

## 周惑星円盤内での微衛星形成とペブル集積

## Satellitesimal formation in a circumplanetary disk and pebble accretion

\*芝池 諭人<sup>1</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>、佐々木 貴教<sup>2</sup>

\*Yuhito Shibaïke<sup>1</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>, Takanori Sasaki<sup>2</sup>

1.東京工業大学理学院地球惑星科学系、2.京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Astronomy, Kyoto University

近年、大量のペブル(cmサイズの個体粒子)を集積することによって、微惑星がガス惑星のコアにまで急成長することが示唆されている。我々は、このペブル集積メカニズムがガス惑星周りの衛星形成にどのように影響するか調べた。我々は、1) ペブルサイズ粒子の原始惑星系円盤及び周惑星円盤内での成長と動径方向の移動、2) ガスとペブルの原始惑星系円盤から周惑星円盤への流入、3) 微衛星による周惑星円盤内でのペブル集積、を扱う、シンプルだが大局的なモデルを構築した。

結果、ほとんどのペブルが周惑星円盤に、円盤上空からではなく赤道面から、外向きのガス流に逆らって進入することがわかった。また、周惑星円盤内でのペブルの成長過程には、全く異なる二つの描像があるとわかった。一つは、あるクリティカルな軌道におけるペブル同士の直接合体成長による微衛星の形成とそれに続く微衛星同士の合体成長による衛星形成、もう一つは、そのクリティカルな軌道の外側での大きい微衛星によるペブル集積、である。クリティカルな軌道の位置は、円盤やペブルの条件によって決まる。我々は、周惑星円盤に進入するペブルと原始惑星系円盤外縁から落下してくるペブルの質量フラックスの比を表すパラメーター  $x$  を導入した。 $0.4 M_J$  の質量を持つ木星のような惑星の周惑星円盤内でのクリティカルな軌道の位置は、 $x = 1$  の時  $r \sim 20 R_J$  であり、 $x = 0.1$  の時  $r \sim 3 R_J$  であった。クリティカルな軌道の外側では、大きい微衛星が、自らの集積半径内のペブルを集積する。微衛星の質量が  $10^{23}$ - $10^{24}$  g に到達すると集積半径が急激に拡大し、微衛星は急成長するとわかった。

我々は、周惑星円盤内での微衛星形成に道筋をつけ、微衛星によるペブル集積の大まかな描像を明らかにした。

キーワード：衛星、衛星形成、ペブル集積、周惑星円盤、微衛星、ガス惑星

Keywords: Satellite, Satellite formation, Pebble accretion, Circumplanetary disk, Satellitesimal, Gas planet

## 冷却する原始惑星系円盤における岩石原始惑星の氷粒子捕獲

## Accretion of icy pebbles by rocky planetary embryos in cooling protoplanetary disks

佐藤 貴央<sup>1</sup>、\*奥住 聡<sup>1</sup>、井田 茂<sup>2</sup>Takao Sato<sup>1</sup>, \*Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>, Shigeru Ida<sup>2</sup>

1.東京工業大学 地球惑星科学専攻、2.東京工業大学 地球生命研究所

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

Standard accretion disk models suggest that the snow line in the solar nebula migrated interior to the Earth's orbit in a late stage of nebula evolution. In this late stage, a significant amount of ice could have been delivered to 1 AU from the outer regions of the disk in the form of mm to dm-sized icy particles called "pebbles." This raises the question as to why the present Earth is so depleted of water.

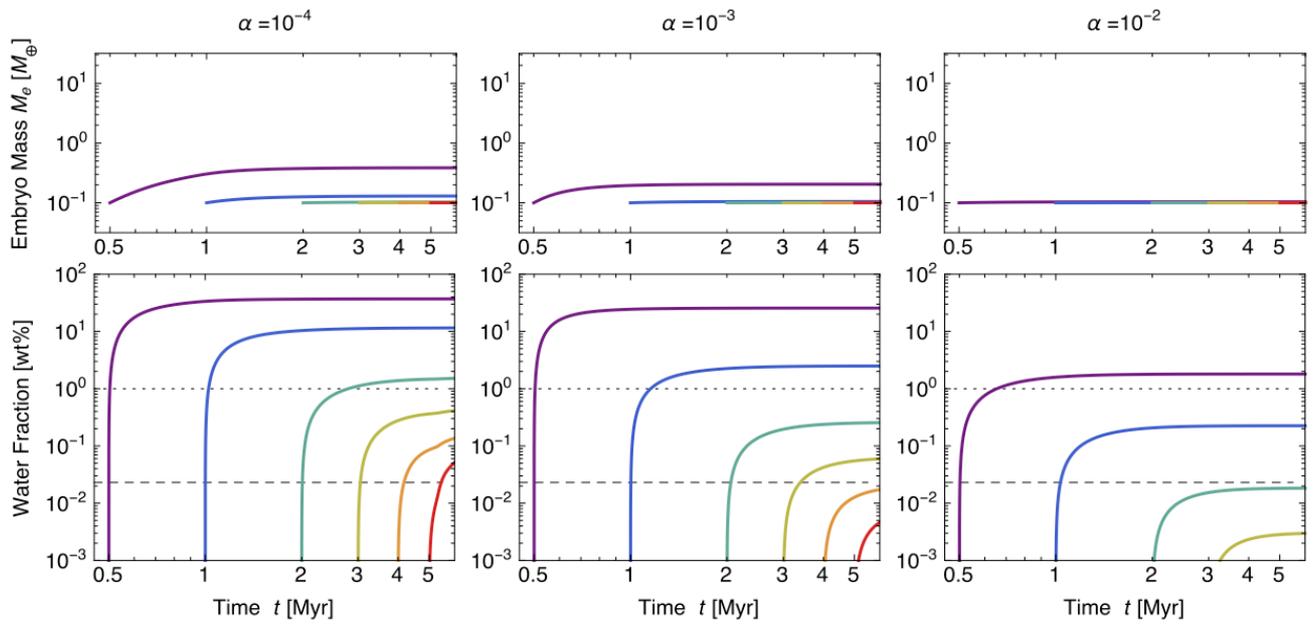
In this study, we quantify the amount of icy pebbles accreted by terrestrial embryos in a cooling protoplanetary disk assuming that no mechanism halts the pebble flow outside the terrestrial planet forming region. We use a simplified version of the coagulation equation to calculate the formation and radial inward drift of icy pebbles in a protoplanetary disk. The pebble accretion cross section of an embryo is calculated using analytic expressions presented by recent studies. We find that the final mass and water content of terrestrial embryos strongly depends on the radial extent of the gas disk, the strength of disk turbulence, and the time at which the snow line arrives at 1 AU. The disk's radial extent sets the lifetime of the pebble flow, while turbulence determines the density of pebbles at the midplane where the embryos reside. We find that the final water mass fraction of the embryos falls below that of the present Earth (0.023 wt%) only if the disk's radial extent is 100 AU or less, turbulence is strong at 1 AU, and the snow line arrives at 1 AU later than 2-4 Myr after disk formation. If the solar nebula extended to 300 AU, initially rocky embryos would have evolved into icy planets of 1-10 Earth masses unless the snow-line migration was slow. If the proto-Earth contained water of ~ 1 wt% as might be suggested by the density deficit of the Earth's outer core, it would have been possible for the proto-Earth to form with weaker turbulence and with earlier (> 0.5-2 Myr) snow-line migration.

Reference: Sato, T., Okuzumi, S., &amp; Ida, S. 2016, A&amp;A, in press (arXiv:1512.02414)

Figure: Time evolution of the mass and water fraction of an initially purely rocky embryo of the initial mass of 0.1 Earth mass placed at 1 AU in a cooling protoplanetary disk with the outermost radius of 100 AU. The curves show how the mass and water fraction evolve with time if the snow line reaches 1 AU at different times (0.5, 1, 2, 3, 4, and 5 Myr from left to right) after disk formation. The dashed and dotted lines mark the water fraction of 0.023 wt% (corresponding to the current terrestrial value estimated from the ocean mass) and 1 wt% (a theoretical upper limit on the primordial terrestrial value estimated from the mass deficit of the outer core), respectively. The left, center, and right panels are for turbulence parameters of  $10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ , respectively.

キーワード：スノーライン、地球型惑星、水

Keywords: snow line, terrestrial planets, water



## 焼結氷ダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーション

## Numerical simulation of collisions between sintered icy dust aggregates

\*城野 信一<sup>1</sup>、上野 春太\*Sin-iti Sirono<sup>1</sup>, Haruta Ueno

1.名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University

惑星形成はサブミクロンサイズのダスト微粒子が相互に付着を繰り返すことから始まる。ダスト微粒子が集合したダストアグリゲイトの衝突が惑星形成における重要なプロセスとなる。中心星から離れた領域ではダスト微粒子の主成分はH<sub>2</sub>Oをはじめとする氷となる。氷は揮発性が高いため、原始惑星系円盤の中で蒸発と再凝縮を繰り返す。ダスト微粒子は表面張力によって付着する。結合部は凹面となっており、凸面である他の部分よりも蒸気圧が低くなるため、再凝縮は結合部周辺に選択的に起こる。これが「焼結」と呼ばれる現象であり、ダスト微粒子の結合部の成長を引き起こす。焼結が進行していないダストアグリゲイトでは、表面張力で付着しているダスト微粒子は結合部を切断することなく、付着している微粒子のまわりを転がることができる。衝突の際には転がりによって多くの運動エネルギーが散逸し合体が可能となる。一方で焼結が進行してしまうと、結合部が成長により強度が大幅に増大する。また、結合部を切断しなにかぎり転がることができない。このため、焼結は氷ダストアグリゲイトの衝突に大きな影響を与えることが予想される。

そこで我々は焼結がどのような効果をもたらすかを明らかにするために氷ダストアグリゲイトの数値シミュレーションを行った。二次元の離散要素法を用いた。焼結後の結合部は弾性変形する円筒で近似した。焼結の進行度合いは結合部の半径の大小に対応する。同一アグリゲイトの正面衝突を行った。衝突の結果は焼結により大きく変化することが分かった。また、その結果はアグリゲイトの充填率に大きく依存することが明らかとなった。焼結が進行していないアグリゲイトの場合、衝突速度が50m/s程度までであれば合体成長が可能である。BCCA (Ballistic Cluster Cluster Aggregation)アグリゲイトのように非常に空隙が多く基本構造が微粒子がつながったチェーンである場合について、付着成長が可能である衝突速度を調べた。その結果、焼結が十分に進行した（ネック半径/グレイン半径=0.7）BCCAアグリゲイトでは成長できる衝突速度が20 m/s程度まで低下することが分かった。一方で焼結がそれほど進行していない（ネック半径/グレイン半径=0.2）BCCAアグリゲイトでは、焼結が起こっていないアグリゲイトと同様の結果となった。この場合は、ネックの強度が小さく衝突の際に多くのネックが破壊され、再び焼結していないネックで再結合するために実質的に差が無くなるためである。

ある程度充填率が上昇しているアグリゲイトの場合は衝突結果は大きく異なった。付着成長できる衝突速度は1 m/s程度であることが分かった。この速度以上であると、衝突結果は跳ね返りとなった。BCCAアグリゲイトとの差は、アグリゲイトの充填率上昇に伴って弾性率が変化したことが原因である。弾性率が小さいと発生圧力が小さくなり、ダスト微粒子間の結合を切断できなくなる。一方で弾性率が大きいと発生圧力が大きいため、一度は形成されるダスト微粒子間の結合を切断し跳ね返りとなる。また、衝突速度が20 m/s程度を越えると、衝突点近傍で破壊がおり、破片が放出される。破片の量は衝突速度が20 m/sで数%程度であった。

これらの結果から、焼結はダストアグリゲイトの衝突合体を大きく阻害することがわかる。ダストアグリゲイトはガス抵抗により中心星方向へ落下する。焼結が進行している領域では十分にアグリゲイトは成長できないため、典型的な落下速度が焼結が進行しない領域と異なる。結果として、原始惑星系円盤における固体成分の分布に偏りが生じることになる。その後の惑星形成過程に影響をあたえることが予想される。

キーワード：焼結、ダストアグリゲイト、衝突

Keywords: sintering, dust aggregate, collision

## 原始惑星系円盤乱流中での微惑星から惑星形成過程

From planetesimals to planets in turbulent protoplanetary disks

\*小林 浩<sup>1</sup>、田中 秀和<sup>2</sup>、奥住 聡<sup>3</sup>\*Hiroshi Kobayashi<sup>1</sup>, Hidekazu Tanaka<sup>2</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>3</sup>

1.名古屋大学理学研究科、2.東北大学、3.東京工業大学

1.Department of Physics, Nagoya University, 2.Tohoku University, 3.Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤中で固体微粒子があつまり惑星ができる。その形成過程は解明されていない部分も多いが、近年の研究で0.1ミクロンサイズの微粒子から10000kmサイズの惑星まで、天体同士の直接合体成長により形成が可能であることがわかってきた。合体成長で形成される天体のサイズ分布は天体間の相対速度に依存し、結果として形成されるサイズ分布がその後どのような惑星が形成されるかを定める。本研究では、乱流円盤中での天体の合体成長を調べ、どのような成長が起こり、サイズ分布がどのようなようになるかを調べた。また、その結果、最終的にどのような質量の惑星がどのような時間でできるかも調べた。この結果を用いて、太陽系惑星形成の条件に制約を与えられるため、これを議論する。

キーワード：惑星形成、微惑星、乱流

Keywords: planet formation, planetesimal, turbulence

原始惑星系円盤のダスト層における2次元軸対称不安定性の局所数値シミュレーション  
Local numerical simulations of axisymmetric two-dimensional instabilities in the dust layer of a protoplanetary disk

\*大西 勇武<sup>1</sup>、関谷 実<sup>1</sup>

\*Isamu Onishi<sup>1</sup>, Minoru Sekiya<sup>1</sup>

1.九大・理・地球惑星科学

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

Two different processes have been proposed for the formation of planetesimals: mutual sticking of dust aggregates, and the gravitational instability of the dust layer. The critical density of the gravitational instability is hundreds times the gas density. However, the turbulent diffusion may prevent dust particles to settle toward the midplane of the protoplanetary disk, and the condition for the gravitational instability is difficult to be satisfied.

The streaming instability by Youdin & Goodman (2005) concentrates dust particles and boosts the planetesimal formation. The streaming instability is very efficient to form dust clumps in the case where dust particles have the stopping time on the order of the Keplerian orbital period (meter-sized particles). However, the streaming instability grows very slowly for small dust particles (1mm or less).

In this work, we carried out numerical simulations of motions of dust particles and gas in the dust layer of a protoplanetary disk. We assume the axisymmetry with respect to the rotation axis of the protoplanetary disk. We employ the local shearing-box approximation. We take account of the radial tidal force as well as the vertical force due to the stellar gravity, the gas drag force acting on dust particles and its back reaction. We include the effect of global pressure gradient by adding radial force to dust particles. We omit the effects of magnetic fields and the self-gravity.

We use the Athena code developed by Bai & Stone (2010) for numerical simulations. We report the results over a wide range of parameters, and consider comprehensively the causes of the instabilities in the dust layer of a protoplanetary disk.

キーワード：原始惑星系円盤、ダスト、不安定性、微惑星

Keywords: protoplanetary disk, dust, instability, planetesimal

## ロスビー波不安定性の新条件

## New Condition for The Rossby Wave Instability

\*小野 智弘<sup>1</sup>、武藤 恭之<sup>2</sup>、竹内 拓、野村 英子<sup>3</sup>\*Tomohiro Ono<sup>1</sup>, Takayuki Muto<sup>2</sup>, Taku Takeuchi, Hideko Nomura<sup>3</sup>

1.京都大学理学研究科物理学宇宙物理学専攻宇宙物理学教室、2.工学院大学基礎・教養教育部門、3.東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻

1.Department of Astronomy, Kyoto University, 2.Division of Liberal Arts, Kogakuin University,

3.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

近年の観測によって非軸対称構造を持つ原始惑星系円盤の存在が明らかになってきている。しかし、そのような非軸対称構造がどのように形成されたのかは未だ明らかになっていない。円盤非軸対称構造の成因候補としてロスビー波不安定性が挙げられる。ロスビー波不安定性は差動回転円盤中における流体不安定であり、円盤が動径方向に大きい勾配の構造を持っている時、非軸対称で大スケールな渦が円盤内に形成される。先行研究によって、ロスビー波不安定性の必要条件や十分条件は提案されているが、必要十分条件は未だ知られていない。

本研究において、我々は広いパラメータ空間上で線形安定性解析を行うことで、順圧流におけるロスビー波不安定性が中立安定となるパラメータを求めた。この結果から、中立安定の時、凸性が高い背景流vortensityの極小点に共回転半径が位置づけられることを発見した。この事実を用いることで、ロスビー波不安定性の中立安定条件を従来より簡単な手法で求めることに成功した。さらに、ロスビー波不安定性の必要十分条件を半解析的に求めた。我々が求めた新条件は、円盤内の動径変化が円盤スケールハイトより十分小さくなければ有効である。今回求めた新手法や新条件が、非軸対称構造を持つ円盤観測や、ロスビー波不安定性の数値シミュレーションを解釈する上で利用されることが期待される。

キーワード：原始惑星系円盤、流体不安定性、線形安定性解析

Keywords: protoplanetary disk, hydrodynamic instability, linear stability analysis

岩石の効果を導入した弾性体ゴドノフSPH法による微惑星の衝突シミュレーション  
Planetesimal Impact Simulations by Godunov SPH Method for Elastic Dynamics with the  
Effects of Rocks

\*杉浦 圭祐<sup>1</sup>、犬塚 修一郎<sup>1</sup>、小林 浩<sup>1</sup>

\*Keisuke Sugiura<sup>1</sup>, Shu-ichiro Inutsuka<sup>1</sup>, Hiroshi Kobayashi<sup>1</sup>

1.名古屋大学大学院理学研究科

1.NAGOYA UNIVERSITY Graduate School of Science

地球などの固体惑星は原始惑星系円盤中で微惑星の衝突合体を介して形成されたと考えられている。従って惑星の起源や小惑星の特異な形状を理解するためには、微惑星同士の衝突の詳細を理解する必要がある。室内実験でも衝突破壊は調べられているが、大きさが数十cm以上の天体や速度が数km/s以上の衝突の取り扱いはいまはほぼ不可能である。そのため数値シミュレーションを用いて微惑星衝突の詳細を調べることは重要である。

多くの先行研究がSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法と呼ばれる流体力学の数値計算手法を用いて衝突計算を行っている。しかしながら広く使われている標準SPH法にはいくつかの問題点があることが指摘されている。具体的には、一般の乱雑な粒子配置では極端に精度が悪化すること（空間1次精度以下）、強い衝撃波で流体粒子の突き抜けが起きる人工粘性を利用していること、固体が引き伸ばされている領域で張力不安定性と呼ばれる数値不安定性が起きることなどの問題点が存在する。また重力が優勢な火星サイズの原始惑星の衝突計算では、せん断応力などの固体の効果は重要ではないとして無視されることが多かった。固体の効果が巨大衝突に及ぼす影響は定量的に議論されておらず、数値計算手法の慎重な吟味が必要である。

標準SPH法の問題点を解決するための手法として、ゴドノフSPH法(Inutsuka 2002)と呼ばれる方法が提案されている。このゴドノフSPH法では空間2次精度の定式化がなされており、リーマンソルバーと呼ばれる物理的な粘性を導入する手法により人工粘性の利用を回避している。また運動方程式に用いられている補間の次数を適切に選ぶことで、張力不安定性を解決することができる(Sugiura and Inutsuka 2016)。我々はこのゴドノフSPH法を弾性体力学へ拡張し、ひび割れの効果など現実的な固体を表す効果も導入した。本講演では固体の効果を導入した数値計算手法を用いた微惑星衝突の数値シミュレーションの結果を紹介し、固体の効果が及ぼす影響について議論する。

キーワード：微惑星、衝突破壊、数値シミュレーション、弾性体力学、ゴドノフSPH法

Keywords: Planetesimals, collisional destruction, numerical simulation, elastic dynamics, Godunov SPH method

## 高空隙率標的に形成される衝突孔のサイズスケーリング：彗星表面への応用

## Scaling of impact-generated cavity-size for highly porous targets and its application to cometary surfaces

\*岡本 尚也<sup>1</sup>、中村 昭子<sup>2</sup>\*Takaya Okamoto<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>2</sup>

1.千葉工業大学惑星探査研究センター、2.神戸大学理学研究科惑星学専攻

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University

近年の盛んな探査計画によって非常に大きな空隙率を持つ小天体が見つかってきただけでなく、その詳細な画像から小天体表面の多様な姿が明らかになってきた。中でも9P/Tempel 1 彗星や67P/Churyumov-Gerasimenkoの表面のくぼみは、月面上に形成された単純クレーター（お椀型クレーター）とは異なり非常に浅く見えるような形態、すなわち(深さ)/(直径)比が小さいような形態を示している。そのようなくぼみの形成メカニズムとして、表面下の揮発性物質の昇華によって内部が空洞化して崩壊するといったもの(Vincent et al., 2015)や衝突後の天体表面の活動、例えば昇華や粘性緩和などによる崩壊(e.g. Cheng and Dombard 2006, Thomas et al., 2013)が議論されている。しかし、そもそもそのような非常に空隙率の大きな天体に、衝突そのものによってどのような形状のくぼみができるかはあまり理解されていない。そこで我々は衝突によって形成される孔（キャビティ）の形状を調べるため空隙率~94-50%を持つ標的を作成し、衝突実験を行った。生成されたキャビティは標的表面よりも少し内部に最大径を持つような形状（カブ型形状）が観察された(Okamoto et al., 2013)。我々はこのカブ型のキャビティの最大径と深さを調べた。本研究で得られたデータと、先行研究で使われた空隙率>~30%を持つ標的への衝突実験のクレーターサイズの結果を合わせることで、広範囲な標的の空隙率空間で適用可能な衝突キャビティのサイズのスケーリング関係を得た。

得られたスケーリング関係を彗星表面に応用した。Deep Impact計画では人工の衝突体をTempel 1彗星へ衝突させた。計画で行われた衝突の条件をスケーリング関係に適用したところ、衝突クレーターの周辺では表面圧縮強度は $10^1$ - $10^3$  Paのオーダーであることがわかった。粒子間力によって表面強度が決まっていることを仮定すると、クレーター周辺の粒子径は $> \sim 50$   $\mu\text{m}$ であることが推定された。また、スケーリング関係から深さ/最大径比を計算を行ったところ、彗星表面が圧縮強度100 Paよりも小さい極めて弱い強度で構成されていた場合、その値は単純クレーターが持つ $\sim 0.2$ という値よりも小さな値をとることがわかった。すなわちこれは昇華や粘性緩和といったその後の表面活動なしに、衝突のみでも浅く見えるクレーターが形成可能であることが示唆された。

キーワード：空隙率、高速度衝突実験、彗星

Keywords: porosity, hypervelocity impact experiment, comets

## 鉄合金へのクレーター形成：温度と衝突速度の影響

Cratering on iron alloy: Temperature and impact velocity effects

\*小川 諒<sup>1</sup>、中村 昭子<sup>1</sup>、鈴木 絢子<sup>2</sup>、長谷川 直<sup>2</sup>\*Ryo Ogawa<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>1</sup>, Ayako Suzuki<sup>2</sup>, Sunao Hasegawa<sup>2</sup>

1.神戸大学大学院理学研究科、2.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1.Graduate School of Science, Kobe University, 2.Institute of Space and Astronautical Science

はじめに：初期の太陽系は主にガスやダスト粒子で構成されており、46億年の間に衝突合体などを繰り返し、現在の惑星系が形成されたと考えられている。惑星成長過程において直径20km以上に達した微惑星は熔融分化により鉄質コアが形成される(Moskovitz and Gaidos, 2011)。鉄質コアの形成は、CAI形成の30-60万年後に起こる始原的な出来事であり、初期の惑星進化過程を理解する上で非常に重要な出来事である。鉄質コアの調査について小惑星16Psycheが注目され、次回のNASAのディスカバリーミッションの候補にその探査が挙げられている。我々は、鉄質コアの調査に関して、その表面での衝突現象を理解するため、鉄へのクレータリングに関する基礎データ収集及び、シミュレーションで用いる標的物質の強度パラメータの調査を目的とし、標的温度・衝突速度を変え鉄同士の衝突実験及び衝突シミュレーションを行った。結果、低速域において低温標的のほうが室温標的よりクレーターが浅くなることがわかり、その温度依存性をもたらすいくつかの強度パラメータを決定した(小川他、北大低温研衝突研究会2016)。

今回の実験では、弾丸物質にも着目し、強度パラメータが既知の銅弾丸を用いて衝突実験とシミュレーションを行った。さらに、鉄同士で行った室内実験スケールの衝突シミュレーションを実際の天体規模まで拡張し、両者の違いを調査した。

実験方法：立方体の鉄質標的へ銅球を速度2.0-6.5 km/sで衝突させた。弾丸の加速には宇宙科学研究所にある横型二段式軽ガス銃を用い、チャンバー内を0.5-5 Paに減圧して実験を行った。クレータリングへの温度の影響を調査するため、液体窒素で150 K以下に冷却した標的と室温の標的に対し、同じ衝突条件においてクレーター形状の変化を観察した。衝突シミュレーションについてはShock physics codeであるiSALEを用いて行った。衝突実験との比較のため、実験と同じ衝突条件を設定し計算を行った。本シミュレーションでは金属に対する強度モデル"Johnson-Cookモデル"に着目しており、鉄合金標的には我々の先行研究で決定したSS400のモデルパラメータを用い、そして銅弾丸のパラメータには無酸素銅の値(Johnson and Cook, 1983)を用いた。そして、鉄同士の衝突について天体スケール(弾丸直径：数百m-数百km)のシミュレーションを行い、 $\pi$ スケールを用い室内実験スケールのシミュレーション結果との比較を行った。

実験結果：低速度域(2.0 km/s)では、室温標的に比べ低温標的のクレーター深さが浅くなったが、高速度域(4-6.5 km/s)においては、深さに温度依存性は見られなかった。さらに直径についても温度依存性は見られなかった。つまり、温度はクレーター深さに影響し、さらにその温度依存性は衝突速度によって変化することが考えられる。

鉄は低温にすると強度が増加することが知られている(e.g. Petrovic, 2001)。そのために低温でのクレーター深さが浅くなった可能性がある。さらに、各実験でクレーターへの弾丸の付着が見られたため、その影響も考えられる。高速度の場合にはクレーター深さに温度依存性がみられなかったことから、クレーター深さへの影響について、弾丸の付着など、低温による強度の増加以外の要因を調査しなければならない。

シミュレーション結果：実験と同条件下でシミュレーションを行ったが、低温と室温でのクレーター深さは誤差の範囲内で一致しており、実験で見られた温度依存性は再現されなかった。原因としては銅の降伏強度、歪量、歪速度に関するパラメータが鉄の約1/3-1/5であることが考えられるが、原因特定のためにさらに詳しく調べる必要がある。また、鉄同士の衝突シミュレーションについて、 $\pi$ スケールによる比較を行ってみると、低速度域において室内実験スケールよりも深くなる結果となった。さらに、室内スケールでは見られたクレーターサイズの温度依存性が見られなかった。今後はシミュレーションを通して衝突規模の影響を調査し、さらに実験について、クレーターの断面から弾丸の付着などを調査する必要がある。

謝辞：iSALEの開発者であるGareth Collins, Kai Wunnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk

Elbeshausen の各氏 に感謝致します。

キーワード：鉄、クレーター、衝突

Keywords: Iron, Crater, Impact

## ラブルパイル小惑星のクレーター形成による質量損失の実験的見積もり

## Experimental estimate of mass loss rate by cratering for rubble-pile asteroids

\*巽 瑛理<sup>1</sup>、杉田 精司<sup>1</sup>\*ERI TATSUMI<sup>1</sup>, Seiji Sugita<sup>1</sup>

1. 東京大学

1. The University of Tokyo

地上望遠鏡や探査機による観測結果は、数10 km以下の小さな小惑星の多くがものにはラブルパイル天体であることを示唆している[1]。その一方、小惑星の質量進化は衝突破壊だけでなくクレーター形成に伴う質量損失に大きく影響されることも理論的に示されている[2]。小さなラブルパイル小惑星表面は粗粒な岩塊で覆われている可能性が高く、標的粒子と弾丸のサイズ比が1に近い衝突が多く発生する。最近の研究からは、このような条件の場合のクレーター形成効率は従来の重力スケール則や強度スケール則と異なるトレンドを示すことは明らかにされたが、統一的なクレーター則およびメカニズムは明らかになっていない[3]。本研究ではクレーター形成効率を定量的に評価することを目的として、ラブルパイル小惑星を模擬した粗粒な標的に対してクレーター形成実験を行った。

室内衝突実験：宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃および東京大学の一段式軽ガス銃を用いて、玄武岩小石 (~10, 18 mm) とパミス小石 (~7, 9, 16 mm) で構成された粗粒な標的にポリカーボネート弾丸を衝突させ、クレーター形成実験を行った。速度範囲は、高速度領域1 - 6 km/sと低速度領域79 - 224 m/sである。クレーター直径と深さをレーザー変位計 (Keyence製LJ-V) で計測した。また、Quarter-space実験を行い、高速カメラ (NAC製Q1v) で撮影しクレーター形成断面を観察した。

結果と解析：標的構成粒子サイズがクレーター形成に関係ないとすれば、クレーター形成効率は砂と同様になるはずである。しかし、クレーター次元解析としてよく知られる $\pi$ スケーリング[4]と比較すると、高速度 (>4 km/s) ではクレーターサイズは砂に形成されるクレーターサイズと同程度であるが、低速度 (<4 km/s) では、砂標的の場合より小さなクレーターが形成した。これは構成粒子を破壊し散逸するエネルギーがクレーター掘削のエネルギーに比べて無視できないためだと考えられる。Quarter-space実験の結果からクレーター形成において、衝突初期の構成粒子の破壊過程と後期の粉体流動的な掘削過程に分けられることがわかった。標的粒子径は衝突破壊過程に大きな影響を及ぼすが、掘削過程は砂と同様の振る舞いをしていると考えられた。観察結果を踏まえ、衝突破壊過程と掘削過程に分離し、衝突時に弾丸と標的粒子の運動量交換を仮定し、粗粒なターゲットに対する新しいクレーター則を構築した。これにより、標的粒子と弾丸サイズ比と衝突速度に応じて、クレーターサイズを見積もることができる。

小惑星の質量損失率への影響：イトカワ (構成平均粒子径2 m) を例にとり、新しいスケーリングでクレーターサイズを見積もると、およそ直径1 mより小さな隕石衝突でクレーター形成効率の低下が見られ、直径が0.1 m未満 (構成粒子が完全に破壊されない) の隕石衝突ではほとんどクレーターが形成されないことがわかる。最も掘削効率が低い時には、砂にできるクレーターサイズの1/5程度になる。一方で、1 mより大きなサイズの隕石衝突では、砂に形成されるのと同程度のクレーターが予想される。天体の構成粒子が完全に破壊される場合には一枚岩のクレーターサイズよりも数倍大きく、砂に形成されるクレーターサイズに近い。掘削過程が砂と同様であるとする、クレーターサイズから隕石衝突により天体の脱出速度を超えて飛散するイジェクタ量を見積もることができる。実験結果より、一枚岩の天体に比べ、ラブルパイル天体は同じ規模の衝突を受けたとしても、大きなクレーターが形成され、より多くの質量を損失することがわかった。小さなメインベルト小惑星 (< 10 km) の分布は衝突破壊によって決められる定常的な分布よりも浅い分布を持っており[5]、小さな天体がより早く失われることを示唆している。小さな小惑星の多くがラブルパイル天体であるとする、実験結果はクレーター掘削が小さな小惑星のサイズ分布を支配的に決定していることを示唆するかもしれない。

[1] Pravec and Harris, *Icarus* 148, 12-20 (2000); Britt et al., *Asteroids III*, 485-500 (2002); Fujiwara et al., *Science* 312, 1330-1334 (2006); [2] Kobayashi and Tanaka, *Icarus* 206, 735-746 (2010) [3] Güttler et al., *Icarus* 220, 1040-1049 (2012); Holsapple and Housen, 46<sup>th</sup> LPSC, #2538

(2014) [4] Holsapple, *Annu. Rev. EPS* 21, 333-373 (1993) [5] Gladman et al., *Icarus* 202, 104-118 (2009)

キーワード：小惑星、衝突実験、クレーター

Keywords: Asteroids, Impact experiments, Crater

## レゴリス層を模擬した粉粒体を伝播する衝突励起振動に関する実験的研究

Experimental study on propagation process of impact-induced seismic wave in quartz sand simulating asteroid regolith layer

\*松榮 一真<sup>1</sup>、荒川 政彦<sup>1</sup>、保井 みなみ<sup>1</sup>、高野 翔太<sup>1</sup>、長谷川 直<sup>2</sup>

\*Kazuma Matsue<sup>1</sup>, Masahiko Arakawa<sup>1</sup>, Minami Yasui<sup>1</sup>, Shota Takano<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>2</sup>

1.神戸大学大学院理学研究科、2.宇宙科学研究所

1.Graduate School of Science, Kobe University, 2.Institutes of Space and Astronautical Science, JAXA

## はじめに

小惑星の表面は、これまでの探査によってボルダールを含む粉粒体で構成されたレゴリス層で覆われていることが明らかとなってきた。レゴリス層で覆われた小惑星の表層地形は、天体衝突によって発生する振動(衝突励起振動)による地形変化を考慮すべきだと言われている。しかし、衝突励起振動に着目した実験的研究は少なく、その実験条件も限られている。我々はこれまでポリカーボネート弾丸を用いて石英砂標的に高速度衝突実験を行い、衝突励起振動の震源・減衰過程について調べてきた(松榮 他, 連合大会2015)。また、2015年度からは宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃においてサボ分離により、様々な種類の弾丸が発射できるようになった。そこで、密度の異なる直径2mmの弾丸を用いて高速度クレーター形成実験を行いクレーター形成過程の観測とともに衝突励起振動を計測した。これまでの実験結果を基に、衝突励起振動による地形変化過程に重要となる“振動強度とその距離減衰率”及び“衝突体の運動エネルギーが振動エネルギーに変換される割合”について調べた。さらに、衝突速度や弾丸密度を広く変化させた衝突実験を行い、石英砂標的に対するクレーターサイズのスケール則の構築を行った。

## 実験方法

衝突実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には直径4.7mmのポリカーボネート球を用いており、その弾丸を0.2-6.9km/sの速度で衝突させた。また、直径2mmの密度の異なる7種類の球(ガラス、アルミ、チタン、ジルコニア、SUS、銅、タングステンカーバイト)も弾丸として利用し、2、4、5km/sの速度で衝突させた。標的試料には平均粒径500 $\mu$ mの石英砂を用いた。標的表面には、加速度計(電荷感度5.47pC/sm<sup>-2</sup>, 応答周波数:0.5Hz-10kHz)を、衝突点からの位置を変化させて設置し、衝突励起振動の加速度を計測した。実験後にはレーザー変位計でクレータープロファイルを取得して衝突クレーターの形状を調べた。

## 実験結果

クレーター形状は、ポリカーボネート弾丸では、衝突速度を変えても形状は変化しなかった。一方、弾丸密度を変えた場合、弾丸密度が大きくなるとより深いクレーター(直径に対しての深さがより深い形状)が形成された。このことから、クレーターの直径深さ比( $d/D$ )は常に一定ではなく、衝突体の密度によって変化することが明らかとなった。一方、クレーターサイズは $\pi$ スケールリング則で表すことができ、本研究で得られたクレーターサイズに対する実験式は、であった。石英砂標的で観測した加速度波形は、衝突点からの距離によって変化することがわかった。すなわち、衝突点近傍では、加速度波形は単発波形であるが、一定距離以上遠くなると減衰振動波形に変化することがわかった。また、加速度波形の最大値は、衝突速度や弾丸密度にかかわらず形成されたクレーター半径で規格化された距離でスケールリングすることが可能であることがわかった。本研究で得られた加速度減衰の実験式は、である。

さらに、観測した加速度波形を基に弾丸の運動エネルギーが石英砂層の振動エネルギーに分配された割合を見積もった。衝突励起振動の振動エネルギーは、sin波でモデル化した波形の一周期分が通過した領域の運動エネルギーとした。また、振動エネルギーは衝突点からの距離により変化することが分かったため、クレーターリムでの値を比較した。その結果、石英砂標的でのエネルギー変換効率は $8.1 \times 10^{-5}$ となった。Yasui et al., 2015で算出されたガラスビーズ標的で得られた値( $5.7 \times 10^{-4}$ )より一桁小さな値となった。

本研究の結果を用いて、天体衝突により地表面が変化する領域を定量的に見積もった。1)イジェクタ堆積による変化、2)衝突励起振動による変化、の二つに分けて地形が変化する領域を推定したイジェクタ堆積により生

する地表面の変化領域は、。クレータープロフィールとイジェクタ速度に関するスケーリング則から求めた。その結果、クレーター半径の数倍程度に及ぶことがわかった。一方、衝突励起振動による変化は、クレーター半径の2~10倍の領域となり、重力が小さい天体ではより広範囲の領域の地形が変化する可能性があることがわかった。

キーワード：クレーター、レゴリス層、衝突励起振動

Keywords: crater, regolith layer, seismic shaking

## 衝突点近傍の掘削流: “干渉領域”からの高速放出物

Impact-driven flow-field: Hypervelocity material ejection from the interference zone

\*黒澤 耕介<sup>1</sup>、岡本 尚也<sup>1</sup>、玄田 英典<sup>2</sup>\*Kosuke Kurosawa<sup>1</sup>, Takaya Okamoto<sup>1</sup>, Hidenori Genda<sup>2</sup>

1.千葉工業大学 惑星探査研究センター、2.東京工業大学 地球生命研究所

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

天体衝突は天体表層物質を掘削・放出し、物質の再分配を引き起こす。天体衝突が惑星表層のあるいは天体間の物質輸送に果たした役割を探るため、実験的にも理論的にも衝突放出物の速度-質量関係を求める研究が盛んに行われてきた。特に放出物の質量の大部分を占める低速の放出物についてはスケーリング関係式が確立され広く用いられている。ところが衝突点近傍かつ、標的表面付近から放出される高速成分についてはあまりよく理解されていない。高速成分の衝突放出物全体に占める質量は小さいため、あまり重要視されてこなかったことが理由だと思われる。しかし、衝突による惑星間、惑星-衛星間、衛星間の物質交換や、放出物と惑星大気の相互作用といった問題に取り組もうとすると、達成される最大速度についての理解が必要になるであろう。これは放出物が宇宙空間に飛び出すため、あるいは空力加熱によって物質が熔融したりするためには、ある閾値を超える速度が必要だからである。

衝突点近傍・標的表面付近からの衝突掘削を扱う際の困難は、(1)衝突天体が標的へ貫入していく途中で発生する衝撃波によって掘削流が駆動されるため、いわゆる点源近似を用いることができないこと、(2)自由表面から発生する希薄波が衝撃波と干渉し、複雑な流れ場(これを“干渉領域”とよぶ)を形成すること、(3)非線形現象のため解析的に解くことができないことである。Melosh (1984)は近似を用いて、“干渉領域”の厚みや放出速度を解析的に求めているが、衝突点から衝突体直径程度の衝突点近傍にまで結果を外挿するのは危険であると述べている。

そこで我々はiSALE shock physics codeを用いて、衝突点近傍の流れ場を可視化し、標的からの最高放出速度を求める試みを開始した。以下に計算条件をまとめる。今回は簡単のため垂直衝突のみを扱う。計算座標系は二次元円柱座標とした。衝突体と標的はともに花崗岩であると設定し、対応するTillotson EOSを用いた。衝突体半径は便宜上10 kmとしたが、物質強度及び重力を考慮していないので、適当な規格化を施せば計算結果はサイズに依存しない。衝突速度は火星への典型的衝突速度程度の12 km/sとした。標的の計算格子に追跡粒子を導入し、各時間ステップにおける位置、圧力、エネルギー変化を記録した。衝突体が標的に貫入するための特徴時間のおよそ1.5 倍に対応する衝突3秒後までに放出された追跡粒子について解析を実施した。

衝突点近傍・標的表面付近からの追跡粒子は、Melosh (1984)で解析的に推定されたものと定性的にはよく似た挙動を示した。特に重要なのは衝突点近傍・標的表面付近の追跡粒子には衝撃波がほぼ動径方向から、希薄波が上方から入射する点である。衝撃波によって動径方向に加速された後、希薄波によって上方へ更なる加速を受ける。衝撃加熱によって不可逆的に蓄えられた内部エネルギーは上方への運動エネルギーに変換されている。このとき放出速度はRankine-Hugoniot関係式から求められる最大衝撃圧に対応する粒子速度の2倍が上限となる。数値衝突計算を用いることで、衝撃波と希薄波が干渉する場合でも、ある場所における粒子が経験する最大衝撃圧を計算することができる。今回の衝突条件における最高放出速度は~5.5 km/sで衝突速度のおよそ半分であった。今回の衝突条件で5 km/sを超える放出速度を得た物質は最大衝撃圧が40 GPaを超えており、その質量衝突天体の~0.1 wt%程度であった。自由表面から~5層程度の粒子がそれをを超える粒子速度を得て放出されることを確認したが、数値誤差による可能性が排除できておらず、更なる解析が必要である。

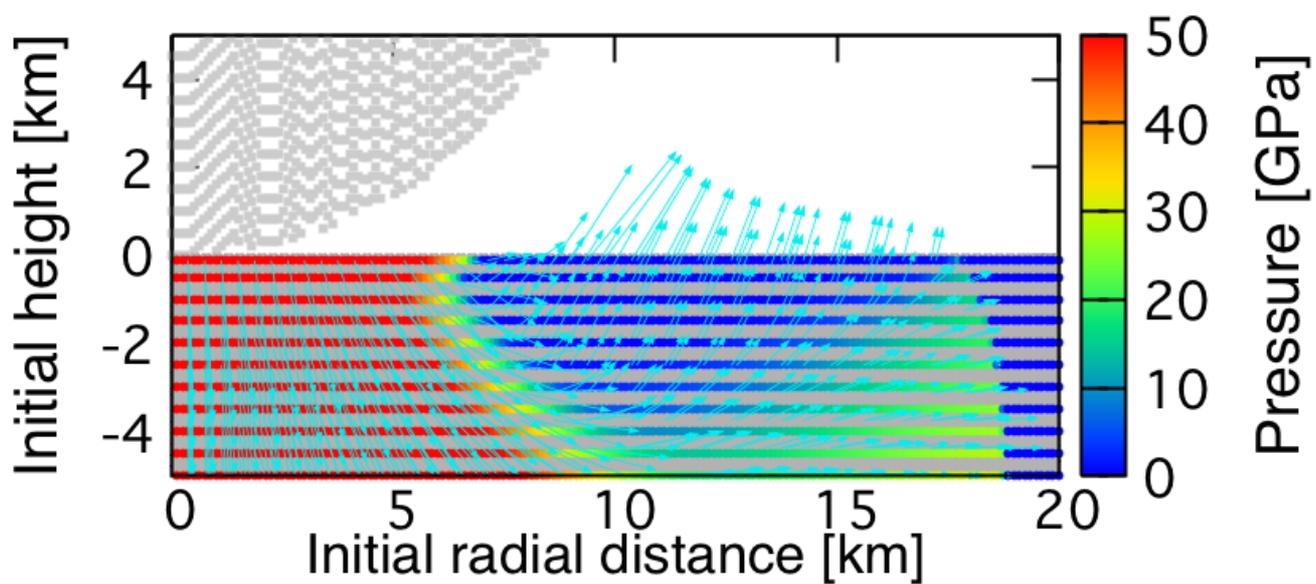
今後は様々な衝突条件に対して数値衝突計算を実施し、干渉領域からの高速放出物についての速度-質量関係式を得る予定である。

## 謝辞

iSALE の 開 発 者 である Gareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausenの各氏に感謝致します。

キーワード：天体衝突、衝突放出物、火星隕石

Keywords: Hypervelocity impacts, Impact ejecta, Martian meteorite



## 集積期における火星マントルへの水の分配

## Water Partitioning into the Martian Mantle during Accretion of Mars

\*齊藤 大晶<sup>1</sup>、倉本 圭<sup>1</sup>\*Hiroaki Saito<sup>1</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>1</sup>

1.北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

1.Department of CosmoSciences, Graduate School of Sciences, Hokkaido University

最新の火星隕石の分析結果から、初期の火星マントルは大量の水（濃度780 ~ 2870 ppm）を保有していた可能性が示唆されている (McCubbin et al., 2012). この推定値は現在の地球の海洋質量 ( $1.4 \times 10^{21}$  kg) のおよそ0.3~1倍に相当する。火星ではプレートテクトニクスは起きなかったと考えられているため、内部の水は集積中にもたらされた可能性が高い。集積中に大量の水を内部に取り込む機構の一つとして、集積エネルギーや原始大気の保温効果によって形成する大規模なマグマオーシャンによる水の吸収が挙げられる。しかしながら集積中にそのようなマグマオーシャンがどう形成されるのかは、これまでのところよくわかっていない。

近年の隕石年代学によると、火星は数 Myr で集積完了した可能性が高い (Dauphas and Pourmand, 2011; Tang and Dauphas, 2013). このことは原始太陽系星雲中で火星の集積が進行したことを示唆している。一方で、原始火星が月サイズ以上になると、微惑星から  $H_2O$  をはじめとする揮発性成分が脱ガスするのに十分な衝突速度が得られる。このことから、原始火星は星雲ガスおよび脱ガス成分の双方からなる、いわゆる混成型原始大気を形成したと予想される。

そこで我々は1次元放射対流平衡モデルを構築し、混成型原始大気の熱的構造について調べた。ここでは集積中の星雲ガス散逸の可能性も想定し、Hill圏における初期星雲ガス圧を  $\sim 6.9 \times 10^{-2}$  Pa (Kusaka et al., 1970), 最小星雲ガス圧を初期値の  $1/10^{12}$  倍 (静水圧平衡近似が破れる値に相当) と仮定し、星雲ガス圧の依存性について調べた。集積時間は隕石年代学と調和的な1- 6 Myrとする。また火星材料物質は、二成分モデル (Wanke and Dreibus, 1988) を適用し、揮発性物質に富み酸化的なCIコンドライト様物質35%, 揮発性物質に枯渇し還元的なEコンドライト様物質65%の混合物とする。脱ガス成分の組成は衝突加熱により生じるケイ酸塩マグマと金属鉄との化学平衡により決定される。脱ガス成分は下層大気を占め、その上空にはHill半径において原始太陽系星雲に接続する水素ヘリウム大気が存在する。原始火星の成長につれた原始大気の進化を数値的に求めた結果、集積時間や星雲散逸の時間スケールによらず、集積期の後半には高温高圧な原始大気が形成され、これに伴い大規模なマグマオーシャンが生じることがわかった。星雲ガスの散逸を無視した場合、原始火星質量が現在の0.3倍以上に成長すると、地表面温度が岩石のソリダス 1500 K を超え、集積完了段階では地表面気圧は 2000bar を超える。一方、急速な星雲散逸を想定した場合、表面温度が岩石のソリダスを超えだすのは原始火星質量が最終質量の0.6 倍に達してからになる。しかしこの場合も集積完了時点での地表面気圧は 800bar を超える。マグマオーシャンに分配される水の量は  $9.6 \times 10^{20}$  kgを上回ると推定され、この分配量は地球海洋質量の  $\sim 0.7$  倍に相当する。これは先に述べた岩石学的証拠と整合的と考えられる。

キーワード：原始火星、マグマオーシャン、水に富んだマントル

Keywords: Early Mars, Magma Ocean, Wet mantle

潮汐固定されたガス惑星の大気大循環の多様性 -- 入射中心星放射強度に対する依存性  
Diversity of atmospheric circulations of tidally locked gas giant planets -- dependence on the incident radiation strength

\*竹広 真一<sup>1</sup>、高橋 芳幸<sup>2</sup>、中島 健介<sup>3</sup>、林 祥介<sup>2</sup>

\*Shin-ichi Takehiro<sup>1</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>2</sup>, Kensuke Nakajima<sup>3</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>2</sup>

1.京都大学数理解析研究所、2.神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻、3.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

1.Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 2.Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

近年の観測機器の性能の向上により多くの太陽系外惑星が発見されるようになってきている。それらの系外惑星のなかには、中心星に潮汐固定され常に同じ面を中心星に向けていると考えられているガス惑星が多数存在している(ホットジュピター)。このようなガス惑星の大気循環のシミュレーションは、地球型惑星の大気大循環モデルを改造拡張して行われてきており、得られている大気大循環構造は赤道で強い西風(赤道超回転)が特徴的である。しかしながら、赤道超回転状態の大気循環が出現する惑星大気パラメーターについてはまだよく知られていない。そこで、本研究は惑星大気パラメーターをさまざまに変化させた大気大循環の数値実験を行って赤道超回転状態の出現条件を見だし、潮汐固定されたガス惑星の大気大循環形態の多様性を探ることを目的とする。今回は入射中心星放射強度を変化させて大気大循環の変化を調べる。

用いるモデルは地球流体電脳倶楽部の惑星大気大循環モデル DCPAM5 である。動径方向に静水圧近似を仮定した 3 次元プリミティブ系に入射短波放射と長波放射を表現するための 2 バンドの放射過程を適用している。入射中心星放射は同じ半球面を常に照らしている。計算領域下面からの熱流はない。惑星大気を特徴づけるパラメーターは系外惑星 HD209458b の値をベースにし、入射中心星放射強度を HD209458b の値から変化させて、数値時間積分を行う。入射中心星放射強度が HD209458b の値( $10^6 \text{ W/m}^2$ )の場合には、強い赤道超回転ジェットが生成し、1 気圧レベルまで達している。入射中心星放射強度を弱めていくにつれて、赤道ジェットは弱まり浅くなっていく。そして入射中心星放射強度を  $10^3 \text{ W/m}^2$  にまで下げると、赤道ジェットは回転と逆方向に向き、高緯度の回転と同方向のジェットが卓越する。この新たに見いだされた、潮汐固定されたガス惑星の赤道逆行ジェットの気大循環レジームは、これまでに提唱されていた赤道順光ジェットの気大循環とは対照的なものである。

キーワード：ホットジュピター、赤道ジェット、赤道超回転

Keywords: Hot Jupiter, Equatorial jets, Equatorial superrotation

系外惑星のための雲微物理モデルの開発：地球と木星の雲観測を用いた妥当性検証

A New Microphysical Model for Exoplanetary Clouds: Testing against the Observations of Terrestrial and Jovian Clouds.

\*大野 和正<sup>1</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>

\*Kazumasa Ohno<sup>1</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

近年のトランジット観測により、大気分子の吸収線を持たない透過スペクトルを持つ系外惑星が複数発見されてきている。このような透過スペクトルをもつ系外惑星は、分子量の高い大気を持っているか、もしくは高層に光学的に厚い雲を持っているかのいずれかであると一般に解釈される。それぞれの系外惑星に対してどちらの解釈がより妥当であるかを明らかにするためには、現実的な雲モデルが必須である。従来の系外惑星雲モデルは、雲粒子の形成・成長の微物理との関連が明らかでない不定パラメーターを含んでおり、また、雲粒子の衝突合体を素過程に基づいて考慮していない。

我々は大気上層に光学的に厚い雲が形成される条件を調べるために、雲形成の微物理に基づいた雲モデルを開発してきた（惑星科学会2015年秋季講演会）。我々のモデルは雲粒子の凝縮、衝突併合による成長を計算し、雲粒子のサイズ・数密度の鉛直分布を大気上昇速度・凝縮ガスの混合率・雲凝結核の数密度の関数として決定する。

モデルの妥当性を検証するため、地球の水雲と木星のアンモニア雲の観測とモデル計算の比較を行った。地球の場合、我々のモデルは地球の平均的な上昇速度、凝結核数密度、地表の湿度を仮定することで、その場観測された雲粒子の質量密度、数密度の鉛直分布、衛星観測から得られた光学的厚みを再現することが分かった。また木星の場合、上昇速度1.2–2 m/sと凝結核数密度 $\sim 5 \times 10^4 \text{ m}^{-3}$ を仮定することで、遠赤外観測によって得られた雲粒子の実効半径、光学的厚み、雲の幾何学的厚みが同時に再現されることが分かった。ここで仮定した上昇速度と凝結核数密度は、ガリレオプローブによるその場観測、先行の2次元雲対流計算の結果と整合的である。

キーワード：系外惑星、雲

Keywords: exoplanet, cloud

## 暴走温室状態の発生条件に関する大気大循環モデル実験

A numerical experiment on occurrence condition of the runaway greenhouse state with a atmospheric general circulation model

\*石渡 正樹<sup>1</sup>、納多 哲史<sup>2</sup>、中島 健介<sup>3</sup>、高橋 芳幸<sup>4</sup>、竹広 真一<sup>5</sup>、林 祥介<sup>4</sup>

\*Masaki Ishiwatari<sup>1</sup>, Satoshi Noda<sup>2</sup>, Kensuke Nakajima<sup>3</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>4</sup>, Shin-ichi Takehiro<sup>5</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>4</sup>

1.北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻、2.京都大学大学院 理学研究科、3.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、4.神戸大学大学院理学研究科、5.京都大学数理解析研究所

1.Faculty of Science, Hokkaido University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, 4.Graduate School of Science, Kobe University, 5.Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

系外惑星での生命存在可能性を念頭に置き、惑星表層における液体の水の存在条件に関する議論が行なわれている（例えば、Kasting et al., 1993）。その中の主要テーマの 1 つが暴走温室状態の発生条件に関する考察である。暴走温室状態とは、表面に海が存在する惑星の湿潤な大気において、入射フラックスが大気によって射出可能な赤外放射量上限値（射出限界）を上回り、熱収支が均衡しえなくなる状態である（Nakajima et al., 1992）。近年の大気大循環モデル（AGCM）を用いた研究では、大気循環の効果や雲のアルベド効果が暴走温室状態の発生条件に強く影響すると議論されている（Leconte et al., 2013; Yang et al., 2013; Wolf and Toon, 2015 など）。これに対して、我々は、暴走温室状態の発生条件は全球平均日射吸収量が赤外放射量最大値を上回ることであると予想している。この予想を確かめるため、大気大循環モデルを用いた数値実験を行ない、地球を想定した日射分布、同期回転惑星を想定した日射分布を与えた場合のそれぞれについて太陽定数の増加に対するモデル大気の変化を調べた。用いたモデルはこれまで我々が開発をおこなってきた大気大循環モデル DCPAM5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>) である。サブグリッドスケールの物理素過程は気象学分野で標準的なパラメータ化の方法を用いて表現する。雲水量は、生成・移流・乱流拡散・消滅（雲水量に比例し、消散時間をパラメータとして与える）を考慮した時間発展方程式を解くことにより求める。地表面は全て比熱が 0 の沼地であると仮定する。GCM 実験の結果、大気放射が灰色であるか否か・雲の有無・日射分布によらず、太陽定数が増大した場合に惑星放射の水平偏差が小さくなった。どの場合でも、赤外放射量最大値を全球平均日射吸収量が越えると暴走温室状態が発生するようである。赤外放射最大値は系の設定に応じて異なるけれども、暴走温室状態が発生するか否かを決定する機構自体は共通であることが示唆された。

キーワード：暴走温室状態、系外惑星、射出限界、大気大循環モデル、生命存在可能性

Keywords: runaway greenhouse state, exoplanet, radiation limit, atmospheric general circulation model, habitability

## 湿潤大気に現れる対流圏界面高度の異なる二つの大気構造

### Two humidity regimes of stratosphere on a moist atmosphere

\*大西 将徳<sup>1</sup>、はしもと じょーじ<sup>2</sup>、倉本 圭<sup>3</sup>、高橋 芳幸<sup>1</sup>、石渡 正樹<sup>3</sup>、高橋 康人<sup>3</sup>、林 祥介<sup>1</sup>

\*Masanori Onishi<sup>1</sup>, George HASHIMOTO<sup>2</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>3</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>1</sup>, Masaki Ishiwatari<sup>3</sup>, Yasuto TAKAHASHI<sup>3</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>1</sup>

1.神戸大学大学院理学研究科、2.岡山大学大学院自然科学研究科、3.北海道大学理学院

1.Graduate School of Science, Kobe University, 2.Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3.Graduate School of Science, Hokkaido University

#### 1. はじめに

ハビタブルゾーンの内側境界は、暴走温室限界と水損失限界で特徴付けられ、Kasting et al. (1993), Kopparapu et al. (2013) は1次元モデルを用いて暴走温室限界、水損失限界を推定した。これらの先行研究は灰色大気による成層圏温度の見積もりを参考に 200K 等温成層圏を仮定しているが、水損失限界の値は cold trap の温度に大きく左右される。Kasting et al. (2015) は1次元放射対流平衡モデルを用いて、 $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  を大気にもつ惑星の温度プロファイルを推定した。その結果、彼等はハビタブルゾーンの推定には成層圏の温度を 150K とすべきと結論している。また Leconte et al. (2013), Wolf & Toon (2015) は3次元モデルを用いて鉛直プロファイルを計算し、成層圏は 140~150K 程度と推定された。これらのモデルは k分布法を用いており、成層圏温度が灰色大気を参考にした 200K よりも低く見積もられたのは、非灰色の効果による。

(Leconte et al. (2013))Arking & Grossman (1972) は理想的な吸収線形の吸収線を持つ大気を考え、放射平衡にある大気温度を推定した。その結果灰色大気に比べ、非灰色大気では上空の温度が下がることを示した。さらに波数による吸収断面積の違いが大きいほど上空の温度は低下し、Lorentz 線形の場合、太陽加熱がなければ、圧力 = 0 Paの極限で、温度は 0 Kとなると述べている。この結果は、圧力の低い大気温度の推定には、波数による吸収断面積の違いを慎重に扱う必要があることを示している。Kasting et al. (2015) などで推定された温度プロファイルでは、圏界面の圧力は、地表面温度によって 1000Pa ~ 1Pa 付近と推定されており、現在の地球と比較してかなり低い圧力に圏界面が現れる。一方でそれらの先行研究は地球モデルを拡張した放射モデルを用いており、低い圧力の圏界面の温度が正しく評価できているか検討の余地がある。本研究では、低い圧力の圏界面温度を推定するために、吸収断面積の波数ごとの違いを十分表現できる line-by-line 放射モデルにより圏界面温度 (cold trap) を推定することを目的とする。

#### 2. モデル

本モデルでは、吸収線形に voigt 線形を仮定した。voigt 線形では、小波数領域では圧力広がり、大波数領域ではドップラー広がりにより吸収線幅が決まるため、小波数領域で吸収線幅の圧力依存性が大きい。つまり小波数領域ほど、低圧では吸収線幅が細くなり、高分解能な計算が求められる。本モデルの波数分解能は、0 - 3000  $cm^{-1}$  で  $10^{-4} cm^{-1}$ , 3000  $cm^{-1}$  以上で  $10^{-2} cm^{-1}$  である。しかしこのような高波数分解能放射モデルでの放射対流平衡計算は難しいため、成層圏は等温の温度プロファイルを仮定し、成層圏温度を変化させた場合の圏界面の放射加熱率の変化から圏界面温度を推定する。大気は窒素 (1bar) と水蒸気を含み、対流圏では飽和、成層圏の水蒸気混合比は一定とする。吸収断面積は HITRAN2008, MT\_CKD 連続吸収モデルを用いており、放射伝達は2流近似 (Toon et al. (1989)) を用いて計算する。

#### 3. 結果

計算の結果、地表面温度によって、2つの圏界面レジームが実現することが示唆された。低温圏界面は 120K 程度であり、このとき成層圏水蒸気混合比は非常に小さい。一方地表面温度が 345K 程度を超えると高温圏界面が存在し、成層圏の混合比は高くなる。本研究で低温圏界面が120K と先行研究より低く推定されたことの要因は、先行研究の波数解像度の問題、もしくは先行研究に含まれている  $CO_2$  の影響が考えられる。

キーワード：水蒸気大気、放射過程、ハビタブルゾーン、水の散逸限界

Keywords: moist atmosphere, radiative property, habitable zone, water loss limit



## 近赤外ドップラー装置IRDによる晩期M型矮星周りの地球型惑星探索

## Search for Earth-like planets around late-M dwarf stars using the infrared Doppler

\*大宮 正士<sup>1,2</sup>、小谷 隆行<sup>2,1</sup>、田村 元秀<sup>3,2,1</sup>\*Masashi Omiya<sup>1,2</sup>, Takayuki Kotani<sup>2,1</sup>, Motohide Tamura<sup>3,2,1</sup>

1.国立天文台、2.アストロバイオロジーセンター、3.東京大学

1.National Astronomical Observatory of Japan, 2.AstroBiology Center, 3.The University of Tokyo

我々は、すばる望遠鏡用太陽系外惑星探索装置IRD (Infrared Doppler instrument) を用いて、晩期M型矮星を公転する地球型惑星の探索を計画している。IRDは、すばる望遠鏡に取り付けることを念頭に製作を進めている天文観測用の近赤外線高分散分光器であり、光周波数コムを用いた波長校正によって近赤外線視線速度精密測定を実現し、ドップラー法での惑星探索を可能とする装置である。本計画は、近赤外線観測での視線速度精密測定を可能とするIRDとすばる望遠鏡の口径の優位性を活かして、他の観測装置ではこれまで困難だった晩期M型矮星のドップラー法による集中的な系外惑星探索を遂行することを目的としている。M型矮星の中でも低温度かつ低質量である晩期M型矮星の周りではハビタブルゾーンが主星に近いので、1m/sの視線速度測定精度が達成できればハビタブルゾーンに位置する地球質量程度の惑星の発見が現実的な観測時間内にて実現可能となる。そのため、この惑星探索では、これまでのドップラー法での惑星探索においてほとんど分かっていなかったハビタブルゾーンに位置する地球質量の惑星を多数発見し、ハビタブル地球型惑星の統計頻度についても迫ることができる。また、地球質量以上の広い質量レンジの惑星に対して検出感度を持ったサーベイを遂行することが可能となり、岩石惑星、氷惑星、ガス惑星を含む惑星系の包括的な理解を実現する。

IRDは2016年夏にはファーストライトを迎え、2017年から本格的なサーベイ観測を開始する予定である。この惑星探索では、すばる望遠鏡を2017年以降の5年間で170日の観測夜を使い、丁寧なサンプルセレクションで選んだ100個の晩期M型矮星をサーベイする計画である。1m/sの視線速度測定精度を達成できれば、種族合成シミュレーションを元にした惑星パラメータ分布とすばる望遠鏡の観測スケジュールなどを考慮した現実的な観測シミュレーションを用いて、惑星発見数の期待値を見積もると、サーベイ期間内に1地球質量の惑星が30個程度、ハビタブルゾーンに位置する地球型惑星が10個発見できることがわかった。また、これらの惑星は軌道が主星に近いのでトランジット起こす可能性が高く、すばる望遠鏡や将来のTMT (30m望遠鏡) を用いたトランジットや直接撮像のフォローアップ観測によって惑星の特徴付けが可能なサンプルを提供できることも期待される。本公演では、観測計画とサーベイサンプル、装置製作の進捗状況を紹介し、ユニークなIRD惑星探索が可能とする新しいサイエンスと系外惑星研究に与えるインパクトについて議論する。

キーワード：地球型惑星、晩期M型矮星、近赤外ドップラー法

Keywords: Earth-like planets, late-M dwarf stars, Infrared Doppler observation

## 窒素・アルゴン同位体を用いた初期火星大気圧の制約

## Constraints on atmospheric pressure on early Mars inferred from nitrogen and argon isotopes

\*黒川 宏之<sup>1</sup>、黒澤 耕介<sup>2</sup>、臼井 寛裕<sup>3</sup>\*Hiroyuki Kurokawa<sup>1</sup>, Kosuke Kurosawa<sup>2</sup>, Tomohiro Usui<sup>3</sup>

1.東京工業大学地球生命研究所、2.千葉工業大学惑星探査研究センター、3.東京工業大学地球惑星科学専攻  
 1.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2.Planet. Explor. Res. Ctr., Chiba  
 Institute of Technology, 3.Dept. of Earth & Planet. Sci., Tokyo Institute of Technology

Geomorphological evidence such as valley networks and deltas on Mars requires repeated episodes of liquid water runoff in the Noachian period. A dense atmosphere possibly caused water-ice being transported to the highlands. Fluvial terrains can be created by episodic melting events of ice under such conditions [1]. The dense atmosphere was lost from Mars, but the mechanism and timing are poorly constrained.

We constructed a one-box atmosphere-hydrosphere model with multiple species ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , and noble gases). We calculated the evolution of the volume and isotopic composition of the Martian atmosphere taking into consideration several processes, including impacts of asteroids and comets, atmospheric escape induced by solar radiation and wind, volcanic degassing, and a gas emission from interplanetary dust particles. A threshold for the atmospheric collapse (0.3 bar) was assumed following recent 3D global-circulation-model simulations [e.g., 2]. Comparing our results with nitrogen and argon isotopic compositions at 4.1 Ga recorded in Allan Hills (ALH) 84001 provided a lower limit of the atmospheric pressure on early Mars.

Since impacts mainly contribute to the evolution of atmosphere during the late accretion at 3.5-4.5 Gyr ago, the atmospheric pressure evolved stochastically for the first ~1 billion years. The atmospheric evolution depends on the volatile abundances in the impactors. In cases where relatively volatile-poor impactors were assumed, the impact erosion prevailed over the injection of volatiles and the atmospheric collapse occurs during this period.

Whereas the nitrogen ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) and argon ( $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) isotopic ratios kept unfractionated values before the collapse, they increased stochastically after the collapse. Impacts of asteroids and comets in a thinner atmosphere increased abundances of nitrogen and argon. It resulted in higher escape rates of these species and subsequently increased their isotope ratios. The cases of a moderately dense atmosphere (> 0.3 bar) at 4.1 Ga are consistent with unfractionated nitrogen and argon isotope ratios recorded in ALH 84001 [3]. This lower limit of the atmospheric pressure is valid regardless of the presence/absence of the Martian magnetic dynamo at 4.1 Ga because the atmospheric nitrogen was removed by photochemical escape driven by solar radiation.

The reported data on the trapped-nitrogen-isotope composition of ALH 84001 are highly scattered (~7 per mil to >200 per mil) in the literature. Identification of the actual nitrogen isotope ratio at 4.1 Ga would help to constrain the evolution of the Martian atmosphere.

Our results provided a lower limit of the atmospheric pressure at 4.1 Ga. If we combine our results with other constraints on the atmospheric pressure on early Mars [4], a moderately dense atmosphere (~0.1-1 bar) was suggested. We suggest that the moderately dense atmosphere was lost after 4.1 Ga by the impact erosion and the escape induced by solar radiation and wind.

[1] Wordsworth, R. et al. (2013) *Icarus*, 222, 1-19. [2] Forget, F. et al. (2013) *Icarus*, 222, 81-99.  
 [3] Mathew, K. J. & Marti, K. (2001) *J. Geophys. Res.*, 106, E1, 1401-1422. [4] Kite, E. S. et al. (2014) *Nature Geosci.*, 7, 335-339.

キーワード：火星、大気、同位体

Keywords: Mars, Atmosphere, Isotopes

## 人工流星生成実験

## Shooting star formation in a laboratory experiment

\*千秋 博紀<sup>1</sup>、黒澤 耕介<sup>1</sup>、岡本 尚也<sup>1</sup>

\*Hiroki Senshu<sup>1</sup>, Kosuke Kurosawa<sup>1</sup>, Takaya Okamoto<sup>1</sup>

1.千葉工業大学惑星探査研究センター

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

A shooting star is caused by an entry of a cosmic dust particle into the planetary atmosphere. The light from the shooting star composed of thermal emission and emission lines from the gas in from of the dust particle and the vapor from the dust particle. It means that the physical and chemical condition of the dust particle can be estimated from a photometric and/or spectroscopic observations. However a shooting star is a sporadic and un-controlled event, and thus the relation between the physical and chemical condition and the resulting spectroscopic observation is estimated by empirical equations.

We are constructing a laboratory experimental system to simulate shooting stars by using a two-stage light gas gun at Planetary Exploration Research Center (PERC), Chiba Instiute of Technology, Japan. This gun shoots a projectile with size of 2 mm into a observational chamber filled with gas. The light from the projectile is observed by high-speed camera with 1 Mfps and its spectrum is taken by spectrometer simultaneously.

We carried out a series of experiments using the system with a variety of projectile composition. The specific spectra relating to the projectile component were confirmed as a function of the location from the projectile (during head-neck-tail structure). We will give the experimental results and discuss the chemical and physical status of shooting star.

キーワード：流星、衝突、分光

Keywords: shooting star, impact, spectroscopy

Shock remanent magnetization measurement using the superconducting quantum interference device microscope

Shock remanent magnetization measurement using the superconducting quantum interference device microscope

\*佐藤 雅彦<sup>1</sup>、黒澤 耕介<sup>2</sup>、潮田 雅司<sup>1</sup>、長谷川 直<sup>3</sup>、小田 啓邦<sup>1</sup>、高橋 太<sup>4</sup>、河合 淳<sup>5</sup>

\*Masahiko Sato<sup>1</sup>, Kosuke Kurosawa<sup>2</sup>, Masashi Ushioda<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>3</sup>, Hirokuni Oda<sup>1</sup>, Futoshi Takahashi<sup>4</sup>, Jun Kawai<sup>5</sup>

1.産業技術総合研究所、2.千葉工業大学、3.宇宙航空研究開発機構、4.九州大学、5.金沢工業大学

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.Chiba Institute of Technology, 3.Japan Aerospace Exploration Agency, 4.Kyushu University, 5.Kanazawa Institute of Technology

Knowledge of the evolution of magnetic field intensity is key to understanding the past evolution of planets. However, magnetic field paleointensity data of terrestrial planets such as Mars and Moon have been poorly obtained because of the lack of appropriate rock samples. To address the problem, we focus on shock remanent magnetization (SRM). There are many impact craters on surface of the terrestrial planets, and the magnetic field originated from the SRM of planetary crust can be measured by spacecraft magnetometer. The magnetic field paleointensity could be estimated using the magnetic field data observed over the impact craters.

In order to estimate the magnetic field paleointensity from the observed magnetic field data, it is crucial to know a structure of the SRM, while the structure remains unclear due to the difficulty in experimental techniques. In this study, to reveal the structure of SRM, we conducted SRM acquisition experiments and magnetic imaging of the SRM sample using the superconducting quantum interference device (SQUID) microscope.

Natural basalt samples with cylindrical form of 10 cm in diameter and 10 cm in length (FURNITURE STONE) were used as a target. Before the SRM acquisition experiments, the basalt samples were subjected to alternating field demagnetization at 80 mT. The two-stage light gas gun at the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) of Japan Aerospace and Exploration Agency (JAXA) was used for the SRM acquisition experiments. A magnetically shielded cylinder of 32 cm in diameter and 100 cm in length was set in a vacuum experimental chamber of the two-stage light gas gun. The magnetically shielded cylinder was constructed with three  $\mu$ -metal layers, and the residual field in the cylinder was  $<0.3 \mu\text{T}$ . A solenoid coil of 26 cm in diameter was set in the magnetically shielded cylinder. The basalt sample was placed at the center of the solenoid coil. The applied field was set to be 0–100  $\mu\text{T}$ , and direction of the applied field was parallel to the cylindrical axis of the basalt samples. An aluminum sphere of 2 mm in diameter was used as the projectile. A nylon slit sabot was used to accelerate the projectile. The impact velocity was  $\sim 7 \text{ km/s}$ , and the impact angle was fixed at  $90^\circ$  from the horizontal.

Using the SQUID microscope at Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), magnetic imaging of the basalt samples were conducted after the SRM acquisition experiments. The basalt cylinder was placed on non-magnetic xyz-sample table. The distance between a surface of the basalt cylinder and the SQUID microscope was set to be  $\sim 1 \text{ cm}$ , and a vertical component of magnetic field over the basalt sample was measured for 6 cm x 6 cm region. The sample imparted SRM in zero-field showed decrease in the magnetic field at center of the crater, corresponding to the increase in sample to sensor distance. On the other hand, the sample imparted SRM in a 100  $\mu\text{T}$  field showed increase in the magnetic field at center of the crater. These results suggest that the basalt samples acquired remanent magnetization as the SRM. In this talk,

we will discuss the structure of SRM based on the results of SQUID microscope measurements.

キーワード：Shock remanent magnetization、SQUID microscope

Keywords: Shock remanent magnetization, SQUID microscope

## 月面ボルダールの衝突破壊による細粒化過程

## Collisional disruption of meter-sized boulders of the Moon

安藤 滉祐<sup>1</sup>、\*諸田 智克<sup>1</sup>Kosuke Ando<sup>1</sup>, \*Tomokatsu Morota<sup>1</sup>

1.名古屋大学大学院環境学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

月などの天体表面はcm以下の粒子であるソイルからcm以上のボルダールまで様々なサイズの物質で覆われている。このような表層構造は新鮮な岩盤への天体衝突で巨礫（ボルダール）が形成され、その後天体衝突などの作用を繰り返すことによって細粒化が進み、形成されると考えられている。このような細粒化プロセスについてはこれまで実験や理論からモデルがたてられてきた。一方で近年、月周回衛星「かぐや」やLR0などによって月表面の高解像度画像が得られ、実際の画像データの解析によるボルダールの細粒化プロセスの検出が可能となってきた。Basilevsky et al. (PSS, 89, 118-126, 2013) は、形成年代が知られている月面の直径180~950 mのクレーター12個に着目し、クレーター周囲に存在する直径2 m以上のボルダールの数密度を計測した。彼らはクレーターの形成年代とボルダールの数密度の関係から、2 mサイズのボルダールの寿命を4000万~8000万年と見積もった。しかしこの研究では、クレーター形成時にボルダールが放出されやすい新鮮な地表と、そうでない古い地表に存在するクレーターを区別しておらず、それぞれのクレーターに伴うボルダール数密度の違いが形成年代によるものであるか、初期状態の違いであるかが分からないなどの問題が残されていた。また、ボルダールのサイズ頻度分布の時間進化については議論していない。そこで、本研究ではこれらの改善点をふまえ、ボルダール細粒化プロセスを検出すること、また、ボルダールサイズ頻度分布の時間進化のモデルを構築し、画像解析の結果と比較をすることでボルダール破壊を支配するパラメーターに制約を与えることを目指す。

本研究では、直径92.5kmのCopernicusクレーターと直径77.3kmのKingクレーターのフロアを解析領域とした。このようなクレーターのフロアは形成時に融解・固化を経験しており、新鮮な岩盤が形成されるため、その後この領域に形成される小クレーターから放出されるボルダールはその初期の数密度やサイズ頻度分布などに大きな差がないと期待される。このような領域に存在する直径210~920 mの小クレーターについてCopernicusで12個、Kingで4個に着目し、その周囲1半径の領域に存在する小クレーター形成時に放出されたと考えられる直径5 m以上のボルダールのサイズ頻度分布を計測した。また、小クレーターの周囲1/2半径分の領域に存在する小クレーター形成以後に形成されたと考えられる直径10m以上の微小クレーターのサイズ頻度分布からクレーター年代学を用いて小クレーターの形成年代を決定した。ボルダールの数密度と小クレーターの形成年代を比較することで、ボルダール消失の時間スケールの決定を行った。また、衝突天体のサイズ分布と衝突頻度、ボルダールの衝突破壊に対する強度をパラメーターとして、衝突破壊によるボルダールサイズ頻度分布の時間進化モデルを構築し、観測結果との比較を行った。

各小クレーターで観測されたボルダールのサイズ分布の形状が大きく変化していないことから、ボルダールの消失時間に強いサイズ依存性はないことが分かった。また、それぞれの小クレーターの形成年代と、その周囲に存在するボルダールの数密度からボルダール数密度の時間進化を求めた結果、直径5 m以上のボルダールの数密度は年代とともに減少しそのタイムスケールは数千万年程度であることが分かった。またモデル計算の結果から、衝突破壊によるボルダールのサイズ頻度分布の時間進化は衝突天体のサイズ分布の傾きや衝突頻度、ボルダールの破壊強度に大きく依存することが分かった。ボルダールの減少の観測結果とモデル計算の比較から、先行研究で挙げられている衝突天体のサイズ分布のうち、ベキの傾きが-3程度のパラメーターを与えると、モデル計算ではボルダールのサイズ頻度分布の傾きの絶対値が小さくなる一方、観測からは大きな傾きの変化が見られなかった。このため、月面におけるcmサイズの天体の衝突頻度の傾きが-3よりも大きいことを示唆している。

キーワード：月、ボルダール、衝突破壊

Keywords: Moon, boulder, collisional disruption

## 室内衝突実験で形成されたクレーター周辺の誘電率・密度・クラック量の関係

Relation among the permittivity, density, and volume fraction of crack around craters formed by laboratory impact experiment

\*石山 謙<sup>1</sup>、熊本 篤志<sup>1</sup>、高木 靖彦<sup>2</sup>、中村 教博<sup>1</sup>、長谷川 直<sup>3</sup>

\*Ken Ishiyama<sup>1</sup>, Atsushi Kumamoto<sup>1</sup>, Yasuhiko Takagi<sup>2</sup>, Norihiro Nakamura<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>3</sup>

1.東北大学、2.愛知東邦大学、3.ISAS/JAXA

1.Tohoku University, 2.Aichi Toho University, 3.ISAS/JAXA

月の表層の地質は、アポロ着陸地点において、コアサンプルの密度測定[e.g., Carrier et al., 1991]および、月の地震波観測[e.g., Cooper et al., 1974]から浅いほど密度が小さいことが示されている。月の表層ほど、隕石衝突由来のクラックが多く含まれることに起因すると考えられている[e.g., Cooper et al., 1974]。また、近年では、月周回衛星SELENE (かぐや) による月レーダーサウンダー (LRS) 観測により、湿りの海などで表層の誘電率推定が推定され、誘電率・密度・空隙率の間の経験的な関係式[e.g., Carrier et al., 1991]を用いることよって、~19%以上の高い空隙率をもつことが示唆された[Ishiyama et al., 2013]。しかし、有効媒質モデル[e.g., Kärkkäinen et al., 2000]によると、媒質中のクラックの異方性によって、誘電率と空隙率の間の関係は、一意に決まらないことが報告されており、レーダー観測に基づく月表層の地質の議論に不確実性を与える。本研究では、(1) 衝突実験で生成した衝突クレーター周辺の誘電率へのクラックの分布の影響を評価し、さらに、(2) レーダー観測に基づく誘電率からの空隙率や密度の推定方法の妥当性を検討する。

本研究の衝突実験は、宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス銃を使用して行われた。最初に、標的とする20 cmx 20 cmx10 cmのウクライナ産の玄武岩試料を2つ用意し、各標的試料に、直径0.32cmのステンレス球 (質量0.133g) を~3.5 km/sおよび~5.5km/sの速度で衝突させて、衝突クレーターを作成した。次に、形成されたクレーター周辺部で、クラックの異方性による誘電率の相違を調べるため、1つの標的試料から衝突面に平行な方向と垂直な方向に沿った直径2.5cm・長さ約8~10cmの円柱状のコアサンプルを切り出した。最後に、切り出したコアサンプルを約3~4mmの厚さごとに切断し、厚片を作成した。クラック分布の同定をやすくするため、厚片の表面を研磨した。

本研究では、作成した厚片の誘電率・密度・クラック量の測定を行った。誘電率は、誘電体測定システム (東陽テクニカ社製・12962A型誘電率測定インターフェイスおよび1260型インピーダンスアナライザ) で5MHzの周波数で測定した。この周波数は、SELENE/LRSの中心周波数に合わせて設定した。密度は、厚片の重量と体積の測定から計算した。また、クラック量は、厚片の表面をスキャナで読み取り、厚片の表面積に対するクラックの面積の比から推定した。

測定の結果、クレーター中心からの距離の増加とともに、クラック量は減少していき、誘電率と密度は増加する傾向が見られた。これらのパラメータは、クレーター周辺のクラック分布の特徴に強く関係していた。また、~5.5km/sの速度条件における標的試料において、衝突面に平行な方向と垂直な方向に沿ったコアサンプルの比較をすることで、我々はクラックの異方性に対応する誘電率の相違を確認し、これが有効媒質モデル[e.g., Kärkkäinen et al., 2000]で説明されうることを示した。しかしながら、この相違は、アポロサンプルの誘電率計測値に見られるばらつきより十分に小さいため、レーダー観測で推定した月表層の誘電率からその密度や空隙率を推定する方法は、妥当であったと結論される。

## 粒径分布と不規則粒子形状が粉体熱伝導率に与える影響の実験的調査

Experimental investigation on effect of particle size distribution and irregular shape on thermal conductivity of powdered materials

\*坂谷 尚哉<sup>1</sup>、小川 和律<sup>2</sup>、荒川 政彦<sup>2</sup>、田中 智<sup>1</sup>

\*Naoya Sakatani<sup>1</sup>, Kazunori Ogawa<sup>2</sup>, Masahiko Arakawa<sup>2</sup>, Satoshi Tanaka<sup>1</sup>

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、2.神戸大学

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Kobe University

月や小惑星表層を覆うレゴリスの熱伝導率は、天体の表面温度や熱進化を計算する上で、最重要の物性値である。しかし、レゴリスのような粉体物質の真空下における熱伝導率は、温度や粒子サイズ、空隙率など、様々なパラメータに依存し、それらの依存関係が十分に理解されていないため、パラメータの値からレゴリスの熱伝導率を一意に推定することは難しいのが現状である。そこで、我々はこれまでに主にガラスビーズを用いて、熱伝導率のパラメータ依存性の実験的な調査を行ってきた。その結果を統合して、パラメータの値から熱伝導率の予測を可能とする、粉体の熱伝導率モデルを構築することに成功した。しかし、本モデルには、粒子サイズの分布や粒子のマクロな形状の効果は明示的には含まれておらず、これらの影響を評価することが実際のレゴリスへ適用するための重要な課題となる。

本研究では月レゴリス模擬物質JSC-1A、および、JSC-1Aをふるいによってサイズ分級したサンプルの熱伝導率計測実験を実施した。これらの実験結果から、粒子サイズ分布と粒子形状が熱伝導率に与える影響を考察した。

JSC-1Aの粒子サイズは 1 mm 以下であり、体積メディアン径（体積累積頻度分布における 50% 粒径）は約 100  $\mu\text{m}$ 、体積算術平均径は 40  $\mu\text{m}$  である。これをふるい分けし、53-63  $\mu\text{m}$ 、90-106  $\mu\text{m}$ 、355-500  $\mu\text{m}$ 、710-1000  $\mu\text{m}$  のサンプルを準備した。未ふるいのサンプルを“JSC-0 (Original)”、ふるい分けしたサンプルを“JSC-S (Sieved)”と呼ぶこととする。これらのサンプルの熱伝導率は線加熱法で計測した。計測中の真空度は 0.01 Pa であり、測定温度範囲は -25~60°C である。各サンプルの熱伝導率の温度依存性は、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を切り分けるために使用した。測定サンプルの粒子サイズ、密度、空隙率を表 1 にまとめる。

実験の結果から明らかになった JSC-0 および JSC-S の固体伝導率と輻射伝導率を図 1 に示す。JSC-S の空隙率はそれぞれ異なるため、我々の熱伝導率モデルを用いて JSC-0 と同じ空隙率 42% に補正した結果も合わせて示す。また、比較として、空隙率 42% のガラスビーズの結果も示す。

#### (1) 粒径分布の影響：JSC-0 と JSC-S の比較

JSC-0 の固体伝導率は、おおよそ JSC-S 90-106  $\mu\text{m}$  の固体伝導率と同程度であることがわかった。この粒子サイズは JSC-0 の体積メディアン径と同程度である。つまり、ある粒径分布を持つ粉体物質の固体伝導率は、体積メディアン径を持つサンプルの固体伝導率として表すことが可能であることを示唆している。輻射伝導率に関しても同様に JSC-S 90-106  $\mu\text{m}$  と同程度であり、同様の示唆を得た。これらの結果から、広い粒径分布を持った粉体サンプルの熱特性に関しての代表粒径は、体積メディアン径であると言える。

#### (2) 粒子形状の影響：JSC-S とガラスビーズの比較

JSC-S の固体伝導率は、同じサイズのガラスビーズと同程度、もしくは低い値であった。これは形状の違いを反映しているものと考えられ、球形粒子に比べて、不規則形状粒子は低い固体伝導率を持つことを示唆している。一方、JSC-S とガラスビーズは、同程度の輻射伝導率を持つことがわかった。すなわち、熱輻射に対する粒子形状の影響は小さく、球形として近似したモデルを適用することが可能である。

以上は実験結果からの示唆であるが、本発表では粒子サイズ分布と粒子形状の効果に関しての理論的考察についても紹介する。

キーワード：レゴリス、熱伝導率

Keywords: Regolith, Thermal conductivity

Table 1: Sample list

Sample	Particle size	Density	Porosity
JSC-O	< 1000 $\mu\text{m}$ median 100 $\mu\text{m}$	1690 $\text{kg}/\text{m}^3$	42%
JSC-S	710-1000 $\mu\text{m}$	980 $\text{kg}/\text{m}^3$	66%
	355-500 $\mu\text{m}$	1110 $\text{kg}/\text{m}^3$	62%
	90-106 $\mu\text{m}$	1460 $\text{kg}/\text{m}^3$	50%
	53-63 $\mu\text{m}$	1540 $\text{kg}/\text{m}^3$	47%

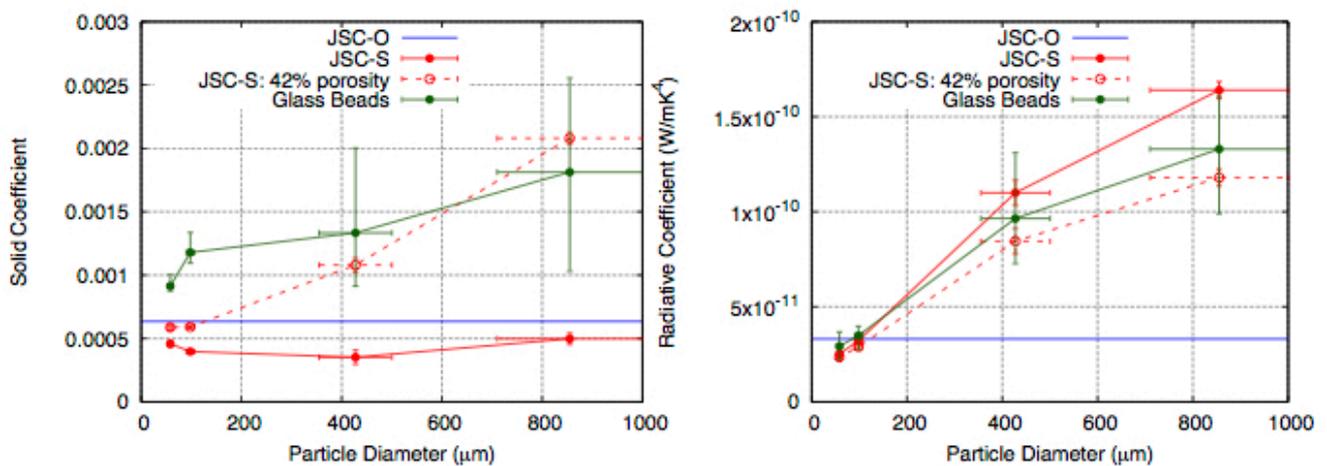


Figure 1: Solid (left) and radiative (right) coefficient of JSC-O (blue), JSC-S (red), and glass beads (green). Dashed red points represent each coefficient that is corrected to porosity of 42%.

## はやぶさ2レーザ高度計 (LIDAR) 初期運用のまとめ

## Initial operation of Hayabusa2 laser altimeter (LIDAR)

\*野田 寛大<sup>1</sup>、水野 貴秀<sup>2</sup>、並木 則行<sup>1</sup>、千秋 博紀<sup>3</sup>、國森 裕生<sup>4</sup>、尾川 順子<sup>2</sup>、竹内 央<sup>2</sup>、清水上 誠<sup>1</sup>

\*Hiroto Noda<sup>1</sup>, Takahide Mizuno<sup>2</sup>, Noriyuki Namiki<sup>1</sup>, Hiroki Senshu<sup>3</sup>, Hiroo Kunimori<sup>4</sup>, Naoko Ogawa<sup>2</sup>, Hiroshi Takeuchi<sup>2</sup>, Makoto Shizugami<sup>1</sup>

1.国立天文台、2.宇宙航空研究開発機構、3.千葉工業大学、4.情報通信研究機構

1.National Astronomical Observatory of Japan, 2.Japan Aerospace Exploration Agency, 3.Chiba Institute of Technology, 4.National Institute of Information and Communications Technology

The Hayabusa2 asteroid explorer was launched on December 3, 2014. The spacecraft orbited around the Sun for a year, and after an Earth Gravity Assist operation, the spacecraft was inserted into a transfer orbit to the target asteroid 162173 Ryugu for the arrival at 2018. The first checkout of a laser altimeter called LIDAR onboard Hayabusa2 was done on January 23, 2015, and a rehearsal operation for the coming laser link experiment was done on August 27, 2015, and the laser link experiments had been done between October and December 2015. In this paper, we will discuss the following three issues of the LIDAR based on the result of the initial operation. i) Estimation of the boresight direction of the receiving telescope: We conducted an experiment in which laser pulses were transmitted toward the LIDAR from ground-based satellite laser ranging stations and the LIDAR bounced the laser toward the Earth. We call the experiment as laser link experiment. In this experiment, we set the observational mode as "optical transponder" mode. As the boresight direction was not determined well at first, the attitude of the spacecraft was scanned spirally outward from a center with 1 mrad separation, and the direction of the boresight of the receiving telescope was estimated when the LIDAR detected the laser pulses from the ground. Based on results of three days experiment, we found out that the boresight direction was closer with 0.2 degrees to the -Z axis of the spacecraft compared with what was measured before the launch with alignment cubes. However, the estimated boresight directions differs about 1 mrad for each day. So far we do not have any good reasons for that. Therefore, we concluded that the boresight was determined with the ambiguity of 1 mrad, and it must be updated after arriving at the target asteroid by detecting notable topographic features. The alignment between the transmitting and the receiving telescope has not been confirmed yet, because we have not detected the downlink laser pulses from the LIDAR on the ground station. ii) Confirmation of the ranging function: In the normal ranging, a gate is set just after the laser is transmitted to inhibit the detection of the laser. As a checkout of the instrument, however, we did not set the gate so that the scattered stray light can be detected to make the ranging circuit operated. We call this operation "non-gate ranging". During the initial checkout, we conducted the non-gate ranging for three times, on January 23, August 27, and December 16. We confirmed that the ranging circuit worked without any problem on each day. The value of the pseudo range (the time between transmission and reception of the laser) did not show any change for each day. The averaged laser power was also confirmed normal, taking into account the deviation from the averaged value. The reception power changed in accordance with the transmission energy. Considering all these evidences, we concluded that the ranging function was normal. iii) Evaluation of the reception noise level: In both ranging mode and optical transponder mode, we observed such phenomenon that the detection flags became ON though the reception power showed zero, and that the frequency of this phenomenon increased as the smaller threshold level of the reception was set. Assuming that this was because of the noise from the AD converter, we conducted a test operation on August 27 to clarify the boundary in which the frequency increased. As a result, we found that the threshold level at which noise increased as between 12 mV and 14 mV. In the ranging mode, the

recommended threshold level is 27 mV or 45 mV, therefore practically the influence of the noises will be insignificant. However, in the "dust counting mode" which aims to detect the levitation dust near the asteroid, the threshold will be set comparable or lower than this value, because the detection level estimated from the dust flux is expected to be low.

キーワード：はやぶさ2、小惑星、レーザ高度計

Keywords: Hayabusa2, asteroid, laser altimeter

JUICE/GALA-J (1) : JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA) - 概要および日本チームの役割  
 JUICE/GALA-J (1) : The Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission  
 - Introduction, current status, and role of the Japan team

\*塩谷 圭吾<sup>1</sup>、並木 則行<sup>2</sup>、小林 正規<sup>3</sup>、木村 淳<sup>4</sup>、荒木 博志<sup>2</sup>、野田 寛大<sup>2</sup>、押上 祥子<sup>2</sup>、鹿島 伸悟<sup>2</sup>、石橋 高<sup>3</sup>、小林 進悟<sup>5</sup>、尾崎 正伸<sup>1</sup>、水野 貴秀<sup>1</sup>、宇都宮 真<sup>1</sup>、斎藤 義文<sup>1</sup>、東原 和行<sup>1</sup>、鎌田 俊一<sup>5</sup>、松本 晃治<sup>2</sup>、倉本 圭<sup>5</sup>、佐々木 晶<sup>6</sup>、岩村 哲<sup>7</sup>、飯田 光人<sup>8</sup>、松本 吉昭<sup>8</sup>、藤井 雅之<sup>9</sup>、藤代 尚文<sup>10</sup>、山室 智康<sup>11</sup>、Lingenauber, Kay<sup>12</sup>、Behnke, Thomas<sup>12</sup>、Oberst, Juergen<sup>12</sup>、Jaenchen, Judit<sup>12</sup>、Loetzke, Horst-Georg<sup>12</sup>、Michaelis, Harald<sup>12</sup>、Hussmann, Hauke<sup>12</sup>

\*Keigo Enya<sup>1</sup>, Noriyuki Namiki<sup>2</sup>, Masanori Kobayashi<sup>3</sup>, Jun Kimura<sup>4</sup>, Hiroshi Araki<sup>2</sup>, Hiroto Noda<sup>2</sup>, Shoko Oshigami<sup>2</sup>, Shingo Kashima<sup>2</sup>, Ko Ishibashi<sup>3</sup>, Shingo Kobayashi<sup>5</sup>, Masanobu Ozaki<sup>1</sup>, Takahide Mizuno<sup>1</sup>, Shin Utsunomiya<sup>1</sup>, Yoshifumi Saito<sup>1</sup>, Kazuyuki Touhara<sup>1</sup>, Shunichi Kamata<sup>5</sup>, Koji Matsumoto<sup>2</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>5</sup>, Sho Sasaki<sup>6</sup>, Satoru Iwamura<sup>7</sup>, Teruhito Iida<sup>8</sup>, Yoshiaki Matsumoto<sup>8</sup>, Masanori Fujii<sup>9</sup>, Naofumi Fujishiro<sup>10</sup>, Tomoyasu Yamamuro<sup>11</sup>, Kay Lingenauber<sup>12</sup>, Thomas Behnke<sup>12</sup>, Juergen Oberst<sup>12</sup>, Judit Jaenchen<sup>12</sup>, Horst-Georg Loetzke<sup>12</sup>, Harald Michaelis<sup>12</sup>, Hauke Hussmann<sup>12</sup>

1.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、2.国立天文台、3.千葉工大、4.東京工業大学 地球生命研究所、5.北海道大学、6.大阪大学、7.MRJ、8.プラネット、9.ファミサイエンス、10.アストロオプト、11.オプトクラフト、12.ドイツ航空宇宙センター

1.JAXA/ISAS, 2.NAOJ, 3.CIT, 4.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 5.Hokkaido University, 6.Osaka University, 7.MRJ, 8.PLANET, 9.FAM Science, 10.Astro-Opt, 11.OptCraft, 12.DLR

We present an introduction, current status, and especially role of the Japan team for the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE) mission. JUICE is a mission of ESA to be launched in 2022, and GALA is one of the payloads of JUICE.

Major objectives of GALA are to provide topographic data of Ganymede, the largest satellite of Jupiter, and to measure its tidal amplitudes. The latter is crucially important to detect and to characterize an underground ocean on Ganymede. Furthermore, GALA support geological studies, e.g., identification of characterization of tectonic and cryo-volcanic regions, impact basins, and craters. GALA also provides information on surface roughness and the albedo.

For the laser altimetry, GALA emits and receives laser pulses at about 500 km altitude above Ganymede. Wavelength, energy, and nominal repetition frequency of the laser pulse are 1064 nm, 17 mJ, and 30 Hz, respectively. Reflected beam from the Ganymede surface is received by the receiver telescope with 25 cm diameter aperture, re-focused by the BEO including a narrow band-pass filter, and then detected by the APD detector.

Development of GALA is carried out in international collaboration from Germany, Japan, Switzerland, and Spain. GALA-Japan will develop the Backend Optics (BEO), the Focal Plane assembly (FPA) including an avalanche photo-diode (APD) detector, and the Analog Electronics module (AEM) in the receiver chain. It should be noted that responsibility of development of the receiver telescope has been moved from Japan to Germany. Based on the heritage of studies for the telescope, GALA-Japan will contribute to the receiver telescope development through the German team.

キーワード：JUICE、GALA、木星、氷衛星、ガニメデ、レーザー高度計

Keywords: JUICE, GALA, Jupiter, Icy moon, Ganymede, Laser altimeter

## エンケラドスの軌道進化と潮汐加熱

## Orbital and tidal evolution of Enceladus

\*中嶋 彩乃<sup>1</sup>、井田 茂<sup>1</sup>、木村 淳<sup>2</sup>\*Ayano Nakajima<sup>1</sup>, Shigeru Ida<sup>1</sup>, Jun Kimura<sup>2</sup>

1.東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻、2.東京工業大学地球生命研究所

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

エンケラドスは土星中型衛星の中で唯一熱的に活発な天体として知られているが、質量、位置関係からも他天体に比べて特別な要素がなく、その理由は明らかになっていない。本研究では、新たに示唆された土星の散逸係数 $Q_{\text{Saturn}}=1680$ を用いて土星中型衛星の潮汐軌道進化を計算し、潮汐加熱による熱量の推定を行った。

探査機カッシーニにより、エンケラドスから約16GWの赤外放射が観測された (Howett et al. 2011)。しかし、一般的に用いられてきた $Q_{\text{Saturn}}=18000$ を用いた場合、平衡の熱放出の見積もりは1.1 GWとなり、観測値を説明することができず、間欠的な熱放出などが考えられていた。近年、アストロメトリ法を用いた分析によって、 $Q_{\text{Saturn}}=1680$ が示唆された (Lainey et al. 2010)。

$Q_{\text{Saturn}}=1680$ の場合、土星円盤は後から捕獲された天体が潮汐破壊を受けることによって形成され、土星中型衛星はその円盤の縁から形成されたと考えられることになる (Charnoz et al. 2011)。この場合、エンケラドスの方がテティスより早くリングから形成される。その結果、エンケラドスとテティスは潮汐軌道進化において、必ず軌道が接近することになる。

われわれの軌道計算によれば、軌道が接近する時、平均運動共鳴に捕獲される。テティスはエンケラドスと比較して質量が大きく潮汐軌道進化が速いので、エンケラドスはこの共鳴関係を維持したままテティスの軌道進化に引きずられ、離心率が永年的に大きく増加し、やがて軌道交差を起こし、エンケラドスはテティスの内側に飛ばされて、現在の軌道順序になる。内側に飛ばされた後は、エンケラドスの軌道はテティスから離れ、エンケラドスの大きな離心率は衛星自身の潮汐により減衰される。その際に莫大なエネルギー散逸が起こり、現在の16GWの熱放射を説明できる可能性があることがわかった。このようなプロセスはエンケラドスのみで起こるため、エンケラドスのみが熱的に活発であることが説明できる。

キーワード：エンケラドス、潮汐加熱、軌道進化、平均運動共鳴

Keywords: Enceladus, tidal heating, orbital evolution, mean motion resonance

## エンセラダスの内部熱構造：氷地殻の緩和状態からの示唆

## Interior thermal state of Enceladus: an inference from the relaxation state of its icy shell

\*鎌田 俊一<sup>1</sup>、Nimmo Francis<sup>2</sup>\*Shunichi Kamata<sup>1</sup>, Francis Nimmo<sup>2</sup>

1.北海道大学 創成研究機構、2.カリフォルニア大学サンタクルーズ校

1.Creative Research Institution, Hokkaido University, 2.UC Santa Cruz

土星の氷衛星エンセラダスの南極領域は極めて活動的な領域であり、カッシーニ探査機によって観測された膨大な発熱量は、未だ物理的・化学的に説明が付かない程大きなものである。この熱の起源を解き明かすためには、内部温度構造を制約することが重要である。本研究では、エンセラダスの内部温度構造について2つの時間スケールの観点から制約を試みる。エンセラダス南極領域では地下海は周囲よりも分厚くなっており、その分氷地殻は薄くなっていると考えられている。この地殻下端における「地形」は時間とともに粘性緩和すると考えられるが、この粘性緩和の時間スケールは地殻深部での温度構造に依存する。もし地殻下部が熱く粘性率が低い場合には同時間スケールは短く、局所的に分厚い地下海の維持は困難であろう。しかし粘性緩和により水平流動した分だけ融解するのであれば、局所的に分厚い海が維持されるであろう。したがって現在のエンセラダスの氷地殻下部においては、粘性緩和と融解の2つの時間スケールが拮抗していると考えられる。本研究では、氷地殻の厚さや総発熱量など様々なパラメータを変えた粘弾性変形計算を行い、これらの時間スケールの比較を行った。その結果、長寿命放射性核種の壊変による熱0.3 GW [Roberts & Nimmo, 2008]と潮汐加熱1.1 GW [Meyer & Wisdom, 2007]のみを考えた場合、粘弾性変形の時間スケールは融解の時間スケールも遙かに短くなることが分かった。また、両時間スケールが等しくなるためには上記の約10倍の発熱量が必要であることが分かった。このことは、現在エンセラダスの熱構造は定常状態になく、過去に蓄えられた熱を放出していることを示している。

キーワード：エンセラダス、氷衛星、粘弾性

Keywords: Enceladus, Icy satellite, Viscoelastic

## 熱伝導率の深さ依存性と強い圧縮性をもつ流体の熱対流シミュレーション：スーパー地球のマントル対流に対する考察

Numerical experiments on mantle convection of super-Earths with variable thermal conductivity and adiabatic compression

\*亀山 真典<sup>1</sup>、山本 真由美<sup>1</sup>

\*Masanori Kameyama<sup>1</sup>, Mayumi Yamamoto<sup>1</sup>

1. 国立大学法人愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

1. Geodynamics Research Center, Ehime University

巨大な地球型惑星「スーパー地球」が近年に次々と発見されてきたことを受け、スーパー地球のマントルダイナミクスの研究が現実味のあるターゲットとなってきた。その際に考慮すべき重要な点の1つは、スーパー地球のマントル内に期待される高い圧力である。これにより、スーパー地球のマントル内部では物性値が大きく変化するだけでなく、断熱圧縮の効果が流れの様式に強く影響していると考えられる。本研究では強い圧縮性に加え、粘性率・熱伝導率の空間変化を持つ流体の熱対流シミュレーションを行い、スーパー地球のマントル対流の様相を考察した。

本研究では地球の10倍の質量を持つスーパー地球のマントルを想定し、深さ6000km、縦横比1:4の2次元箱型領域内での圧縮性流体の熱対流を考える。ここでは非弾性流体近似を用いることにより、流体の上昇/下降に伴う断熱的温度変化の効果をとり入れている。さらにマントル物質の粘性率は温度とともに指数関数的に減少し、熱伝導率は深さとともに指数関数的に増加すると仮定した。これらの物性量の依存性の強さを系統的に変化させて熱対流シミュレーションを行い、内部の対流様式や熱構造の変化を観察した。

その結果、粘性率の温度依存性と熱伝導率の深さ依存性の双方とも十分に大きい場合には、上面沿いに発達する「冷たくて固いふた」に加えて、底面直上には「深部成層圏 (deep stratosphere)」とも呼ぶべき特異な層が形成されることが分かった。この層の内部は (i) 安定な温度成層と (ii) 鉛直方向の流れが非常に弱い、という点で特徴づけられ、気象学の「成層圏」の性質によく似ている。この特異な層が発達する理由は、上面で「冷たくて固いふた」が厚く発達したことに加え、深部での熱伝導率が高くなっていることである。この両者によってマントル内部の温度が全体的に上昇し、断熱温度変化が鉛直方向の流れを抑制する効果が強まった結果、安定な温度成層をもつ「深部成層圏」が形成されたと理解することができる。さらに熱伝導率の深さ依存性のみを変化させて、「深部成層圏」が形成された場合とされなかった場合で熱輸送効率を比較したところ、熱伝導の寄与も含めた全体的な熱輸送効率は「深部成層圏」が形成された場合のほうがむしろ高くなっていることも分かった。

本研究の結果より、粘性率の温度依存性と熱伝導率の深さ依存性の双方とも十分に大きいマントルをもつスーパー地球では、表面に「冷たくて固いふた」が、加えてマントル最下部には「深部成層圏」が形成されることが期待される。「深部成層圏」の形成により、マントル対流はあまり活発でなく、マントル最下部からの上昇流がほとんど発生しない反面、マントル全体では熱輸送効率が高いために核の冷却は進み、核の対流運動が促進される可能性が考えられる。よって「スーパー地球」とは、プレートテクトニクスやホットスポット火山はないものの、固有の磁場を持っている惑星かもしれない。

キーワード：スーパー地球、マントル対流、断熱圧縮

Keywords: super-Earths, mantle convection, adiabatic (de)compression

## 磁極反転を記述する高次元スピンモデル

## High dimensional coupled spin model for polarity reversals

\*國友 有与志<sup>1</sup>、中道 晶香<sup>2</sup>、原 哲也<sup>1</sup>

\*Ariyoshi Kunitomo<sup>1</sup>, Akika Nakamichi<sup>2</sup>, Tetsuya Hara<sup>1</sup>

1.京都産業大学、2.京都産業大学神山天文台

1.Kyoto Sangyo University, 2.Koyama Astronomical Observatory, Kyoto Sangyo University

地球や太陽での磁極反転を記述するモデルとして、マクロスピンモデルが提案されている (Nakamichi et al. 2012, Mori et al. 2013)。このモデルは、まず天体内部の対流構造によって発生した複数の渦構造に電流が巻き付き、マクロな方向をもつ磁場が生成される。そして、このマクロな磁場構造をマクロスピンと呼ぶこととし、それらの相互作用によって磁極の振る舞いを表すというものである。このモデルは、磁極の定常期の存在や、その持続時間のランダム性、急激で間欠的な反転、パワースペクトル等、実際の地磁気の観測的特徴をよく再現する。また、太陽に対して適用した場合は、太陽で特徴的な磁極反転の周期性まで再現することができる。今回、我々は、円周上を動くマクロスピンモデルの次元を上げ、球面上を動くようなモデルとする研究を行った。その結果、磁極反転の特徴以外にも、先行研究では不可能であった磁極の極付近でのふらつきの観測データとの比較が可能となり、より多くの種類の観測事実を再現でき得ることが分かった。また、磁極の従う統計分布に関しては、Lévy分布やLog-Normal分布に従うといった研究結果が報告されている (Carbone et al., 2006, Ryan & Sarson, 2007)。そこで、我々はこの高次元モデルを用いて統計的な研究を行い、これらの提案されている分布関数との比較も行った。

キーワード：地磁気、太陽磁場、結合スピン

Keywords: geomagnetism, solar magnetism, coupled-spin