

特集「月の火成活動からみた熱進化」

かぐやスペクトルプロファイラが発見した新しいタイプの月の火山砕屑物

山本 聡¹, 中村 良介², 松永 恒雄¹, 小川 佳子⁴, 石原 吉明²,
 諸田 智克⁴, 平田 成³, 大竹 真紀子⁵, 廣井 孝弘⁶, 横田 康弘¹,
 春山 純一⁵

2013年9月18日受領, 2013年11月1日受理.

(要旨) かぐや搭載のスペクトルプロファイラを使った観測により, 熱の入江にある火山砕屑物で, 可視域の吸収および2 μm 付近に強い吸収を示す珍しい反射スペクトルを見つけた. スペクトル解析の結果, これらのスペクトルは, 鉄およびクロムに富むスピネルを含む火山砕屑物によるものであると考えられる. 月面上の他の火山砕屑物領域ではこのような物は見つからないことから, 熱の入江は月の中でも特殊な火成活動があった場所であると考えられる.

1. はじめに

月周回衛星「かぐや」など各国の最近の月探査衛星による連続反射スペクトル観測により, 月の主要鉱物(輝石・斜長石・カンラン石等)やマグネシウムが支配的なスピネル^{*1}(以下ではMgスピネルと呼ぶ)に富む場所の全球分布が明らかにされつつある[e.g. 1-6]. これらの鉱物は, 波長0.8 μm ~2.3 μm において特徴的な吸収(以下では, 1 μm 吸収および2 μm 吸収と呼ぶ)を示す. 一方, 1 μm および2 μm 吸収以外に可視域の0.6-0.7 μm に特徴的な吸収(以下では可視吸収と呼ぶ)を示す鉱物の存在が知られている. 例えば, 層状珪酸塩[7], 火山ガラスの一つであるブラックビーズ[8], チタン鉄鉱[8,9], 衝突溶融物[10], 単斜輝石[11], スピネル族の一部[12]等である. しかしこれまで, 月面上において明らかな可視吸収を持つスペクトルが観測されたという報告はない. 一例, ガリレオ探査機によるマルチバンド観測(連続波長ではなく, 離散的な特

定波長帯での反射スペクトル観測)によって, 可視吸収に似たものが見つかったという報告があるが, その真偽についてはよく分かっていない[7]. というのは, 可視吸収は1 μm 吸収や2 μm 吸収と比べて吸収深さが浅いため, マルチバンド観測では信頼のおける判断は難しいからである.

そこで, 我々はかぐや搭載のスペクトルプロファイラ(以下SP)[1]の連続反射スペクトルデータを使って, 月面上における可視吸収の探索を行った[13]. その結果, 顕著な可視吸収を示す特定領域を発見することができたが, その地質のおよびスペクトルの特徴を詳しく調べていくと, 月の火成活動に関わる興味深い事実につながる事が分かった. そこでここでは, SPによる可視吸収の発見についての紹介と, そこから推定される月の火成活動について議論したいと思う.

1. 国立環境研究所
 2. 産業技術総合研究所
 3. 会津大学
 4. 名古屋大学
 5. JAXA/ISAS
 6. ブラウン大学
 yamachan@gfd-dennou.org

*1.スピネル鉱物は, 酸素の立方的パッキングの4面体席(A)と8面体席(B)を AB_2O_4 の比で持つ鉱物である. 月面に産出するスピネル鉱物は, A席をFeやMgがほとんどを占め, B席をCr, Al, Tiが濃集する傾向にあり, FeCr_2O_4 (クロム鉄鉱), Fe_2TiO_4 (ウロボスピネル), CrとMgを少し含む FeAl_2O_4 (クロム・プレオネイスト)などの固溶体となっている.

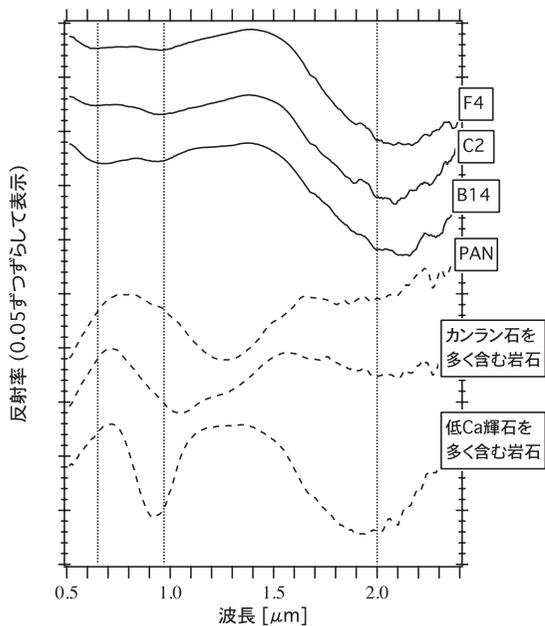


図1：SPが見つけた可視吸収を持つスペクトルの例(実線；F4, C2, B14は図3で示されている検知地点)。ここでは反射スペクトルから連続光成分(コンティニューム)を引いた後のスペクトルを示している。比較のため、SPによって月の他の場所で発見された、極めて純度の高い斜長石(Purest AnorthositeまたはPAN)、カンラン石を多く含む岩石、低Ca輝石を多く含む岩石の反射スペクトルも示した(破線)。縦点線は0.65 μm 、0.97 μm および、2.0 μm に相当。

2. 月面上で可視吸収を示す特定領域の発見

2.1 SPデータによる可視吸収サーベイ

SPは月全球にわたって連続反射スペクトル観測を行った。その為SPの全データ(約7000万スペクトル)を解析することで、特定鉱物の月表面分布を明らかにすることができる。実際に、SP全データを使った特定スペクトルサーベイ研究により、極めて純度の高い斜長岩(Purest AnorthositeまたはPAN)が支配的な領域[1,3,5]、低Ca輝石を多く含む岩石が支配的な領域[2]、およびカンラン石を多く含む岩石が支配的な領域[4]の月全球分布が明らかにされている。

今回は、これと同じく全SPデータから可視吸収を持つスペクトルだけを探し出すということを行った。このスペクトルサーベイでは、全SPデータの中で波長0.5-0.8 μm の反射スペクトルが下に凸になっているデータだけを選び出している。図1にSPで発見された可視吸収の例を示す。0.8 μm より短波長側に注目すると、0.65 μm を中心に下に凸になっている浅い吸収を見ることが出来る。一方、PANや、低Ca輝石を多く含む岩石やカンラン石を多く含む岩石の場合、この波長域では鉱物種によらず上に凸になっており、可視

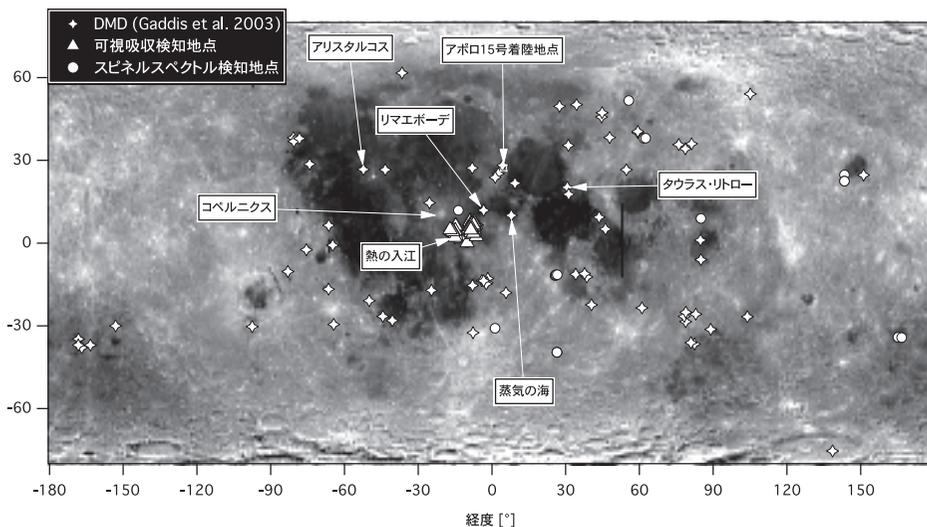
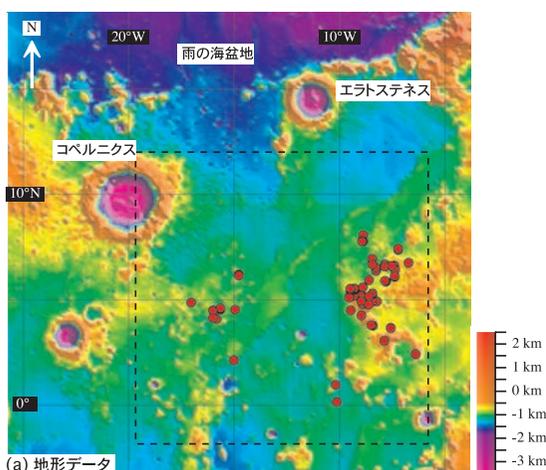
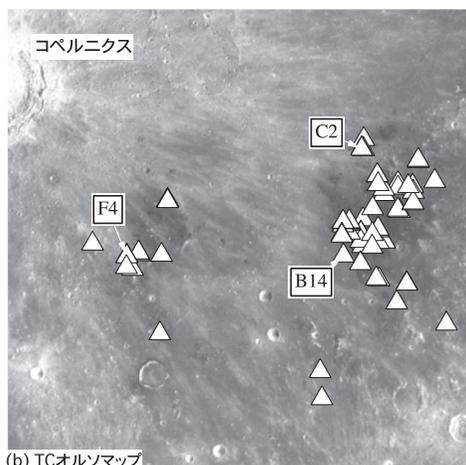


図2：可視吸収が見つかった70箇所(△点)の全球分布。背景の図はかぐやSPの750nmで作成されたアルベドマップ。また顕著な2 μm 吸収を示すスピネルスペクトルが見つかった場所を○点で示す。比較のために月面上の代表的なDMD(75箇所)[8]の分布も示した(◇印)。また本文中で引用されるDMD及びアポロ15号の着陸地点について場所と名前も記した。



(a) 地形データ



(b) TCオルソマップ

図3：(a)可視吸収が見つかった70箇所(○点)。背景の図はかぐや地形データ[15](白黒でわかりにくい場合は、電子版や[13]のカラー図を参照していただきたい)。(b) (a)図の点線で囲まれた領域について拡大した分布図。背景はTCによるアルベドモザイクマップ[14]。黒っぽい部分(熱の入江の火山砕屑物領域)にそって検知地点(△点)が分布している。

吸収とは明らかに特徴が異なる。つまり1 μm や2 μm の特徴に関わらずこの可視域にのみ注目することで、可視吸収を持つスペクトルだけを選別することが可能となる。もちろん、このような解析が出来るのはSPの持つ高い波長分解能と高いS/Nによるものであることは言うまでもない(従来のマルチバンド観測では不可能である)。

2.2 可視吸収を示す場所の全球分布と顕著な2 μm 吸収

上記のアルゴリズムを7000万スペクトルに対して適用すると、わずか70スペクトルだけが選別された

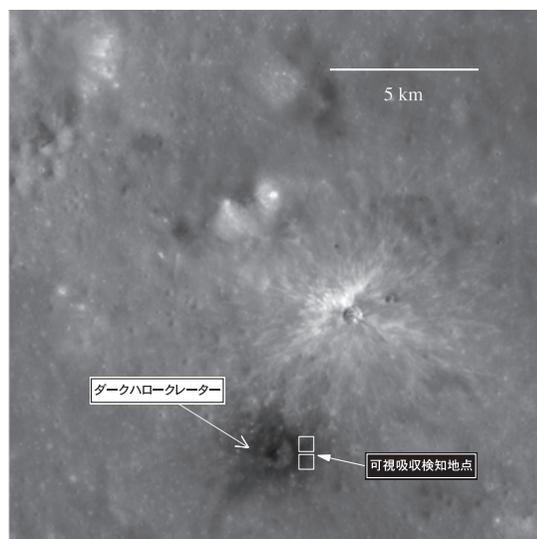


図4：可視吸収が検知された領域においてMIの波長750 nmバンドで撮像された反射率画像。四角(約500m×500m)のSPのフットプリントサイズに相当)で示した二箇所が可視吸収の検知地点。これらは暗いダークハロークレーターの上に相当している。

(全SPデータのわずか0.0001% !!)。面白いことに、検知された70スペクトルは、月面上に限られた領域(コベルニクスクレーターの東南方向)でのみ見つかることがわかった(図2)。また、局所的に見ると(図3)、地形的に高地に分布しており、海に覆われている領域では見つからない事がわかった(印刷物の図3が白黒でわかりにくい場合は、電子版のカラー図を参照していただきたい)。さらに、地形カメラ(TC) [14]によるアルベドモザイクマップと比較すると、可視吸収を示す場所は、比較的暗い領域にそって分布しているのがわかる。実はこの暗い領域は、熱の入江と呼ばれる火山砕屑物からなるダークマントル堆積物(DMD = Dark Mantle Deposit)に相当する。DMDは地球の火山で言えばハワイで見られるような火の噴水(Fire Fountain)による噴火によって撒き散らされたマグマの飛沫が周辺に堆積して形成したものと考えられている[8]。また、各検知地点についてTCやマルチバンドイメージャー(MI) [3]を使って詳細解析を行った所、いずれも暗い火山砕屑物の上でのみ見つかることが分かった。例えば、図4では、ダークハロークレーター(表層の下にある黒い物質(この場合は火山砕屑物)が衝突により表面に撒き散らされたもの)が見られるが、可視吸収が見つかるのはこの上のみであり、他の明るい

場所では一切見つからない。他の68箇所の検知地点についても同様に、MIまたはTCによる詳細解析を行った所、いずれも図4のように暗い火山砕屑物と解釈されるものの上でのみ見つかることが分かった。

さらにこれらの可視吸収を示すスペクトルは、顕著な $2\mu\text{m}$ 吸収を示すという特徴を持つ。図1の代表的なスペクトルでは、いずれも $2\mu\text{m}$ 付近に非常に深い吸収がみられる。また $2\mu\text{m}$ 吸収に比べると吸収深さは弱い $1\mu\text{m}$ 吸収も見ることが出来る。ここで思い出していたきたいのが、今回のスペクトルサーベイのアルゴリズムでは $0.8\mu\text{m}$ より長い波長のデータは使用していないにも関わらず、検知されたスペクトルはいずれも顕著な $2\mu\text{m}$ 吸収を示すことである。つまり可視吸収と顕著な $2\mu\text{m}$ 吸収は同じ物質からのものである可能性が高いと考えられる。

ところで、顕著な $2\mu\text{m}$ 吸収を示す鉱物としてスピネルが挙げられる。実際月面上で見つかるMgスピネルを多く含む岩石に富む場所は非常に強い $2\mu\text{m}$ 吸収を示す[e.g. 6]。そこで可視吸収を示すスペクトルが見つかった場所とスピネルに富む領域の関連について調べるために、 $2\mu\text{m}$ 吸収に着目した「スピネルスペクトルサーベイ」を行ったところ、7000万スペク

トルのうち、スピネルスペクトルが87箇所で見つかった(サーベイの詳細は[13]) (検知地点について図2に表示した)。その結果、(1)それらの検知地点は過去に報告がされているMgスピネルが見つかった場所を含むこと、(2)熱の入江で見つかるスペクトルスペクトルは可視吸収を示すが、他の場所で見つかるスピネルスペクトルでは可視吸収は一切見られないこと、(3)熱の入江以外のDMDではそもそもスピネルスペクトルが見つからない事が分かった。

2.3 可視吸収を示す物質の正体

可視吸収と同時に顕著な $2\mu\text{m}$ 吸収を示す物質の正体はなんなのであろうか? 上でも述べたように、可視吸収を示す鉱物としては(a)層状珪酸塩、(b)衝突溶融物、(c)ブラックピース、(d)チタン鉄鉱、(e)単斜輝石や(f)スピネル族が考えられる。一方、今回見つかったものはいずれも火山砕屑物の中で見つかることから、(a)や(b)の可能性は極めて低いと考えられる。また、(c)や(d)は $2\mu\text{m}$ 吸収を示さない[8,9]ことから、SPが見つけたものとは異なる。さらに(e)であるが、地球上に存在する単斜輝石の中で Fe^{3+} による可視吸収と $2\mu\text{m}$ 吸収の両者を示すものがあることが知られ

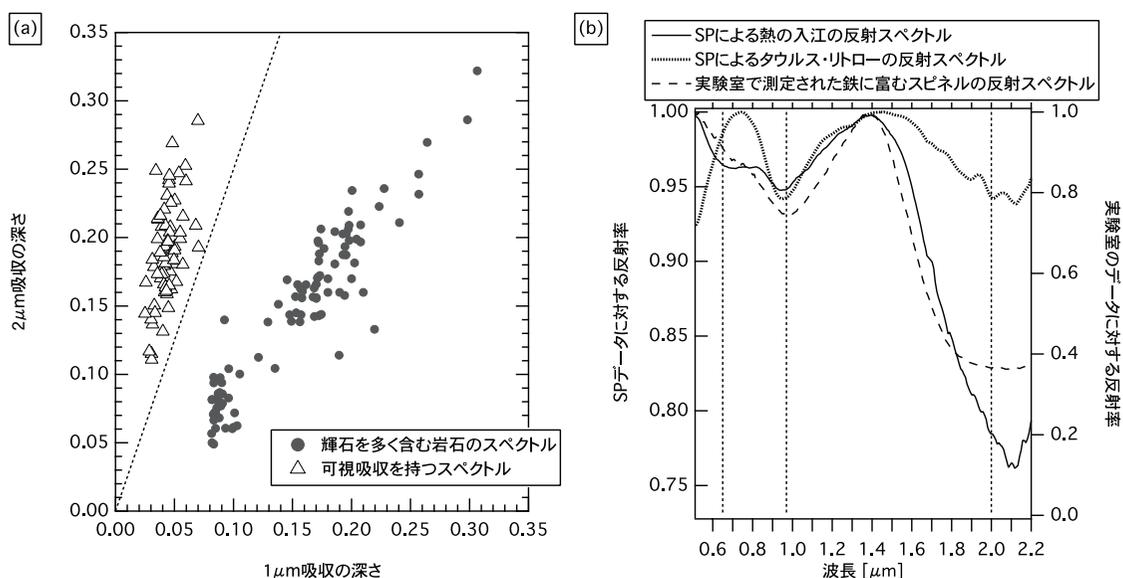


図5: (a)可視吸収を持つスペクトルの $2\mu\text{m}$ 吸収と $1\mu\text{m}$ 吸収の深さ比(△印)。点線は深さ比が0.4の場合の直線。SPによって発見された輝石を多く含む岩石が支配的な領域に対するデータ(●印)と比べると、可視吸収を持つスペクトルでは、 $2\mu\text{m}$ 吸収の深さが $1\mu\text{m}$ 吸収とくらべて非常に深い。(b)SPが見つけた可視吸収を持つスペクトル(実線)と実験室で測定された鉄に富むスピネルのスペクトル(破線)の比較。両者は $0.65\mu\text{m}$ や $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ での吸収特性(縦点線)がよく似ている。一方、他のDMD(e.g.,タウラス・リトロ)のスペクトルとは似ていない(薄い点線)。

ている[11]. しかし, $1\ \mu\text{m}$ と $2\ \mu\text{m}$ 吸収の深さの関係について調べてみると, 今回見つけたスペクトルの持つ $1\ \mu\text{m}$ と $2\ \mu\text{m}$ 吸収の深さ比の特徴は, 輝石が多く含まれる岩石とは明らかに異なる(図5(a)).

結局何が候補として残るかという(f)であるが, 確かに, スピネル族の中に可視吸収を示しかつ顕著な $2\ \mu\text{m}$ 吸収を示す鉱物がある[9,12]. 例えばウルボスピネルがあげられる. しかし, ウルボスピネルは波長 $1\ \mu\text{m}$ や $1.5\ \mu\text{m}$ で反射スペクトルの急増を示すため[9], 図1でみたように $1\ \mu\text{m}$ 吸収をもつスペクトルの特徴とは相容れない. 一方, 鉄やクロムに富むスピネル(e.g., 鉄スピネルやクロム鉄鉱)は可視吸収, 適度な $1\ \mu\text{m}$ 吸収, 顕著な $2\ \mu\text{m}$ 吸収を併せ持つ[12]. 実際, 図5(b)のように, 実験室で測定された鉄に富むスピネルの反射スペクトルと比較すると, SPが見つけたスペクトルと非常に似た特徴を示す. さらに70スペクトルの中には可視吸収, $1\ \mu\text{m}$ 吸収, $2\ \mu\text{m}$ 吸収に加えて, $1.3\ \mu\text{m}$ に弱い吸収を示すものが見つかる(例えば, 図1のB14)が, それらはクロム鉄鉱の特徴であることが知られている[12]. 以上のことから, 我々は, この熱の入江の火山砕屑物中には, 鉄やクロムに富むスピネルが大量に含まれると結論づけた(より詳しいスペクトルに対する考察は[13]).

2.4 熱の入江の特殊性

月には多数のDMDが存在する(図2). しかし従来の研究で, 熱の入江だけが特殊であるというような報告はなかった. 例えば, クレメンタイン探査機によるマルチバンドデータを使ったDMDの分類研究によると, 熱の入江はチタンの量が高く, またブラックビーズを大量に含むという点で, タウラス・リトロ, リマエポーデ, 蒸気海のDMDと同じ分類であると報告されている[8]. 一方, 今回のサーベイで熱の入江以外のDMDでは可視吸収および顕著な $2\ \mu\text{m}$ 吸収を示すスペクトルは見つからない. 実際に幾つかのDMDについて直接反射スペクトルを調べてみても, 可視吸収は見つからなかった(図5(b)にタウラス・リトロの反射スペクトルの例を示す). ところで, PANやカンラン石に鉄およびクロムに富むスピネルが含まれている場合は, 浅い吸収である可視吸収が見えなくなることが予想される. しかし, その場合でもスピネルの持つ顕著な $2\ \mu\text{m}$ 吸収は観測されることに

なる. 一方, 2.2章で見たように熱の入江以外のDMDでは顕著な $2\ \mu\text{m}$ 吸収を示すスペクトルは見つからなかった. つまり, 月面上に数多くあるDMDの中で, 熱の入江のDMDだけが鉄やクロムに富むスピネルを大量に含むということである. なお月面上では別のスピネル族であるMgスピネルが支配的な場所が多数見つかっているが, いずれも衝突クレーター構造に付随しており[e.g.6,13], 他のDMDでは一切見つかっていない(なおMgスピネルは可視吸収を示さない[12]). 以上のことから, 熱の入江は月面上で大量のスピネルが見つかる唯一のDMDであり, 他では観測されていない鉄およびクロムに富むスピネルを持つ極めて特殊な火山砕屑物からなるということが分かった.

3. 熱の入江で起きた火成活動

この熱の入江のDMDの特殊性は何によって作られたのだろうか? 残念ながら, 我々は確固たる答えをまだ持っていないが, 現時点でわかりうる限りの事実に基づき, ありそうなシナリオ(仮説)について議論してみたいと思う.

3.1 熱の入江の形成史

最初に, この熱の入江の形成史について考察を行ってみたいと思う. まず, これらの火山砕屑物が分布している領域は地形的に高地に位置する事がわかっている(図3(a)). ただし, 高地に位置するがゆえに起伏があることと, 火砕堆積物起源のレゴリス層は他のレゴリスと比べて比較的ルーズであり, 数百メートルサイズのクレーターの保存状態が良くないことから, DMDが堆積した年代をクレータ年代学から直接的に決定する事は難しい. 一方, DMD領域と海の南西側の境界をみると地形との対応が良いことから, この一帯に堆積したDMDを雨の海からの玄武岩溶岩が覆い隠しており, 高い場所に堆積したDMDだけが海に覆われずに残ったと考えられる. 従って, その層序関係をもとに, DMDが堆積している高地とDMD南西の海の年代を調べることで, 形成年代の上限および下限を与えることができる. そこでTCの画像データを使ってDMDが堆積している高地とDMD南西についてクレーターのサイズ分布測定を行った. その結果を図6に示す. 概ね, 高地におけるクレーター個数密度は

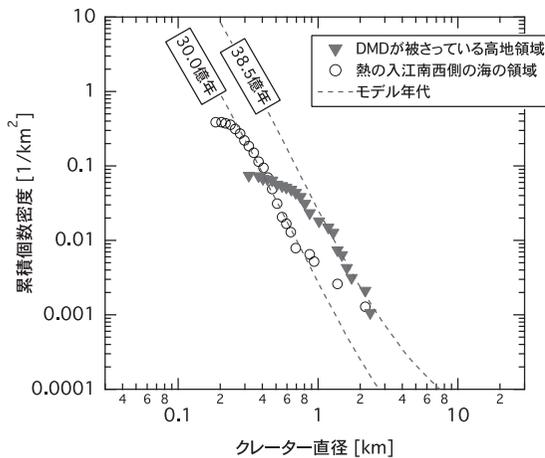


図6：熱の入江DMDの南西側の海(○印)およびDMDの高地(▼印)におけるクレーターサイズ頻度分布。目安として30.0億年および38.5億年のモデル年代を破線で示した。

海のものとは比べて高いことがわかるが、数100 mの大きさでは保存が良くないため海領域の個数密度よりも少なくなっている。このデータに対してモデル年代解析[16]を行ったところ、高地の年代は約38.5(+0.6/-1.1)億年で、海領域は31.7(+1.2/-2.6)億年と見積もられた。これより熱の入江DMDの形成年代は31.7~38.5億年前と考えられる。なお、この高地の年代は、雨の海盆地の形成年代38.5億年[17]とよい一致を示す。以上のことより、以下の様な形成史が考えられる。まず今から38.5億年前に雨の海盆地が形成され、その周辺に放出堆積物による高地領域が形成された。その後、火山砕屑物が噴出しこの周辺一帯に大規模なDMDが形成されたが、31.7億年前に吹き出した玄武岩の海がこの一帯の低地を埋め尽くし、現在我々が観測している熱の入江の姿を形成したと考えられる。

もしこの解釈が正しいとすれば、図3で見たように熱の入江が東西にわかれている理由は、単純にその間の低地が玄武岩の海で覆われたことが理由と考えられる。つまり、雨の海盆地の形成後、鉄やクロムに富む火山砕屑物はかなり大規模に噴出し、高地だけでなく低地も含めこの周辺一帯を埋め尽くした。しかし31.7億年程前に流れ出てきた玄武岩の海が低地の火山砕屑物に覆いかぶさり、熱の入江DMDを東西にわけた可能性が考えられる。実際、可視吸収は熱の入江の東側と西側の両方で見つがっているが(図3)、それらの反射スペクトル特性に違いは見られなかった(例えば図

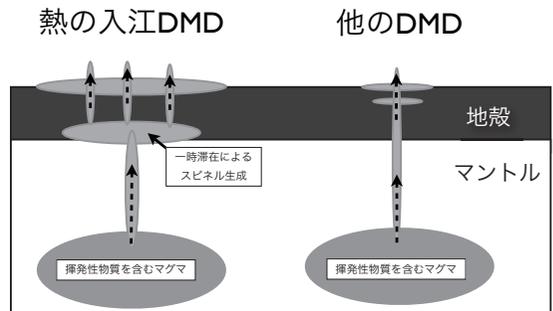


図7：熱の入江DMDの生成シナリオのポンチ絵。他のDMDとの違いは、下部地殻の深い所(10km以深)での一時滞在によるスピネル生成過程の有無。

1のC2とF4)。また、約10億年前に形成されたコペルニクスクレーターの放出物が上に覆いかぶさったことを考えると、元々の火山砕屑物はさらに大規模に広がっていた可能性も考えられる。たとえば仮に熱の入江がコペルニクス領域も含めこの一帯10度×10度程度の領域に広がっていたとすると、その総面積は約9万km²になる。これはタウラス・リトロー(2,940 km²)やリマエポーデ(6,620 km²)のように月の代表的なDMDと比べても桁違いの大きさであり、さらに[8]において最も大きいとされているアリストアルコスDMDの49,013 km²をも凌ぐ大きさである。つまり、この領域で起こった鉄やクロムに富むスピネルを含むマグマの噴出は、月面上で最大規模の噴出イベントであった可能性が考えられる。

3.2 成因

鉄またはクロムに富むスピネルを大量に含む火山砕屑物の成因はなんであろうか？最近行われた室内実験によれば、アポロ15号着陸地点で見つかったグリーンガラス組成のマグマと斜長岩組成の岩石が、地下10 kmより深い所で反応すると、鉄に富んだ(>5 wt%)スピネルが生成されると報告されている[18]。このことより、成因シナリオとして、以下のようなものを提案したい。まず、今から32億年以上も前に、マンテル中の深い所で生成したマグマが表面に向かって上昇するが、熱の入江ではなんらかの理由で10 kmより深いところの下部地殻で一時的に滞在した(図7)。そこで下部地殻の斜長岩と反応することで、鉄やクロムに富むスピネルが生成される。一方、その後においても、深部から上昇してきた揮発物質が下部地殻に滞

在中のマグマにどんどん追加される。時間が経つにつれマグマ中の揮発性物質の割合も増え、ある臨界点を越えたところで月面最大規模の噴出を起こし、大量の火山碎屑物によるDMDが形成された。一方他のDMDでは、マグマの下部地殻での一時滞在は10 kmよりも浅い領域で起こった(または一時滞在そのものがなかった)ため、鉄やクロムに富むスピネルが生成されなかった。つまり、下部地殻におけるマグマの一時滞在の深さによる違いが、熱の入江DMDの特殊性を作った要因ではないかという仮説である。

残念ながら我々はこの成因シナリオに対して決定的な証拠をもっているわけでないで、そもそも10 kmより深い所での一時滞在が何故ここでだけ起こったのかも今後様々な検証を行う必要がある。一方で、もしこのシナリオが正しいのであれば、この熱の入江を生成したマグマには、地下深部で大量の地殻物質を溶かしこんでもなお、DMDとして噴出するのに十分な割合の揮発性物質を含んでいた可能性が高い。つまり、この熱の入江には水などの揮発性物質がそれなりに高い割合で含まれることが期待される。実際Saalたちによって、グリーンガラス内部に水が含まれることが報告されている[19]。また同位体解析によれば、それらの水は彗星起源ではなくC型小惑星に近いものであることが報告されていることから、それらの水は彗星などにより外部から持ち込まれたものではなく、月マントルの深部起源である可能性が高い[20]。つまり、地球-月系の形成時または直後に月深部に取り込まれた揮発物質が月の深部に保持されていると考えられるわけである。そのような水を多く含む可能性のある熱の入江の火山碎屑物に対するサンプルリターンを行うことにより、太陽系の初期情報とりわけ地球-月系における揮発性物質に関する貴重な資料を得ることができると期待できる。このような事から将来探査候補地点として熱の入江は非常に興味深い場所であると我々は考えている。

4. まとめ

かぐや搭載のスペクトルプロファイラを使った観測により、熱の入江にある火山碎屑物で、可視域の吸収および $2\mu\text{m}$ 付近に強い吸収を示す反射スペクトルを見つけた。スペクトル解析の結果、これらは鉄および

クロムに富むスピネルによるものであると考えられる。月面上の他の火山碎屑物ではこのような物は見つからないことから、熱の入江は月の中でも特殊な火成活動史を持つ領域である可能性が高い事がわかった。その成因については今後様々な面から議論されていくことが重要だろう。またそこからのサンプルリターンは地球-月系の揮発性物質の起源に関して重要な情報をもたらしてくれることが期待される。

謝辞

鉱物学的解釈を進める上で有益なコメントを頂きました武田弘先生に感謝いたします。また査読者として数多くの有益で建設的なコメントをして頂きました佐伯和人先生に感謝致します。

参考文献

- [1] Matsunaga, T. et al. 2008, *Geophys. Res. Lett.* 35, L23201.
- [2] Nakamura, R. et al. 20, *Nature Geoscience* 28, NGE01614.
- [3] Ohtake, M. et al. 2009, *Nature* 461, 236.
- [4] Yamamoto, S. et al. 2010, *Nature Geoscience* 3, 533.
- [5] Yamamoto, S. et al. 2012, *Geophys. Res. Lett.* 39, L13201.
- [6] Pieters, C.M. et al. 2011, *J. Geophys. Res.* 116, E00G08.
- [7] Vilas, F. et al. 2008, *Earth Planets Space* 60, 67.
- [8] Gaddis, L.R. et al. 2003, *Icarus* 161, 262.
- [9] Reiner, M.A. et al. 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, L02201.
- [10] Tompkins, S. et al. 1997, *Lunar Planet. Sci. XXVIII*, abst 1255.
- [11] Cloutis, E.A. and Gaffey, M.J. 1991, *J. Geophys. Res.* 96, 22809.
- [12] Cloutis, E.A. et al. 2004, *Meteoritics & Planetary Science* 39, 545.
- [13] Yamamoto, S. et al. 2013, *Geophys. Res. Lett.* 40, doi: 10.1002/grl.50784.
- [14] Haruyama, J. et al. 2008, *Earth Planets Space* 60 (4), 243.

- [15] Araki, H. et al. 2009, *Science* 323, 897.
- [16] Morota, T. et al. 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, L21202.
- [17] Stoffler, D. et al. 2006, in *New Views of the Moon* (eds Jolliff, B.L. et al.), 60, 519 (The Mineralogical Society of America).
- [18] Prissel, T.C. et al. 2012, *Lunar Planet. Sci.*, XLIII, Abstract, 2743.
- [19] Saal et al. 2008, *Nature* 454, 192.
- [20] Saal et al. 2013, *Science* 340, 1317.