

特集「月から始まる地球惑星進化学」

無水および含水マグマオーシャンと月と地球の地殻

大谷 栄治¹

月の地殻の組成は無水の環境を反映している。一方、それとは対照的に、地球は水の惑星と呼ばれている。地球の地殻形成には水が重要な働きをしていた。含水マントルの証拠は現在のマントルとともに初期地球においても見出されている。このような無水の月と含水の地球の特徴はジャイアントインパクトによる地球・月系の形成説によって説明することができる。

1 はじめに

これまでの月探査によって月の興味深い化学組成の特徴が明らかになりつつある [1]。これらの研究によると月は、地球とは大きな組成の違いが存在することが明らかになっている。本論文では、これまでに得られた月の地殻組成、そしてそれから推定される月のマントル、月の総化学組成の特徴を整理する。そして、そのような組成的な特徴を説明することができるモデルについて考察する。月の組成的な特徴は地球の起源と無関係ではない。これまで、地球の集積過程の研究は、月の起源とは独立に議論されてきた [2]。これに対して、月の成因モデルとして提案されたジャイアントインパクト説によって、初めて地球の形成過程に月の形成を組み込むことが可能になった [3]。地球の形成過程を議論するためには月の形成も同時に説明するモデルが不可欠であり、地球と月の形成過程の議論は、それぞれの形成過程を独立に論ずるのではなく、地球・月系形成過程のモデル化が必要となっている。

惑星形成過程の理論においては、ジャイアントイン

パクトが集積の末期に必然的なプロセスであると見なされるようになってきている [4]。一方で、月の起源について提案されたジャイアントインパクトの地球への影響は計り知れない。地球の形成過程への、このジャイアントインパクトの影響については、未だに定性的な議論しか行われていない [5]。月を形成したジャイアントインパクトが地球に与えた影響をより詳しく評価することは、地球の形成過程のモデルを確立するために不可欠な課題となっている。

2 月と地球の化学組成の違い

表1と表2に月と地球の地殻、マントル、そして総化学組成の特徴をまとめた [1,6]。月の高地の地殻組成の特徴は以下のようにまとめられる。月の陸地は、灰長石からなる岩石、アノーソサイトを主とし、 SiO_2 の含有量は45wt.%であり塩基性の組成を示す。これに対して地球の大陸地殻は、 SiO_2 が57.3%に及び、中性（安山岩）の組成を示す。さらに、月の高地の地殻は地球に比べて難揮発性の Al_2O_3 、 CaO に富み、揮発性の Na_2O や K_2O に枯渇している。また、月の玄武岩の特徴は、地球に比べて FeO に富み、揮発性の Na_2O と K_2O に枯渇している。

このような組成的な特徴を持つ月の地殻の岩石から推定される月のマントルの化学組成は、地球に比べて Al_2O_3 、 CaO に富み、揮発性の Na_2O 、 K_2O に枯渇するという特徴をもっている。また、地球に比べて高い FeO 含有量を示している。

月のマントルはこのように地球に比較して FeO に富

1. 東北大学大学院理学研究科

んだ特徴を有するのに対して、月の総化学組成は、総鉄量に枯渇する特徴を有している。月の地震波探査によって、月の核サイズを定量的に決定することは今後の問題にのこされているが、月の電磁気学的な観測によると、月の核は非常に小さく、その半径は200 km以下であろうと予想されている。このことは、月の核も鉄を主成分とすると考えると、月の総鉄量が地球に比べてかなり少ないことを意味している。推定されている月の総化学組成を表2に示す。比較のために地球と火星の総化学組成も、この表に示した。この表から明らかなように、月は地球や火星に比べて総鉄量は少ないにもかかわらず、月のマントルには地球のマントルよりも多くの割合で鉄が含まれているという興味深い特徴をもっている。

	Lunar highland crust	Earth's continental crust	Lunar Mare Basalt (Apollo11 low K)	Earth's oceanic crust	Lunar mantle	Earth's mantle
SiO ₂	45.0	57.3	39.76	49.5	44.3	45
TiO ₂	0.56	0.9	10.5	1.5	0.28	0.15
Al ₂ O ₃	24.6	15.9	10.43	16.0	4.1	3.3
FeO	6.6	9.1	19.8	10.5	11.4	8
MnO			0.3			0.13
MgO	6.8	5.3	6.69	7.7	35.6	39.8
NiO						0.25
CaO	15.8	7.4	11.13	11.3	3.36	2.6
Na ₂ O	0.45	3.1	0.4	2.8	0.052	0.34
K ₂ O	0.075	1.1	0.06	0.15	0.003	0.02
Cr ₂ O ₃	0.06		0.25		0.67	0.44
	99.9	100.1	99.32	99.45	99.77	100.03

表1：月と地球の地殻・マントル組成

	Mantle compositions			Bulk composition			
	Moon	Earth	Mars	Moon	Earth	Mars	
SiO ₂	44.4	49.9	44.4	43.4	34.0	34.8	
TiO ₂	0.31	0.16	0.14	0.3	0.1	0.1	
Al ₂ O ₃	6.14	3.64	3.02	6.0	2.5	2.4	
FeO	10.9	8.0	17.9	10.7	5.5	14.0	
MnO	0.15		0.46	0.15	-	0.4	
MgO	32.7	35.1	30.2	32.0	24.0	23.6	
NiO			-	-	-	-	
CaO	4.6	2.89	2.45	4.5	2.0	1.9	
Na ₂ O	0.092	0.34	0.5	0.09	0.2	0.4	
K ₂ O	0.01	0.02	-	0.01	-	-	
P ₂ O ₅			0.16			0.1	
Cr ₂ O ₃	0.61	-	0.76	0.6		0.5	
Total	99.912	100.05	99.99	(Core)			
				Fe,S,O	2.3	30.0	21.7
				Ni	-	1.7	-
				Total	100.1	100.0	99.9

表2：地球、月そして火星のマントル組成と総化学組成

3 ジャイアントインパクトモデルと月の組成

ジャイアントインパクトモデル（例えば、[3]）は、月の起源を説明する最も良いモデルであると考えられている。図1に模式図を示す。このモデルは、月と地球系の大きな慣性モーメントとともに、月の総化学組成の特徴もある程度説明できるものである。

月の総化学組成の大きな特徴の一つは、総鉄量が地球に比べて低い点である。ジャイアントインパクトによって地球周回上にばらまかれた地球とインパクターのケイ酸塩（マントル物質）は、少なくとも一部分は蒸発を経験する。また、ばらまかれたケイ酸塩から月が形成される際、重力エネルギーの開放によって、さ

らに蒸発を経験する。これらの過程で、蒸発しやすい揮発性成分が月および地球周回上から失われるならば、現在の月の特徴、つまり難揮発性に富み、揮発性に枯渇しているということを定性的には説明可能である。すなわち、ジャイアントインパクトモデルでは、月は地球と衝突したインパクターの原始地殻・マントルからなると考えることができる。表2に示したように、月のマントルは地球に比べてFeOに富んでいる特徴がある。このことは、衝突した微惑星の地殻・マントルの化学組成

を反映していると解釈することもできる。火星隕石の研究によると火星は、地球に比べて揮発成分に富み、火星マントルのFeOの含有量は地球に比べて大きいと考えられている。表2に火星のマントルの組成、総化学組成を示す。衝突した火星サイズの分化した原始惑星が、火星に類似したFeOに富む組成の地殻・マントルを持っていたとすると、月のマントルの多いFeOの量を説明することができる。

月のもう一つの大きな特徴は、揮発性成分が枯渇している点である。表1、2によると月はK₂OおよびNa₂Oが地球に比べてはるかに少ない。同様に、月のマグマや地殻の組成はH₂Oにも枯渇した特徴を示して

いる。このような揮発性成分の枯渇の特徴は、ジャイアントインパクトにより揮発性成分が蒸発し、月として再凝縮できなかったと解釈することができる。月の揮発性成分枯渇の特徴は月が高温起源であることを示し、この高温条件はジャイアントインパクトで説明することが可能である。月のマントルが地球に比べて高い難揮発性元素CaO, Al_2O_3 の含有量を示すこともジャイアントインパクトによる高温起源説と調和的である。

このように、ジャイアントインパクトモデルは月の起源を説明するのに良いモデルである反面、地球の初期進化に与える影響を定量的に評価することが困難なモデルでもある[5]。それは、ジャイアントインパクトモデルには、衝突した原始惑星のサイズ、組成、衝突条件など不確定な変数が多いからである。一度形成された核が、ジャイアントインパクトによって影響を受けるのかどうか、親鉄性元素を含む様々な元素のマントル・核での分配が、ジャイアントインパクトによってどのような影響を受けるのかなど、初期地球における地球のマグマオーシャンと引き続き核形成過程へのジャイアントインパクトの影響をより詳しく評価することは、これまでの地球の形成過程のモデルを地球・月系の形成モデルとして統一的に説明するために不可欠な課題である。

4 月と地球の地殻の組成とマグマオーシャン

表1に示すように月の高地の地殻は地球に比べてCaO, Al_2O_3 に富んでおり、 K_2O , Na_2O などの揮発性元素に枯渇している。また、 TiO_2 は様々な程度に濃集している。この特徴は、ジャイアントインパクトによって形成される月の総化学組成、マントル組成を反映している。表1に示すように地球の大陸地殻は SiO_2 成分が57.3%と中性の組成を示すのに対して、月の高地の地殻は灰長石を主要構成鉱物として、 SiO_2 成分が45%程度であり塩基性から超塩基性の地殻組成となっている。

地球と月の陸地組成の違いは、月と地球における水

などの揮発性元素存在度の違いによって説明することができる。すなわち、月の長石の地殻は、カンラン岩のマントルの結晶化によって、マグマオーシャン中を長石が浮き上がって集積したものと考えられている[7]。図2に示すように、超塩基性から塩基性の月のマグマオーシャンが無水すなわち揮発性物質に枯渇している条件では結晶化したカンラン石、輝石がマグマオーシャン中を沈降し、結晶化した長石は浮き上がり月の陸地を形成したと考えられる。もし、マグマオーシャンに水が含まれている場合には長石よりもマグマは軽くなり、長石に富んだ月の高地の地殻は形成されなかったであろう。なお、月にCaOを多く含む灰長石が多いのは、月にはCaOなどの難揮発性元素が多いためである。このように、月の高地の地殻は、無水の条件におけるマグマオーシャン中での長石の結晶化と重力分別による浮き上がりという現象によって説明することができる。図3には、マグマ中の H_2O 成分の部分モル体積を示す[8]。この図によって、マグマ中の水は低圧で大きな体積減少を示すことがわかる。このことは、低圧条件ではマグマ中に水が溶解することによ

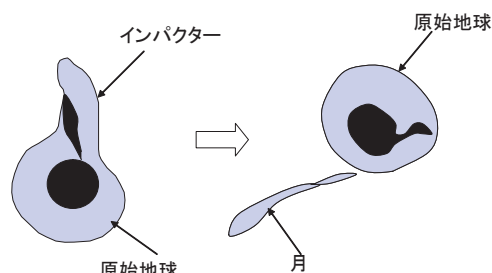


図1: Cameron(1986)などに基づいたジャイアントインパクトによる地球・月系形成の概念図。

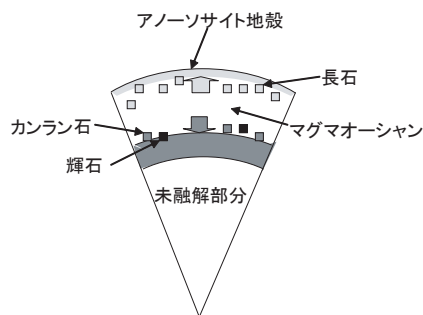


図2: 月のマグマオーシャンモデル

って、マグマは大きな密度変化をすることを示している。しかし、5GPaを越える高压では急激に縮みにくなる。含水のマグマオーシャンにおいては、すべての結晶はマグマよりも重く、灰長石の浮き上がりとカンラン石、輝石の沈降による灰長石の集積にともなう月の高地の地殻は生じない。月の地殻の形成には、月が揮発性物質に枯渇していたという特徴が反映されている。

地球のマグマオーシャンに伴って、金属鉄が分離し、マグマオーシャンの底に堆積する。ここでは金属鉄とマグマオーシャンの間の熱力学的平衡が成り立つと考えられる。マントルのNiとCoの存在度を説明する温度圧力条件は、マグマオーシャンの底の条件を表している。Righter and Drake [9]によると、この条件は25GPa, 2000°C程度である。この条件は無水のカンラン岩のソリダス及びリキダス温度よりも低い。融解の温度を下げるには含水のマグマオーシャンを考える必要がある。含水マグマオーシャンの固化に伴い、水の多くの部分は気体海洋を形成したが、一部はマントル内部に保持されたと考えられる。

地球の大陸地殻は月と異なり、中性(SiO_2 が57.3wt.%)を示している[1]。このような地球の大陸

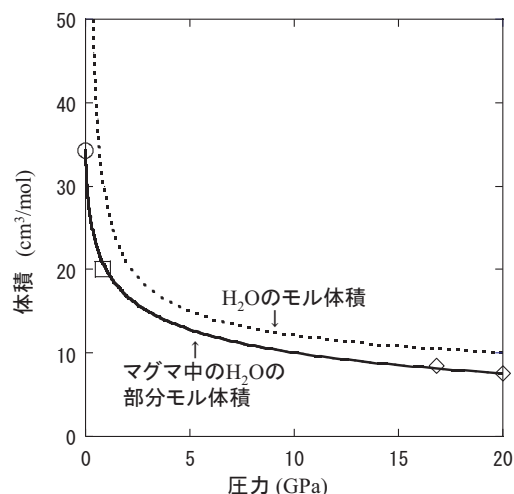


図3：マグマ中の H_2O 成分の部分モル体積の圧力変化[8]。

地殻形成には揮発性成分である水が大きな役割を果たしたと考えられている。含水のカンラン岩の部分溶融によって、高マグネシア安山岩が生じることが知られている。また、玄武岩的な地殻の含水条件下での溶融によって、 SiO_2 に富んだ中性から酸性のマグマが生じることが良く知られている[10]。図4に模式的に示すように、 SiO_2 に富んだ地球の大陸地殻は、カンラン岩質のマントルや玄武岩的な地殻が含水条件下で部分溶融や再溶融したり、 SiO_2 に富んだ堆積岩が含水条件下で再溶融することによって形成されることは良く知られていることである。

5 結論

地球は水の惑星と呼ばれているのに対して、月は乾燥した天体である。月と地球の地殻の組成の違いには、水の有無が大きな影響を与えている。月の斜長岩の地殻は、含水の条件では形成されない。水など揮発性物質を含む地球と無水に近く揮発性物質に枯渇した月の化学組成の特徴は、ジャイアントインパクトモデルで説明できるようである。ジャイアントインパクトは惑星形成過程の末期に必然的に生じた過程であると考えられる。このモデルは月の物理的・化学的な特徴をうまく説明するモデルである。しかしながら、衝突したインパクト（微惑星）の化学組成や衝突条件、この

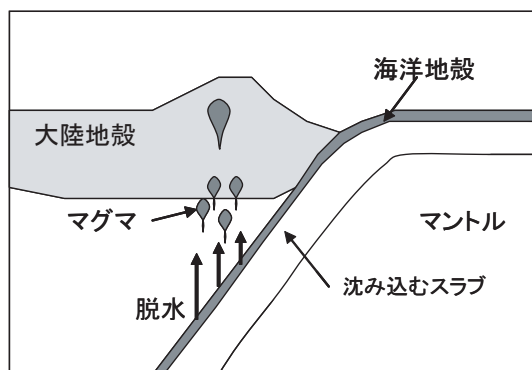


図4： SiO_2 に富む地球の大陸地殻の形成モデル。地球の大陸地殻の形成に水は不可欠である。

衝突現象が地球の初期分化に与えた影響などの評価は今後の課題として残されている。ジャイアントインパクトの地球への影響の詳細な評価なしには、地球・月系の形成過程、特に地球の核形成や層構造の形成などの諸過程の理解は不可能である。

謝辞

この小論を執筆する機会を与えてくださいました宇宙航空開発研究機構の岡田達明博士、大竹真紀子博士、また、この論文に関して適切な改善の指摘とコメントをくださいました東京工業大学の玄田英典博士に感謝いたします。

参考文献

- [1] Tayler, S.R., 1992, Solar system evolution, A new Perspective, Cambridge University Press, New York, 307p.
- [2] Abe, Y. and Matsui, T., 1985, J. Geophys. Res., 91, E291.
- [3] Cameron A.G.W., 1986, The impact theory for origin of the Moon. In Origin of the Moon, edited by W.K. Hartmann, R.. Phillips, and G.J. Taylor, pp609-616, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- [4] Canup, R.N. and Agnor, C.B., 2000, Accretion of the terrestrial planets and the Earth-Moon system. In Origin of the Earth and Moon, edited by R.N. Canup and K. Lighter, pp113-129, Univ. Arizona Press, Tuscon.
- [5] Rubie, D.C., et al., 2003, Earth and Planetary Science Letters 205, 239.
- [6] Basaltic Volcanism Study Project, 1981, Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets. Pergamon Press, Inc., New Yorl, 1286 pp.
- [7] Warren, P., 1985, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 13, 201.
- [8] Sakamaki, T. et al. 2005, Nature in press, ; 大谷 栄治他, 2003, 高温高压下における含水玄武岩マグマの密度, 特定領域「火山爆発」成果報告書 (2003)
- [9] Righter, K. and Drake, M.J., 1999, Earth Planet. Sci. Lett. 171 383.
- [10] Kushiro, I., 1974, Carnegie Inst. Washington Yearb. 73, 244.
- [11] Schmidt, M.W. and Poli, S., 1998, Earth Planet. Sci. Lett., 163, 361.