

特集「月から始まる地球惑星進化学」

月と小惑星ベスタの地殻の初期進化

山口 亮¹, 武田 弘²

1 はじめに

月探査の始まる前から、分化した隕石であるホワルダイトは月高地の角レキ岩に、ユークライトは月の海の溶岩に対比されてきたように、これらの隕石は月試料に類似した特徴を持つことが知られていた。この類似性は、二つの天体が太陽系初期の大規模熔融分化後にできた斜長石や輝石を含む地殻をもつこと、また、その地殻が形成後に熱変成作用や衝突による角礫化など類似のプロセスを経験したという二つの点から生じている。

ホワルダイト(図1)は、HED(ホワルダイト、ユークライト、ダイオジェナイト)と総称される隕石グループの一つである。HED隕石は、分化した隕石の中では、最大のグループをなし、これまで400個近く回収されている[1]。望遠鏡による分光学的研究や天体力学的考察から、HED隕石は、3番目に大きい小惑星4ベスタ(Vesta)の地殻から来た可能性が高いことがわかった[例えば2]。隕石として豊富に得られる試料の鉱物学的研究とベスタ表面の直接観測から、この分化した小惑星ベスタの地殻の発達史を詳しく知ることができるだろう。HED隕石以外にも、熔融分化を経験した小惑星地殻の破片は、隕石として回収されている。例えば、アングライトやメソシセライト中の玄武岩の破片などである[3]。最近、鉄隕石の一種にコンドライトの始原物質がそのまま部分熔融してできたような安山岩の岩石片が発見された[4]。ま

た、酸素同位体組成が異なるため別の天体由来だと考えられるが、岩石学的にユークライトに極めて類似した隕石も発見された[5]。しかし、これらの隕石試料は、HED隕石に比べると、回収された試料も少なく、母天体の全体像をみるには不完全といわざるをえない。

地球の月は、地球外の天体では、唯一人間が訪れ、地質調査が行われている天体である。1969年からはじまったアポロやルナによる月探査により、これまで460Kg近くの岩石が地球に持ち帰られ、様々な手法で研究が行われた。さらに、リモートセンシングのデータと岩石試料の比較から、月地殻の形成過程がさらに詳しくわかりつつある[例えば、6,7]。また、月の岩石は隕石としても得られ、1982年の南極大陸での月隕石の発見以来、現在までに南極や砂漠から30個以上回収されている[1]。探査機により回収された岩石は、月の表側の赤道付近のものに限られるのに対して、月隕石は、化学組成の多様性から衝突によって月の表面からランダムに放出されたと考えられる[7]。これらの月隕石の中には、探査機により直接サンプリングされていない裏側起源のものも存在するといわれている。ここ数年の月隕石の研究によって、アポロの試料からはわからなかった月の地殻形成史についてさらに新しい事実が明らかになろうとしている。

小惑星ベスタと地球の月は、大規模熔融分化を経験し、地殻を持つので、地球型惑星であるともいえる。現在の太陽系に生き残っている地球型惑星の中では、ベスタ(直径520km)は最も小さく、地球の月(直径3476km)はその次に大きい。この二つの小さな固体惑星はいまだに原始地殻を保持している。この原始地

1. 国立極地研究所

2 千葉工業大学・附属総合研究所

殻は、地球などの進化した惑星に比べ簡単なプロセスを経て形成されたと考えられる。これらの天体の地殻の岩石を物質科学的に比較することにより、地球を含めた固体惑星の初期進化過程の全容が明らかになることが期待される。本論文では、とくに、月や小惑星ベスタの地殻が形成後、どのような物質進化をとげたかについて着目した。

2 月とベスタの地殻形成

小惑星ベスタと月は、太陽系誕生直後に母天体の大規模熔融を経験し、地殻が形成されたと考えられる。しかし、この二つの天体の初期発達過程は、いくつかの点で大きく異なる。

ベスタは、熔融分化直後、一番外側にユークライトの地殻を持ち、その内側にダイオジェナイトの層、さらに内側に、かんらん石のマントル（この部分は、単体の隕石としては見つかっていない）があったと考えられる。現在は、衝突による破碎と混合のため、ホルダイトやポリミクトユークライトがベスタ表面を覆っている可能性が高い。ユークライトの成因に関して、主に二つの説がある。一つは、原岩が部分熔融し、発生したマグマが地上に噴出したもの、もう一つは、マグマ大洋の固結に際し、大規模な結晶分化後の生じた残液が表層付近で固まったものだとされる [例えば8]。

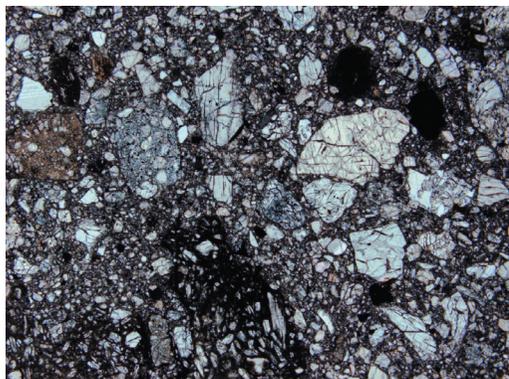


図1：ホルダイト（Yamato-7308）の薄片写真。ホルダイトは、ユークライトとダイオジェナイトからなるポリミクト角レキ岩である。輝石、斜長石、衝撃熔融物などが観察される。横幅：5.1mm。

ユークライト地殻の厚さは、10-30 km程度であると推定される[9,10]。月の地殻は、ほとんどが角礫化した斜長岩からなる（図2）。この斜長岩地殻は、表側で厚さ63km、裏側で100km以上あり、太陽系最大の斜長岩体といえる[6]。この斜長岩の地殻は、大規模なマグマ大洋の上部に斜長石が集積し固まって形成されたと考えられる[6]。

ベスタの地殻を形成した火成活動は、主に短期寿命核種をつかった研究から極めて短期間（CAI形成後から数百万年から千数百万年以内）に起こり終息したとされる[例えば11]。他方、月の場合の地殻形成（マグマ大洋の固化）は、もっと長く、44.1～45.1億年前の間におこったとされる [12]。火成活動は、その後も続き、KREEP火山活動やMgに富む岩石(Mg-suite)の貫入、そして、海の火山活動が20億年前まで起こったとされる。月の火成活動の期間は、ベスタのそれに比べてはるかに長期間にわたっていた。これは、天体の大きさの違いによる冷却速度の違いを反映しているのだろう。

3 地殻形成後の母天体スケールの熱変成作用

ユークライトは、大きく玄武岩的なものとガブロ的なものにわけられる。個数としては、前者が圧倒的に

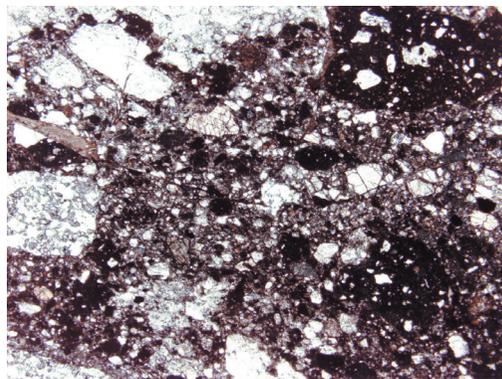


図2：月高地起源の角レキ岩（Yamato-86032）の薄片写真。主に斜長岩や衝撃熔融物の破片からなる。左中央部に、グラニューライト角レキ岩の破片が観察される。横幅：5.1mm。

多い。玄武岩質ユークライトのほとんどすべては、急冷（～0.1-100°C/hour）してできた細粒な玄武岩組織をもつにもかかわらず、ピジョン輝石のMg/Fe比は均質化され、様々な変成組織をもっている[13,14]。この輝石の変成組織は、地球の層状貫入岩体の深成岩のものに類似しているものまでである。これは、ユークライトが、最初に表層近くで急冷され固化したにもかかわらず、長期間の熱変成作用を受けたためだと考えられる。変成温度は800～1000°Cであり、期間は、数千年から数十万年と推定されている[13]。最近、変成温度がソリダス温度（～1050-1060°C）を超えたため、ユークライトそのものが部分溶融をしているものも見つけた[15]。

ユークライトの熱史は、地殻の形成過程をそのまま反映していると考えられる[14]。もし、地殻が短期間（数百万年程度）に形成されると、ユークライトは、新たに噴出した溶岩によって埋没され熱変成作用を受けると考えられる。ユークライトの溶岩は、母岩より密度が低いいため、地表に噴出し急冷固化したと考えられる。さらに、冷え固まった溶岩を貫いて、古い溶岩の上に新しい溶岩が噴出すると新しい溶岩の層ができる。この溶岩の噴出が繰り返して起こると、最初に噴出した溶岩はしだいに埋没し、火成活動の最後には、地殻の底部に位置することになる。もし、ユークライトの地殻の厚さが厚く、深く埋没されると内部からの熱源により十分に加熱されると考えられる。

このモデルは、母天体内部が部分溶融を起こして、

マグマが地表に噴出したようなケースである。しかし、マグマ大洋モデル[8]でも同様の考察ができる。もし、大規模結晶分化後にできた残液が、地上に噴出して地殻を形成したすると、上記と同様のメカニズムで熱変成作用が起こると考えられる。他の説では、マグマ大洋が固化するとき、表面に急冷皮殻をつくり、それが積み重なってできたのがユークライトの地殻であるとされる[8]。この場合も、マグマ大洋そのものの熱でユークライトは十分に加熱されるだろう。いずれのモデルでも、ユークライトの厚い地殻が母天体の表層に形成され、地殻そのものの冷却中に熱変成作用が起こったと考えられる。この間にも衝突は起こり、複雑な再結晶角レキ岩（例えば、グラニューライト）が形成された[16]。しかし、ユークライトの再結晶岩には、隕石由来の成分（親鉄元素など）が認められず、月のグラニューライト角レキ岩と呼ばれる変成岩に比べ、隕石衝突の影響は低いと考えられる（下記参照）。

月の場合、形成初期に、表面に大規模なマグマ大洋が形成され、表面に斜長石が集積してできた斜長岩の地殻が形成されたとされる。結晶化中から固相にかけて、きわめてゆっくり冷却したと考えられる。HED隕石のように、より小さい天体においても、初期の地殻の冷却中に熱変成作用が起こったとすると、月のようにもっと大きく厚い地殻をもつ天体では、地殻の冷却速度が遅く、もっと大規模な熱変成作用がおこったはずである。しかし、後で述べるように、月地殻の岩石は、激しい衝突により破砕されているため、熱変

	小惑星ベスタ (HED隕石母天体)	地球の月
直径	520 km	3476 km
地殻の厚さ	10-30 km (?)	60-100 km
地殻の岩石	ユークライト (ピジョン輝石・斜長石からなる)	斜長岩 (主に斜長石からなる)
地殻の形成年代	～45.6億年前	45.6～44億年前? (マグマ大洋の固化*1)
地殻の形成過程	マグマ大洋 連続的火山活動	マグマ大洋

*1 海の火山活動はもっと最近（20億年前まで）続いていた。

表1：ベスタと月の比較

成作用の痕跡は見つけにくいと考えられる。もしくは、あまりにも強度の再結晶作用のため、構成鉱物が粗粒化し、変成岩と火成岩の区別が出来なくなった可能性も否定できない。ユークライトは、最初に急冷された玄武岩であるため、熱変成作用を受けると、鉱物の組織や化学組成が明瞭に変化するのに対し、斜長岩などの深成岩では、結晶化時にも高温で徐冷されたため、その後の熱の影響は残りにくいかもしれない。

4 隕石の衝突による地殻の破碎

HED隕石の研究やベスタの表面の直接観測から、ベスタも衝突クレータリングの痕跡があることがわかってきた。Gaffey[17]は、赤外吸収スペクトルのデータから、ベスタ表面の「地質図」を作成した。これによると、ベスタは、ユークライト的な表層に、ダイオジェナイト的やかんらん石を含む部分が認められ、これらは衝突クレーターに相当するとされる。最近のハッブル宇宙望遠鏡の観測結果から、ベスタ表面に、さらに、直径460kmの巨大クレーターがあることがわかった[18]。

このようなベスタ表面にある衝突クレーターの存在は、HED隕石に記録されている岩石学的事実と調和的である。HED隕石のほとんどすべては、隕石の衝突によりつくられた、様々なタイプの角レキ岩である。様々な深度で形成された異なったタイプ岩石がまじりあってきた角レキ岩であることが多く、これはポリミクト角レキ岩と呼ばれる。ポリミクト角レキ岩は、含まれる岩石片の体積比により、数種類に分類される[19]。最も多いタイプは、ホルダイトとポリミクトユークライトである。これらの角レキ岩は、二つの火成岩であるユークライトとダイオジェナイトの岩石片が様々な割合で機械的に交じりあったものである。ポリミクトユークライトは、おもにユークライト破片(90%以上)からなる。また、ほとんどがダイオジェナイトからなるポリミクトダイオジェナイトもあるが、個数は少ない。ホルダイトは、単一の火成岩成分(つ

まり、ユークライトとダイオジェナイト)が90%以下のものをいう。数パーセント以下の、衝撃熔融物や母天体外起源の隕石を含むことが多い。

HED隕石の角レキ岩は、月の角レキ岩と同様、比較的大きな衝突クレーターにより形成される角レキ岩にも対応される[20,21]。ホルダイトやポリミクトユークライトなどHED角レキ岩のほとんどは、フラグメンタル(fragmental)角レキ岩に分類される。ホルダイトの中には、いくつかの(例えば、Kapoeta隕石)レゴリス角レキ岩が認められる。レゴリス角レキ岩とは、母天体表層のレゴリスが衝撃固化してできた岩石で、微少衝突によりできた衝撃熔融物があったり太陽風成分が含まれることがある。また、炭素質コンドライトの破片など、母天体外起源の物質も含まれていることが多い。Bununu隕石は、スーバイトと呼ばれるガラスと岩石片が混じり合ったような角レキ岩である。変成作用を受けたユークライトやダイオジェナイトは、モノミクト角レキ岩であるものも多く、これは、比較的大きなクレーターの底部や小規模な衝突でできるとされる。また、数は少ないが衝突のためほぼ全熔融した衝突熔融(im-pact melt)インパクトメルト角レキ岩も数個みつまっている[21,22]。

ベスタ表面を破碎しHEDの角レキ岩をつくりだした隕石衝突は、いつごろからどれくらいの期間起こったのだろうか。主に角レキ岩や衝撃熔融物の年代を知ることで、推定することが出来る。Bogardらの一連の研究[23,24]によると、Ar-Ar年代とRb-Sr年代は、45-30億年にばらつき、34-41億年前にピークを示す。しかし、新しい年代は、さらに古い年代をかき消している可能性が高く、もっと前から隕石衝突期ははじまったのかもしれない。数個のユークライトの熱史と年代系の詳細な比較から、ある程度大きな衝突現象が起こった可能性があることがわかった。鉱物学的研究から、数個のユークライト(EET90020, Ibitira隕石など)は、熱変成作用の後、高温(900-1000°C)から急冷されたことがわかった[15,16など]。この中の一つのAr-Ar年代は、約45.0億年の年代を示し、大規模

衝突により地下深部から掘り起こされた年代だとされた[15]. また、地下深部で結晶化したと考えられる集積岩ユークライト (Moore County隕石) やダイオジェナイトは、高温から急冷されたという鉱物学的な証拠を残すものがある[9,25]. このような事実は、母天体がまだ冷え切っていない時期、つまり45.6 ~ 45.0億年前に巨大衝突が起こり、地下深部(数~数十kmの深さ)の岩石が掘り起こされたことを示す。

月の高地が衝突クレーターで覆われているのをみればわかるように、月の地殻は度重なる隕石衝突のため破碎されている。これは、これまで得られている月の岩石のほとんどすべてが熔融や角礫化している事実と一致する。アポロ探査機により回収された多くの月高地の岩石は、大規模な衝突のために、多くの年代系が39億年前にリセットされている。これは、ベスタに隕石が降り注いだ時期とほぼ同じである[23]. この月の隕石爆撃期は、「lunar cataclysm」と呼ばれ、表側の大型クレーター (impact basin) はこのときに形成されたと考えられる[26など]. 最近、月隕石中の衝突熔融物の破片の年代からも、この時期の存在が確認された [27].

月の高地起源の岩石に、グラニュライト角レキ岩とよばれる再結晶した衝突角レキ岩がある。この変成岩の形成年代は古く、雨の海などをつくりだした大規模衝突以前であり、かつ、その化学組成が、KREEP成分に乏しいことから、月の高地を代表する岩石ではないかといわれている[28]. 親鉄元素など隕石由来の成分が混入していることから、激しい衝突破碎を受けたことが示唆される。その前駆岩石は、月高地起源の岩石からなるポリミクト角レキ岩であるといわれている。再結晶後の冷却速度などは、大規模なクレーター形成にともなうイジェクタブランケットの中での冷却速度に調和的である [29]. 従って、大規模なクレーター形成にともなう角礫化と熱変成作用のためにできたと思われる。月のグラニュライト角レキ岩は、原始地殻由来のポリミクト角レキ岩を起源とし、かつ、月高地を代表する岩石だという点では、HED隕石母天体の岩石

に対応するのはホルワライトだろう。しかし、ホルワライトは、月のグラニュライト角レキ岩のように再結晶しておらず、強い熱変成作用を受けていない。これは、HED母天体上での衝突イベントに比べ、月での衝突の規模がいかに大きいものであるかということを示唆する。

前にも述べたように、月高地の岩石は、39億年前の雨の海などの大規模クレーター (basin)の形成による大事件で、年代も物質も攪乱されているので、それ以前の衝突による衝撃変成作用についてはあまり議論できなかった[26]. しかし、最近見つかった月高地由来の角レキ岩隕石 (Dhofar 489) には、スピネルトクロイトなど月地殻深部を起源とする岩石片が含まれることがわかった[30]. その岩石のAr-Ar年代は42-43億年と非常に古い。おそらく、この年代は角レキ岩形成の年代である可能性が高く、スピネルトクロイトを掘り起こした年代は、42-43億年以前であると考えられる。リモートセンシングにより雨の海以前にもサウスポールエイトケン盆地などの大規模クレーターをつくった巨大衝突現象があったとされ、これと関係しているのかもしれない。

謝辞

本稿執筆に際し、三河内岳博士には貴重な査読意見を、荒井朋子博士には有益なコメントをいただきました。ここに、深く感謝します。

参考文献

- [1] Grady, M.M., 2000, Catalogue of Meteorites, 5th edition.
- [2] Binzel, R.P. and Xu, S., 1993, Science 260, 186.
- [3] Mittlefehldt, D.W. et al., 1998, Planetary Materials, ed. by Papike, J.J., Chapter 4.
- [4] Takeda, H., et al., 2003, Geochim. Cosmochim. Acta, 67, 2269.

- [5] Yamaguchi, A. et al., 2002, *Science* 296, 334.
- [6] *Lunar Sourcebook*, 1991, ed. by Heiken, G. et al.
- [7] Korotev, R.L., 2003, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, 4895.
- [8] Takeda, H., 1997, *Meteor. Planet. Sci.*, 32, 841.
- [9] Delaney, J.S., 1995, *Lunar Planet. Sci.*, 26, 329.
- [10] Miyamoto, M. and Takeda, H., 1994, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 122, 343.
- [11] Nyquist, L.E. et al., 2003, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 214, 11.
- [12] Snyder, G.A. et al., 2000, *Origin of the Earth and Moon*, ed. by Canup, R.M. and Righter, K., 361.
- [13] Miyamoto, M., et al., *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 15, C629.
- [14] Yamaguchi, A. et al., 1997, *Icarus*, 124, 97.
- [15] Yamaguchi, A. et al. 2001, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65, 3577.
- [16] Yamaguchi, A. et al. 1997, *Antarct. Meteorite Res.*, 10, 431.
- [17] Gaffey, M.J., 1997, *Icarus*, 127, 130.
- [18] Thomas, P.C. et al., 1997, *Science*, 277, 1492.
- [19] Delaney, J.S. et al., 1983, *Meteoritics*, 18, 103.
- [20] Stoffler, D., 1980, *LPI Tech. Rept.* 81.
- [21] Metzler, K. et al., 1995, *Planet. Space Sci.*, 43, 499.
- [22] Barrat, J.-A., 2003, *Geochim. Cosmochim. Acta* 67, 3959.
- [23] Bogard, D.D. and Garrison, D.H., 1995, *Meteoritics*, 30, 244.
- [24] Bogard, D.D. and Garrison, D.H., 2003, *Meteor. Planet. Sci.*, 38, 669.
- [25] Mori, H. and Takeda, H. 1981, *Earth Planet. Lett.*, 53, 266.
- [26] Tera, F., 1974, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 22, 1.
- [27] Cohen, B.A. et al., 2000, *Science*, 290, 1754.
- [28] Lindstrom, M.M. and Lindstrom, D.J., 1986, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 16, *J. Geophys. Res.*, 91, D263.
- [29] Takeda, H., 1992, *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 23, 1406.
- [30] Takeda, H., et al., 2005, in preparation.