきかも知れない。ただし、蛇行谷の形成が月の海全体の形成・進化に果たした役割は未だ明らかではない。

第二に、井田は月の海の火成活動の類推として地球のホットスポットと洪水玄武岩について紹介

した(表1)。ハワイやデカン高原を例にして、ホットスポットと洪水玄武岩の分布、成因関係、大陸分裂に及ぼす影響について講演した。さらに、リソスフェアの応力が火成活動の様式を支配する例として、ハワイのイーストリフトゾーンでの噴火を示した。そして、自身の最近の研究から、リソスフェア内の応力が圧縮あるいは中立的で、マグマ溜まり内部の圧力が高いときには噴火が *extrusive* (どこまでも伸び、割れ目は閉じる) になること、逆にリソスフェア内の応力が張力的でマグマ溜まり内部の圧力が低いときには噴火が *intrusive* (安定状態に達して、保持される) にな

表1. 第四回月の起源研究会の講演リスト。

講演者	タイトル
<b>セッション1 鉄のコアの観測可能性について</b>	
倉本圭 (司会)	鉄のコアの観測可能性について [2]
竹内希	ルナー-Aミッションによる月のコアの検知 [12]
渋谷秀敏	月の核と月磁気/古月磁気学 [13]
花田英夫	重力ポテンシャルの観測によるコア密度の制約 [14]
坪井誠司	海半球プロジェクト:地震計配置の戦略 [15]
桜庭中	月ダイナモの可能性について [16]
<b>セッション2 海盆のテクトニクスと火成活動の関連</b>	
並木則行 (司会)	海盆のテクトニクスと火成活動の関連
高田淑子	海の溶岩流出と大型クレーター盆地の構造 [8]
山路敦	レーダーサウンダー観測による海のテクトニクス研究 [9]
井田喜明	リソスフェアと地殻の構造が地球の火成活動に及ぼす影響について
小松吾郎	Comment on mare volcanism in terms of sinuous rilles
<b>セッション3 二分性 (dichotomy) の構造と形成</b>	
佐々木晶 (司会)	月の二分性 [1]
岡田達明	SELENE分光観測を総合して解析されるアノーソサイト地殻の形成過程 [17]
阿部豊	月重力観測と二分性の起源 [18]
武田弘	鉱物スペクトル、X線、ガンマ線データを総合した月原始地殻の再構築 [19]
大谷栄治	月岩石の分析にもとづくマグマオーシャンの冷却モデル
福田洋一	人工衛星測定重力ポテンシャルの解析による地球の内部構造の研究 (レビュー) [5]
古在由秀	月重力場解析の問題点

ることを紹介した。このような地球の火山学の成果は惑星火山学にも十分に取り込まれなければならない。また第三に、海の内部だけでなく、周辺の高地にまで及んだテクトニックな活動の痕跡を探ることも重要であろう。

このように海盆のテクトニクス、火成活動はルナーAやセレーネ計画の重要なターゲットとなると期待される。ただし、以上述べてきたような観測提案が実際に可能であるか否かは今後詳細に検討されなければならない。特に観測機器の精度や空間分解能と照らし合わせて議論されるべきであることは言うまでもない。一方、複数の観測データを総合して月の海の形成・進化を解釈するためには、それぞれの観測データの依存性や要求される性能について検討が必要である。従来は個々の観測目標をもとに観測機器のスペックが独立に決められる傾向が強かったので、今後は観測グループ間での積極的な情報交換が望まれる。

#### 4. 研究会の今後の取り組み

米国では1994年のクレメンタイン計画により月探査が再開されている。1998年1月にはルナプロスペクターが打ち上げられて現在まで月探査を継続中である。さらに、ヨーロッパの宇宙機関もユーロムーン、ルナサットなどの月探査を2000年から2001年をめどに計画之中である。一日一日と進む月科学の進展を睨みながら、日本の月科学・探査計画もアップデートして行かねばならない。この点から、現時点での本研究会の開催は意義のあるものであったと考えられる。しかし、研究会の討論を振り返ってみると、十分に議論がかみ合わないことも往々であった。これは、研究会の意図と各セッションのテーマが講演者に十分に伝わってなかったためである。世話人として強く反省している。また会議の参加者からは、具体的な観測提

案が少ない、あるいは紹介された観測提案と月の起源・進化の解明との関連性が明らかではないという指摘があった。当然ながら本研究会が取り上げたテーマと目指した科学目標は、一回限りの研究会で議論し尽くされる問題ではない。今後も同様の研究会を継続する必要性を強調したい。

#### 謝辞

ご多忙中にもかかわらず、ご足労頂き講演していただいた諸氏に感謝する。編集締め切りの期限が近いづいていたために、ごく短時間で原稿の提出と改訂をすませていただいた。また、本研究会の世話人として企画、構成、実行でご協力いただいた渋谷秀敏、佐々木晶、倉本圭、岡田達明の四氏には特に感謝したい。第四回月の起源研究会は宇宙科学研究所の小研究会旅費、および文部省科学研究費（課題番号 08304033）の補助を受けている。なお、本文中の図2と3については米国地質調査所の開発したソフトウェアISISを利用して、NSSDC提供の画像データを合成した。

#### 参考文献

- [1] 佐々木晶, 1998: 月の二分性. 遊・星・人, 本特集号.
- [2] 倉本圭, 1998: 鉄のコアの観測可能性について. 遊・星・人, 本特集号.
- [3] Spudis, P. D., 1990: The moon, In *The New Solar System*. J. K. Beatty and A. Chaikin (eds.), 41-52. Sky Pub. Co., Cambridge.
- [4] McCauley, J. F., 1977: Orientale and Carolis. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **15**, 220-250.
- [5] 福田洋一, 1998: 人工衛星測定重力ポテンシャルの解析による地球の内部構造の研究(レビュー). 遊・星・人, 本特集号.

- [6] Schaber, G. G., 1973: Lava flows in Mare Imbrium: Geologic evaluation from Apollo orbital photography. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 4th*, 73-92.
- [7] Peeples, W. J., Sill, W. R., May, T. W., Ward, S. H., Phillips, R. J., Jordan R. L., Abbott, E. A., and Killpack, T. J., 1978: Orbital radar evidence for lunar subsurface layering in Maria Serenitatis and Crisium, *J. Geophys. Res.*, **83**, 3459-3468.
- [8] 高田淑子, 1998: 海の溶岩流出と大型クレーター盆地の構造. 遊・星・人, 本特集号.
- [9] 山路敦, 1998: レーダーサウンダー観測による海のテクトニクス研究. 遊・星・人, 本特集号.
- [10] Melosh, H. J., 1989: *Impact Cratering*, 245 pp. Oxford University Press, New York.
- [11] Schultz, P. H., 1976: Floor-fractured craters. *Moon*, **15**, 241-273.
- [12] 竹内希, 1998: ルナーAミッションによる月のコアの検知. 遊・星・人, 本特集号.
- [13] 渋谷秀敏, 網川秀夫, 1998: 月の核と月磁気／古月磁気学. 遊・星・人, 本特集号.
- [14] 花田英夫, 1998: 重力ポテンシャルの観測によるコア密度の制約. 遊・星・人, 本特集号.
- [15] 坪井誠司, 1998: 海半球プロジェクト: 地震計設置の戦略. 遊・星・人, 本特集号.
- [16] 桜庭中, 1998: 月ダイナモの可能性について. 遊・星・人, 本特集号.
- [17] 岡田達明, 1998: SELENE分光観測を総合して解析されるアノーソサイト地殻の形成過程. 遊・星・人, 本特集号.
- [18] 阿部豊, 戸田康史, 小島勝行, 1998: 月重力観測と二分性の起源. 遊・星・人, 本特集号.
- [19] 武田弘, 春山純一, 大嶽久志, 1998: 鉱物スペクトル, X線, ガンマ線データを総合した月原始地殻の再構築. 遊・星・人, 本特集号.