

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¹、奥住 聡¹、佐々木 貴教²

*Yuhito Shibaïke¹, Satoshi Okuzumi¹, Takanori Sasaki²

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¹、*奥住 聡¹、井田 茂²Takao Sato¹, *Satoshi Okuzumi¹, Shigeru Ida²

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.

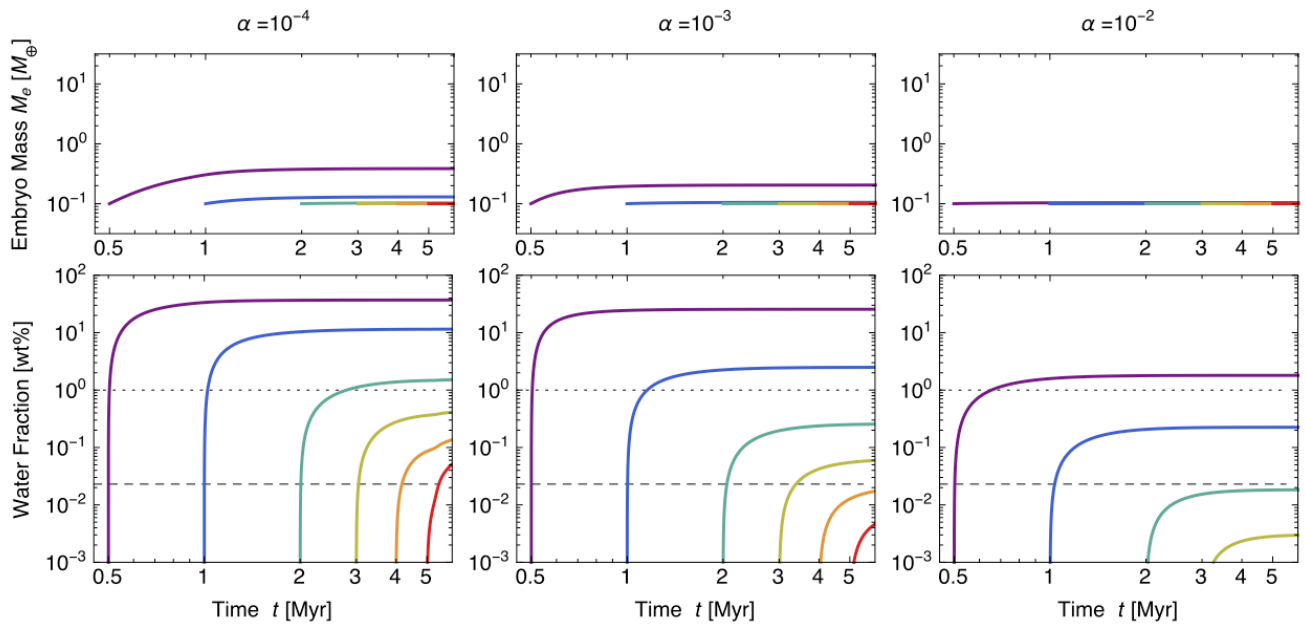
In this study, we quantify the amount of icy pebbles accreted by terrestrial embryos in a cooling protoplanetary disk assuming that no mechanism halts the pebble flow outside the terrestrial planet forming region. We use a simplified version of the coagulation equation to calculate the formation and 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., & Ida, S. 2016, A&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 信一¹、上野 春太*Sin-iti Sirono¹, 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H₂O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¹、田中 秀和²、奥住 聡³*Hiroshi Kobayashi¹, Hidekazu Tanaka², Satoshi Okuzumi³

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¹、関谷 実¹

*Isamu Onishi¹, Minoru Sekiya¹

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¹、武藤 恭之²、竹内 拓、野村 英子³*Tomohiro Ono¹, Takayuki Muto², Taku Takeuchi, Hideko Nomura³

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¹、犬塚 修一郎¹、小林 浩¹

*Keisuke Sugiura¹, Shu-ichiro Inutsuka¹, Hiroshi Kobayashi¹

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ほ不可能である。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¹、中村 昭子²*Takaya Okamoto¹, Akiko Nakamura²

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、広範囲な標的的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 $> \sim 50$ μm 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 ~ 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¹、中村 昭子¹、鈴木 絢子²、長谷川 直²*Ryo Ogawa¹, Akiko Nakamura¹, Ayako Suzuki², Sunao Hasegawa²

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、 π 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、 π 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¹、杉田 精司¹*ERI TATSUMI¹, Seiji Sugita¹

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 π 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, 46th 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¹、荒川 政彦¹、保井 みなみ¹、高野 翔太¹、長谷川 直²

*Kazuma Matsue¹, Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui¹, Shota Takano¹, Sunao Hasegawa²

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 μ 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⁻², 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 π 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 8.1×10^{-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(5.7×10^{-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¹、岡本 尚也¹、玄田 英典²*Kosuke Kurosawa¹, Takaya Okamoto¹, Hidenori Genda²

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越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。

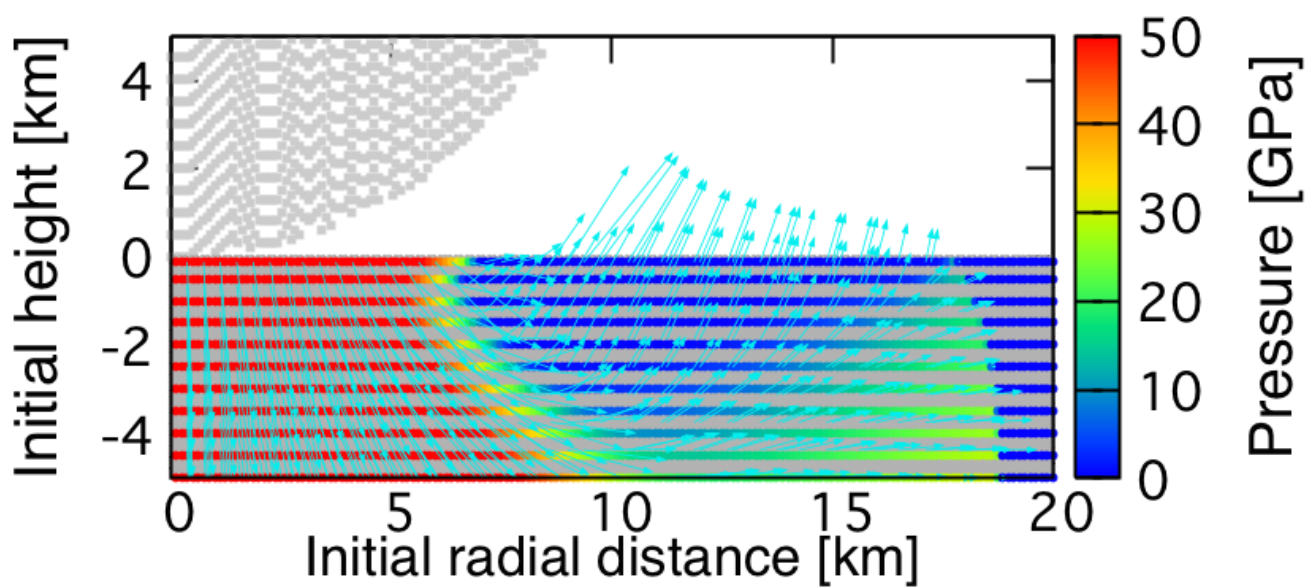
今後は様々な衝突条件に対して数値衝突計算を実施し、干渉領域からの高速放出物についての速度-質量関係式を得る予定である。

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¹、倉本 圭¹*Hiroaki Saito¹, Kiyoshi Kuramoto¹

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 (1.4×10^{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 9.6×10^{20} kgを上回ると推定され、この分配量は地球海洋質量の ~ 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 真一¹、高橋 芳幸²、中島 健介³、林 祥介²

*Shin-ichi Takehiro¹, Yoshiyuki O. Takahashi², Kensuke Nakajima³, Yoshi-Yuki Hayashi²

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 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 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¹、奥住 聡¹

*Kazumasa Ohno¹, Satoshi Okuzumi¹

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¹、納多 哲史²、中島 健介³、高橋 芳幸⁴、竹広 真一⁵、林 祥介⁴

*Masaki Ishiwatari¹, Satoshi Noda², Kensuke Nakajima³, Yoshiyuki O. Takahashi⁴, Shin-ichi Takehiro⁵, Yoshi-Yuki Hayashi⁴

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¹、はしもと じょーじ²、倉本 圭³、高橋 芳幸¹、石渡 正樹³、高橋 康人³、林 祥介¹

*Masanori Onishi¹, George HASHIMOTO², Kiyoshi Kuramoto³, Yoshiyuki O. Takahashi¹, Masaki Ishiwatari³, Yasuto TAKAHASHI³, Yoshi-Yuki Hayashi¹

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の温度を推定した。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^{1,2}、小谷 隆行^{2,1}、田村 元秀^{3,2,1}*Masashi Omiya^{1,2}, Takayuki Kotani^{2,1}, Motohide Tamura^{3,2,1}

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¹、黒澤 耕介²、臼井 寛裕³*Hiroyuki Kurokawa¹, Kosuke Kurosawa², Tomohiro Usui³

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 (CO_2 , N_2 , H_2O , 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¹、黒澤 耕介¹、岡本 尚也¹

*Hiroki Senshu¹, Kosuke Kurosawa¹, Takaya Okamoto¹

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¹、黒澤 耕介²、潮田 雅司¹、長谷川 直³、小田 啓邦¹、高橋 太⁴、河合 淳⁵

*Masahiko Sato¹, Kosuke Kurosawa², Masashi Ushioda¹, Sunao Hasegawa³, Hirokuni Oda¹, Futoshi Takahashi⁴, Jun Kawai⁵

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 μ -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 μT , 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° 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 μT 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¹、*諸田 智克¹Kosuke Ando¹, *Tomokatsu Morota¹

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¹、熊本 篤志¹、高木 靖彦²、中村 教博¹、長谷川 直³

*Ken Ishiyama¹, Atsushi Kumamoto¹, Yasuhiko Takagi², Norihiro Nakamura¹, Sunao Hasegawa³

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¹、小川 和律²、荒川 政彦²、田中 智¹

*Naoya Sakatani¹, Kazunori Ogawa², Masahiko Arakawa², Satoshi Tanaka¹

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 μm 、体積算術平均径は 40 μm である。これをふるい分けし、53-63 μm 、90-106 μm 、355-500 μm 、710-1000 μm 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 μm 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 μm 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 μm median 100 μm	1690 kg/m^3	42%
JSC-S	710-1000 μm	980 kg/m^3	66%
	355-500 μm	1110 kg/m^3	62%
	90-106 μm	1460 kg/m^3	50%
	53-63 μm	1540 kg/m^3	47%

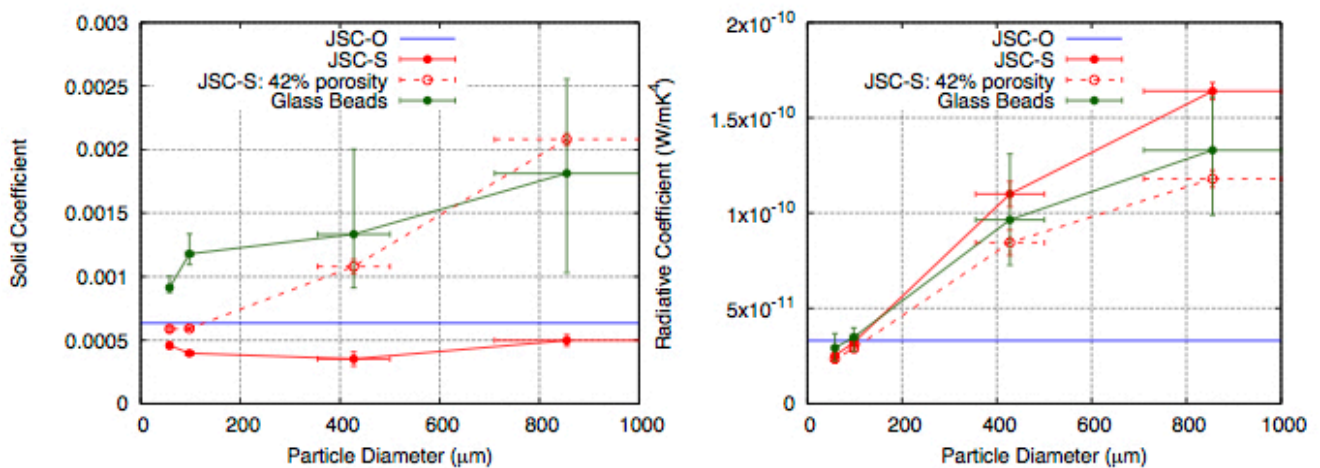


Figure 1: Solid (left) and radiative (right) coefficient of JSC-O (blue), JSC-S (red), and glass beads (green). Dashed red points represent each coefficient that is corrected to porosity of 42%.

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¹、水野 貴秀²、並木 則行¹、千秋 博紀³、國森 裕生⁴、尾川 順子²、竹内 央²、清水上 誠¹

*Hiroto Noda¹, Takahide Mizuno², Noriyuki Namiki¹, Hiroki Senshu³, Hiroo Kunimori⁴, Naoko Ogawa², Hiroshi Takeuchi², Makoto Shizugami¹

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¹、並木 則行²、小林 正規³、木村 淳⁴、荒木 博志²、野田 寛大²、押上 祥子²、鹿島 伸悟²、石橋 高³、小林 進悟⁵、尾崎 正伸¹、水野 貴秀¹、宇都宮 真¹、斎藤 義文¹、東原 和行¹、鎌田 俊一⁵、松本 晃治²、倉本 圭⁵、佐々木 晶⁶、岩村 哲⁷、飯田 光人⁸、松本 吉昭⁸、藤井 雅之⁹、藤代 尚文¹⁰、山室 智康¹¹、Lingenauber, Kay¹²、Behnke, Thomas¹²、Oberst, Juergen¹²、Jaenchen, Judit¹²、Loetzke, Horst-Georg¹²、Michaelis, Harald¹²、Hussmann, Hauke¹²

*Keigo Enya¹, Noriyuki Namiki², Masanori Kobayashi³, Jun Kimura⁴, Hiroshi Araki², Hiroto Noda², Shoko Oshigami², Shingo Kashima², Ko Ishibashi³, Shingo Kobayashi⁵, Masanobu Ozaki¹, Takahide Mizuno¹, Shin Utsunomiya¹, Yoshifumi Saito¹, Kazuyuki Touhara¹, Shunichi Kamata⁵, Koji Matsumoto², Kiyoshi Kuramoto⁵, Sho Sasaki⁶, Satoru Iwamura⁷, Teruhito Iida⁸, Yoshiaki Matsumoto⁸, Masanori Fujii⁹, Naofumi Fujishiro¹⁰, Tomoyasu Yamamuro¹¹, Kay Lingenauber¹², Thomas Behnke¹², Juergen Oberst¹², Judit Jaenchen¹², Horst-Georg Loetzke¹², Harald Michaelis¹², Hauke Hussmann¹²

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¹、井田 茂¹、木村 淳²*Ayano Nakajima¹, Shigeru Ida¹, Jun Kimura²

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とわかった。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 俊一¹、Nimmo Francis²*Shunichi Kamata¹, Francis Nimmo²

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¹、山本 真由美¹

*Masanori Kameyama¹, Mayumi Yamamoto¹

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¹、中道 晶香²、原 哲也¹

*Ariyoshi Kunitomo¹, Akika Nakamichi², Tetsuya Hara¹

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

異なるハビタブルゾーン定義の比較のための系外惑星データベース「ExoKyoto」の開発
Development of Exoplanet database "ExoKyoto" aiming for inter-comparison with different criteria of Habitable zones

山敷 庸亮¹、伊藤 岳陽³、嶋田 侑治³、稲澤 真里子⁴、*佐々木 貴教²、西浦 理⁴、野津 翔太²、石川 裕之⁵、鈴木 杏那⁶、坂上 峻仁⁵、野津 湧太²、中村 尚樹²、行方 宏介⁵、磯部 洋明¹、柴田 一成²、下崎 紗綾⁷、藤田 汐音⁷

Yosuke Yamashiki¹, Takaaki Ito³, Yuji Shimada³, Mariko Inazawa⁴, *Takanori Sasaki², Osamu Nishiura⁴, Shota Notsu², Hiroyuki Ishikawa⁵, Anna Suzuki⁶, Takahito Sakae⁵, Yuuta Notsu², Naoki Nakamura², Kosuke Namekata⁵, Hiroaki Isobe¹, Kazunari Shibata², Saaya Shimosaki⁷, Shione Fujita⁷

1.京都大学大学院総合生存学館、2.京都大学大学院理学研究科、3.京都大学農学部、4.京都大学工学部、5.京都大学理学部、6.京都産業大学大学院理学研究科、7.SGH滋賀県立守山高校

1.Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability Kyoto University,

2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3.Faculty of Agriculture, Kyoto University,

4.Faculty of Engineering, Kyoto University, 5.Faculty of Science, Kyoto University, 6.Graduate

School of Science, Kyoto Sangyo University, 7.SGH Shiga Prefectural Moriyama High School

存在が確認された系外惑星系をより理解し、異なるハビタブルゾーンの定義を互いに比較するための系外惑星データベース「ExoKyoto」を開発した。「ExoKyoto」のコアモジュールはC++で記載され、「系外惑星」「ホスト星」などを始めとする異なるクラスが定義されている。ハビタブルゾーンの定義はKopparapu et al. (2013)の定義が参照ケースとして定義されているが、その他に太陽系相当天文単位(SEAU)が定義され、系外惑星の位置と太陽系での想定されうる位置を理解することができる。

データベースはまた、すでに存在するExoplanet.eu, Open Exoplanet CatalogueやNASA exoplanet archiveなどとの相互比較参照モジュールを有し、相対的に信頼できる値を得ることができる。ほとんどの「ケプラー衛星」により発見された惑星のほとんどはトランジット法でのみ確認され、質量が同定されていないため、スーパーアースサイズの惑星に関してはLarsen and Geoffrey(2014)の方法を参照にした質量推定モジュールを有している。これによって、発見されている質量推定可能な系外惑星(計1988個)の分類としてスーパーアースサイズが最も多く(794個)になっており、超木星サイズ(480個)を上回り、木星サイズ以上(合計926個)に迫る。実際にはスーパーアースの中の140個しか質量が視線速度法で同定されていない。またKopparapu et al.(2013)によるM型星まわりのハビタブルゾーン判定は、他の判定に比較して個別要素による影響が大きく、さらなる改良が求められる。スーパーフレアの系外惑星への影響もデータベースにより議論可能である。

また、アウトリーチ目的のため、ExoKyotoはGoogle Skyによる位置検索インターフェースを有している。

Lauren M. W. and Geoffrey W. M. 2014. The mass-radius relation for 65 exoplanets smaller than 4 earth radii. *The Astrophysical Journal Letters*, 783:L6

Kopparapu R. K. et al. 2013. Habitable Zones Around Main-Sequence Stars: New Estimates. *The Astrophysical Journal*, 765:131

キーワード：系外惑星、ハビタブルゾーン、太陽系相当天文単位

Keywords: Exoplanet, Habitable Zone, SEAU

ハレアカラT60望遠鏡のDIPOL-2を用いた系外惑星の観測と解析

observation and analysis of exoplanets by using Dipol-2 of T60 telescope at Haleakala mountain

*前田 東暁¹、坂野井 健¹、鍵谷 将人¹

*Haruaki Maeda¹, Takeshi Sakanoi¹, Masato Kagitani¹

1.東北大学大学院理学研究科惑星・プラズマ大気研究センター

1.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

我々は、ハワイ・ハレアカラの口径60cm望遠鏡と偏光観測装置DIPOL-2 (a double image high precision polarimeter, Pirola et al., 2014) を使い、系外惑星の偏光観測を2015年1月に開始した。主星を光源とし、惑星大気により散乱・反射されて観測者に届く光は、公転に伴い周期的な偏光の変化を生じる。観測者は、ほぼ無偏光の主星からの光と、直線偏光した惑星性大気からの散乱・反射光とを合わせた光を観測することとなる。その結果、最大で $10^{(-4)}$ - $10^{(-5)}$ の振幅を持つ周期的な直線偏光の変化が観測されると期待される。これらを検出できる精密な偏光測定を系外惑星の様々な公転位相角について実施することで、トランジット天体に限定することなく、惑星の軌道要素や、惑星の大気の情報を引き出すことも可能と考えられる。また、我々が用いた偏光観測装置DIPOL-2は、可視光の3つの波長帯 (B, V, Rバンド) での同時測定が可能であり、系外惑星大気散乱の波長依存性を知ることが出来る。しかし、これまで実際に系外惑星の偏光観測に成功した例は1天体にとどまる (Berdyugina et al., 2008, 2011)。本研究では、系外惑星の偏光観測のメリットを踏まえ、観測と解析方法の確立を目指している。

系外惑星の偏光観測の容易さ、すなわち期待される直線偏光の変動の振幅は、主星と惑星の距離、および惑星の半径という2つの条件に主に依存する。加えて、S/N向上のためには、主星が明るいことが重要となる。既知のホットジュピターに分類される系外惑星において、期待される偏光度の振幅を検討したところ、 $10^{(-5)}$ 以上の精度での偏光測定が必要であると考えられる。この精度の実現には、望遠鏡と偏光観測装置の固有の偏光 (機器偏光) を校正し、その時間安定性を必要な測定精度の範囲に収めることが不可欠である。

我々は、まず観測装置の直線偏光の基準方向を決定するために、既知の直線偏光天体 (HD204827, HD25443) を観測し、ストークスパラメータの基準軸を決定した。また、機器偏光を決定するために、2015年1月、5月、8月、10月にそれぞれ19個、12個、18個、10個、合計59個の無偏光標準星の観測を実施した。その結果、十分な追尾機能を備えていなかった2015年1月の観測データを除く、40個の無偏光標準星についてストークスパラメータを求め、機器偏光を $10^{(-5)}$ の精度で決定した。また、これらの観測と並行して、既知の系外惑星を含む3天体 (tau_boo b, HD189733 b, 55Cnc e) の観測もおこなった。系外惑星の偏光状態については、観測値から機器偏光を差し引くことで求めることができる。またこれら観測対象とした系外惑星は、短期間に異なる公転位相角でのデータが収集できることから、公転周期が既知 (数日) であるホットジュピター型の系外惑星を選定した。今後は同様の系外惑星においてデータを増やすと同時に、異なる種類の系外惑星についても観測をおこなうことを検討している。今回の発表では、これらの機器偏光の校正結果、既知の系外惑星の偏光度推定手法、および、観測した3つの系外惑星大気偏光観測の解析と結果について発表する。

キーワード：系外惑星、偏光、観測、大気、散乱

Keywords: exoplanet, polarization, observation, atmosphere, scattering

紫外線望遠鏡による系外惑星観測の検討

UV space telescope for exoplanetary systems

*堀越 寛己¹、亀田 真吾²、村上 豪³、生駒 大洋⁴、成田 憲保⁵

*Hiroki Horikoshi¹, Shingo Kameda², Go Murakami³, Masahiro Ikoma⁴, Norio Narita⁵

1.立教大学大学院理学研究科、2.立教大学理学部、3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、4.東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、5.国立天文台

1.Graduate School of Science, Rikkyo University, 2.School of Science, Rikkyo University,
3.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 4.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 5.National Astronomical Observatory of Japan

1995年に系外惑星が発見されてから数多くの観測が行われ、現在では1900個以上の惑星が検出されている。また、一部の惑星では大気組成に関する情報が得られている。

地球と太陽系内の他の惑星の大気組成を比較すると、地球は酸素が多いことが特徴的であり、この酸素は主に植物の光合成によって生成される。従って、惑星における酸素の検出は、惑星を特徴付けるうえで一つの大きな要因となる。そこで、本研究では惑星大気中の酸素原子の発光（波長130.6 nm）を紫外線望遠鏡によって検出することを目指している。

惑星は主星の周りを公転しているので、惑星の光はドップラーシフトによって波長がわずかに変化して観測される。従って、惑星の光のドップラーシフトが大きく、恒星の連続光成分が無ければ、惑星の輝線は高分散分光器を利用して主星の光と分離することができ、直接観測することができる。低温度星のハビタブルゾーンは主星に近いので、地球が低温度星のハビタブルゾーンに存在すると、公転速度は速くなり、ドップラーシフトは大きくなる。また、低温度星は、波長130nm付近で連続光成分がほとんど無い。そこで本研究では、地球が低温度星のハビタブルゾーンに存在すると仮定して検討を行った。これより、惑星の輝線は主星の光と分離することができ、惑星の輝線のコントラストを向上させることが可能となる。検討の結果、O I輝線の強度は非常に弱いため、検出にはハッブル宇宙望遠鏡を超える大口径かつ高効率の望遠鏡で長期間観測する必要があることが示された。

NASAやESAで提案されている将来計画の観測波長域は可視-赤外であり、系外惑星観測専用の紫外線望遠鏡の将来計画は無い。そこ我々は、系外惑星観測に特化した紫外線望遠鏡の開発を検討している。本発表では、本研究の検討状況と具体的な観測装置の仕様について発表する。

キーワード：系外惑星、紫外線、宇宙望遠鏡

Keywords: exoplanet, ultraviolet, space telescope

BepiColombo 日欧共同水星探査ミッション
BepiColombo Euro-Japan Joint mission to Mercury

*早川 基¹、前島 宏則¹

*Hajime Hayakawa¹, Hironori Maejima¹

1. 独立行政法人宇宙航空研究開発機構

1. The Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い灼熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であり、2011年3月からの米国MESSENGERによる観測が初めてのものである。MESSENGERの探査から、この小さな惑星の表面には従来考えられていたものをはるかに超える量の揮発性物質が存在し、惑星磁場も双極子の中心が惑星半径の2割も北にずれているなど予想外の発見をもたらしたが、その究明は未だこれからの課題となっている。「ベピ・コロombo (BepiColombo)」は、欧州宇宙機関(以下、ESA)との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を初めて多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査＝「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらす。また、磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核など水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。

本計画は、観測目標に最適化された2つの周回探査機、すなわち表面・内部の観測に最適化された「水星表面探査機(MPO)」(3軸制御、低高度極軌道)、磁場・磁気圏の観測に最適化された「水星磁気圏探査機(MMO)」(スピン制御、楕円極軌道)から構成される。ISAS/JAXAは、日本の得意分野である磁場・磁気圏の観測を主目標とするMMO探査機の開発と水星周回軌道における運用を担当し、ESAが残りの全て、すなわち、打ち上げから惑星間空間の巡航、水星周回軌道への投入、MPOの開発と運用を担当する。

両探査機に搭載する数々の科学観測装置は、2004年の搭載機器選定以降開発は着々と進行し、日本側の詳細設計審査は平成23年11月に終了した。JAXAの開発するMMOは昨年3月に総合試験が終了し、4月にESA/ESTECへと輸送した。単体の作業を12月に終了し、ESA側製作のモジュールと組合わせた環境試験の開始を待っているところである。環境試験終了後、各モジュールは射場である仏領ギアナへ輸送され、2017年に打ち上げの予定である。一方MMO電気モデルはドイツへ輸送され2012年10月から電気モデル試験に参加した。今後第2回電気モデル試験に参加する予定である。

水星到着後の観測は、選ばれた装置開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成する「BepiColombo 科学ワーキングチーム」(年1回程度開催)で立案・実施される。本講演では、初の大型日欧協力となったBepiColomboプロジェクトに関してのこれまで、今後についての状況を報告する。

キーワード：水星、惑星探査、国際協力

Keywords: Mercury, Planetary Exploration, International Collaboration

JUICE/GALA-J (2): JUICE搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA)が拓くサイエンス

JUICE/GALA-J (2): Science objectives of the GAnymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

*木村 淳¹、鎌田 俊一⁵、松本 晃治²、押上 祥子²、並木 則行²、倉本 圭⁵、佐々木 晶⁸、塩谷 圭吾⁴、小林 正規³、小林 進悟⁶、荒木 博志²、野田 寛大²、石橋 高³、斎藤 義文⁴、Hussmann Hauke⁷、Lingenauber Kay⁷
 *Jun Kimura¹, Shunichi Kamata⁵, Koji Matsumoto², Shoko Oshigami², Noriyuki Namiki², Kiyoshi Kuramoto⁵, Sho Sasaki⁸, Keigo Enya⁴, Masanori Kobayashi³, Shingo Kobayashi⁶, Hiroshi Araki², Hiroto Noda², Ko Ishibashi³, Yoshifumi Saito⁴, Hauke Hussmann⁷, Kay Lingenauber⁷

1.東京工業大学地球生命研究所、2.国立天文台、3.千葉工業大学、4.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究
 所、5.北海道大学、6.放射線医学総合研究所、7.ドイツ航空宇宙センター、8.大阪大学

1.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2.National Astronomical Observatory Japan, 3.Chiba Institute of Technology, 4.ISAS/JAXA, 5.Hokkaido University, 6.National Institute of Radiological Sciences, 7.German Aerospace Center, 8.Osaka University

The JUUpiter Icy Moons Explorer (JUICE), led by European Space Agency, has started development toward launch in 2022 (arrival at Jupiter in 2029, and Ganymede orbit insertion in 2032), and we are now developing the GALA instrument onboard JUICE spacecraft collaborating with German Aerospace Center (DLR) and other institutions in Europe. Primary objective of GALA is to acquire the key information for understanding the evolution of icy bodies and to play an essential role in the JUICE's purpose: exploration of deep habitat.

Jovian icy moon Ganymede, which is the largest moon in the Solar System and the primary target of the JUICE, can be said to be one of the typical solid bodies along with terrestrial planets in terms of its size and the intrinsic magnetic field originated from the metallic core. However, current knowledge provided by previous explorations is extremely limited since it comes from only several fly-bys. The JUICE will uncover the whole picture of Ganymede by the first "orbiting" in the history around extra-terrestrial moon. Expected new big picture of the origin and evolution of Ganymede will not only be a key to unveil the origin of diversity among the Solar System bodies, but also contribute to understand exoplanets with a wide diversity.

The GALA will measure a distance between the spacecraft and the surface of icy moons and acquire the topography data (globally for Ganymede, and fly-by region for Europa and Callisto). It will be a first-ever laser altimetry for the icy object. Such information makes surface geologies clear and tremendously improves our understanding of the icy tectonics. By comparing their tectonic styles on the rocky planets/moons, GALA data leads to reconsider the Earth's plate tectonics. In addition, the GALA will confirm a presence/absence of the subsurface ocean by measuring tidal and rotational response, and also the gravitational information reflecting the interior structure will be greatly improved. In addition, strength and waveform of laser pulse reflected from the moon's surface have information about surface reflectance at the laser wavelength and small scale roughness, and therefore we can see degrees of erosion and space weathering without being affected by illumination condition through GALA measurements.

In order to interpret and understand such measurements, accumulated studies for the Earth over the years will be effectively utilized: e.g., the data for surface topography, roughness and albedo will lead to describe the icy tectonics through the knowledge from terrestrial glaciology and experiments on impact and deformation process. The tidal measurements by GALA will also be a window to see its interior based on our knowledge and experiences cultivated through the past geodetic observations, e.g., the SELENE mission for the terrestrial Moon.

Characterization of the icy moons will be achieved not only from the GALA measurements but also

synergy of other scientific instruments onboard JUICE spacecraft, for examples, surface images taken by optical camera (JANUS) will confirm the position of GALA laser footprint to complement the GALA “point” data for precise topographic mapping. A radar sounder (RIME) and a radio science experiment (3GM) probe the interior structure, especially interior of the icy crust to figure out an occurrence of tectonic features. A visible and infrared imaging spectrometer (MAJIS), an ultraviolet imaging spectrograph (UVS) and a sub-millimeter wave instrument (SWI) will acquire a surface and atmosphere compositional data. A magnetometer (J-MAG) monitors moons’ inductive response to the Jovian magnetic field and probes the subsurface ocean with the help of a particle environment package (PEP) and a radio and plasma wave investigation (RPWI). The GALA works closely together with these instruments and plays a leading and a supporting role to clarify the whole picture of Ganymede and other icy moons.

JUICE/GALA-J (3): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における回線設計・性能モデルシミュレーション

JUICE/GALA-J (3): Performance model simulation of Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

*荒木 博志¹、並木 則行¹、野田 寛大¹、石橋 高²、塩谷 圭吾³、尾崎 正伸³、水野 貴秀³、宇都宮 真³、齋藤 義文³、東原 和行³、押上 祥子¹、鹿島 伸悟¹、木村 淳⁴、小林 進悟⁵、小林 正規²、Steinbruegge Gregor⁶、Stark Alexander⁶、Althaus Christian⁶、del Togno Simone⁶、Lingenauber Kay⁶、Hussmann Hauke⁶
*Hiroshi Araki¹, Noriyuki Namiki¹, Hiroto Noda¹, Ko Ishibashi², Keigo Enya³, Masanobu Ozaki³, Takahide Mizuno³, Shin Utsunomiya³, Yoshifumi Saito³, Kazuyuki Touhara³, Shoko Oshigami¹, Shingo Kashima¹, Jun Kimura⁴, Shingo Kobayashi⁵, Masanori Kobayashi², Gregor Steinbruegge⁶, Alexander Stark⁶, Christian Althaus⁶, Simone DelTogno⁶, Kay Lingenauber⁶, Hauke Hussmann⁶

1.国立天文台 RISE月惑星探査検討室、2.千葉工業大学 惑星探査研究センター、3.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、4.東京工業大学地球生命研究所、5.放射線医学総合研究所、6.ドイツ宇宙航空センター
1.National Astronomical Observatory of Japan, 2.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 3.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 4.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 5.National Institute of Radiological Sciences, 6.Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

The laser altimeter GALA (GAnymede Laser Altimeter) is one of the payload instrument of JUICE (JUUpiter ICy moons Explorer) project led by ESA to be launched in 2022. GALA is developed by the international collaboration by Germany, Japan, Switzerland, and Spanish teams.

In order to clarify the requirement on the interface conditions between modules of GALA, we developed the performance model of GALA based on the model of BELA (Bepi-Colombo Laser Altimeter). The performance model quantifies the link budget, range accuracy, albedo measurement accuracy, and probability of false detection (PFD). In the performance model, background noise from scattered sunlight from the Ganymede surface, surface and bulk dark currents of APD, noise floor of APD-TIA, shot noise, and speckle noise are taken into consideration. Black-body emission from the Ganymede surface is also taken into account while its influence to SNR is negligible compared with other noises. EMI noise shall be included after the evaluation of the verification model.

Scientific requirements on GALA performance is summarized into the following four criteria: [1] For Europa fly-by, PFD is less than 0.2 from an altitude of 1300 km or lower, [2] Under the worst observation condition for albedo and surface slope of GC0500 (Ganymede Circular Orbit whose height is 500km), the accuracy of the ranging is less than 10 m and PFD is less than 0.2. [3] Under the nominal observation condition of GC0500, the accuracy of the ranging is less than 2 m and PFD is less than 0.1. [4] Under the best observation condition of GC0500, the accuracy of the ranging is less than 1 m and PFD is less than 0.1.

Returned laser pulse is converted to analogue signal in Japanese Analogue Electric Module (AEM), then to digital signal and transferred to Swiss Range Finder Module (RFM). RFM applies matched filtering to the digital signal to determine the range as accurately as possible. The signal processing in RFM constrains the performance of AEM, therefore, GALA-J developed its own matched filter simulation aiming to determine the signal-to-noise ratio (SNR). The matched filtering in RFM is a convolution of signal and Gaussian filter whose width in time domain is adjustable. The filtering is thus equivalent to moving average weighted by Gaussian filter in time domain. In this

simulation, the length of range gate is 8192 and the sampling frequency is 66.7 MHz which is lower than the current design of ADC of 200 MHz. The band-pass filtering by trans-impedance amplifier of APD (APD-TIA) is taken into account by filtering the return pulse and APD noise by 100 MHz. By changing input SNR and width of the Gaussian filter, the lower bounds of the output SNR that satisfy the system requirements are investigated. The requirements for the input SNR obtained by the investigation are then confirmed well below the analogue SNRs calculated by the performance model.

The return signal is assumed to have a Gaussian form in both spatial and time domain in this performance model, however, the broadening occurs on a reflection by the surface topographic roughness and filtering processes in AEM and RFM. These effects on the results are now investigated and will be shown at the poster presentation.

キーワード：木星、ガニメデ、JUICE、GALA、レーザー高度計、回線設計

Keywords: Jupiter, Ganymede, JUICE, GALA, Laser altimeter, Performance model

JUICE/GALA-J (4): JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA) におけるエレクトロニクス・検出器
関連開発

JUICE/GALA-J (4): Electronics and detector development for Ganymede Laser Altimeter (GALA)
for the JUICE mission

*小林 正規¹、奥平 修¹、石橋 高¹、藤井 雅之⁶、塩谷 圭吾²、並木 則行³、荒木 博志³、野田 寛大³、押上 祥
子³、鹿島 伸悟³、尾崎 正伸²、水野 貴秀²、宇都宮 真²、斎藤 義文²、東原 和行²、木村 淳⁴、小林 進悟⁵
、Hussmann Hauke⁷、Lingenauber Kay⁷、Behnke Thomas⁷、DelTogno Simone⁷

*Masanori Kobayashi¹, Osamu Okudaira¹, Ko Ishibashi¹, Masayuki Fujii⁶, Keigo Enya², Noriyuki Namiki³
, Hiroshi Araki³, Hiroto Noda³, Shoko Oshigami³, Shingo Kashima³, Masanobu Ozaki², Takahide Mizuno²
, Shin Utsunomiya², Yoshifumi Saito², Kazuyuki Touhara², Jun Kimura⁴, Shingo Kobayashi⁵, Hauke
Hussmann⁷, Kay Lingenauber⁷, Thomas Behnke⁷, Simone DelTogno⁷

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.国立天文台 RISE月惑星
探査検討室、4.東京工業大学地球生命研究所、5.放射線医学総合研究所、6.FAMサイエンス、7.ドイツ宇宙航空
センター

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.Institute of Space and
Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3.National Astronomical Observatory of
Japan, 4.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 6.National Institute of
Radiological Sciences, 5.National Institute of Radiological Sciences, 6.FAM Science Co., LTD.,
7.Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

2022 年打ち上げ予定のESA 木星探査計画(JUICE; JUpiter ICy moons Exploler) でレーザー高度計(GALA,
Ganymede Laser Altimeter) の搭載が予定されている。GALA はドイツ、日本、スイス、スペインの4 国で共同
開発され、日本チームはレーザー反射光受信光学系のうち、バックエンド光学系(BEO)、APDセンサモジュールお
よびAPDモジュールが収められる焦点面アセンブリ(FPA)、そしてアナログの電子モジュール(AEM)の開発を担当
している。本講演では、APDモジュールとAEMの開発について状況を説明する。

採用したAPDモジュールは、APDセンサ、プレアンプ(トランスインピーダンスアンプ、TIA)、温度センサ、ペ
ルチエ素子を含むハイブリッドICで構成されている。TIAの出力信号の帯域は100MHzとする。このAPDセンサは
1060nmで約40%まで高められた量子効率を持っていて、1064nmのYAGレーザーを利用する装置には有利な仕様と
なっている。

光学系からの受光パルスをAPDモジュール内のAPDセンサで電流信号に変換し、それをTIAで電圧信号に変換して
AEMに送り、その波形をアナログ・デジタル変換(ADC)回路によってデジタルデータに変換する。デジタルサ
ンプリングされた波形信号は距離測定モジュール(RFM)に送信される。

現在、APDモジュールで使われるセンサの放射線耐性を調べる試験や、開発課題をクリアするためにAEMのブ
レッドボードモデルを製作して、性能評価を進めているところである。

キーワード：JUICE、GALA、APD、ガニメデ、レーザー高度計

Keywords: JUICE, GALA, APD, Ganymede, Laser Altimeter

JUICE/GALA-J (5): JUICE搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) のための放射線解析

JUICE/GALA-J (5): Radiation analysis for Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

*小林 進悟¹、DelTogno Simone²、小林 正規³、尾崎 正伸⁴、塩谷 圭吾⁴、水野 貴秀⁴、宇都宮 真⁴、齋藤 義文⁴、東原 和行⁴、石橋 高³、並木 則行⁵、荒木 博志⁵、野田 寛大⁵、押上 祥子⁵、鹿島 伸悟⁵、木村 淳⁶、Althaus Christian²、Lingenauber Kay²、Hussmann Hauke²

*Shingo Kobayashi¹, Simone DelTogno², Masanori Kobayashi³, Masanobu Ozaki⁴, Keigo Enya⁴, Takahide Mizuno⁴, Makoto Utsunomiya⁴, Yoshifumi Saito⁴, Kazuyuki Touhara⁴, Ko Ishibashi³, Noriyuki Namiki⁵, Hiroshi Araki⁵, Hiroto Noda⁵, Shoko Oshigami⁵, Shingo Kashima⁵, Jun Kimura⁶, Christian Althaus², Kay Lingenauber², Hauke Hussmann²

1.国立研究開発法人 放射線医学総合研究所、2.ドイツ宇宙航空センター、3.千葉工業大学 惑星探査研究センター、4.宇宙航空研究開発機構、5.国立天文台、6.東京工業大学 地球生命研究所

1.National Institute of Radiological Sciences, 2.Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 3.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 4.Japan Aerospace Exploration Agency, 5.National Astronomical Observatory of Japan, 6.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

The radiation environment around the Jupiter consists of electrons and protons that are trapped by the Jupiter's magnetosphere, solar energetic particles and galactic cosmic-rays. The trapped electrons are the most harmful to devices on the JUICE because the trapped electron flux is the most intense and the its penetrability is relatively higher than the other charged particles. The solar energetic particles are of secondary importance in spite of the lower flux because its energy spectrum is hard and the high energy protons easily penetrate a shield.

The most sensitive device to radiation on the GALA is the avalanche photo diode (APD) to detect the laser pulses returned from the Ganymede's surface. The maximum tolerance, total ionizing dose (TID), is relatively lower than the other devices and is 30 krad. Thus, an adequate shielding is required to reduce the degradation of the performance of the APD. In order to estimate the radiation dose at the APD, a simulation application, GALA-sim and GALA-analy, based on Geant4 [1] and ROOT [2] was developed by GALA Japan to estimate the radiation dose during Jupiter cruising. The application can import for a radiation analysis a three dimensional CAD model which is produced as a result of our structural and strength design of the GALA instrument. It also can estimate the influence of secondary neutron production by nuclear reactions in JUICE in addition to the primary trapped electrons and the solar energetic particles.

The preliminary three dimensional model of the GALA Transceiver Unit (TRU), GAL-TRU-i1.4-Shielding, was developed to analyze the radiation dose during the JUICE mission. The average thickness of mass around the APD in this model is 11.4 g/cm² which corresponds to aluminum which 42 mm thickness. The TRU was irradiated with trapped electrons and solar energetic particles by the GALA-sim based on Geant4 version 9.6.p03 and 10.01.p01 and TIDs at the APD due to trapped electrons and solar energetic particles were estimated. They are 21.2 and 0.72 krad (Figure of safety, FoS=2), respectively, if calculated by Geant4.10.01. The sum of TIDs fell below the maximum tolerance of the APD (30 krad). The radiation dose due to the trapped electrons is 30 times higher than that of solar energetic particles as expected. It is found that the trapped electrons with an energy of 10-40 MeV mainly contributes the TID. No dependency on the versions of Geant4 was observed and both results are consistent each other within 3% difference. The result was also confirmed by the calculation by FASTRAD [3].

The total non-ionizing dose (TNID) which is the energy deposition on a material via non-ionizing

processes such as Coulomb scattering, nuclear elastic scattering and nuclear reactions, and results in displacement damage is also estimated based on the theory of non-ionization energy loss by [4] with the help of GRAS [5]. The TNID due to the primary trapped electrons, the primary solar protons and the secondary neutron at the APD is 7.52×10^7 MeV/g (FoS=2) which is equivalent to the 50 MeV proton flux of 1.75×10^{10} cm⁻². The contributions of each particles to TNID were 71%, 24% and 5%, respectively.

In summary, we have developed a simulation code to estimate the radiation damage of the devices in GALA instrument. We found the reasonable solution for the radiation shielding of the APD. The results of calculation are used for the radiation test of the APD at a beam irradiation facility and the improvement of the design of TRU.

[1] S. Agostinelli et al., Nucl. Instr. and Meth. A506 (2003) 250-303.

[2] R. Brun and F. Rademakers, Nucl. Inst. & Meth. A389 (1997) 81-86.

[3] TRAD, <http://www.fastrad.net/>

[4] I. Jun et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 50 (2003) 1924-1928.

[5] G. Santin et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 2294-2299.

キーワード：木星、ガニメデ、JUICE、GALA、レーザー高度計、耐放射線解析

Keywords: Jupiter, Ganymede, JUICE, GALA, Laser altimeter, radiation analysis

JUICE/GALA-J (6) : JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における受光部の光学/構造/熱設計

JUICE/GALA-J (6): Optical/thermal/structural design for the receiver part of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

*塩谷 圭吾¹、小林 正規²、石橋 高²、鹿島 伸悟³、宇都宮 真¹、岩村 哲⁴、飯田 光人⁵、松本 吉昭⁵、藤井 雅之⁶、藤代 尚文⁷、山室 智康⁸、尾崎 正伸¹、水野 貴秀¹、斎藤 義文¹、東原 和行¹、並木 則行³、荒木 博志³、野田 寛大³、押上 祥子³、木村 淳⁹、Althaus, Christian¹⁰、DelTogno, Simone¹⁰、Lingenauber, Kay¹⁰、Husmann, Hauke¹⁰

*Keigo Enya¹, Masanori Kobayashi², Ko Ishibashi², Shingo Kashima³, Shin Utsunomiya¹, Satoru Iwamura⁴, Teruhito Iida⁵, Yoshiaki Matsumoto⁵, Masanori Fujii⁶, Naofumi Fujishiro⁷, Tomoyasu Yamamuro⁸, Masanobu Ozaki¹, Takahide Mizuno¹, Yoshifumi Saito¹, Kazuyuki Touhara¹, Noriyuki Namiki³, Hiroshi Araki³, Hiroto Noda³, Shoko Oshigami³, Jun Kimura⁹, Christian Althaus¹⁰, Simone DelTogno¹⁰, Kay Lingenauber¹⁰, Hauke Husmann¹⁰

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

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.CIT, 3.NAOJ, 4.MRJ, 5.PLANET, 6.FAM Science, 7.Astro-Opt, 8.OptCraft, 9.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 10.DLR

We present Optical/Structural/thermal design for the receiver part of 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. For the laser altimetry, GALA emits and receives laser pulses at about 500 km altitude above Ganymede. Wavelength, energy, and repetition frequency of the laser plus 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. In the international collaboration, 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.

Thermal environment of GALA is unique: The Receiver telescope and some parts are cooled to intermediately cryogenic temperature by radiation to the cold surface of Ganymede and deep space while the APD detector has to be kept at 25 degree in its operation time. Many parts of GALA are warmed by self-heating. Furthermore, GALA repeats observation time of 16 hours and data downlink time of 8 (power of observation part is off) hours. So the thermal environment is dynamic. On the other hand, GALA have to keep stability of optical performance, especially absolute agreement of the optical axis of the emitter and the receiver and to the spacecraft coordinate system. Radiation shield also has to be mandatory. Considering these conditions, we are carrying out design of optics, structure and thermal design for the BEO, FPA, and AEM. The current baseline design, the BEO is simply consisting of a collimator lens, a narrow band-pass filter, a focusing lens supported without adhesive. The material used for the structural material of both BEO and FPA must have small thermal expansion and good radiation shielding. Iterative studies of thermal analysis of whole GALA and the optical/thermal/structural design is ongoing.

キーワード：JUICE、GALA、光学/熱/構造設計

Keywords: JUICE, GALA, optical/thermal/structural design

磁場勾配によって誘導される並進運動を用いた太陽系物質粒子の非破壊同定

Non-destructive material identification of volatile particles using translational motions induced by magnetic field gradient

*久好 圭治^{1,2}、山口 若菜¹、植田 千秋¹*Keiji Hisayoshi^{1,2}, Wakana Yamaguchi¹, Chiaki Uyeda¹

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、2.大阪府立春日丘高等学校

1.Dept. of Earth and Space Science, School of Science, Osaka University, 2.Kasugaoka High School

近年、私たちは磁場勾配力による並進運動を利用した新しい磁化測定法を確立し、これに基づく物質同定法を提案した。すなわち重力の無視できる希薄な空間に開放した固体粒子は、誘導される磁氣的エネルギーのため、永久磁石レベルの低磁場で並進や回転を引き起こす。この運動は体積力に由来するため、同一の磁場分布の中では、粒子の質量に依存せず物質固有の磁化率のみに依存する。物質はそれぞれ固有の磁化率を持つので、この方法で得た磁化率を文献値と対応することで、単一粒子の物質識別ができる。これまでに私たちはmm ~ sub-mmサイズの反磁性粒子について、微小重力環境下の磁場勾配中に試料を解放し、試料の並進運動で得た磁化率が文献値と一致することを確認した。この原理に基づき、私たちは、常磁性粒子に、この方法を拡張した。鉄の含有量が異なるサンカルロス産オリビン粒子とミャンマー産オリビンの粒子で分離実験を行った。さらに今回、揮発性固体である水(H₂O)とドライアイス(CO₂)についても並進運動から磁化率を得ることができた。

微小重力は室内型の小型落下ボックスを用いて発生させた。落下距離は1.8m、有効な微小重力継続時間は約0.5秒である。30x30x20cmに小型化した直方体の落下ボックス内に観測装置を配置した。装置は、小型のNdFeB磁石製の磁気回路(B < 0.8T)、電動アクチュエーターを装備した真空チャンバー、試料ホルダー解放信号受信装置、試料ホルダーコントローラー、電池およびハイスピードカメラで構成される。小型の磁気回路を導入することにより、試料の磁気並進運動の距離を約2cmに、さらに、粒子が終端速度に到達するまでの所要時間を0.5秒以下に短縮し、落下装置の微小重力継続時間内に測定が可能になった。

磁場による粒子の抽出・識別はこれまで自発磁化を有する一部物質に限られていたが、私たちが提案する方法は、一般の固体に拡張される展望が得られた。上記のように、この方法では原理上、(試料の運動が観測可能な限り)無制限に小さい試料の磁化率を測定することができる。有機・生化学の分野では精密分析に先立ち、有機分子の混合物をクロマトグラフィにより分子量ごとに分離する方法が確立している。無機物質でも、有機物と同様の分析過程が望まれるが、上記の磁気運動を取り入れることで、ほぼ全ての固体物質で、それが実現すると期待される。

無機物質でもこれに相当する過程が確立すれば、始原的隕石の分析のみならず、惑星・衛星探査機に搭載するためのダスト分析装置への応用が考えられる。このような探査では、従来のサンプルリターンと並行して、探査現場での物質の存在頻度を効率的にサーベイすることが重要になる。即ち、粒子を物質毎の存在頻度とサイズ分布を効率的にデータ化することが求められる。探査機に搭載する分析装置は、小型で、測定原理が単純でしかも科学的根拠が明確であり、可能であれば非破壊分析であることが求められるが、提案する計測原理は、現時点でこれらの条件を満たす有力な解の一つと考えられる。

Reference

[1] K. Hisayoshi, S. Kanou and C. Uyeda : Phys.:Conf. Ser., 156 (2009) 012021.

[2] C. Uyeda, K. Hisayoshi, and S. Kanou : Jpn. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 064709.

キーワード：非破壊同定、並進運動、磁場勾配力、微小重力、揮発性粒子

Keywords: non-destruction distinction, translational motion, magnetic field gradient force, microgravity, volatile particle

氷ガリレオ衛星内部の電磁誘導

Electromagnetic induction in icy moons of Jupiter - A review and its future perspective

*藤 浩明¹、桂 貴暉²*Hiroaki TOH¹, Taka'aki Katsura²

1.京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター、2.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1.Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

Internal oceans of icy moons of gas giants of our solar system are among recent hot topics in planetary sciences. Newly discovered evidence for hydrothermal vents in the liquid ocean of Enceladus (Hsu et al., 2015) is still fresh in our memory. Presence of the internal oceans is one of the necessary conditions for extra terrestrial life, although interaction of liquid water with the lithosphere of the icy moon in concern via, say, the hydrothermal activity, is also indispensable. It, therefore, worth revisiting the problem of internal oceans of Jupiter's Galilean satellites with icy surfaces at this time of coming successive Jovian probe missions such as Juno (Bagenal et al., 2014), JUICE (ESA, 2014) and so on.

The latter three of the four Galilean satellites, Io, Europa, Ganymede and Callisto, are covered with ice, while intense volcanic activity is ongoing on the Io's surface due to the immense tidal force of Jupiter. Those volcanic ejecta become a dense source of plasmas of Io origin, which results in Io's footprints of Jupiter's auroras (e.g., Bonfond et al., 2013). It is noteworthy that the former three of the Galilean satellites have those footprints, while Callisto alone lacks in them implying a very thin plasma environment around that moon as it is the farthest to Jupiter without any significant source of plasmas from Callisto itself. This means that Callisto is least subject to the plasma effect in terms of electromagnetic induction.

Another feature of Callisto that is worth noting is its orbital state. While the former three revolutions are in the state of Laplace Orbital Resonance (Murray and Dermott, 1999), Callisto alone is out of it. This may cause a significant difference in tidal force which each moon feels. Tidal dissipation is one of the important factors (Chen et al., 2014) when we consider the heat source that maintains the internal oceans of the icy moons, if any.

In this study, we reanalyzed the vector magnetic field data at the time of Galileo Probe flybys around Callisto. Assuming a time-varying uniform external magnetic field (Khurana, 1997; Khurana and Schwarzl, 2005) with a direction almost parallel to the direction of Jupiter looking from Callisto, we calculated the induced dipole field generated by concentric spherical shells. As a result, a conductive shell with a similar conductivity of seawater on the Earth was found when the depth to it was constrained by an assumed phase diagram of water inside Callisto, which coincides with previous studies (Khurana et al., 1998; Zimmer et al., 2000).

However, if the internal structure of Callisto is significantly different from those of Europa and Ganymede in the sense that Callisto has experienced immature differentiation unlike rest of the two, Callisto may provide a better platform for extra terrestrial life by an increased chance for liquid water-lithosphere interaction. In this presentation, the obtained electrical structure will be further examined comparatively with that of Europa known to date. Comparison with that of Ganymede may be subject to another research because of the moon's peculiar intrinsic core field.

キーワード：氷衛星、木星、電磁誘導

Keywords: Icy moons, Jupiter, Electromagnetic induction

タイタン表面における液体メタンの安定性 Stability of liquid methane on Titan's surface

*丹 秀也¹、佐々木 晶²
*Shuya Tan¹, Sho Sasaki²

1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2.大阪大学大学院理学系研究科宇宙地球科学専攻
1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo,
2.Department of Earth and Space science, Graduate School of Science, Osaka University

土星の衛星タイタンは、表面に液体メタンが確認されている唯一の天体である。この表面環境は、タイタンが保持する厚い大気の温度分布のために形成されている。本研究では、太陽光フラックスや重力加速度など、大気に関係するパラメータと表面液体メタンの存在範囲の関係を推定することで、タイタン表面環境の安定性評価を試みた。

こうしたパラメータ変更や他の天体との比較は、天体の状態は形成時からの進化に依存し、潮汐加熱などの外的要因も影響するため、一般には時間変化を含んだものとなる。しかしタイタンや他の氷天体の場合、大気や内部の形成過程について複数の説が存在し、評価が容易ではない。タイタン大気については、アルゴンの同位体比などから主成分である窒素はアンモニアの光分解に由来するとされているものの、その生成過程・時期・生成量については定説が得られていない状況である。そこで、現在のタイタンの状態を基準として定常状態でのパラメータ変更を考えた。

本研究ではモデルとして、放射と対流を用いた次元平行平板灰色大気モデル (Robinson et al., 2012) を用いた。ただし対流についてはメタンの凝結を考慮した。

タイタンの大気では、メタンなど気体分子の赤外吸収と、成層圏に多く分布する、メタンの光分解で生成される有機物エアロゾルの可視光吸収が放射に影響する。この可視光吸収による表面温度低下は逆温室効果 (Antigreenhouse effect) とも呼ばれる。赤外吸収はメタン濃度による吸収係数の変化を考慮し、暴走温室効果を定常状態での閾値として表現できるようにした (Nakajima et al., 1992を参考)。可視光吸収については、入射可視光の量や成層圏でのメタン濃度、エアロゾルの光学特性などで吸収される割合が変化する可能性が考えられるが、次元の近似では正確な表現は困難である。そこで今回は、吸収される割合が現在の値から変化しない場合などを単純に仮定した。

このモデルにおいて、表面の温度と窒素・メタンの分圧および重力加速度を設定し、対応する太陽光フラックスを算出してパラメータ変更を行った。

太陽光フラックスが小さい領域では、表面温度が低くメタンの凝結が起きるため、表面液体が存在するための下限値が得られた。一方で太陽光フラックスが大きい領域において、逆温室効果に対して温室効果の寄与が大きすぎる場合には、暴走温室効果により上限値が得られた。こうした液体の存在範囲を規定する太陽光フラックスの値に関して、表面窒素分圧は下限値のみに影響し、重力加速度は上限値と下限値の両方に影響した。

可視光のうち、吸収される割合が変化しない場合を仮定したところ、表面窒素分圧・重力加速度の大きさによらず上限値が存在した。また、現在の太陽光フラックスが下限値となる表面窒素分圧と重力加速度は、それぞれ 1.06×10^6 Pa, 0.15 m/s^2 という値となった。

熱慣性推定のための小惑星の熱モデルにおける表面ラフネスに関する研究

A study on surface roughness in thermo-physical modeling of asteroid for the estimation of thermal inertia

*滝田 隼¹、千秋 博紀²、田中 智³

*Jun Takita¹, Hiroki Senshu², Satoshi Tanaka³

1.東京大学大学院理学系研究科、2.千葉工業大学惑星探査研究センター、3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1.Graduate School of Science, Tokyo University, 2.Chiba Institute of Technology/PERC, 3.JAXA/ISAS

This study reports preliminary results of our study about the effect of rough surface on thermal inertia from thermal phase delay using thermo physical model (TPM). In the thermal modeling of asteroid, information on the surface topography and surface roughness is indispensable for thermophysical estimation, which is especially important to deduce thermal inertia of an asteroid. This is one of the preparations for the thermo-physical observations of asteroid Ryugu using the thermal infrared imager in Hayabusa2 mission.

For numerical approach using TPM, we produced rough surface models by deforming a spherical surface mesh. We considered the effect of surface roughness on surface temperature as a function that changes only the effective emissivity of the planetary surface, following the works of Davidsson et al. (2009) and Leyrat et al. (2011).

We fitted the surface temperatures that were generated by the rough surface models to determine whether the thermal phase delay can still be retrieved under rough surface topographies. We picked only the surface temperatures on the equatorial zone. Quadratic least-square fitting is applied to the data to deduce thermal phase delay.

We evaluated uncertainties in the estimation of the phase delay based on a series of data generated in the diurnal motion. As a result, we found that the feasibility of thermal inertia from the diurnal phase delay depended greatly on the observational geometry in terms of solar illumination over the asteroid surfaces. The thermal phase delay could be determined without being strongly affected by local topography under low solar phase angles. Considering the errors of phase shift, the uncertainty of thermal inertia will be greater than 50% if the rough scale is greater than 9.6° (RMS surface slope angle) from the case of low solar phase angle.

キーワード：小惑星、熱慣性、表面ラフネス

Keywords: asteroid, thermal inertia, surface roughness

月面クレータの地形緩和と形成年代の関係

Relationship between formation age and the degree of degradation of the lunar craters

武藤 史樹¹、*諸田 智克¹、春山 純²Fumiki Muto¹, *Tomokatsu Morota¹, Junichi Haruyama²

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.宇宙航空研究開発機構

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Japan Aerospace Exploration Agency

月面の地形は形成以後、微小天体の衝突とレゴリスの攪乱によって崩壊し、緩和していくとされる。地形緩和のタイムスケールを知ることは、表層レゴリスの移動の素過程の理解や天体衝突頻度の推定、クレータの緩和状態を用いた年代決定法の構築のために重要である。

Fassett and Thomson [JGR, 119, 2255-2271, 2014] は地形拡散モデルと実際の地形の平均プロファイルとの比較によってクレータの緩和度を評価した。さらに、表面年代とその領域に存在するクレータの緩和度の中央値の比較から月面地形の拡散速度を評価している。しかし、先行研究では表面年代と複数のクレータの緩和度の中央値との関係を見ているため、個々のクレータの形成年代と緩和度の関係は明らかになっておらず、拡散速度の見積もりも正確ではない。また、クレータの初期形状をすべてのクレータで同一と仮定しているが月面では層構造が卓越しており、形成されるクレータの形状はその層構造に強く影響されるため、個々のクレータの崩壊度を正しく評価できていない可能性がある。それらの問題をふまえ、本研究ではクレータ初期形状の多様性を評価し、個々のクレータの緩和度と年代の関係を明らかにすることを目的とし、クレータの緩和状態とクレータ噴出物の宇宙風化度を指標としたクレータ形成年代との関係を調査した。

本研究では、「かぐや」で得られた地形モデルと反射スペクトルのデータを使用した。これらを用いて、各クレータの平均地形プロファイルと宇宙風化度の指標となるOMATを算出した。クレータ緩和度を評価するために拡散プロセスに従う緩和モデルを用いて、緩和時間とクレータ形状の関係を調べ、実際の地形とのプロファイルの比較によって各クレータの緩和度を評価した。

まずクレータ初期形状を評価するために、クレータ放出物のOMAT値が0.25を超える直径1.5 km~5 kmのクレータを月の3つの海から選び出し、平均地形プロファイルを比較した。その結果、フロア高さにはクレータ間で多様性がある一方で、内壁の傾斜についてはほぼ一定であることがわかった。このことから、クレータ緩和度の指標として、クレータの深さ/直径比よりも内壁傾斜が適していることがわかった。

次に、クレータ形成年代と緩和度の関係を調べるために、Mare Serenitatisの直径1 km~2 kmの25個のクレータに対して緩和度とクレータの周りの地表のOMATの比較を行い、緩和度と形成年代をそれぞれ評価した。緩和度と放出物のOMAT値を比較したところ、両者には負の相関があり、OMAT値が高く新鮮なクレータであるほど、緩和の程度も小さいことがわかった。

試料分析やクレーターカウンティングによっていくつかの大クレータについては形成年代が調べられている。これらのクレータ放出物のOMATと形成年代の間の関係を用いて、本研究で得られた地形緩和度とOMATの関係から、月面地形拡散係数は13-31 m²/Myrと見積もられる。

キーワード：クレータ、地形緩和、天体衝突、月

Keywords: crater, crater degradation, impact, Moon

Statistical analyses of bright ray craters on Ganymede: implications from Galileo and Voyager images

Statistical analyses of bright ray craters on Ganymede: implications from Galileo and Voyager images

*Xu Luyuan¹、宮本 英昭¹、平田 直之²

*Luyuan Xu¹, Hideaki Miyamoto¹, Naoyuki Hirata²

1. 東京大学総合研究博物館、2.神戸大学

1.The University Museum, The University of Tokyo, 2.Kobe University

Ray craters are impact craters surrounded by radial rays or ejecta patterns (both bright and dark) and prominent on Ganymede, the biggest satellite of Jupiter. Bright ray craters are recognized to be the youngest features on Ganymede [1], and represent the most recent impact cratering [2]. Also, being susceptible to destruction by various processes [1-3], bright ray craters may inform on the most recent geologic processes on Ganymede.

Passey and Shoemaker [4] identified 84 bright ray craters $D > 30$ km and obtained several preliminary results and conclusions using the image data of Voyager. However, since Voyager 1 and 2 only have sufficient resolution (better than 2 km/pixel) images limiting to the subjovian and antijovian surroundings [4, 5], the analysis of Galileo images could fill in this gap. Also, the revised global geologic map [5] and advanced cratering impact model [2] make a more accurate distribution and a more comprehensive understanding of bright ray craters of Ganymede possible.

In this study, we used the raw images of both Voyager and Galileo images (825 Voyager images and 314 Galileo images) to identify ray craters. Since the crater rays are sensitive to solar illuminations [2] and the coverage limitation of images, we only measured the ray craters at high sun conditions and in the latitudinal range 70°N - 70°S [5]. Also considering the identifiable sizes of ray craters are highly dependent on spatial resolution of images, we initially examined the influence of image resolution on the density distribution of ray craters.

Ultimately, our work resulted in a revised density distribution of bright ray craters corresponding to spatial resolution, latitude, angular apex distance, and different terrain types, finding that the crater density of bright ray craters on Bright Terrain of Ganymede is at least $\sim 4x$ from apex (the center of the leading hemisphere) to antapex (the center of the trailing hemisphere), and the bright rays are likely to be erased at a higher rate with increasing latitudes. Based on our results, we reconsidered the possible reasons for cratering asymmetry on Ganymede [2], and confirmed the influence of latitude-related factors, which might include thermal-driven sublimation [6] and plasma-induced sputtering [7].

References

- [1] Shoemaker E. M. et al. (1982) *Satellites of Jupiter*: 435-520.
- [2] Zahnle K. et al. (2001) *Icarus*, 153, 111-129.
- [3] Schenk P. M. and McKinnon W. B. (1991) *Icarus*, 89, 318-346.
- [4] Passey Q. R. and Shoemaker E. M. (1982) *Satellites of Jupiter*: 379-434.
- [5] Patterson G. W. et al. (2010) *Icarus*, 207, 845-867.
- [6] Squyres S. W. (1980) *Icarus*, 44, 502-510.
- [7] Khurana K. K. (2007) *Icarus*, 191, 193-202.

キーワード: Ganymede、bright ray craters、Galileo images

Keywords: Ganymede, bright ray craters, Galileo images

火星衛星探査計画のためのLIBSを用いた隕石判別実験

The discrimination experiment of meteorites using LIBS for the Martian Moons Explorer mission

*堀内 美沙¹、芝崎 和夫¹、長 勇一郎¹、亀田 真吾¹、石橋 高²、和田 浩二²、三河内 岳³、中村 智樹⁴、杉田 精司³

*Misa Horiuchi¹, Kazuo Shibasaki¹, Yuichiro Cho¹, Shingo Kameda¹, Ko Ishibashi², Koji Wada², Takashi Mikouchi³, Tomoki Nakamura⁴, Seiji Sugita³

1.立教大学、2.千葉工業大学惑星探査研究センター、3.東京大学、4.東北大学

1.Rikkyo University, 2.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 3.The University of Tokyo, 4.Tohoku University

火星にはフォボスとダイモスという2つの衛星がある。両衛星の起源は、小惑星が火星の重力によって捕獲されたという小惑星捕獲説と、初期火星に天体が衝突して、その時に飛散した火星初期物質が集積したという巨大衝突説の2つの説が存在している[1]。JAXAでは2022年に打ち上げを目標にしている火星衛星探査計画が検討されている。この計画はフォボスからサンプルリターンを行いフォボスの起源を判別することを大目標の1つとしている。起源がわかれば太陽系形成論に制約を与えることができる。起源を判別するためには、回収試料が衛星固有物質である必要があるため、フォボス全体の反射スペクトルを取得して試料採取地点を決定する。しかしフォボス表面は宇宙風化によって変成していると考えられており、粒子表面の状態を反映する反射スペクトルだけでは衛星固有物質の情報が隠されている可能性がある。また、今回の探査計画では着陸地点の粒子スケールでの地表の組成が不明であることと、回収試料を地球に持ち帰って分析するまで組成が分からないという問題がある。そこで反射スペクトルを変化させる宇宙風化の影響をほぼ受けない元素組成に着目する。私たちのグループでは元素組成を調べることのできるLIBS装置の搭載を提案し、フォボス表面で元素のその場測定を行うことで、これらの問題を解決することを試みている。

LIBS計測の実現可能性を実証するために一連の実験を行った。本実験では組成が報告されている炭素質コンドライトと火星隕石をLIBSで計測し、得られた元素組成から双方の判別可能性を検討した。これが可能であれば、フォボスの表面が小惑星に似た物質か火星に似た物質かを識別できることになる。実験系はこの計画でフォボスに着陸した時に使用される、実際の配置を想定して製作した。レーザーは出力が約12 mJで波長が1534 nmの小型のレーザーを使用し、分光器は波長範囲が約195 nmから1128 nmのものを使用した。レーザー光を集光するレンズと試料との間の距離と、分光器用の集光レンズと試料との間の距離は共に約1.5 m、集光光学系の有効径は約20 mm、試料は真空容器内に設置した。このような探査の現実的な条件の下で、S/Nの成立性なども含めて検証した。計測した試料は、Allende(炭素質コンドライト)、NWA1068(火星隕石)、Zagami(火星隕石)である。レーザーの繰り返し周波数を10 Hz、分光器の露光時間を1 sに設定し、1試料に対して16箇所測定を行い、1箇所に対してレーザーを150回照射した。隕石の平均組成を求めるために16箇所の発光スペクトルを平均した。その平均スペクトルからはFe, Ca, Al, Mg, Si, Tiなどの主要元素の輝線が検出された。さらにAllendeの発光スペクトルから他2つの試料の発光スペクトルをそれぞれ差し引くと、Allendeに多く含まれるFe, Mgの輝線波長のところはプラスの値になり、NWA1068とZagamiに多く含まれるAl, Caの輝線波長のところはマイナスの値になった。これよりLIBS計測で得られた発光スペクトルの差は、測定試料の元素組成の差を定性的に表していることがわかり、LIBS計測で小惑星に似た物質と火星に似た物質が判別できる可能性が高いことが示された。

実際の探査でLIBSが運用できる時間は約1時間であるとされており、短時間で計測を完了することが求められる。そこで、この時間内で本実験結果の実現可能性を検討した。1測定点あたりの焦点調整や撮像に10秒、測定点の移動に20秒かかると仮定する。また、レーザーの繰り返し周波数は電力の制約上2Hzとし、本実験の条件であった1測定点あたりのレーザー照射回数を150回、測定点を16点で計算すると、本実験と同様の測定にかかる時間は約28分となった。これより実際の探査でLIBSを運用できる時間内で本実験と同様の測定を行えることがわかった。以上の結果は、フォボス上でLIBSを用いることでフォボスの表面が小惑星に似た物質か火星に似た物質かを識別できる可能性が高いことを示している。

参考文献

[1] Fraeman, A. A., et al. (2012), J. Geophys. Res., 117, E00J15.

キーワード：火星衛星探査計画、LIBS、その場計測

Keywords: the Martian Moons exploration project, LIBS, in-situ measurement

「月と地球のミッシングリンク」を解決する新パラダイム、「月形成と地球のプレートテクトニクス」の起源を共に説明する「マルチインパクト仮説」と水星の形成

A new paradigm to solve "the missing link of "Moon and Earth"" is "Multi-Impact Hypothesis", it explains both Origin of the "Moon formation and the Earth's plate tectonics" and Formation of Mercury

*種子 彰¹

*Akira Taneko¹

1.SEED SCIENCE Lab.

1.SEED SCIENCE Lab.

人類に最も身近な太陽系には地球を含む9個の惑星がある。惑星科学では、この太陽系の起源と進化と現状を探究することを目的とする。人類を含む生命が発生する以前の太陽系の起源を探究する科学的方法では、演繹法、帰納法以外に創造的仮定法が挙げられる。帰納法で真理を発見する手段は、地球進化の観測か実験である。しかし実験結果が得られるのに数億年かかるという問題がある。実験するには費用も材料も足りなく、実際には実験が不可能です。

手段として今まで地球観測以外に何も無かった。仮説を立てて、その結論が現状を説明できる事が多ければ多いほどその仮説は信じられる。今、Abduction創造的推論では、逆に云えば正しさが増すという考え方です。それは起源や謎を探求するには最適な方法であるが、しかし画期的な仮説を考えつかないと、まったく意味がありません。「マルチインパクト仮説」では、(A)と(B)の仮説と以下の「月と地球のミッシングリンクを繋ぐ」統一的な推論を得た。(A)太陽系の小惑星帯位置に形成された火星サイズの分化した原始惑星CERRAが、その直近の木星(巨大質量)の摂動により、軌道が木星近点側に偏平化する。(B)そのCERRAが木星衝突する直前に、木星と太陽の張力で断裂し、そのマントル片が地球軌道と交差しており衝突する。

アブダクションによる<結論>

(1)月の起源：マントル片が地球に衝突(12.4km/s, 36.5度)し、軌道半径60・Re位置に形成

* (2)環太平洋弧状列島縁海起源：月形成時の太平洋位置衝突では、全方向へ凹縁海形成

* (3)月形成衝突で大量のマントル欠損により、コア偏芯(約10%)のブラジルのバンアレン帯が低下。

* (4)CERRAが木星摂動で軌道偏平し断裂するまで約5~6億年掛かり、既に分化冷却していた。

* (5)地球へ複数のマントル片が衝突して、マントル剥離しアイススタシーで-5kmの地球表面の70%海が形成した。

* (6)プレートテクトニクスPTの起源、駆動力は衝突による偏芯と慣性モーメントの最小化である

* (7)プレート境界の起源：マントル片衝突による地殻剥離と亀裂形成

* (8)弧状列島と縁海盆凹プレートの起源：衝突によるマントル欠損とアイススタシーでプレート凹形成

* (9)凸プレート沈み込み開始の起源：その駆動力で凹プレートと凸プレートが押し合うと凹の下に凸が潜り込む原因となる。

(10)CERRAの断裂時の破片は小惑星帯の起源である。長半径(運動エネルギー)の分布で理解

(11)隕石には、分化した石質・石鉄・鉄隕石が混在しているがそれはCERRAの破片と理解できる。

(12)CERRAの破片は複数あり、順次衝突して度重なる生物絶滅が起きた。

(13)セラのコアとマントルの一部は質量が大きい為に速度が低下し、エネルギー等分配の法則により軌道エネルギーの低い水星(多くの割合をコアが占める)となった。

(14)CERRAの破片が木星へ衝突した事が、大赤斑の起源となった。

cf. シューメーカーレヴィ9号彗星が1997年7月に木星に衝突し、衝突痕は小赤斑として約半年間残った。

彗星より大きいセラの破片なら、数億年前から消えることなく大赤斑を維持できる。これで実証実験が済んだのか?

(15)何故冥王星は石質であるのか? 木星や土星はガス惑星である! 私は提案した。「木星でスイングバイしたセラ破片が冥王星になった」

(16)地軸の傾き23.5度は 高緯度への衝突で実現された! アフリカのプレミア鉱山のキンバーライトパイプはマ

ントル下部からの炭素が超高压のまま急冷し噴出してきたダイヤモンドを含む。鉾山の形状は知られていたが、何故できたのかは不明であった。地球の反対側へのマントル片の衝突で、そのエネルギーが地球の反対側に集中して、その圧力で噴出してパイプができた。ハワイの衝突とアフリカのパイプは互いに反対位置であり、アフリカは既に移動している。ロシアのミルーヌィ鉾山位置へのキンバーライトパイプ形成は、Drke Passage(高緯度)への衝突により、地軸の傾斜が変わるモーメントを与えた。

(17)自転軸の傾きは駆動力の方向も変えて、天皇海山列の急な曲がりも説明できる。(熱対流駆動説では急変の説明が不可能と思われる)

この様に「月と地球のミッシングリンク」をアブダクションで解明できた。

キーワード：月と地球のミッシングリンク、月形成起源、プレートテクトニクス起源、アブダクション、水星の形成、ティティウス・ボーデの法則

Keywords: the missing link of "Moon and Earth", Origin of the "Moon formation", Origin of the "Platet ectonics", Abduction, Formation of Mercury, Titius Bode law

8. チチウス・ボーデの法則の

チチウス・ボーデの法則を再検討 (1) 2015 10-14

問題点,

8-1. 本仮説での証明方法

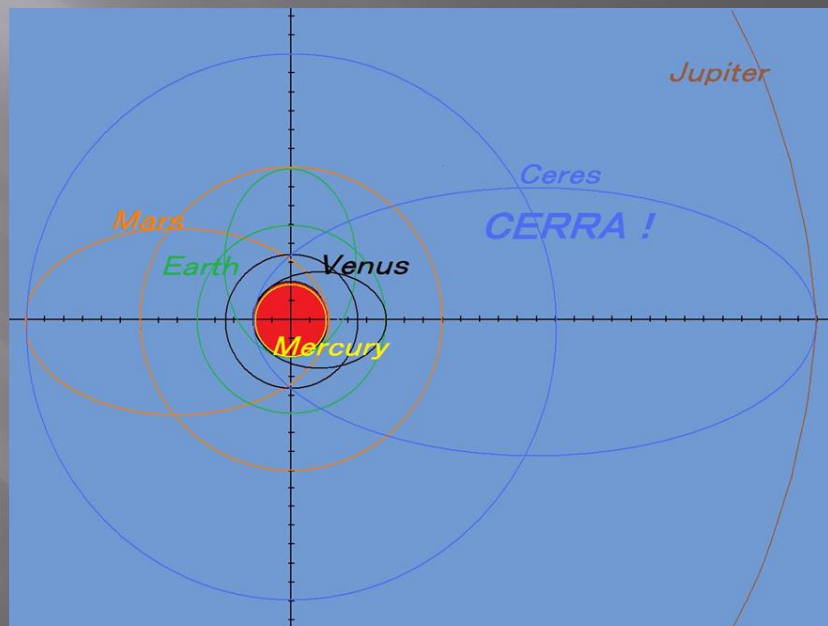
種子彰 2015

- ◆ 水星 $n = -\infty$ の理由が説明できない。⇒ 禁制帯とマルチインパクト仮説。
- ◆ 小惑星帯 $n = 3$ の欠番理由が説明できない。⇒ CERRAの潮汐関断裂。
- ◆ 海王星 $n = 7$ で

の不一致と、冥王星の一致の理由が説明できない。⇒ CERRA断片のフライバイと海王星衝突

8-1. <証明>

- 禁制帯、フィードバックゾーンでの合体
- 微惑星楕円軌道近点での衝突合体による軌道縮退
- CERRAの潮汐断片⇒水星に。
- 断片木星スイングバイ⇒冥王星



空隙のある天体表面の衝突脱水模擬実験

Experimental simulations on impact-induced dehydration of porous surfaces

*崔 仁士¹、小川 諒²、中村 昭子²、瀬戸 雄介²、小川 和律²

*Jinshi Sai¹, Ryo Ogawa², Akiko Nakamura², Yusuke Seto², Kazunori Ogawa²

1.東京大学大学院理学系研究科、2.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate school of science, Tokyo University, 2.Graduate school of science, Kobe University

惑星の形成と成長は、微惑星同士や小天体の衝突、集積によって起こる。このような、微惑星や小天体の衝突とそれに伴う脱水は惑星の初期大気構成や惑星への水の供給に大きな影響を与える。このことから、天体の衝突脱水を理解することは水惑星の起源を考えるうえで重要である。また、近年、太陽系や惑星の起源を探るために小天体に関する研究が盛んに行われており、サンプルリターンを目的とする小惑星探査計画も進められている。小惑星探査機はやぶさ2は、水鉱物を含む可能性があると考えられているC型小惑星、リュウグウからのサンプルリターンを行う。持ち帰ったサンプルにおける衝突脱水の影響を議論するためにも、天体の衝突脱水についての理解は重要であるといえる。

衝突脱水に関する実験的研究は多く行われており、そのうち主な手法は固体回収実験である。この方法は、サンプルに直接弾丸を撃ち込まず、サンプルを金属密閉容器に入れその容器に弾丸をぶつけるというものである。この方法により衝突圧力に対するサンプルの脱水率が求められているが、固体回収実験ではサンプルを容器に入れて実験を行うため自然な天体表面での衝突過程をよく模擬しているとはいいがたい。また、脱水率とサンプルの空隙率の関係に焦点を置いた実験もなされているが、その関係の詳細は明らかではない。小惑星は様々な空隙率をもつので、小惑星の衝突脱水を考えるうえで、空隙率と脱水率の関係を明らかにすることが必要である。

本研究では、より自然に近い状態を模擬するために開放系での衝突脱水実験を行い、また、標的サンプルに空隙率の異なるいくつかの二水石膏を用いて実験を行うことで、脱水率と空隙率の関係について調査した。

蓋がないステンレス円筒容器にサンプルを入れ弾丸が直接標的サンプルに衝突するようにし、また、標的を設置したチャンバー内は0.1気圧程度まで減圧して衝突実験を行った。実験の際には、ハイスピードカメラで弾丸軌道を撮影し、その画像から衝突速度を求め、求めた衝突速度を用いてインピーダンスマッチング法により衝突圧力を求めた。弾丸にはポリカーボネートの先端に金属を取り付けた円柱弾丸を用いた。弾丸の金属部分には厚さが2.3mmのSUSと5.0mmの銅の二種類を用いた。その後、衝突により圧縮され弾丸の先端に付着したサンプルを回収し分析を行った。回収したサンプルの分析として、まずXRDによる成分測定を行い、脱水と脱水以外の組成の変化が起きているかを確認した。次に、熱重量分析を行い回収したサンプルの含水率を求め、衝突実験前の二水石膏の含水率との比較から衝突による脱水率を求めた。その後、成分測定の結果と求めた脱水率の比較、考察を行った。また、サンプルの空隙率や弾丸の厚さの違いにより、衝突圧力に対する脱水率に何か傾向や違いが見られるか考察を行った。

XRDによる成分測定の結果、実験後回収したサンプルに二水石膏の脱水反応により生成される半水石膏と無水石膏の存在が確認されたので、衝突により脱水が起こったことが確かめられた。ただし、無水石膏はほとんどの場合でわずかにしか生成されていなかった。また、脱水以外の組成の変化は見られなかった。全てのサンプルにおいて成分測定と熱重量分析の結果のよい一致が見られ、衝突による確かな脱水率が求められた。SUS弾丸で実験を行ったときよりも、同じ直径で厚さがより大きい銅弾丸で実験を行ったときの方が、脱水率が高い傾向が見られた。これは弾丸の厚さの違いからくる圧力継続時間による影響と考えられ、圧力継続時間が脱水率に関係していることが示唆された。脱水率に対する空隙率の影響は見られなかった。本研究では、より天体表面の状態に近い、開放系での衝突脱水実験でデータを得たとともにサンプルの回収方法の問題点や回収できるサンプルの量などの基礎データが得られた。

キーワード：衝突脱水、空隙率

Keywords: impact-induced dehydration, porosity

2次破壊とターゲットの組織が衝突破片の3次元形状に及ぼす影響

Effect of secondary collision and target texture on three-dimensional shape distribution

*門川 隆進¹、土山 明¹、道上 達広²、長谷川 直³、中野 司⁴、上杉 健太郎⁵*Tokiyuki Kadokawa¹, Akira Tsuchiyama¹, Tatsuhiro Michikami², Sunao Hasegawa³, Tsukasa Nakano⁴, Kentaro Uesugi⁵

1.京都大学大学院 理学研究科、2.近畿大学 工学部、3.JAXA、4.産業総合研究所、5.JASRI/SPring-8

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Kinki University, 3.ISAS/JAXA, 4.AIST, 5.JASRI/SPring-8

はやぶさ計画やアポロ計画・ルナ計画によって持ち帰られた小惑星イトカワや月のレゴリス粒子の3次元形状（3軸比）の分布 [1,2] は、レゴリス粒子の生成条件を反映していると考えられ、イトカワや月がどのような衝突過程を経てきたのかを推測するために、室内高速衝突実験で生成する破片粒子との比較が重要である。これまでの室内実験において、衝突破壊における破片の3次元形状分布は、破片の長軸 a :中間軸 b :短軸 c の比が、分布に広がりはあるものの平均として $2:\sqrt{2}:1$ となるという、特徴的な分布をもつ可能性が指摘されている [3]。しかしながら、これは激しいカタストロフィック破壊によって得られたものであり、より広い条件での検証が必要である。このため、Michikami et al. [4]は、クレータリングからカタストロフィック破壊までの幅広い衝突エネルギー条件での衝突実験を行い、衝突エネルギー密度が低い場合には平均3軸比は必ずしも $2:\sqrt{2}:1$ とはならないことを見出した。しかしながら、このとき3軸比が測定された破片サイズ (>4 mm) はイトカワや月レゴリス粒子のサイズ (20-300 μ m) と比べて大きかった。そこで、我々は同じ実験で得られたレゴリス粒子サイズに対応する破片の3軸比測定を行い、(1)破片の3軸比はサイズ依存性をもち、(2)レゴリス粒子サイズ破片の平均3軸比は衝突エネルギー密度によらずほぼ $2:\sqrt{2}:1$ となり、イトカワ粒子の3次元分布と区別できないことを示した [5]。しかしながら、この研究では衝突破片に対する2次破壊やターゲットの岩石組織の破片形状に対する影響が評価されておらず、レゴリス粒子との比較に至っていない。

本研究では、これらの影響を明らかにし、室内での高速衝突実験が宇宙空間での衝突を模擬できているか検証するために追加の衝突実験を行なった。衝突実験は、JAXA宇宙科学研究所の2段式水素ガス銃を用いた。ターゲットは玄武岩、かんらん岩、普通コンドライト隕石(L4/5)、鉛ガラス（所謂クリスタルガラス）を採用し、弾丸はナイロン球(直径7.14mm)とアルミナ球(1mm)の2種類を約1.6-7.0km/s の速度範囲で衝突させた。回収した破片のうち、①エアロゲルで捕獲した2次破壊を防いでいると思われる破片、②衝撃吸収材の表面に軽く乗っていた破片の2種類で微小なもの(約30 μ m-600 μ m)について、SPring-8のマイクロX線CTを用いてその3軸長を測定し、それらの3次元形状分布についてK-S(Kolmogorov-Smirnov test)検定を用いて比較をした。破片粒子の3次元形状分布の測定結果からは、以下のことが明らかになった。(1)同じ衝突条件の実験において、エアロゲルで捕獲した破片の形状分布や平均3軸比は衝撃吸収材の表面に軽く乗っていた破片と有意に区別できない。よって、門川ら [5]で測定された粒子は2次破壊の影響を受けていない、もしくは2次破壊がレゴリス粒子サイズでの破片の形状に及ぼす影響は小さい。(2)玄武岩の破片形状分布は鉱物の集合体(岩石)であるかんらん岩・コンドライト隕石の破片形状分布とは有意に区別できないが、均質な物質であるガラスとは有意に区別できた。よって、玄武岩での室内衝突実験は宇宙空間での衝突を模擬していると考えられる。これらは、門川ら [5]の測定結果がイトカワや月のレゴリス粒子に適応できるということを意味している。彼らの結果を用いてイトカワ粒子と比較すると、イトカワ粒子は衝突破壊によってできたと考えて矛盾はないが、その3次元形状からその衝突条件は推定できないことがわかった。また月粒子については単純な衝突破片に比べて平均3軸比がやや1に近く、レゴリスでのガーデニングの影響を受けていると推測できることがいえる。

[1] Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333,1125-1128. [2] 櫻間ら(2015) 日本地球惑星科学連合大会予稿集 PPS23-P10. [3] Fujiwara et al. (1978) Nature, 272, 602-603. [4] Michikami et al. (2015) Icarus, 264, 316-330. [5] 門川ら(2015) 日本惑星科学秋季講演会予稿集 04-05.

岩石天体の衝突破壊に対する斜め衝突の効果

Effects of oblique impacts on catastrophic disruption of rocky bodies simulated by quartz glass

吉田 優作¹、*荒川 政彦¹、保井 みなみ¹、小川 和律¹、岡本 千里¹

Yuu-saku Yoshida¹, *Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui¹, Kazunori Ogawa¹, Chisato Okamoto¹

1.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kobe University

Planetary collisional process is one of the most important physical processes in the solar system, especially for the planetary formation process in the solar nebulae. Because of the importance of the physical process and the implications for the origin of asteroids and other small bodies, impact disruption experiments have been conducted for several decades, and rocky materials such as basalt and glass etc. were used for these impact experiments. Then, the impact strength defined by the specific energy (Q) necessary for the catastrophic disruption was obtained for these rocky materials, and most of the impact experiments were conducted by head-on collisions, so that the impact strength was usually applicable only for the head-on collision. However, collisions among planetary bodies are well known to be not only head-on collision but also oblique collision, and actually the impact angle of 45 degrees is the most probable impact angle in the solar system. Therefore, it is necessary to study the impact strength for the oblique impact and to clarify the effect of oblique impact on the collisional disruption of rocky bodies.

In this study, we conducted the impact experiments of quartz glass at the impact angle from 90 (head-on collision) to 0 (glancing impact) degrees, and studied the effect of oblique impacts on the degree of disruption and the ejection velocity of the ejecta fragments. We used quartz glass spheres with the size of 5cm and 8cm for the target, and a polycarbonate spherical projectile with the size of 4.75mm was launched at the impact velocity from 2 to 6km/s. The oblique impact was made at 15 to 90 degrees at 4.3km/s under the vacuum condition of 20Pa. After the impact, all the impact fragments were recovered to measure each weight in order to construct the size distribution of these fragments.

We found that the largest fragment mass was almost constant at the impact angle from 90 to 60 degrees, and it suddenly decreased from 60 to 45 degrees for the 5cm target, and then gradually increased up to 15 degrees: the largest fragment mass at 45 degrees was one order of magnitude larger than that obtained from the impact between 90 and 60 degrees. Although the impact strength could be strongly affected by the impact angle at the high obliquity smaller than 45 degrees, the modified specific energy (Q_c) defined by the normal component of the impact velocity on the impact surface was an appropriate parameter to scale the impact angle on the degree of the impact disruption, then the impact strength (Q^*) could be refined by using this modified specific energy, Q_c : The obtained impact strength defined by Q_c including the oblique impacts is 1110 J/kg for the quartz glass. We also found a very unique feature on the quartz glass during the disruption, that is, the severe disruption and high velocity ejecta was discovered at the antipodal region. The mass of disrupted fragments originated from the antipodal region was almost same as that was originated from the cratered region near the impact site. This might be caused by the severe concentration of the shock wave at the antipodal region and it would be reflected on the free surface with the perfectly spherical shape of the quartz glass. But, further research would be necessary to understand this unique features discovered at the antipode.

キーワード：カタストロフィック破壊、斜め衝突、衝突破壊強度

Keywords: catastrophic disruption, oblique impact, impact strength

石英の衝撃誘起ガラス化とカソードルミネッセンスの系統的变化：新しい衝撃圧力計としての可能性
Shock induced vitrification, defect generation, and change in cathodoluminescence of quartz: possibility as a new shock barometer

*常 ユイ¹、鹿山 雅裕²、田近 英一³、関根 康人¹、関根 利守⁴、西戸 裕嗣⁵、小林 敬道⁶

*Yu Chang¹, Masahiro KAYAMA², Eiichi Tajika³, Yasuhito Sekine¹, Toshimori Sekine⁴, Hirotsugu Nishido⁵, Takamichi Kobayashi⁶

1.東大 理 地惑、2.神戸大 理 惑星学、3.東大 新領域 複雑理工、4.広島大 理 地惑、5.岡山理科大 自然科学研究所、6.物質材料研究機構

1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2.Planetology, Kobe Univ., 3.Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, 4.Earth & Planetary Sci., Hiroshima Univ., 5.Research Institute of Natural Science, Okayama Univ. of Science., 6.National Institute for Material Science (NIMS)

Impact cratering is a ubiquitous process on both terrestrial planets and small bodies in the solar system. Researches for impact craters on the Earth provide a valuable opportunity to constrain planetary-scale impact event. In particular, reconstruction of shock pressure recorded in the shock-metamorphosed minerals leads to a clue to understand a partition of the impact energy and cratering mechanism on Earth.

Quartz, which is one of the most abundant and widely distributed rock-forming mineral on the Earth's crust, has been widely used to evaluate shock pressure on the impactite. However, the conventional shock estimations based on the mineralogical features of quartz, such as PDFs, are no more than a qualitative approach, hence it is required for more detailed evaluation of shock pressure to develop new advanced method using quartz.

Recently, we found the drastic change in cathodoluminescence (CL) features of quartz due to shock metamorphism [1]. The blue emission intensity (450-460 nm) of shocked quartz increases drastically with the experimentally induced pressure and reaches up to 100 times as large as that of the starting materials. On the other hand, CL intensity around 630 nm changes less than 3 times in spite of the pressure increase. Therefore, the relationship between shock pressure and blue CL intensity could be used as a new shock barometer. The mechanism for the increase in the blue CL intensity, however, still remains unclear because of a lack of information on structural defect in shocked quartz. In this study, Raman spectroscopy and EBSD analysis were conducted for the experimentally shock-induced quartz to clarify the structural change and generation of misorientations with the pressure. Consequently, we elucidated the CL mechanism of shocked quartz by comparison with the obtained Raman and EBSD data.

Raman spectra of the shocked quartz show a weakening of the main peak at $\sim 464 \text{ cm}^{-1}$ with pressure increase. At 30 GPa, the new peak at $\sim 495 \text{ cm}^{-1}$ appears, indicating the generation of shock-densified silica glass [2]. EBSD mapping revealed that shocked quartz undergo high pressure (~ 20 GPa) has high-density domains with boundary misorientation dominated by 60° , suggesting the development of Dauphiné twinning. However, for the quartz undergo pressure over 30 GPa, EBSD diffraction pattern was unrecognized because of low crystallinity. Therefore, the blue CL emission is closely related to Dauphiné twin, but this phenomenon is limited to the pressure lower than 30 GPa. On the other hand, the destruction of crystal structure and generation of high-density silica glass are consistent with the continuous increase in CL intensity of blue emission with pressure increase. These facts indicate a spectral change depending on the extent of vitrification. The relationship between CL intensity and the possibility as a new shock barometer will be also discussed.

[1] Chang et al., (2015) JpGU Meeting, PPS22-19.

[2] Okuno et al., (1999) PCM, 26, 304-311.

キーワード：衝撃変成作用、衝撃変成石英、カソードルミネッセンス、顕微ラマン分光、電子後方散乱回折
Keywords: shock metamorphism, shocked quartz, cathodoluminescence, micro-Raman spectroscopy, EBSD

チェリャビンスク大火球の発光メカニズム

Radiation mechanism of the Chelyabinsk superbolide

*柳澤 正久¹*Masahisa Yanagisawa¹

1.電気通信大学情報理工学研究科

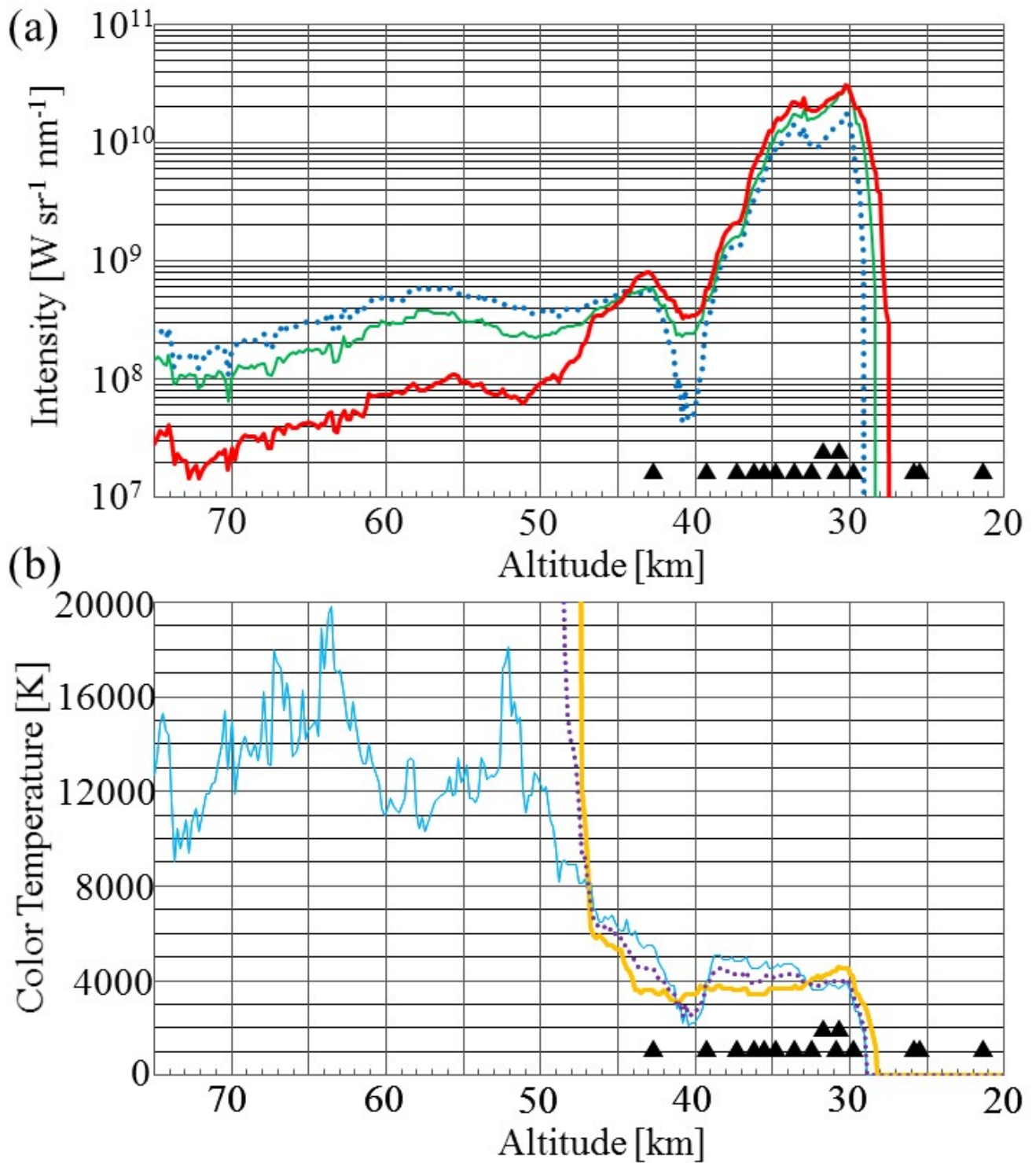
1.The University of Electro-Communications

2013年2月15日3時20分(世界時)にロシア南西部の都市チェリャビンスク(Chelyabinsk)近郊で観測されたチェリャビンスク火球の爆発規模はTNT爆薬500 kton相当で(1 kton = 4.2×10^{12} J)、同じく天体衝突が原因と考えられている1908年のツングースカ爆発(約2000 kton)に次ぐ大きさだった。アポロ型小惑星の軌道を持つLL5コンドライト組成のメテオロイドの地球大気との衝突が原因だった。我々は、車載カメラによって撮影された動画を解析し、火球のRGB(赤、緑、青)の各バンドでの明るさの時間変化を調べた(Fig. 1)。そしてバンド間での明るさの比が黒体放射で説明できるかどうかを検討した。なお、このカメラでは、非常に強い光が入射した場合に、像が真白に飽和するのではなく、逆に黒くなるというCMOSイメージセンサ特有の性質が十分補正されていない。そのため、火球の最も明るい部分が暗い像として浮かび上がっており、その形状を知ることができた。結果は次のようにまとめることができる：(a) 光エネルギーの90%は、高度47 kmで始まったメテオロイドの分裂に伴う1-2秒間のフレア(光度が急激に増大する現象)で放出された；(b) 高度47 km以上での放射は、黒体放射ではなかった；(c) フレア時のスペクトルは約4000 Kの黒体放射と矛盾しない；(d) 放射領域は、最も明るい時には直径1 km、長さ7 kmに及んだ。結果(c)(d)は高度80 km以上での流星の発光とは異なる。流星では線スペクトルが卓越しており、また、主な発光領域の長さは直径に比べて2倍程度である。低高度(47 km以下)でのメテオロイドの分裂がその発光特性に大きな影響を与えたようである。なお、以上の結果の詳細については以下を参照されたい。M. Yanagisawa, Radiative characteristics of the Chelyabinsk superbolide, Planetary and Space Science., 118C, 79-89, 2015.

Figure 1. (a) Bandpass photometric intensities for the Chelyabinsk bolide plotted as functions of the bolide altitude. The thick, thin, and dotted lines respectively show the intensities in the R, G, and B bands. The black triangles indicate the altitudes at which meteor fragmentation occurred, with the upper two triangles corresponding to severe fragmentation events. (b) Color temperatures for the bolide as functions of altitude. The thick, thin, and dotted lines show the temperatures based on the R/G, G/B, and R/B intensity ratios, respectively. The error is expected to be about ± 400 K.

キーワード：チェリャビンスク、大火球、火球、流星、メテオロイド、自然災害

Keywords: Chelyabinsk, bolide, fireball, meteor, meteoroid, hazard



巨大惑星による小天体の捕獲

Capture of small bodies by a giant planet

*樋口 有理可¹、井田 茂²

*Arika Higuchi¹, Shigeru Ida²

1.東京工業大学、2.東京工業大学地球生命研究所

1.Tokyo Institute of Technology, 2.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

We have investigated the dependence of the prograde/retrograde temporary capture of asteroids by a planet on their original heliocentric semimajor axes through analytical arguments and numerical orbital integrations in order to discuss the origins of irregular satellites of giant planets. We found that capture is mostly retrograde for the asteroids near the planetary orbit and is prograde for those from further orbits. An analytical investigation reveals the intrinsic dynamics of these dependences and gives boundary semimajor axes for the change in prograde/retrograde capture. The numerical calculations support the idea of deriving the analytical formulae and confirm their dependence. Our numerical results show that the capture probability is much higher for bodies from the inner region than for outer ones. These results imply that retrograde irregular satellites of Jupiter are most likely to be captured bodies from the nearby orbits of Jupiter that may have the same origin as Trojan asteroids, while prograde irregular satellites originate from far inner regions such as the main-belt asteroid region.

キーワード：不規則衛星、小天体

Keywords: irregular satellites, small bodies

ガス抵抗による微惑星捕獲

Capture of planetesimals by gas drag

*末次 竜¹、大槻 圭史¹*Ryo Suetsugu¹, Keiji Ohtsuki¹

1.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kobe University

巨大惑星の周りには数多くの衛星があり、これらは規則衛星と不規則衛星に分類できる。規則衛星は惑星近傍でほぼ円軌道で公転していることから、周惑星円盤内で固体が集積することで形成されたと考えられている。一方、不規則衛星の軌道は楕円で、逆行方向に公転しているものもあるため、捕獲された微惑星が起源だと考えられている。

近年、周惑星円盤への固体物質の供給過程が詳しく調べられた。その結果、従来の規則衛星の形成モデルでは考慮されていなかった微惑星も、周惑星円盤通過時のガス抵抗によって捕獲され、円盤に衛星の材料物質として供給されることが明らかになった(Fujita et al. 2013, Tanigawa et al. 2014)。先行研究では周惑星円盤の散逸過程は考慮していなかったが、実際には原始惑星系円盤の散逸やギャップ形成によるガス供給の減少によって散逸したと考えられる。こうした惑星形成終了直前でのガス密度の低い周惑星円盤によって捕獲された微惑星が不規則衛星になった可能性がある(Cuk & Burns 2004)。しかしながら、弱いガス抵抗による微惑星捕獲過程は不明な点が多い。そこで本研究では、軌道計算を用いて周惑星円盤の散逸過程を考慮した微惑星の捕獲について調べた。

ガス抵抗が弱い場合、微惑星は一回の近接遭遇で大きくエネルギーを失い捕獲されるのではなく、惑星周りを一時的に公転している間に次第にエネルギーを失い、捕獲されることが明らかとなった。こうした捕獲は微惑星の惑星周りの公転方向が順行でも逆行の場合でも起こる。また周惑星円盤の散逸の効果を検討した場合、円盤の散逸時間が長いほどガス抵抗を受けている時間が長いため、離心率や軌道傾斜角が小さくなる傾向があることがわかった。不規則衛星の軌道要素と比較した場合、順行の不規則衛星の軌道長半径の分布と数値計算結果は合ったが、逆行の場合は観測値よりも小さな軌道長半径をもつものが大半であった。そのため、三体相互作用といった他の捕獲過程が必要だと考えられる。

一方、火星の規則衛星の起源についても火星の原始大気からのガス抵抗による微惑星捕獲が寄与した可能性がある。そこで球対称のガスによる微惑星の捕獲及び軌道進化についても調べた。その結果、球対称の大気からのガス抵抗による捕獲の場合でも、周惑星円盤の場合と同様の一時捕獲を経由した捕獲過程によって、微惑星が捕獲されうることを明らかにした。

キーワード：惑星、衛星、微惑星

Keywords: Planet, Satellite, Planetesimal

円盤形成段階における微惑星形成の可能性

Possibility of Planetesimal Formation in Disk Formation Stage

*本間 謙二¹、中本 泰史¹

*Kenji Homma¹, Taishi Nakamoto¹

1.東京工業大学地球惑星科学専攻

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

微惑星は惑星の元となる天体であり、微惑星が形成される条件を考えることは、現在の太陽系の成り立ちや系外の惑星系の理解のためにも非常に重要な事である。微惑星は、原始惑星円盤内の μm サイズの固体微粒子（ダスト）が合体成長し km サイズまで成長し形成されると考えられるが、その過程には様々な困難がある。中でもメートルサイズのダストがガス円盤中でガスによる抵抗力を受け、角運動量を失って中心星へ落下してしまう中心星落下問題は深刻な問題である。

一方、空隙率の大きいダストアグリゲイトは中心星への落下を回避しうることが示唆されている。高空隙率な氷ダストアグリゲイトは、最小質量円盤モデルでは 10AU よりも内側の領域で、直接合体成長により微惑星サイズへ成長可能であることが示されている(Okuzumi et al. 2012)が、このような円盤モデルではガス円盤の時間進化は考慮されていない。ダストの合体成長がどのようなタイミングで開始するのかは円盤の状態に依存するので、実際の微惑星形成を考える場合は、円盤の時間進化とダストの合体成長を同時に考える必要がある。本研究では、円盤の形成とダストの合体成長が同時に起きているという状況を考え、分子雲コアの崩壊から円盤の粘性進化を含めた一次元の円盤モデルを用いて計算を行った。その際、内部密度進化を考慮した氷ダストの合体成長計算を行い、微惑星サイズへと合体成長可能な条件を調べた。その結果、微惑星サイズへと合体成長可能なのは、比較的大きな角速度を持つ分子雲から形成され、なおかつ粘性の小さい円盤の場合であることがわかった。この場合は、氷ダストが中心星へ落下するようなサイズになる前に、十分な空間密度の氷ダストがスノーライン外側に供給されるからである。またこの結果は、そのような円盤であれば、微惑星は分子雲コアの崩壊から数十万年で形成される可能性を示唆している。

周惑星ガス円盤中での微惑星軌道進化

Orbital evolution of planetesimals in circumplanetary gas disks

*川村 浩司¹、大槻 圭史¹、末次 竜¹*Hiroshi Kawamura¹, Keiji Ohtsuki¹, Ryo Suetsugu¹

1.神戸大学

1.Kobe University

質量の十分大きなガス惑星はその形成過程の後期において、原始惑星円盤からガスと固体を重力により捕獲することで周惑星円盤を形成する。巨大惑星の周りには規則衛星が確認されているが、それら規則衛星の公転軌道はほぼ順行の円軌道に近く、中心惑星の赤道面にそろっているため、周惑星円盤の中で固体粒子が衝突合体を繰り返すことにより集積して形成されたと考えられている。太陽系内の衛星の全質量のうち殆どは規則衛星が占めているため、衛星系を理解する上で規則衛星の形成過程を理解することは重要となってくる。従来の研究(Shimizu & Ohtsuki、投稿準備中)では微惑星をテスト粒子とした三体計算により原始衛星を含んだ周惑星円盤中の微惑星の速度進化を調べていたが、微惑星の質量が大きい場合、原始衛星の平均運動共鳴に捕まるため微惑星同士の相互重力や衝突の効果が重要となる可能性がある。例えば、微惑星同士の衝突合体により微惑星の質量が変化し、共鳴捕獲から逃れうる。本研究では微惑星間の相互重力を考慮したN体シミュレーションを用いて原始衛星が存在する周惑星円盤内での微惑星の軌道進化を調べ、その結果について議論する。

キーワード：衛星形成

Keywords: Satellite formation

原始惑星系円盤のダスト沈殿層におけるストリーミング不安定性

Streaming instability in the dust layer of a protoplanetary disk

*長谷川 稜¹*ryo hasegawa¹

1. 東京大学大学院理学系研究科

1. graduate school of science the university of tokyo

原始惑星系円盤において、固体微粒子のダストから成る微惑星の形成過程は、相反する2つのモデルが存在する。

その内の一つは、円盤中心面へのダスト沈殿が進むと、ダスト層が自己重力不安定を起こして、キロメートル・サイズの微惑星が形成されるというものである。重力不安定が生じるためには、ダストの密度が重力不安定の臨界密度を超える必要がある。

本研究では、動径方向のガスとダストの速度差から生じるダスト沈殿層でのストリーミング不安定性(Johansen & Youdin 2007)に注目し、ダストガス比が~1の薄いダスト層において、密度擾乱により実現される最大ダスト密度を調べた。

原始惑星系円盤での鉛直方向拡散によるダストアグリゲイトの焼結

Sintering of icy dust aggregates by vertical diffusion in a protoplanetary disk

*児玉 季里子¹、城野 信一¹*Kiriko Kodama¹, Sin-iti Sirono¹

1.名古屋大学大学院環境学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

原始惑星系円盤はガスとダスト微粒子で構成されている。ダスト微粒子の付着成長が惑星形成の第一ステップであるので、ダスト微粒子が付着成長できるか否かを知ることは重要である。ダスト微粒子には氷ダストと岩石ダストがある。本研究では氷ダスト微粒子に注目する。氷ダストアグリゲイトは加熱されると焼結する。焼結とは表面積が小さくなる方向に物質が移動する現象である。氷ダストアグリゲイトが焼結するとダストのつなぎ目のネックが焼結により成長する。焼結したダストアグリゲイトは衝突すると跳ね返り成長できなくなるので、焼結の進行が惑星形成に影響する。

原始惑星系円盤では、熱源は中心星の可視光照射である。赤道面付近のダスト微粒子によって照射は遮られるため、円盤表面のダスト微粒子のみ加熱される。そのため乱流によって氷ダストアグリゲイトが高温の円盤表面付近に輸送されると、焼結が進む可能性がある。

Sirono, (2011, ApJ, 735, 131)では赤道面の温度分布から焼結に必要なタイムスケールが示されている。しかし、氷ダストアグリゲイトが鉛直方向に運動している場合での焼結タイムスケールはまだ研究されていない。そこで本研究では、数値シミュレーションによりダストアグリゲイトの鉛直方向の運動を算出し、焼結に必要なタイムスケールを求めた。

ダストアグリゲイトの鉛直方向の運動は乱流による拡散と、中心星の重力による沈降の2つである。この拡散と沈降を数値シミュレーションで再現することで、各ダストアグリゲイトの運動を算出する。焼結は温度に強く依存しているため(Sirono, 2011, ApJ, 735, 131)、氷ダストアグリゲイトは高温の領域に行くと、付着成長に影響するまで焼結する。数値シミュレーションで高温になる高さ以上を経験した焼結したダストアグリゲイトの割合を算出し、そこから焼結タイムスケールを得る。

一定時間が経つと、ダストアグリゲイトの分布は定常状態になる。定常状態になるまでのタイムスケールは沈降タイムスケールで決まる。分布が定常状態でも、各ダストアグリゲイトは円盤内の鉛直方向を上下に動き、高温になる高さまでいくと焼結する。そのため、焼結したダストアグリゲイトの比は時間とともに増加する。この結果をフィッティングすると、 $1-\exp(-t/b)$ でよく近似できることがわかった。ここで t は時間で b は焼結タイムスケールである。焼結タイムスケールは高温になる高さが減少するにつれ短くなる。また、焼結タイムスケールは拡散タイムスケールで決まり、ダストアグリゲイトのサイズには依存せず、乱流の強さのみに依存することがわかった。一方で、円盤表面の高温領域までの距離はダストアグリゲイトのサイズに依存している。成長によりダストアグリゲイトが沈殿すると、高温領域までの距離は短くなる。そのため、ダストアグリゲイトがあるサイズまで成長すると、鉛直方向拡散による焼結が起こる。ここから焼結によってダストアグリゲイトの成長が阻害されることが期待される。

キーワード：原始惑星系円盤、ダストアグリゲイト、焼結、乱流、拡散

Keywords: protoplanetary disk, dust aggregates, sintering, turbulence, diffusion

ペブル集積による地球型各惑星への水供給

Water Delivery to Terrestrial Planets by Pebble Accretion

*山村 武¹、井田 茂¹*Takeru Yamamura¹, Shigeru Ida¹

1.東京工業大学地球理工学研究科惑星科学専攻

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

The Earth would contain water of 0.023wt%-1wt% on the surface(ocean) and in the interior. It is observationally suggested that early Mars and early Venus had water. In particular, the water fraction of the early Mars may be comparable to that of the current Earth. Based on this information, we have investigated the water fraction of the Earth, Mars, Venus, and Mercury delivered by pebble accretion which is actively discussed today, numerically calculating the growth and inward migration of icy pebbles.

It is suggested that the snow line once migrated down to ~0.7AU. Then, the terrestrial embryo gained water components from capturing migrating icy pebbles from outer parts of the protoplanetary disk. Because icy components have been subtracted in the outer disk, the gas in the terrestrial planet region should have been 'dry'.

Using this model, Sato et al. (2016) calculated the amount of water delivered to the Earth by icy pebble accretion and showed that a relatively small disk, strong turbulence, late passage of the snow line at 1AU are required to be consistent with the inferred water content of the current Earth. We have generalized their simulation to a system of multiple planets (Earth, Mars, Venus and Mercury). While we used the same model of migration and formation of dust grains as Sato et al. (2016), we included decrease in pebble mass flux due to accretion by each planet. We found that the final water fraction of individual planets is directly determined by total amount of solid materials remaining in the disk. As long as the snow line passage timing at the individual planetary orbits is the same for all the planets, the final water fraction of individual planets should be similar to one another, while the amount of the water fraction depends on disk size, strength of turbulence, the timing of the snow line passage.

キーワード：ペブル、水、惑星

Keywords: pebble, water, planet

全球大循環モデルを用いた濃厚二酸化炭素大気における火星古気候シミュレーション
Simulation of the early Martian climate with denser CO₂ atmosphere using a general circulation model

*鎌田 有紘¹、黒田 剛史¹、笠羽 康正¹、寺田 直樹¹

*Arihiro Kamada¹, Takeshi Kuroda¹, Yasumasa Kasaba¹, Naoki Terada¹

1.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohoku University

現在の火星表面には、液体が流れた跡と考えられる地形が数多く発見されている。これが液体の水によるという前提のもと、太古の火星は温暖環境であったと考えられてきた。しかし、38億年程度前、すなわち太陽日射量を現在の75%としたより高圧の二酸化炭素大気を想定した火星大気大循環モデル[Forget et al., 2013]では、地表面気圧を7気圧程度まで上げてても地表温度は最高250K程度に留まり、水の融点に達しない。

我々は、太古の火星大気環境の再現を狙い、火星大気大循環モデルDRAMATIC MGCM [e.g., Kuroda et al., 2005]を援用した同様のシミュレーションを試みた。初期試行として、まず純粋CO₂大気を想定し、全球平均地表面気圧を0.1~5.1気圧の間で設定したシミュレーションを行った。Forget et al. [2013]と同様に火星の自転軸傾斜・離心率は現在と同じとし、またForget et al. [2013]では考慮していない非常に弱い(光学的厚さ0.01)ダストの放射効果を取り入れた。日射量は約38億年前の火星環境を想定して現在の75%とした。Forget et al. [2013]で導入されたCO₂氷雲の放射効果は、まだ導入していない。

CO₂平均大気圧が1気圧未満の場合、全球平均地表面温度は放射平衡温度である192Kにほぼ等しくなった。これは、太陽光強度がより弱い環境下では現在よりも寒冷化し、15μm帯CO₂赤外吸収帯による温室効果が働きにくくなることを意味する。また、CO₂平均大気圧が1気圧以上の場合、全球平均地表面温度は気圧とともに上昇して昇華温度に近くなり、全球的な温度分布でも昇華点近傍(200-210K)の緯度領域が広がった。これは、昇華・凝結によって生じる潜熱が温度の安定化をもたらしているためと考えられる。ただしForget et al. [2013]では、平均地表面温度が我々の今回結果に比べてCO₂平均大気圧が2-3気圧の時に約30K高くなり、その後は気圧とともに差は縮まっていき、5気圧でほぼ一致した。この相違の理由は2つ考えられる。1つ目は、我々のモデルに含まれないCO₂氷雲の影響である。我々のモデル結果ではCO₂平均大気圧3気圧以下においてCO₂氷雲量が気圧とともに増大しており(3気圧以上ではほぼ一定)、光学的に厚くなることで極域赤外放射の吸収によるより大きな温室効果が生じることが考えられる。2つ目は、地表面アルベドの影響である。Forget et al. [2013]と我々のGCMではCO₂積雪がある場所のアルベドの値が異なり(Forget et al. [2013]では0.5なのに対し我々のGCMでは0.65)、この影響により積雪域の面積が拡大した2-3気圧において、我々の結果では地表面温度が低温となったことが考えられる。

キーワード：火星、古気候、大気大循環モデル

Keywords: Mars, Paleoclimate, General circulation model

隕石重爆撃による大気・海洋量の進化

Erosion and Replenishment of Atmosphere and Ocean on Earth during Heavy Bombardment

*小佐々 唯¹、玄田 英典²、黒川 宏之²、井田 茂^{1,2}*Yui Kozasa¹, Hidenori Genda², Hiroyuki Kurokawa², Shigeru Ida^{1,2}

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

地球は、巨大衝突が完了した後にも、小惑星や彗星のような小天体の衝突を多く経験したと考えられている。この小天体の衝突は、大気が宇宙空間に散逸する大気はぎ取りや、逆に小天体内の揮発性成分が地球にもたらされる供給を引き起こす。小天体の衝突は地球形成直後の時期に集中していることが想定され、さらに初期の地球で既に海が存在している可能性(Wilde et al., 2001)がある。そこで、本研究ではこの隕石重爆撃による地球の大気量・海水量への影響を明らかにすることを目的として研究を行った。さらに、この過程が地球の高いH/C(Hirschmann & Dasgupta, 2009)や、ハロゲンの枯渇(Sharp & Draper, 2013)に寄与した可能性についても考察を行った。

天体の衝突による大気のはぎ取りに関する理論的・数値的な研究はいくつか行われており(Svetsov, 2000; 2007, Shuvalov 2009; 2014)、これらの先行研究では天体が惑星に衝突するときに、はぎ取られる惑星大気や地面の質量を解析的な計算や数値計算で求め、衝突天体サイズ、衝突速度、大気圧などのパラメータへの依存性を示している。また、de Niem et al. (2012)では、Svetsov (2000)の大気はぎ取りモデルを用いて、38億年前頃に起きたとされる後期重爆撃での大気のはぎ取りと供給の計算をMonte Carlo法を用いて計算している。地球質量のおよそ0.01%までの隕石を降らせ、結果として、大気はぎ取りよりも揮発性元素の供給が上回り大気圧が上昇することを示している。しかし、大気はぎ取りモデルに対する結果の依存性や、海水量の進化については調べられていない。

そこで本研究では、先行研究で示された1回の衝突による大気はぎ取りモデル(Svetsov 2000, 2007; Shuvalov 2009, 2014)と衝突天体のサイズ分布・速度分布に関するMonte Carlo計算を用いて、隕石重爆撃による大気と海の進化を同時に計算した。地球に降ってくる天体の総量として隕石重爆撃期の衝突天体の総量である地球質量の1%を仮定した。海のはぎ取りに関しては、Shuvalov (2009)の地面はぎ取りのモデルを用いた。衝突天体のサイズ分布としては、現在観測されている小惑星帯の小惑星のサイズ分布を用い、衝突速度に関しては、小惑星が地球に衝突する際の衝突速度を計算したモデル速度分布を用いた。揮発性成分については、3通りの値で別々に計算を行った。

結果として、Svetsov (2000, 2007)のモデルでは大気は多くはぎ取られ、初期大気圧に関わらず、大気圧は一定値に収束する傾向が見られた。収束する値は衝突天体内の揮発性成分の量に依存した。しかしShuvalov (2014)では大気のはぎ取りはあまり起きず、大気量の進化は大気はぎ取りモデルに大きく依存することが明らかとなった。また、海のはぎ取りに用いたShuvalov (2009)の地面はぎ取りモデルは大気圧に依存するが、今回の計算では結果として海水量の進化に対する大気圧の影響は小さかった。大気のはぎ取りと比較して海のはぎ取りの効率は低いことから、最終的な海水量は初期海水量と衝突天体の含水率に依存するという結果が得られた。

本研究のSvetsov (2000, 2007)モデルを用いた結果では、海よりも大気のはぎ取りが効率よく起こっているため、隕石衝突によって地球のH/Cが増加する可能性が示された。また、原始大気が多くはぎ取られることから、H-Heの円盤ガスを原始大気として地球が獲得していた(Ikoma & Genda 2006)としても、隕石重爆撃によるはぎ取りで0.0001~10%しか残らない可能性がある。さらに、今回のモデルでは初期海洋のうちはぎ取られた割合は20%程度であったことから、隕石重爆が少なくとも部分的には地球のハロゲンの枯渇に寄与している可能性がある。

キーワード：隕石重爆撃、大気散逸、海散逸

Keywords: heavy bombardment, atmospheric erosion, oceanic erosion

異なる中心星及び軌道条件における仮想地球の気候進化トラック

The evolutionary climatic track of the hypothetical Earth with different conditions of central star and semi-major axis

*門屋 辰太郎¹、田近 英一²

*Shintaro Kadoya¹, Eiichi Tajika²

1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻
1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2.Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo

The climate of the Earth is affected strongly by the insolation from the Sun and also by the amount of greenhouse gasses, especially CO₂, in the atmosphere. The former depends on the mass and age of the central star, and the semi-major axis of the planet, while the latter depends on the degassing rate of CO₂, which, in turn, depends on the thermal evolution of the planetary interiors. Thus, the climate of the Earth may be controlled both by the evolution of the planetary interior and the evolution of the host star. It is however unknown how the climate of planet could evolve if the central star and semi-major axes are different from those of the Earth today. In this study, we examine the climatic evolution of the Earth with different conditions of host stars and orbital semi-major axes.

We use a one-dimensional energy balance model coupled with a carbon cycle model to estimate the climate, a parameterized convection model coupled with a mantle degassing model to estimate the evolution of the CO₂ degassing rate, and a standard evolution model of the Sun with a relationship between mass and lifetime of main sequence stars to estimate the evolution of luminosity of the central star.

We found that, while the climate of the Earth orbiting at the inner region of the habitable zone (HZ) becomes hot owing to the increase in the luminosity of the central star, the climate of the Earth orbiting at the outer region of the HZ becomes cold because the CO₂ degassing rate of the Earth decreases with time. In particular, the Earth orbiting at the outer region of the HZ becomes the snowball climate mode after 3 Gyr, irrespective of the mass of the central star. This timescale depends mainly on the planetary parameters, such as the land fraction and land distribution. Thus, the lifetime of the habitability of the planets orbiting at the outer region of HZ is controlled largely by the evolution of the planetary interiors rather than the stellar evolution. This is essentially because the greenhouse effect of CO₂ is necessary for the planets orbiting even in the HZ to have a warm and wet climate.

キーワード：炭素循環

Keywords: Carbonate-silicate geochemical cycle