

## 撮像観測で探る若い星周円盤のダストの性質 Imaging observations to understand dust grains in young circumstellar disks

深川 美里<sup>1\*</sup>  
FUKAGAWA, Misato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学  
<sup>1</sup>Osaka University

Circumstellar disks around young stars are the likely sites of planet formation, thus observations of physical and chemical properties of disk material are essential to understand planet building processes. One of the recent highlights of observations for such disks is the discovery of transitional disks with clear spiral arms by high-angular-resolution and high-contrast imaging with Subaru. Those observations employ polarization differential imaging (PDI) method, combined with adaptive optics, where the scattered light from dust grains is detected while the un-polarized stellar component is subtracted out. The technique is very powerful to probe the inner part of the disk compared to classical methods, thus to reveal the signs of interaction between the disk and possible planets. For instance, observations with the state-of-the-art instruments have successfully detected disks typically beyond 30 AU from the central stars with the angular resolution of about 9 AU. In addition, the polarized light tells us about properties of scatterers in the disk since polarization depends such as on grain size, composition, shape, and porosity as well as the scattering angle. Given the current situation that PDI is becoming the major technique for disk imaging, it is useful to discuss how we can derive information on realistic dust grains from such data. In this talk, I will review the recent observational efforts especially in PDI and introduce the attempts to put constraints on grain properties in young circumstellar disks.

Keywords: astronomical observations, polarization, circumstellar disks, dust grains

## 原始惑星系円盤におけるダストの衝突進化と円盤内移動 Collisional and orbital evolution of dust particles in protoplanetary disks

奥住 聡<sup>1\*</sup>  
OKUZUMI, Satoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学  
<sup>1</sup>Nagoya University

原始惑星系円盤に含まれるダスト粒子の成長進化は、固体天体形成の第一段階であるとともに、円盤オパシティの進化をももたらす重要な過程である。しかしながら、ダスト粒子の集合体（アグリゲイト）の衝突は単純な成長過程ではなく、衝突速度やアグリゲイトの内部構造に応じて様々な結果（成長・圧縮・跳ね返り・破壊）がもたらされる。この点を十分に考慮した現実的な理論モデルの構築はいまだ道半ばである。加えて、ダストはガス円盤との摩擦相互作用を通じて円盤内を大規模に移動しうることも理論的に示されている。この点まで考慮に入れた大局的なダスト成長進化のモデル化は近年始まったばかりである。

本講演では、ダストの衝突進化・円盤内移動に関する理論的理解の現状について紹介する。近年、実験・数値実験を通じて、ミクロンサイズの粒子で構成されるアグリゲイトの衝突素過程の詳細が明らかになってきた。同時に、ダストアグリゲイトのサイズ分布および内部構造の進化を統計的に取り扱うための理論的手法も確立されてきた。講演者は、数値衝突実験に基づくアグリゲイト衝突モデルを用いて、円盤内におけるダストのサイズ分布・空間分布・内部密度の進化を同時に追跡する世界初の数値シミュレーションに取り組んできた。最新の結果は、(1) 中心星から数 AU から 10AU 程度の領域にあるダストは、大規模な円盤内移動を起こさずに数万年の時間スケールで微惑星質量程度の固体天体へと成長しうる、(2) それより遠方の領域にあるダストは大規模な中心星方向の移動を経験し、10 万年から 100 万年の時間をかけて円盤のより内側へ向かって集積することを示唆している。本講演では、これらの結果を紹介し、さらに円盤観測への示唆についても簡単に触れる。

キーワード: ダスト, 衝突, 原始惑星系円盤  
Keywords: dust, collision, protoplanetary disks

## 分子動力学計算による微粒子付着過程の解明

## Molecular dynamics simulation of sticking process of sub-micron particles

田中 秀和<sup>1\*</sup>TANAKA, Hidekazu<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 北海道大学低温科学研究所<sup>1</sup>ILTS, Hokkaido University

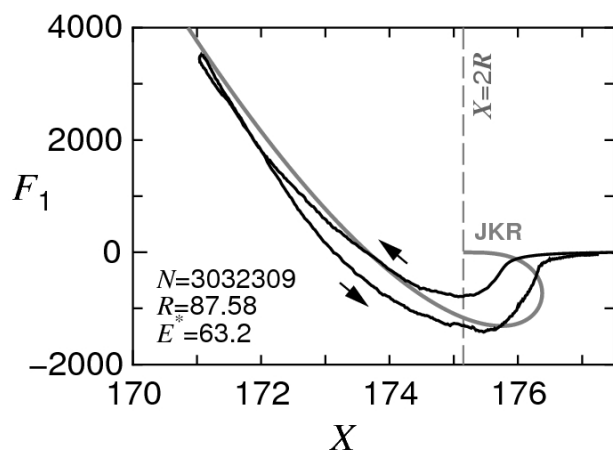
惑星形成の第一段階は固体微粒子合体成長過程であり、微粒子間の付着力がこの過程を支配している。付着合体においては付着力と同時に微粒子間の摩擦などによるエネルギー散逸も重要である。粒子の付着や摩擦は地球惑星科学のみならずトライボロジーなど理工学の広範な分野において重要な研究課題であり詳細に研究されてきた。最近ナノサイズ粒子では大きな付着力が働き強い散逸過程が起こることが知られているが、そのミクロな現象がマクロでの理論(JKR理論)へどのように遷移するのは明らかになっていない。本研究では、百万から1億のレナード-ジョーンズ分子からなる固体微粒子の衝突の分子動力学計算(MD計算)を行うことにより、ナノサイズからサブミクロンサイズの範囲で粒子間相互作用と散逸過程の詳細を調べた。百万分子以上からなる粒子付着の大規模MD計算は他に行われておらず、本研究は挑戦的な課題といえる。

まず、多数分子で構成された微粒子の正面衝突を分子動力学計算により調べた。計算から得られる衝突の際の微粒子の加速度から、各時刻における微粒子間相互作用(垂直方向の力)の大きさを求めることができる。下図には、約3百万分子からなる直径60nmの球粒子2体の衝突計算から得られた粒子間力を2球重心間距離の関数として示した。粒子間相互作用はマクロな表面張力を用いたJKR理論にておおよそ説明できる。一方、2球衝突の往復の間で相互作用のヒステリシスもみられる。これは衝突時の運動エネルギー散逸を引き起こす。球粒子サイズや衝突速度を変え多数の計算を行った結果、他の場合でも粒子間相互作用とエネルギー散逸に関して同様な結果が得られた。エネルギー散逸過程は摩擦力を導入することで表される。この摩擦力は速度と粒子半径にほぼ比例する形で定式化できることも明らかにした。2粒子間の垂直方向の運動の場合以外に、2球の転がりや、すべり、ねじれの各運動についても分子動力学計算を行い、相互作用や摩擦を調べた。得られた結果は従来の微粒子相互作用の理論モデルとおおよそ調和的であった。

以上のように、数値計算機の高速化により分子動力学計算は微粒子相互作用の研究手法として強力なものとなっている。より複雑で現実的な表面状態を再現した分子動力学計算を今後行うことも可能であろう。

キーワード: 宇宙ダスト, グレインアグリゲイト, 惑星形成, 微惑星, トライボロジー

Keywords: cosmic dust, grain aggregate, planet formation, planetesimal, tribology



## 彗星コマの水分子の核スピン温度は彗星氷の生成温度を反映しているか？ Does nuclear-spin temperature of water molecules in comet coma reflect the formation temperature of the cometary ice?

羽馬 哲也<sup>1\*</sup>, 渡部 直樹<sup>1</sup>, 香内 晃<sup>1</sup>

HAMA, Tetsuya<sup>1\*</sup>, WATANABE, Naoki<sup>1</sup>, KOUCHI, Akira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学 低温科学研究所

<sup>1</sup>Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

The nuclear-spin temperature ( $T_{spin}$ ) is derived from the ortho-to-para ratio (OPR) of molecules such as  $H_2$  or  $H_2O$ , which contains two protons with spin of  $1/2$ ; thus, its total spin state can be either 0 (singlet, para) or 1 (triplet, ortho). In the case of  $H_2O$ , the OPR is equal to 3 in statistical equilibrium, which is achieved at temperatures above  $\sim 50$  K.

$T_{spin}$  of interstellar  $H_2O$  molecules has been observed, because they are suggested to be indicators of these molecules' physical and chemical histories. In cometary coma,  $T_{spin}$  of  $H_2O$  has been derived to be typically  $\sim 30$  K. Recently, it was found that there has been a wide range of the observed values of  $T_{spin}$  of  $H_2O$  from 13.5 K to  $\sim 50$  K in interstellar space.

Since nuclear-spin conversion is unlikely to occur for isolated molecules in the gas phase. These values have been implicated as the temperature of cold grains at molecular condensation or formation in a molecular cloud, or in the solar nebula, for example. However, the real meaning of the observed  $T_{spin}$  remains a topic of continuing debate. For a proper interpretation of  $T_{spin}$  of molecules observed in interstellar space or cometary coma, the correlation between  $T_{spin}$  and temperatures of ice at condensation, formation, and desorption needs to be investigated. Even  $T_{spin}$  of thermally desorbed  $H_2O$  from water ice condensed or formed at low temperature is yet to be experimentally measured.

The present study measured the  $T_{spin}$  of  $H_2O$  thermally desorbed from pure amorphous solid water (ASW) deposited at 8 K by employing a combination of temperature programmed desorption and resonance-enhanced multiphoton ionization (REMPI) methods. We also produced ASW at 8 K by photolysis of a  $CH_4/O_2$  mixture (photoproduced ASW) for the idea that  $T_{spin}$  of  $H_2O$  molecules formed at a low temperature relates to the formation environment.

As a result, thermally desorbed  $H_2O$  molecules at 150 K from all ice samples prepared at 8 K showed  $T_{spin}$  almost at the statistical high-temperature limit ( $> \sim 30$  K).  $T_{spin}$  of desorbed  $H_2O$  from vapor-deposited pure ASW is almost at the statistical high-temperature limit ( $> \sim 30$  K), while its value was almost the same after leaving it for 9 days at 8 K. These results suggest that the  $T_{spin}$  of gaseous  $H_2O$  molecules thermally desorbed from ice does not necessarily reflect the surface temperature at which  $H_2O$  molecules condensed or formed. We discuss the possibility of nuclear-spin conversion of  $H_2O$  in water ice.

キーワード: 彗星, 核スピン温度, オルソパラ比, 星間分子, 室内実験

Keywords: comet, nuclear-spin temperature, ortho-to-para ratio, interstellar molecules, laboratory experiment

## 熱プラズマを用いた GEMS 模擬粒子の合成実験

### A synthesis experiment of GEMS analogue grains produced by thermal plasma

松野 淳也<sup>1\*</sup>, 土山 明<sup>1</sup>, 八木下将史<sup>2</sup>, 小山誠司<sup>2</sup>, 渡辺隆行<sup>2</sup>

MATSUNO, Junya<sup>1\*</sup>, TSUCHIYAMA, Akira<sup>1</sup>, YAGISHITA Masahito<sup>2</sup>, KOYAMA Seiji<sup>2</sup>, WATANABE Takayuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup> Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology Interdisciplinary

彗星起源と考えられる無水惑星間塵中には、GEMS (glass with embedded metal and sulfides) と呼ばれる非晶質物質が多量に含まれている。GEMS は直径数 100 nm の粒子であり、丸い 10-50 nm 程度の Fe-Ni の金属や硫化物を含む SiO<sub>2</sub> に富む非晶質珪酸塩である。GEMS の形成過程は、以下に挙げる二つのモデルが提唱されている：(1) Si に富むガスからの凝縮 [1], (2) 結晶質珪酸塩ダストの宇宙線による非晶質化 [2]。GEMS の形成過程を理解する上で、実験室で GEMS 模擬物質を合成することは極めて重要である。本研究では、Si に富むガスの凝縮によりナノサイズの金属鉄を含む非晶質珪酸塩微小粒子が生成されるかどうかを検証した。

Si に富むガスは誘導結合型熱プラズマ (ITP: induction thermal plasma) 装置 (TP12010, JEOL) を用いて作成した。ITP は高温 (~10,000 K) を用いて瞬時に出発物質を蒸発させることができ、10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> K/sec の冷却速度でガスを急冷し、ナノ粒子を合成することができる装置である。出発物質には、単純化のため、太陽系の固体物質の主要元素である Mg, Fe, Si, O を選び、原始太陽系の Si に富むガスを模擬するため GEMS 平均組成 (Mg/Si = 0.65, Fe/Si = 0.56) [1] を持った MgO-Fe-SiO<sub>2</sub> 混合粉末を用いた。GEMS は金属を含む非晶質物質が凝縮した後、表面近くの金属が硫化した物質であると示唆されていること [1] や、実験で S の扱いが困難であることから、S を含まない系で実験を行った。また、実験は大気圧の Ar-He の雰囲気下で行った。

実験チャンパー内壁に付着した生成物を回収した。粉末 X 線回折において、 $\alpha$ -iron のピークと、非晶質物質に特有なハローパターンが見られたが、結晶質珪酸塩は同定されなかった。透過型電子顕微鏡による観察から、実験生成物は多くの球状粒子 (典型的には 50 nm 程度) から成り、それぞれの粒子において非晶質珪酸塩が一つの金属鉄の核 (~20 nm) を取り囲んでいることが分かった。これらのことから、非晶質珪酸塩は凝縮によって高温ガスから直接形成したものであり、おそらく先に凝縮した金属鉄の上に不均一核形成したものであると考えられる。

Yamamoto & Hasegawa (1977) は、ダストがガスから均一核形成と成長によって生成される様子を、凝縮の無次元パラメーターを導入して理論的に取り扱い、様々な宇宙環境での  $\tau$  の値を推定した。 $\tau$  の値は、例えば 0.1 AU での原始太陽系円盤では  $3 \times 10^9$ 、AGB 星周りでは 0.9-90 である [3]。今回の実験系での  $\tau$  を推定したところ  $\sim 4 \times 10^3$  となった。この値はこれらの宇宙環境での値と同じではないが、大きくは異なっていない。

GEMS の組織は金属鉄が非晶質珪酸塩によって覆われているという点で実験生成物のそれとよく似ていた。しかし、GEMS においては一つの粒子中に複数の金属粒子が含まれており、その点で実験生成物と異なっていた。一つの金属を含む非晶質珪酸塩の球状粒子の集合体の焼結によって GEMS が形成されたとすると、これは説明が可能である。酸素同位体比異常のある GEMS が少ないことから GEMS は太陽系起源の物質であると提案されている [1]。しかし GEMS が数 10 nm 程度の微小な一次粒子の集合体であるとすると、低温でもそれら一次粒子が H<sub>2</sub>O や CO を含むガスと酸素同位体の交換を起こし同位体が均質化する可能性が考えられる。GEMS は必ずしも太陽系起源物質ではないかもしれない。この場合 GEMS の形成過程は、一次粒子が晩期星周りで凝縮し、星間空間を経て原始太陽系星雲に取り込まれ、周囲のガスと低温で同位体交換反応を起こした後、集合・合体し、非晶質珪酸塩が結晶化しない程度に加熱焼結され、最後に表面が硫化した、というプロセスが考えられる。

[1] Keller & Messenger, 2011 [2] Bradley & Dai, 2004 [3] Yamamoto & Hasegawa, 1977

キーワード: GEMS, 凝縮実験

Keywords: GEMS, condensation experiment



## 鉱物学としての「宇宙鉱物学」: これまでとこれから "Astromineralogy" as mineralogy: until now and from now

土山 明<sup>1\*</sup>

TSUCHIYAMA, Akira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Osaka University

様々な宇宙環境に存在する固体微粒子(ダスト)は太陽系の固体原料物質であるとともに、高エネルギーの光(紫外・可視)を吸収し低エネルギーの光(赤外)を輻射することにより、星や惑星形成など様々な天体現象におけるエネルギー収支を支配している。近年の赤外線天文観測の進展により、かつては非晶質珪酸塩のみと考えられていたダストの中に地球上の鉱物が普遍的に存在することが明らかにされ、天文学と鉱物学との境界分野として宇宙鉱物学(astromineralogy)と呼ばれる分野が開拓された[1]。晩期星や若い星の星周領域には、非晶質珪酸塩だけでなく15%程度の結晶質珪酸塩(Mgに富むカンラン石や輝石)からなるサブミクロンサイズのダスト(星周塵)が観測され、その組成や形状・温度などの情報から粒子の形成条件が議論されている。これに対して、星間領域では結晶質珪酸塩は観測されず[2]、一部結晶を含む星周塵は星間領域に放出され、結晶は宇宙線照射により非晶質化されたと考えられている。このような星間塵は分子雲に取り込まれ、非晶質珪酸塩ダストを核として氷が凝縮し、さらに氷から有機物が生成された。これはGreenberg粒子[3]と呼ばれ、太陽系の固体物質の原材料であると考えられる。原始惑星系円盤の高温領域では非晶質珪酸塩の結晶化や蒸発・再凝縮が起こるが、微惑星形成後珪酸塩ダストは有機物とともに水質変成を受ける。

宇宙鉱物学はこれまでは主として天文学の分野として発展してきたが、物質科学の観点からは鉱物のもつイントリンシクな性質(結晶構造、化学組成、温度)およびエキストリンシクな性質(粒子サイズ、粒子形状、異方性、格子欠陥、集合状態)が赤外線吸収スペクトルに与える影響に着目し、ダストの形成や進化が議論されてきた(例えば[4])。とくに前者の研究により、観測された赤外線スペクトルとの比較から星周塵鉱物が同定され、その化学組成が推定されてきた。一方、後者の研究は発展途上であり、今後観測的・理論的な研究に加えて、このような「鉱物学」としての物質科学的なアプローチを進めることにより、ダストの形成や進化の研究を推進していくことが重要である。

物質科学的なアプローチとして今後重要と考えられるものとしては、(i)結晶質星周塵の起源:先に形成された非晶質珪酸塩の結晶化[5,6]か高温ガスからの直接凝縮[7]?また、既存の結晶の衝突破片の可能性は[8]?(ii)固体を構成する主要元素であるFeやSの挙動、(iii)隕石や宇宙塵(とくに彗星起源のもの)に含まれる太陽系外物質(プレソーラー粒子)[7]やその候補物質(GEMS)[9]との関連、(iv)鉱物の赤外吸収スペクトルのさらなる物理的理解、が挙げられる。

最後に、これまでおこなわれてきた研究をもとに、ダスト形成・進化の一連のプロセスについて以下のような作業仮説を提案したい。(1)晩期星星周領域における星からの質量放出、(2)高温ガスからの難揮発性鉱物(コランダムなど)の凝縮[7]とそれに引き続く球状非晶質珪酸塩粒子(中心には金属鉄ナノ粒子が存在)の凝縮[5]、(3)一部の非晶質珪酸塩の結晶化[6]、(4)星間空間への放出と宇宙線照射による結晶の非晶質化[2]、(5)分子雲への取り込みと氷の不均一核形成・凝縮と有機物の生成[3]、(6)原始惑星系円盤への取り込みと球状非晶質珪酸塩粒子の焼結(GEMSの形成)[9]、(7)中心星に近い高温領域での結晶化[6]、(8)より高温領域での珪酸塩の蒸発・再凝縮と高温生成物質のリサイクル。

引用文献:[1] Henning (2010) "Astromineralogy" Springer-Verlag. [2] Kemper et al. (2004) ApJ 609: 826. [3] Greenberg (1998) A&A 330: 375. [4] 茅原弘毅ら (2006) 遊星人 15: 44. [5] Koike et al. (2010) ApJ 709: 983. [6] Murata et al. (2009) ApJ 697:836. [7] Takigawa et al. (2009) MAPS, 44: A200. [8] Imai et al. (2009) A&A 507: 277. [9] Matsuno et al. (2012) JGU Meeting, abstract, this volume.

キーワード: 星周塵, 星間塵, 非晶質珪酸塩, 結晶質珪酸塩, 赤外スペクトル, 凝縮

Keywords: circumstellar dust, interstellar dust, amorphous silicate, crystalline silicates, infrared spectrum, condensation