

深宇宙探査技術実証機 DESTINY⁺による 小惑星 Phaethon フライバイ探査計画

荒井朋子¹⁾・川勝康弘・豊田裕之・西山和孝・船木一幸・岩田隆浩²⁾・船瀬龍³⁾
日本惑星科学会Phaethon探査検討チーム

¹⁾ 千葉工大 惑星探査研究センター, ²⁾ JAXA, ³⁾ 東大・航空宇宙

Asteroid Phaethon Fly-by mission with DESTINY⁺

Tomoko ARAI¹⁾, Yasuhiro KAWAKATSU, Hiroyuki TOYOTA, Kazutaka NISHIYAMA,
Kazuyuki FUNAKI, Takahiro IWATA²⁾, Ryu FUNASE³⁾,
and Phaethon mission study team of The Japanese Society for Planetary Sciences

¹⁾ Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ²⁾ ISAS, JAXA,
³⁾ The University of Tokyo

Abstract

Asteroid 3200 Phaethon is a parent body of the Geminids meteor shower. While most of the parent bodies of meteor showers are comets, cometary activity of Phaethon has only been reported near its perihelion at 0.14 AU. Phaethon is likely a comet to asteroid transitional body. Na depletion is reported from visible spectroscopic study of the ground observation of the Geminids meteoroid. Since an expected temperature by solar heating at 0.14 AU is not high enough to sublimate Na from Na-bearing phases, the observed Na depletion is likely derived from surface materials of the parent Phaethon. Na depletion does not occur in chondritic materials, but does occur in differentiated chondrites, such as primitive achondrites, which are subject to melting and segregation of Na-rich silicate melts. Phaethon may hold a signature of comet-asteroid transition body and primitive-differentiated material. Because of its small perihelion distance, dehydration of the surface material by solar heating is expected, but some primitive, hydrous material may still reside in its interior. Phaethon is an ideal body to understand the thermal evolution of planetesimals in the solar system history. Further, Phaethon is the largest body among potentially hazardous asteroids (PHAs), of which cross the Earth's orbit. Thus, Phaethon is a critical mission target both in the context of science and planetary defense. Here, we propose a flyby mission to Phaethon and its related asteroids with DESTINY.

Key Words: Phaethon, DESTINY, PROCYON-mini, Fly-by, Comet-asteroid transition

1. 背景と目的

近年の小惑星・彗星探査、隕石研究、望遠鏡観測により、太陽系小天体に関する古典的概念は見直されつつある。従来、小天体は太陽系初期の始原物質（溶融や熱変成などの分化を経ない物質）から成り、組成的に概ね均質であると考えられ、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[1, 2]。しかし、はやぶさが持ち帰った試料分析の結果、小惑星イトカワ（540m×270m×210m）は、直径20km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[3]。また、2008年に地球に衝突した小惑星2008TC3(直径2-5m)の天文観測及び落下隕石(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, R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]。

近年の地上望遠鏡やハubble望遠鏡観測では、小惑星軌道を持つ彗星や彗星活動を見せる小惑星が小惑星帯で発見され[6-8]、小惑星表面に氷や有機物が見つかる[9-11]。一般的には彗星起源である流星群の中には、ふたご座流星群、四分儀座流星群、おうし座南群など母天体が小惑星のものもある。彗星と小惑星の中間的天体の存在により、古典的な彗星と小惑星の区別があいまいになっている。

従来の太陽系小天体の理解は、限られたデータやサンプリングバイアスから単純化できていたが、地上観測、彗星・小惑星探査、隕石分析のデータ量の増加及び各データの融合により、多様な実態が見えてきた。

現状、太陽系物質科学は(1)太陽系の始原物質とは何か、(2)始原物質はどこに存在するのか、(3)固体物質はどのような場所(天体)でどのような過程を経て分化していくのか、という本質的な問いに直面している。(3)を解く鍵となるのは、分化過程の過渡的状态を残す天体であり、太陽加熱の影響が顕著で、さらに太陽系形成初期に熔融分別を経験した可能性があるPhaethonは理想的な探査標的である。

ふたご座流星群を含む流星群は、特定の彗星や小惑星由来の塵の帯を地球が通過する際に1mm~1cmサイズの塵が地球大気との衝突により高温高压のプラズマ状態となり発光する現象である。1cm以上の破片は隕石として地上に落下し、1mm以下の塵は発光することなく静々と地上に到達する。つまり年に1回地球が流星群の流星塵の帯を横切る度に、大量の流星群母天体由来の物質が地球に供給されているわけである。彗星に含まれる有機物や水氷などが地球生命の起源となったという仮説を考慮すると、流星群母天体物質の理解は、地球生命の起源の謎を解く手がかりとなる。

また、一昨年2月にロシアのチェリャビンスクに直径約17mの小天体が落下し、建物が破壊するなど被害が出た。地球外天体の衝突による社会への影響を目の当たりにし、地球接近天体の監視と理解の重要性が再認識されている。地球接近天体流星群母天体=地球接近天体であり、その中でも最大級の天体サイズを持つPhaethonの物理・化学特性の理解はスペースガードの観点からも重要である。

2. 小惑星Phaethonの科学的意義

小惑星Phaethon及び関連天体は、太陽系科学の主要課題と密接に関連する特徴を持つため、探査により複数の科学目標の同時達成が可能である。

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 [14他]。アルベドは 0.11 ± 0.02 と低く [14他]、青いスペクトルを持つB型小惑星である [1, 2]。青いスペクトルを持つB型小惑星は近地球型小惑星の中で5%程度と少なく [2]、その中でもPhaethonは最も青い [15]。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 [14, 16, 17]。また、小惑星2005UD(直径 1.3 ± 0.1 km、自転周期5.24時間) [18, 19]、及び小惑星1999YC(直径 1.4 ± 0.1 km、自転周期4.50時間) [20]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 [18])。

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も示唆されている [21]。

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乏しく、枯渇彗星あるいは岩石彗星の可能性が高い [22-25]。ふたご座流星群流星体のバルク密度 (2.6 gcm^{-3}) 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 [26]。近年、近日点付近で二倍の増光およびテイルが確認され、機械的破壊によるダスト放出と考えられているため、小規模な彗星活動は間欠的に存在する [27, 28]。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と考えられる。

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 [29-31]。また、分裂天体である2005UDはB型小惑星、1999YCはC型小惑星である [1, 2]。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 [32]。C型小惑星の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。

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 [33他]。B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、 $0.7 \mu\text{m}$ 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 [29-31]。PhaethonがB型スペクトルを持つことは枯渇彗星であることと調和的である。一方、近日点付近で観測されたPhaethonの二倍の増光やテイルは、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 [28]。近日点距離(0.14AU)での太陽輻射熱により加熱脱水は十分に起こり得る [34]。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 [34]。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。

2.5 Na不均質が示す部分熔融可能性

ふたご座流星群の発光輝線の地上分光観測から、太陽組成に対して二桁低いナトリウム(以下Na)濃度が

報告されている[35, 36]. 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 [37]. これらの報告は流星体がNaに枯渇すること及び流星群内で流星体の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. 近日点距離が0.1AU以下の流星群からは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[36]. 従って, ふたご座流星群のNa欠乏は太陽加熱の影響でなく, 母天体のPhaethonに由来する可能性が高い.

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おり[38], 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, 加熱熔融による物質分別が必要である. 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 [39, 40]. コンドライト隕石が1000度程度の加熱で部分的に熔融すると, 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. この熔融分別現象により, 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[39-46] (図1). ふたご座流星群の粒子サイズは1-10 mmであるため[27], 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たNa不均質の空間スケールと一致する.

3. 探査計画

我々はPhaethon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提案を行ってきた[47-49]. 探査手法の可能性としては, フライバイ, インパクトによる衝突実験, サンプルリターンが考えられ, NASAのDeep Impact ミッションやOSIRIS-RExサンプルリターンミッションの最終候補天体でもあった. [50-51]. しかし, 大きい軌道傾斜角により生じる探査工学的な制約とリスクを考慮すると, フライバイが最適かつ実現可能性が高い. Phaethonは1999YC及び2005UDという二つの分裂天体を持つため, これらの関連天体を連続してフライバイすることにより, Phaethon前駆天体の組成不均質や内部の調査が可能になる.

我々は深宇宙探査技術実験ミッションDESTINY(Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage)[52]および子衛星PROCYON(Proximate Object Close flyby with Optical

Navigation)-mini[53]によるPhaethonおよび関連天体の近接フライバイ計画の検討を行っており, JAXAの次期小型科学衛星プロジェクトに提案中である. 本計画ではイオンエンジンにより地球周回軌道から地球重力圏を脱出後, Phaethonをフライバイする軌道に入ることを検討している[52]. Phaethonをフライバイする際, 母船(DESTINY)は安全な距離からPhaethonを遠隔観測する一方, 母船から放出された小衛星(PROCHYON-mini)はPhaethonの至近距離を通過し, 近接詳細観測を行う. Phaethon観測終了後, 子衛星は再び母船とランデブ・ドッキングする計画である. 現状, DESTINY搭載可能重量制約から, 質量10kg子衛星(母船との分離機構を合わせて20kg)および質量10kgの観測機器を想定している.

3.1 ミッション目的と定義

本ミッションの定義と目的は表1の通りである.

表1. Phaethon フライバイミッションのミッション定義

大目的	A. 流星群母天体かつ彗星・小惑星遷移天体かつ地球接近天体の実態解明 B. 太陽系始原天体の熱進化 (初期加熱と太陽加熱の影響) の理解 C. 流星群物質の地球生命への寄与の理解 D. 地球接近天体の理解と監視
小目的	[1] 1AUでの彗星活動有無 (ガスやダストの放出有無) [2] 周辺ダストの物理化学特性のその場観測 [3] 天体の物理的産状理解 (一枚板 or 複数岩塊の集合 or ラブルパイル) [4] 表層状態の近接観測 (太陽過熱で脱水固化した外殻, クラックやクレータの有無) [5] 南北半球の太陽加熱度合いの相違理解 (表層状態や組成の相違理解) [6] 表層物質の同定. 既存の隕石タイプとの相関. 未熔融物質と熔融物質の混在状況 [7] 表層物質の組成不均質性の空間スケール特定 (できれば隕石と同等の cm スケールまで観測) [8] 加熱を受けた外殻下の内部物質や構造の観測

これまでの地上望遠鏡観測から1AU付近でPhaethonの彗星活動は確認されていない. またPhaethon及ふたご座流星群軌道のダストトレイルも確認できていない. 従って1AUにおけるPhaethonの彗星活動有無は接近観測により始めて明らかにできる. また複数の分裂天体を持つことからPhaethon自身が一枚板ではなく, 複数の岩塊の集合体あるいはラブルパイル天体である可能性があり, 産状の実態は近接観測でのみ確認可能である. 南北半球の太陽加熱度合いと影響差異も接近観測により明らかになる. 小さい近日点距離(0.14AU)と短い公転周期(1.4年)のため, 表層物質は太陽加熱により加熱脱水を受け, 水氷や揮発性成分は枯渇していると考えられる. 一般的に太陽加熱を受け加熱脱水した彗星の最外層(Thermal skin)の厚さは数cmから数10cmで

あり、それより内部には揮発性成分に富む彗星物質が保持されている可能性は高い。衝突により1m以上の深部物質を掘削し、放出ダストをその場観測できれば、サンプルリターンに匹敵する成果が得られる。子衛星を30km/sの速度でPhaethonに衝突させた場合、表層がレゴリス状物質の場合は深さ4.7m、岩石状物質の場合は深さ2mのクレータができると思積もられるため thermal skinの下にある太陽加熱を受けていない内部物質を掘削・放出が可能である。

Phaethonの理学観測のサクセス基準は以下の通り。

★フルサクセス：5000kmから1万kmの距離で母船からの遠隔観測による表層撮像[100m/pix]及び周辺ダストの物理化学特性のその場観測（小目的の[1], [2], [3], [5]に対応）。

★エクストラサクセス#1：子衛星による近接観測（10cm/pix）と周辺ダストのその場観測（小目的の[4], [6], [7]に対応）

★エクストラサクセス#2：子衛星のPhaethonへの衝突及び母船からの放出ダストの撮像とその場分析（小目的の[8]に対応）

3.2 搭載候補機器

3.1で述べた理学観測は、母船のDESTINYに搭載する、望遠モノクロカメラ及び可視近赤外の多バンドカメラ及びダストアナライザー、及び子衛星のProcyon-miniに搭載する広角の可視近赤外域カメラ及び小型ダストアナライザにより行う計画である。また、ダストアナライザーは、ドイツのグループと協力し、カッシーニ探査機搭載のCosmic Dust Analyzer (CDA)の小型軽量モデルの検討を進めている。

3.3 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。Phaethonは軌道傾斜角が大きいので、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）。

4. 期待される成果

本ミッションが実現できれば、世界初の流星群母天体かつ彗星-小惑星遷移天体探査となる。フライバイによる近接撮像とその場ダスト分析により、彗星-小惑星遷移天体の実態が始めて明らかになると共に、始原的小天体の熱進化(初期加熱,太陽加熱),分裂過程,軌道進化に係る知見が得られ、太陽系初期から現在に至るまでの始原的小天体の進化過程が明らかになる。本ミッションは、我国のはやぶさ、はやぶさ2、米国のDeep Impact, Stardust, OSIRIS-Rexの探査成果と相補的な成

果をもたらす。また、Phaethonは太陽系小惑星の地上望遠鏡観測、流星群の地上観測、隕石分析という太陽系科学の複数分野を横断する科学的意義を持つため、国内外における探査の波及効果も広く、地上観測-隕石研究-小惑星探査の融合研究という新たな研究分野を拓く象徴的探査となる。高軌道傾斜角を持つPhaethonとのフライバイは相対速度が約30km/sと大きく観測時間も限られる。本ミッションで、イオンエンジンを用いた小型衛星による小天体のマルチフライバイ、高速フライバイ観測時に必要な光学航法誘導制御技術及び小惑星の追尾撮像技術が実証されれば、同様に高軌道傾斜角を持つ彗星探査やマルチフライバイによる複数天体のグランドツアーミッションへの応用が可能となり、将来の太陽系天体探査に必須となる効率的で機動性の高い探査の実現への重要なステップとなる。

参考文献

- 1) Nakamura, T. et al., *Science* 333, 1113, 2011.
- 2) Tholen, D. J., Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tucson, 1984.
- 3) Bus, S. J. and Binzel, R. P., *Icarus* 158, 146, 2002.
- 4) Jenniskens, P. et al., *Nature* 458, 485, 2009.
- 5) Bischoff, A. et al., *Met. Planet. Sci.* 45, 1638, 2010.
- 6) Hsieh, H. H. and Jewitt, D., *Science* 312, 561, 2006.
- 7) Jewitt, D. et al., *Astron. J.* 137, 4313, 2009.
- 8) Jewitt, D. et al., *Astrophys. J. Lett.* 733, L4, 2011.
- 9) Campins, H., *Nature* 464, 1320, 2010.
- 10) Rivkin, A. S., and Emery, J. P., *Nature* 464, 1322, 2010.
- 11) Licandro, J. et al., *Astron. Astrophys.* 525, A34, 2011.
- 12) Jenniskens, P., *Earth Moon Planets* 102, 505, 2008.
- 13) Zolensky, M. et al., *Science* 314, 1735, 2006.
- 14) Green, S. F. et al., *MNRAS* 214, 29, 1985.
- 15) Luu, J. X. and Jewitt, D. C., *Astron. J.* 99, 1985.
- 16) Whipple, F. L., *IAU Circular*, 3881, 1983.
- 17) Williams, I. P. and Wu, Z., *MNRAS* 262, 231, 1993.
- 18) Ohtsuka, K. et al., *Astronomy & Astrophysics* 453, L25, 2006.
- 19) Jewitt, D. and Hsieh, H. H., *Astron. J.* 132, 1624, 2006.
- 20) Kasuga, T. and Jewitt, D., *Astron. J.* 136, 881, 2008.
- 21) de León, J. et al., *Astronomy & Astrophysics* 513, A26, 2010.
- 22) Cochran, A. L. and Barker, E. S., *Icarus* 59, 296, 1984.
- 23) Gustafson, B. A. S., *Astronomy & Astrophysics* 225, 533, 1989.
- 24) Chamberlin, A. B. et al., *Icarus* 119, 173, 1996.
- 25) Hsieh, H. H. and Jewitt, D., *Astrophys. J.* 624, 1093, 2005.
- 26) Borovička, J. B. et al., *Proc. IAU Symp.* 263, 218, 2010.
- 27) Jewitt, D. and Li, J., *Astron. J.* 140, 1519, 2010.
- 28) Jewitt, D. et al., *Astrophys. J. Lett.*, 771:L36, 2013.
- 29) Hiroi, T. et al., *Science* 261, 1016, 1993.

- 30) Hiroi, T. et al., *Met. Planet. Sci.* 31, 321, 1996.
 31) Licandro, J. et al., *Astronomy & Astrophysics* 461, 751, 2007.
 32) Kinoshita, D. et al., *Astronomy & Astrophysics* 466, 1153, 2007.
 33) Burbine, T. H. et al., *Rev. Mineral & Geochem.* 68, 273, 2008.
 34) Ohtsuka, K. et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* 61, 1375, 2009.
 35) Kasuga, T. et al., *Astronomy & Astrophysics* 438, L17, 2005.
 36) Kasuga, T. et al., *Astronomy & Astrophysics* 453, L17, 2006.
 37) Torigo-Rodriguez, J. M. et al., 2003, *Met. Planet. Sci.* 38, 1283, 2003.
 38) Nakato, A. et al., *Earth Planet Space* 60, 855, 2008.
 39) Arai, T. et al., *Lunar Planet. Sci.* XXXXIII, abstract #2932, 2012.
 40) Arai, T. et al., *Asteroids, Comets, Meteors* 2012, abstract#6220, 2012.
 41) Takeda, H. et al., 2000, *Geochem. Cosmochem. Acta* 64, 1311, 2000.
 42) McCoy, T. et al., *Planetary materials: Review in mineralogy* 36, 2006.
 43) Arai, T. et al., *Lunar Planet. Sci.* XXXIX, abstract #2465, 2008.
 44) Day, J.M.D et al., *Nature* 457, 179, 2009.
 45) Shearer, C. K. et al., *Am. Mineral.* 93, 1937, 2008.
 46) Shearer, C. K. et al., *Geochem, Cosmochem. Acta* 74, 1172, 2010.
 47) 荒井朋子, 他, 「月惑星探査の来たる10年」第一段階パネルへの意見書, 2010.
 48) 荒井朋子, 他, 「月惑星探査の来たる10年」第二段階パネルへの提案書, 2011.
 49) 荒井朋子, 「小惑星Phaethon探査提案」遊星人(日本惑星科学会誌), 21, No.3, 239-246, 2012.
 50) Belton, M. J. S. and A'Heam M. F. A., *Adv. Space Res.* 24, 1167, 1999.
 51) Lauretta, D. S., et al., *Lunar Planet. Sci.* XXXXIII, abstract #6291, 2012.
 52) 川勝康弘, 他, "深宇宙探査技術実証機DESTINY", 2G01, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015.
 53) 船瀬龍, 他, "50kg級超小型深宇宙探査機PROCYONの軌道上成果と将来展望", 1G07, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015.

(2016年4月29日受付, 2016年5月10日受理)

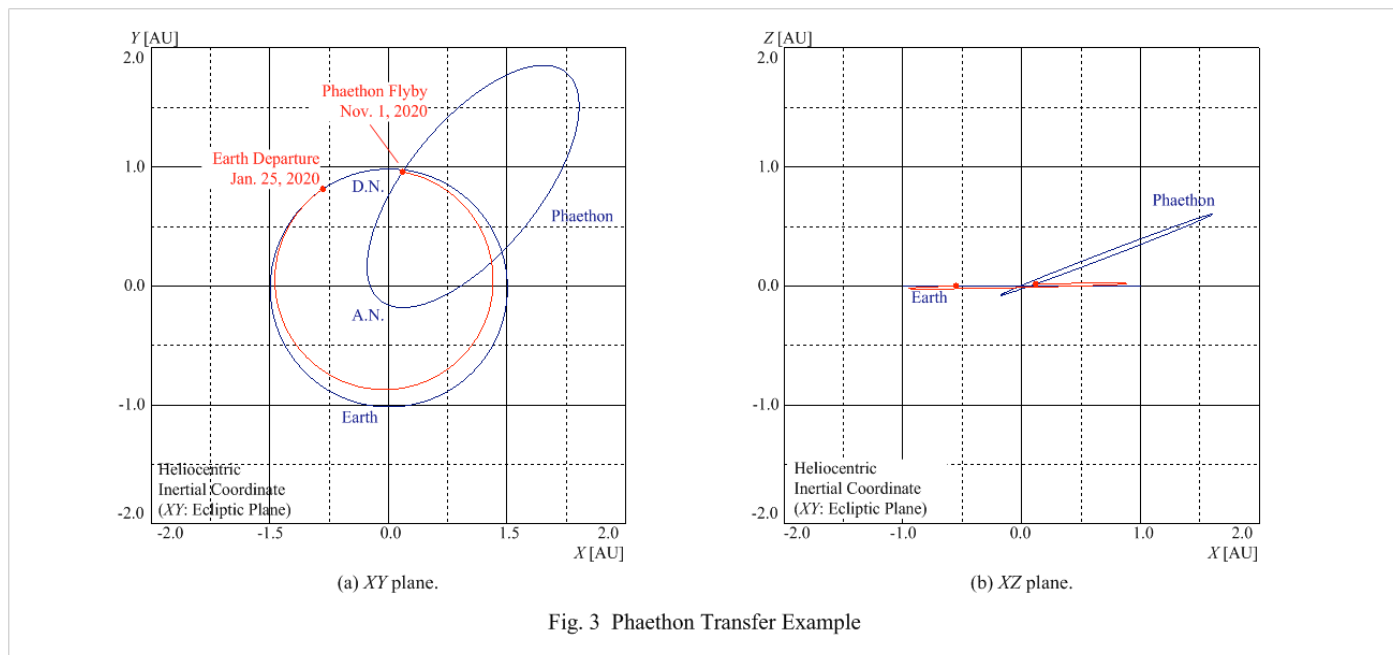


Fig. 3 Phaethon Transfer Example

図1 (a)黄道面に投影した Phaethon 軌道 (青色楕円), 地球軌道 (青色円), 及びフライバイ探査機(赤色円)の軌道例. (b) 黄道面に垂直な断面から見た Phaethon 軌道 (青色楕円)と地球 (青色直線)とフライバイ探査機(赤色直線)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 月中旬この点を通り, Phaethon のダストスワームであるふたご座流星群に遭遇する.