

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21340040

研究課題名(和文) 赤外線スペクトルは彗星進化のバロメーター

研究課題名(英文) Infrared Spectra of Comets as a Barometer for Their Evolution

研究代表者

木村 宏 (Kimura, Hiroshi)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・学術研究員

研究者番号：10400011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究により、彗星コマの赤外線スペクトル観測で検出されるカンラン石に特有のピークは、凝集体構造をした彗星塵のフラクタル次元によってその強さが決まるが、そのピーク波長は有機物の体積比率や炭素化度によって決まることが分かった。つまり、彗星表層のダストマントル形成過程でフラクタル次元が増加し、有機物の炭素化が進み、彗星進化に伴う塵の変成が彗星コマの赤外線スペクトルに現れる。このように、赤外線スペクトルが彗星進化のバロメーターになることが示された。こうした塵の変成は彗星の公転とともに進むことから、この研究をさらに進めれることで、彗星の公転軌道長半径と赤外線スペクトルとの相関が得られるものと推測される。

研究成果の概要(英文)：We have found that the fractal dimension of aggregated dust particles in comets determines the strength of peaks characteristic of olivine detected in the infrared spectra of dust in cometary comae, while the volume fraction and carbonization of organic refractory material in the dust aggregates play an important role in the determination of the peak wavelengths. Furthermore, both an increase in the fractal dimension and the carbonization of organic refractory material are associated with the formation of a dust mantle on the surface of a comet. Therefore, the infrared spectra of cometary comae can be regarded as a barometer of the evolution of comets as well as the alteration of comet grain properties. Since the processing of comet dust proceeds with the orbit of the parent-body comet, we expect that a thorough analysis of infrared data will reveal a correlation between the spectral features characteristic of olivine and the orbital semi-major axes of comets.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光学赤外線天文学 モデル化 理論天文学 惑星起源・進化 彗星 ダスト

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 当該分野におけるこれまでの問題点  
彗星コマの赤外線スペクトルに現れる熱放射ピークの強さは「塵の大きさ」を示す指標とされてきた。彗星コマの観測では、カンラン石微粒子に特徴的な赤外線スペクトルが得られることから、彗星塵のサイズはサブミクロン以下であると見なされてきた。しかし、塵の典型的サイズは数十ミクロン以上であるという探査機によるその場観測と明らかに矛盾する。可視光地上観測においても、塵の典型的サイズは数十ミクロン以上であると示唆される。しかし、国内・海外の研究動向を見ると、サブミクロン粒子による赤外線スペクトルのパラメーターフィッティングに重点が置かれ、その場測定や可視光地上観測によって得られたデータ・知見は彗星の形成・進化を議論する上で活用されていない。

### (2) 問題点の新たな解決策

これまでの熱放射ピークと塵の大きさとの関係は、塵が球形粒子であるという仮定の下で導出された。しかし、原始惑星系円盤における彗星の形成過程を考えると、彗星塵はむしろサブミクロン粒子が付着成長した凝集体と考えるのが自然である。付着成長した凝集体塵のサイズと構成粒子数は、フラクタル次元を使って関係づけられる。フラクタル次元の小さな凝集体塵ほど彗星核から放出されやすく、彗星核表面で「ダストマントル」と呼ばれる層を形成する凝集体塵はフラクタル次元が大きいに違いない。さらに、断面積／質量比の小さい凝集体塵はダストマントルに降り積もり、衝突によりフラクタル次元を増加させるであろう。本研究代表者によるこれまでの研究成果から、フラクタル次元と熱放射ピークの強さ及びスペクトルの関係が明らかになっていた。よって、赤外線スペクトルは彗星の進化を表すバロメーターであるという着想に至った。

### (3) 本研究の位置付け

本研究では、彗星塵の形成・進化という観点から天文観測結果を考察し、物理的な意味付けを行う。このような、天文観測に加え近年の物質科学的情報と調和的な彗星塵モデルを構築することが、彗星の起源・進化に対する真の理解へと繋がるアプローチである。さらに、本研究は原始惑星系円盤や主系列星周残骸円盤の観測データを正しく理解する上で重要な役割を果たす。

## 2. 研究の目的

原始太陽系円盤内で塵が付着成長することによって形成された微惑星の生き残りが彗星であると考えられている。観測技術の飛躍的な進歩により、近年、世界各国で詳細な赤外線スペクトル観測によって、彗星核から放出された塵の熱放射が赤外線スペクトルによって捉えられてきた。この赤外線スペクトル

ルデータに正しい解釈を与えること無しに、彗星および微惑星の形成・進化を理解することはできない。本研究の具体的な目的は、彗星塵の変成に着目し、赤外線スペクトルと彗星の進化との関係を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

本研究課題を(1)光散乱のモデル化、(2)力学進化のモデル化、(3)衝突現象のモデル化、(4)熱放射のモデル化、という4プロジェクトとして遂行した。(1)及び(4)が専門である研究代表者と、(2)・(3)をそれぞれ専門とする若手研究者ら(小林浩、和田浩二)と連携することで研究目的を達成することを容易にした。また、上記(1)～(4)のモデル化を相互作用的に行うと共に、海外共同研究者らの数値計算・模擬実験・観測・分析に基づく研究から得られた知識を本研究のモデルにフィードバックすることにより、彗星塵の変成及び彗星の進化を解明することを目指した。

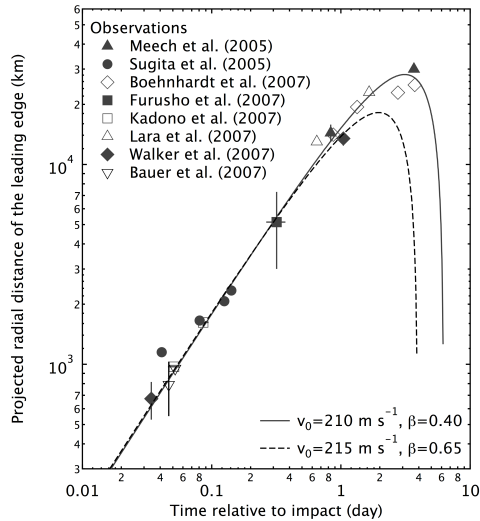
さらに、Cosmic Dustという名称で小規模の国際会議を連携研究者や海外共同研究者らと共に企画・開催し、国内・海外の関連する研究者らに宇宙における塵の形成・進化を議論する場を提供することで知識の集約を図った。こうして得られた集合知をもとに彗星の形成・進化を様々な角度から考察し、本研究を促進してきた。

## 4. 研究成果

(1) サブミクロン粒子凝集体塵の光散乱行列・断面積を数値計算するために、離散双極子近似法(DDA)やT-matrix法を駆使した。計算結果は、データベース化を行いインターネット上(<https://www.cps-jp.org/~lisa>)で公開している。これら数値データは、彗星および原始惑星系円盤や主系列星周残骸円盤の観測データを解析する時に非常に有用であるというコメントを国内・海外の関連する研究者らから受けた。また、凝集体塵の構成粒子であるサブミクロン粒子同士の相互作用が偏光特性に及ぼす影響をT-matrix法で調べた結果、偏光の波長依存性から凝集体塵の空隙率についての情報が得られることがわかった。これらの成果により、多波長偏光観測することで、彗星核表面でダストマントル層を形成するサブミクロン粒子凝集体塵の空隙率に制約を加えることができる。

(2) サブミクロン粒子凝集体塵の輻射断面積から太陽輻射圧／重力の比( $\beta$ 値)を数値積分により求め、彗星塵の力学的振舞いをモデル化した。そのモデルに基づいて、NASAのDeep Impactミッションによるテンペル1彗星のダストマントルから放出された塵イジェクタ分布の観測データを解析し、塵の物理特性を考察した(図1参照)。その結果、テンペル1彗星表層のダストマントルは、数

図1 イジェクタ分布データとモデル(雑誌論文4より)

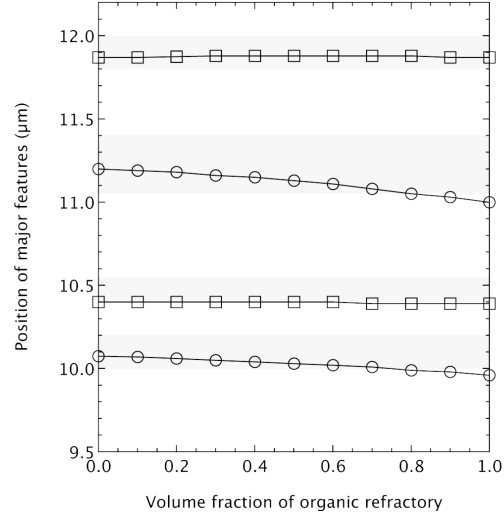


十ミクロンの比較的コンパクトな構造、すなわち、大きなフラクタル次元をもつサブミクロン粒子凝集体塵からなっていることが分かった。さらに、これらの結果から、ダストマントルの熱伝導度を見積る方法を提案した。ダストマントル下の彗星核内部では水が昇華しないほどの低温が維持されているため、その熱伝導度に制約を加えることができる。このことは、ダストマントルの形成および彗星核の熱進化を理解する上で非常に大きな成果である。

(3) サブミクロン粒子凝集体塵同士の衝突数値シミュレーションを接触力学に基づいて行った。ダストマントルを形成する塵の構造変化に関する物理パラメータ(衝突速度・初期空隙率)の影響を調べた結果、非現実的なほど空隙率の低いサブミクロン粒子凝集体塵を除いては、実験室での模擬実験から示唆された跳ね返りは起こらないことが分かった。また、サブミクロン粒子凝集体塵同士の質量比が大きくなるにつれ成長率が上昇することから、彗星核表面に戻った断面積/質量比の小さい凝集体塵は容易にダストマントル形成に寄与することが示唆される。これによって、彗星が太陽周回にともない数十ミクロン程度の比較的コンパクトな(大きなフラクタル次元を持った)凝集体塵が表層に残りダストマントルを形成するという彗星核表層進化の描像が明らかになった。

(4) サブミクロン粒子凝集体塵の赤外線スペクトルを有効媒体理論に基づいて計算した。その結果、これまで彗星コマの赤外線スペクトル観測で検出されたカンラン石に特有のピークについて、その強さはフラクタル次元に依存するが、ピーク波長は有機物の含有体積率や組成(炭素化度)によって決まることが分かった(図2参照)。すなわち、彗星の進化に伴いダストマントルが彗星核表

図2 ピーク波長と炭素化度の関係(雑誌論文1より)



層に形成される過程で、フラクタル次元の増加および有機物の炭素化が起こり、彗星コマの赤外線スペクトルが決まるといふ彗星核進化の描像が明らかになったのである。こうして、「赤外線スペクトルと彗星進化との関係を明らかにする」という本研究の目的が達成されたことから、本研究が成功裡に終わったと言える。有機物の炭素化は彗星の太陽周回ごとに進み、公転軌道長半径に依存すると期待されるので、今後の研究展望として、NASAのSpitzer宇宙望遠鏡などによる赤外線スペクトルデータを解析することにより、カンラン石に特有の熱放射ピークと軌道長半径との相関が得られるのではないかと推測される。

(5) 本研究期間中に企画・開催したCosmic Dust国際会議では、各方面からの参加者を総数50~60人に絞り議論を深めやすい環境を整えた(<https://www.cps-jp.org/~dust>)。そこで行われた年1回5日間におよぶ白熱した議論は、彗星および原始惑星系円盤や主系列星周残骸円盤に閉じず、全関連分野からの研究者を幅広く集めたことで、研究代表者のみならず連携研究者・海外共同研究者らの知見を広めるのに大いに役立った。その結果として得られた集合知は、彗星および彗星塵の形成・進化を様々な角度から考察する上で欠くことのできない多くの貢献があった。また、Cosmic Dust国際会議は、各分野における研究コミュニティから非常に高い評価を受け、その会議録は査読付国際雑誌の特集号として刊行されてきた。以下が、その特集号である。

- ① Earth, Planets and Space, 63(10), 2011  
DOI:10.5047/eps.2011.08.013
- ② Earth, Planets and Space, 65(3), 2013  
DOI:10.5047/eps.2012.11.006
- ③ Earth, Planets and Space, 65(10), 2013  
DOI:10.5047/eps.2013.09.012

- ④ Planetary and Space Science, 100, 2014  
DOI:10.1016/j.pss.2014.02.009(印刷中)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計22件)

- (1) Kimura, H., The organic-rich carbonaceous component of dust aggregates in circumstellar disks: Effects of its carbonization on infrared spectral features of its magnesium-rich olivine counterpart, *Icarus*, 232, 133-140, 2014. 査読有  
DOI:10.1016/j.icarus.2014.01.009
- (2) Wada, K., Tanaka, H., Okuzumi, S., Kobayashi, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., Growth efficiency of dust aggregates through collisions with high mass ratios, *Astronomy & Astrophysics*, 559, A62 (8pp), 2013. 査読有  
DOI:10.1051/0004-6361/201322259
- (3) Kimura, H., The reincarnation of interstellar dust: The importance of organic refractory material in infrared spectra of cometary comae and circumstellar disks, *The Astrophysical Journal Letters*, 775, L18 (5pp), 2013. 査読有  
DOI:10.1088/2041-8205/775/1/L18
- (4) Kobayashi, H., Kimura, H., and Yamamoto, S., Dust mantle of comet 9P/Tempel 1: Dynamical constraints on physical properties, *Astronomy & Astrophysics*, 550, A72 (4pp), 2013. 査読有  
DOI:10.1051/0004-6361/201220464
- (5) Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., The rebound condition of dust aggregates revealed by numerical simulation of their collisions, *The Astrophysical Journal*, 737, 36 (12pp), 2011. 査読有  
DOI:10.1088/0004-637X/737/1/36
- (6) Tanaka, K. K., Yamamoto, T., and Kimura, H., Low-temperature crystallization of amorphous silicate in astrophysical environments, *The Astrophysical Journal*, 717, 586-596, 2010. 査読有  
DOI:10.1088/0004-637X/717/1/586
- (7) Kolokolova, L. and Kimura, H., Effects of electromagnetic interaction in the polarization of light scattered by cometary and other types of cosmic dust, *Astronomy & Astrophysics*, 513, A40 (4pp), 2010. 査読有  
DOI:10.1051/0004-6361/200913681
- (8) Zubko, E., Petrov, D., Grynko, Y., Shkuratov, Y., Okamoto, H., Muinonen, K., Nousiainen, T., Kimura, H., Yamamoto, T., and Videen, G., Validity criteria of the discrete dipole approximation, *Applied Optics*, 49, 1267-1279, 2010. 査読有  
DOI:10.1364/AO.49.001267
- (9) Yamamoto, T., Chigai, T., Kimura, H., and Tanaka, K. K., Nonthermal crystallization of amorphous silicates in comets, *Earth, Planets and Space*, 62(1), 23-27, 2010. 査読有  
DOI:10.5047/eps.2008.11.002
- (10) Kolokolova, L. and Kimura, H., Comet dust as a mixture of aggregates and solid particles: model consistent with ground-based and space-mission results, *Earth, Planets and Space*, 62(1), 17-21, 2010. 査読有  
DOI:10.5047/eps.2008.12.001
- (11) Yamamoto, S., Wada, K., Kobayashi, H., Kimura, H., Ishiguro, M., and Matsui, T., Collisional process on Comet 9/P Tempel 1: Mass loss of its dust and ices by impacts of asteroidal objects and its collisional history, *Earth, Planets and Space*, 62(1), 5-11, 2010. 査読有  
DOI:10.5047/eps.2008.11.003
- (12) Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., Collisional growth conditions for dust aggregates, *The Astrophysical Journal*, 702, 1490-1501, 2009. 査読有  
DOI:10.1088/0004-637X/702/2/1490
- (13) Zubko, E., Kimura, H., Shkuratov, Yu., Muinonen, K., Yamamoto, T., Okamoto, H., and Videen, G., Effect of absorption on light scattering by agglomerated debris particles, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110, 1741-1749, 2009. 査読有  
DOI:10.1016/j.jqsrt.2008.12.006

〔学会発表〕（計 4 5 件）

- (1) Kobayashi, H., Kimura, H., and Yamamoto, S., Dust Property on the Nucleus Surfaces of Short-Period Comets. Cosmic Dust, Kobe, Japan, August 6-10, 2012
- (2) Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., Numerical Simulation of Collisions of Dust Aggregates Composed of Particles with Size Distributions. Dust and Grains in Low Gravity and Space Environment, Noordwijk, The Netherlands, April 2-4, 2012
- (3) Kimura, H., Dust in the Local Interstellar Cloud. International Conference on Interstellar Dust, Molecules and Chemistry, Pune, India, November 22-25, 2011
- (4) Kolokolova, L., Kimura, H., and Petrova, E., Photopolarimetric Phenomena at Scattering of Light by Aggregated Dust Particles. Asia Oceania Geosciences Society 8th Annual Meeting, Taipei, Taiwan, August 8-12, 2011
- (5) Kimura, H., The Reincarnation of Interstellar Dust in Cometary Comae and Debris Disks: Its Evidence in Their Infrared Spectra. Asia Oceania Geosciences Society 8th Annual Meeting, Taipei, Taiwan, August 8-12, 2011
- (6) Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., Growth Efficiency of Dust Aggregates Through Collisions with a Great Difference in Their Sizes. 42nd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA, March 7-11, 2011
- (7) Kolokolova, L. and Kimura, H., The Porosity and Composition of Dust in Different Cosmic Environments Studied Through Its Spectral Dependence of Polarization. Asia Oceania Geosciences Society 7th Annual Meeting, Hyderabad, India, July 5-9, 2010
- (8) Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., and Yamamoto, T., Collisional Growth Possibility of Dust Aggregates: A Bouncing Problem. 41th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA, March 1-5, 2010

〔図書〕（計 1 件）

- (1) Kolokolova, L., Petrova, E., and Kimura, H., Effects of interaction of electromagnetic waves in complex particles, In Electromagnetic Waves, V. Zhurbenko (ed.), Chap. 9, InTech, 2011. 査読有 DOI:10.5772/16456

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.cps-jp.org/~lisa>

<https://www.cps-jp.org/~dust>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 宏 (KIMURA HIROSHI)

神戸大学・大学院理学研究科・学術研究員

研究者番号：10400011

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

小林 浩 (KOBAYASHI HIROSHI)

名古屋大学・大学院理学研究科・特任助教

研究者番号：40422761

和田 浩二 (WADA KOJI)

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：10396856