

平成21年 5月 19日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19540234  
 研究課題名 (和文) 太陽系外ダスト円盤の寿命を決める新過程  
 研究課題名 (英文) New processes that determine the lifetime of dust disks around exoplanets  
 研究代表者 山本 哲生  
 山本 哲生 (YAMAMOTO TETSUO)  
 北海道大学・低温科学研究所・教授  
 研究者番号：10126196

研究成果の概要：惑星系ダスト円盤の寿命やそこでの種々の物理過程を明確にするため、以下の研究を行った。

- (1) 残骸円盤におけるダスト集積の理論
- (2) ダストアグリゲートの衝突シミュレーション
- (3) 電子線照射によるシリケートダストの結晶化
- (4) 低温結晶化の実験と理論
- (5) 結晶シリケート粒子の蒸発実験

その結果、汎用性をもつ、残骸円盤におけるダスト集積の解析的理論の構築、従来の常識を破る低温結晶化の機構と宇宙物理学へのその応用、ダスト衝突によるダストの付着成長／破壊の条件の解明と微惑星への成長への含意、等についての研究を展開した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：惑星科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽系外惑星，原始惑星系円盤，ダスト，物質進化

1. 研究開始当初の背景  
 系外惑星残骸円盤の寿命に関して PR 効果を想定した研究は多数存在する。また衝突破壊によるダストの消滅は太陽系内のダストについて多くなされてきた。これに対して、星

風によるプラズマ PR 効果の有効性を最近、申請者たちが指摘した (Minato et al. 2004, 2006)。さらに最近、Plavchan et al. (2005) も彼らが観測した年齢が  $10^7$  yr 以上の M 型矮星 (M dwarf) ではダスト円盤が観測され

なかったことから、これらの星でプラズマ PR 効果が効いているのではないかと、この議論を行なっている。

## 2. 研究の目的

本研究は PR 効果、プラズマ PR 効果、スパッターリング、ダスト衝突破壊等、ダスト円盤の寿命を決定する種々の過程を定量的に評価する。中心星のスペクトル型や進化段階によってもっともその過程が円盤の寿命を決定するうえでもっとも有効かは異なることが予想される。これが円盤の多様性とどのように関連づけられるかを明確化にすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

系外惑星ダスト円盤におけるダストの集積、結晶化、付着成長、ダストアグリゲイトの光学に関する理論的および実験的研究を両者の密接な連携によって展開した。

## 4. 研究成果

### (1) 残骸円盤におけるダスト集積の理論

主計列星の周りのデブリ円盤におけるダストの運動とその集積、寿命の研究を行った。運動を支配する効果は、Poynting-Robertson 効果、星風プラズマによるドラッグ(プラズマ PR 効果)、輻射圧、蒸発による輻射圧/重力比の変化を考慮した。これについては投稿中の論文を含め 2 編の論文を完成した。第 1 の論文では、氷粒子を想定し数値シミュレーションによって、その寿命、集積度、等を決定した。この論文は現在印刷中である。第 2 の論文では、解析的な一般論を構築した。これによってデブリ円盤のダストの運動学的振舞、昇華帯における集積度、寿命、等を個々の数値計算によることなく、予測できる道を拓いた。

さらに研究を拡張し、現在の太陽系や残骸円盤にけるダストの観測と結びつける研究を展開した。その論文は現在印刷中である。

### (2) ダストアグリゲイトの衝突シミュレーション

衝突付着、破壊等の条件を定量的に明らかにした。また衝突付着成長による密度進化に関連して、ダストアグリゲイトの強度-密度関係式(「状態方程式」)を導出した。

### (3) 電子線照射によるシリケートダストの結晶化

実験的研究においては、既存の装置を改造し、非晶質マグネシウム・シリケート粒子への電子線照射実験を行った。その結果、常温シリ

ケート粒子の結晶化が生じることを見出した。結晶化度は電子線のエネルギーおよび粒子サイズに依存する。この結果は専門紙に発表した。

### (4) 低温結晶化の実験と理論

Yamamoto & Chigai (2005)によって予言されていた結晶化機構を検証するため、研究代表者および分担者の協力によって常温結晶化の実験と理論モデリングを行った。実験ではサブミクロンサイズの非晶質シリケート粒子の表面に非晶質炭素膜をメタンガス雰囲気中でコートした粒子を作成した。これを常温、常圧の空気に触れさせると、シリケート粒子の表面付近が結晶化することを見いだした。この結果は従来の結晶化の常識を破る結果であるとともに、宇宙において従来想定されてきたよりもずっと低温で結晶化が生じることを示している。

この実験の理論モデリングにより低温結晶化の機構の解明を行った。その結果、空気とメタンとの反応によって生じる反応熱が炭素膜のグラファイト化を誘発し、グラファイト化の潜熱がさらなる温度上昇をもたらす、シリケート粒子の結晶化を導くことを示した。さらにシリケート粒子の結晶化が起る条件を定式化した。その結果、原始惑星系円盤のようなガスが希薄な環境下では、実験条件と比べてずっと容易に結晶化が起ることを予言した。

### (5) 結晶シリケート粒子の蒸発実験

惑星系円盤条件下での結晶シリケート粒子の蒸発実験を行った。その結果、以前の加熱実験における結晶核生成温度で、顕著な構造変化が起ることを見出した。さらに蒸発やおよび粒子の合体が活発に起る温度を従来の実験と比べて格段に精密に決定した。その結果、結晶化温度付近で蒸発が活発に起ることを示した。

## 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 34 件)

以下はすべて査読論文

①E. Zubko, H. Kimura, Y. Shkuratov, K. Muinonen, T. Yamamoto, H. Okamoto, & G. Videen Effect of absorption on light scattering by agglomerated debris particles J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, in press

②H. Kobayashi, S. Watanabe, H. Kimura,

- & T. Yamamoto, Dust ring formation due to sublimation of dust grains drifting radially inward by the Poynting-Robertson drag: An analytic model Icarus, in press
- ③ T. Yamamoto, T. Chigai, H. Kimura, & K.K. Tanaka, Nonthermal crystallization of amorphous silicate in comets Earth, Planets, Space, in press
- ④ Kaito, C., Shintaku, M., Sakao, R., Kumamoto, A., Saito, M., Kimura, Y., Oyagi, S., Morikawa, S., & Suzuki, H. Structural Alteration of Carbon Particle in Saturated Water Vapor, Japanese Journal of Applied Physics, in press
- ⑤ Kimura, Y., Miyazaki, Y., Kumamoto, A., Saito, M., & Kaito, C. Characteristic Low Temperature Crystallization of Amorphous Mg-Bearing Silicate Grains Under Electron Irradiation, Astrophysical Journal, in press.
- ⑥ Kimura, Y. Sasaki, Y., Suzuki, H., Kumamoto, A., Saito, M. & Kaito, C.: Experimental Demonstration of Condensation of Mg-Bearing Silicate Grains Around Evolved Stars, Astrophysical Journal, in press.
- ⑦ H. Kobayashi, H. Kimura, S. Yamamoto, S. Watanabe, & T. Yamamoto: 2009, Ice sublimation of dust particles and their detection in the outer solar system Earth, Planets, Space, 61, 1-5
- ⑧ C. Kaito, A. Kumamoto, Yoshio Saito, & Ryoichi Ono: 2009, Low-temperature crystallization of thin silicate layer on crystalline Fe dust, Earth Planets Space, 61, 1-3
- ⑨ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., & Yamamoto, T.: 2008, Numerical Simulation of Dust Aggregate Collisions. II. Compression and Disruption of Three-Dimensional Aggregates in Head-On Collisions., ApJ, 667, 1296-1308
- ⑩ Kimura, H., Chigai, T., & Yamamoto, T.: 2008, Mid-infrared spectra of cometary dust: The evasion of its silicate mineralogy, A&A, 482, 305-307
- ⑪ Kimura, H., Chigai, T. & Yamamoto, T.: 2008, Infrared Spectra of Dust Aggregates in Cometary Comae: Calculation with Olivine Formed by Exothermic Chemical Reactions ApJ, 111, 1-7
- ⑫ Tanaka, K.K., Yamamoto, T., Nagashima, K., & Tsukamoto, K.: 2008, A New method of evaluation of melt/crystal interfacial energy and activation energy of diffusion, Journal of Crystal Growth, 310, 1281-1286
- ⑬ Tanaka, K.K., Yamamoto, T., Watanabe, S. & Nakajima, K.: 2008, Analytic Model of Upper tropospheric clouds in the tropical Hadley cell, Earth, Planets, Space, 60, 219-228
- ⑭ Yuki Kimura & Kaito, C.: 2008, Production of refractory-metal ultrafine particles by gas evaporation method and their surface oxide layer, Surface & Coatings Technology 202, 4159-4162
- ⑮ Kimura, Y., Miyazaki, Y., Kumamoto, A., Saito, M. & Kaito, C.: 2008, Characteristic low-temperature crystallization of amorphous Mg-bearing silicate grains under electron irradiation, ApJ, 680, L89-L92
- ⑯ Nina, K., Kimura, Y., Yokoyama, K., Kido, O., Binyo, G., & Kaito, C.: 2008, Direct observation of MoO<sub>2</sub> crystal growth from amorphous MoO<sub>3</sub> film, Physica E 40 2995-2998
- ⑰ Kaito, C., Shintaku, M., Sakao, R., Kumamoto, A, Saito, M., Kimura, Y. Ohyagi, S., Morikawa, S. & Suzuki, H.: 2008, Structural alterations of carbon particles in saturated water vapor, Jpn. J. Applied Phys., 47, 6588-6591
- ⑱ C. Kaito, Y. Kinuta, H. Suzuki, S. Adachi, A. Kumamoto, Y. Saito, & Y. Kimura: 2008, Morphological Alteration & Structure of ZnO Particles Produced in Electric Field, J. Phys. Soc. Jpn., 77, 094708-1-4
- ⑲ Y. Kimura, S. Sasaki, H. Suzuki, A. Kumamoto, M. Saito, & C. Kaito: 2008, EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF CONDENSATION OF Mg-BEARING SILICATE GRAINS AROUND EVOLVED STARS, ApJ, 684, 1496-1501
- ⑳ Y. Kimura & C. Kaito: 2008, POSSIBLE DRIVING FORCE BEHIND FORMATION OF COSMIC CARBYNE CRYSTALS, ApJ, 685, L83-L86
- ㉑ Chihiro Kaito, Akihito Kumamoto, Ryoichi Ono, Yoshio Saito, & Shigeru Morikawa: 2008, Growth of Functional FeTi Clusters Covered with Carbon Layer, Research Letters in Nanotechnology Volume 2008, Article ID 734940, 3 pages
- ㉒ Yamamoto, T., Minato, T.: 2007, Theory of Energy Dissipation in a Viscoelastic Body under Time-dependent Stress Adv. Space Res. 39, 472-476
- ㉓ Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., & Yamamoto, T.: 2007, Numerical simulation of dust aggregate collisions. I. Compression and disruption of two-dimensional aggregates, ApJ, 661,

320-333.

㉔ Saito, M., Kurumada, M. & Kaito, C.: 2007, Relationship between Morphology and Spectra Revealed by Difference in Magnesium Content of Spinel Particles, *Advances in Geosciences, Vol.7:Planetary Science(PS)*, 133-142

㉕ Katsuyama, T., Kumamoto, A., Suzuki, H., Kido, O, Saito, Y., & Kaito, C.: 2007, Production of Metallic Particles Covered with Insulator Layer, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, No.6A, 3690-3693

㉖ Shintaku, M., Kumamoto, A., Suzuki, H., & Kaito, C.: 2007, Growth of Pt clusters from Mixture Film of Pt-C and Dynamics of Pt Clusters, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, No.6A, 3687-3689

㉗ Kaito, C., Sasaki, S., Miyazaki, Y., Kumamoto, A., Kurumada, M., Yokoyama, K., Saito, M., Kimura, Y., & Suzuki, H.: 2007, Direct observation of the Crystallization of Carbon-Coated Mg bearing silicate, *Advances in Geosciences, Vol.7:Planetary Science(PS)* 125-131

㉘ Yokoyama, K., Kimura, Y., Kido, O., Kurumada, M., Kumamoto, A. & Kaito, C.: 2007, Formation of CaTiO<sub>3</sub> Crystalline Dust in Laboratory, *Advances in Geosciences, Vol.7:Planetary Science(PS)* 115-123

㉙ Kumamoto, A., Kurumada, M., Kimura, Y., & Kaito, C.: 2007, New Method of Producing Titanium Carbide, Monoxide and Dioxide Grains in Laboratory, *Advances in Geosciences, Vol.7:Planetary Science(PS)*, 93-99

㊀ Kurumada, M. & Kaito, C.: 2007, Formation of Alumina Nanoparticles in Plasma, *Advances in Geosciences, Vol.7: Planetary Science (PS)*, 69-77

㊁ Kaito, C., Miyazaki, Y., Kumamoto, A., & Kimura, Y.: 2007, Exothermic chemical reactions can drive nonthermal crystallization of amorphous silicate grains, *Astrophysical Journal*, 666, L57-L60

㊂ Kumamoto, A. & Kaito, C.: 2007, A New Method for Producing Fine Platinum Particles, *Japanese Journal Applied Physics*, 46, No.10A, 6906-6907

㊃ Kaito, C., Ono, R., Sakao, R., Kumamoto, A., Saito, M., Kimura, Y. & Ohyagi, S.: 2007, Structural Alteration of Nanostructure Carbon Particles Carrying Pt Clusters in H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> Gases, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, No.46, L1141-1142

㊄ Nishio, N., Saito, Y., Yoshimoto, N. &

Kaito, C.: 2007, An Observation of the Gravitational Acceleration generated by A Magnetic Force by means of Bold's Pendulum, *Japanese Journal of Applied Physics Education*, 31, No. 2, 19-24

[学会発表] (計 15 件)

① T. Yamamoto Physical processes of dust aggregates in protoplanetary disks The 2nd Subaru International Conference, Exoplanets and Disks - Their Formation and Diversity - Keauhou, Hawaii, 10 March, 2009

② Laboratory experiments on the evaporation of amorphous and crystalline grains C. Kaito & A. Kumamoto The 2nd Subaru International Conference Keauhou, Hawaii 9-12 March 2009

③ Silicon oxide formation in hydrogen or carbon monoxide gases A. Kumamoto & C. Kaito The 2nd Subaru International Conference Keauhou, Hawaii 9-12 March 2009

④ アモルファスシリケートの低温結晶化過程, 田中今日子, 山本哲生, 日本惑星科学会秋季講演会, 2008.11.1-3, 九州大学

⑤ デブリ円盤における衝突の効果- 惑星形成時の衝突による質量損失 -, 小林 浩, 田中秀和, 山本 哲生, 日本惑星科学会秋季講演会 2008.11.1-3, 九州大学

⑥ 星雲衝撃波に伴う過飽和珪酸塩ダスト蒸気の生成: 凝縮物のサイズと形態の多様性, 三浦 均, 田中今日子, 山本哲生, 中本 泰史, 野澤純, 塚本勝男, 山田淳也, 日本惑星科学会秋季講演会, 2008.11.1-3, 九州大学

⑦ Direct observation on the structural alteration of dusts under low energy He<sup>+</sup> irradiation, C. Kaito, R. Ono, A. Kumamoto, Y. Saito, & C. Koike *Cosmic Dust Near & Far*, 8 - 12 September 2008, Heidelberg

⑧ Atmosphere Gas Effect on Grain Formation in Laboratory, A. Kumamoto & C. Kaito *Cosmic Dust Near & Far*, 8 - 12 September 2008, Heidelberg

⑨ Crystalline Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> and Amorphous Fe-bearing grains formation by coalescence and growth, Y. Saito, R. Ono, A. Kumamoto, and C. Kaito *Cosmic Dust Near & Far*, 8 - 12 September 2008, Heidelberg

⑩ Low temperature crystallization of silicate dust, T. Yamamoto, K.K. Tanaka, H. Kimura, T. Chigai *AOGS 2008*, 16-20 June, 2008, Busan,

⑪ Low Temperature Crystallization of Thin Amorphous Silicate Layer on the Crystalline Fe Dust, Chihiro Kaito, Akihito Kumamoto, Midori Saito & Yuki Kimura

AOGS 2008, 16-20 June, 2008, Busan

⑫ Laboratory Experiments on the PAH grains with inorganic Matters and their alteration by plasma, Midori Saito, Y. Kimura and C. Kaito AOGS 2008, 16-20 June, 2008, Busan

⑬ Laboratory Production of Crystalline and Amorphous Forsterite Grains, Tetsuya Miyashita, Akihito Kumamoto, Midori Saito, Yuki Kimura & Chihiro Kaito AOGS 2008, 16-20 June, 2008, Busan

⑭ Characteristic Grain Formation in Hydrogen Gas Atmosphere, Akihito Kumamoto, Yuki Kimura & Chihiro Kaito AOGS 2008, 16-20 June, 2008, Busan

⑮ In situ observation of structural alteration process of filmy quenched carbonaceous composite, Akihito Kumamoto, Yuki Kimura, Chihiro Kaito, & Setsuko Wada Organic Matter in Space IAU Symposium 251, 18-22 February, 2008, Hong Kong

[図書] (計 1 件)

① 山本哲生 星間物質と星形成 シリーズ 現代の天文学 6 (福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 水野亮 編) 日本評論社, 2008 共著, 6.6-6.8 節担当, pp. 325

[その他]

ホームページ:

[http://risu.lowtem.hkudai.ac.jp/japanese\\_index.html](http://risu.lowtem.hkudai.ac.jp/japanese_index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 哲生 (YAMAMOTO TETSUO)  
北海道大学・低温科学研究所・教授  
研究者番号: 10126196

### (2) 研究分担者

墻内 千尋 (KAITO CHIHIRO)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号: 80027812

平原 靖大 (HIRAHARA YASUHIRO)  
名古屋大学・環境学研究科・准教授  
研究者番号: 30252224