

## B. ミッション提案

### (B1) 提案タイトル

小惑星 Phaethon 探査提案

### (B2) 代表者（氏名・年齢・所属（連絡先））・惑星探査（及び宇宙開発）に係った経験

荒井 朋子（千葉工業大学惑星探査研究センター (tomoko.arai@it-chiba.ac.jp)・かぐや搭載 LISM Co-I, かぐや搭載 GRS Co-I, かぐや衛星ミッション系、アポロサンプル分析、国際宇宙ステーション米国生命科学与圧実験棟・生命科学グローブボックス・人工重力発生装置の開発（SRR から PDR まで）及びシステムインテグレーション、国際宇宙ステーション日本与圧実験棟きぼう-米国実験装置(Human Research Facility 及び Minus Eighty degree Celsius Laboratory Freezer for ISS) インタフェース適合試験ディレクター。

### (B3) 共同提案者（氏名・年齢・所属（連絡先））・惑星探査に係った経験

春日敏測（国立天文台 (toshi.kasuga@nao.ac.jp)）

大塚勝仁（東京流星観測網 (ohtsuka@jb3.so-net.ne.jp)）

中村智樹（東北大学大学院理学系研究科 (tomoki@m.tohoku.ac.jp)）・NASA スターダスト初期分析/詳細分析、NASA オデッセイ彗星探査申請準備チーム、ESA マルコポーロ小惑星探査機器分析チーム、はやぶさキュレーション、初期分析)

中藤亜衣子（東北大学大学院理学系研究科 (a9sd6007@s.tohoku.ac.jp) はやぶさ初期分析)

中村良介（産業技術総合研究所 (r.nakamura@aist.go.jp)・かぐや搭載 LISM Co-I, はやぶさ搭載 AMICA Co-I, はやぶさ 2 搭載 AMICA PI)

伊藤孝士（国立天文台 (tito@cfca.nao.ac.jp)）

渡部潤一（国立天文台 (jun.watanabe@nao.ac.jp)）

小林正規（千葉工業大学惑星探査研究センター (kobayashi.masanori@it-chiba.ac.jp)）・かぐや搭載ガンマ線検出器 Co-I（機器開発、運用、データ解析）、ベピコロンボ搭載水星ダストモニター Co-I（機器開発、校正実験）、SELENE-2 ローバー搭載 LIB-S2 PI、SELENE-2 オービター搭載ダストモニター-LDM Sub-PI（仕様検討、機器開発）、はやぶさ 2 搭載 LIDAR Co-I（校正実験、仕様検討）

川勝康弘（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙航行システム研究系

(Kawakatsu.Yasuhiro@jaxa.jp)・SELENE システム、あかり、Planet-C, はやぶさ, はやぶさ 2、小型衛星プロジェクト Destiny)

中村圭子（NASA Johnson Space Center (keiko.nakamura-1@nasa.gov)）・ESA Rosetta 搭載・彗星塵観察顕微鏡 MIDAS 機器テスト・データ評価・比較試料データベース作成、NASA 彗星探査機 STARDUST サンプルリターンカプセル回収チーム、STARDUST 彗星塵試料初期分析チーム、STARDUST 彗星塵キュレーション、NASA OSIRIS-REx キュレーション Deputy Lead OSIRIS-REx サンプルサイト選定委員会 Deputy Lead、OSIRIS-REx サンプル分析チーム、はやぶさ 2 サンプルサイエンスチーム)

小松睦美（早稲田大学高等研究所 (komatsu@aoni.waseda.jp) スターダストサンプル分析)

千秋博紀（千葉工業大学惑星探査研究センター (senshu@perc.it-chiba.ac.jp)）

和田浩二（千葉工業大学惑星探査研究センター (wada@perc-it-chiba.ac.jp) はやぶさ 2 搭載 SCI Co-I)

石橋高（千葉工業大学惑星探査研究センター (ko.ishibashi@perc.it-chiba.ac.jp)）

亀田真吾（立教大学物理学科 (kameda@rikkyo.ac.jp)・かぐや搭載 UPI Co-I, Beppi Colombo/MMO/MSASI システム)

大野宗佑（千葉工業大学惑星探査研究センター (ohno@perc.it-chiba.ac.jp)）

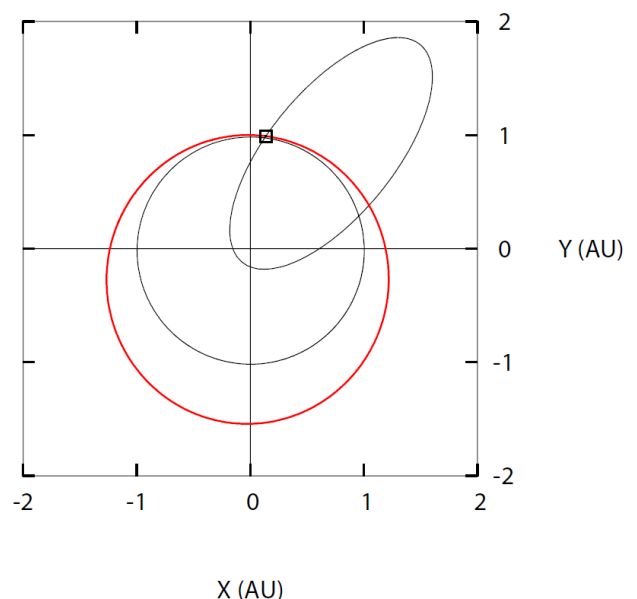
石丸亮（千葉工業大学惑星探査研究センター (ishimaru.ryo@it-chiba.ac.jp)）

## (B4) 提案するミッションの概要(A4 一枚以内)

### ■ 提案ミッション計画概要

Destiny 級の小型探査プログラムにより、地球近傍小惑星 3200Phaethon (以下 Phaethon) のフライバイ観測及びサンプルリターンを行う。Phaethon は、直径  $4.7 \pm 0.5$  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 [e.g. Green et al., 1985]。アルベドは  $0.11 \pm 0.02$  と低く [Green et al., 1985]、青いスペクトルを持つ B(または F)型小惑星である [e.g. Tholen, 1985; Bus & Binzel, 2002]。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。また、小惑星 2005UD、小惑星 1999YC、及び双子座流星群は、Phaethon と同一の軌道要素を持ち (PGC; Phaethon-Geminid Complex [Otsuka et al., 2006])、Phaethon の分裂破片である可能性が高い。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のフライバイ観測も合わせて行う。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 1)。

サンプルリターン探査については、いくつかの課題があるため、現在探査方法の検討を行っている。一つ目の課題は、Phaethon の軌道傾斜角が大きく (22.2 度)、黄道面での会合速度が約 30km/s と大きくなり、ダストサンプルの捕獲機構の検討が必要となる。二つ目の課題は、Phaethon は彗星活動が活発でないため (詳細は下記を参照のこと)、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ことである。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、2 機目でダストサンプルリターンを行う。あるいは、二機目は 1.4 年後に打ち上げるなど、最適なミッションデザインについて、今後検討を進める。



**図 1** 黄道面に投影した Phaethon (楕円) と地球 (黒の円) とフライバイ探査機 (赤の円) の軌道例。□点はこれらの交点で、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双子座流星群に遭遇する。他方、Phaethon は 1.4 年毎にこの点を通過する。赤の円軌道は黄道面内で、軌道周期は Phaethon と等しいので、Phaethon の毎帰ごとにフライバイが可能であり、複数回フライバイの軌道候補である。

### ■ 提案ミッションの観測内容

本ミッションでは、小惑星 Phaethon の下記項目を明らかにするために、多角的観測・分析を行う。

(1)(2)及び(4)はフライバイ探査で、(2)及び(3)はインパクト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 family 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 (インパクトによる衝突)
- (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)

## **(B5) ミッションの科学目標、および「惑星探査の長期的展望」に於ける本提案の位置づけ**

### **■ ミッションの背景 1 : 小惑星・彗星科学の最新発見と重点課題**

近年の小惑星・彗星探査、隕石研究、望遠鏡観測により、太陽系固体物質進化の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、今後さらなる研究が必要である重点項目を以下に挙げる。

#### **[1] 小惑星物質の加熱の痕跡**

従来、小惑星は太陽系初期の始原物質（溶融や熱変成などの分化過程を経ていない物質）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小惑星イトカワの試料は、約 800 度の加熱を受けた変成度の高い LL6 コンドライト隕石に相当する物質であった [Nakamura et al., 2011]。このことから、小惑星イトカワは、直径 20km 以上の母天体で加熱変成を受けた物質が衝突・破砕を受けた破片が再集積して形成されたことがわかった [Nakamura et al., 2011]。従って、小惑星の構成物質が、どのような分化過程（加熱温度、酸化還元状態など）をどの程度経たものかを正しく理解することは、太陽系の物質分化のプロセスと小惑星の起源を解明するためには極めて重要である。

#### **[2] 小惑星物質の組成不均質**

小惑星 2008TC<sub>3</sub> (直径 2-5m) は 2008 年に地球に落下し、合計 47 個、総重量 3.95kg の Almahata Sitta 隕石として回収された [Jenniskens et al., 2009]。これらの隕石の過半数は、角レキ化したユレイライトで、残りは E コンドライト (EL 及び EH タイプ)、H コンドライト、R コンドライトなど多様な種類のコンドライト隕石である [Bischoff et al., 2010]。Almahata Sitta 隕石の発見により、異種のコンドライトやエコンドライト（分化隕石）が混在する小惑星の存在が明らかになった。また、Kaidun 隕石も同様に、複数種のコンドライト隕石が混合から成り [Zolensky & Izanov, 2003]、一つの小惑星上に異なる分化過程を経た物質が混在する証拠である。従って、小惑星の物質は均質であり、一つの小惑星が一つの隕石タイプに相当するという古典的概念は見直されている。はやぶさのサンプルリターン研究成果と同様に、小惑星は、前世代の母天体で様々な分化過程を経た物質が破壊・再集積して形成されるという概念が新たに確立しつつある。

#### **[3] 隕石種と小惑星スペクトルタイプ相関の不整合**

[2] で挙げた小惑星 2008TC<sub>3</sub> は、落下前の望遠鏡観測により波長 1 ミクロンまでの反射スペクトルが観測されている。太陽に対して青いスペクトルを持ち、B 型あるいは F 型の小惑星に分類される [Jenniskens et al., 2009]。Almahata Sitta 隕石は主にユレイライト隕石から成るが、ユレイライト隕石の母天体は S 型小惑星だと考えられてきた [Gaffey et al., 1993]。B 型または F 型小惑星は、加熱脱水を経た炭素質コンドライト (CI/CM) に相当すると考えられているが [e.g. Licandro et al., 2007]、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。ユレイライトは炭素を多く含むため、B 型や F 型のようにアルベドは低いが、加熱溶融を経た分化隕石であり、B 型、F 型から従来想定される始原的な隕石種ではない。隕石種と母天体のスペクトルタイプ不整合の原因としては、多様な物質が混在する小惑星 2008TC<sub>3</sub> には炭素質コンドライト的物質も存在していたが隕石としては回収されなかった可能性が考えられるが、今のところはっきりしていない。小惑星 2008TC<sub>3</sub> - Almahata Sitta 隕石の研究成果は、「**B(F)型天体—分化隕石とのリンクという新たな可能性**」及び、項目 [1][2] から示唆されるように、「**単一の小惑星上でも、異なるスペクトルタイプの物質が存在する可能性**」が明らかになったという点で、極めて重要である。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。

#### **[4] 彗星⇔小惑星の進化的相関(evolutional link)**

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が彗星活動を見せたり [Hsieh & Jewitt, 2006; Jewitt et al., 2009; 2011]、小惑星で氷や有機物が検知されたり [Campin et al., 2010; Rivkin & Emery, 2010; Licandro et al., 2011] 等、彗星と小惑星の間の過渡的状态 (dormant comet, activated asteroid) が存在することが明らかになってきた。彗星⇔小惑星の進化的相関は、太陽系小天体の起源や進化過程を理解する上で重要な研究課題である。

#### **[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近年見つかっており、親子関係が確実な 7 個は共通して軌道傾斜角が大きい [Jenniskens et al., 2008]。こ

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—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。課題[4]と同様に、流星群⇔彗星⇔小惑星の進化的相関について、今後の研究が必要である。

#### [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 の試料は、主に無水ケイ酸塩鉱物から成り、含水鉱物が含まれなかったことから、彗星では、水質変成が起こっていないことが明らかになった [Zolensky et al., 2006]。このことは、彗星では、水は固体の状態が存在し、ケイ酸塩鉱物とは反応を起こさないため、ケイ酸塩鉱物中に水が含まれないことを意味する。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がある。

また、C型小惑星の(24)Themis(直径 198 km)及び(65)Cybele(直径  $273.0 \pm 11.9$  km)の表層から氷（及び有機物）が観測されており [Campins et al., 2010; Rivikin & Emery, 2010; Licandro et al., 2011]、小惑星でも固体の水が存在する場合もある。課題[4]と関連して、彗星と小惑星の始原度の違いや従来の定義が見直されている。

#### [7] 低温加熱による部分溶融で生じる mm-cm スケールでの Na 不均質

隕石は、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、コンドライトが加熱を受け様々な分化過程を経たエコンドライトに分けられる。エコンドライトは加熱温度により、コンドライトが溶けずに焼結したものの、部分的に溶融したもの、大部分溶融したものが再結晶したものなどがある。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, K, Fe 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。溶け残り固相に相当する隕石（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）が存在するのに対し、ケイ酸塩メルトに対応する隕石が存在しないことが最近までの隕石学の大きな謎であった。

近年、ケイ酸塩メルトに相当する物質が、IAB 鉄隕石中のケイ酸塩包有物 [Takeda et al., 2000] や新種の隕石 [LEW 86220: McCoy et al., 2006; GRA06128/9: Arai et al., 2008; Shearer et al., 2008; Day et al., 2009] として発見され、低温加熱による部分溶融過程が明らかになってきた。これらのケイ酸塩メルトは、共通して Na 濃度が高く（=Na 斜長石に富む）、実験岩石学的予見と調和的である。また、これらの隕石では、Na に富む部分溶融液相と Na に枯渇する溶け残り固相が mm から cm スケールで共存しており（図 2）、低温加熱による部分溶融が、mm-cm スケールでの Na 不均質を生じることを示している。

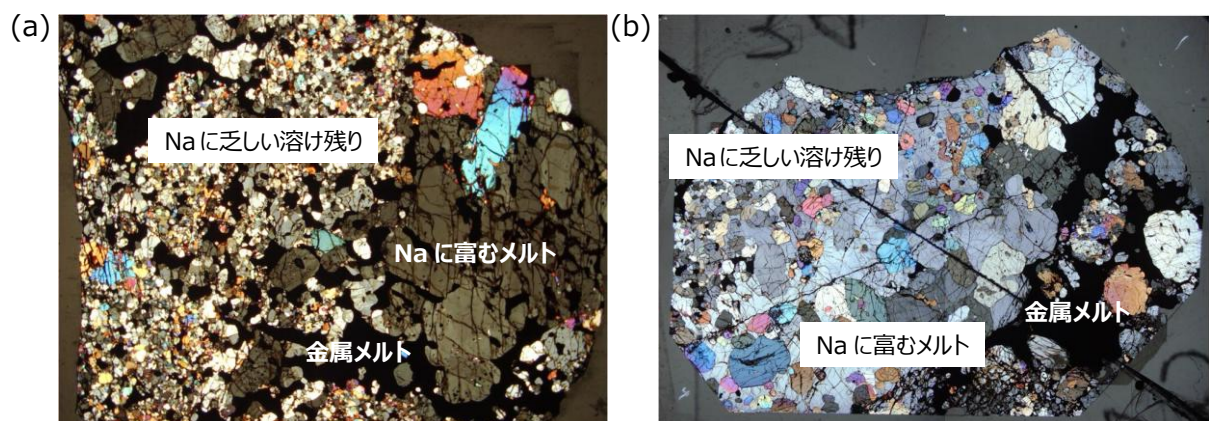


図 2 Na に富むケイ酸塩部分溶融液（メルト）を含む隕石の岩石薄片の偏光顕微鏡写真。金属メルト、Na に富むケイ酸塩メルト及び Na に乏しい溶け残り固相が mm から cm のスケールで共存する。(a) LEW86220 ロドラナイト（写真幅 1.2cm）、(b) Caddo County IAB 鉄隕石中のケイ酸塩包有物（写真幅 2.5cm）。

#### ■ ミッションの背景 2 : Phaethon 及び family 天体の特徴と重要性

小惑星 Phaethon 及び family 天体は、前述の最新の重点課題全て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 family 天体の特徴と意義を前述の重点項目との関連を示しながら述べる。



### [a] 双子座流星群の母天体だが、彗星活動無し。

Phaethon は双子座流星群と同一の軌道要素を持つため、双子座流星群の母天体と考えられている [Whipple, 1983; Green et al., 1985; William & Wu, 1993]。一般的に流星群は彗星由来である一方、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いないため、「枯渇彗星」「岩石彗星」と考えられている [Cochran & Baker, 1984; Gustafson, 1989; Chamberlin et al., 1996; Urakawa et al., 2003; Hsieh & Jewitt, 2005]。一般的な彗星の密度より 2-3 倍大きい Phaethon のバルク密度 ( $2.6 \text{ gcm}^{-3}$ ) は、枯渇彗星であることと調和的である [Borovička et al., 2010]。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は残っている [Jewitt & Li, 2010]。従って、Phaethon は彗星-小惑星の過渡的天体であると共に、流星群の母天体である枯渇彗星（あるいは活動的小惑星）の代表例であり、課題[4]及び[5]の理想的研究対象である。

### [b] Phaethon 及び family 天体物質の不均質性

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 [Licandro et al., 2007]。小惑星 2005UD（直径  $1.3 \pm 0.1 \text{ km}$ , 自転周期 5.24hr） [Ohtsuka et al., 2006; Jewitt & Hsieh, 2006]、及び小惑星 1999YC（直径  $1.4 \pm 0.1 \text{ km}$ , 自転周期 4.50hr） [Kasuga & Jewitt, 2008] は Phaethon と同一の軌道要素を持つため、双子座流星群と同様、Phaethon の分裂（または衝突破壊）破片だと考えられている。2005UD は B（または F）型小惑星、1999YC は C 型小惑星である [e.g. Tholen, 1985; Bus & Binzel, 2002]。青いスペクトルを持つ B/F 型小惑星は太陽系の中で 5% 程度と少なく、その中でも Phaethon は最も青い天体である [Luu & Jewitt, 1990]。B/F 型スペクトルを持つ 2005UD との相関の可能性は高い。2005UD が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 [Kinoshita et al., 2007]。B 型及び F 型は C 型と物質的には類似するが、変成度が異なる。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。Phaethon 及び family 天体のスペクトル多様性は Phaethon の不均質性を支持するものであり、課題[1]及び[2]と密接に関連する。また、B 型のメインベルト小惑星の(2)Pallas が Phaethon と軌道相関を持つことから、Phaethon と Pallas に相関の可能性を示唆する報告もある [de León et al., 2010]。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由来するのかもしれない。

### [c] Phaethon 表層は太陽輻射熱により加熱脱水を受けている？

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 [e.g. Burbine et al., 2008]。B(F)型小惑星は、C 型同様にアルベドが低い、青いスペクトルを持ち、 $0.7 \mu\text{m}$  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 [Hiroi et al., 1993; 1996; Licandro et al., 2007]。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）であることを整合している。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、内部には含水鉱物が存在する可能性がある [Jewitt & Jing, 2010]。近日点距離 ( $0.14 \text{ AU}$ ) では、Phaethon の表面温度は約  $900 \text{ K}$  に上昇するため [Kasuga et al., 2006]、加熱脱水は十分に起こり得る [Ohtsuka et al., 2009]。従って、表層は太陽輻射熱により加熱脱水を受けているが、内部には含水鉱物が存在する可能性は高い。また、Phaethon は自転軸の傾きが大きい、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 [Ohtsuka et al., 2009]。そのため、加熱脱水の影響差異により、表層組成（スペクトルタイプ）が南北半球で異なる可能性もある。

あるいは、[6]で述べたスターダストサンプルや小惑星(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-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。従って、本項目は、近日点距離が非常に小さい軌道を持つ Phaethon 特有の課題であるとともに、課題[1]、[2]、[6]を解決する鍵を握る。

#### [d] 双子座流星群の Na 不均質—Phaethon の部分溶融の可能性

双子座流星群の最近の観測では、他の彗星と異なり、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） [Kasuga et al., 2005; 2006]。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） [Trigo-Rodríguez et al., 2003]。これらの報告は、双子座流星体が 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 900K 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。これまでの流星観測研究から、近日点距離が 0.1AU 以下の流星群（例えば、散在流星（近日点距離 0.03AU）、みずがめ座流星群（近日点距離 0.07AU）からは Na 欠乏が観測されているが、近日点距離が 0.1AU 以上の流星群からは Na 欠乏は観測されていない。従って、双子座流星群の 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、元素濃度の不均質を生じるためには加熱による物質分化が必要である。炭素質コンドライトの加熱脱水過程では、Na 濃度に変化を及ぼさない（= Na の不均質は生じな）ことが実験からわかっている [中藤、未発表データ]。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。課題[7]で示すように、コンドライトの 1000 度程度の加熱による部分溶融で、Na に富むメルトが生じることにより、mm-cm スケールで Na 不均質が生じることが、隕石分析からわかっている。双子座流星群の粒子サイズは 1-10 mm であるため [Borovička et al. 2010]、双子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、隕石から確認された Na 不均質の空間スケールと一致する。

また、課題[2]及び[3]で示したように、B(F)型天体—分化隕石（ユレイライト）とのリンクの可能性が、小惑星 2008TC<sub>3</sub>と Almahata Sitta 隕石の研究から示唆されている。ユレイライトはかんらん石の集積岩であるため、部分溶融を経た溶け残り固相に相当する。コンドライトから Na に富む部分溶融液（斜長石に富む組成）が除去された結果、Na に乏しい溶け残り（斜長石に乏しい組成）が生じるため、ユレイライトはコンドライト（≈太陽組成）に比べ、Na に枯渇する。従って、Phaethon-双子座流星群が Na に枯渇する物質を持つことと調和的である。また、課題[3]で挙げたように、Na に枯渇する溶け残り部分と Na に富む部分溶融液は mm-cm の空間スケールで共存している可能性が高いため、Phaethon-双子座流星群で報告されている mm-cm スケールの Na 不均質も隕石分析と整合する。

Almahata Sitta 隕石の母天体であった B(F)型小惑星 2008TC<sub>3</sub> 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)型天体の物質組成、物質不均質性、分化天体とのリンクなど、隕石学、天文学分野で共に最先端の重要課題を解明する手掛かりが得られる。

表 1. 双子座流星群の元素組成 [kasuga et al. 2005]。太陽組成に比べ Na 欠乏及び不均質が見られる。

	Geminid (this study)	Solar abundance (Anders & Grevesse 1989)	Geminid (other research) (Trigo-Rodríguez 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

#### ■ ミッションの科学目標

上記の Phaethon(及び family 天体)の科学的意義と特異性を最大限に生かし、7つの重要課題の解決を目的とした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、ミッションの科学目標を段階的に示す。

#### [Minimum success]

**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。

#### [Nominal success]

**インパクト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、インパクトによる衝突を行う。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。インパクトによる衝突は、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。

#### [Maximum success]

**サンプルリターン、インパクトによる衝突、及びフライバイ観測：**上記のインパクトによる衝突、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。サンプル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、部分熔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。

### ■ 惑星探査の長期的展望に於ける本提案の位置づけ

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、惑星に成りそとなった天体であり、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 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。小惑星 Phaethon 及び family 天体（Phaethon-Geminid Complex）は、前述の固体惑星科学における最新の重要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小惑星である [荒井他、2010(第一段階パネルへの意見書)]。また、Phaethon-双子座流星群（Phaethon-Geminid Complex）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。従って、Phaethon 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、探査標的として最適の天体である。このような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できるものである。[塚本他、2011（第一段階小天体パネルからの報告）]。

わが国では、はやぶさ探査の成功に引き続き、はやぶさ 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—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わた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。

### (B6) 搭載観測機器の候補、およびミッション科学目標との関係 及び

### (B7) 科学目標の達成に必要な観測精度とカバレッジ（試料回収については取得すべき試料の条件）

(1) 固体表層の形状及び組成の観測（空間分解能：0.1-1 mm/pixel 程度）

(ア) 可視域単バンドカメラ

(イ) 紫外から赤外波長域の反射スペクトル観測用のマルチバンドカメラまたは連続分光カメラ

(ウ) 主要元素分析（Na, Mg, Fe, Ca, K, Al, Si, P, Ti, Cr など）用の XRS

- (I) 主要 (Fe, Ti, K) 及び微量元素分析用の GRS
- (2) ダスト及びガスの物理・化学特性の観測
  - (ア) ダストモニターによるダストの密度・粒径分布測定 (Beppi Columbo 搭載機器を参考)
  - (イ) ダストの組成分析用質量分析器 (Giotto 搭載あるいは Cassini 搭載ダストアナライザを参考)
  - (ウ) ガスアナライザ
- (3) 内部構造及び組成の観測
  - (ア) インパクタによる衝突 (はやぶさ 2 検討のインパクタ、Deep Impact ミッションを参考)
  - (イ) 上記 (2) の機器
- (4) 軌道要素観測による Yarkovsky 効果の観測 (OSIRIS-Rex 搭載機器を参考)
- (5) 回収試料
 

粒径が数ミクロンから数mmサイズの粒子、サンプル回収時に溶融しないことが望ましい。

### (B8) 想定する開発体制

- 全体とりまとめ：荒井朋子
  - 探査機の軌道計画、ミッションデザイン、システム設計：川勝康弘、伊藤孝士、大塚勝仁
  - フライバイ観測のデータ解析：春日敏測、伊藤孝士、渡部潤一、大野宗佑、石橋高、荒井朋子
  - Phaethon の望遠鏡同時観測：春日敏測、伊藤孝士、渡部潤一
  - リターンサンプル分析：中村智樹、中村圭子、小松睦美、中藤愛子、荒井朋子
  - 観測機器、衝突装置、サンプルリターン装置の設計、選定、開発：小林正規、亀田真吾、千秋博紀、和田浩二、石丸亮
- メーカーの検討はまだ行っていない。

### (B9) 実現に向けて必要となる技術課題

#### ■軌道計画

Phaethon は軌道傾斜角が大きいため、軌道計画には制約があり、現在検討を進めている。探査機との相対速度をサンプルリターンに適した 10km/s 程度にするためには、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 ( $V_{\infty}$ ) が約 11km/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。他の探査との打ち上げ機会共有があれば、小型プログラムでも可能である。

#### ■サンプルリターン方法

サンプルリターンについては、いくつかの課題があり、現在検討中である。一つ目の課題は、Phaethon 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。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、2 機目でダストサンプルリターンを行う。あるいは、二機目は 1.4 年後に打ち上げるなど、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。すばる望遠鏡や衛星搭載の望遠鏡などを使用して、Phaethon の継続的観測を行う計画も検討している。二つ目の課題は、黄道面での会合速度が約 30km/s と早いため、従来のサンプル回収方法が適用できない (サンプル捕獲時に溶融してしまうなど) 可能性が高いため、サンプル回収方法あるいはサンプル回収時の軌道計画の検討が必要である。

#### ■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) に搭載された機器の中から、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。



## (B10) 参考文献提案書内容の根拠となる文献資料 (論文・報告書など)

- Arai, T., Tomiyama, T., Saiki, K. and Takeda, H. (2008) Unique achondrites GRA 06128/06129: Andesitic partial melt from a volatile-rich parent body. *Lunar Planet. Sci.* XXXIX, abstract #2465.
- 荒井朋子, 他 (2010) 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, 「月惑星探査の来たる 10 年」第一段階パネルへの意見書.
- Bischoff, A., Horstmann, M., Pack, A., Laubenstein, M. and Haberer S. (2010) Asteroid 2008 TC3-Almahata Sitta: A spectacular breccias containing many different ureilitic and chondritic lithologies. *Met. Planet. Sci.* 45, 1638-1656.
- Borovička, J. B., Koten, P., Spurný, Čapek, D., Šrbeny, L., and Štork, R. (2010) Material properties of transition objects 3200 Phaethon and 2003 EH1. *Proc. IAU Symp.* 263, 218-222.
- Burbine, T. H. et al. (2008) *Rev. Mineral & Geochem.* 68, 273.
- Bus, S. J. and Binzel, R. P. (2002) Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey A Feature-Based Taxonomy. *Icarus* 158, 146-177.
- Campins, H., Hargrove, K., and Pinilla-Alonso, N. (2010) Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis. *Nature* 464, 1320-1321.
- Chamberlin, A. B., McFadden, L. Schulz, R., Schleicher, D. G. and Bus, S. J. (1996) 4015 Wilson-Harrington, 2201 Oljato, and 3200 Phaethon: Search for CN Emission. *ICARUS* 119, 173-181.
- Cochran, A. L. and Barker, E. S. (1984) Minor planet 1983 TB- A dead comet? *ICARUS*, 59, 296-300.
- Day, J.M.D et al. (2009) Early formation of evolved asteroidal crust. *Nature* 457, 179-183.
- de León, J., Campins, H., Tsiganis, K., Morbidelli, A., and Licandro, J. (2010) Origin of the near-Earth asteroid Phaethon and the Geminids meteor shower. *Astronomy & Astrophysics* 513, A26.
- Gaffey, M. J., Burbine, T. H., and Binzel, R. P. (1993) Asteroid spectroscopy: Progress and perspectives. *Meteoritics* 28, 161-187.
- Green, S. F., Meadows, A., and Davis, J. K. (1985) Infrared observation of the extinct cometary candidate minor planet (3200) 1983TB. *Mon. Not. R. astr.Soc.* 214, Short Communication, 29p-36p.
- Gustafson, B. A. S. (1989) Geminid meteoroids traced to cometary activity on Phaethon. *Astronomy & Astrophysics* 225, 533-540.
- Hiroi, T., Zolensky, M. E., Pieters, C. M., Lipschutz, M. E. (1993) Evidence of thermal metamorphism of the C, G, B, and F asteroids. *Science* 261, 1016-1018.
- Hiroi, T., Zolensky, M. E., Pieters, C. M., Lipschutz, M. E. (1996) Thermal metamorphism of the C, G, B, and F asteroids seen from 0.7  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , and UV absorption strengths in comparison with carbonaceous chondrites. *Met. Planet. Sci.* 31, 321-327.
- Hsieh, H. H. and Jewitt, D. (2005) Search for activity in 3200 Phaethon. *The Astrophysical Journal*, 624:1093-1096.
- Hsieh, H. H. and Jewitt, D. (2006) A population of comets in the main asteroid belt. *Science* 312, 561-563.
- Jenniskens, P. (2008) Mostly dormant comets and their disintegration into meteoroid streams: A review. *Earth Moon Planets* 102, 505-520.
- Jenniskens, P. et al. (2009) The impact and recovery of asteroid 2008 TC<sub>3</sub>, *Nature* 458, 485-488.
- Jewitt, D. and Hsieh, H. H. (2006) Physical observation of 2005 UD: A mini-Phaethon.
- Jewitt, D., Yang, B., Haghighipour, N. (2009) Main-belt comet P/2008 R1 (Garradd). *Astron. J.* 137, 4313-4321.
- Jewitt, D. and Li, J. (2010) Activity in Geminid parent (3200) Phaethon. *The Astronomical Journal*, 140:1519-1527.
- Jewitt, D., Weaver, H., and Mutchler, M. et al. (2011) Hubble space telescope observations of main belt comet (596) Scheila. *Astrophys. J. Lett.* 733, L4.
- Kasuga, T., Watanabe, J., Ebizuka, N. (2005) A 2004 Geminid meteor spectrum in the visible-ultraviolet region. *Astronomy & Astrophysics* 438, L17-L20.
- Kasuga, T., Yamamoto, T., Kimura, H., and Watanabe, J. (2006) Thermal desorption of Na in meteoroids: Dependence on perihelion distance of meteor showers. *Astronomy & Astrophysics* 453, L17-L20.
- Kasuga, T. and Jewitt, D. (2008) Observations of 1999 YC and the breakup of the Geminid stream parent. *The Astronomical Journal*, 136:881-889.
- Kinoshita, D., Ohtsuka, K., Sekiguchi, T., Watanabe, J., Ito, T., Arakida, H., Kasuga, T., Miyasaka, S., Nakamura, R., and Lin H.-C. (2007) Surface heterogeneity of 2005 UD from photometric observations. *Astronomy & Astrophysics* 466, 1153-1158. *The Astronomical Journal*, 132:1624-1629.
- Licandro, J., Campins, H., Mothé-Diniz, T., Pinilla-Alonso, N., and de León, J. (2007) The nature of comet-asteroid transition object (3200) Phaethon. *Astronomy & Astrophysics* 461, 751-757.
- Licandro, J., Campins, H., Kelley M. et al. (2011) (65) Cybele: detection of small silicate grains, water-ice, and organics. *Astron. Astrophys.* 525, A34.
- Luu, J. X. and Jewitt, D. C. (1990) Charge-coupled device spectra of asteroids. I-Near-earth and 3:1 resonance asteroids. *Astronomical Journal* 99, 1985-2011.
- McCoy T. et al. (2006) Planetary materials: Review in mineralogy 36.
- Nakamura, T. (2011) Itokawa dust particles: A direct link between s-type asteroids and ordinary chondrites. *Science* 333, 1113-1116.
- Ohtsuka, K., Sekiguchi, T., Kinoshita, D., Watanabe, J., Ito, T., Arakita, H., and Kasuga T. (2006) Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon? *Astronomy & Astrophysics* 453, L25-L28.
- Ohtsuka, K., Nakato, A., Nakamura, T., Kinoshita, D., Ito, T., Yoshikawa, M., and Hasegawa, S. (2009) Solar-radiation heating effects on 3200 Phaethon. *Publ. Astron. Soc. Japan* 61, 1375-1387.
- Rivkin, A. S., and Emery, J. P. (2010) Detection of ice and organics on an asteroidal surface. *Nature* 464,

- 1322-1323.
- Shearer, C. K. et al. (2008) A unique glimpse into asteroidal melting processes in the early solar system from the Graves Nunatak 06128/06129 achondrites. *Am. Mineral.* 93, 1937-1940.
- Takeda, H., Bogard, D. D., Mittlefehldt, D. W., and Garrison, D. H. (2000) Mineralogy, petrology, chemistry, and  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  and exposure ages of the Caddo County IAB iron: Evidence for early partial melt segregation of a gabbro area rich in plagioclase-diopside, *Geochem, Cosmochem. Acta* 64, 1311-1327.
- Tholen, D. J. (1985) *IAUC*, 4034.
- Torigo-Rodríguez, J. M., Llorca, J., Borovička, J. B., et al. (2003) Chemical abundances determined from meteor spectra: I Ratios of the main chemical elements. *Met. Planet. Sci.* 38, 1283
- Urakawa, S., Takahashi, S., Fujii, Y., Ishiguro, M., Mukai, T., and Nakamura, R. *IAUC* 181, 414p. vol15, p.83.
- Whipple, F. L. (1983) *IAU Circular*, 3881. Cochran, A. L. and Barker, E. S. (1984) Minor planet 1983TB: A dead comet? *ICARUS* 59, 296-300.
- Williams, I. P. and Wu, Z. (1993) The Geminid meteor stream and asteroid 3200 Phaethon. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices (MNRAS)*, 262, 231-248.
- 坂本尚義、荒川政彦、渡部潤一、伊藤孝士「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)」
- Zolensky, M. E. and Ivanov, A. (2003) The Kaidun microbreccia meteorite: A harvest from the inner and outer asteroid belt. *Chemie der Erde-Geochemistry* 63, 185-246.
- Zolensky, M. et al. (2006) Mineralogy and petrology of comet 81p/wild 2 nucleus samples. *Science* 314, 1735-1739.

(以上)