

「月惑星探査の来たる 10 年」第一段階パネルへの意見書

確認： 本意見書は日本惑星科学会が行う「月惑星探査の来たる 10 年」検討の第一段階においてパネルリーダーが意見取りまとめを行うための資料として提出して頂きます。 **将来の月惑星科学・探査において最も重要になるであろう、第一級の科学**について提案して下さい。意見書の内容は公開討論会などで議論の対象となり、最終報告に反映されます。

締めきり： 2010 年 8 月末日

提出： 電子ファイル (Word または PDF 形式) で「月惑星探査の来たる 10 年」事務局 (decade_sec@wakusei.jp) に送って下さい。事務局で取りまとめて、パネルリーダーに展開します。

- 「月惑星探査の来たる 10 年」検討の詳細については、惑星科学会サーバから資料をダウンロードすることができます。

https://www.wakusei.jp/news/announce/2010/2010_03_10/2010_03_09_introduction.pdf

■ 意見提出先パネル (希望するパネルに○をつけて下さい。複数回答可)

- 地球型惑星固体探査パネル
- 地球型惑星大気・磁気圏探査パネル
- 小天体探査パネル
- 木星型惑星・氷衛星・系外惑星探査パネル

■ 提案タイトル

(小惑星 3200 Phaethon のサンプルリターン：揮発性元素に富む微小天体の分化と地球近傍小惑星の起源)

■ 代表者の氏名・所属・連絡先 (E-mail アドレス, または電話番号と Fax 番号)

(荒井朋子 千葉工業大学 PERC、tomoko.arai@it-chiba.ac.jp)

■ 共同提案者の氏名・所属 (適宜追加して下さい)

(春日敏測 (Department of Physics and Astronomy, University of Western Ontario)

大塚勝仁 (東京流星観測網)

中村智樹、中藤亜衣子 (東北大学理学研究科地学専攻)

■ 要約 (400 字程度)

(隕石は、太陽系の歴史の中で、物質がどのような分化過程を経て、どのような物質多様性が生まれたのかを理解する手掛かりである。始原的コンドライトから分化が進み、隕石が部分的に熔融すると、低温で溶けやすい Fe-Ni-S 金属メルトと Fe、Na、K に富むケイ酸塩メルトの二種類が生じ、溶け残った部分は Mg に富むかんらん石や輝石からなることが実験岩石学的にわかっている。しかし、これまでの溶け残り部分を代表する隕石や金属メルトに対応する鉄隕石は見つかっていたが、ケイ酸塩メルトに対応する隕石が見つからなかったことが隕石学の大きな謎であった。しかし、近年、ケイ酸塩メルトに相当する物質が、IAB 鉄隕石中に含まれるケイ酸塩包有物(Takeda et al., 2000, 2003 GCA)や新種の隕石(GRA06128/9: Arai et al., 2008; Shearer et al., 2008; Treiman et al., 2008 他)として発見され、微小天体での部分熔融に伴う物質分化の実態が徐々に明らかになってきた。これらの物質に共通する点は、含まれる斜長石が Na に富むことで、分化度の高い小惑星起源のユークライトやアングライト隕石中の斜長石が Na に乏しいことと対照的である。Na 濃度の違いは、母天体の分化度 (熔融度) の違いによる揮発性元素の蒸発度合いの差によるものだとするとうまく説明がつくように見えるが、現時点では非常に粗い仮説に過ぎない。

この仮説の実証に理想的な小天体が地球近傍小惑星 3200 Phaethon (直径 5.1 km)である。Phaethon は B タイプ小惑星であるが、軌道的観点からふたご座流星群の母天体だと考えられているため、元々は揮発性元素に富んだ彗星的な物質と揮発性元素に乏しい部分が混在したと考えられる。双子座流星群の最近の観測では、他の彗星と比較して、著しく Na に乏しいことが報告されている(Kasuga et al., 2005A&A)。これは、母天体である Phaethon 内での局所的な部分熔融による Na に枯渇した部分を見てのかもしれない。彗星の母天体であり、小惑星の様相を呈する Phaethon の表層物質や密度分布の遠隔探査及びサンプルリターンにより、揮発性物質に富む微小天体における分化過程を理解する手掛かりが得られるとともに、コンドライトより始原的物質 (彗星物質が低温で加熱) が入手できる可能性

もある。

- 本意見書の内容（テキストおよび図表）をパネルリーダー並びに事務局がパネル討論と各種報告書へ引用することについて承諾しますか？（いずれかに○）
（○）承諾する （ ）承諾しない

- （上で「承諾する」に○をされた方のみ）引用時には協力者リストを付加する場合があります。協力者リストに氏名を公表することを希望しますか？（いずれかに○）
（○）希望する （ ）希望しない

- ・自由記述 (3 ページ以内, 図表の貼り付け可)
[背景と意義]

隕石は、太陽系の歴史の中で、物質がどのような分化過程を経て、どのような物質多様性が生まれたのかを理解する手掛かりである。隕石には、原始太陽系円盤でガスと塵が集積した過程を残すコンドライトと、コンドライトが様々な分化過程を経たエコンドライトの大きく分けて二つがある。エコンドライトの中には、コンドライトが溶けずに焼結したもの、部分的に溶けたものと、そして、ほぼ完全に溶けたものから再結晶化したものなど、加熱された温度（熱源量）、酸素分圧、揮発性成分濃度などの違いから、岩石種や化学組成は多岐に渡る。隕石が部分的に溶融すると、低温で溶けやすい Fe-Ni-S 金属メルトと Fe、Na、K に富むケイ酸塩メルトの二種類が生じ、溶け残った部分は Mg に富むかんらん石や輝石からなることが実験岩石学的にわかっている。しかし、これまでの溶け残り部分を代表する隕石（ロドラナイト・アカブルコアイト、ユレイライトなど）や金属メルトに対応する隕石（鉄隕石）は見つかっていたが（図1）、ケイ酸塩メルトに対応する隕石が見つからなかったことが隕石学の大きな謎であった。しかし、近年、ケイ酸塩メルトに相当する物質が、IAB 鉄隕石中に含まれるケイ酸塩包有物(Takeda et al., 2000, 2003 GCA)や新種の隕石(GRA06128/9: Arai et al., 2008; Shearer et al., 2008; Treiman et al., 2008 他)（図2）として発見され、微小天体での部分溶融に伴う物質分化の実態が徐々に明らかになってきた。これらのケイ酸塩メルトに共通する点は、Na 濃度が高いことで、含まれる斜長石は Na に富み、Ca に乏しい。一方、分化度の高い（おそらくほぼ全球溶融を経験している）小惑星起源のユークライト隕石やアングライト隕石に含まれる斜長石は Na に乏しく、Ca に富むのが特徴的で、月の斜長石組成に類似する。Na 濃度に違いは揮発性元素の蒸発しやすさによるためであり、天体のサイズ、熱源量（加熱温度）、組成に依存すると考えられる。局所的な低温部分溶融が起こった微小天体（直径数 km から程度）に対して、ほぼ全球溶融過程を経たベスタ級（直径 100km 以上）の巨大小惑星が Na などの揮発性元素に乏しいことは、直観的に理にかなっているように見えるが、現時点では仮説に過ぎない。

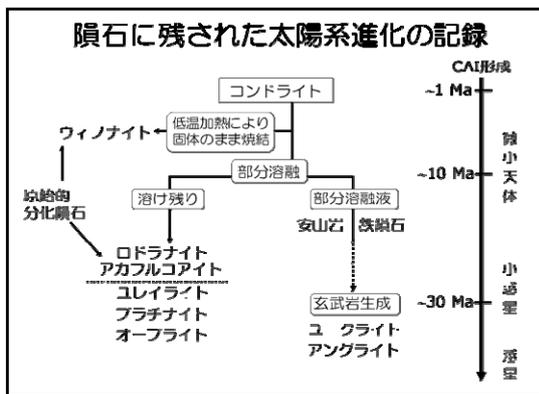


図1 太陽系物質進化と対応する隕石種 (荒井, 2008)



図2. 2006年に南極で発見された新種の隕石 GRA06128/9 (写真 NASA)

この仮説の実証に理想的な小天体が 3200 Phaethon (1983 TB)(直径 5.1 km)である。Phaethon は地球近傍小惑星で、近日点が 0.14 AU で、小惑星の中でもっとも太陽に近づく天体である。スペクトル的には B タイプ小惑星（炭素質、揮発性成分に富む）であるが、軌道的観点からふたご座流星群の母天体だと考えられている。これまでは、コマやガスジェット、ダストトレイルなどは観測されていないことから、元々は揮発性元素に富んだ彗星的な物質と揮発性元素に乏しい部分が水平方向、あるいは深さ方向に混在していた（る？）と考えられる。双子座流星群の最近の観測では、他の彗星と比較して、著しく

Na に乏しいことが報告されている(Kasuga et al., 2005A&A)。これは、母天体である Phaethon 内での局所的部分溶融による Na に枯渇した部分を見ているのかもしれない。彗星の母天体であり、小惑星の様相を呈する Phaethon の表層物質や密度分布の遠隔探査及びサンプルリターンにより、揮発性物質に富む微小天体における分化過程を理解する手掛かりが得られるとともに、コンドライトより始原的物質（彗星物質が低温で加熱）を入手できる可能性もある。

リターンサンプルの酸素同位体分析により、地球近傍小惑星が地球-月系の酸素同位体比を持つのか否かを知ることができる。現在、月以外の天体物質の酸素同位体比はわかっていないため（火星隕石や小惑星ベスタ起源の HED は除く）、軌道の知られている小惑星物質の酸素同位体比がわかることで、地球近傍小惑星の出発物質や起源という大きな謎が明らかにされることが期待される。

[手法]

Phaethon の探査は、周回衛星及びサンプルリターンを行う。周回衛星では、詳細地形観測、マルチバンドカメラや連続分光カメラによる紫外から赤外波長域の反射スペクトル測定、XRS による主要元素測定、密度分布や形状観測を行う。表層の観測データから、特徴的な化学組成を持つ部分（高濃度 Na など）が確認できれば、その地点に軟着陸し、サンプルリターンを行う。もし、表面組成が均質である場合は、可能であれば上空から弾丸を打ち込み、その影響の観測を行い、垂直方向の組成変化が調査する。数 10cm 深部まで掘削できれば、表層部と内部で物質的に優位な差が期待できるので（彗星の一般的な垂直構造からの推定）、双方のサンプルを持ち帰ることが望ましい。リターンサンプルについては、岩石鉍物分析、化学組成分析を行い、ミリメートル、ミクロンスケールでの物質の存在形態や組成分布データを取得し、彗星的物質であるのか、低温度での部分溶融を経たものなのか、揮発性成分だけが蒸発し焼結したものなのか、もし溶融していれば、部分溶融がどのような形で起きているのかを詳細に調べる。さらに、同位体組成・年代分析、酸素同位体比分析、希ガス分析、宇宙線照射履歴分析などを行い、出発物質や原始太陽系における出生地の特定を行う。

[期待される成果と波及効果]

Phaethon からの「サンプルリターン」探査により、太陽系固体惑星科学における、複数の本質的課題解決につながるデータが得られることが期待される。

- 微小天体における初期分化（低温溶融）過程における、揮発性成分の挙動
- 地球近傍小惑星の起源特定（酸素同位体比の取得）
- コンドライトより始原的物質（彗星様物質）の初のサンプルリターンの可能性

以上

- ・自由記述 (3 ページ以内, 図表の貼り付け可)