

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287106

研究課題名(和文) 流星・火球の高精度分光観測と軌道決定による隕石の母天体小惑星探査

研究課題名(英文) Explorations of parent asteroids for meteors and fireballs using high precision spectroscopy and orbital determination

研究代表者

阿部 新助 (ABE, Shinsuke)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：40419487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：彗星や小惑星を起源とする直径がmm～cmサイズのメテオロイドが、秒速数10kmで地球大気に入ると、空力加熱により固体表面が熔融液滴化および気化して失われていくアブレーションが起こる。メテオロイドから気化したガスと大気中の原子分子が共に励起状態となり、脱励起の際に発光する現象が流星である。本研究では、未解明である(1)流星アブレーションの物理過程の理解、(2)流星・火球・隕石の母天体小惑星に関する知見を得ることを目的に、流星・火球の高精度分光カメラシステムの開発と観測および軌道決定、アーク加熱風洞を用いた室内アブレーション実験、分裂が示唆されている流星群母天体小惑星の観測を行った。

研究成果の概要(英文)：Meteoroids whose diameters are between μm and m are thought to be originated from comets and asteroids. On the other, there is little knowledge of connection between meteoroids, meteorites and parent asteroids. Spectroscopic observation of ultra-high-speed, 10s km/s, atmospheric entry of meteoroids enable us to investigate time variations of atomic and molecular emissions, exciting temperature, abundance and so on. The purpose of this study is to understand the relation between small bodies such as asteroids, comets and meteoroids from their interplanetary orbits, mass, species and flux rate by using ultrahigh-sensitivity and high-resolution meteor spectroscopic-imaging cameras together with a high-power large-aperture meteor head-echo radar, laboratory simulation of meteor ablation and telescopic observations of meteor parent bodies.

研究分野：惑星科学

キーワード：流星 小惑星 宇宙科学 自然現象観測 惑星起源・進化

1. 研究開始当初の背景

彗星や小惑星を起源とする直径が mm～cm サイズのメテオロイド (meteoroid) と呼ばれるダスト (塵) が、秒速数 10km で地球大気に突入すると、空力加熱 (圧縮大気層からの対流加熱と波輻射加熱) によりメテオロイド固体表面が熔融液滴化および気化して失われていくアブレーション (ablation) が起こる。メテオロイドから気化したガスと大気中の原子分子が共に励起状態となり、脱励起の際に発光する現象が流星 (meteor) である。

これまで、流星 (特に明るい火球) の軌道については多くの研究が行われてきたが、流星・火球に含まれる成分 (Fe, Mg, Na など) の組成比は統計的に十分な研究が行われていない。また、流星現象のアブレーションや放射過程のメカニズムについても、完全な解明には至っていない。

一方、地球に落下する隕石や惑星間塵の成分に関しては、直接採取されたサンプルから詳細に調べられているが、地上で発見あるいは回収されている約 6 万個の隕石のうち、落下時の隕石火球の観測から軌道が決定された隕石は、2 ダースに満たず、母天体が確実に同定された隕石は (月, 火星, 火星の衛星ベスタを除き) 皆無である。

2. 研究の目的

本研究では、お互いに関連性を持つ以下の 3 つの課題を目的としている。(1) 地球大気圏に超高速突入するメテオロイドの発光過程を観測や実験を通して理解し、彗星や小惑星起源のメテオロイドのサイズ・組成、地球大気との相互作用に関する知見を得て、流星のアブレーション過程についての物理化学モデルへ繋げていく。(2) メテオロイドの軌道の統計量を観測から得て、母天体である彗星や小惑星との関連について調査を行う。(3) 流星群を伴う小天体 (彗星・小惑星) の表層の組成変化を調査して、母天体の分裂過程を探求し、メテオロイドの起源と進化についての新たな知見を得る。

3. 研究の方法

(1-1) 超高感度・高解像度 4K カメラ (SONY α 7S の改良版) と透過型回折格子分光器を組み合わせた分光および撮像カメラを用意し、波長 380-900nm の高品質の可視光スペクトルと、約 8 等級までの微光流星の高解像度映像を取得した。

(1-2) JAXA 宇宙科学研究所の惑星大気突入環境模擬装置 (アーク加熱風洞) の高エンタルピー・極超音速流を応用した高加熱率 (20-30W/m²) で、流星アブレーション実験を行い、独自に製作した流星模擬体 (人工流星) やコンドライト隕石を真空チャンバ内で発光させて、分光計測 (200-1000nm) と高速度撮影 (1 μ s) を行い、流星発光素過程を調査した。

(2) 京都大学生存圏研究所・信楽 MU レーダー (周波数 46.5MHz, 出力 1MW, 直径 103m 内

に 475 本の直交八木アンテナ, 多チャンネルデジタル受信機, 3ms=332 パルス/秒) を応用した流星ヘッド・エコー観測と、本研究で開発した分光・撮像カメラを用いた同時観測を行い、レーダーから導出されるメテオロイドの軌道および、レーダー散乱断面積 (RCS) と流星の発光光度の関係について調査した。

(3) ふたご座流星群の母天体である直径約 6km (近日点距離 $q=0.14\text{au}$, 離心率 $e=0.89$, 軌道傾斜角 $i=22.2^\circ$) の地球衝突危険性天体である (3200) Phaethon は、彗星小惑星遷移天体 (PHO) で、現在は B タイプ小惑星として観測されている。一方、直径約 1.5km の小惑星 2005 UD は、軌道進化類似性と、NEO では極稀な B タイプ小惑星であることから分裂ペアと考えられている。Phaethon と同様に太陽に接近する直径約 1km ($q=0.19\text{au}$, $e=0.83$, $i=22.9^\circ$) の PHO である S タイプ小惑星 (1566) Icarus にも、軌道類似性天体 2007 MK6 が発見されているが、スペクトルタイプは不明であった。これらの分裂候補天体の自転に伴う表層の物質不均質性を調査するため、望遠鏡を用いた分光観測を実施した。使用した望遠鏡は、米国・ローウェル天文台 DCT4.3m 望遠鏡 (Icarus, 2007 MK6) と DevNeny 分光器、和歌山・かわべ天文台 1m 望遠鏡 (Phaethon) と新規開発した低分散分光器 LEIA を用いた分光観測を行なった。また、2007 年に台湾・鹿林天文台 1m 望遠鏡で観測された Phaethon 分光データの再解析を行い、比較に用いた。

4. 研究成果

図 1 は、超高感度・高解像度 4K カメラと $f=50\text{mm}/F1.4$ レンズ、および $f=35\text{mm}/F1.4$ レンズと透過型回折格子 (600/mm) を組み合わせたシステムで取得したペルセウス座流星群 (対地速度=59km/s) とふたご座流星群 (対地速度=35km/s) の火球のスペクトルである。600nm より短波長側は、メテオロイド起源の主に Fe, Mg, Na, Ca 原子輝線が、長波長側は、O, N, N₂ などの地球大気原子・分子の発光が占めていることが分かる。高速流星であるペルセウス座流星群は、O, N が強く光る。局所熱平衡を過程した鉄輝線群からは、共に 4000~5000K のプラズマ励起温度が導出された。

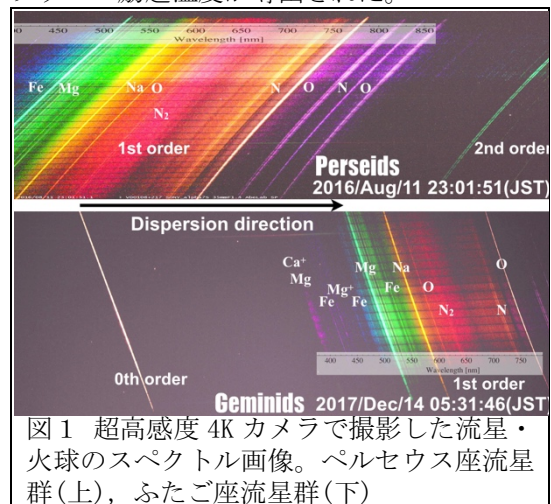


図 1 超高感度 4K カメラで撮影した流星・火球のスペクトル画像。ペルセウス座流星群 (上), ふたご座流星群 (下)

図2は、アーク加熱風洞を用いた隕石 (LL5コンドライト= Chyriabinsk, CM2炭素質コンドライト= Jbilet Winselwan) と人工流星 (FMAC = Fe+Mg+Al+C, オリビン, Fe+Mgなどの10~30%空隙体) のアブレーション実験結果および、流星・火球の分光観測で得られたFe, Mg, Naの最大発光強度を三角ダイヤグラムにまとめ先行研究と比較したものである。アーク加熱風洞を用いた人工流星は、2000-4000Kの黒体放射が卓越しており、黒体スペクトルにFeI-15が漏れてしまうため、近紫外のFeI(386nm)を採用しているが、Fe発光は弱い。また、高空隙になるとMg発光強度が強く変化する。一方、アーク加熱風洞を用いた隕石の発光も黒体成分が強く、Fe発光は弱く、Mg発光は見られなかった。これらの発光は、天然の低速流星(おうし座流星群など)に比較的近い結果を示した。中央の曲線は、対地速度[km/s]の違いによる典型的な炭素質コンドライト組成(太陽組成)の変化を示し、高速突入だと高温となり、難揮発性物質であるMgが発光強度を増し、逆に低速だと低温となり、揮発性物質のNaが強く光る事を示している。

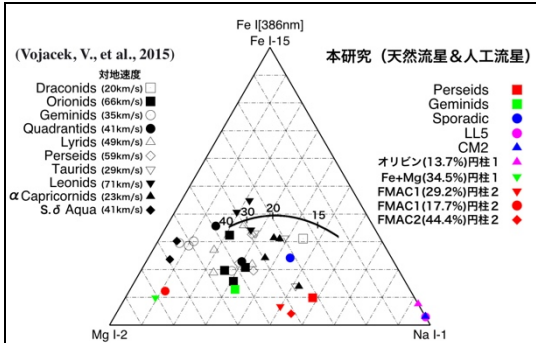


図2 流星分光観測とアブレーション実験で得られたFe-Mg-Naの発光強度比の比較。

図3は、MUレーダー・流星ヘッドエコー観測で得てきた約16万個の流星の発光開始光度と突入速度の関係を示したものである。同一流星群でも発光開始光度にばらつきがあるのは、メテオロイドの大きさだけでなく、強度が関係するためである。また、メテオロイドの突入速度、突入角度、大気密度のバイアスを除去した無次元量 Kb により、メテオロイドの強度を分類できることが分かった。即ち、揮発性でも軽い彗星起源メテオロイドは低 Kb 、難揮発性で強い小惑星起源は高 Kb 値を示す。

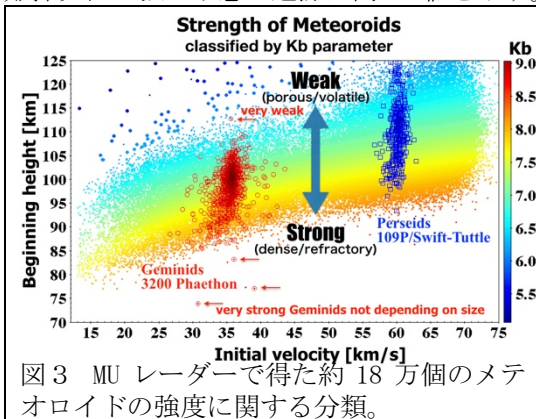


図3 MUレーダーで得た約18万個のメテオロイドの強度に関する分類。

図4は、MUレーダー・流星ヘッドエコー観測で得られた「ふたご座流星群」の軌道と母天体である(3200)Phaethonの軌道を黄道座標系に投影したものである。ふたご座流星群の平均軌道要素を用いて、軌道類似性パラメータ(D -criterion; $Dsh < 0.1$)を用いて、流星群の同定を行なっている。レーダーから推定された惑星間軌道の精度を調べるため、光学2点観測との同時観測を行い、レーダーと光学から得られた軌道要素が、ほぼ一致を確認することができた。

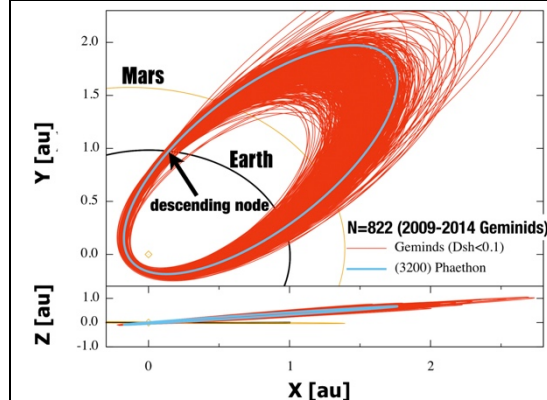


図4 ふたご座流星群ダストと母天体(3200)Phaethonおよび地球、火星の軌道。

レーダーと光学の同時観測を行い、レーダー散乱断面積(RCS: Radar Cross Section)と等級の最大値の関係を得ることに成功した。高速流星($V > 40$ km/s), 低速流星($V < 40$ km/s), ふたご座流星群($V \sim 36$ km/s)毎に得たRCS-等級関係式を約16万個のレーダー流星に適用して得た等級分布を図5に示す。

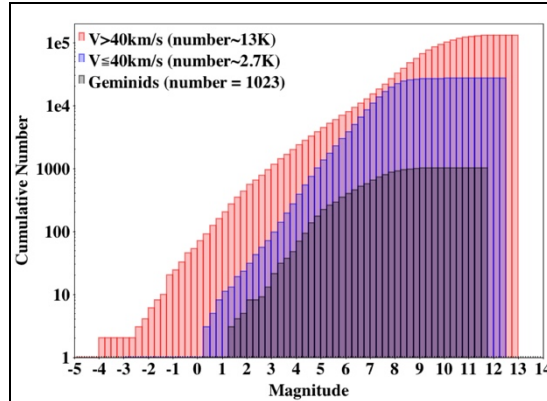


図5 レーダーで得られた約16万個の流星の等級分布。

Bタイプ小惑星に分類されている「ふたご座流星群」母天体の(3200)Phaethonは、流星群を生成しただけでなく、分裂を引き起こした小惑星(枯渇彗星)と考えられている。約3.6時間の自転に伴う可視分光特性(波長550-750nmのスペクトルの傾き)を詳しく調べると、2007年は全体的に負の傾きのBタイプの表面が見えているのに対し、2017年の観測では、スペクトルの傾きが正のCタイプに近い表面が支配的であることが分かった(図6)。これは、Hanus et al. (2016)の自転軸と形状モデルを使うと次のように説明可能となる。即ち、2007年の地球大接近では、北極を中心とする

北半球のみが地球から見えていたのに対して、2017年の大接近では、北極に加え赤道領域と南半球の一部を含む領域を臨むことができていた。そして、赤道領域は、近日点通過前後に最も太陽に炙られる領域であり、表面温度は千度を超えることから、宇宙風化してBタイプ表面を示していた Phaethon の表層が剥がれて(或いは崩壊して)、フレッシュな内部の(或いは熱変性を強く受けた)Cタイプに似た物質が赤道付近に現れて、2017年に観測されたと考えられる。BタイプとCタイプが混在した物質的に不均質な小惑星の証拠が得られたのは初めてのことである。Phaethonから「ふたご座流星群」、関連流星群への進化(PGC: Phaethon-Geminids-Complex)の研究に一石を投じる成果を示すことができた。

また、本研究では、Phaethonと同様に太陽に非常に近づくSタイプ小惑星(1566) Icarusの軌道類似性天体(分裂候補天体)2007 MK₆が、Qタイプ小惑星であり、Icarus表面にもQタイプを示す領域が存在していることを初めて突き止められた。更に、MUレーダーの観測では、小惑星 Icarus 軌道に類似した6月昼間流星群の活動も捉えている。これらの流星群を発生させる分裂天体の分裂進化メカニズムや、メテオロイドや隕石・火球との関連については、更なる研究が必要である。

2022年頃に打上げ予定のJAXAのDESTINY+探査機は、Phaethonをフライバイ探査する計画であり、本観測結果は、ミッション観測立案にも大きく貢献することができた。

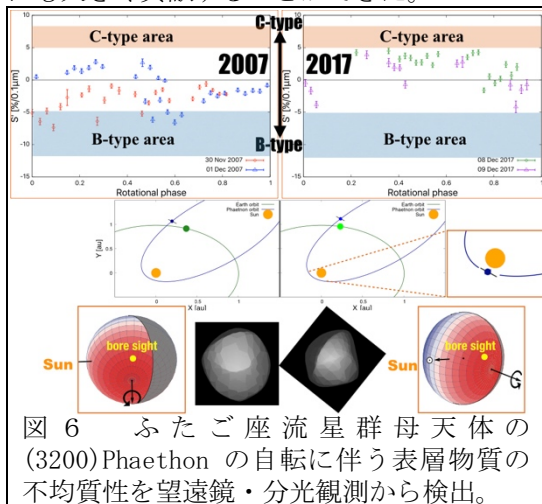


図6 ふたご座流星群母天体の(3200)Phaethonの自転に伴う表層物質の不均質性を望遠鏡・分光観測から検出。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6件)

- ① R. Fuse, S. Abe, M. Yanagisawa, R. Funase, H. Yano, Space-based Observation of Lunar Impact Flashes, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Aerospace Technology Japan, 査読有り, 2018 印刷中
- ② T. Arai and 41 coauthors (including S. Abe), DESTINY+ Mission: Flyby of Geminids Parent Asteroid (3200) Phaethon and In-

Situ Analyses of Dust Accreting on the Earth, 49th Lunar and Planetary Science Conference, 査読なし, 2018

③ G. Abdellaoui, S. Abe, and 358 coauthors, Meteor studies in the framework of the JEM-EUSO program, Planetary and Space Science, 査読有り, 245-255, 2017

④ Mask Watanabe, Koki Sakuyama, Hironori Sahara, Soichiro Numata, Shinsuke Abe, Takeo Watanabe, Takayuki Shimoda, Junsei Nagai, Yuta Nojiri, Lena Okajima, Evaluation of Artificial Meteor Sources with Arc Heater Wind Tunnel, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有り, 14巻, 119-123, 2016

⑤ Shinsuke Abe, Kero Johan, Takuji Nakamura, Yasuour Fujiwara, Souichirou Numatawara, Junichi Watanabe, Hiroyuki Hashiguchi, Orbit Determination of Meteoroids by MU Radar Meteor Head Echo Observations, Proc. 30th International Symposium on Space Technology and Science, 査読有り, 30巻, 1-4, 2015

⑥ 阿部 新助, Kero Johan, 中村 卓司, 藤原 康徳, Daniel Kastinen, 渡部 潤一, 橋口 浩之, MUレーダー・ヘッドエコー観測による惑星間ダストの軌道と流星アブレーション過程の計測, 査読なし, 第9回MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム収録, 9巻, 93-98, 2015

[学会発表] (計 10件)

① S. Abe, J. Kero, A. Hirota, Y. Fujiwara, T. Nakamura, J. Watanabe, H. Hashiguchi, Size and Spatial Distribution of Geminids' Meteoroids using Simultaneous Optical and Meteor Head Echo Radar Observations, International Symposium on Dust & Parent Bodies, 2018

② S. Abe, J. Kero, R. Ohsawa, T. Nakamura, A. Hirota, S. Sako, J. Watanabe, H. Hashiguchi, Ultra Faint Meteor Observation using High Power Large Aperture Radar and Wide-field CMOS Camera, APRIM 2017

③ S. Abe, J. Kero, A. Hirota, T. Nakamura, Y. Fujiwara, J. Watanabe, H. Hashiguchi, Size and Orbital Distribution of Interplanetary Dusts by MU Radar Meteor Head Echo Observation, The 31st ISTS, 2017

④ S. Abe, J. Kero, A. Hirota, T. Nakamura, J. Watanabe, H. Hashiguchi, SIZE AND ORBITAL DISTRIBUTION OF INTERPLANETARY DUSTS ASSOCIATED WITH NEAR-EARTH ASTEROIDS BY MU RADAR METEOR HEAD ECHO OBSERVATION, Planetary Defense Conference,

2017

⑤ 阿部新助, 荒木健吾, 岩崎太陽, 戸田和博, 鴻巣雄貴, 松山誉, 作山幸樹, 麻野将吾, 木村菜摘, 山下矩央, 佐原宏典, 渡部武夫, 岡島礼奈, 下田孝幸, アーク加熱風洞を用いた流星アブレーション過程の計測, 宇宙航行の力学シンポジウム, 2016

⑥ Shinsuke Abe, Kengo Araki, Taiyo Iwasaki, Kazuhiro Toen, Hironori Sahara, Takeo Watanabe, Lena Okajima, Artificial Meteor and Chelyabinsk Ablation Test using Arc-heated Wind Tunnel, Meteoroids 2016

⑦ Shinsuke Abe, Johan Kero, Takuji Nakamura, Yasunori Fujiwara, Daniel Kastinen, Jun-Ichi Watanabe, Hiroyuki Hashiguchi, Asteroidal Meteors Detected by MU Radar Head-echo Observations, Meteoroids 2016

⑧ Shinsuke Abe, Hironori Sahara, Takeo Watanabe, Lena Okajima, Artificial Meteor Test towards On-demand Meteor Shower, International Meteor Conference 2016

⑨ Shinsuke Abe, Kero Johan, Takuji Nakamura, Yasuour Fujiwara, Souichirou Numatawara, Junichi Watanabe, Hiroyuki Hashiguchi, Orbit Determination of Meteoroids by MU Radar Meteor Head Echo Observations, The 30st ISTS, 2015

⑩ T. Nakamura, M. Yamamoto, Y., Tanaka, J. Kero, C. Szasz, J. Watanabe, S. Abe, D. Kastinen, Precise Orbit Determination of Meteors by HPLA Radar and the MU Radar Meteor Head Echo Database, 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014

[その他]

ホームページ等

<http://abelab.net>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 新助 (ABE, Shinsuke)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号 : 40419487

(2) 連携研究者

荒井 朋子 (ARAI, Tomoko)
千葉工業大学・惑星探査研究センター・上
席研究員
研究者番号 : 10413923

渡部 潤一 (WATANABE, Junichi)
大学共同利用機関法人・自然科学研究機構・
国立天文台・教授
研究者番号 : 50201190

平田 成 (HIRATA, Naru)
会津大学・コンピュータ理工学部・准教授

研究者番号 : 80372655

矢野 創 (YANO, Hajime)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・助教

研究者番号 : 00321571

小林 正規 (KOBAYASHI, Masanori)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・上
席研究員

研究者番号 : 70312080

石丸 亮 (ISHIMARU, Ryo)

千葉工業大学・惑星探査研究センター・研
究員

研究者番号 : 10573652