特集「月惑星探査の来たる10年:第二段階のまとめ」 小惑星Phaethon探査提案

大塚勝仁3, 敏測². 荒井 朋子! 中村 智樹4, 中藤 亜衣子*. 春日 孝士 中村 良介5. 伊藤 渡部 潤 小林 正規¹ 川勝 康弘 ,_{上,} 睦美⁸, 千秋 博紀1, 和田浩二1 小松 中村 第田 石橋 高', 石丸 亮¹. 中宮 腎樹¹⁰ 2012年7月4日受領, 2012年7月31日受理,

(要旨)地球近傍小惑星(3200) Phaethonは、ふたご座流星群の母天体であるが、彗星活動は乏しく、彗星と 小惑星の中間的特徴を持つ活動的小惑星(あるいは枯渇彗星)と考えられている。また、ふたご座流星群のス ペクトル観測から報告されているナトリウムの枯渇及び不均質は、太陽加熱の影響よりも局所的部分溶融を 経た母天体の組成不均質を反映している可能性が高い。部分溶融の痕跡を残す原始的分化隕石中に見られる 薄片規模(mm-cmスケール)でのナトリウム不均質は、上記の可能性を支持する。従って、Phaethonでは局 所的な加熱溶融・分別を経験した物質と、始原的な彗星物質が共存することが期待される。Phaethonは、 太陽系固体天体形成の最初期プロセスを解明するための貴重な探査標的である。また、天文学、天体力学、 小惑星・彗星科学、隕石学、実験岩石学などの惑星科学の多分野に横断的な本質的課題解明の鍵を握る理想 的な天体である。本稿では、小惑星 Phaethon 及び関連小惑星の科学的意義と探査提案について述べる。

1.背景

近年の小惑星・彗星探査,隕石研究,望遠鏡観測に より,太陽系固体天体に関する古典的概念は見直され, 新たな概念や視点が生まれている.その中でも特筆す べき主要課題を以下に挙げる.

1.1 S型小惑星≠始原的物質

従来,小惑星は太陽系初期の始原的物質(溶融や熱 変成などの分化を経ていない物質)から成ると考えら れてきた.しかし,はやぶさが持ち帰った試料分析の 結果,S型小惑星イトカワ(540 m×270 m×210 m)は, 直径20 km以上の母天体で800度程度加熱を受けた物 質が衝突・破砕を受け、破片が再集積して形成された ことがわかった[1]. 従って、小惑星の起源を理解す るためには、小惑星の物質が始原的物質からどのよう な分化過程をどの程度経たのかを正しく理解する必要 がある.

1.2 小惑星物質の組成不均質

従来,惑星の組成は均質と考えられ,地上望遠鏡観 測による小惑星の反射スペクトルと隕石の実験室分光 データとの照合により,天体組成が議論されてきた [2,3].2008年に地球に落下した小惑星2008TC₃(直径 2-5m)の天文観測及び隕石(Almahata Sitta)分析の 結果,この小惑星が分化隕石(ユレイライト)と多種類 の始原隕石(E,H,Lコンドライト)の混合から成るこ とがわかり,小惑星の物質不均質性が示された[4,5].

1.3 隕石種と小惑星スペクトルタイプ相関の 不整合

小惑星2008TC₃の落下前の望遠鏡観測による反射ス ペクトルからB(F)型小惑星に分類されていたが[4],

 ^{1.} 千葉工業大学惑星探査研究センター
2. 国立天文台
3. 東京流星観測網
4. 東北大学大学院理学系研究科
5. 産業技術総合研究所
6. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
7. NASA Johnson Space Center
8. 早稲田大学高等研究所
9. 立教大学物理学科
10. 京都大学生存圏研究所
tomoko, arai@it-chiba, ac. jp

主にユレイライト隕石を含む落下隕石からは母天体は S型小惑星と推定されるため[6],天文観測と調和しな い.B(F)型小惑星は,加熱脱水を経た炭素質コンド ライト(CL/CM)に相当すると考えられているが[7-9], 今のところAlmahata Sitta隕石からは炭素質コンド ライトは見つかっていない[4,5].従って,隕石種と 小惑星スペクトルタイプの従来の単純な相関関係に見 直しが必要となってきた.

1.4 彗星と小惑星の遷移的相関

従来,彗星と小惑星は全く異なる軌道要素,物理・ 化学特性を持つと考えられてきた.しかし,近年の地 上望遠鏡やハッブル望遠鏡観測から,小惑星軌道を持 つ彗星が見つかったり,メインベルト小惑星で彗星活 動が報告されたり[10-12],小惑星で氷や有機物が検知 されたり[13-15],彗星と小惑星の間の過渡的天体(枯 渇彗星または活動的小惑星)が存在することが明らか になってきた.

1.5 流星群-小惑星(枯渇彗星)の相関

一般的に,流星群は彗星起源であることが知られて いる.近年,地球近傍小惑星を起源とする流星群が見 つかっており,親子関係が確実な7個は共通して軌道 傾斜角が大きい[16].これらの流星群の母天体である 小惑星は,メインベルトの最も外側に存在する彗星と 小惑星の過渡的天体由来であると示唆されているが, その起源や物質についてはよくわかっていない.

1.6 彗星と小惑星における水の存在形態

スターダストミッションで持ち帰られた彗星81P/ Wild 2の試料が主に無水ケイ酸塩鉱物から成ること から,彗星では水は固体の状態で存在し,ケイ酸塩鉱 物の水質変成を生じないことが明らかになった[17]. 従って,望遠鏡観測で含水鉱物の吸収スペクトルが確 認されなくても,小惑星や彗星に(固体の)水が存在す る可能性はある.一方,C型小惑星の(24)Themis(直 径198 km)及び(65)Cybele(直径273.0±11.9 km)の表 層から氷が観測されており[13-15],小惑星でも固体の 水が存在する場合もある.

2. 小惑星Phaethon及び関連天体の 概要と科学的意義

小惑星 Phaethon 及び関連天体は,前項に挙げた太 陽系科学の最新主要課題と密接に関連する特徴を持つ ため,Phaethon探査により,複数の科学目標の同時 達成が可能である.以下に,Phaethon 及び関連天体 の概要と科学的に特筆すべき項目を述べる.

2.1 概要

Phaethonは、直径4.7±0.5 km、自転周期が3.6時間 のアポロ型の地球近傍小惑星で、大きい軌道傾斜角 (22.2度)と小さい近日点距離(0.14 AU)を持つ[18他]. アルベドは0.11 ± 0.02と低く[18他], 青いスペクトル を持つB(またはF)型小惑星である[2,3]. 青いスペク トルを持つB/F型小惑星は近地球型小惑星の中で5% 程度と少なく[3]. その中でもPhaethonは最も青い天 体である[19]. Phaethon はふたご座流星群と同一の軌 道要素を持つため、ふたご座流星群の母天体と考えら れている[18, 20, 21]. また,小惑星2005UD(直径1.3 ±0.1 km, 自転周期5.24 hr) [22, 23], 及び小惑星 1999YC(直径1.4±0.1 km, 自転周期4.50 hr) [24]は Phaethonと類似した軌道要素をもち、同じスペクト ルタイプを有するため、ふたご座流星群と同様、 Phaethonの分裂(または衝突破壊)破片だと考えられ ている (PGC; Phaethon-Geminid Complex[22]). さら に, B型のメインベルト小惑星であるPallasが Phaethonと軌道相関を持つことから, Phaethonが Pallasの分裂天体である可能性が示唆されている[25].

2.2 彗星活動無しの流星群母天体

一般的に流星群は彗星由来であると考えられている. しかし, Phaethonはガスジェットやダストトレイル などの彗星活動が確認されておらず,枯渇彗星あるい は岩石彗星の可能性が高い[26-30].ふたご座流星群流 星体のバルク密度(2.6 g cm³)が,典型的な彗星の密 度より2.3倍大きいことは,枯渇彗星と調和的である [31].近年,近日点通過時に二倍の増光が報告されて おり,微量のダスト放出によるものだと考えられてい るため,小規模な彗星活動が間欠的に存在する可能性 がある[32].従って,Phaethonは,流星群の母天体で ある彗星 – 小惑星の過渡的天体であり,課題項目1.4 と1.5の理想的研究対象である.

2.3 組成不均質性

Phaethonの望遠鏡観測から、紫外域スペクトルに 著しい多様性が報告されており、原因は物質の不均質 性(含水鉱物の存在度や加熱度合い)だと考えられてい る[7-9]. また、分裂天体である 2005UD はB(またはF) 型小惑星, 1999YCはC型小惑星である[2,3]. 2005UD は輝度の多様性を持つことから、不均質な表層物質の 可能性が示唆されている[33]. B型及びF型はC型の サブグループであり、物質的に類似するが加熱変成度 が異なると考えられている[7-9]. C型小惑星である 1999YCは、Phaethonの変成度の異なる部分を代表し ているのかもしれない、また、PhaethonとPallasは、 可視域のスペクトルが大きく異なるが. これも元天体 の物質不均質性に起因するのかもしれない. Phaethon 及び関連天体のスペクトル多様性はPhaethonの物質 不均質性を支持するものであり、課題項目の1.2と1.3 の実証対象として最適である.

2.4 太陽輻射熱による加熱脱水?

C型小惑星や彗星はニュートラルあるいは赤いスペ クトルを持つ[34他]. B(F)型小惑星は、C型同様に アルベドが低いが、青いスペクトルを持ち、0.7 µmの 含水鉱物の吸収がないため、加熱脱水を経たCI/CM タイプの炭素質コンドライトに相当すると考えられて いる[7-9]. PhaethonがB(F)型スペクトルを持つこと は、彗星活動のない枯渇彗星(岩石彗星)であることと 調和的である. 一方、近年観測されたPhaethonの二 倍の増光は、表面温度の上昇による亀裂や内部の含水 鉱物の熱変成によるダスト発生が原因であると考えら れており、内部には氷あるいは含水鉱物が存在する可 能性がある[32]. 近日点距離(0.14 AU)での太陽輻射 熱により加熱脱水は十分に起こり得る[35]. また, Phaethonは自転軸の傾きが大きいため,太陽輻射熱 の影響は緯度に依存し,北半球のほうが南半球よりも 太陽加熱の影響が大きい[35]. そのため,加熱脱水の 影響差異が,表層の反射スペクトルの不均質を生じて いる可能性もある.

あるいは課題項目の1.6で挙げた小惑星(24) Themis, (65) Cybeleのように, Phaethon形成当初より, 含水 鉱物は存在せず, 氷と無水ケイ酸塩鉱物で構成されて いて, 太陽加熱により氷が昇華してしまった可能性も ある. 彗星一小惑星の過渡的天体の形成過程において, 水が液体で存在したのか, 固体で存在したのか, Phaethon探査によって明らかになる. 近日点距離が 非常に小さい枯渇彗星(活動小惑星)である Phaethon ゆえに, 課題項目の1.6を解決する鍵を握る.

2.5 Na不均質が示す部分溶融可能性

ふたご座流星群の最近の観測から、太陽組成に対し て著しいナトリウム(以下Na)の欠乏が報告されてい る(表1)[36,37].他方,別の報告では,太陽組成の倍 程度のNaが報告されている(表1)[38].これらの報告 は、ふたご座流星体がNaに枯渇すること,及び流星 群内でNa濃度が不均質であることを示す.Naは900 K以上で(Naを含む斜長石などから)昇華するため, 太陽輻射熱による加熱温度がこの温度を超える場合は, 太陽加熱の影響が考えられる[37].これまでの流星観 測研究から,近日点距離が0.1 AU以下の流星群(例え ば、散在流星(近日点距離0.03 AU),みずがめ座流星 群(近日点距離0.07 AU)からはNa欠乏が観測されて いるが,近日点距離が0.1 AU以上の流星群からはNa 欠乏は観測されていない[37].従って、ふたご座流星

	Geminid	Solar abundance	Geminid (other research)
	(this study)	(Anders & Grevesse 1989)	(Trigo-Rodrìguez et al. 2003)
Fe/Mg	0.43 ± 0.07	0.84	_
Ca/Mg	0.0031 ± 0.0005	0.057	0.017 ± 0.009
Ni/Mg	0.078 ± 0.012	0.046	_
Na/Mg	0.0036 ± 0.0005	0.054	0.10 ± 0.03
Mn/Mg	0.0072 ± 0.0011	0.0090	0.0054 ± 0.0020
Cr/Mg	0.0082 ± 0.0012	0.013	0.0078 ± 0.0035

図1: 部分溶融によりmmからcmのスケールでNa濃度不均質が生じている原始的分化隕石LEW86220ロドラナイト.(a) 偏 光顕微鏡写真(写真幅1.2cm). 金属メルト, Naに富むケイ酸塩メルト及びNaに乏しい溶け残り固相がmmからcmの スケールで共存する.(b)(a)の点線で囲まれた部分の元素マッピング図(図幅0.9cm).青(Na)は主に斜長石,赤(Fe) は金属鉄と硫化鉄,緑(Mg)は主にかんらん石が分布する[40].

群のNa欠乏は、太陽加熱の影響ではなく、母天体の Phaethonに由来する可能性が高い.

均質な始原的物質から, Naの濃度不均質を生じる ためには、加熱溶融による物質分別が必要である、炭 素質コンドライトの加熱脱水過程では、Na濃度の不 均質は生じないことが実験からわかっている[39]. コ ンドライト中のNaは、主に斜長石に含まれるため、 斜長石の存在度が不均質になることでNa不均質が生 じる[40, 41]. コンドライト隕石が1000度程度の加熱 で部分的に溶融すると、低融点のFe-Ni-S金属メルト とNaやKに富むケイ酸塩メルトの二種類が生じ、溶 け残り部分はMgに富むかんらん石や輝石を含むこと が実験岩石学的にわかっている、この溶融分別現象に 伴い、Naに富む溶融液相とNaに乏しい溶け残り固相 が生成し、結果としてmm-cmスケールでNa不均質 が生じることが原始的分化隕石の分析から示されてい る[40-47](図1). ふたご座流星群の粒子サイズは1-10 mmであるため[31]、ふたご座流星群で観測されたNa 不均質はmm-cmのスケールで生じていると考えられ, 原始的分化隕石で確認されているNa不均質の空間ス ケールと一致する、従って、母天体である Phaethon 上に、同様の空間スケールでNa不均質が存在するこ とが考えられる.

また,小惑星2008TC₃と Almahata Sitta 隕石の研究 から,B(F)型天体一分化隕石(ユレイライト)との関 連が示唆されている.ユレイライトはかんらん石の集 積岩であり,部分溶融液が分別した溶け残り固相に相 当すると考えられている.Almahata Sitta 隕石中に, コンドライト(\approx 太陽組成)に比べNaに枯渇する溶け 残り固相であるユレイライトと、コンドライトがcm スケールで混在することから、小惑星2008TC₃にも、 Phaethonと同様にNa不均質が存在した可能性が高い. Almahata Sitta隕石の母天体であったB(F)型小惑星 2008TC₃は地球に衝突して観測は不可能である。 Phaethonの探査により、B(F)型天体の物質不均質性、 加熱変成度合(加熱脱水、部分溶融)、氷の存在有無な ど、天文学、隕石学、太陽系科学における最先端の重 要課題解明が可能になる。

3. 探査の科学目標

小惑星 Phaethon 及び関連天体の科学的意義と特異 性を最大限に生かし、太陽系科学の本質的課題解決に 迫るミッションを目指す.大きい軌道傾斜角により生 じる探査工学的な制約を考慮して,探査手法の可能性 を段階的に示し、それぞれの科学目標を示す.

3.1 フライバイ観測

Phaethon表層の組成不均質性と形状観測.彗星活 動がある場合は、ダストテイル(あるいは周辺ダスト) 及び噴出ガスの物理・化学と特性の観測,軌道要素の 詳細観測.また,軌道計画上,2005UD及び1999YC のマルチフライバイ観測が可能な場合は,同様の観測 を2005UD及び1999YCに対しても行う.複数の関連 天体の表層観測は,Phaethonの内部構造・組成探査 と等価である.

3.2 インパクタによる衝突及びフライバイ観測

上記のフライバイ観測後に,内部構造及び組成の観 測を行うために,インパクタによる衝突を行う.衝突 後に,ダストの物理・化学特性を(後続衛星にて)その 場観測を行う.インパクタによる衝突は,彗星活動の 弱いPhaethonのダスト発生を促す目的のためでもあ る.

3.3 サンプルリターン、インパクタによる衝突、 及びフライバイ観測

上記のインパクタによる衝突,及びフライバイ観測 に加え、ダストを採集し、サンプルリターンを行う. リターンサンプルの鉱物分析により、Phaethon物質 の正確な同定、物質の不均質性、分化(加熱)過程によ る影響評価(Naなどの揮発性成分の挙動)を行う.また、 酸素同位体比分析により地球近傍小惑星の起源特定が 可能になる.リターンサンプルには、コンドライトよ り始原的な物質(彗星様物質)から、始原的物質が太陽 加熱を受けた物質、部分溶融を経たエコンドライト的 物質などが含まれることが期待される.太陽系形成史 における、物質分化の分岐点に相当する主要プロセス や分化のメカニズムを解明するための複数の手掛かり が同時に得られる可能性が高く、少量のサンプルから 複数の科学目標を同時に達成できる.

4. 探査の観測内容

3節で挙げた複数の探査手法可能性を視野に入れ, 小惑星 Phaethon 及び関連天体の多角的観測・分析を 計画している. (1)(2)及び(4)はフライバイ探査で, (2)及び(3)はインパクタによる衝突後のフライバイ観 測で, (5)はサンプルリターン探査(衝突前 and/or 衝 突後)でそれぞれ行う. Phaethonの関連天体である小 惑星 2005UD 及び1999YCのマルチフライバイ観測が 可能な場合, (1)及び(4)の観測を行う.

- (1) 固体表層の形状及び組成の観測(可視域単バンド カメラによる地形観測,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及びGRSによる表層の元素 分布測定)
- (2) 周辺のダスト及びガスの物理・化学特性の観測(ダ ストモニターによるダストの密度・粒径分布測定,

ガスアナライザ, 質量分析器によるガス・ダスト の組成分析)

- (3) 内部構造及び組成の観測(インパクタによる衝突)
- (4) 軌道要素の詳細観測
- (5) リターンサンプルの分析(鉱物組織・組成分析, 元素組成分析,同位体組成・同位体年代分析,酸 素同位体比分析,希ガス分析,宇宙線照射履歴分 析など)

5. 惑星探査の長期的展望に於ける 本提案の意義と位置付け

小惑星とは、太陽系初期にガスとチリから構成され る原始太陽系星雲から、惑星や衛星が形成・配置する 過程で、惑星に成りそこなった天体であり、太陽系惑 星の形成過程解明の鍵を握る.しかし現状、小惑星の 起源、形成過程、形成後の進化過程については、よく わかっていない.これまでの小惑星探査の成果や隕石 分析や望遠鏡観測結果に基づき、太陽系形成過程に関 する最新の概念や仮説を実証するために、最適の小惑 星を標的に、遠隔観測、着陸観測、サンプル採取を行 うことが、これからの小惑星探査の目指すべき姿と考 える.

Phaethon 及び関連天体(PGC)は、これまでの隕石 研究、流星研究、小惑星の望遠鏡観測から積み上げた 研究成果の融合により、探査の科学目標や科学シナリ オを特定できる点で、発見型の小惑星探査とは一線を 画す. PGCは太陽系科学の本質的課題と密接に関連し, 天文学, 天体力学, 小惑星・彗星科学, 隕石学, 実験 岩石学などの惑星科学の多分野に横断的な本質的研究 課題を解明する鍵を握る天体群である[48, 49]. また、 PGCの場合は、流星体観測から元素組成の情報が得 られているため、反射スペクトルと元素濃度の双方が 揃っている貴重な研究例である[50].従って、 PhaethonあるいはPGC探査により、上記の複数の科 学目標の同時達成が可能であり、Phaethonは最適か つ理想的探査標的天体である. このようなは科学的効 率の高い探査は、他の天体では不可能で、Phaethon という特異な天体ゆえに実現可能である[51].また, Phaethonは小惑星パラスの分裂破片の可能性がある ため、メインベルトまで行かずに、メインベルト小惑 星の探査が実現可能である点も特筆すべきである.

わが国では、はやぶさ探査の成功に引き続き、はや



図2: (a)黄道面に投影したPhaethon軌道,地球軌道,及びフライバイ探査機の軌道例.(b)黄道面に垂直な断面から見た Phaethon軌道と地球とフライバイ探査機の軌道例.フライバイ探査は黄道面とPhaethon軌道との交点(□点)で行う. □点では、地球は毎年12月中旬この点を通過し、Phaethonのダストスワームであるふたご座流星群に遭遇する.

ぶさ2計画が進められている.これらの経緯を踏まえ, 日本の固体惑星探査の長期的展望の中で,小型一中型 プログラムによる小惑星探査を日本の強みとし,小惑 星探査の分野で今後も世界を牽引する存在を目指すこ とが望ましいと考える.従って,はやぶさ及びはやぶ さ2で培った工学的技術と理学的知見を継続的に発展 させていくと同時に,発見型の小惑星探査から,より 科学目標を絞った「戦略的小惑星探査」を実現する上で, Phaethon探査は重要なマイルストーンとなると確信 する.また,Phaethon探査は,探査科学と従来の地 球惑星科学の多岐に渡る手法を有機的にリンクし,分 野を横断して相乗効果を上げることが期待できること も特筆すべきことである.

6. 実現に向けて必要となる技術課題

6.1 軌道計画

地球軌道と1.4年周期で会合するため、一回の探査 で複数回のフライバイ観測が可能である.従って、軌 道計画の観点で可能であれば、これらの関連小惑星も 合わせてマルチフライバイ観測を行う計画である.現 在、深宇宙探査技術実験ミッションDESTINY (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage)級の探査機を利用 した探査実現性検討を進めている.Phaethonは軌道 傾斜角が大きいため、フライバイ探査は黄道面と Phaethon軌道との交点で行う.探査機側は黄道面内 にいる状態で、地球出発後に地球とは位相をずらし、 Phaethonと上述の点で会合できるようにタイミング をはかる(図2).

フライバイ探査での会合点では、探査機と Phaethonとの相対速度は約30 km/sと大きい. イン パクタによる衝突やサンプルリターン探査の場合。相 対速度を10 km/s程度まで下げる必要があり、 Phaethonと同じ軌道面に探査機を投入する必要があ る、そのためには、地球との相対速度を上げ、地球ス イングバイで軌道面を変える必要がある.軌道面を 22度傾けるためには、地球との相対速度(V_∞)が約11 km/sにする必要があるが、これを実現するためには 金星スイングバイあるいはイオンエンジンを用いるこ とになる、その場合、探査機規模としてはDESTINY 級で可能かもしれないが、イプシロン級の打ち上げ機 では厳しく、打ち上げ時に惑星間に脱出させてくれる 規模の打ち上げ機会が必要となる。また、他の探査と の打上げ機会共有があれば、小型プログラムでも可能 である.

PhaethonはNASAのDeep Impactミッションや OSIRIS-Rexミッションの候補天体であり[52-53], 衝 突観測については先行研究の検討内容も考慮する[52].

6.2 搭載機器検討

過去あるいは現在進行中の彗星探査(Giotto, Rosetta, Stardust, Deep Impactなど)や小惑星探査 (NEAR, はやぶさ, はやぶさ2, OSIRIS-Rexなど)の 搭載機器で, Phaethon探査に適した機器を検討中で ある.小型プログラムでの搭載可能性を念頭に,機器 の選定や検討を進める予定である.

6.3 サンプルリターン方法

Phaethonは上記の会合地点(1AU)では彗星活動が 活発でないため、ダストトレイルの密度が低いことが 予測される.従って、能動的衝突あるいは破壊により、 ダスト生成を促す必要があるかもしれない[50,54]. 方法としては、一回の探査で2機の小型衛星を打ち上 げ、一機目でフライバイ観測後にPhaethonに衝突させ、 二機目でダストサンプルリターンを行う.あるいは、 ダストのその場観測を行うなど、最適のミッションデ ザインについて、今後検討を進める予定である.また、 国内外のPhaethon研究の専門家に協力を仰ぎ、地上 望遠鏡や衛星搭載望遠鏡によるPhaethonの継続的観 測を行う計画も検討している.

参考文献

- [1] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
- [2] Tholen, D. J., 1984, Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tucson.
- [3] Bus, S. J. and Binzel, R. P., 2002, Icarus 158, 146.
- [4] Jenniskens, P. et al., 2009, Nature 458, 485.
- [5] Bischoff, A. et al., 2010, Met. Planet. Sci. 45, 1638.
- [6] Gaffey, M. J. et al., 1993, Meteoritics 28, 161.
- [7] Hiroi, T. et al., 1993, Science 261, 1016.
- [8] Hiroi, T. et al., 1996, Met. Planet. Sci. 31, 321.
- [9] Licandro, J. et al., 2007, Astronomy & Astrophysics 461, 751.
- [10] Hsieh, H. H. and Jewitt, D., 2006, Science 312, 561.
- [11] Jewitt, D. et al., 2009, Astron. J. 137, 4313.
- [12] Jewitt, D. et al., 2011, Astrophys. J. Lett. 733, L4.
- [13] Campins, H., 2010, Nature 464, 1320.
- [14] Rivkin, A. S. and Emery, J. P., 2010, Nature 464, 1322.
- [15] Licandro, J. et al., 2011, Astron. Astrophys. 525, A34.

- [16] Jenniskens, P., 2008, Earth Moon Planets 102, 505.
- [17] Zolensky, M. et al., 2006, Science 314, 1735.
- [18] Green, S. F. et al., 1985, MNRAS 214, 29.
- [19] Luu, J. X. and Jewitt, D. C., 1990, Astron. J. 99, 1985.
- [20] Whipple, F. L., 1983, IAU Circular, 3881.
- [21] Williams, I. P. and Wu, Z., 1993, MNRAS 262, 231.
- [22] Ohtsuka, K. et al., 2006, Astronomy & Astrophysics 453, L25.
- [23] Jewitt, D. and Hsieh, H. H., 2006, Astron. J. 132, 1624.
- [24] Kasuga, T. and Jewitt, D., 2008, Astron. J. 136, 881.
- [25] de Léon, J. et al., 2010, Astronomy & Astrophysics 513, A26.
- [26] Cochran, A. L. and Barker, E. S., 1984, Icarus 59, 296.
- [27] Gustafson, B. A. S., 1989, Astronomy & Astrophysics 225, 533.
- [28] Chamberlin, A. B. et al., 1996, Icarus 119, 173.
- [29] Urakawa, S. et al., 2002, IAU Collq. 181, 83.
- [30] Hsieh, H. H. and Jewitt, D., 2005, Astrophys. J. 624, 1093.
- [31] Borovička, J. B. et al., 2010, Proc. IAU Symp. 263, 218.
- [32] Jewitt, D. and Li, J., 2010, Astron. J. 140, 1519.
- [33] Kinoshita, D. et al., 2007, Astronomy & Astrophysics 466, 1153.
- [34] Burbine, T. H. et al., 2008, Rev. Mineral & Geochem. 68, 273.
- [35] Ohtsuka, K. et al., 2009, Publ. Astron. Soc. Japan 61, 1375.
- [36] Kasuga, T. et al., 2005, Astronomy & Astrophysics 438, L17.
- [37] Kasuga, T. et al., 2006, Astronomy & Astrophysics 453, L17.
- [38] Trigo-Rodriguez, J. M. et al., 2003, Met. Planet. Sci. 38, 1283.
- [39] Nakato, A. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 855.
- [40] Arai, T. et al., 2012, Lunar Planet. Sci. XXXXIII, abstract #2932.
- [41] Arai, T. et al., 2012, Asteroids, Comets, Meteors 2012, abstract #6220.
- [42] Takeda, H. et al., 2000, Geochem. Cosmochem. Acta 64, 1311.
- [43] McCoy, T. et al., 2006, Planetary materials: Review in

mineralogy 36.

- [44] Arai, T. et al., 2008, Lunar Planet. Sci. XXXIX, abstract #2465.
- [45] Day, J. M. D. et al., 2009, Nature 457, 179.
- [46] Shearer, C. K. et al., 2008, Am. Mineral. 93, 1937.
- [47] Shearer, C. K. et al., 2010, Geochem. Cosmochem. Acta 74, 1172.
- [48] 荒井朋子,他,2010,「月惑星探査の来たる10年」 第一段階パネルへの意見書.
- [49] 荒井朋子,他,2011,「月惑星探査の来たる10年」 第二段階パネルへの提案書.
- [50] 春日敏測, 2006, 遊星人 15, 94.
- [51] 圦本尚義,他,2011,「来る10年検討第一段階: 小天体パネルからの報告(平成23年1月20日)」.
- [52] Belton, M. J. S. and A'Heam, M. F. A., 1999, Ads. Space Res. 24, 1167.
- [53] Lauretta, D. S., et al., 2012, Lunar Planet. Sci. XXXXIII, abstract #6291.
- [54] Kasuga, T. et al., 2006, MNRAS 373, 1107.