

# 地球化学的月起源論

奥地拓生・高橋栄一

〈東京工業大学理学部地球惑星科学科 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

月は地球には不釣り合いに大きい衛星であり、その起源は昔からの大きな問題である。1970年代には、アポロ計画が月についての多くの情報をもたらした。1980年代には、火星サイズ天体の地球への衝突によって月が形成されたとする、ジャイアント・インパクト仮説が議論を巻き起こした。そして1990年代には、宇宙科学研究所のLunar-A計画により、再び月に探査機が送られようとしている。月の起源はどこまで理解されているのか、地球化学的視点から整理をしてみた。

## 1. はじめに

アポロ計画の成果が一段落した後の1976年から79年にかけて、ヒューストンのLPI(月惑星研究所)では、地球型惑星表層の岩石からその内部を探る目的で“Basaltic Volcanism Study Project”(BVSP)が行なわれた。玄武岩(basalt)は地球型惑星に普遍的に存在し、惑星内部の化学組成・構造を得る手掛かりとして最適の噴出岩である。BVSPでは地球、隕石、月の玄武岩についての研究成果から、各天体について何が理解されたかがまとめられた。そして1984年に、ハワイ・コナにてLPI主催の会議“Origin of the Moon”が開催され、月の起源についての研究成果が各方面から提出され議論された。本稿ではアポロ以後の月起源論について、地球化学的視点からBVSP<sup>1)</sup>、コナ会議<sup>2)</sup>、その後の順に議論を追ってみよう。

## 2. BVSPの成果

月の岩石片は必ず斜長石の結晶を含む。斜長石は光の反射率が高い鉱物である。これに注目した隕石学者J.A.Woodは、月の白く見える部分を全て斜長石だと考えた。これは正しかった。斜長石はマグマより軽い。月地殻はマグマの海から斜長石が大量に浮上して表面を覆ったものであった。

月面の大部分は地殻が露出した高地である。39

億年前まで続いた隕石の重爆撃により、高地はクレーターで埋め尽くされた。39~30億年前にかけて、深いクレーターに月マントルから玄武岩マグマがしみ出してプールを作った。これが月の海である。海の玄武岩を分析すると、Ti量に大きな分散があった(図1)。そのTi量とNa, K量に正の相関、Ti量とNi量には負の相関があった。玄武岩の組成はマントルの組成を反映する。月マントルは著しく不均質であり、その理由は45億年前に月表層が大規模融解していたことにあった。

融けていた月の冷却過程を実験で再現すると、最初に結晶する鉱物はかんらん石(Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>である。かんらん石はNi<sup>2+</sup>を選択的に取り込む鉱物であり、沈積してマグマからNi<sup>2+</sup>を取り去る。冷却が進むに従い輝石・斜長石も結晶する。このときTi<sup>4+</sup>は価数が高くイオン半径が小さいため、これらの鉱物の中に入れず、結晶沈積後のマグマに濃集する。そして固化末期にチタン鉄鉱として結晶する。Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>はイオン半径が大きすぎるために鉱物の中に入れずマグマに濃集する。最終残液が固化すると図2のような層状構造ができる。これが再融解すると、融解深度によってTi, Na, KとNiが逆相関を持つ玄武岩マグマが生成する。

月の海の玄武岩は、元は月マントルのかんらん石や輝石の融解したマグマである。かんらん石や輝石はMg<sup>2+</sup>とFe<sup>2+</sup>を交換可能な成分として含

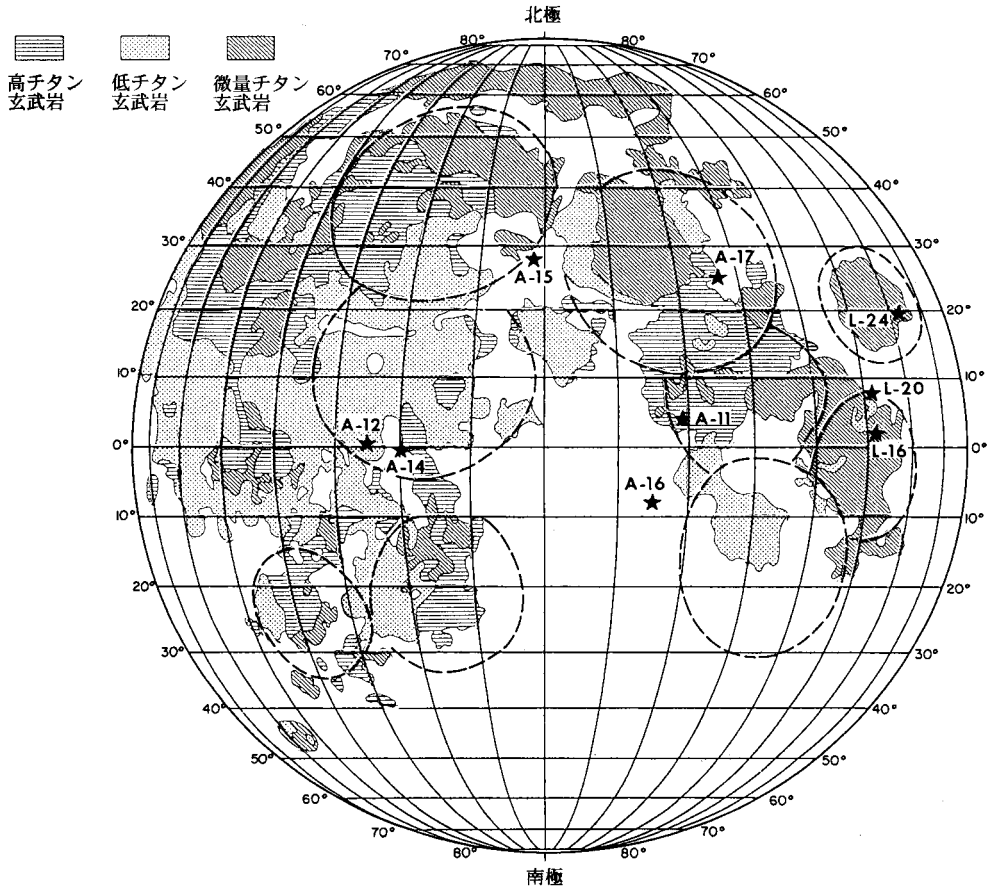


図1 月の海の玄武岩の分布図。紫外線と赤外線反射率により区分される。TiO<sub>2</sub>量は、高チタン玄武岩8~14%、低チタン玄武岩1.5~5%、微量チタン玄武岩~1.5%。BVSP<sup>1)</sup>より。

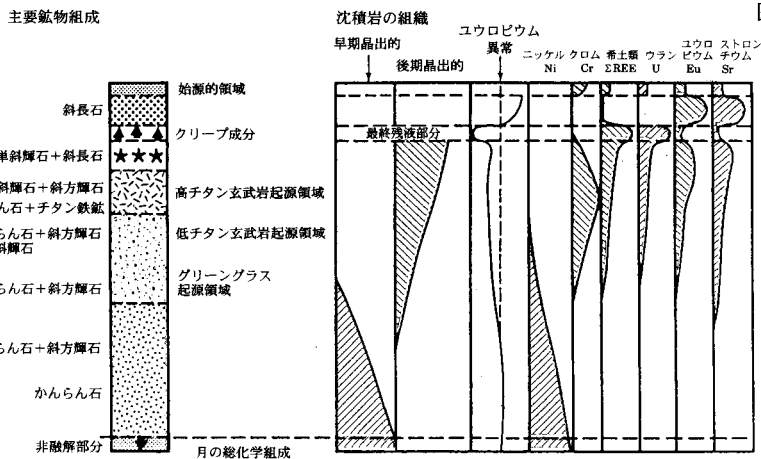


図2 月内部の層状構造。45億年前融けていた月のかんらん石、斜方輝石、単斜輝石、斜長石、チタン鉄鉱の順に鉱物を結晶化した。斜長石は浮上して地殻を形成した。ニッケルはかんらん石に、ユロピウムとストロニウムは斜長石に取り込まれやすい元素である。希土類やウランは残液に濃集してクリープ成分となった。固化した後に各層が再融解して種々の組成の玄武岩を生成した。BVSP<sup>1)</sup>による。

む。そこで  $Mg^{2+}$  と  $Fe^{2+}$  に対する  $Mg^{2+}$  のモル比を使ってマントル鉱物の組成を表す。(Mg #)月の玄武岩の融解実験から、マントルの鉱物の Mg # は決定できる。マントル鉱物の Mg # は月組成を代表するパラメーターである。

月の海の玄武岩の Mg # は約 0.5 である。月ソイル中に発見された玄武岩組成のガラス玉、グリーンガラスの Mg # は 0.6 である。グリーンガラスの起源は融解実験の結果、深度約 400 km と推定された。融解実験で得られた月マントル Mg # は 0.79~0.84 となった。地球の上部マントルの Mg # は 0.90 である。月は地球より Mg # が低い。この大きな相違点が月の海から明らかになった。

月高地の玄武岩からも内部の情報が得られる。隕石の衝撃で地殻が融解して噴出した玄武岩は急冷組織を持ち、破碎鉱物片やイリジウムなど隕石特有の元素を含む。地殻深部の自発的融解による玄武岩は組成が一定で鉱物片を含まない。両者とも K, REE(希土類), P など主要鉱物に入れない元素に富む。これらクリープ (KREEP) 成分は、地殻直下で固化した月マグマオーシャンの最終残液とされ(図 2), 地殻深部起源の玄武岩には特に多い。同位体モデル年代では、海の玄武岩の起源物質はすでに 44.2 億年前までに固化し、その後 43.0 億年前までに最終残液が固化している。

結論を述べよう。1. 斜長石地殻の存在と月内部の著しい不均質は、月の初期の大規模融解を示す。2. 月マントルは地球より Mg # が低い。

### 3. コナ会議報告の論争

70 年代に平衡凝縮理論<sup>3)</sup>を生んだシカゴ大学グループは、原始太陽系星雲がゆっくり冷却し、ガスから凝縮した物質が惑星の集積に合わせて高温凝縮物から低温凝縮物に変化する、不均質集積モデルを考えた。このモデルによれば、月は不均質集積の初期に集積した高温凝縮物、つまり難揮発性元素で構成される。この根拠は、月表層を覆っている斜長石の主成分の Ca, Al が難揮発性であ

ることだった。不均質集積モデルは惑星集積より原始太陽系星雲の冷却が遅い必要があり、太陽に匹敵する星雲質量を必要とする。しかし惑星形成論の研究が進むにつれて軽い星雲質量が現実的とされ、不均質集積モデルは支持されなくなった。

その次に月の化学的特徴から起源を論じたのは、オーストラリア国立大の Ringwood とマックスプランクの Wanke である。彼らは地球と月の親鉄元素の類似性から、地球マントル分離による月形成を主張した。オーストラリア国立大の S.R. Taylor, ニューメキシコ大の Drake, Newsom がこれに反論し論争になった。コナ会議以後も続くこの論争を、元素群ごとに整理してみよう。

**難揮発性元素** Langseth et al. (1976) は難揮発性元素 U の量を月の地殻熱流量から求めた。月が現在内部で発生する熱量と放出する熱量が等しいと仮定して、発生熱量から放射性元素 U の量を計算したのである。結果の 46 ppb は地球上部マントルの 2.3 倍だった。翌年 1 箇所の測定値が高すぎるとして平均熱流量が下方修正されたが、その値でも月の U 量は地球の 1.7 倍である。この差は固体地球マントルの分離説と明らかに矛盾する。

Taylor<sup>2)</sup>は難揮発性元素 Al について考察した。月の重心は形の中心より 2 km ほど地球寄りである。彼はその原因が月の表と裏の地殻の厚さの差にあると考えた。地殻によって重心を移動させるためには地殻とマントルに密度差が必要になる。彼はここから月地殻が 70 km の深さまで軽い斜長石だと考え、その体積から地殻中の Al 量を求めマントルの Al を足して月平均の  $Al_2O_3$  を 6.0 % と推定した。これは地球の 1.6 倍である。彼はこの差を根拠に、地球マントル分離説を否定した。

しかしこのように難揮発性元素が多い天体の起源を不均質集積以外で説明するのは困難である。そのため難揮発性元素濃縮には疑いが持たれる。1985 年に月表層のレゴリス・地殻の低熱伝導率のため、内部に熱がたまる効果と、測定場所の地形効果とで月の地殻熱流量が 2.4 倍になっていると

いう論文<sup>4)</sup>が発表された。結論は月のW量が地球程度というもので、これは説明が容易であることからその後広く認められるようになる<sup>5)</sup>。しかし我々は難揮発性元素の濃集を積極的に支持する。そしてこれを自然に説明し得る仮説を後に示す。

**親鉄元素** 地球上部マントルには、鉄族・白金族などの元素が宇宙存在度よりもかなり少ない。これらは金属に吸収されやすい性質を持つ親鉄元素で、地球質量の32%を占める金属核によりマントルから吸収されたと考えられる。地球マントルの親鉄元素減少パターンは、隕石や火星と異なり高圧で金属分離が起きた場合の特徴を持つ。

月の平均密度は3.344で地球マントルの値とほぼ等しい。月には大きく重い金属核は存在しないと考えられる。しかし月マントルの親鉄元素には地球のように高圧で核分離が起きた特徴がある。これが地球マントル分離の新しい根拠になった。

Wänkeらはまずタングステン(W)に注目した。月岩石のW量とLa量を対数プロットすると直線上に乗る(図3)。地球も同様である。これは岩石中の元素比W/Laが一定であることを意味する。WとLaはともに主要鉱物に入れない元素なので、比を一定に保ちながらマグマに濃集する。Laは希土類の最初の元素で、難揮発性であり、蒸発や金属核形成では失われない。

W/Laは核分離でWだけが減少すると変化す

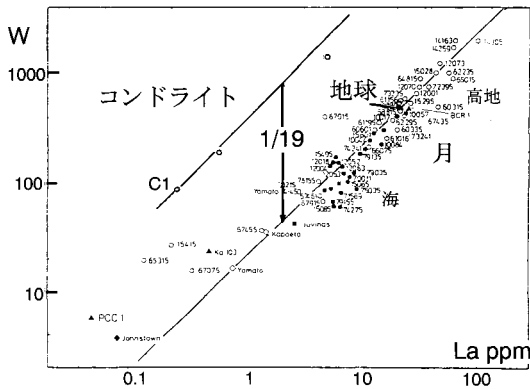


図3 WとLaの相関図。月と地球のW/Laは宇宙存在度の1/19である。Rammensee & Wänke (1977)による。

る。地球と月のW/Laはほぼ等しく、両者とも宇宙存在度の1/19に減っている(図3)。元素分配実験の結果、Wの減少量を説明するために質量の26%の金属核分離が必要であることが示された。地球は問題ないが、月の核は存在したとしても小さすぎてW減少量を説明できない。地球マントルの分離を考えると、月のW/Laがかなり小さいこと、減少度が地球と等しいことが説明できる。

Newsom & Drake (1982)は、大部分がマグマに予め濃集した状態であれば、小さな核でもWを効率よく吸収できることを示した。彼らは月のW減少をこのように説明し、地球マントル分離に反対した。だが月の核形成時の条件はかなり酸化的で、Wが還元され金属に吸収される量は少ない(Hillgren, 1991)。このモデルは疑わしい。

さて、Wänke (1974)は月高地岩石の組成変動が、斜長石と未分化隕石に似た「始源的成分」の混合で説明できることに注目した。彼は始源的成分を、月形成後に降った月材料の生き残りだと考えた。Ringwoodは始源的成分を、斜長石間に捕えられた月マグマオーシャンの固化物と考えた。彼は始源的成分の組成が、地球の中央海嶺玄武岩(MORB)と似ていること、それがMORBとよく似たNi, Co量を持つこと、隕石の汚染を補正するとNi, Coの変化傾向がMORBと一致することを示した。そして始源的成分を生んだ月マントルとMORBを生んだ地球上部マントルは組成が似ていて、Ni, Coを同程度に含むことを示した<sup>6)</sup>。Ni, Coは親鉄性が強く、火星起源と考えられる隕石や、融解して金属核形成を経験した隕石では極端に減少している。しかし地球のマントルにはこれより2桁も多い。Ringwoodはこれを高圧での核形成の結果だと考えた<sup>6)</sup>。地球深部の高圧下では、液体の鉄に酸素が大量に溶けこむことが可能になる。この結果金属核が酸化的になり、Ni, Coの一部が還元されずにマントルに残る可能性がある(図4)。月にNi, Coが多い高圧核形成の特徴があることは、地球マントル分離の証拠となる。

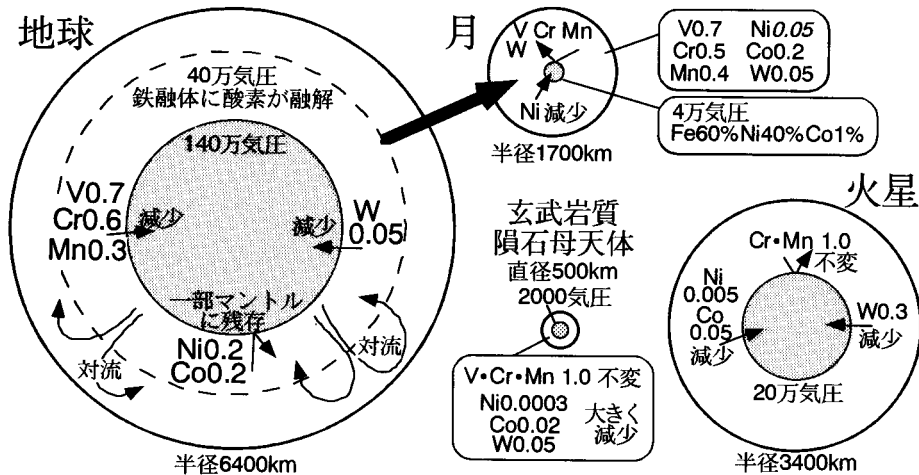


図4 天体サイズと親鉄元素。数字は宇宙存在度比。>40万気圧でV, Cr, Mnが核に, Ni, Coがマントルに分配される。

これを確認するため、グリーンガラスから月マントルのNi, Co量を得る試みがされた。

Ringwood & Seifert<sup>2)</sup>によると、グリーンガラス・マグマはNi 890 ppm Co 156 ppmを含むかんらん石と平衡共存する。地球上部マントルのかんらん石はNi 2900 ppm Co 136 ppm, 隕石の鉄中のかんらん石はNi 29 ppm Co 9 ppmを含む。月マントルは隕石よりかんらん石のNi量がずっと多く、地球のように高压核形成の特徴を示す。彼らは月のかんらん石が、Fe 60% Ni 40% Co 1%の金属核と共存することも示した。月が地球マントルから形成したとすれば、Ni量を1/3に減らすために、半径200 kmの上記組成の核が期待される。より大きな核が存在すると、核に1%含まれるCoが無視できない量になり、地球マントルよりわずかに多い月のCo量がさらに増える。Co量の大きな差は地球マントル分離と矛盾する。

月と地球のマントルは、この他にV, Cr, Mnが宇宙存在度から減少している特徴も持つ。これらの元素は強い還元条件下でないとも金属にならず、隕石や火星マントルには減少がない。Wänkeは地球マントルの高压条件ではV, Cr, Mnが金属核に吸収されると考え、月のV, Cr, Mnの減少は月が地球マントル起源のためだとした(図4)。

地球マントルはかなり酸化的でV, Crは3価になり、Mnのみ2価で存在する。月は金属鉄が存在する還元的条件なので、V, Cr, Mnは2価が安定になる。V<sup>2+</sup>, Cr<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>はFe<sup>2+</sup>とイオン半径が近くマグマ中での挙動が似るため、月の玄武岩ではVO/FeO, CrO/FeO, MnO/FeOが一定になる。ここから月マントルのV, Cr, Mn量を求めると、それぞれ宇宙存在度比で0.7, 0.5, 0.4倍となる。地球マントル物質の分析値は宇宙存在度の0.7, 0.6, 0.3倍である。この類似は地球マントル分離による月形成を示唆する。なお月のMn量が地球の1.3倍になる意味は後に説明する。

**揮発性元素** 低温でガスから凝縮する揮発性元素群は月に極端に少ない。Kは代表的な揮発性元素だが、難揮発性元素Uとの比、K/Uは宇宙存在度で60000、地球で10000、月では2000である。Uを不変とすると地球のK量は宇宙存在度の1/6で、月のK量は宇宙存在度の1/30、地球の1/5となる。月はKを含む揮発性元素全体が地球より少なく、低温で蒸発しやすい元素ほど減少が激しい特徴を持つ。揮発性元素量は月と地球で一致しない。これは何らかの理由で月材料物質が加熱された結果だと考えられる。月の揮発性元素量は全体的に地球より少ないので、地球マントルを月の

材料としても月の揮発性元素量と矛盾はしない。

ところが Kreutzburger et al. (1985) によると、月の Cs/Rb は地球より大きい。Cs は Rb より蒸発しやすく、蒸発で Cs/Rb は必ず減少する。地球マントルが月の材料だとすると、月の Cs/Rb は地球より小さい必要がある。Drake はここから地球マントル分離に反対した。Cs/Rb の逆転は分離説の弱点となったが、後に反論が提出される。

**まとめ** 1. 親鉄元素組成から、月は地球サイズの天体の金属核形成後の物質からできている。  
2. しかし難揮発性元素は地球より月に多いと思われ、固体地球マントルの分離とは矛盾する。

#### 4. ジャイアント・インパクト仮説

コナ会議では、火星サイズ天体の地球への衝突により月が形成されたとする、ジャイアント・インパクト仮説がさかんに議論された。巨大衝突は天体の捕獲（他人説）・地球との同時集積（兄弟説）・地球の分裂（親子説）などの旧説より月形成過程として起こりやすいと考える研究者が、この後急増した。巨大衝突は必然的に物質を加熱するので、月の揮発性元素減少を説明できる利点も注目された。Taylor, Drake, Newsom は巨大衝突を支持し、衝突天体の組成を仮定して月組成を論じた。だが Ringwood はただ一人反対した。

巨大衝突があると地球は大規模に融解すると考えられる。しかし地球の上部マントルは均質で、月のような融解の跡はない。また親鉄元素の類似性から月物質の大部分は地球マントル起源の必要がある。以上が Ringwood の反対の根拠である。彼は加藤工（東北大）らと融解実験を行い、V, Cr が高圧下で酸素の混じった鉄融体に分配されることから、地球マントルの V, Cr は減少する可能性が高いことを示した。また火星サイズ天体では圧力が低くマントルの V, Cr は減少しないことも示した。巨大衝突では月の大部分が火星サイズ天体から作られる。これは月の V, Cr 量と矛盾する。

Ringwood らの実験では地球マントルの Mn 減

少は充分説明できなかつた。地球の核マントル境界圧力で分配実験が可能な装置は今のところ存在しないが、この高圧条件では Mn も核に分配される可能性がある。Drake et al. (1989) は地球と月の V, Cr, Mn は蒸発によって減少したのであり、高圧核形成の結果ではないと主張した。しかし V は難揮発性元素であり、凝縮温度が同程度の元素がまったく減少していないことから蒸発は考えにくい。Mn が蒸発した証拠も存在しない。Cr は蒸発を考える立場もある<sup>5)</sup>。

Ringwood は地球マントルの表層が多数の小天体衝突で融解・蒸発し、大気外で凝縮後集積して月を形成したという<sup>6)</sup>。彼は 1992 年にグリーンガラスの表面に凝縮した揮発性親鉄元素の分析値を調べ、それが地球の玄武岩と似ていることを示した。McDonough らは太古代岩石の Rb/Cs が現在より高いことから、地球マントルの Cs/Rb は月分離時には現在より高かったとして Kreutzburger らに反論した。Jones & Drake (1993) は太古代岩石の Cs は変質で増えていると再反論した。

O'Neil は巨大衝突を月の親鉄元素組成と調和させるべく、親鉄元素分配を熱力学に基いて精密に計算し、月組成と比較した<sup>5)</sup>。彼は地球と月の V, Cr, Mn 減少を巨大衝突に基いて説明するために、極端に還元されて親鉄元素を全く含まない地球マントルを仮定し、それが月の 86% を形成したと考えた。つまり月の親鉄元素は残る 14% を構成する衝突天体からもたらされる。このモデルは月の親鉄元素量をほぼ説明するが、初期条件に無理があるように思われる。彼はまた月の核組成を熱力学計算で求めた。これは重要で、その結果は Ringwood & Seifert<sup>2)</sup> が実験によって決定した組成とほぼ一致した。月の核は地球より酸化的で Fe が還元されにくい条件で形成され、より還元されやすい Ni を多く含むと考えられる。

巨大衝突は月の大部分が地球マントル起源でない限り月親鉄元素組成と矛盾する。数値計算の結果を見る限りは、この矛盾は回避できそうにない。

## 5. 地球マグマオーシャンと月

巨大衝突説は、そのままでは月の親鉄元素組成と難揮発性元素濃集を説明できない。月の難揮発性元素量は、濃集の唯一の可能性であった不均質集積モデルが下火になるとともに下方修正され、現在は地球程度であるという見解が支配的になってしまった。その鍵はU量である。月内部が現在まだ熱く、そのために月地殻熱流量が高いとすると、全熱流量の起源をUの放射壊変による発熱とした場合より月に必要なU量は少なくなる<sup>6)</sup>。だが地球の1/4の大きさの天体の内部に、膨大な熱がたまっていると考えるのは現実的だろうか？。月の火山活動は30億年前に停止している。月は冷えきった天体と考えるのが自然ではないだろうか。この場合、月の熱流量値はそのままU量を表す。それは地球の最低1.5倍であった。

難揮発性のうち宇宙存在度が最大のCa, Alも月に濃集しているように見える。Ca, Alは斜長石の主成分である。月の際立った特徴の一つは、表層地殻がこの斜長石で構成されていることだ。この地殻は他天体にはない。月の難揮発性元素は濃集していると考えるのが自然であろう。我々は問題の濃集機構を以下のように説明する。

難揮発性元素とは、固体・気体が共存する条件で固体に主として分配される元素のことである。しかし難揮発性元素の大部分は、固体・液体が共存する条件で液体に分配される元素でもある。つまり難揮発性元素には、2章で述べたTi, Na, Kのようにマグマに濃集する性質がある。月形成はこれまで固体物質の離合集散によって考えられてきた。しかし45億年前に月の材料を生んだ地球は、融けてマグマオーシャンになっていた可能性がある。地球から飛び出したとすれば、月はマグマオーシャンの組成を持つはずで、マグマに集まる難揮発性元素は月にも濃集することになる。我々はこのように、月を地球のマグマオーシャンの化石とする仮説を提案している<sup>7)</sup> (図5)。

この仮説は月の親鉄元素組成もよく説明する。地球が融解してマグマオーシャンになるとき、表層で最後まで融け残る鉱物はいかんらん石である。Takahashi (1978) はかんらん石・マグマ間のNi<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>の分配を実験によって測定した。その結果、Ni<sup>2+</sup>は前記のように強くかんらん石に濃集し、Mg<sup>2+</sup>はかんらん石に濃集、Co<sup>2+</sup>はほぼ等濃度、Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>はマグマに濃集した。この関係は、マグマオーシャンから沈積したかんらん石を地球マントルとし、マグマオーシャンを月とするとよく再現される。分析に基づく月マントルのNi量は地球の0.3倍、Mg量は0.8倍、Co量は1倍、Fe, Mn量は1.3倍である。

固体地球マントル分離説は月マントルのMg#が地球より低い事実を説明できなかった。この点も融けた地球マントルの分離を考えることにより自然に説明できる。我々の仮説では地球マグマオーシャンはかんらん石と共存していたことが推論される。地球マントル物質の融解実験<sup>8)</sup>では、かん

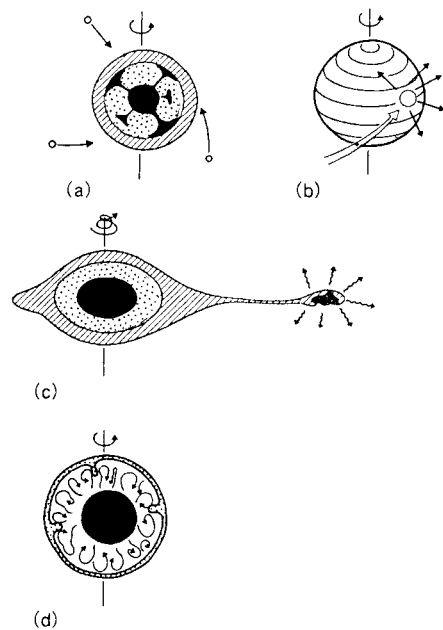


図5 月のマグマオーシャン起源仮説。(a)表層が融解していた地球に、(b)天体が衝突し、(c)地球自転が加速されて一部が分離し、(d)月を形成する。高橋<sup>7)</sup>より。

◎  
月

らん石は15万気圧(450 km)以下の圧力で安定である。月分離時の地球マグマオーシャンは深さ450 km以下の浅いものであったと考えられる。

月のNi量が地球の1/3であることは、月集積後の内部での二次的核形成の結果だと考えられている(図4)。しかし我々の仮説はこれを必要としない。よって月に地震波で測定できる大きさの核が存在しない場合、仮説はかなり有力になる。

## 6. 月の起源

19世紀後半に、月が地球の回転不安定によって分裂したとする仮説が提出されて以来、月の起源はホットな議論の対象になった。この親子説と、月が地球の周囲で地球と同時に集積したとする兄弟説とでまず議論が闘わされた。20世紀になると親子説に、月が飛び出した跡が太平洋になったという説がつけ加わった。地球が分裂するためには回転不安定を起こすほどの高速の自転が必要である。必要な角運動量は、現在の地球・月系の持つ角運動量の3~4倍になる。1960年代になると、この差が説明しにくいために親子説は下火になり、代わって捕獲説が検討されるようになった。

しかし、1970年代までの力学計算の結果、捕獲説も可能性がきわめて低いことが示された。1970年代には、地球のロシュ限界内を通過した天体が潮汐力で破壊され、それが再集積して月を形成したとする仮説も登場した。しかし計算の結果、地球軌道通過時の短い時間に天体を破壊することはとてもできないことが示された。

巨大衝突説はこのような状況の中で華々しく登場した。コナ会議以降はこの仮説が月起源論を席卷した。ほぼ唯一の反対者は親鉄元素から地球マントル分離を主張し続けたRingwoodだった。

我々は彼と同じく巨大衝突には疑問を持ち、地球マントル分離を支持する。そして地球と月の難揮発性元素・Mg#の差を積極的に捉え、ここから地球マグマオーシャンの分裂を提案した。

地球の分裂を考える場合の主な問題点は、必要

な角運動量がかなり大きいことである。しかし巨大衝突のように火星サイズ天体を考えなくても、多数の小天体の衝突で必要な角運動量を獲得できる可能性が最近示されつつある。我々はこのような小天体の衝突によって月が分裂したと考えている<sup>7)</sup>(図5)。液体の分裂過程は固体とは異なる可能性がある。また今後東工大グループでは、力学的研究を加えてこのモデルをさらに詳しく検討していく予定である。衝突、回転不安定など分裂を可能にする力学過程の研究の進展を期待したい。

## 参考文献

- 1) BVSP, 1981, Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets (Pergamon Press, New York), 1286p.
- 2) Hartmann, W. K., Phillips, P., Taylor, G. Origin of the Moon (LPI, Houston), p. 781.
- 3) Grossman, L., Larimer, J., 1974, Rev. Geophys. Space Phys., 12, 71.
- 4) Rasmussen, K. L., Warren, P. H., 1985, Nat, 313, 121.
- 5) O'Neill, H. St. C., 1991, Geochim. Cosmochim. Acta, 55, 1135.
- 6) Ringwood, A. E., 1979, Origin of the Earth and Moon (Springer-Verlag, New York), p. 295.
- 7) 高橋栄一, 1993, 科学, 63, 32.
- 8) Takahashi, E., 1986, J. Geophys. Res., 91, 9367.

## Geochemical Constraints on the Origin of the Moon

Takuo OKUCHI & Eiichi TAKAHASHI

*Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology*

Abstract: Geochemical constraints on the origin of the Moon were reviewed in the light of the possible connection with the Earth. The Moon mantle is akin to the Earth's mantle in the abundance of siderophile elements. This can be understood by the metal/silicate partitioning under very high pressures. Therefore, current scenario on the formation of the Moon as a result of the giant impact of a Mars-size object needs to be reconsidered. Both abundances of the refractory and siderophile elements may be explained if the bulk Moon composition represents a liquid fraction of the Earth's magma ocean.