

氏 名 藤原 康德

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2037 号

学位授与の日付 平成 30 年9月28日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 先端的な流星観測による彗星のダスト放出と進化の研究

論文審査委員 主 査 教授 中村 卓司
教授 堤 雅基
助教 江尻 省
教授 渡部 潤一
物理科学研究科 天文科学専攻
教授 山本 真行
高知工科大学

博士論文の要旨

氏 名 藤原 康德

論文題目 先端的な流星観測による彗星のダスト放出と進化の研究

本研究は、太陽系小天体の進化を流星群の観測から明らかにしようという研究である。太陽系小天体とは、小惑星、彗星、太陽系外縁天体、惑星間空間塵などを指す。彗星から放出された惑星間空間塵でミリメートル以上の大きさの流星体は、次第に彗星の前後に伸びる流星体の流れ、ダストトレイルを形成する。この流れと地球とが衝突したときに地上で見られるのが流星群である。1990年代後半に登場したダストトレイル理論は、彗星起源の流星体の流れが地球に衝突することによる流星群出現についての理解を飛躍的に改善した。流星体の流れは、親彗星から近日点回帰ごとに放出された個別のダストトレイルの集合体であり、親彗星の回帰ごとに形成される個々のダストトレイルの進化が流星体の流れ全体の進化・変遷につながることをこの理論は明らかにした。またこの理論により過去の流星群の大出現の検証及び将来の正確な出現予報が可能となった。2001年と2002年のしし座流星群では、この理論による予報は、観測結果と非常に良い一致を見た。群流星は親天体の破片であることから、流星群の観測は親天体の変化を反映するため、親天体の変遷を理解する手法として重要である。小惑星と彗星は一般的には太陽に接近したときの形状が異なるものの、近年の観測・研究から、小惑星の中には、彗星とよく似た細長い楕円軌道を持つものが多数発見されており、かつて彗星であった天体が揮発物質を失ったものである可能性が指摘されている。小惑星と彗星の定義・線引きは曖昧になってきており、彗星から小惑星への進化・変遷など太陽系小天体間の関係については、未解明の課題が多数存在する。本研究では、ダストトレイル理論と流星群の観測とを組み合わせることで比較検討を加えることにより、親彗星からの流星群の形成とその進化を研究するとともに、ダストトレイルによる流星群の予報と観測結果から親彗星の過去の活動履歴を調べるという新たな手法を用いて、これまで明らかでなかった彗星から小惑星への変遷にかかる課題の解明にも取り組んだ。具体的には、第2章では、親彗星から大きな速度で放出された流星体から成るダストトレイルによる流星群の出現予報を観測から検証するとともに、ダストトレイル理論の予想と観測とを比較することにより親彗星からの放出速度の速い流星群の特性を明らかにする研究を行った。この研究では、2002年11月のしし座流星群と2012年10月の10月りゅう座流星群の二つの流星群の観測を実施して検討を行った。一つ目の課題として、しし座流星群で親天体から高速度で放出された流星体からなるダストトレイルによる流星群の出現についての観測・研究を行った。しし座流星群の過去の大出現をダストトレイル理論で検証した結果、そのほとんどのケースで流星体の親天体からの放出速度は 15 m s^{-1} 以内であったが、1965年に親天体から約 89 m s^{-1} という速い速度で放出された流星体からなるダストトレイルが1回帰後の2002年に地球に接近することが予報されたため、このダストトレイルによる流星群が起こるかどうか、また、起きればどのような特性があるのか、特に光度分布について明らかにするために高感度ビデオカメラによる観

測を実施した。結果、このダストトレイルによると考えられる 6~8 等の暗い流星を主とする活発な流星群活動を捉えた。これは肉眼では見えない暗い流星が主体となる流星群の大出現を捉えた世界最初のケースとなった。また、このような高速で放出された流星体についてその放出速度に対応する光度分布が明らかにした。2 つめの課題は、2012 年の 10 月りゅう座流星群の MU レーダーによる流星ヘッドエコー観測とその結果の考察である。2012 年のダストトレイル理論による予報と観測結果の比較とともに、2011 年のダストトレイル予報と MU レーダー観測結果の検討結果を組み合わせることで、2012 年と 2011 年のりゅう座流星群の活動を違いについて考察した。MU レーダーによる群流星のレーダー散乱断面積の分布の観測結果の比較から 2012 年は 2011 年より質量の小さい流星体の割合が多かったことを解明した。2011 年の出現をもたらしたダストトレイルは親天体からの流星体の放出速度が約 8 m s^{-1} であったのに対して 2012 年は $43\sim 51\text{ m s}^{-1}$ と速かったことが観測された質量分布の差異の原因であると考えられる。親天体からの放出速度の大きさが観測された流星体の質量分布を決定したという点で、この観測結果は 2002 年のしし座流星群の出現と特性を裏付けるものとなった。観測される流星（流星体）と親天体からの放出速度と流星の光度（質量）の分布との関連の研究は、流星群の誕生と構造のメカニズムを明らかにするとともに親天体の流星体放出時の活動状況を知る上でも重要であることを示した。第 3 章では、彗星の物理的な進化を流星群の出現から推測するという近年新たに考案された手法を 289P/Blanpain 彗星とほうおう座流星群のケースに適用した。Blanpain 彗星は、1819 年に最初に観測されて以来、観測で検出されることがなかったが、2003 年に偶然に小惑星として検出されたもので、このことで Blanpain 彗星の軌道が正確に確定され、ダストトレイル理論によって 20 世紀初頭にこの天体から放出された流星体により 2014 年 12 月にほうおう座流星群が観測されることが予報された。この流星群の活動が確認されるか、またその規模はどれくらいかを観測することにより、1819 年に彗星として観測されて以来見失われていたこの天体が、20 世紀初頭にすでに枯渇彗星となっていたのか、あるいは彗星として活動をしていたのか、またその活動度についても推測することが可能であると指摘されていた。この点に注目し、アメリカ東海岸に遠征して流星群の観測を実施し、その結果から 1956 年の大出現の観測の 1/10 以下程度の弱い流星群活動を検出した。このことからほうおう座流星群の親天体の Blanpain 彗星は、20 世紀初頭には弱いながらも彗星活動を行っていたことを解明した。本研究は、新たに提案された手法を用いて彗星の活動履歴を推定した初めてのケースである。第 4 章では 2012 年度に第 53 次南極地域観測隊での公開利用研究として実施した南極昭和基地で行った南天で活動する流星群のビデオ観測結果についてまとめた。流星群の観測はこれまで主として北半球で行われてきたので、南天での流星群の観測は不十分であった。南天で活動する流星群の観測、特に新流星群を見出すことは、2,3 章で行ったような研究のための基本的なデータを得るという意味で重要である。今回の観測は、1 シーズンのみの観測であったが、観測データが得られた 234 夜中 114 夜（49%）で流星が検出された。流星群の検出法は、眼視観測で用いられている方法を南極でのビデオ観測でより多くの流星輻射点を検出できるように最適化した。その結果、32 個の輻射点を検出した。検出された輻射点の内、17 個は 4 つの確定流星群、3 個は 3 つの未確定流星群の輻射点と同定され、検出法の有用性を示すことができた。今回検出した 9 つの未報告の輻射点については今後の観測・研究への足掛かりとなると考え

る。第5章では以上の研究のまとめとこれを踏まえた将来計画について記した。以上、本研究では彗星からのダスト放出とその進化、特に流星群の形成と彗星の物理的進化についてダストトレイル理論と高感度ビデオ観測やMUレーダーでの最先端の流星観測の結果から明らかにし、特に南半球の群流星の観測に新たな一石を投じた。

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 藤原 康德

論文題目 先端的な流星観測による彗星のダスト放出と進化の研究

(論文審査結果) [平成30年7月31日実施]

審査論文は、高感度の光学ビデオ観測および大口径大出力レーダー等先端的な観測手法を用いて彗星のダストに起因する流星物質が地球大気の大気突入する「流星」現象を観測することで、彗星からのダスト放出後のダストの空間分布を記述する「ダストトレイル理論」の正確さや適用範囲を検証するとともに、彗星から小惑星に変化する過程を明らかにしたものである。彗星及び小惑星はともに太陽系小天体を構成する要素であるが、彗星が揮発物質を失って小惑星へと進化するものなど、その定義や線引きは不明瞭となっており、太陽系小天体間の関係や進化が解明すべき問題となっている。審査論文では、ダストトレイル理論と流星群の観測とを組み合わせることで比較検討を加えることにより、親彗星からの流星群の形成とその進化を研究するとともに、ダストトレイルによる流星群の予報と観測結果から親彗星の過去の活動履歴を調べるという新たな手法を用いて、これまで明らかでなかった彗星から小惑星への変遷にかかる課題の解明に取り組んだ。

審査論文ではまず太陽系小天体の概説のあと、流星群およびその観測法などが述べられ、また彗星からの流星体放出に関するダストトレイル理論が述べられた。2001年のしし座流星群大出現では、この理論による予報が観測結果と非常に良い一致を示し、ダストトレイル理論の成功で流星群出現の予報精度が大幅に改善されたことが研究背景として述べられた。

次に審査論文では、親彗星からの放出速度の速いダストに起因する流星群の特性を明らかにする研究を行った。すなわち、2002年11月のしし座流星群における高感度ビデオカメラによる観測と、2012年10月のりゅう座流星群における中層・超高層大気観測用大型レーダーによる観測を詳細に解析し、それぞれ89 m/s, 43~51 m/sの放出速度のダストによる流星群をとらえた。これは従来流星群の活動として観測されてきた15 m/s以下の放出速度のものに比べて格段に速い放出速度のダストによる流星群活動の記録となった。とくに前者(2002年しし座流星群)は肉眼では見えない暗い流星が主体の流星群の大出現を捉えた世界最初のケースとなった。また後者(2012年10月りゅう座流星群)では、放出速度が8 m/sであった2011年の同流星群の出現に比べてより質量の小さい流星体の割合が多かったことをレーダー散乱断面積の解析から解明した。このような親彗星から流星体が放出される速度と流星の光度(質量)分布との関連の研究は、流星群の構造と誕生のメカニズムを明らかにするとともに流星体放出時の親彗星の活動状況を知る上でも重要であることを示した。

次に、1956年に第1次日本南極地域観測隊で大出現が発見されたほうおう座流星群に

ついて、ダストトレイル理論で予測された流星群の活動日時に米国に遠征して流星群観測を実施し、その親彗星である 289P/Blanpain 彗星の過去のダスト放出の活動を明らかにした。同彗星は 1819 年の発見後 2003 年に小惑星として再び観測されるまで地球からの観測記録がなかったが、その軌道をもとにダストトレイル理論で 2014 年 12 月に約 60 年ぶりの流星群活動が予測されていた。審査論文著者らによる米国東海岸での遠征観測の解析結果から、2014 年には 1956 年の大出現の観測の 1/10 以下程度の弱い流星群活動を検出した。このことで、289P/Blanpain 彗星は、今回観測されたダストが放出されたと考えられる 20 世紀初頭には小惑星状にはなっておらず弱いながらも彗星活動を行っていたことを解明した。この一連の研究は、流星群の観測から過去の彗星の活動履歴を推定するという新たな手法を適用した初めてのケースである

次に審査論文では 2012 年度に第 53 次南極地域観測隊での公開利用研究として実施した南天で活動する流星群の南極昭和基地でのビデオ観測結果についてまとめた。流星群の観測はこれまで主として北半球で行われてきており、南天での流星群の活動状況が十分知られておらず、太陽系小天体の進化を議論する上で障害となっていた。今回の観測は、1 シーズンのみの観測であったが、観測データが得られた 234 夜中 114 夜 (49%) で流星を検出し、32 個の輻射点を検出した。そのうち、国際天文連合による 4 つの確定流星群、3 つの未確定流星群の輻射点と同定されたもののほか、9 つの未報告の輻射点を発見した。これらの検出はその輻射点分布そのものも興味深いが、流星輻射点の分布自体に南北非対称性があるかという太陽系研究史上の大きな問いの一つに対する今後の観測・研究計画への大きな足掛かりとなるものである。

以上、審査論文では彗星からのダスト放出とその進化、特に流星群の形成と彗星の物理的進化についてダストトレイル理論と高感度ビデオカメラや大型大気レーダーでの最先端の流星観測の結果から明らかにし、今後の研究の発展についても重要な指針を与えた。なお、論文の第 2 章は、国際学術誌に 2 編の主著論文として出版(Fujiwara et al., PASJ, 2003, Fujiwara et al., MNRAS, 2016)されており、第 3 章は 1 編の主著論文(Fujiwara et al., PASJ, 2017)として出版され、計 3 編の主著論文として国際学術誌に掲載されている。このうち最後のものは、和文および英文のプレスリリースも行った。さらに、第 4 章の内容も国際学術誌に投稿準備中である。また、フィンランドおよびオランダで開催された国際会議(Asteroids, Comets, Meteors, および Meteoroids 2016)でも、3 編のポスター発表を行ってきた。以上のことから、審査委員会では審査論文が博士学位論文に値するものと全員一致で判定した。

(備考)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格 (JIS) A 4 縦型とする。
2. 1 行あたり 40 文字 (英文の場合は 80 文字)、1 ページ当たり 40 行で作成する。
3. 上マージン、下マージン、右マージンは 2 cm、左マージンは 2.5 cm とする。
4. タイトルと本文の間は、1 行空ける。
5. ページ番号は入れない。
6. 出願者 (申請者) が論文審査に合格し、博士号が授与された場合は、本紙を総合研究大学院大学リポジトリにおいて、インターネット公開する。

Note:

1. The sheets must be Japanese Industrial Standard (JIS) A4 vertical.
2. Each line shall have approximately 40 characters in Japanese or 80 characters in English, and each page shall have 40 lines.
3. The top, bottom, and right margins must be 2 cm and the left one must be 2.5 cm.
4. Single spacing is required between the title and the text.
5. There must be no page numbers.
6. If the applicant is conferred a doctoral degree, this paper will be published on the SOKENDAI Repository.