

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^{1*}
FUKAGAWA, Misato^{1*}

¹ 大阪大学

¹Osaka 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^{1*}

OKUZUMI, Satoshi^{1*}

¹ 名古屋大学

¹Nagoya 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^{1*}TANAKA, Hidekazu^{1*}¹ 北海道大学低温科学研究所¹ILTS, Hokkaido University

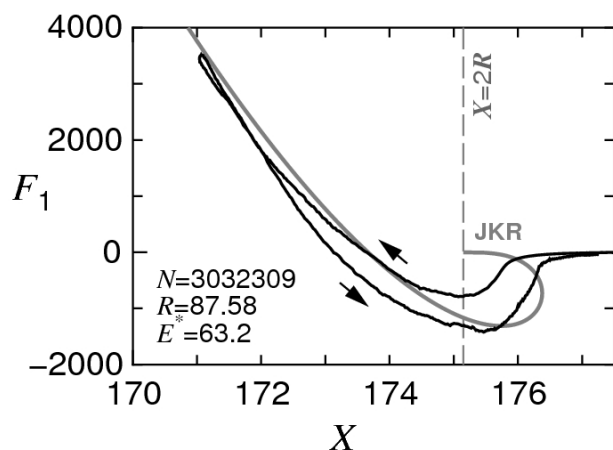
惑星形成の第一段階は固体微粒子合体成長過程であり、微粒子間の付着力がこの過程を支配している。付着合体においては付着力と同時に微粒子間の摩擦などによるエネルギー散逸も重要である。粒子の付着や摩擦は地球惑星科学のみならずトライボロジーなど理工学の広範な分野において重要な研究課題であり詳細に研究されてきた。最近ナノサイズ粒子では大きな付着力が働き強い散逸過程が起こることが知られているが、そのミクロな現象がマクロでの理論(JKR理論)へどのように遷移するのかが明らかになっていない。本研究では、百万から1億のレナード-ジョーンズ分子からなる固体微粒子の衝突の分子動力学計算(MD計算)を行うことにより、ナ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^{1*}, 渡部 直樹¹, 香内 晃¹

HAMA, Tetsuya^{1*}, WATANABE, Naoki¹, KOUCHI, Akira¹

¹ 北海道大学 低温科学研究所

¹Institute 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 ~ 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 ~ 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 ~ 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^{1*}, 土山 明¹, 八木下将史², 小山誠司², 渡辺隆行²

MATSUNO, Junya^{1*}, TSUCHIYAMA, Akira¹, YAGISHITA Masahito², KOYAMA Seiji², WATANABE Takayuki²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 東京工業大学大学院総合理工学研究科

¹ Graduate School of Science, Kyoto University, ² 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 SiO₂ 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、10⁴-10⁵ 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-SiO₂ 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、 α -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 τ の値を推定した。 τ の値は、例えば 0.1 AU での原始太陽系円盤では 3×10^9 、AGB 星周りでは 0.9-90 である [3]。今回の実験系での τ 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 H₂O 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 ”Astro-mineralogy” as mineralogy: until now and from now

土山 明^{1*}

TSUCHIYAMA, Akira^{1*}

¹ 大阪大学理学研究科

¹ 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trinsicな性質(結晶構造、化学組成、温度)およびエキストラinsic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]か?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) "Astro-mineralogy" 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

分子動力学シミュレーションにおける気相からの核生成過程：付着確率の効果 Nucleation process from vapor due to molecular dynamics simulations: effect of the sticking probability

田中 今日子^{1*}, 河野 明男², 田中 秀和¹

TANAKA, Kyoko^{1*}, KAWANO, Akio², TANAKA, Hidekazu¹

¹ 北海道大学低温科学研究所, ² 独立行政法人海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ²Institute For Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

In the previous studies (Tanaka et al. 2005, 2011), we performed molecular dynamics (MD) simulations of nucleation from vapor of Lennard-Jones (L-J) type molecules and found that the semi-phenomenological (SP) model reproduces very well the nucleation rates obtained from the MD simulations. In this study, we performed MD simulations of nucleation from vapor for systems of 4000 water molecules to test nucleation theories. Simulations were done for wide ranges of the initial supersaturation ratio ($S=4-400$) and temperature ($T=250-375$ K). Through comparison with the nucleation rates and the cluster size distributions obtained from our MD simulations, we investigated the validity of the SP model. Our results show that the semi-phenomenological model reproduces well the size distributions of the clusters and the nucleation rates. Furthermore, the sticking probability of vapor molecules onto clusters was examined in MD simulations, by observing the growth rate of stable clusters larger than the critical size. In all runs in the present study, the values of the sticking probability are larger than 0.1. Our results show that the obtained sticking probability depends on the supersaturation ratio.

K. K. Tanaka, K. Kawamura, H. Tanaka, and K. Nakazawa, J. Chem. Phys. 122, 184514, 2005

K. K. Tanaka, H. Tanaka, T. Yamamoto, and K. Kawamura, J. Chem. Phys. 134, 204313, 2011

キーワード: 核生成過程, 水, 凝縮, MD シミュレーション

Keywords: nucleation process, water, condensation, MD simulation

航空機による微小重力環境を利用した核生成の“ その場 ”観察実験 In-situ observation of nucleation process under microgravity by an aircraft

木村 勇氣^{1*}, 田中 今日子², 三浦 均¹, 塚本 勝男¹, 稲富裕光³

KIMURA, Yuki^{1*}, TANAKA, Kyoko², MIURA, Hitoshi¹, TSUKAMOTO, Katsuo¹, Yuko Inatomi³

¹ 東北大学, ² 北海道大学, ³ 宇宙航空研究開発機構

¹Tohoku University, ²Hokkaido University, ³JAXA

To understand the formation process of cosmic dust particles with nm to sub-micrometer in size, dust analogues have been produced in the laboratory. The gas evaporation method has a similarity in the dust formation process in space, where dust forms by a condensation from gas phase via homogeneous nucleation in most case. Nucleation determines characters of dust, such as size, number and composition. However, nucleation process has been unknown not only in universe but also in the laboratory. Recently, we succeeded in directly observing the temperature and concentration during homogeneous nucleation in the vapor phase by interferometer under the gravity [1,2] To understand the homogeneous nucleation quantitatively, we applied nucleation theories to the experimental results and determined the following results: the surface free energy, the size of critical nuclei, determination of polymorph, fusion growth and sticking probability. In particular, surface free energy and sticking probability are most important parameters to know the characters of cosmic dust. Here, we will show the recent results in microgravity by using an aircraft. Microgravity experiment has an advantage to determine above mentioned values more certainly due to suppress the thermal convection, which generates inhomogeneous formation condition and secondary growth in the flow.

Smoke particles of WO_3 , SiO , Mn, Fe, Au or NaCl were produced in a specially designed smoke chamber setting with a Mach-Zehnder-type interferometer with two wavelengths lasers, which can obtain two unknown parameters simultaneously, i.e., concentration of evaporant and temperature.

When an evaporant is initiated in an inert gas, the evaporated vapor subsequently cools and condenses homogeneously in the gas atmosphere. Condensation temperature depends on surface energy and sticking probability. Both parameters can be determined from the condensation temperature and the size of produced particles, respectively.

In case of Mn and WO_3 , condensation occurred at 660 and 600 K below the equilibrium temperatures, and the degree of supersaturation was as high as 10^5 and 10^9 , respectively. The condensation temperature, number density, and size of particles for Mn experiment were consistent with the values calculated by the semi-phenomenological nucleation theory. On the other hand, however, the results have a gap with the values calculated by the nucleation theories in case of WO_3 and NaCl. One of the reasons may be due to secondary growth. Since there is strong thermal convection generated by the hot evaporation source in the chamber, condensed particles follow the convection and possibly grow in the way as gas cools. As the result, size and number density could be different from the theory. In the same reason, estimation of the sticking probability will be difficult. It has been expected that microgravity experiment gives us more certain results due to suppress the thermal convection.

Recently, we firstly performed the gas evaporation experiments in microgravity using the aircraft. Here, we will present the brief results and show the difference from gravity experiment. Since microgravity environment strongly suppresses the thermal convection, evaporated vapor diffused simply to the direction of centric distance and condensed at the wider area compared with gravity condition due to no convection. Then, it can be concluded that condensation in microgravity occurred farther from the evaporation source compared with gravity experiment. In case of microgravity experiment, since condensation and growth occur at the same place due to no convection, secondary growth is negligible and the results are able to compare with the nucleation theories. As the result, surface free energy and sticking parameter will be determined more certainly.

[1] Y. Kimura, et al., J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 28 (2011) S9.

[2] Y. Kimura, et al., J. Crystal Growth, 316 (2011) 196.

キーワード: 核生成, ダスト, ナノ粒子, その場観察

Keywords: Nucleation, dust, nanoparticle, in-situ observation

ガス・ダスト系の熱的不安定 Thermal instability of gas-dust fluid system

渡辺 圭亮^{1*}, 中本 泰史¹
WATANABE, Keisuke^{1*}, NAKAMOTO, Taishi¹

¹ 東京工業大学地球惑星科学専攻

¹Department of Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

ガス・ダスト二流体の系の一次元線形安定性解析を行った。本研究では放射冷却による熱的不安定に注目する。流体内のある領域でダストによる放射冷却が卓越すると、ガスの温度、圧力が低下し、この領域へ向けてガスの流れが発生する。この時、ガスの抵抗力によってダストもこの領域へ集められ、ダストの数密度が増加する。放射冷却率はダストの数密度に比例するため、より放射冷却が卓越する。この過程は一方向的であり、不安定である。

初期状態として、定常な、ガス温度がダスト温度より高い系を考える。定常状態を保つため、ガスの温度、密度の関数である仮想的なガスの熱源関数を導入し、冷却源としてダストからの放射冷却を考える。放射は吸収されることなく系の外へ放出されるとする。二流体の間でのエネルギーの輸送はガス・ダスト間の衝突によって起こり、運動量の輸送はガス・ダスト間の抵抗力によって起こると考える。

線型安定性解析の結果、分散関係式が得られた。またこれから、熱源関数のガス温度微分、およびガス密度微分がある条件を満たす時、不安定のモードが現れることがわかった。この時、ダストの密度の揺らぎは成長し、ダスト密度は増加する。

この結果は、原始惑星系円盤内で、現実的な熱源関数が不安定の条件を満たす場合に、ダスト集積が起こり得ることを示唆している。ダスト集積は微惑星形成に至るための重要な過程である。

キーワード: 線形安定性解析, ダスト集積, コンドリュール形成, 微惑星形成

Keywords: hydrodynamics linear stability analysis, dust accumulation, chondrule formation, planetesimal formation

54 クロムの異常と隕石母天体の集積年代 Cr-54 anomalies and accretion ages of meteorite parent bodies

杉浦 直治^{1*}, 藤谷 渉¹
SUGIURA, naoji^{1*}, FUJIYA Wataru¹

¹ 東京大学理学系研究科

¹Department of Earth and Planetary Sci. University of Tokyo, Tokyo, Japan

A positive correlation between ⁵⁴Cr excesses and accretion ages is observed among meteorites including iron meteorites, palasites, mesosiderites, aubrites, HED meteorites, angrites, ureilites, acapulcoites and chondrites (including E, O, R, CK, CO, CV, CH-CB, CR, CM and CI) [1]. This suggests that ⁵⁴Cr carriers were injected into the forming solar nebula. We could constrain the solar system evolution based on this observation. However, there are still many unsettled issues concerning the ⁵⁴Cr anomalies, the accretion ages and the interpretation of the correlation. Here, we examine some of the most important issues.

26Al Heterogeneity: Homogeneous distribution of ²⁶Al is assumed for calculating accretion ages of chondrites parent bodies. It is also assumed for estimating accretion ages of differentiated meteorite parent bodies. But, at present heterogeneous distribution of ²⁶Al [2] cannot be ruled out. Comparison of precisely determined Al-Mg ages and other ages is needed to solve this problem.

Exceptions: The NWA011 group (basaltic achondrites) and Tafassasset (primitive achondrite) do not fit the correlation. They both have high ⁵⁴Cr excesses [3,4] similar to that of CR chondrites and yet apparently formed early when there was enough ²⁶Al. A possible explanation may be that early-formed planetesimals in the terrestrial-planet formation region were gravitationally scattered into the far end of the asteroidal belt, capturing CR-like materials. This is an ad hoc explanation but is shown to be possible by numerical simulations [5].

CAIs: CAIs have ⁵⁴Cr, ⁵⁰Ti and ⁴⁸Ca isotope anomalies which are larger than those found in bulk meteorites. ⁵⁴Cr and ⁵⁰Ti anomalies in CAIs and bulk meteorites appear to be well correlated with each other [6] but ⁴⁸Ca anomalies are not so well correlated with them [7]. Since CAIs formed early, they do not fit the trend formed by various meteorites on the ⁵⁴Cr vs. accretion age diagram. If we consider that the isotope anomalies of neutron-rich isotopes in CAIs and bulk meteorites originated from a similar source, then, a kind of chemical fractionation that enriched carriers of the neutron-rich isotopes must have operated during CAI formation. Otherwise, the anomalies in CAIs may have originated from a totally different source.

Other issues such as the way to estimate accretion ages of differentiated meteorite parent bodies will also be discussed at the meeting.

References

[1] Sugiura N. and Fujiya W. 2011. MAPS. 46. abstract. 5105.pdf. [2] Larsen K. K. et al. 2011. *Astrophys. J. Lett.* 735. L37-L43. [3] Bogdanovski O. and Lugmair G.W. 2004. 35th LPSC Abstract #1715. [4] Gopel C. et al. 2009. MAPS. 44. abstract 5267.pdf. [5] Bottke W. F. et al. 2006. *Nature* 439. 821-824. [6] Trinquier A. et al. 2009. *Sci.* 324. 374-376. [7] Chen H-W. et al. 2011. *Astrophys. J. Lett.* 743. L23.

キーワード: 54 クロム, 集積年代, 隕石母天体

Keywords: ⁵⁴Cr, accretion age, meteorite parent bodies

原始惑星系円盤条件での鉱物の凝縮およびガス反応実験 Condensation and gas-solid experiments of minerals in protoplanetary disk conditions

橋 省吾^{1*}, 瀧川 晶¹, 永原 裕子¹, 小澤 一仁¹

TACHIBANA, Shogo^{1*}, TAKIGAWA, Aki¹, NAGAHARA, Hiroko¹, OZAWA, Kazuhito¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Dept. Earth Planet. Sci., Univ. Tokyo

Condensation from vapor and gas-solid reaction may have been responsible for dust formation in the high-temperature region or during high-temperature events in the early solar system. Physical properties of condensed materials, such as size of individual components and textural relationship in a mineral assemblage, are important because they may change the efficiency of physical separation of dust and the interaction between dust and a radiation field, i.e., the thermal condition of the dust-forming environment. These properties are determined by reaction processes, but equilibrium calculations cannot deal with processes of reactions. It is thus crucial to understand condensation and gas-solid reaction processes of minerals and their kinetic aspects to understand the evolution of solar system materials. There have been many experimental studies on evaporation of major minerals in chondrites such as forsterite, enstatite, metallic iron, and troilite, while it has not been easy to carry out condensation and gas-solid experiments under low-pressure conditions for quantitative discussion on kinetic processes due to experimental difficulties. However, recent progresses of experimental studies have made it possible to determine the growth kinetics of minerals in chondrites. Here we report our recent condensation and gas-solid reaction experiments and the growth kinetics of minerals from vapor obtained in the experiments.

キーワード: ダスト, 凝縮, 速度論, 原始惑星系円盤

Keywords: dust, condensation, kinetics, protoplanetary disk

小天体衝突がガス惑星大気進化に与える影響 - 電波望遠鏡を用いた観測的アプローチを中心として -

Chemical evolution of the atmosphere of Neptune and Jupiter induced by the cometary impact

飯野 孝浩^{1*}, 水野 亮¹, 長浜 智生¹, 前澤 裕之¹, 森部 那由多¹, 桑原 利尚¹

IINO, Takahiro^{1*}, MIZUNO, Akira¹, NAGAHAMA, Tomoo¹, MAEZAWA, Hiroyuki¹, MORIBE, Nayuta¹, KUWAHARA, Toshihisa¹

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所

¹ STEL, Nagoya University

小天体衝突はガス惑星の大気組成に大きな影響を与える。また、衝突時に生成される分子種やその全量、化学進化の過程を調べることは、その場観測が困難な小天体の分布やその組成の理解につながる重要なアプローチである。海王星大気中に高濃度で存在する一酸化炭素の存在は、その供給源として小天体衝突など外部からの輸送の存在を示唆している。我々は衝突時に生成される分子種のうち、硫化物に着目して研究を行なっている。彗星及び惑星中に含まれる硫化物が衝突時の高温高圧環境により分解された後、どの硫化物として観測されるかは、惑星大気及び彗星の組成を反映していることが強く示唆されている。ガス惑星中の硫化物の分子種やその寿命を調べることにより、多くの小天体を重力的に束縛しているガス惑星ならではの大气進化パスを明らかにすることが可能となる。我々はこれまで国立天文台野辺山のASTE電波望遠鏡及び45m電波望遠鏡を用い、ガス惑星大気に含まれる衝突時生成物質の観測を行ってきた。一連の観測から、生成物質の種類に制限を与えるとともに、その寿命が短期的に変動している可能性が示唆されつつある。本発表では、これまでの観測成果および衝突時生成物質の化学進化についての現状の成果について発表する。

キーワード: 電波天文学, 木星, 海王星, 彗星, 衝突, 大気進化

Keywords: Radio astronomy, Jupiter, Neptune, Comet, Collision, Atmospheric evolution