

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

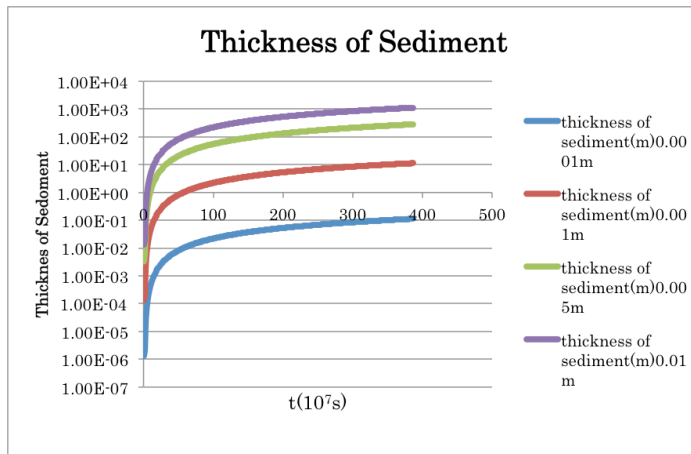
会場:416

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 $v_{zmax} \propto g^{0.97}$ と表せることが分かった。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の上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黒体放射より顕著に小さい。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ー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を目的とし、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の大気散逸進化：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) 放射駆動の大気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。大気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、大気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 の大気において一般的に雲が存在する場合、観測的に大気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、大気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気散逸過程の影響を分離して理解することを試みる。本研究の大気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、大気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気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, 大気散逸, 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温の推定値である。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