

小惑星ベスタ形成時のマグマオーシャンの固化過程について The solidification of a magma ocean of Vesta

川畑 佑典^{1*}; 永原 裕子¹
KAWABATA, Yusuke^{1*}; NAGAHARA, Hiroko¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
¹ Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Asteroid 4 Vesta is the only preserved intact example of a large, differentiated protoplanet. Observations of surface spectra of Vesta provide convincing evidence for a differentiated interior. Vesta is considered as the parent body of HED meteorites.

Whether growing mineral grains remain suspended in the magma ocean or settled out is crucial for the primary interior structure of a planet.

The purpose of this study is to understand the role of grain size of crystals on solidification of a magma ocean under a turbulent flow. We select asteroid 4 Vesta as a subject of this study due to the presence of HED chondrites as a reference. In this study, we consider the solidification before the rheological transition occurs.

We assume that the interior structure of Vesta had already differentiated to form a core. We use the bulk silicate Vesta composition proposed by Righter and Drake (1998), which is a mixture of L and CV chondrites with the ratio of 7 to 3 adjusted for core separation. We calculate liquidus, solidus and solid fractions using the MELTs program (Ghiorso and Sack 1995; Asimow and Ghiorso 1998). In vigorously convective systems such as magma oceans, the temperature distribution is nearly adiabatic and isentropic (Solomatov, 2000).

The heat flux can be calculated with the help of the blackbody radiation. This heat flux must match the heat flux transported to the surface by convection. Convection changes to a regime sometimes called hard turbulence at very high Rayleigh number such as those in the magma ocean, of which heat flux is shown by Siggia (1994).

To describe the rate at which particles settle out of a turbulently convective fluid, we use the model by Martin & Nokes (1989). The particle number is calculated by

$$dN/dt = N(-g\Delta\rho a^2)/(18\nu h)$$

where N is the particle number, g is the acceleration due to gravity, a is the diameter of the particle, $\Delta\rho$ is the density difference between the crystal and the magma, ν is the kinematic viscosity, and h is the depth of the fluid layer (Martin & Nokes, 1989).

The adiabat, liquidus and solidus of the magma ocean of Vesta are very steep, that is, they have negligibly small dependence on pressure.

Thermodynamic calculations with the MELTs program showed that olivine is the first liquidus phase at ~1900K, followed by orthopyroxene and spinel. At the very late stage, clinopyroxene appears consuming orthopyroxene if chemical equilibrium is maintained.

The fluid dynamic evaluation shows that a very small fraction of crystals are separated from the magma ocean until the rheological transition which varied from 100um to 1cm in the current work. The thickness increases with time, which is shown in Figure.

Evaluation of fluid dynamic regime shows that the magma ocean on Vesta was at the hard turbulence regime, suggesting near equilibrium crystallization until the rheological transition takes place at the crystal fraction of 60% at 1649K.

The role of grain size on fluid dynamics is very small, but the amount of crystals settled down to the bottom of the magma ocean has small dependence on the grain size. If the crystal size is 1cm, 1km thickness bottom layer is formed.

The fluid dynamic regime changes into soft turbulence in 100 years in the order in the magma ocean of Vesta.

The summary of our conclusion is as follows.

- (1) The pressure effect in the interior of Vesta is negligibly small.
- (2) The solidification of a magma ocean of Vesta before the rheological transition follows batch solidification.
- (3) The size of crystallizing grains has a minor effect on the evolution of magma ocean until the rheological transition.
- (4) The mantle would be harzburgite if the interstitial melt was effectively extracted at the later soft turbulence stage.

PPS21-01

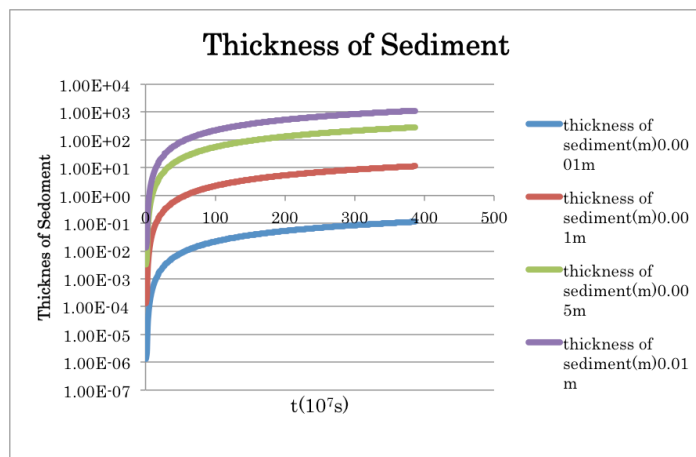
会場:416

時間:4月29日 09:00-09:15

Fig. The thickness of the bottom layer consisting of settled crystals from the main body of a magma ocean.

キーワード: ベスタ, マグマオーシャン

Keywords: Vesta, magma ocean



対流とメルト移動を含むベスタの熱進化数値シミュレーション Thermal evolution simulation of Vesta including convection and melt migration

野上 竜彦^{1*}; 城野 信一²

NOGAMI, Tatsuhiko^{1*}; SIRONO, Sin-iti²

¹名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻, ²名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University, ²Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University

小惑星ベスタは、地上で発見される HED 隕石ときわめてよく似た反射スペクトルを持ち、内部が分化していると考えられている。HED とはホルダイト、ユークライト、ダイオジェナイトの頭文字を取ったもので、エコンドライトの一種である。ユークライトは、地表付近において大きい冷却速度で固化したものであり、結晶の粒子の大きさに違いがある。ダイオジェナイトは、ユークライトよりも結晶が成長しており、より地下深くにおいて形成された岩石である。ホルダイトは、ユークライトとダイオジェナイトが砕かれ、角礫化したものを言う。分化したということは、何らかの熱源によりベスタ内部の温度が上昇し、融点に到達した後メルトが生成され表面に移動したと推測される。DAWN の観測によって、ホルダイト層が 50~80km 存在することが分かった。ここから、表面に噴出したメルト量はベスタ全球体積の約 10~20 % に相当する。

ベスタが形成される初期太陽系には、太陽系内にガスや塵が多くあり、それが集積して惑星が形成されたと考えられている。26Al はベスタに含まれる Al のうち 10ppm を占める。しかし、この値はベスタの形成時刻により変化する。26Al は放射性核種であるので、形成時刻が遅ければ遅いほど熱源は失われてしまう。

M. Formisano et al.(2012) ではベスタの形成時刻を計算し、1Ma 以内だと内部が完全溶融することを示した。しかしこの研究では、メルトの対流とメルト移動についての効果を考慮していない。これらの効果を加えると、ベスタが全球的に冷却されるはずなので、より多くの熱源が必要であることが予想される。そこで本研究では、メルトの対流とベスタ表面へのメルト移動の効果を考慮に入れてベスタ熱進化の数値シミュレーションを行った。ベスタ体積の 10 % のメルトが表面に噴出できるように必要な 26Al 量から、ベスタ形成時刻に対して制約を与える。

一次元熱伝導方程式を完全陰解法を用いて数値的に解いた。数値シミュレーションにおいて、全てのメッシュにおいて生成したメルトは一定の割合 $a(0 < a < 1)$ で上方に移動すると仮定した。対流は Kaula(1979) のモデルを使用した。含まれる 26Al の量を変化させることで、ベスタ形成時刻を変化させた。

シミュレーションの結果、対流が内部の熱進化を大きく変化させることが明らかとなった。対流を考慮しない場合は内部の温度が 8000K までも上昇するのに対して、対流を含めると 1700K までしか上昇しない。ベスタ形成時刻はメルト噴出量に左右される。 $a=0.8$ の時は 26Al 崩壊開始後 70 万年以内にベスタが形成される必要があり、 $a=0.5$ の時は 25 万年以内にベスタが形成されなければならないことが明らかになった。一方で、アルミが全く崩壊していない場合では、 a が少なくとも 0.3 以上でなければ 10km のメルト層が実現できないことが分かった。このシミュレーション結果から、以前の見積もりに比べてベスタはかなり早い段階で形成される必要があることが示唆される。

ガラスビーズ焼結体の熱伝導率測定実験と微惑星熱進化への応用 Thermal conductivity measurements of sintered glass beads and application to planetesimal thermal evolution

津田 彰子¹; 坂谷 尚哉^{2*}; 小川 和律³; 田中 智³; 荒川 政彦⁴; 本田 理恵⁵

TSUDA, Shoko¹; SAKATANI, Naoya^{2*}; OGAWA, Kazunori³; TANAKA, Satoshi³; ARAKAWA, Masahiko⁴; HONDA, Rie⁵

¹ 東京大学, ² 総合研究大学院大学, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 神戸大学, ⁵ 高知大学

¹University of Tokyo, ²The Graduate University for Advanced Studies, ³Institute of Space and Astronautical Science, ⁴Kobe University, ⁵Kochi University

微惑星は原始太陽系円盤内においてダストが集積した天体であり、太陽系天体の多様性を生む分岐点となる天体である。その形成過程や内部構造進化などの描像を制約することは惑星形成論における重要な課題である。特に微惑星の熱進化を知ることは微惑星の描像を理解する上で重要であり、その熱進化を解明する上で最も重要なパラメータの一つは微惑星構成物質の熱伝導率である。

微惑星をダストの集積物とした場合、熱進化過程を経て温度が上昇すると焼結と呼ばれる現象が起こり、粒子同士が接着する。焼結が起こる前の粉体の熱伝導率に関しては近年研究が進んでいる。しかし、焼結体の熱伝導率を真空下で測定した例はない。ダストが焼結すると、ダスト間にネックと呼ばれる結合部が形成される。焼結が進むことにより、ネックの成長や空隙率の減少が起こる。これらの変化により、全体の熱伝導率は上昇することが予想される。

粉体の熱伝導率と圧力の関係を測定した先行研究から、空隙率が一定であっても、粒子間の接触サイズにより熱伝導率が大きく変化することが知られている。すなわち、空隙率のみでなく、焼結によるネックサイズの変化にともなう熱伝導率の変化を知ることが重要である。

そこで、本研究では焼結による熱伝導率の変化を微惑星の熱進化計算に取り入れるため、粉体焼結体の熱伝導率を測定し、粉体熱伝導率に対する焼結の効果を定量的に明らかにすることを目的とした。特に、真空化における焼結体の熱伝導率のネックサイズ依存性に着目した。

用いたサンプルは粒径約 250、500、1000 μm の 3 種類のガラスビーズである。各サンプルは一定の加熱温度の下で加熱時間を変えることにより、3 種類の焼結度を持つ焼結体を作成した。焼結ビーズを一粒ずつ分離し、ネックの割れ跡の面積を測定することによって、ネックサイズを推定した。一方、熱伝導率測定には、焼結体内部に埋め込まれたニクロム線加熱時の温度上昇率から熱伝導率を推定する方法である line heat source 法を用いた。測定は常温において行い、熱伝導率測定時の真空度は約 0.01 Pa であった。

ネックの観察によって、平均ネック比(粒子半径に対するネック半径の比)が 0.075 から 0.30 の異なる焼結度を持つサンプルを作成できたことを確認した。これらの熱伝導率は 0.036 から 0.25 W/mK であった。これらの値は、同種の未焼結粉体の真空中での熱伝導率よりも 10 倍以上高い値である。焼結体試料の空隙率は約 40% で一定であり、熱伝導率とネック比の間には比例関係が見られた。すなわち、ネック比 0.3 未満の焼結初期段階では、焼結体の熱伝導率は空隙率の減少ではなくネックの成長による熱伝導率の増加を考慮する方が本質的であることが分かった。

最後に、本実験で得られた熱伝導率とネック比の関係をを用いて、微惑星の熱進化計算を行った。主なパラメータとして、微惑星半径を 1 から 1000 m、形成年代を CAI 形成後 1 から 3 Myr、ダストの粒径を 1 から 1000 μm の範囲で与えた。その結果、焼結による熱伝導率の上昇を考慮したことにより、この効果を考慮しない場合の結果よりも微惑星の内部温度は 1000 K 以上下がるということが分かった。加えて、微惑星内部の温度構造やネックサイズの分布(言い換えると、強度分布)は微惑星のサイズや形成年代、構成する粒子の粒径などに依存し、変化に富むことが分かった。

擬物質の摩擦実験から考察する摩擦挙動に対するメルトの影響と深発月震への考察 The effect of melt on frictional behavior and the implication for deep moonquake

東 真太郎^{1*}; 片山 郁夫¹
AZUMA, Shintaro^{1*}; KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

これまでアポロ計画の月震観測 (Passive Seismic Experiment) によって、12,000 以上の月震イベントが観測されている (e.g., Nakamura 2003)。それらの月震イベントは主に、熱月震、インパクトによる月震、浅発月震、深発月震と4つに分類される (Latham et al., 1969)。この中で最も興味深いのは深発月震である。なぜなら、月の半径が約 1735 km に対して、800~1200 km の深さで深発月震は観測されており、先行研究から考えられている温度圧力から、明らかに塑性変形が支配的と考えられる領域だからである。通常は破壊や滑りが起こらない塑性変形領域で月震が起こるメカニズムを実験的に検証することが本研究の目的である。これまで月の内部はドライな状態だと考えられてきたが、最近になって月には水が存在することがわかってきた。さらに月の比較的深い場所 (~800km) にも、水が存在している可能性が、鉱物の電気伝導度からも議論されている (Karato 2013)。水は岩石の様々な物理パラメーターに大きな影響を及ぼすことが分かっているが、その1つとして岩石の融解温度を大きく下げる働きをすることがわかっており、この効果を考慮すると、深発月震の深さで部分溶融が起こっている可能性がある。Weber et al. (2011) は月震データとモデリングから 1200km の深さ付近に部分溶融層が存在していることを示唆している。そこで、この部分溶融が月震を引き起こす1つの原因であるという仮説を立て、低温で部分溶融を起こすことのできる模擬物質 (Borneol-diphenylamine) (Takei 2000) を用いて、2軸摩擦変形試験機を使用して摩擦実験を行った。この Borneol-diphenylamine を用いることで部分溶融度とメルトの濡れ角を調節することができる。実験結果から摩擦係数とピークストレスを観察した。我々の実験結果から、ぬれ角 30° のときは部分溶融度が大きくなればなるほど、摩擦係数とピークストレスは減少することが分かった。しかし、ぬれ角 0° のときは摩擦係数は大きく減少するが、部分溶融度が増加しても摩擦係数は変化しない。これはメルトが界面を完全に濡らすことで、力学的挙動がメルトによって完全に支配されていることが原因であると考えられる。摩擦係数におけるメルトの効果は3つ期待される。1つは実験で示された摩擦係数を下げる効果、2つ目はメルト自体が間隙圧として働く効果、3つ目はメルトによって周囲の水が抜き取られることで剪断の局所化が誘発される効果である。Byerlee の法則によると、摩擦強度は惑星の深さ (圧力) に比例して増加するため、深発月震の発生深度ではとても大きくなる (月内部の上載岩圧から計算すると 5GPa 以上)。しかし、上述した3つの効果を考慮すると、摩擦強度が劇的に減少することが考えられる。3つ目の効果として挙げた剪断の局所化の効果は定量的に評価するのは困難であるが、このメルトの効果によって摩擦強度が劇的に下がることで塑性変形領域でも摩擦による変形が起こりえるのかもしれない。

キーワード: メルト, 深発月震, 月, 摩擦挙動

Keywords: melt, deep moonquake, moon, frictional behavior

粉体対流の速度スケージングとそのレゴリス移動の時間スケールへの応用 Velocity scaling of granular convection and its application to timescale of regolith migration

山田 智哉^{1*}; 桂木 洋光¹
YAMADA, Tomoya^{1*}; KATSURAGI, Hiroaki¹

¹ 名古屋大学大学院 環境学研究所

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

小惑星のイトカワには、表面のレゴリスが流動化・分級したと考えられる痕跡がある [1]。また、サンプルリターンにより持ち帰られた粒子の分析から、その宇宙線照射年代はおよそ 8Myr と比較的若いことが分かった [2]。これらの観測結果を説明するための仮説の一つとして、“天体衝突起源の地震動でイトカワ表面のレゴリスが流動化、移動することによって表面が更新された可能性”が提唱されている [1]。実際、地上の室内実験ではレゴリスのような粉体に振動を加えると、粉体対流が生じることが知られている (e.g. [3])。しかし、イトカワのような微小重力環境下で生じる粉体対流の対流速度に関する定量的な議論はこれまで十分になされてない。一般に、室内実験で重力を変化させることは難しい。そこで、本研究では室内実験で粉体対流の対流速度と重力加速度 g の満たすスケージング関係を次元解析により求めた。得られたスケージング関係から対流速度の重力依存性を実効的に求めた。また、得られたスケージング関係から粉体対流によるレゴリス粒子の表面移動時間の推定を試みた。

実験では粉体試料として直径 $d=0.4, 0.8, 2$ mm のガラスビーズを用いた。粉体を入れる容器は内半径 $R=16.5, 37.5, 75$ mm の円筒形アクリルセルを用い、ガラスビーズを高さ $H=20\sim 110$ mm の範囲で積層させた。電磁式の振動装置 (EMIC 513-B/A) で容器全体に鉛直振動を加え、最大振動加速度と重力加速度の比を表す Γ ($\Gamma=A(2\pi f)^2/g$; A : 振動振幅, f : 振動数, g : 重力加速度) を 2~6 の間で、 f を 100~300 Hz の間で変化させ、粉体対流を発生させた。円筒容器壁面での粉体の流れ場を高速カメラ (Photoron SA-5) により 1000 fps で撮影し、鉛直方向の対流速度 v_z を PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて算出した。 v_z の最大値 v_{zmax} を重力と粒子径が作る特徴速度 $(gd)^{1/2}$ で無次元化し、これと振動と重力のエネルギーバランスを表す無次元パラメーター $S=(2\pi Af)^2/gd$ [4] および無次元システムサイズ $L=(RH)^{1/2}/d$ の 2 つのコントロールパラメーターとのスケージング関係を求めた。

系統的な次元解析の結果、 v_{zmax} は上記の無次元数を用いて $v_{zmax}/(gd)^{1/2} \sim S^{0.47} L^{0.82}$ と表されることが分かった。 S, L にその定義を代入すると、重力依存性は Γ 一定の条件下で $v_{zmax} \propto g^{0.97}$ と表されることが分かった。これより、微小重力環境では対流速度は g にほぼ比例して遅くなるとが明らかになった。一方、本実験では L は無次元の対流ロールサイズともいえる。得られたスケージングから、 L を無次元対流ロールサイズとみなすことでレゴリス粒子の表面移動時間を見積もると、対流ロールサイズの時間スケールへの影響が少なくなることも分かった。本発表では粉体対流による粒子の移動と宇宙線照射年代 8Myr との整合性の詳細検討の結果についても議論する。

[1] H. Miyamoto *et al.*, *Science* **316**, 1011 (2007)

[2] K. Nagao *et al.*, *Science* **333**, 1128-1131 (2011)

[3] A. Garcimartín *et al.*, *Physical Review E* **65**, 031303 (2002).

[4] P. Eshuis *et al.*, *Physics of Fluids* **19**, 123301-1 (2007)

キーワード: 粉体対流, スケージング, 重力加速度, レゴリス移動, イトカワ

Keywords: granular convection, scaling analysis, gravitational acceleration, regolith migration, Itokawa

粉流体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 Experimental study on impact-induced seismic wave propagating in granular materials

松本 恵里¹; 保井 みなみ^{2*}; 荒川 政彦¹
MATSUMOTO, Eri¹; YASUI, Minami^{2*}; ARAKAWA, Masahiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹Graduate school of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：固体天体の表層及び内部構造を調べる直接的な方法として、地震波（弾性波）の伝播を測定、解析する地震波探査がある。現在まで地震波探査が実際に行われたのは地球と月のみであるが、今後は他の固体表層を持つ惑星や小惑星での探査も検討されている。その上で、限られた期間で地震波探査を行うには人工体を標的天体に衝突させて地震波を発生させる能動的な方法が望ましく、そのためには人工震源が必要不可欠である。しかし、実際に人工震源を用いるには、衝突エネルギーとそれによって励起される地震波の励起・伝播特性の関係を明らかにすることが重要である。この関係は探査に必要な地震計の感度や、地震波が測定可能な震源からの距離（範囲）の推定に用いることができ、さらに将来、地震波形から衝突エネルギーを推測することで、その天体の衝突フラックスの推定にも応用できると期待される。そこで、我々は室内クレーター形成実験を行い、発生する地震波を加速度計で観測し、励起される地震波の励起・伝播特性の弾丸物性依存性を明らかにした。

実験方法：衝突実験は神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は、直径10mm、高さ10mmのポリカーボネート円柱と、直径3mmのステンレス球とアルミナ球を用いた。ステンレス球とアルミナ球は、ポリエチレンのサポに入れて衝突させた。衝突速度は約100m/sとした。標的は200ミクロンのガラスビーズを用いた。それを直径300mm、高さ100mmの容器に深さ80mmになるように入れ、標的の表面に3つの加速度計（応答周波数<10kHz）を衝突点から距離を変えて設置した。また観測された地震波は、データロガー（A/D変換効率100kHz）で電圧として記録した。

結果：弾丸が標的に衝突した瞬間から地震波が加速度計に到達する時間と衝突速度を用いて、標的を伝播する地震波の伝播速度を計算した結果、 $105 \pm 15 \text{ m/s}$ となった。また、3種類の弾丸の最高加速度 g_{max} と規格化距離 x/R （ x :衝突点からの距離、 R :クレーター半径）の関係は $g_{max} = 268(x/R)^{-2.8}$ となった。伝播速度と最高加速度の経験式から、標的が同じであれば弾丸種類に依らず地震波は同じような波形をもって減衰することがわかった。また、最高加速度を保つ地震波の継続時間は約0.3msとなり、これはNiimi *et al.* (2011)の弾丸貫入モデルから求めた弾丸貫入時間と桁で一致した。McGarr *et al.* (1969)は、弾丸の貫入時の運動量の力積 I と弾丸の持つ運動エネルギー E_k の比を、衝突エネルギーから地震波エネルギーへのエネルギー変換効率と定義している。本研究でエネルギー変換効率を計算した結果、 $1.6 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-2}$ となった。一方、レキサン弾丸を2~8kmで砂標的に衝突させたMcGarrの実験では、 $6 \times 10^{-6} \pm 4 \times 10^{-6}$ であった。このことから、エネルギー変換効率に弾丸の速度依存性があることが示唆された。

キーワード: 衝突励起地震, 粉流体, 減衰過程, 惑星探査, クレーター形成, 加速度計

Keywords: impact-induced seismic wave, granular materials, decay process, planetary exploration, crater formation, accelerometer

斜め衝突による Impact jetting の速度計測 Velocity measurements of impact jetting during oblique impacts

黒澤 耕介^{1*}; 長岡 洋一¹; 長谷川 直²; 杉田 精司³; 松井 孝典¹

KUROSAWA, Kosuke^{1*}; NAGAOKA, Yoichi¹; HASEGAWA, Sunao²; SUGITA, Seiji³; MATSUI, Takafumi¹

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻

¹PERC, Chitech, ²ISAS, JAXA, ³Dept. of Complexity Sci. & Eng., The Univ. of Tokyo

平板同士がある臨界角以上の角度で斜めに衝突すると、接触点から衝突速度よりも速く物質が放出される現象は 1950 年代から知られていた。これは Impact jetting と呼ばれている。Impact jetting には (1) 衝突速度よりも高速の物質を生成すること、(2) Jetting で放出される物質は現象の中で最も強い衝撃加熱を受けること、という 2 つの重要な特徴がある。そのため惑星科学においてもコンドリュール、テクタイト、衝撃生成ガラスの起源、巨大衝突で発生する Jet による冥王星、月の起源を説明する過程として検討されてきている。

天体衝突による Impact jetting を検討するためには球が衝突する状況で起こる現象を理解する必要があるが、球形状飛翔体を用いた実験データが非常に限られており、十分に理解されているとは言えない。特に Jet の速度に関しては、非公表データを含む 3 点が報告されているのみである。Jet 速度は Jet の生成を記述する理論モデルを構築する上で重要なアンカーであることは言うまでもない。

我々は千葉工業大学惑星探査研究センターに設置された新型二段式軽ガス銃を用いて球形状飛翔体の高速度斜め衝突実験を行った。100 ns/frame の時間分解能で Jet 生成過程を捉え、世界で初めて Jet 速度を衝突速度と標的ショックインピーダンスの関数として得ることに成功した。その結果衝突速度で規格化した Jet 速度 (Jet 速度比) は衝突速度の増加とともに減少すること、Jet 速度比は標的のショックインピーダンスが大きいほど大きくなることが明らかとなった。

次にこのデータ・セットを用いて Jet 理論の構築を試みた。得られた結果は、(1) 衝突速度を衝突面に垂直な成分と水平成分に分離し、Ang により提唱された現象論的 Jet モデルに当てはめると実験結果をうまく再現できること、(2) Jet 速度は、衝突速度の水平成分、弾丸の変形速度、放出点からの粒子飛び出し速度の和でも表すことができることがわかった。(2) のモデルはまだ preliminary であるがこれまで現象論的な理解にとどまっていた Jet 速度に物理的な説明を与えるものである。

最後に惑星科学的な応用について議論する。我々のモデルは実際の天体衝突時においても衝突速度の 2.5 倍の速度を持つ Jet が発生することを示唆する。空力加熱率は速度の 3 乗に比例するため、大気を持つ惑星/衛星上ではこれまで予測されなかった強い加熱を受け、極めて高温の電離プラズマが発生することが期待される。このような高温プラズマが緩和していく際には周辺に強い EUV 放射を放つであろう。例えばタイタンのような炭化水素を多く含んだ大気中では激しい化学反応が引き起こされると期待できる。これまでタイタンの地表付近での化学反応のエネルギー源は極めて高いエネルギーを持つ銀河宇宙線しかないと考えられてきた。Impact jetting は時間的空間的に局所的ではあるが、タイタン地表付近の化学反応を駆動する重要なエネルギー源であったかもしれない。

キーワード: 天体衝突, 斜め衝突, 高速ビデオカメラ, 撮像計測, ジェットティング, タイタン

Keywords: Hypervelocity impacts, Oblique impacts, High-speed video camera, Ultrafast imaging observation, Impact jetting, Titan

隕石海洋衝突下でのアミノ酸の安定性：生物有機分子の化学進化への応用 The stability of amino acids in early ocean by meteorite impacts: Implication for chemical evolution of biomolecules

梅田 悠平^{1*}; 関根 利守¹; 古川 善博²; 掛川 武²; 小林 敬道³

UMEDA, Yuhei^{1*}; SEKINE, Toshimori¹; FURUKAWA, Yoshihiro²; KAKEGAWA, Takeshi²; KOBAYASHI, Takamichi³

¹ 広島大学理学研究科, ² 東北大学理学研究科, ³ 物質・材料研究機構

¹Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Graduate School of Science, Tohoku University, ³National Institute for Materials Science

地球上の生命の誕生過程を知る上で、生命の基本構成物質であるアミノ酸の起源、安定性、化学進化などについて考察することはタンパク質の起源、さらに生命の起源に直結する重要な研究課題である。初期地球における生物有機分子の生成や化学進化には莫大な量のエネルギーが必要であったと推察されており、その候補には隕石の衝突、落雷、紫外線、放射線などがある (Furukawa et al., 2009; Miller, 1953; Groth and Weyssenhoff., 1960; Barnun et al., 1970)。

先行研究により、鉄を主成分とする隕石が原始海洋に衝突することにより引き起こされる化学反応が初期地球上に局所的な還元的環境 (アンモニアが存在する環境) を生みだし、その結果として無機炭素から単純なアミノ酸 (グリシン) やアミン類、カルボン酸類など様々な有機分子を生成しうることが示唆されている (Nakazawa et al., 2005; Furukawa et al., 2009)。しかし、現状ではこのように生成した有機分子の生成メカニズムやその安定性について不明な点が多く、さらに生体高分子への更なる化学進化に関する議論は一切行われていない。そこで本研究では、後期重爆撃期 (38-41 億年前) においての高頻度で激しい隕石の海洋衝突によるアミノ酸の化学反応を再現するべく、アミノ酸 (アラニン) 水溶液に対して衝撃回収実験を行った。実験は隕石物質を模擬したオリビンおよびヘマタイトの固体粉末に初期海洋を模擬したアミノ酸水溶液を浸み込ませたものを試料として使用した。出発試料のアラニンは実験による生成物と汚染物を区別するために、¹³C でラベルされたものを用いている。これらを金属製の試料容器に封入し、試料の背後には空気の層が存在する条件で実験を行った。また、周囲の化学種や、酸素ポテンシャルが実験生成物の量や種類に及ぼす影響について検討するために、先行研究により生成が確認されたアンモニアとベンゼンを出発試料に加えた実験や、固体粉末試料についてオリビンとヘマタイトを使い分ける実験を行った。実験後、抽出した水溶液を東北大学にて、液体クロマトグラフ質量分析計 (LC/MS) を使用し、四種類のアミノ酸 (グリシン、アラニン、バリン、フェニルアラニン) と四種類のアミン (メチルアミン、エチルアミン、プロピルアミン、ブチルアミン) について定量分析を行った。回収した固体試料については、X 線回折分析により鉱物種を同定するとともに、熱力学的計算により、実験における酸素ポテンシャルを推定した。LC/MS 分析の結果、出発試料のアラニンは全ての回収試料から検出され、高温・高圧下においても一部は生存しうることが分かった。また、衝撃圧力が高くなるにつれて、アラニンの残存率は低くなるという傾向が見られた。また、実験による新たな生成物として ¹³C からなる多種のアミンも検出された。特にオリビン粉末を隕石物質として用い、アンモニアとベンゼンを系内に加えた試料から、出発試料のアラニンよりも炭素数が一つ多いブチルアミンの生成が確認された。回収試料の XRD 分析の結果は、ヘマタイト (Hm) および出発試料には無いマグネタイト (Mgt) のピークを示し、酸素分圧が Hm-Mgt バッファー近傍であったことが明らかになった。そのような酸素分圧の高い環境ではアラニンの分解がより進み、アミンの生成が支配的になる事が分かった。

本研究結果から、後期重爆撃期の隕石海洋衝突において、アミノ酸は生き残る事が可能であるとともに、隕石の衝突エネルギーはアミノ酸の化学進化に重要な役割を果たすということが分かった。また、その化学進化は隕石衝突により発生する温度・圧力だけでなく、周囲に存在する化学種や酸素ポテンシャルにも影響を受けるという事が明らかになった。

CH₄/CO₂ 大気中での遠紫外線による有機物エアロゾル生成 Organic aerosol experiments for CH₄/CO₂ atmospheres using a hydrogen/helium UV lamp

洪 鵬^{1*}; 関根 康人¹; 杉田 精司¹
HONG, Peng^{1*}; SEKINE, Yasuhito¹; SUGITA, Seiji¹

¹ 東京大学 複雑理工学専攻
¹Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

有機物エアロゾルはメタンに富む還元的な惑星大気中で光化学反応によって生成されるが、その生成経路は実験的にあまり制約されていない。酸素濃度が増大する以前の原始地球においては、有機物エアロゾル層が反温室効果 (Pavlov et al., 2001) または間接的温室効果 (Wolf and Toon, 2010) によって地表温度に大きな影響を与えていたことが推測されているが、エアロゾル生成経路の不定性のため、これまで見積もられてきたエアロゾルの生成率や光学的厚みには大きな不定性が内在しているのが現状であった (Trainer et al., 2006)。そこで我々は、有機物エアロゾルの生成経路を制約するため、室内実験を行い、CH₄/CO₂ 大気中での遠紫外線 (FUV) によるエアロゾル生成率の (1)FUV フラックス依存性、および (2) CH₄/CO₂ ガス比依存性を調べた。波長 110nm より長波長における模擬太陽紫外光として、ライマンアルファ線の発光強度が卓越することが知られている、水素・ヘリウム混合ガスを用いた紫外線光源を用い、FUV フラックスは N₂O ガスおよび CO₂ ガスを用いたアクチノメトリー法によって計測した。また反応容器内の基板に堆積する有機薄膜の膜厚の時間変化を分光エリプソメトリーによって計測することで、エアロゾル生成率を得た。その結果、エアロゾル生成率は FUV フラックスに対して 1 次関数的に増加することがわかった。このことは、タイタン大気中で観測されているエアロゾル生成率を、原始地球や系外惑星などの他の還元的な惑星大気に外挿した場合、生成率は低く見積もられることを意味する。またエアロゾル生成率の CH₄/CO₂ ガス比依存性を調べた結果、CH₄/CO₂ 比が 1 を下回ると生成率は急速に低下することがわかった。この実験結果を解釈するため、我々はさらに 1 ボックス光化学モデルを構築し、実験条件における反応経路を解析した。光化学モデルは 791 反応、134 分子種 (C₈ 分子まで) を含む。モデルの妥当性は、幾つかの主要な中間生成ガス (CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO, CO₂) の濃度の計算結果と、質量分析によって計測されたそれらのガスの濃度を比較することで確認した。高次の炭化水素の計算結果から、実験で得られた CH₄/CO₂ ガス比に対するエアロゾル生成率の依存性とベンゼンを介する重合反応の反応率の相関が良いことがわかった。このことはベンゼンがエアロゾルの生成を律速していることを示唆している。一方で、過去の光化学モデルでエアロゾル生成反応に寄与すると仮定されていた C₄H₂ などのポリンの重合反応は、エアロゾル生成率とあまり相関が良くないことがわかった。そのかわりポリンはベンゼンを生成する上での前駆体として重要であることがわかった。以上の結果と紫外線光量に対する結果ともあわせて、タイタンでのエアロゾル生成率を元に、原始地球でのエアロゾル生成率を見積もると、過去の研究による見積もりより 2 桁程度小さくなることがわかった。この理由は、先行研究ではエアロゾルの生成に直接関与しない分子も含めての生成率を計算していたため、遠紫外線によるエアロゾル生成量を過大評価していたことが原因である。これらの結果から、原始地球においては遠紫外線で生成されるエアロゾル層は光学的に薄く、反温室効果も間接的温室効果も聞かないことが推測される。一方で原始地球においてはメタン・二酸化炭素・水・エタンなどの他の赤外活性気体による温室効果ガスが卓越していたであろうことが示唆される。本発表ではさらに、タイタン大気中で高い生成率を持つと見積もられている、高エネルギー粒子の入射によって駆動されるニトリル反応による有機物エアロゾル生成の可能性についても議論する。

キーワード: 有機物エアロゾル, 光化学, 室内実験, 還元的な大気

Keywords: organic aerosol, photochemistry, laboratory experiment, reducing atmosphere

周惑星ガス円盤中で形成する巨大氷衛星の原始大気 Proto-atmosphere on giant icy satellites forming within gaseous circum-planetary disks

三上 峻^{1*}; 倉本 圭¹
MIKAMI, Takashi^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学理学院宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

巨大氷衛星ガニメデ、カリスト、タイタンはサイズと平均密度が似るにも関わらず、表層環境が顕著に異なる。特にタイタンは太陽系の衛星として唯一厚い大気を持ち、その地表面気圧は地球の1.5倍にも上る。その主成分であるN₂は、近年の探査機カッシーニのデータから、NH₃のような他の窒素分子種に由来する可能性が高いことが示唆された。しかし、N₂がいつどのように生成されたのかは未解決の問題であり、これは、集積期の巨大氷衛星の物理状態について不明な点が多いことに起因する。

最近有力視される衛星形成理論によると、巨大氷衛星をはじめとする規則衛星は低温・低圧な周惑星円盤において比較的長い時間をかけて集積成長する。そのような形成条件では、集積期の巨大氷衛星は非常に寒冷な環境にあったとする主張があるが、そこでは原始大気の保温効果が無視されている。しかし低温の円盤環境下では巨大氷衛星は大量の円盤ガスを捕獲し、蒸発した氷成分とともに厚い原始大気を形成する可能性がある。

そこで本研究では、このような混合型大気の構造と保温効果について数値モデルを構築して検討した。原始大気は衛星ヒル半径において薄い周惑星円盤に静力学的に接続する。大気成分として円盤ガス成分であるH₂、Heと材料物質中の氷に含まれるH₂OとNH₃を考慮し、衛星の地表面温度の関数として放射対流平衡構造を求め、大気上端の熱放射フラックスを算出した。また、それぞれの衛星形成場領域の円盤条件はCanup and Ward (2002)をもとに、ガニメデ軌道では150 K、カリスト軌道では120 K、タイタン軌道では50 Kとして計算を行った。

どの円盤条件においても、地表面温度が273 K以上の場合には、H₂Oの寄与により大気が光学的に厚くなり、大気上端からの熱放射フラックスは大気無しの場合より顕著に小さい。一方、地表面温度がより低い場合、ガニメデ・カリストの条件下では熱放射フラックスは黒体放射に漸近する。これは背景温度が比較的高いために大気のスケールハイトが大きく、低圧で光学的に薄い大気となるからである。一方、タイタンの条件下では、同じ地表面温度に対し、黒体放射に近い熱放射フラックスを持つ解に加え著しく熱放射フラックスの小さな解も出現する。後者の解は、背景温度が低いために重力的に強く束縛された光学的に厚い大気が形成されることに対応している。

ここから、タイタンでは、集積エネルギーの解放が完了したのちも、比較的高温(～200 K)の原始大気が保持されると考えられる。安定性の解析から、ガニメデやカリストの原始大気は円盤ガスの散逸に追従して失われるのに対し、タイタンのそれは残存すると考えられる。この場合、氷成分から揮発したNH₃が高分圧で維持されると期待される。現在のタイタン大気のN₂はこのNH₃が光化学反応プロセスを経ることで生成されたのかもしれない。

キーワード: 巨大氷衛星, 大気, 周惑星円盤

Keywords: Giant icy satellite, Atmosphere, Circum-planetary disk

原始太陽系星雲中で集積する火星の大気形成と熱進化 Atmospheric formation and thermal evolution of a proto-Mars growing in the solar nebula

齊藤 大晶^{1*}; 倉本 圭¹
SAITO, Hiroaki^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
¹ Cosmo Sci., Hokkaido Univ

火星は寡占成長により形成した原始惑星の唯一の生き残りと考えられている。多数の微惑星が原始火星へ衝突することで、衝撃加熱による融解が引き起こされ、コアが形成される。これは火星由来隕石の年代学からの示唆と調和的である。これらの衝突はまた、微惑星から H₂O 等の揮発性成分の脱ガスも引き起こし、大気形成に貢献したと考えられる。寡占成長は原始太陽系星雲ガス中で進行するため、集積成長中の原始火星は星雲ガスおよび、脱ガス成分の双方からなる原始大気を獲得していた可能性が高い。このようなハイブリッド型原始大気は惑星表面の熱収支や惑星表面-内部間での揮発性成分の分配に重要な役割を果たした可能性がある。

そこで、本研究では、星雲ガス、脱ガス成分の2層からなるハイブリッド型原始大気を想定した1次元放射対流平衡モデルを構築した。ここで、上層は星雲ガス成分由来の H₂-He 大気層、一方下層は微惑星脱ガス成分由来の H₂O に富んだ大気層を仮定する。また、輻射輸送には、H₂, He および H₂O による吸収を考慮する。放射対流平衡構造は、集積エネルギーフラックスと均衡する熱的光度および、脱ガス成分大気量の関数として得られる。H₂, He から成る脱ガス大気成分のモル比を、金属-シリケートとの化学平衡状態にある 1:5 とした。また、火星の集積時間は、惑星形成論および年代学的に矛盾のない 10⁶-10⁷ 年と置いた。

H₂-He のみで構成される大気の場合、地表面温度は 700 K 以上になることはない。一方、脱ガス成分の大気量が火星質量の 1% より多ければ、地表面温度は岩石の融点の目安である 1500 K を超える。もし微惑星が H₂O をはじめとする揮発性成分を十分に含有していたとすると、集積中の火星には、原始大気の保温効果によって、惑星全体を覆うマグマオーシャンが形成した可能性がある。このような全球的マグマオーシャンは、コアの形成やマグマや金属鉄に溶解した揮発性成分の内部輸送を促進させた可能性がある。

Line-by-line 放射計算による水蒸気大気の放射特性 Line-by-line calculations of radiation properties for exoplanets with steam atmosphere

大西 将徳^{1*}; はしもと じょーじ²; 倉本 圭³; 高橋 芳幸¹; 高橋 康人³; 石渡 正樹³; 林 祥介¹
ONISHI, Masanori^{1*}; HASHIMOTO, George²; KURAMOTO, Kiyoshi³; TAKAHASHI, Yoshiyuki O.¹; TAKAHASHI, Yasuto³; ISHIWATARI, Masaki³; HAYASHI, Yoshi-yuki¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 岡山大学大学院自然科学研究科, ³ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ²Department of Earth Sciences, Okayama University, ³Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

水蒸気を多く含む大気では、地表面温度と無関係に大気上端からの放射フラックスが一定になってしまう射出限界を持つことが知られており (Simpson 1927, Nakajima et al., 1992)、惑星大気の進化と深い関わりを持っている。Hamano et al., 2013 では中心星からの放射が射出限界よりも大きい場合と小さい場合で、地球型惑星の進化形態が異なることが報告された。一方、最近では系外惑星の直接撮像観測の例も報告されており、地球型惑星の放射スペクトルの観測も期待されている。水蒸気を多く含む地球型惑星の放射スペクトルを得ることができれば、そのスペクトルから惑星の大気や表層環境、また進化の段階を推定できる可能性がある。そのためには、水蒸気大気を持つ惑星の放射スペクトルがどのようなものになるのかを数値シミュレーションにより計算する必要がある。放射スペクトルを正しく計算するためには line-by-line 計算が有効であり、水蒸気大気を line-by-line 法で計算した研究として Goldblatt et al., 2013 がある。しかしこの研究は地表の水の量を地球の海洋質量 (270bar) 分与えて計算しており、異なる地表水量を持つ惑星の計算例はない。そこで本研究では、水蒸気大気を持つ多様な系外惑星の放射特性を計算するために、地表水量と地表温度をパラメタとして水蒸気大気を持つ惑星からの放射を line-by-line 法で計算した。

H₂O の吸収断面積は HITEMP2010 (Rothman et al., 2010) と MT_CKD 連続吸収モデル (Mlawer et al., 2012) を用いた。大気は水蒸気のみ対流平衡の温度分布を与え、地表面温度は 250~2000[K]、地表面の H₂O 量は 0.01~5 地球海洋質量まで変化させた。H₂O の吸収断面積の計算を効率的に行うために、温度と圧力ごとの吸収断面積をあらかじめ計算し、そのテーブルをもとに cubic spline 補間をして必要な吸収断面積を計算した。放射伝達計算は 2 方向近似を用い、波数分解能は 0.01[cm⁻¹] で line-by-line 法により計算を行った。

本研究で計算された射出限界は 282[W/m²] であった。射出限界の値は Goldblatt et al., 2013 とよく一致しているが、1 海洋質量を与えた場合、放射の立ち上がりは Goldblatt et al., 2013 よりも高温で立ち上がるという結果を得た。地表水量が少なくなるほど、低い地表面温度で放射は立ち上がり、0.01 海洋質量の場合には、1000[K] 以下で放射が増大する。この時 10 μm、4 μm 付近の大気の窓領域から多くの放射が出ている。また 1500[K] 以上では、大気がとても厚くなるため、0.01 海洋質量をもつ惑星の場合でも地表面からの赤外放射は直接観測できないことが明らかとなった。

キーワード: 水蒸気大気, 放射過程, 射出限界

Keywords: steam atmosphere, radiative property, radiation limit

地球型惑星の地表水分布と暴走温室限界 Dependence of the runaway threshold on water distributions on the surface of Earth-like planets

新田 光^{1*}; 阿部 豊¹; 大石 龍太²; 阿部 彩子²
NITTA, Akira^{1*}; ABE, Yutaka¹; O'ISHI, Ryouta²; ABE-OUCHI, Ayako²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学大気海洋研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, ²Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

液体の水は惑星気候に大きく影響を与える物質であることに加えて、生命の生存可能性を議論する上でも重要な物質である [e.g. Kasting et al., 1993]。この液体の水が地表に存在する惑星、すなわち水惑星は大きく3つのタイプに分類され、[1] 海惑星 (地表が全て海で覆われた、水量の十分多い惑星)、[2] 部分海惑星 (海と陸が存在するが、海はほぼ全て1つに繋がっている現在の地球のような惑星)、[3] 陸惑星 (水が南北両極域に局在化している、水量の少ない惑星)、と呼ばれている [Abe et al., 2013, Hawaii, Kona]。どのタイプに分類されるかは水の量、地形によって決まる地表水輸送と、大気循環による水蒸気輸送のバランスによって決定される。

この地表の水は、ある閾値をこえる中心星放射を惑星が受け取った時、存在できなくなることが知られている。これは強い温室効果気体である水の正のフィードバックが原因で、このような状態を暴走温室状態と呼び、暴走状態に達する閾値については現在に至るまで数多く議論がなされている [e.g. Abe and Matsui, 1988; Nakajima et al., 1992; Leconte et al., 2013]。ただし、陸惑星と海惑星との違いなど、地表水分布に依存した閾値の議論についてはあまり多くない。

Abe et al. [2011] では、3次元モデルを用いて初めて陸惑星が再現され、暴走温室状態に陥る条件が計算された。その結果、地球サイズの惑星では、海惑星が相対太陽放射で130%程度の中心星放射を受け取ると暴走状態に陥るのに対し、赤道域の良く乾燥した陸惑星は170%の強度の放射を受け取っても地表の水分布は維持された。但し、ここでは限定的な陸惑星状態についての議論に留まっており、水分布の多様性とその影響については言及されていない。

Takao [2013] では、南北1次元のエネルギーバランスモデルと鉛直1次元放射対流平衡モデルを組み合わせ、地表水の緯度分布と暴走温室限界の関係について計算が行われた。これによって、緯度方向の水の局在化の程度で暴走温室限界が異なることが明らかになった。しかし、この南北1次元モデルでは、経度方向の水分布についての議論はできない。また、力学的な大気循環による影響が考慮されていないという課題があった。

そこで我々は、3次元モデルにより地球型惑星の地表水分布が暴走温室限界に与える影響を系統的に知ることが目的とし、3次元モデルとしてGCMを用いたモデル実験を行った。

今回我々はCCSR/NIES AGCM 5.4g [Numaguchi, 1999] を用い、大気中の水蒸気循環を計算した。このGCMでは力学的な大気循環に加え、放射過程、雲形成過程などが計算されており、地球の大気循環、気候をよく再現している [Numaguchi, 1999]。但し、このGCMでは水の量や地形による地表水輸送を計算することが出来ない。そこで我々は地表水分布を境界条件として与えることで様々なタイプの水惑星を想定し、太陽放射を徐々に上げていき、暴走温室状態に陥らず地表の水が維持できる上限を求めた。

緯度方向に水分布を与えて実験を行った結果、Takao[2013]と同様に、局在化の程度によって暴走温室限界に達する中心星放射の強度変化することが分かった。水が十分局在化した状況では180%の相対太陽放射でも地表の水が維持される一方、水分布が低緯度まで広がると、ハドレー循環による水蒸気輸送の効果により130%程度の放射でも暴走状態に突入した。また、経度方向に水分布を与えた結果、全球積分した水面積が等しくても、水分布が異なる場合は相対太陽放射で最大10%程度の違いが暴走温室限界に現れることが分かった。

キーワード: 暴走温室限界, GCM, 地球型惑星

Keywords: runaway greenhouse, GCM, Earth-like planet

原始惑星系円盤における電場加熱によるデッドゾーン Dead zones by electric heating in protoplanetary disks

森 昇志^{1*}; 奥住 聡¹
MORI, Shoji^{1*}; OKUZUMI, Satoshi¹

¹ 東京工業大学
¹Tokyo Institute of Technology

現在, 原始惑星系円盤の形成初期の角運動量は, 磁気回転不安定性 (MRI) に起因する磁気乱流によって円盤の外側へ輸送されると考えられている. 一方で, 原始惑星系円盤は電離度が低いため, 磁気乱流を維持するほど電流が流れられず, 磁気回転的に安定な領域 (デッドゾーン) が存在する (Sano et al., 2000). 原始惑星系円盤における乱流は, サブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星まで, その成長に影響を及ぼす. そのため, いつ, どこに, どの程度の乱流が存在するかを知ることは惑星形成を考える上で無くてはならない.

本研究では電子の電場加熱による電離度の変化に着目する. これまで原始惑星系円盤での磁気乱流に関する研究は, 常に電子の温度は中性ガスの温度に等しいとしている. しかし, 磁気乱流の成長による電場の上昇は非常に強い電場を形成し, 電場による電子の加熱が無視できない可能性がある (Inutsuka & Sano, 2005). 高温な電子はダストに吸着されやすいため, 気相の電子の数密度は減少する. これらの結果として, ある電場強度の範囲では, 電場の上昇に伴い電離度が減少する (Okuzumi & Inutsuka, in prep). 電離度の値は乱流の強さに影響を及ぼす. そのため原始惑星系円盤における電子の電場加熱の重要性を検討する必要がある.

本研究では原始惑星系円盤で電子の電場加熱による電離度の減少が起こる領域を求めた. 従来のデッドゾーンの外側では, 磁気乱流と共に電場が発達するとして, 電場に対する電離度の値を計算した. その結果, ダストサイズ $0.1 \mu\text{m}$, 縦磁場の強さ 0.05G , ダストガス質量比 0.01 の最小質量円盤では, 70AU まで電場加熱によって電離度が減少する領域が広がることを明らかにした. また簡単な見積もりによって, この領域では従来考えられていたような激しい乱流は起きないことが示唆された.

キーワード: 原始惑星系円盤, 電離度, ダスト, 磁気乱流, 電場加熱

Keywords: protoplanetary disk, ionization degree, dust grains, MHD turbulence, electric heating

焼結ダストアグリゲイトの衝突破壊 Collisional disruption of sintered dust aggregates

城野 信一^{1*}; 上野 春太¹
SIRONO, Sin-iti^{1*}; UENO, Haruta¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Graduate School of Environmental Sciences, Nagoya University

原始惑星系円盤と呼ばれる、ガスとダストからなる円盤の中で惑星系が形成される。その第一段階はダスト微粒子の付着成長である。付着成長により、ダスト微粒子が集合したダストアグリゲイトが形成される。このダストアグリゲイトがさらに衝突を繰り返すことにより成長してゆくと考えられている。周囲のガスと運動が分離するようになるとダストアグリゲイトは中心星方向に落下を始める。このまま中心星に落下してしまうと惑星形成につながらないため、落下するダストアグリゲイトを捕獲し、微惑星を形成するメカニズムが多く提案されている (Kretke & Lin 2007, Lyla et al. 2009, Sandor et al. 2011 等)。また、落下途中で引き続き衝突合体が進行することにより直接合体成長で微惑星を形成するシナリオも存在する (Okuzumi et al. 2012)。これらの研究ではいずれにしてもダストアグリゲイトの運動がガスと分離することが前提とされている。ダストアグリゲイトとガスの運動が分離するとき、ダストアグリゲイトの中心星方向への落下速度は 1m/s 程度である。したがって、この程度の落下速度になる大きさまでダストアグリゲイトは成長する必要がある。ここまでの成長は可能であろうか？

実験的には、ミクロンサイズの SiO₂ ダストアグリゲイトの衝突破壊速度は m/s のオーダーである (Blum 2010)。H₂O 氷を用いた実験においても、同程度の衝突破壊速度が得られている (Shimaki & Arakawa 2012)。ただし、室内実験では地球重力のため、原始惑星系円盤で形成されるような空隙率の非常に高いアグリゲイトを用いることは困難である。そこで本研究では高空隙率ダストアグリゲイトの衝突の二次元数値シミュレーションを行った。H₂O が主体である氷ダストアグリゲイトの焼結に着目した。原始惑星系円盤の広い範囲で焼結が進行する可能性が指摘されている (Sirono 2013)。焼結が進行すると、ダスト微粒子間の結合部が成長し、力学的性質が大きく変化する。ダスト微粒子間の結合力を変化させることで焼結の効果を取り入れた。新たに生成したダスト微粒子間の接触については、従来用いられているモデル (Dominik & Tielens 1997) を用いた。

焼結が十分進行したアグリゲイトでは、低速度 (~10cm/s) においてもカタストロフィックな破壊が観察された。これは、ダスト微粒子の転がり運動によって結合が容易に破壊されるためである。一方で、焼結がそれほど進行していないアグリゲイトではこのような破壊は観察されず、焼結していない場合と大きな違いは無かった。これは転がり運動によって破壊された結合がすぐに再接触によって焼結していない結合に変化するためである。また、これらの結果は仮定する H₂O の破壊強度に依存しており、強度の増加とともに破壊速度は上昇した。本研究の結果から、原始惑星系円盤における氷ダストアグリゲイトの進化はその形成場所によって多様であることが予想される。

キーワード: ダストアグリゲイト, 原始惑星系円盤, 衝突破壊, 焼結

Keywords: dust aggregate, protoplanetary nebula, collisional disruption, sintering

微惑星の大きさと原始惑星系円盤の乱流との関係について Planetesimal size and protoplanetary disk turbulence

小林 浩^{1*}; 田中 秀和²; 奥住 聡³

KOBAYASHI, Hiroshi^{1*}; TANAKA, Hidekazu²; OKUZUMI, Satoshi³

¹名古屋大学大学院理学研究科, ²北海道大学低温科学研究所, ³東京工業大学

¹Nagoya University, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ³Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤の中で、1km よりもずっと大きな天体は重力フォーカシングが効くため、暴走成長を起こし固体惑星やガス惑星の中心核を形成する。暴走成長を起こすと、系の大半の質量は暴走成長が始まったサイズのまま止まり、大きな天体(原始惑星)は円盤各領域に1つだけ形成される。このような成長が止まり原始惑星のその後の成長の材料となる天体が微惑星と考えられている。一方で、固体微粒子が集まってできた大きな天体も微惑星と呼ばれており、この2つが必ずしも一致する物ではない。近年の研究で、微惑星が衝突合体で形成されることが示唆されており、この場合、連続的に成長するため微惑星の定義はより曖昧になる。そのため、暴走成長が始まるサイズを微惑星と呼ぶのが妥当であろう。実際、小惑星帯では天体のサイズ分布から暴走成長が始まったサイズが分かり、その大きさは100km程度である。暴走成長開始は、微惑星のランダム速度がその表面脱出速度よりも小さくなり重力による衝突断面積増大効果が働き始める時点で決まる。ガス円盤の乱流は、この微惑星ランダム速度を増大させ、暴走成長開始時期を遅らせられる効果がある。つまり、乱流の強さにより、微惑星のサイズが決まり、形成される惑星の大きさもそれにより決められる。以上をシミュレーションにより確認し、太陽系の惑星の形成や、小惑星帯の天体のサイズ分布を決めるために必要な乱流の強さの動径方向の分布について議論する。

キーワード: 微惑星, 原始惑星系円盤, 小惑星, サイズ分布, 惑星形成

Keywords: Planetesimal, Protoplanetary disk, Asteroids, The size distribution of bodies, Planet formation

タイプ I 軌道移動するコアからのガス惑星形成 The formation of gas planets from cores in type I migration

前島 直彦^{1*}; 渡邊 誠一郎¹
MAESHIMA, Naohiko^{1*}; WATANABE, Sei-ichiro¹

¹名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University

観測により、ガスをまとっていると考えられる巨大惑星が多数発見されている。そのようなガス惑星の原始惑星系円盤中の形成のためには、円盤ガスが完全に散逸する前に固体惑星（ガス惑星のコア部分に相当）は臨界コア質量 M_{crit} まで成長する必要がある。ただし、コアは円盤ガスとの相互作用により、トルクを受けて動径方向に移動する（タイプ I 軌道移動）。従来の研究では、コアは M_{crit} に達する前に負のトルクにより短時間で中心星に落下するとされていた（Ward 1997, Tanaka et al. 2002）。しかし最近の研究によれば、ガスについて非等温過程を考慮すると共回転トルクと呼ばれるトルクにより、コアが外向きに動ける領域が円盤中に形成される（Baruteau & Masset 2008, Paardekooper & Papaloizou 2008）。結果としてトルクが 0 になる「平衡半径」ができ、もしコアがその場所に捕らえられれば軌道移動速度は円盤進化速度程度に低下するため、内側へ落下せずガスを捕獲できる可能性が示唆される。ただし正のトルクは限られた質量（ $M_{p,min} < M_p < M_{p,max}$ ）のコアにしか働かない（Kretz & Lin 2012）。そのため $M_p = M_{p,min}$ となるまでに時間がかかると、その間に負のトルクによって大きく内側へ移動してしまうということも起こりうる。本研究では円盤物理量に依存してどのようにコアが軌道移動・質量成長を行うのかを調べ、ガス惑星形成のために円盤が持つべき条件を求めた。

円盤のガス面密度分布は粘性拡散・photoevaporationによって進化し、温度は粘性加熱・中心星放射で与える。そのような円盤では加熱機構が粘性加熱から中心星放射へ遷移する領域に平衡半径ができる。本研究ではその平衡半径でのガス惑星形成可能性について調べる。惑星コアは自身の重力圏にある微惑星を集積しながら成長し、 M_{crit} に達したら周囲のガスを捕獲する。

結果、円盤物理量に依存して、ガス惑星形成条件は以下のように決まることが分かった。進化の速い円盤（乱流粘性の α パラメータ = 0.005）では、円盤質量が大きい段階（初期ガス質量降着率 $\sim 10^{-7} M_{\odot} yr^{-1}$ ）で、しかもコア成長の材料が豊富にある状況（固体物質/ガス比 > 0.03 ）でコア成長が始まれば、円盤の中間領域（ ~ 10 AU）で形成されたコアは成長途中で平衡半径に捕らえられ、そこで M_{crit} に達した結果、ガス惑星が形成される。それに対し、進化の遅い円盤（ $\alpha = 0.001$ ）あれば、円盤質量が小さくなった段階（初期ガス質量降着率 $\sim 10^{-8} M_{\odot} yr^{-1}$ ）でコア成長が始まってもガス惑星は形成される。この場合、固体/ガス比に対する依存性は弱い。

キーワード: タイプ I 軌道移動

Keywords: type I migration

微惑星集積による原始惑星の自転の研究 Protoplanet Spin by Planetesimal Accretion

柴田 雄^{1*}; 小久保 英一郎²

SHIBATA, Takashi^{1*}; KOKUBO, Eiichiro²

¹ 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻, ² 国立天文台

¹University of Tokyo, ²National Astronomical Observatory of Japan

惑星系形成において微惑星の寡占的成長を経て形成される原始惑星の自転について調べた。現在の標準的な惑星系形成シナリオでは、惑星系は原始惑星系円盤とよばれるガスとダストから構成される星周円盤から形成される。まずダストが集積して数キロメートルほどの微惑星が形成される。微惑星は公転をしながら衝突合体を繰り返し成長していく。成長は初期は暴走的、すなわち大きな微惑星ほど速く成長する。原始惑星(暴走成長微惑星)の質量が臨界値を超えると、暴走的成長は減速し、成長モードは寡占的成長となる。ここでは原始惑星は軌道反発によって一定の軌道間隔を保ちながら、秩序的に成長していく。本研究では、この原始惑星の形成過程において微惑星集積によってもたらされる自転角運動量を多体シミュレーションによって調べた。多体シミュレーションでは微惑星系の軌道進化、集積進化、自転進化を矛盾なく調べることができる。原始惑星の自転は、その合体条件に影響するため、原始惑星の巨大衝突による地球型惑星形成を考える上で重要である。また、原始惑星の自転角運動量は、巨大衝突によって形成される地球型惑星に継承されるため、地球型惑星の自転にも影響する。さらに、現在の火星は原始惑星の生き残りであると考えられているため、原始惑星の自転を調べることは火星の自転の起源を調べることにつながる。計算の結果、原始惑星の自転角速度は、質量の増加とともに小さくなる傾向がみられ、原始惑星の典型的な自転角速度は回転不安定の臨界角速度の1/10ほどの小さい値となった。質量が小さい微惑星が原始惑星にランダムな方向から多数衝突合体すると、微惑星のもたらす角運動量は、ほぼ相殺して正味の角運動量が非常に小さくなり、原始惑星の自転角運動量はあまり変化しない。しかし、微惑星の集積で質量は増加するため、それに伴い自転角速度は減少する。よって質量が大きいものほど自転角速度は小さくなる。原始惑星の自転軸傾斜角は等方的に分布し、天王星のような横倒しの軸をもつものが多いことがわかった。これは微惑星円盤の厚みが微惑星のサイズよりはるかに大きく、さらに微惑星の速度分散が大きいために衝突が等方的に起こることによる。原始惑星の自転の微惑星固体密度、微惑星初期質量に対する依存性も調べた。原始惑星の自転角速度は、固体密度の増加とともに大きくなり、 $\omega \propto \rho^{1/2}$ の関係が得られた。また、微惑星初期質量が大きいほど自転角速度の質量依存性が弱くなることがわかった。しかし、自転軸傾斜角の分布が等方であることは変わらない。今回の計算は、合体条件に完全合体を仮定し、円盤ガスによる抵抗を考慮していないので、得られた自転角速度は原始惑星形成で得られる自転角速度の上限であると考えられる。

土星リング中の小衛星へのリング粒子の重力集積 Gravitational accretion of particles onto moonlets embedded in Saturn's rings

安井 佑貴^{1*}; 大槻 圭史¹; 台坂 博²
YASUI, Yuki^{1*}; OHTSUKI, Keiji¹; DAISAKA, Hiroshi²

¹ 神戸大学理学研究科, ² 一橋大学商学部

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ²Graduate School of Commerce and Management, Hitotsubashi University

Collision and gravitational accretion of particles is an important issue related to the origin of ring-satellite systems of giant planets in the solar system. The Hill radii of Pan, Daphnis, Atlas, and Prometheus are found to be within 15 % of the observed long axes of these satellites given by the best-fit model ellipsoids. Also, the densities of these satellites (0.4 - 0.6 g cm⁻³) are very low compared to the density of water ice and all approximately equal to the critical density at that distance, which is defined as the density of a body that entirely fills its Hill sphere. From these results, the small satellites within the orbit of Pandora are thought to be formed by accretion of small porous ring particles onto large dense cores, and further accretion seems to have been suppressed when the density of the satellite reaches the critical density at that distance. Local N-body simulations also demonstrated that a Hill sphere-filling body is produced by accretion of small porous particles onto a large dense core. However, it has not been studied how the degree of particle accretion onto moonlets in the inner parts of Saturn's rings depends on the distance from Saturn.

The shapes of these small ringmoons would also provide clues to the dynamical evolution of Saturn's rings. The fact that the shapes of these ringmoons approximately match those of their associated Hill sphere suggests that the moonlet cores were surrounded by a number of particles when they were formed. On the other hand, Pan and Atlas have the characteristic shapes with equatorial ridges, and are thought to be formed by two stages. First, their precursors whose shapes are similar to their Hill sphere without equatorial ridges were formed when the rings were thick. Then, equatorial ridges were formed through particle accretion onto the equatorial planes of the above formed objects after the rings became sufficiently thin and also before ring particles diffused. However, effects of dynamical properties of the rings on the shaping of moonlets formed by particle accretion have not been examined in detail.

Propeller-shaped structures have also been found in Cassini images of Saturn's rings. These propeller-shaped features are explained by gravitational interaction between ring particles and unseen embedded moonlets. From these observations, the sizes and orbital distributions of these unseen embedded moonlets are obtained, and such information provide us with clues to the evolution of the ring-satellite system. The propeller-shaped structures are mainly observed in the A ring. Recently, observations of similar structures have also been reported for the Cassini Division, and the B and C rings. Although some of these moonlets either may be collisional shards resulting from the breakup of a bigger icy progenitor ring body or may have formed by accretion of small low-density ring particles onto larger dense fragments, the origin of these moonlets is not clear.

Using local N-body simulation, we examine gravitational accretion of ring particles onto moonlets in Saturn's rings. We find that gravitational accretion of ring particles onto moonlets is unlikely to occur at radial locations interior to the outer edge of the C ring, unless the density of the moonlets is much larger than that of water ice or non-gravitational cohesive forces play a major role. Detailed analysis of accretion process of individual particles onto moonlets shows that particle accretion onto high-latitude regions of the moonlet surface occurs even if the rings' vertical thickness is much smaller than the moonlet's radius. The degree of particle accretion in outer rings is found to depend significantly on rings' vertical thickness and optical depth. Our results suggest that large boulders recently inferred from observations of transparent holes in the C ring are likely to be collisional shards, while propeller moonlets in the A ring would be gravitational aggregates formed by particle accretion.

キーワード: 重力集積, 小衛星, 土星リング

Keywords: gravitational accretion, moonlet, Saturn's rings

Super-Earthの大气散逸進化：惑星組成と起源への制約 Mass-Loss Evolution of Super-Earths: Constraints on Their Compositions and Origins

黒川 宏之^{1*}; カルテネッガー リサ²; 中本 泰史³
KUROKAWA, Hiroyuki^{1*}; KALTENEGGER, Lisa²; NAKAMOTO, Taishi³

¹名古屋大学, ²マックスプランク天文研究所, ³東京工業大学
¹Nagoya University, ²Max Planck Institute for Astronomy, ³Tokyo Institute of Technology

ケプラー宇宙望遠鏡によるトランジット観測を始めとする近年の観測の進展により、低質量の系外惑星が次々に検出されてきている。その中で多数発見されている地球サイズから海王星サイズの惑星は総称して Super-Earth と呼ばれている。太陽型星の3割ほどがこの Super-Earth を持つと見積もられており (Howard et al., 2012)、Super-Earth は宇宙に数多く存在する惑星である。従って、Super-Earth の組成、ひいては起源を理解することは、惑星の形成と進化を理解する上で極めて重要である。

本研究では特に、質量・半径がともに測定されている Super-Earth を用いて、理論計算との比較をもとに Super-Earth の組成を決定する要素について議論する。Super-Earth の組成の特徴として、水素ヘリウムエンベロープの有無が挙げられる。岩石を主体とすると考えられる高密度の Super-Earth が存在する一方、低密度で形成時に獲得したエンベロープを保持していると考えられる Super-Earth も存在する。このような特徴は惑星質量・軌道半径などの違いが原始惑星系円盤ガス捕獲量の違いが生まれたか、もしくは形成後の中心星 XUV(X-ray と EUV) 放射駆動の大气散逸によって一部の Super-Earth からエンベロープが失われたこと (Lopez et al., 2012 など) に起因すると考えられる。また、Super-Earth の組成については、質量・半径が測定されていても、岩石・氷・水素ヘリウムの存在比が一意に決定できないという、組成の縮退の問題がある。大气透過光の多波長観測が最も直接的に組成を制約する方法であるが、最近のハッブル宇宙望遠鏡を用いた高精度観測では極めて平坦なスペクトルが観測され、大气上層に雲が存在している可能性が示唆された (Kreidberg et al., 2014; Knutson et al., 2014)。Super-Earth の大气において一般的に雲が存在する場合、観測的に大气組成を制約することが困難となる。

本研究では、この 1.Super-Earth のエンベロープの有無の起源, 2.Super-Earth の組成の縮退という問題について、大气散逸進化計算から制約を行う。特に今回の発表では中心星のスペクトル型に着目する。恒星はスペクトル型によって全波長積分した光度と XUV 光度の比が異なるため、同じ平衡温度となる軌道半径で比較すると XUV 照射量が異なる。この性質を用いて、Super-Earth のエンベロープの有無の起源における形成過程の影響と大气散逸過程の影響を分離して理解することを試みる。本研究の大气散逸進化計算の結果得られたエンベロープを失う閾値となる軌道半径・平衡温度は中心星スペクトル型ごとに異なるが、質量・半径の測定されている Super-Earth が発見されている G 型星、K 型星、M 型星のそれぞれについて、Super-Earth のエンベロープの有無の傾向と整合的である。このことから、Super-Earth のエンベロープの有無の起源は、大气散逸によるエンベロープの剥ぎ取りであることが示唆される。この場合、Super-Earth の組成の縮退の問題についても、やや低密度の Super-Earth の中で中心星に十分近いものはエンベロープをもたず、氷組成であることが示唆される。そのような中心星近傍の氷惑星はスノーライン以遠で形成し、惑星移動を経験したと考えられる。

本研究ではさらに大气散逸モデルの不定性や恒星の XUV 光度進化の不定性の影響を評価し、結果の妥当性について議論を行う。

キーワード: 系外惑星, 大气散逸, 組成, スーパーアース
Keywords: exoplanet, atmospheric escape, composition, super-Earth

赤外アストロメトリ法による褐色矮星周りの惑星探査 Exoplanet exploration for brown dwarfs with infrared astrometry

山口 正輝^{1*}; 矢野 太平¹; 郷田 直輝¹
YAMAGUCHI, Masaki^{1*}; YANO, Taihei¹; GOUDA, Naoteru¹

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

アストロメトリによる系外惑星探査は最も古くから行われている惑星探査法である。にもかかわらず現在アストロメトリ法によって発見された惑星の数はわずか1つにとどまる。これは惑星の質量が中心星の質量に比べて十分小さく、惑星重力による中心星のふらつきが観測しにくいためである。そこで我々は太陽の10分の1以下の質量を持つ褐色矮星をターゲットとして、将来のアストロメトリ衛星を用いて発見できる惑星の公転周期、惑星質量を調べた。

褐色矮星周りの惑星については現在5つ見付かっており、そのすべてで質量比10分の1を超える。距離10pc、公転周期1年、質量比10分の1の褐色矮星惑星系に対しては、中心星の軌道運動の見込角は3ミリ秒角に達する。これは将来のアストロメトリ衛星である小型JASMINE、Gaiaで十分検出可能である。これらの検出機器の位置決定精度である約10マイクロ秒角を用いると、距離、周期が上記の場合にはスーパーアース探査も可能であることがわかった。

我々はさらに、個別の褐色矮星に対して小型JASMINE、Gaiaを用いた場合、周期・惑星質量平面のどの領域を探索できるかを調べた。その結果、周期5年以内、惑星質量3地球質量以上のかかなり広い領域を探索できることがわかった。また、これまでどの中心星に対しても惑星が発見されていない周期0.1日、惑星質量10木星質量付近の領域を探索できることもわかった。この領域は、ほとんどの対象天体に対して小型JASMINEのみで探索できる。

キーワード: アストロメトリ, 褐色矮星, 惑星探査, 赤外線, 小型JASMINE, ガイア

Keywords: astrometry, brown dwarf, exoplanet exploration, infrared, Small-JASMINE, Gaia

スーパーアース大気中の有機物エアロゾル生成に関する実験的研究：トランジット観測への示唆
Experimental study on organic aerosol formation in super-Earths' atmosphere: Implications for transit observations

小林 潤平^{1*}; 関根 康人²; 洪 鵬²
KOBAYASHI, Jumpei^{1*}; SEKINE, Yasuhito²; HONG, Peng²

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学新領域創成科学研究科複雑理工学専攻
¹Dept. Earth & Planet. Sci., Univ. Tokyo, ²Dept. Complexity Sci. & Engr., Univ. Tokyo

A super-Earth is an extrasolar planet with a mass greater than Earth and below Neptune. Although there is no super-Earth in our solar system, astronomical observations demonstrate that it is one of the major categories of planets beyond the solar system. Recent transit observations of super-Earths, including GJ 1214b, indicate that their atmospheres contain opaque clouds or haze at high altitudes. One candidate for the opaque materials is metallic or salt dusts, such as KCl and ZnS, which would condense in the upper atmospheres of super-Earths. Another candidate is organic haze, such as those observed in the atmosphere of Saturn's moon Titan, which would be composed of high-molecular-weight hydrocarbon aerosols produced through photochemical reactions involving CH₄. Given the proposed formation mechanisms of nearby super-Earths, e.g., planetary migration, they would have a wide variety in chemical composition of atmosphere. However, previous laboratory experiments have mainly focused on organic aerosol formation in Titan's and early Earth's atmospheres. Thus, both the formation rate and optical property of organic haze for various atmospheric compositions have been poorly constrained by laboratory experiments.

In this study, we investigate the formation rate and optical property of organic aerosols formed by laboratory experiments simulating super-Earths' atmospheres with a wide variety in chemical composition. We used initial gas mixtures of H₂ and CH₄ or CO₂ and CH₄, and varied the H₂/CH₄ or CO₂/CH₄ ratios. The experiments were conducted at a total pressure of 1 Torr in a flow system. Cold plasma irradiation was used to initiate aerosol formation. We measured the aerosol formation rate, chemical compositions of intermediate gas molecules, and optical property of aerosol using a spectroscopic ellipsometer, a quadrupole mass spectrometer, and a UV/VIS spectrometer, respectively.

Our experimental results show that the aerosol formation rate decreases with increasing the H₂/CH₄ ratio, suggesting that recycling of high-molecular-weight hydrocarbons to CH₄ occurs through reactions with H and H₂ under H₂-rich conditions. We also show that organic aerosols are produced less efficiently at higher CO₂/CH₄ ratios. The results of gas analyses also show that formation of high-molecular-weight hydrocarbons are inhibited at higher CO₂/CH₄ ratios. These results indicate that oxygen-bearing molecules and radicals formed by CO₂ dissociation oxidizes hydrocarbons produced from CH₄, which results in a lower aerosol formation rate at higher CO₂/CH₄ ratios. Optical constant of the aerosols formed under the conditions simulating super-Earths' atmospheres is significantly lower than those of Titan aerosol analogs.

Based on the experimental results, we discuss the chemical composition and formation process of transiting super-Earths, such as GJ 1214b, by comparing the observed transmittance spectra with the model spectrum. We suggest that organic aerosol production in a H₂-rich or CO₂-rich atmosphere is inefficient so that organic haze would not be capable of explaining the observed transit spectra of super-Earths, even if they contains gaseous CH₄ in the atmospheres.

キーワード: 系外惑星, スーパーアース, 有機物エアロゾル, ヘイズ, 大気組成
Keywords: exoplanet, super-Earth, organic aerosol, haze, atmospheric composition

ヘイズを持つ低質量系外惑星の大気透過スペクトルモデル: GJ 3470b への応用 Transmission spectrum models of low-mass exoplanet atmospheres with haze: Application to GJ 3470b

川島 由依^{1*}; 生駒 大洋¹; 福井 暁彦²; 成田 憲保²
KAWASHIMA, Yui^{1*}; IKOMA, Masahiro¹; FUKUI, Akihiko²; NARITA, Norio²

¹ 東京大学, ² 国立天文台

¹The University of Tokyo, ²National Astronomical Observatory of Japan

1995年に最初の系外惑星が発見されて以来、現在までに1000個以上の系外惑星の発見が報告されている。最近では、ひとつの惑星に対して、多波長でトランジット観測が行われるようになった。惑星のトランジット時に起きる恒星光度の見かけの減少から、その惑星の半径が分かる。また、測定された半径の波長依存性（これを大気透過スペクトルという）には、惑星大気中の分子やヘイズ、雲による吸収・散乱の情報が含まれる。従って、観測データと理論的な透過スペクトルモデルとを比較することにより、惑星大気の組成を制約できる。大気組成は、惑星の熱進化や形成過程などを考える上で重要である。

これまでに、我々の観測グループは2つの低質量系外惑星（GJ 3470b と GJ 1214b）に対して多波長でのトランジット観測を行った。この2つの惑星とも、近赤外域に比べると、可視域で大きなトランジット半径が観測されており、このことから、ヘイズの存在が示唆されている。GJ 1214bについては、ヘイズを考慮した理論スペクトルモデルの系統的な議論がなされているが、GJ 3470bについては、まだなされていない。そこで、本研究では、トランジット観測がされるような中心星近くに存在する低質量惑星を想定し、その惑星が大気中にヘイズをもつ場合の理論的な透過スペクトルモデルを作成した。その上で、GJ 3470b と GJ 1214b にスペクトルモデルを適用し、その大気組成について議論する。

理論スペクトルモデルの作成においては、惑星大気分子およびヘイズによる主星光の吸収・散乱と、化学平衡計算によって鉛直組成分布を考慮した。大気組成は、太陽組成、太陽組成からその重元素量やC/O比を変えたもの、水蒸気に富んだ大気などを考え、大気組成によるスペクトルモデルの違いを調べた。また、ヘイズの高度、粒径、数密度による違いについても調べた。実際の透過スペクトルの観測点とモデルとを比較し、惑星の大気組成について議論する際、カイ2乗検定を行ない、各大気モデルの妥当性を定量的に評価した。

キーワード: 系外惑星, トランジット, 透過スペクトルモデル, 大気組成, ヘイズ

Keywords: exoplanets, transits, transmission spectrum models, atmospheric composition, haze

SEEDS 計画による太陽系外惑星や星周円盤の直接撮像探査 The SEEDS Exoplanet and Circumstellar Disks Survey

葛原 昌幸^{1*}; 田村 元秀²; 工藤 智幸³; 橋本 淳⁴; 日下部 展彦⁵; 松尾 太郎⁶; マクエルウィン マイケル⁷; ジャンソン マーカス⁸; 高橋 安大²

KUZUHARA, Masayuki^{1*}; TAMURA, Motohide²; KUDO, Tomoyuki³; HASHIMOTO, Jun⁴; KUSAKABE, Nobuhiko⁵; MATSUO, Taro⁶; MCELWAIN, Michael⁷; JANSON, Markus⁸; TAKAHASI, Yasuhiro²

¹ 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻, ³ ハワイ観測所, ⁴ オクラホマ大学物理・天文学専攻, ⁵ 国立天文台, ⁶ 京都大学理学研究科宇宙物理学教室, ⁷ ナサ・ゴダード宇宙飛行センター, ⁸ クイーンズ大学ベルファスト 宇宙物理学研究センター

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Department of Astronomy, The University of Tokyo, ³Subaru Telescope, ⁴H. L. Dodge Department of Physics and Astronomy, University of Oklahoma, ⁵National Astronomical Observatory of Japan, ⁶Department of Astronomy, Kyoto University, ⁷NASA Goddard Space Flight Center, ⁸Astrophysics Research Centre, Queen's University Belfast

太陽系外惑星(系外惑星)の発見数は現在 1,000 に及ぶまでになった。さらに、Kepler 衛星による探査によって、3,000 を超える系外惑星候補天体が報告されている (Huber et al. 2013)。このように惑星系は我々の銀河系において普遍的に存在するものであるが、これまでの系外惑星の観測研究の成果として、その特徴は非常に多様であることもわかってきた。一方、それらの惑星を形成する母体である星周円盤の観測的研究も進んでいる。特に、近年運用が開始された電波望遠鏡 ALMA によって原始惑星系円盤の構造に対して興味深いデータが得られるようになってきたが (e.g., van der Marel et al. 2013; Casassus 2013), 星周円盤に対する理解は ALMA によって今後ますます進むことが期待できる。

直接撮像法は数十 AU 程度の大きさの軌道を持つ系外惑星(広軌道惑星)の探査や研究を可能にするが、そのような惑星の探査はドップラー法やトランジットの法などの間接的手法では極めて難しい。また、直接撮像法は星周円盤の探査やその特徴の研究に対しても有効な手法である。実際に直接撮像法による原始惑星系円盤や残骸円盤からの散乱光の高解像度観測によって、円盤と惑星の物理的な結びつきを示唆する重要な証拠がこれまで得られてきた。我々は、すばる望遠鏡と最新の補償光学装置 AO188, さらに新たに開発した高感度近赤外カメラ HiCIAO を用いて系外惑星と星周円盤を直接撮像探査するプロジェクトである SEEDS をこれまで進めてきた。SEEDS はおよそ 500 のターゲットを最終的に観測することを目指しており、主に年齢が百万年から 10 億年の太陽型星をターゲットにしているが、中質量星や低質量星も一部ターゲットに含まれている。SEEDS 計画はその開始から 5 年目の探査を現在行なっているが、10 以上の遷移円盤や残骸円盤において溝や渦巻き構造などの興味深い円盤構造を検出するのに成功している (e.g., Hashimoto et al. 2012; Grady et al. 2013)。さらに、アンドロメダ座 Kappa 星という B 型星を公転する大質量巨大惑星の候補天体 (Carson et al. 2013) や、G0 型の太陽型星である GJ 504 から約 44AU 離れた軌道を公転する巨大ガス惑星 (GJ 504b) の検出に成功している (Kuzuhara et al. 2013)。GJ 504b の質量は木星の 4 倍程度と推定され、さらに有効温度は 500K と推定される。これまで検出された広軌道惑星の中でも、この質量推定値は最低の値の一つであり、さらにその有効温度はこれまでで最低の推定値である。追加で行った観測からは、GJ 504b の大気にメタンが存在することも示唆されたが (Janson et al. 2013), 直接撮像惑星においてメタンを検出するのは初のことである。このように、SEEDS はこれまで知られていない様な特徴をもつ系外惑星の検出やその特徴を調べることに成功している。全探査完了後、SEEDS 探査結果の総合的・統計的な分析を行なう予定であるが、それは系外惑星や星周円盤に対する理解をよりいっそう前進させると期待される。また、それらの成果は地球型惑星の探査などの将来の系外惑星探査においても重要な試金石になることも期待される。

本講演では、主に GJ 504b の検出など最新の SEEDS 探査の成果について報告する。さらに、SEEDS 計画の全体的状況や進捗、今後の予定についても報告する。

キーワード: 太陽系外惑星, 残骸円盤, 原始惑星系円盤, 巨大惑星, 直接撮像観測

Keywords: extrasolar planet, debris disk, protoplanetary disk, giant planet, direct imaging observation

地球大気を考慮した極超音速飛行隕石のソニックブーム解析 Sonic Boom Analysis of Meteorite at Hypersonic Speeds in Earth Atmosphere

山下 礼^{1*}; 鈴木 宏二郎¹
YAMASHITA, Rei^{1*}; SUZUKI, Kojiro¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

隕石落下時の問題点として、高速飛行することにより発生する衝撃波、すなわちソニックブームがあげられる。2013年2月にロシアのチェリャビンスクで観測された事象では、隕石から発生したソニックブームにより窓ガラスや建物が損壊し、多くの人的被害を被った。このことから、隕石がもたらすソニックブームの影響を検証する事は重要と考えられる。本研究では、航空宇宙工学で培われたソニックブーム予測手法を適用することで、極超音速飛行する隕石から発生したソニックブーム強度を予測する。具体的には、数値流体力学 (CFD) に基づいた予測手法 (R. Yamashita and K. Suzuki, APISAT2013, No. 02-05-3) を適用することで、衝撃波が地球大気内を地上まで伝播する様子を明らかにする。解析対象は、高度 10 km をマッハ 10 (約 3 km/s) で水平定常飛行する隕石を想定し、直径 20 m の球体まわりの流れ場とした。地球大気モデルは国際標準大気 (ISO 2533:1975) を用いた。国際標準大気では、温度が高度の関数で与えられ、圧力、密度は理想気体の状態方程式及び静水圧平衡の式から導出される。支配方程式は、重力項を付加した 3 次元 Navier-Stokes 方程式である。計算格子は、2 次元格子を物体軸周りに 180 度回転させた格子であり、格子数は約 554 万点である。地球大気の場合、高度に応じて大気の状態が変化するため、衝撃波角も変化する。そのため、予備計算を行った後、物体前方から発生する bow shock wave に沿った適合格子を形成し、再度計算を行った。なお、計算負荷を軽減するため、計算領域をセクターに分割し、物体近傍のみ 2 次元軸対称解析を実施した。対流項の離散化は AUSM 系のスキームである SHUS (E. Shima and T. Jounouchi, 第 14 回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, pp.7-12, 1997) を 3 次精度 MUSCL 法により高次精度化したものを用いた。粘性項は 2 次精度中心差分で評価し、重力項は生成項として扱った。また、時間積分は MFGS 陰解法 (嶋英志, 第 29 回流体力学講演会論文集, pp.325-328, 1997) で行った。

数値解析結果より、球体から発生する衝撃波は、物体前方の bow shock wave と物体後流の trailing shock wave である事が分かる。そして、bow shock wave と trailing shock wave は地上にかけて近づき、高度 8 km までに統合する。そのため、極超音速飛行する隕石の場合、急峻な圧力上昇 (爆発音) が生じるのは 1 回のみとなり、bow shock wave より弱い trailing shock wave の寄与は小さくなる (超音速機の場合、N 型の波形を形成し、爆発音の回数は 2 回となる)。チェリャビンスクの事象では、隕石が爆発により 3 個に分裂し、地上で 3 度の爆発音が発生したと報告されている (NHK COSMIC FRONT: ロシア隕石の全貌)。つまり、隕石の破片の数と爆発音の回数が一致し、本解析結果から得られる特徴とも一致する。一様大気を伝播する衝撃波は、遠方にかけて円錐状に広がるため、地上にかけて常に減衰し続ける。一方、地球大気の場合、地上にかけて大気圧及び大気温度が上昇するため、圧力上昇値を増幅させる効果も働く。特に、国際標準大気では高度 11 km から地上にかけて、温度が 6.5 K/km の割合で上昇し、増幅効果の影響が顕著に表れる。その結果、物体近傍では最大圧力上昇値が急激に減少するが、高度 5 km から地上にかけてはほとんど変化が見られない。また、地球大気では衝撃波の伝播方向によって圧力上昇値の減衰傾向が異なり、ソニックブーム強度は鉛直下方で最も強くなる。本解析結果では、地上での反射係数が 1.9 の場合、隕石直下で圧力上昇値が約 1.5 kPa となり、次世代超音速機の開発で求められている基準値 (24Pa) の約 63 倍に相当する。チェリャビンスクの隕石では、窓ガラスの損傷から圧力上昇値を導出した結果、 3.2 ± 0.6 kPa であったと報告されている (NATURE 12741)。従って、計算条件と実際の飛行条件は異なるが、圧力上昇値は共に 1 kPa のオーダーであり、ソニックブームの伝播傾向を検証する上では有用な結果と考えられる。そして、1 kPa オーダーの圧力上昇がもたらす影響は甚大であり、チェリャビンスクで起きた事象はその影響を顕著に表した事例である。

本研究では、航空宇宙工学で培ったソニックブーム予測手法を適用することで、隕石から発生したソニックブーム強度を評価した。今後はパラメトリックスタディを行うことにより、実際の隕石のサイズや飛行条件を推算できると考えられる。

キーワード: ソニックブーム, 隕石, 極超音速流, CFD, 衝撃波

Keywords: Sonic Boom, Meteorite, Hypersonic Flow, CFD, Shock Wave

チェリャビンスク火球の明るさと色の時間変化 The brightness and the color temperature of the Chelyabinsk bolide

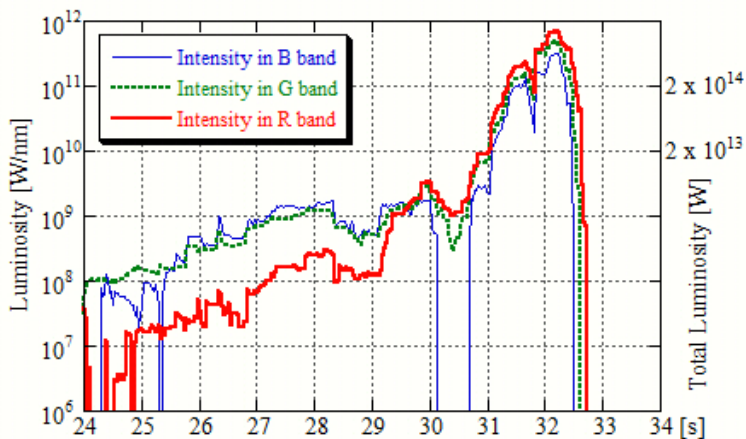
柳澤 正久^{1*}
YANAGISAWA, Masahisa^{1*}

¹ 電気通信大学
¹ Univ. Electro-Communications

2013 年 2 月 15 日 3 時 20 分 (世界時) のロシア・チェリャビンスク市近郊で起きた火球は、車載カメラを含む多くのモニターカメラによって撮影され、その画像がインターネット上に公開されている。我々はその中の一つを解析し、明るさと色の時間変化を調べた (明るさの時間変化を図に示す)。結果は次の通りである。(1) 光エネルギーのほとんどは 1~2 秒間のフレア (光度が急激に増大する現象) で放射された;(2) フレア以前の放射は黒体放射ではない;(3) フレア時のスペクトルは 3500 K の黒体放射と矛盾しない;(4) 3500 K の黒体放射を仮定すると全波長にわたって単位時間に放射されるエネルギーは最大で 1.0×10^{15} W であった;(5) 全放射エネルギーから推定される衝突エネルギーは 1.9×10^{15} J (TNT 爆薬 450 kton のエネルギーに相当) であった。また、3500 K の黒体放射をする黒体の面積は 120 km^2 であり、火球の軌跡に沿った半径 1 km、長さ 20 km の円柱の表面からの放射が考えられる。

図の説明: 単位波長当たりの光度 (左側の目盛: RGB 各バンドについて太線, 破線, 細線で示す)。光度は単位時間当たり全方向に放射されるエネルギーと定義する。右側の目盛は 3500 K の黒体放射を仮定した場合の G バンドの値 (破線) から算出される全波長での光度である。横軸の時刻は 2013 年 2 月 15 日 3 時 20 分の秒 (世界時)。

キーワード: 火球, 天体衝突, 太陽系小天体, チェリャビンスク, スペースガード, 隕石
Keywords: bolide, meteoroid impact, small solar system objects, Chelyabinsk, Space guard, meteorites



大型レーダー流星ヘッドエコー観測による太陽系ダスト軌道の統計的分布 Statistical distribution of the solar system dusts by meteor head echo observations with the large-aperture radar

阿部 新助^{1*}; Kero Johan²; 中村 卓司³; 藤原 康徳⁴; 渡部 潤一⁵
ABE, Shinsuke^{1*}; KERO, Johan²; NAKAMURA, Takuji³; FUJIWARA, Yasunori⁴; WATANABE, Jun-ichi⁵

¹ 日本大学理工学部航空宇宙工学科, ² スウェーデン宇宙物理研究所, ³ 国立極地研究所, ⁴ 日本流星研究会, ⁵ 国立天文台
¹Department of Aerospace Engineering, College of Science and Technology, Nihon University, ²Swedish Institute of Space
Physics (IRF), ³National Institute of Polar Research (NIPR), ⁴Nippon Meteor Society, ⁵National Astronomical Observatory of
Japan

メテオロイド(流星)が超高速で大気突入すると、高度約 70-130km において流星物質のアブレーションによりプラズマが形成さる。特に、流星ヘッドプラズマから反射される電波を流星ヘッドエコーという。我々は、京都大学生存圏研究所・信楽 MU レーダー(東経 136.10 度、北緯 34.85 度)を用いた、流星ヘッドエコー観測を実施した。MU レーダーにより、2009 年以降、流星の経路と惑星間軌道が継続的に導出されてきた。2014 年 1 月現在、約 12 万個の流星軌道が高精度で求まっている。典型的な軌道決定誤差は、速度で 0.3 km/s、軌道長半径で 0.1 AU と非常に小さな誤差である。これまで、このような高精度で膨大な数の流星軌道が通年を通して観測されたことはない。我々は、このデータベースの統計解析から得られた軌道分布、母天体彗星・小惑星との関連などについて報告する。

キーワード: 流星, ダスト, メテオロイド, 彗星, 小惑星, MU レーダー
Keywords: meteors, dusts, meteoroids, comets, asteroids, MU radar

火星表面のサブミリ波偏波放射観測の室内実験による検討 Laboratory experiment simulating Martian surface observation with submillimeter-wave polarimetric radiometry

有村 健斗^{1*}; 落合 啓²; 菊池 健一²; 北 和之³; 笠井 康子²

ARIMURA, Taketo^{1*}; OCHIAI, Satoshi²; KIKUCHI, Kenichi²; KITA, Kazuyuki³; KASAI, Yasuko²

¹茨城大学大学院理工学研究科, ²情報通信研究機構, ³茨城大学理学部

¹Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³Faculty of Science, Ibaraki University

背景・目的:

海洋の存在しない火星大気の大循環において、大気と地表面下の間で昇華・凝結過程を通して生じる物質、エネルギー交換サイクルが大きな影響を持つと考えられ、その理解のために火星の地表面状態の広域な変動を捉えることが重要となる。このような変動を捉える上で周回衛星を用いた地表面観測が重要であるが、火星大気中に存在するダストが観測の妨げとなっているため継続的な光学観測が困難とされている。そこで、波長がダスト粒径よりも大きいサブミリ波偏波を利用した放射観測を行うことで火星ダストの影響を受けず、地表面の継続観測が可能となり、ごく浅い火星表面下の温度や物質組成などの情報を得ることができる。しかし、今までの惑星探査において周回衛星を用いた惑星表面のサブミリ波偏波放射観測が行われた例はなく、観測を提案するためには表面観測におけるこの観測手法の有効性を十分に検討する必要がある。本研究では火星周回衛星による観測を模擬した室内実験を行うことによって観測の有効性を議論することを目的とする。

測定原理:

地表面をある入射角で観測する衛星で受信される放射強度は、地中の温度に応じた放射が地表面へ伝搬し大気中へ射出した成分と、大気からの放射が地表面で散乱された成分の和がさらに大気中を伝搬してきたものとなる。地表面の射出率および反射率は衛星の入射角、地表物質の誘電率や表面粗度、偏波によって決定する。複数の入射角、偏波、周波数で火星表面を観測することで火星表面の温度、誘電率、表面粗度を推定することが可能となる。

室内実験:

衛星によって観測される放射強度から地表面の温度や誘電率、表面粗度などの地表面状態を知るためには衛星の入射角および偏波方向ごとに得られる射出率、反射率と地表面状態を表すパラメータとの関係性を理解しておく必要がある。そこで、衛星観測を模擬した測定を行うことが出来る実験システムを構築した。実験システムは散乱測定部、光学系部、送受信機から構成される。散乱測定部は火星平均気圧と表面温度を再現できるように真空容器で作られ、冷却装置で測定資料を火星表面温度に冷却することが可能になっている。また、光学系部で測定する入射角と偏波を制御することができ、送受信機を併用することで測定試料の反射率が、受信機のみを用いることで放射強度および射出率が測定可能となっている。本研究ではサブミリ波放射強度測定から火星表層を模擬した測定試料から温度、誘電率、表面粗度などを導出できるか検討することを目的としているが、そのためには地表面状態のパラメータひとつひとつが放射強度と放射率、反射率に与える影響について調べることが必要となる。今回は比較的組成や粒径が単一であると考えられるアクリル平板、アルミナボールのサブミリ波偏波反射率を測定し、単一組成の誘電体をもつ誘電率や表面粗度が反射率に与える影響について調べた結果を報告する。この結果を踏まえることで、火星表面のような混合した物質組成をもつ誘電体とその反射率の関係性の検討を行うことができ、さらに放射強度、放射率との関係性について検討を行うことが期待される。

キーワード: 火星, 表面観測, サブミリ波

Keywords: Mars, surface observation, submillimeter-wave

ALMA 望遠鏡によるエンセラダス・プルーム内の HCN 観測可能性とその科学的意義

Scientific importance and possibility of HCN detection in Enceladus plumes by ALMA

兒玉 賢哉^{1*}; 関根 康人¹; 飯野 孝浩²; 西合 一矢⁶; 笠井 康子³; 佐川 英夫⁴; 前澤 裕之⁵

KODAMA, Kenya^{1*}; SEKINE, Yasuhito¹; IINO, Takahiro²; SAIGO, Kazuya⁶; KASAI, Yasuko³; SAGAWA, Hideo⁴; MAEZAWA, Hiroyuki⁵

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 名古屋大学理学研究科太陽地球環境研究所, ³ 独立行政法人通信総合研究所電磁波計測研究センター, ⁴ 情報通信研究機構, ⁵ 大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学科, ⁶ 自然科学研究機構国立天文台
¹Dept. Complexity Sci. and Engr. Univ. of Tokyo, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Graduate school of science, Nagoya University, ³Senior Researcher Global Environment Division National Institute of Information and Communications, ⁴National Institute of Information and Communications Technology, ⁵Department of Physical Science Osaka Prefecture University, ⁶National Astronomical Observatory of Japan

Saturn's icy moon, Enceladus, exhibits ongoing geological activities, including eruption of water-rich plumes from warm fractures near the south-pole region. These geological activities together with the findings of Na-rich salts in the plumes suggest the presence of an interior liquid ocean beneath the icy crust. This demonstrates that Enceladus' plumes provide a unique opportunity to investigate the chemical composition of oceanic water, possible geochemical reactions, and habitability of the icy moon. However, due to limitations of in-situ measurements of the plumes by the Cassini spacecraft, it is not able to identify or quantify some key molecules, which could probe physical and chemical conditions of the ocean.

Here we discuss scientific importance and possibility of detection of HCN in the plumes by large ground-based, sub-millimeter telescope, ALMA. Because HCN is one of the fundamental materials contained in icy planetesimals in the outer solar system, and because it readily hydrolyzes in warm water (>50 °C), a lack of HCN suggests that Enceladus' interior would have experienced relatively high temperatures, i.e., a presence of hydrothermal activity. On the other hand, if HCN were present in the plumes, this in turn means that Enceladus would have been cold throughout its history. Given the results of thermal evolution model, the latter case suggests late formation of the Saturnian system (>5Myr) after CAI formation, which would result in a depletion of short-lived radiogenic heat source in Enceladus.

To evaluate the possibility to detect HCN in the plumes by ALMA, we first estimate a special distribution of H₂O gas density based on results from Cassini's observations and plume eruption modeling. Then, we calculate radiative temperatures of HCN in the field of view of ALMA as a function of HCN concentration. Finally, the upper limit of HCN as a function of observation time will be obtained. For instance, if HCN were not detected within 4-6 hours of observation time, an upper limit of the HCN concentration in the plumes becomes 0.2% relative to water, which is comparable to a typical concentration of HCN in comets. Thus, the ALMA telescope is capable of detecting HCN in Enceladus' plumes within a reasonable observation time, if it were present in an amount comparable to that of comets. In either case whether HCN were present or not, we would be able to constrain geochemical reactions and thermal history of Enceladus as well as the timing of formation of Saturnian system.

円盤内縁近傍の惑星が円盤に与える影響の解析に向けて Development of SPH: Toward Understanding of Disk-planet Interaction Near the Disk Inner Edge

藤井 悠里^{1*}; 岩崎 一成¹; 塚本 祐介¹; 犬塚 修一郎¹
FUJII, Yuri^{1*}; IWASAKI, Kazunari¹; TSUKAMOTO, Yusuke¹; INUTSUKA, Shu-ichiro¹

¹ 名古屋大学
¹ Nagoya University

系外惑星の多数発見に伴い、中心星のごく近傍を回転する惑星が数多く存在することが明らかにされてきた。これらの惑星の多くは円盤の外側で形成され、円盤と惑星との相互作用で角運動量を失い、内側へと移動してきたと考えられている。惑星が円盤内縁まで移動してくると、円盤ガスとの相互作用がなくなるのでそれ以上落下せずに、円盤近傍にとどまることができる。この惑星は円盤の進化に大きな影響を与える。よって、本研究では円盤内縁の近傍の惑星が円盤に与える影響を解明するためのコード開発を行う。中心に空隙がある場合や、惑星が楕円率の大きい軌道を持っている場合には従来用いられてきた格子法を用いた手法では計算が困難である。しかし、SPH法を用いることでこれらを取り扱うことができると期待される。この問題の解決には、SPH法の精度を上げることが本質的である。本講演では、コード開発の詳細と性能評価について発表する。

キーワード: 系外惑星, 原始惑星系円盤, SPH 法
Keywords: exoplanet, protoplanetary disk, smoothed particle hydrodynamics

原始惑星系円盤進化にともなう微惑星組成進化 Evolution of a protoplanetary disk and chemical composition of planetesimals

永原 裕子^{1*}; 小澤 一仁¹
NAGAHARA, Hiroko^{1*}; OZAWA, Kazuhito¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

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

We investigate physico-chemical evolution of the proto-solar disk at the early stage by developing a new model that combines physics and chemistry with special interest to temporal and spatial evolution of the disk. Then, we discuss how the composition of planetesimals varies depending on the time and space for their formation including refractory or volatile rich ones.

The basic of the model is a radial advection-diffusion equation, which includes drift and dispersion by turbulence with stochastic diffusion term calculated by the Monte Carlo method and which shows the diffusivity by the viscosity of the disk. The difference from conventional disk models is that the present method stands on the Lagrangean differentiation, and it is able to trace the movement of individual particles.

A considerable amount of materials in the inner regions are transported outward at the early stage ($t < 10^5$ yrs), which is because the surface density is much larger in the inner region at the early stage of the disk evolution. Although the outward flux is large at the early stage, there comes a larger amount of materials from the outer region even within $\sim 10^5$ yrs. The mixing ratio of materials from the inner regions to outer regions is almost unity within several AU all through the disk evolution, suggesting that thermally processed materials and unprocessed materials were mixed in the inner region of the disk. It is important that the relative abundance of materials from outer regions becomes larger with time, which implies that planetesimals formed within several AU at the early stage of the disk evolution consists partly of materials initially located at the inner regions and partly from outer regions, but those formed at the later stage contain more abundant low materials transported from the outer regions.

The mixing ratio of materials from the inner and outer regions is almost unity at the early stage but the fraction of materials from the outer regions increases with time. Combining the information about the maximum temperature that the particles experienced, we can constrain that early differentiated planetesimals such as the parent body of angrites and planetesimals with refractory-rich compositions such as CV chondrites were formed at the inner region of the disk in $\sim 10^5$ yrs. On the other hand, planetesimals for other carbonaceous chondrites or ordinary chondrites that are depleted in sulfur were formed later, possibly at $\sim 10^6$ yrs.

キーワード: 原始惑星系円盤, 化学進化, ダスト移動

Keywords: protoplanetary disk, chemical evolution, dust movement

静電反発を考慮したダスト合体成長の大局的数値計算法 Simulating global dust coagulation with grain charging

奥住 聡^{1*}; 田中 秀和²
OKUZUMI, Satoshi^{1*}; TANAKA, Hidekazu²

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科, ² 北海道大学低温科学研究所

¹Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Growth of dust particles by collisions is the initial step of planet formation. Conventionally, the theory of dust coagulation in protoplanetary disks assumed electrically neutral dust particles, but in reality dust in the disks is likely to be charged given that the disks are ionized by cosmic rays and stellar X-rays. In our previous work (Okuzumi 2009; Okuzumi et al. 2011a,b), we extensively studied the role of grain charging in protoplanetary dust growth, and concluded that dust growth stalls at its early stage because of the excessively large (negative) charges carried by small dust aggregates. We also predicted that this "charge barrier" could be overcome (albeit on a very long timescale) if dust in the disks is globally transported by radial drift and turbulent diffusion.

The purpose of the present work is to demonstrate the breakthrough of the charge barrier in a global setup. In order to do this, we have developed a new simulation code for global dust coagulation including the effect of grain charging. The new code is based on a previous code for planetesimal formation (Brauer et al. 2008; Okuzumi et al. 2012) but now calculates charging and Coulomb repulsion of dust particles at each location in a disk consistently with the particle size distribution at the same location. To verify the code, we perform some test simulations and compare them with the prediction from our previous theory.

キーワード: ダスト, 帯電, 惑星形成, 原始惑星系円盤

Keywords: dust, charging, planet formation, protoplanetary disk

潮汐場におけるラブルパイル天体の衝突 N 体シミュレーション N-body simulations of Rubble pile Collisions in Tidal fields

兵頭 龍樹^{1*}; 大槻 圭史¹
HYODO, Ryuki^{1*}; OHTSUKI, Keiji¹

¹ 神戸大学理学研究科

¹Kobe University, Graduate School of Science

土星の F リングなどは中心惑星のロッシュ半径の外側ではあるが、中心惑星に比較的近い領域であるため中心惑星の潮汐力の効果が無視できない領域に位置している。一方、カッシーニによる観測結果から F リングにはリング粒子が自己重力で集積したアグリゲイトが多数存在していると示唆されている。さらに形成されたアグリゲイトは潮汐力で中心惑星方向に引き延ばされて、球体ではなく楕円体として存在していると考えられる。潮汐場を無視した自由空間における天体同士の衝突については小惑星や微惑星の破壊プロセスとして多くの先行研究で扱われてきた。一般的にこれらの衝突では head-on 衝突において破壊は衝突エネルギーによって構成物質が重力的に散乱されることでおこる。つまり、衝突エネルギーの増加に伴って最大破片サイズは小さくなる傾向にある。しかし、中心惑星に近く潮汐力が強く効いてくる領域ではアグリゲイト自身の体積と重力ポテンシャルの大きさが同等のものとなってくる。このような状況におけるアグリゲイト同士の衝突は自由空間のものとは異なったものとなりうると予想される。

本研究では粒子間の相互重力と衝突を考慮して潮汐場を再現する系における局所 N 体計算を用いて楕円体アグリゲイト同士の衝突シミュレーションを行ない、破壊条件が中心惑星からの距離にどのように依存するかを調べた。衝突方向としては動径方向と軌道運動方向の二通りを考慮し、衝突速度をパラメーターとした。

本研究によってロッシュ半径のすぐ外側の潮汐力が強く作用する領域では、動径方向の衝突よりも軌道運動方向の衝突の方がはるかに壊れやすいことが分かった。さらに動径方向の衝突においては自由空間の場合のように衝突エネルギーの増加によって最大破片サイズが律せられる結果にはならず、より複雑な速度依存性がみられた。そして、これらの領域では、自由空間において従来合体するだろうと考えられていた脱出速度よりもはるかに小さい速度で衝突した場合でも破壊につながるということが分かった。このことから潮汐力が卓越する領域におけるアグリゲイト同士の衝突において、その破壊プロセスを議論する際に衝突エネルギーだけでなく、衝突直後のアグリゲイトの形状も重要となることが分かった。また、中心惑星からより遠ざかるにつれて潮汐場の効果は小さくなることで、衝突結果は自由空間で得られるものに近づいていくことを確認した。

以上の結果は、the Astrophysical Journal に投稿済みである。

キーワード: リング, 衛星, アグリゲイト

Keywords: rings, satellites, aggregates

微惑星衝突における衝突破壊モデルの再検討 An improved fragmentation model on outcome of planetesimal collisions

藤田 智明¹; 玄田 英典^{2*}; 小林 浩³; 田中 秀和⁴; 阿部 豊¹

FUJITA, Tomoaki¹; GENDA, Hidenori^{2*}; KOBAYASHI, Hiroshi³; TANAKA, Hidekazu⁴; ABE, Yutaka¹

¹ 東京大学 理学系研究科, ² 東京工業大学 地球生命研究所, ³ 名古屋大学 理学研究科, ⁴ 北海道大学 低温科学研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology,

³Department of Physics, Nagoya University, ⁴Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

惑星形成過程において、微惑星同士または微惑星と原始惑星の衝突は頻繁に起こり、そのような衝突を経て天体は成長する。ところが、そのような衝突には破壊的な衝突も含まれており、それらは成長を促すどころか天体を粉々にしてしまう。すなわち、そのような衝突がどの程度破壊的であったかを知ることは、微惑星の成長過程を正しく理解する上で重要である。

これまでに、衝突前の質量の半分が飛び散ってしまうような破壊的な衝突を引き起こす衝突エネルギー Q_D^* は様々な条件で調べられており (Holsapple et al., 2002; Benz & Asphaug, 1999; Leinhardt & Stewart, 2009)、惑星形成を論じる際にはそのような破壊的な衝突のみが重要視されてきた。 Q_D^* の値で現在広く引用されているのが、Benz & Asphaug 1999 によって計算されたものである。彼らは非常に多くの衝突シミュレーションにより Q_D^* を決定しているが、彼らの数値シミュレーションにおける解像度は極めて低く、 Q_D^* の値が収束する解像度も調べていない。また、最近の研究によると、衝突エネルギーが Q_D^* よりも小さいような小規模な衝突も、そのような衝突は頻度が多いため、惑星の成長を考える上で重要であることが示唆された。ところが、そのような小規模な衝突から大規模衝突をつなぐ信頼できるモデルも存在していない。

惑星の成長をより正確に議論するためには、正しい Q_D^* の値と、小規模衝突における、衝突エネルギーとその際に飛び散るイジェクタ質量との関係が必要となる。本研究では、衝突シミュレーションにより、 Q_D^* の解像度依存性を調べ、微惑星衝突における Q_D^* の値を再調査した。また、小規模衝突における衝突エネルギーとイジェクタ質量の関係性を定式化した。本研究では、SPH法(自己重力入り、物質強度抜き)と呼ばれる流体計算コードにより、岩石微惑星同士の衝突シミュレーションを系統的に行った。衝突条件としては、100km、10kmサイズのターゲット天体と様々なサイズの天体の衝突を考え、衝突速度、衝突角度、解像度を様々に変えて計算した。

その結果、 Q_D^* の値は解像度に依存することがわかった。これは衝突後の衝撃波、希薄波伝播及び破片放出過程で発生するシア一流により、初期エネルギーの、ターゲット天体の運動エネルギーと内部エネルギーへのエネルギー分配率が解像度依存性を持つことに由来する。このエネルギー分配率は 7.5×10^7 粒子数を費やしたところで収束する。Benz & Asphaug 1999 で使われていた粒子数は 5×10^4 であり、正しい Q_D^* の値を求めるには不十分であることがわかった。本研究では、可能な限り高解像度で Q_D^* を求めたのだが、その値は彼らの値よりも半桁ほど小さくなった。これは微惑星同士の衝突がこれまで考えられてきたよりも破壊的であったことを意味する。実際に本研究と彼らの Q_D^* の値を使って、Kobayashi et al. 2010 で提案された解析解により原始惑星の成長を見積もったところ、最終的に形成される原始惑星質量は、先行研究の値を用いた場合よりも半分ほど小さくなった。

また、小規模な衝突を含めた様々な規模の衝突に対する衝突エネルギーと破片質量の関係性をスケーリング則として定式化した。このスケーリング則は、ターゲットサイズ、 Q_D^* で規格化した衝突エネルギー、衝突速度でスケーリングできることもわかった。しかし、衝突角度には依存し、異なる式が得られた。今回得られた Q_D^* とスケーリング則を Kobayashi et al. 2010 で提案された解析解に与えたところ、最終原始惑星質量は 1 AU で 0.058 地球質量、5 AU で 0.17 地球質量、という結果が得られた。

iSALE shock physics code を用いた衝突計算 Numerical modeling of impact phenomena using iSALE shock physics code

黒澤 耕介^{1*}; 千秋 博紀¹; 和田 浩二¹; 三上 峻²; 平田 成³; 鎌田 俊一²; 石原 吉明⁴; 玄田 英典⁵; 中村 昭子⁶; 高田 淑子⁷

KUROSAWA, Kosuke^{1*}; SENSHU, Hiroki¹; WADA, Koji¹; MIKAMI, Takashi²; HIRATA, Naru³; KAMATA, Shunichi²; ISHIHARA, Yoshiaki⁴; GENDA, Hidenori⁵; NAKAMURA, Akiko⁶; TAKATA, Toshiko⁷

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² 北海道大学 大学院 理学院 宇宙理学専攻, ³ 会津大学 コンピュータ理工学部, ⁴ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ⁵ 東京工業大学 地球生命研究所, ⁶ 神戸大学 大学院理学研究科, ⁷ 宮城教育大学 理科教育講座

¹PERC, Chitech, ²Dept. of CosmoSciences, Hokkaido Univ., ³Dept. of Computer Sci. & Eng., The University of Aizu, ⁴ISAS, JAXA, ⁵ELSI, Titech, ⁶Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ⁷Division of Science Education, Miyagi University of Education

iSALE [impact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)] は惑星科学研究者に対して公開されている衝突流体計算コードである。特に惑星科学研究用に特化したオプション、初心者でも解析が可能な描画ソフトがパッケージとして配布されており、すでに多くの欧米の研究者が使いはじめている。これまで日本の惑星科学衝突コミュニティでは扱えるものが皆無であった ANEOS や物質強度の効果を取り入れた衝突計算を手軽に走らせることができることは大きな利点である。我々は日本の惑星科学コミュニティでも iSALE を自由に扱える環境を作るために「iSALE users group in Japan」という活動を開始した。まだまだ整備途中であるが、情報をまとめた wiki ページとメーリングリストを立ち上げている。発表では様々なテスト計算の例を紹介する。

iSALE users group in Japan のウィキページ
<https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/>

Mailing list
isale-users-jp@perc.it-chiba.ac.jp

謝辞

iSALE の開発者である Gareth Collins 博士, Kai Wünnemann 博士, Boris Ivanov 博士, Jay Melosh 博士, Dirk Elbeshausen 博士に感謝致します。

キーワード: 高速衝突, 数値流体計算, 状態方程式, 強度モデル, iSALE

Keywords: Hypervelocity impacts, Shock physics code, Hydrocode calculation, Equations of state, strength model, iSALE

氷天体用ペネトレータ貫入ダイナミクスの基礎特性に関する研究 Study on fundamental characteristics of penetration dynamics into icy target

難波 和也^{1*}; 鈴木 宏二郎²

NAMBA, Kazuya^{1*}; SUZUKI, Kojiro²

¹ 東京大学大学院工学系研究科, ² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Grad. Sch. Eng., The University of Tokyo, ² GSFS, The University of Tokyo

天体の固体表面に高速でハードランディングし、天体の内部を直接観測することを目的としたペネトレータと呼ばれる探査機は、将来の惑星探査において重要な役割を果たすと考えられる。通常のランダーに比べて着陸用燃料が少なく、低質量ゆえに一度に複数の機体の打ち上げが可能である点などで優位性を持つが、機体にかかる衝撃が大きく、現在までミッションを達成した例は存在しない。一方、彗星核やエウロパに代表される氷天体には、生命の前駆物質となる有機物が存在する可能性が高く、将来的な探査対象として重要である。ここで、氷天体に貫入し、宇宙線による汚染を受けていない地下のサンプルを直接観測する「氷ペネトレータ」の有用性は非常に高いといえる。ペネトレータの先行例としては、実機が製作された LUNAR-A などがあるが、氷ペネトレータに限ると NASA の CRAF 構想 (Adams et al., NASA CR-177393, 1986) のみに限られ、貫入のダイナミクスに関する工学的研究は少ない。そのため、本研究ではバリスティックレンジを用いた針状物体の H₂O 氷への貫入実験を行い、基礎特性に関する研究を行った。

実験には、本研究室が所有するバリスティックレンジを使用した。飛翔体は加速用サボと共に圧縮空気により重力方向に水平に加速され、測定室内でサボから分離し、速度方向に垂直になるよう設置されたターゲットに衝突する。衝突速度は 100-300[m/s] の間で変化させた。飛翔体として、針状飛翔体 (鉄製、寸法 $\phi 2.45 \times 45$ [mm], 重量 1.71[g]) と鈍頭円錐状飛翔体 (真鍮製、寸法 $\phi 8.4 \times 15$ [mm], 重量 2.33[g]) を使用した。ターゲットには、純氷 (寸法 270x175x130[mm], 質量 5.5[kg], 密度 0.90[g/cm³], 空隙率 3[%]) と水道水を凍らせて作った低純度氷 (寸法 155x120x100[mm], 質量 1.5[kg], 密度 0.75[g/cm³], 空隙率 19[%])、また比較のために油粘土 (寸法 155x120x70[mm], 質量 2.2[kg], 密度 1.7[g/cm³]) を使用した。衝突の様子はハイスピードカメラ (フレームレート 2200-8800[fps], 露光時間 15[μ s]) を用いて記録し、飛翔体の姿勢と衝突時の貫入・クレータ形成の様子を観測した。

H₂O 氷に飛翔体が衝突したとき、衝突直後においてコーン状のイジェクタ噴出が発生した後、ターゲットからほぼ垂直方向に集中したジェット状イジェクタ噴出が発生することがわかった。この噴出は 100[ms] 以上にわたる長期間のもので、粘土への貫入における数ミリ秒程度の短いコーン状の噴出とは対照的な結果となった。また、貫入により破壊された氷の大部分が噴出されるため、粘土への貫入の際に発生するような、飛翔体が周りの物質に締め付けられて固定される現象が起こらず、イジェクタと一緒に押し出されてしまう傾向があることが確認できた。飛翔体がターゲットから完全に離脱した後も衝撃波のもたらす破壊によるイジェクタ噴出は続いていた。この傾向は体積に対する衝突断面積が大きい機体において強く見られた。迎角がついた場合での貫入においても、細長形状の方が貫入を保つケースが多く見られた。そのため、貫入ミッション達成には細長形状の方が有利に働く可能性が高いことが考えられる。貫入後のクレータ形状は、中央の貫入部近傍のピット領域、その周辺の浅くなだらかなスポール領域、ターゲットの広範囲に延びるクラックからなり、氷への弾丸形状の衝突における先行研究 (e.g. Kato et al., Icarus 113(2) 423-441, 1995., Arakawa, Low Temperature Science 66 113-121, 2008) と定性的に一致している。衝突点で発生する圧力を一次元的近似である平板衝突近似 (Wada, JSIAM 16(4) 19-31, 2006) により見積もった結果、H₂O 氷のユゴニオ弾性限界圧力を大きく超えており、衝突点近傍で氷は剪断強度を喪失し、流体として振る舞うことが推測できる。

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B)No.25289301) の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

キーワード: 氷天体, ペネトレータ, クレータ, バリスティックレンジ

Keywords: icy object, penetrator, crater, ballistic range

遠心加速装置を用いた粉体層圧密過程の実験的研究 Experimental study of compaction process of powder bed by centrifuge experiment

大村 知美^{1*}; 木内 真人¹; Guettler Carsten²; 中村 昭子¹
OMURA, Tomomi^{1*}; KIUCHI, Masato¹; GUETTLER, Carsten²; NAKAMURA, Akiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

微惑星の集積においては、衝突時の圧力、周辺のガスによる圧力、自己重力によって空隙率が変化する (Kataoka et al., 2013)。小惑星などの再集積過程においても、衝突時の圧力や自己重力によってラブルパイル天体やレゴリス層の空隙率が支配されると考えられる。

地上で粉粒体を降り積もらせたときの空隙率と粒子半径の関係は、次のように書かれる (Yu et al., 2003; Kiuchi and Nakamura, 2014)。

$$p = p_0 + (1 - p_0) \exp\{-mR_F^{-n}\} \quad (1)$$

ここで R_F は粒子間に働く固着力と粒子にかかる重力の比で、粒子半径の関数である。 p_0 、 m 、 n は定数で、 p_0 は粒子間力が存在しない場合の空隙率である。

(1) 式が異なる重力下でも成り立つかどうかは確かめられていない。また、(1) 式は表面粒子の空隙率についてのもので、天体内部にどの程度適用可能かはわかっていない。すなわち、すでに積もっている粒子の空隙率が新しく粒子が降り積もることによりどのように変化するかはわかっていない。仮に (1) 式がすでに積もっている粒子にも適用できるとすれば、かける重力を大きくしていくことで R_F を小さくしたときの空隙率も (1) 式から得られる値に一致すると考えられる。そこで本研究では、重力加速度を変化させる実験を行い、その結果と (1) 式の比較を行う。

実験試料には全体の 60% が粒子直径 7.5-80 μm の粒子からなる海砂と、全体の 60% が 1-8 μm の粒子からなるフライアッシュを用いた。これらを直径 5.8 cm、深さ 3 cm のプラスチック製円筒形容器にふり入れ、カップからはみでた表面を水平にすり切り、それぞれ空隙率およそ 60%、70% にしたものを用いた。これに遠心加速装置を用いて 1-18 G の模擬重力をかけ、その時の圧縮の様子を装置に取り付けたカメラで観察した。一方向からピストンで圧縮する場合はかかる圧力に偏りが出てしまうが、遠心加速器を用いた場合、容器内にかかる圧力を一様にするという利点がある (Mizuno et al., 1991)。模擬重力を印加した後に表面高さ変化を測定し、実験前後での空隙率の変化を調べた。表面高さの測定にはレーザー測距計を用いた。

実験の結果空隙率は、粉体の粒子直径がそれぞれ累積分布の中央値である 24 μm (海砂)、4.5 μm (フライアッシュ) であると仮定した場合の (1) 式とは、それぞれ空隙率 6% 以内、5% 以内で一致し、経験式と大きな矛盾はないことが分かった。海砂に注目すると、この粒子直径 24 μm というのは、海砂の大きな粒の周りに付着している小さな粒の大きさに近い。

キーワード: 微惑星, 小惑星, 空隙率, 高重力, 粉粒体

Keywords: planetesimal, asteroid, porosity, high gravity, powder and granular material

氷衛星表面を模擬した氷・砂混合物に対するクレーター形成実験 High velocity impact cratering experiments on ice-sand mixture simulating the surface of icy satellites

高野 翔太^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ²
TAKANO, Shota^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹ Graduate School of Science, Kobe University, ² Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：氷衛星、火星凍土、小惑星ケレスの地殻などは氷と岩石粒子の混合物からなると言われており、特に小惑星ケレスは、NASAの小惑星探査機Dawnが2015年に到着して観測が行われる予定である。このケレスは、小惑星帯のメインベルトにあるので、その氷地殻には、様々なタイプの小惑星が衝突してクレーターを作る。衝突クレーターのサイズや形状は、衝突物質や地殻の種類、さらに衝突速度や地殻の内部構造により大きく変化する。そこで、ケレス表面のクレーターを調査することにより、衝突した小惑星の種類やその頻度、または、ケレス地殻の岩石含有率や内部構造などに関する情報を得ることができる。このような調査を実現するには、室内実験での十分な準備が必要である。すなわち、氷や氷・岩石粒子混合物、さらには内部構造を持つ表面に形成されるクレーターの特徴を明らかにする必要がある。加えて、それらの特徴が衝突物質の種類によりどのような影響を受けるかを詳細に調べる必要がある。

これまでクレーター形成効率に関する系統的な実験は主に純氷標的でのみ行われてきた。純氷に関しては0.1km/sから7km/sまでの広い範囲で、数種類の弾丸を用いたクレーター形成実験が行われている。しかしながら、氷・岩石粒子混合物試料に対しては限られた条件でしか実験は行われてきていない。特に小惑星帯におけるケレスの氷地殻への衝突を考えると衝突速度4km/s以上での高速衝突実験を実現する必要があるが、その例は少ない。そこで本研究では1km/sを超える高速度領域で、広い密度と強度範囲を持つ数種類の弾丸を用いて氷・岩石粒子混合物試料へのクレーター形成実験を行った。そして、クレーター形状やクレーター形成効率が純氷と比べてどのように変化するのかを調べることにした。

実験方法：実験は2013年度から新しく稼働し始めた神戸大学の二段式水素ガス銃を用いて行った。ケレス地殻を模擬した氷・岩石粒子標的試料は、粒径500 μ mの石英砂と水を質量比80~83wt%になるように混ぜて準備した。その混合物を直径15cm・高さ5~10cmの円筒金属容器に入れ、-23から-15 $^{\circ}$ Cの冷凍庫で凍らせて作製した。弾丸には、直径2mmのアルミ球、ジルコニア球、チタン球を用いた。それぞれの密度は、2.7g/cm³, 5g/cm³, 5.7g/cm³である。これらの弾丸をナイロン製のサポに装填して速度1.6~5.1km/sで発射した。標的試料は、衝突直前に衝突チャンバー内に設置し、真空引きを行い周囲と断熱する。実験時のチャンバー内の圧力は200~230Paの範囲内である。クレーター形成過程はイメージコンバーターカメラにより5 μ s毎に18回撮影した。この撮影画像から、衝突時のイジェクタ形状やその成長速度を調べて純氷との比較を行った。実験後は、試料に残されたクレーターの形状をノギスにより計測した。

実験結果：今回の実験から氷・岩石粒子混合試料では純氷試料と比べてSpallationが、どの弾丸、速度においても起きにくいことがわかった。このSpallに関する特徴から、深さ直径比の速度依存性・弾丸密度依存性も純氷試料とは異なる。クレーター直径は衝突エネルギーが同じ場合、氷・岩石粒子混合試料では純氷試料の約半分となることがわかった。Hiraoka et al (2004)では、氷・岩石混合物の岩石含有率を変えながら、ほぼ一定の弾丸エネルギーでクレーター形成実験を行った。この衝突実験と我々の実験結果と比較し、クレーター直径に関する特徴を調べることにする。結果、Hiraokaたちが行っていない高い含有率80wt%のデータは、彼らの含有率50%のデータとほぼ一致し、50%までの直径減少傾向が、80wt%までは続かないことを明らかにした。その結果、80~100wt%の間で急激にクレーターが小さくなることが予想される。これは、0~80wt%においては氷が強度を支配しているのに対して80~100wt%では岩石自身が強度を支配するようになるからだと考えられる。また、Housen and Holsapple (2012)で提案されたクレータースケール則を用いて氷・岩石粒子混合試料に対する無次元パラメーター π_R と π_Y の関係を求めた。80wt%岩石粒子試料の動的引張り強度は測定されていないので、30wt%の混合物試料の強度の値を用いた。この場合、 π_R と π_Y の関係は氷の場合と大きく異なった。そこで80wt%岩石粒子混合試料の強度を、例えば100MPaにして、再度関係を求めてみると純氷の関係とほぼ一致するようになった。もしこれが正しいとすると80wt%の岩石粒子混合試料の動的引張り強度は純氷の強度の6倍近くになることがわかった。

キーワード: 氷衛星, 氷・砂混合物, 衝突クレーター, 高速度衝突実験

Keywords: icy satellites, ice-sand mixture, impact crater, high velocity impact experiments

砂を伝播する衝突励起応力の減衰過程に関する実験的研究 Experimental study on the decay process of impact-induced stress propagating through granular materials

松榮 一真^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ²
MATSUE, Kazuma^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹ Graduate School of Science, Kobe University, ² Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに: 衝突現象は惑星形成において最も重要な物理過程の一つであり, 太陽系内の固体天体にはその証拠として衝突クレーターが数多く存在する. 衝突クレーターのサイズは, 衝突天体のサイズ・物性・衝突条件, それに天体表面の構造や物性により変化する. 従って, クレーターの調査から衝突天体の物性や衝突条件に関する情報が得られる. km サイズを超えるクレーターでは, その形成過程は重力により支配されていると言われており, そのため粉粒体へのクレーター形成実験が今までに多く行われている. その結果, 重力支配域でも粉粒体の種類によってクレーターサイズが異なることが知られている. 一方, 最近の惑星探査では微小惑星の表面もレゴリス層で覆われていることがわかってきた. はやぶさ2の小型搭載型衝突装置(SCI)による衝突のような重力の小さな微小惑星のレゴリス層へのクレーター形成過程を予測するには, 粉粒体の物性がクレーター形成過程にどのように影響を与えているのかを解明する必要がある. 特に重力支配域においてはクレーターの掘削流がクレーターサイズを決める物理過程と考えられているので, 粉粒体の物性と掘削流の関係を明らかにする必要がある. そこで本研究では, 衝突時の掘削流の特徴を定量化するため, 粉粒体中を伝播する応力波を計測することにした. そして, この応力波の伝播・減衰が, クレーターサイズや粉粒体の物性とのような関係にあるかを調べることにした.

実験方法: クレーター形成時の応力波を測定できるように試料容器を準備した. 容器は, 大きさが10cm×10cm×10cmのアルミ製で, 粉粒体の厚みを1-10cmと変化させた. 計測に用いた圧力計は, 定格容量20kPa, 固有振動数約2kHzの歪ゲージ式センサーで, このセンサーを衝突点直下の底面に取り付けた. 実験は自由落下・神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った. それぞれ実験では, 応力波形状とクレーターサイズの弾丸サイズ依存性・衝突速度依存性を調べた. 縦型銃の実験は大気圧下で行ったが, 加速用のガスが試料に直接当たらないようにサボと風除けを用いた. 標的試料には形状や表面荒さが異なる4種類の試料を準備した. それらは, ガラスビーズと石英砂であり, それぞれ粒径100,500 μ mを実験に用いた. 弾丸は自由落下の実験ではガラス球(直径7.75,10,15mm), ガス銃の実験はナイロン・アルミナ(直径3mm)を用いた. 衝突速度は自由落下では2-5.5m/s, ガス銃では60-70m/sと変化させた. それぞれの衝突実験において, クレーターサイズと圧力波形を観測した.

結果: クレーターサイズと弾丸運動エネルギーの関係は標的の種類により異なることがわかった. 特に, 100 μ mの石英砂では, 相対的に小さなクレーターしかできなかった. この理由を調べるため圧力波形の特徴を調べた. 自由落下実験による圧力波形は, 急激に圧力が増加し, 最大圧力に達した後に減少するが, ガラスビーズでは緩やかに減少し, 石英砂の場合は急激に減少した. 特に, 100 μ m石英砂では圧力計の固有振動が見られ, その圧力波形の持続時間が0.5ms以下であることを示唆している.

縦型銃の実験による圧力波形は, 石英砂の場合は自由落下の場合とほぼ同じ波形であったが, ガラスビーズの場合は砂の深さによって波形が異なった. 深さが深い場合は(5-10cm), 自由落下の場合と同じ形状だが, 浅くなると(-5cm)石英砂の波形の様に固有振動を示す波形となった. また, 速度が大きくなるとすべての波形に圧力計の固有振動が見られた. これらの圧力波形を最大圧力に達して以降 $P(t)-P(\infty)=A \exp(-t/\tau)$ (τ :緩和時間, A :定数)と指数関数的に減衰すると仮定して緩和時間を求めた. その結果, τ はガラスビーズでは 10^{-3} s, 石英砂では 10^{-4} sとなり, τ は砂の種類毎に変化する値であることがわかった. また, 圧力 P と伝播距離 r の関係は次のような式で表すことができる: $P(r)=P_0(r/L)^{-b}$ (P_0 :初期発生圧力, L :弾丸半径, b :減衰パラメータ). 減衰率 b は, 自由落下の実験では, -0.79(ガラスビーズ), -0.94(石英砂), ガス銃の実験では, -1.61(ガラスビーズ), -1.71(石英砂)となり衝突速度によって距離の減衰率が異なる結果となった.

自由落下の実験におけるクレーターサイズと深さ4cmで計測した最大圧力 P の関係を調べると砂の種類毎に大きく関係が異なることがわかった. 一方, この圧力とその緩和時間 τ の積から算出した力積 I との関係を調べると, 砂の種類によらず一つの直線でフィッティングすることができた. これは, 緩和時間 τ がクレーター形成効率の物性依存性を表す物理量であることを示唆している. 今後, この緩和時間が砂のどのような物性値と関係し, 物理状態により変化するか調べたい.

キーワード: 掘削流, 粉粒体, クレーター形成過程

PPS21-P15

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 29 日 18:15-19:30

Keywords: Excavation flow, Granular material, Cratering process

氷・岩石微惑星の衝突破壊に関する実験的研究：同サイズ天体の衝突破壊に対する衝突角度の影響 Effects of impact angles on the impact strength of icy and rocky planetesimals for the collision among equal size bodies

河本 泰成¹; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ^{2*}
KOMOTO, Yasunari¹; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami^{2*}

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：これまで数多く微惑星に関する衝突破壊実験が行われてきたが、そのほとんどは弾丸と標的の質量差が大きなものばかりであった。天体の衝突破壊強度は、おおまに言えばエネルギー密度（弾丸の運動エネルギー/弾丸と標的の質量）で表すことができるので、弾丸が標的に比べて小さい場合、一般には非常に早い速度でなくては衝突破壊は生じない。一方、微惑星の初期集積過程では、その相対衝突速度は数10 m程度であったと考えられているので、そのような低速では衝突破壊はほとんど起こらないことになる。しかしながら、初期集積過程では、微惑星間に大きなサイズ差がない状態で成長が起きたと考えられているので、同サイズ衝突での衝突破壊強度が重要となる。特に同サイズ衝突では、衝突破壊に必要な最低衝突速度を求めることができる。逆に言えば、この最低速度以下での衝突では、弾丸・質量比によらず微惑星の破壊は絶対に起こらないため、集積過程を議論する上で非常に重要な速度といえる。これまでは数10倍以上の質量差を持った弾丸・標的系での実験結果を同サイズ標的に外挿して用いてきたが、同サイズ衝突では衝突破壊のスケール則で良く用いられる衝撃波伝播の点源近似や終段階等価性が成り立つのは難しい。従って、同サイズ試料を用いた衝突実験により、実際の衝突破壊強度を求める必要がある。本研究では、氷、石膏、ガラスビーズ混合石膏を用いて同サイズ試料を用いた衝突実験を行った。これらの試料は、氷微惑星、コンドライト隕石母天体の微惑星を模擬している。さらに、正面衝突だけでなく衝突破壊に対する衝突角度依存性も調べた。

実験方法：氷、ガラスビーズ混合石膏、そして石膏を用いて直径25mmと30mmの球形試料を作成した。それぞれの試料は型に溶液を流し込むことにより作成した。衝突実験には、その速度に応じて3種類の装置を用いた。それらは、バネ銃（低速度用）、縦型ガス銃（氷用）、横型ガス銃（石膏用）である。なお、衝突速度は4~160m/sとした。また、衝突点を試料の中心からずらすことにより斜め衝突実験も行った。この時の角度は0（正面衝突）から80°（ほぼすれ違い衝突）とした。実験の様子は高速ビデオカメラで観測し、実験後の衝突破片はすべて回収して質量分布を計測した。さらに、回収破片とビデオ上で確認できる破片をできるだけ同定することにより、速度・破片質量分布も調べた。

結果：同サイズ試料衝突の場合のエネルギー密度は、換算質量を用いた系の運動エネルギーにより定義することにした。この重心系での運動エネルギーを用いたエネルギー密度を用いて衝突破壊強度 Q^* を求めると氷、石膏試料では、質量比が10倍以上異なる衝突実験で得られた値とほぼ同じ値を示した。一方、ビーズ入り石膏試料では質量差10倍以上の衝突実験より小さい値となった。これは、破壊様式が同サイズ試料衝突では点源近似が成り立つ衝突とは大きく異なるからだと思われる。斜め衝突では、角度が大きくなるにつれて最大破片は小さくなっていった。そこで、衝突速度の法線方向の速度成分だけを使ったエネルギー密度を用いてデータを整理するとほぼすべてのデータは、それぞれの試料で一つの直線に乗ることがわかった。また、計測した破片速度から再集積条件を見積もった。その結果、氷微惑星は直径20kmより大きな天体ならば破片は再集積し、普通コンドライト母天体を形成した微惑星は直径5.2kmより大きな天体ならば再集積することがわかった。そして、コンドリュールを含まない多孔質岩石微惑星は直径6.7kmより大きければ再集積することがわかった。

キーワード: 微惑星, 斜め衝突, 衝突破壊強度, エネルギー分配, 再集積

Keywords: Planetesimals, Oblique impact, Impact strength, Energy partition, Re-accretion

多孔質物質の動的圧密実験：微惑星前駆天体の衝突圧密への応用 Dynamic compaction experiments of porous materials: Implications for impact compaction of pre-planetesimals

保井 みなみ^{1*}; 横田 みずき²; 坂本 花菜²; 荒川 政彦³

YASUI, Minami^{1*}; YOKOTA, Mizuki²; SAKAMOTO, Kana²; ARAKAWA, Masahiko³

¹ 神戸大学自然科学系先端融合研究環, ² 神戸大学理学部地球惑星科学科, ³ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
¹Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ²Faculty of Science, Kobe University, ³Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：微惑星形成過程において、cm サイズから km サイズ（微惑星前駆天体と呼ぶ）への成長メカニズムは、2つの説が提唱されている。1つは、赤道面に沈殿、濃縮したダストアグリゲイトが自己重力によって分裂・収縮し、微惑星を形成すると唱えた重力不安定説、もう1つは、衝突合体を繰り返してダストアグリゲイトから微惑星へと成長すると唱えた直接合体成長説である。本研究では、直接合体成長説に着目する。この説では、微惑星前駆天体同士が衝突を繰り返すことで内部密度が上昇し、その後の衝突で反発や衝突破壊が起こり、合体成長が妨害されるという問題点がある。そこで、衝突によって変化する微惑星前駆天体の最終密度分布を調べたのが坂本（2013、卒論）である。坂本は高空隙の雪にステンレス円柱を自由落下させる衝突圧密実験を行い、衝突時の衝突応力と圧密分布、圧密領域の大きさの関係を明らかにした。しかし、坂本の研究では衝突速度が0.7~3.5m/sと微惑星前駆天体の比較的小さい平均衝突速度範囲で実験を行っている。そこで本研究では、微惑星前駆天体の圧密メカニズム、衝突応力、圧密分布を調べるため、5m/s以上の速度範囲での多孔質物質の衝突圧密実験を行った。

実験方法：標的には、岩石および氷微惑星前駆天体を模擬したパーライトと雪を用いた。雪の初期空隙率は70、80%、パーライトの初期密度は85kg/m³である。雪の衝突実験は北大低温研の低温室（-10℃）、パーライトの実験は神戸大で行い、横型一段式軽ガス銃及び縦型一段式軽ガス銃を使用した。雪の実験は縦型銃のみを使用した。アクリル筒内に液体窒素内に噴霧して作成した氷粒子（40~200μm）、または市販のパーライト粒子（2.2~3.4mm）を深さ12cmになるように入れ、2cm間隔で染色した氷粒子またはパーライトで境界を5層作り、深さに伴う密度変化を観察出来るようにした。このアクリル筒内の標的の上にピストンを設置し、弾丸でピストンを加速させて標的を圧密した。弾丸は、横型銃では直径25mmの弾性ボールを用い、縦型銃では直径30mmの円筒サボを取り付けた弾性ボールを用いた。ピストンは、直径30mm、高さ10~30mmのポリカーボネイト、アルミ、ポリアセタール円盤を用いて、ピストンによる圧密の違いを調べた。弾丸の衝突速度は2~118m/sである。衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影し、撮影速度は6000~10000fps、露出時間は20~100μsとした。

実験結果：まず、ピストンの加速度から求める衝突応力 σ_p と、エネルギーの保存式から求める木下式高度 Y を比較した。その結果、 σ_p と Y はパーライト、雪、共に1対1の関係にあることがわかった。

次に、標的の平均最終密度 ρ_f を決める物理量を求め、 ρ_f を求めるモデル式を決定した。パーライトは粒子の破碎による圧縮によって圧密が進行する。衝突により破壊された破片質量 Δm を運動量と運動エネルギー E_k と比較した結果、運動エネルギーと相関があり $\Delta m = 10^{-3} E_k^{0.4}$ という経験式が得られた。また、破碎した破片が未破壊のパーライト粒子間の隙間を埋めると仮定して圧密前後の標的質量保存式を用いると、モデル式 $\rho_f = \rho_i / (1 - \Delta m / m_t)$ (ρ_i : 標的の平均初期密度、 m_t : 標的質量) が得られた。またこのモデル式は実験値とよく一致した。

一方、雪の場合、氷粒子間の隙間が小さくなることによって圧密が進行する。このことから、パーライト同様圧密前後の標的質量保存式を用いて、モデル式 $\rho_f = m_t / (L_0 - \Delta L) S$ (L_0 : 標的の初期深さ、 S : 標的の底面積、 ΔL : 標的の圧密前後の長さ変化量) が得られた。ここで、 ΔL は衝突応力と歪速度の関係から得られた圧縮粘性係数 η を用いて $\Delta L = E_k / A \eta v_p S$ (v_p はピストン速度、 A は定数) となる。このことから、雪の平均最終密度は運動量によって決まり、実験値ともよく一致した。

最後に、標的最上層の最終密度 ρ_{f1} と衝突応力 σ_p の関係を調べた。その結果、パーライトでは $\rho_{f1} = 3.0 \sigma_p^{0.8}$ (kPa)、雪では $\rho_{f1} = 127 \sigma_p^{0.3}$ (kPa) という関係が得られた。しかし雪は、 $\sigma_p > 100$ kPaになると ρ_{f1} にばらつきが見られる。これは、圧密メカニズムの違いが原因と考えられる。100kPa以下では雪の初期空隙率で圧密メカニズムは変化しないが、100kPa以上の場合、初期空隙率70%では衝撃波の伝搬による圧密が起こり、初期空隙率80%では衝突直後に上層部が最終密度まで圧密し、その後下層部が時間と共に同時に圧密されることがわかった。一方、パーライトは全ての応力範囲で破碎圧密が起こっているため、データのばらつきはほとんどみられなかった。

キーワード: 微惑星前駆天体, 動的圧密, 衝突実験, 最終密度, 木下式硬度, 圧縮粘性係数

Keywords: pre-planetesimal, dynamic compaction, impact experiment, final density, Kinoshita strength, compression viscosity

粒径分布が粉体の熱伝導率に与える影響の実験的調査 Effect of particle size distribution on thermal conductivity of powdered materials

坂谷 尚哉^{1*}; 小川 和律²; 本田 理恵³; 荒川 政彦⁴; 田中 智²
SAKATANI, Naoya^{1*}; OGAWA, Kazunori²; HONDA, Rie³; ARAKAWA, Masahiko⁴; TANAKA, Satoshi²

¹ 総合研究大学院大学, ² 宇宙科学研究所, ³ 高知大学, ⁴ 神戸大学

¹The Graduate University for Advanced Studies, ²Institute of Space and Astronautical Science, ³Kochi University, ⁴Kobe University

月表層レゴリスのような粉体の熱輸送メカニズムを理解することは、惑星の熱進化と現在の熱的状態を推定する上で重要である。粉体物質の熱伝導率は粒径やその分布、温度、圧縮応力など様々なパラメータに依存し、その程度によっては 1 桁以上変化するものである。実験的な研究が少ないため、熱輸送メカニズムの理解は不十分であり、実際の天体上の粉体熱伝導率を制約することは困難である。

本研究の目的は、熱伝導率のパラメータ依存性の系統的な調査によって、熱輸送メカニズムを理解することである。それによって熱伝導率をモデル化し、天体上の熱伝導率推定に応用する。これまでの粉体の熱伝導率に関する実験的研究の多くは、粒径が揃った粉体サンプルを用いたものであった。しかし、月レゴリスは μm サイズから mm サイズまでの粒子の混合物である。また、コンドライト隕石の母天体の構成粒子は、マトリックスサイズとコンドリュールサイズの粒子の混合物だと考えられる。このような粒径分布を持った粉体の熱伝導率に関する研究は、これまでに二例のみしか行われていない (Woodside and Messmer, 1961; Huetter et al., 2008)。本発表では、真空下において粉体の熱伝導率測定実験を行い、粒径分布の影響を調査した結果を報告する。

用いたサンプルはガラスビーズであり、粒径 $100 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}$ の混合物である。調製したサンプルは全 5 種類であり、それぞれの粒径の質量混合比は 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1 である。それぞれのサンプルの空隙率は 0.38, 0.35, 0.32, 0.35, 0.38 であった。これらのサンプルの熱伝導率は line heat source 法で測定した。

実験の結果、単一粒径サンプルの場合、 $100 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}$ のガラスビーズの熱伝導率はそれぞれ 0.0023 W/mK と 0.0035 W/mK であった。この熱伝導率の増加は、主に熱輻射の寄与の増加が原因である。一方、粒径混合物については、混合比 2:1, 1:1, 1:2 のサンプルの熱伝導率はそれぞれ $0.0039, 0.0029, 0.0039 \text{ W/mK}$ であり、粒径混合物の熱伝導率は空隙率と良い相関を持っていた。また、測定された熱伝導率と混合率の間には直線関係は見られず、M 字型の変化を示すことが明らかになった。

測定した熱伝導率は、粒子間の接触面を通った熱伝導の寄与である固体伝導率と粒子表面間の熱輻射の寄与である輻射伝導率の和で表される。本実験で得られた結果は、固体伝導率と輻射伝導率の粒径分布変化による増減の程度によって説明されると考えられる。したがって、実験結果の解釈のためには、測定された値を固体伝導率と輻射伝導率に分離する必要がある。これは、輻射伝導率の強い温度依存性を利用し、熱伝導率の温度依存性を調査することによって可能となる (坂谷 他, 2013)。本発表では、各調製サンプルに対して熱伝導率の温度依存性の測定結果を合わせて、固体伝導率と輻射伝導率の粒径分布依存性についての結果を報告する。

焼結ガラスビーズの熱伝導率と音速の測定実験 Measurement experiments of thermal conductivity and sound velocity in sintered glass beads

津田 彰子¹; 小川 和律^{1*}; 坂谷 尚哉²; 荒川 政彦³; 保井 みなみ³
TSUDA, Shoko¹; OGAWA, Kazunori^{1*}; SAKATANI, Naoya²; ARAKAWA, Masahiko³; YASUI, Minami³

¹ 東京大学, ² 総合研究大学院大学, ³ 神戸大学

¹The University of Tokyo, ²The Graduate University for Advanced Studies, ³Kobe University

The thermal conductivity and sound velocity of sintered particle materials (glass beads) were experimentally measured, and a correlation between them was investigated. Particles have often played important roles in the solar system history. Especially dust particles condensed in the early solar nebula formed planetesimals, and they remained as the main structure material of the bodies. The particles were then gradually sintered as temperature increased by disintegrations of radioactive isotopes. Finally, a part of planetesimals might be completely sintered and began to melt. Currently the sintered materials may also exist on the lunar and asteroid subsurface for example. Mechanical and thermal properties of such sintered materials are essential information for investigating the history of these bodies.

In the thermal issues, particles are known as a strong thermal insulator in vacuum. Although the thermal conductivity of sintered materials has never been measured, it is considered to be a value between the unsintered and a continuous rock, depending on degree of the sintering process. Concerning the sound velocity, characteristic feature depending on the sintering degree is expected to be similar to the thermal conductivity, because basically the phonon conduction is a common mechanism for both the thermal and sound phenomena in electrical insulation materials.

In this presentation, we report results of the first experiments of the thermal conductivity and sound velocity measurements in sintered particle materials. For measurement samples, 9 different blocks of sintered soda-lime glass beads were prepared: three bead diameters of 180-255, 355-500, and 710-1000 μm , and three degrees of sintering that have nearly the same porosity 40%. The cross section of sintering contact sites (neck) was evaluated for each sample. The thermal conductivity was measured by the line heat source method by a line heater and temperature sensors given in the sample in advance. The sound velocity was directly measured by a transmitter and receiver put at both ends of the block samples.

As results of the experiments, both the thermal conductivity and the sound velocity had an apparent correlation with each other, and with degree of sintering. They appeared almost in proportion to the neck diameter, which feature obviously indicates that the neck or contact size controls the bulk thermal and sound conductions, in weakly-sintered particle systems at least. These results can be directly applied to estimation of thermal and mechanical property of the ancient planetesimals. These results also suggest that the thermal conductivity of sintered materials, and also of unsintered particles probably, can be evaluated by measurements of the sound velocity.

キーワード: 粉体, レゴリス, 熱伝導率, 音速, ガラスビーズ

Keywords: Particle material, Regolith, Thermal Conductivity, Sound velocity, Glass beads

土星を模した磁場中で磁軸対称の石が相互に干渉しあうことを証明するための実験 ～土星の環を生成し維持する力～ Experiment to know the power to pull mutually between things that are axisymmetric for the Saturn's-like magnetic axis

間瀬 博文^{1*}
MASE, Hirofumi^{1*}

¹ 所属なし

¹ none

土星の磁場は巨大な双極子磁場と言えるほど整っており、さらにこの磁軸は自転軸と一致している(1)。この観測事実は奇跡的である。さらに土星の環は土星の赤道面を公転している(2)。これが自明であるとの説明はいまだなされていないと思われる。故にこの観測事実も奇跡的である。

美しい環の奇跡的な存在理由を、これまでに確認されている上述の奇跡的な特徴に結び付けて考えたい。双極子磁場の中心を通り磁軸に垂直に交差する面(磁場赤道面という)上では磁軸対称にあるもの間で相互に引き合う力(割増引力)が発生する。つまり環を構成する物質は割増引力によって180度反対側の物質と繋がれるために土星の環は生成され維持されている。この理論を証明する実験に取り組んでいるので成果を紹介する。

理論を簡単に説明したい。磁石では電子のスピンが一方(磁軸に平行)に揃うとされる。電子には周囲から常時エネルギーが流入する(私は電子はエネルギー補給なしで万年運動できるほど目出度いものとは考えない)。磁場赤道面に沿う方向ではスピンのためのエネルギー消費が多いからそれを補給するため流入量も多い状態(逆に磁軸方向は少ない状態)になる。磁石の磁場赤道面上に磁軸対称になるよう2個の普通の石を配置する。「衛星(石)A - 天体(磁石)B - 衛星(石)C」の並びで、A,B,C(の電子1個あたり)に流入する磁場赤道面上のエネルギーの大きさでは「A普通 - B多い - C普通」の並びである。これは私が提唱してきた2温度回転円盤そのものなのでAとCが割増引力で引き合う(3)。

****実験の構成(図面を参照)**

A,C:天然砥石(砂岩)を切断したもの(34L×25W×25H)

B:永久磁石(異方性フェライト,40L×40W×10H,表面磁束密度B=79mT,吸引力F=2.746kgf)を4~8個を重ねたもの(40L×40W×40~80H)

装置箱:市販の二段ボックス(木質)を横に寝かせた状態(280L×580W×410H)で利用する。中板を境に左室、右室と呼ぶ。中板に150×150程度の穴を、左室の天板に50×50程度の穴を開ける(中板に近い位置)。天板の穴の上にはφ65×1,000Lの塩ビパイプを取り付ける。左室の前面はベニヤ板を枠としたガラスを張る。右室は前面がそのまま開放である。150×150×3tのベニヤ板に穴を開けBをはめ込んだ状態で穴とBの隙間をコーキングする。そのベニヤ板を中板に中板の穴を塞ぐように貼り付ける。左室は塩ビパイプ上端以外は気密状態となる。

Aは天井から2本の糸(1,700L)で吊り下げられ左室内で自由揺動できるが静止点ではBとの間隙が20mm程度であるとする。Cは右室内天板から糸で吊るされ、Cの右側面には別の糸の端が接着されている。装置箱の右側から糸を引けばBからCを離す(状態C1)ことができ、緩めればCをBに間隙が20mm程度に接近させる(状態C2)ことができる。

****変化させる条件** Bの構成と向きを変化させ次の3通りとした。条件1:縦8個重ね(磁軸鉛直)、条件2:縦4個重ね(磁軸鉛直)、条件3:横4個重ね(磁軸左右水平)

****毎回の手順** 1.Aを極力静止させる(状態C1)。2.ビデオカメラでAの撮影を開始する(状態C1)。3.開始2分後C1からC2へ(状態C2)。4.開始4分後C2からC1へ(状態C1)。5.開始6分後C1からC2へ(状態C2)。6.開始8分後撮影を終了する。

****結果** 完全静止は困難で撮影開始時、Aは微小に揺動していた。1.条件1及び条件2の場合、最初の(状態C2)の時間帯に揺動が抑制され、2回目の(状態C2)の時間帯に揺動が増幅された。2.条件3の場合、全時間中にAの特別な変化は認められなかった。

****考察** 条件2と条件3の比較により静電気や磁気の悪影響はないと考えてよさそうである。予想した力が検出されている可能性がある。

参考文献

(1)堀安範(2013)/「第13回森羅万象学校」/国立天文台

http://th.nao.ac.jp/MEMBER/hori/pdf/HORI_2013Mar26_part1.pdf P23

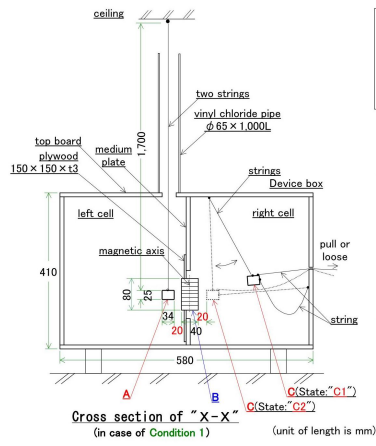
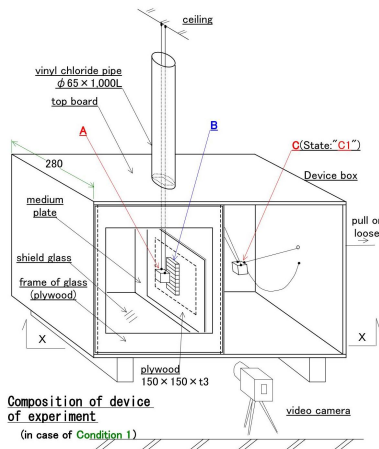
(2)平塚市博物館/「土星の耳 リングの消失」http://www.hirahaku.jp/hakubutsukan_archive/tenmon/00000050/59.html

(3)間瀬博文(2008)/『ひので』(SOLAR-B)の観測成果により得られた、巨大フレアの典型事例の解法/地球惑星科学連合2008年合同大会/E108-P007

PPS21-P20

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 29 日 18:15-19:30



A, C: natural whetstone(sandstone)
 34L x 23W x 23H
 B: permanent magnet(anisotropic ferrite, 40L x 40W x 10H,
 B=79mT, F=2.746kgf) piled up 4~8 pieces
 40L x 40W x 40~80H

