

## 石膏衝突クレーターのフラッシュX線による可視化実験 In-situ flash X-ray observation of impact crater formation in porous gypsum

保井 みなみ<sup>1\*</sup>, 荒川 政彦<sup>2</sup>, 長谷川 直<sup>3</sup>, 藤田 幸浩<sup>4</sup>, 門野 敏彦<sup>5</sup>

YASUI, Minami<sup>1\*</sup>, ARAKAWA, Masahiko<sup>2</sup>, HASEGAWA, Sunao<sup>3</sup>, FUJITA, Yukihiro<sup>4</sup>, KADONO, Toshihiko<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学自然科学系先端融合研究環, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>4</sup> 名古屋大学大学院環境学  
研究科, <sup>5</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

<sup>1</sup>Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>3</sup>Japan  
Aerospace Exploration Agency, <sup>4</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>5</sup>Institute of Laser Engineering,  
Osaka University

はじめに: 小惑星表面に見られる衝突クレーターを研究することは、小惑星の形成過程に関わる衝突史を理解する上で重要である。その上で、衝突クレーターの形成メカニズムを理解し、そのメカニズムに基づいた理論を構築することが必要となる。近年の惑星探査により、多くの小惑星はその密度が低く、多孔質であることがわかってきた [例, 1]。空隙はクレーター形成に重要な影響をもたらす、例えば衝撃圧により容易に空隙が潰され、クレーター表面に圧密層を伴った巨大クレーターになると言われている [2]。従って、多孔質物質上に形成される衝突クレーター形成の物理素過程を理解することが、小惑星の衝突史を解明する上で重要となる。クレーター形成過程における標的内部の構造変化に関する詳細な研究は、室内実験では行われていない。なぜなら、岩石内部の変化を可視光で観察することが困難なためである。これまでは、標的内部を可視化するため、低密度で透明なエアロジェルを用いた衝突実験が行われてきた [3]。しかし、エアロジェルの密度は小惑星と比べて極端に低く、形成されるクレーター孔は小惑星表面のクレーターとは全く異なる。そこで本研究では、多孔質物質のクレーター形成の素過程を明らかにするため、フラッシュX線を用いた高速度衝突現象の可視化を行い、クレーター形成時の弾丸貫入とクレーター孔の拡大を観察した。

実験方法: 標的は空隙率 50% の石膏を用いた。標的サイズは直径 34mm、高さ 65mm の円筒形と、直径 64mm、高さ 70mm の円筒形である。実験は宇宙科学研究所の二段式水素ガス銃を用いて行った。衝突速度は 1.9-2.4km/s (低速度) と 5.4-6.1km/s (高速度) の二種類とした。弾丸は SUS 球 (直径 3.2mm、1.6mm) と Al 球 (直径 3.2mm) の三種類用いた。フラッシュX線 (300kV) 装置は二台設置し、撮影タイミングを変えることによって時間変化を IP プレートに撮像した。また、衝突実験を同一条件で複数回を行い、撮影タイミングをずらすことで、衝突後 0.250 マイクロ秒間で複数枚の画像を取得した。フラッシュX線のトリガーにはピエゾゲージを用いた。さらにエジェクタの放出を観察するため、ストロボ光源を用いた影写真法による高速撮影を毎秒 25 万コマで行った。

実験結果: フラッシュX線を用いて、石膏を貫入する弾丸とそれに伴って成長するクレーター孔の観察を行うことに成功した。画像解析の結果、衝突速度や弾丸の種類が異なると、標的に形成されるクレーターの形状が変化することが分かった。低速度の場合、弾丸の種類でクレーター形状が異なった。弾丸が SUS 球の場合、石膏を弾丸が破壊することなく貫通し、貫通孔を形成した。弾丸が Al 球の場合、衝突面に半球状の空孔を形成し、弾丸は円盤形に変形した。高速度の場合 (SUS 球) 弾丸サイズでクレーター形状が異なった。弾丸が大きい場合、弾丸が変形・分裂して標的内に空孔を形成し、空孔の先端にはピット状の細い貫入孔が形成された。一方、弾丸が小さい場合、標的内に半球状の空孔を形成したのみであった。X線画像から、弾丸の貫入距離および空孔の入口および最大直径の時間変化を計測した。クレーター形状が貫通の場合、空孔直径はほぼ弾丸サイズであったが、貫入距離は時間と共に増加した。そこで、弾丸減速モデルの式 [3] を用いて抵抗係数  $C_d$  を調べた。その結果、貫入の場合は約 0.9 となり、他の多孔質標的とはほぼ一致した [3]。クレーター形状が半球空孔の場合、20 マイクロ秒までは貫入距離・空孔直径ともに増加するが、20 マイクロ秒以降は空孔の入口直径のみが増加した。60 マイクロ秒以降になると弾丸サイズ (SUS 球) で振舞いが異なった。弾丸が小さい場合、最終的には入口直径が最大になり、スポーリングが起こった。一方、弾丸が大きい場合、分裂した弾丸が標的内に更に進行することによる貫入距離の増加が見られた。最終的には標的の破壊とその破片の飛散により、全てのサイズパラメータが増加した。弾丸減速モデルを用いてこれらの場合の抵抗係数  $C_d$  を調べた結果、約 2-3 となった。弾丸の変形・分裂によりその形状が変化したが、この大きな  $C_d$  の原因であると思われる [4]。

参考文献 [1] Veverka *et al.* (1999), *Icarus* 140, 3-16. [2] Housen and Holsapple (2003), *Icarus* 163, 102-119. [3] Niimi *et al.* (2011), *Icarus* 211, 986-992. [4] 玉木・難田 (1966), *生産研究* 18, 219-221.

キーワード: 衝突クレーター, 貫通, ピット, 抵抗係数, フラッシュX線, 水素ガス銃

Keywords: impact crater, penetration, pit, drag coefficient, flash X-ray, H-gas gun

## 複数回衝突が及ぼす氷ターゲットの衝突破壊強度への影響 The effects of multiple impacts on the impact strength of ice targets

羽山 遼<sup>1\*</sup>, 荒川 政彦<sup>1</sup>

HAYAMA, Ryo<sup>1\*</sup>, ARAKAWA, Masahiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kobe University

氷天体同士の衝突は、氷惑星・氷衛星、カイパーベルト天体の形成・進化に重要な役割を果たしたと考えられている。そこでこれまで氷試料を用いた衝突破壊実験が数多く行われてきた。実際の氷天体は、カタストロフィックに破壊して散乱する以前に複数回の衝突を経験したと思われるが、これまでの衝突実験では単一衝突による研究が多かった。複数回衝突に関する過去の研究では、事前衝突により発生したクラックにより衝突破壊強度が下がることが報告されている (Gault et al., 1969; Housen, 2008)。さらに、衝突エネルギーの合計が等しく衝突回数を変化させた実験を行った場合、衝突により発生する最大破片と積算エネルギー密度の関係は、単一衝突によって得られたものとほぼ一致することが報告されている。一方、Nakamura et al. (1994) は、衝突破壊で得られたコア破片を2回目の衝突試料として実験を行い、その結果、1回目の衝突が破壊にはほとんど影響しないことを報告している。このような不一致が起こる理由は、衝突により発生するクラックが非均質だからであり、複数回衝突の研究では試料に入ったクラック密度を定量化した上で実験することが必須である。

そこで本研究では氷試料を用いた複数回衝突実験を行い、事前衝突によるプレクラック分布と衝突破壊強度の関係を定量的に明らかにすることを試みた。そして衝突履歴を考慮した衝突条件を用いて衝突破壊強度を表す経験式を求めた。

実験では北海道大学低温科学研究所の低温室に設置したガス銃を用いて行った。氷弾丸を氷試料に複数回(最大4回)衝突させ、その衝突はすべてターゲットの異なる面に行った。実験温度は約-10℃で、衝突速度は140~480m/sの範囲で変化させた。氷弾丸は円筒形で、その質量は1.6gである。氷ターゲットは立方体多結晶氷で、その質量は240~1280gである。実験後、回収した衝突破片の質量を計測した。また、カタストロフィックに破壊されなかったターゲットは、クラック密度を定量化するために縦波速度と横波速度の測定を行った。その後、次の衝突実験のターゲットとした。

1回目の衝突のエネルギー密度  $Q$  を変化させ、2回目の  $Q$  を一定にした実験を行った結果、ターゲットの初期質量 ( $M$ ) で規格化した最大破片質量 ( $m_L/M$ ) は、1回目の  $Q$  が大きいターゲットのほうが無傷の氷よりも小さい値だった。また、衝突回数増加に伴い  $m_L/M$  は減少した。そして、事前衝突を受けたターゲットの  $m_L/M$  は、既存の氷-氷1回衝突の  $m_L/M$  と  $Q$  の関係と比較するとかなり小さくなっていることが確認された (Arakawa et al., 2002)。これはプレクラックによりターゲットの強度が下がった結果であると考えられ、衝突破壊時の  $Q$  が小さいほど衝突履歴に強く依存していることを示す。一方、規格化した破片の質量 ( $m/M$ ) が  $10^{-4}$  以下の細粒破片の積算個数分布は、衝突回数によらず一定であった。これはプレクラックが影響を及ぼすことができる破片サイズには下限があることを示している。

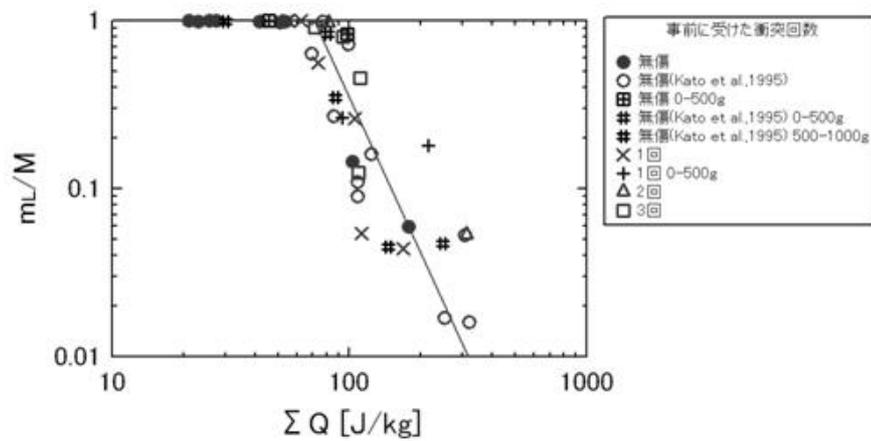
さらに、事前衝突の  $Q$  をすべて積算した値で  $m_L/M$  を見た場合、複数回衝突を受けたターゲットの  $m_L/M$  は、無傷の氷の結果によく一致することが分かった。図は事前の衝突回数でマーカー分けした、 $m_L/M$  と積算エネルギー密度の関係である。縦軸は  $m_L/M$  で横軸は積算エネルギー密度  $Q$  である。図をみると  $m_L/M$  の値は、 $Q$  に依存し、事前の衝突回数やターゲット質量によらないことがわかる。これらのデータをべき乗関数でフィッティングした結果、 $m_L/M = 7.8 \times 10^5 Q^{-3.2}$  という経験式を得た。

また、クラック密度の増加に伴い物質中の音速は減少することが知られており、この性質は O'Connell and Budiansky (1974) によって試料内部のクラック密度と弾性体の関係式として理論的に示されている。この式を実験試料に適用した結果、クラック密度は衝突回数によらず  $Q$  の増加に伴い線形に増加することが分かった。

PPS21-02

会場:201A

時間:5月21日 15:45-16:00



## 焼結した多孔質氷球の等質量衝突に関する実験的研究：衝突付着の空隙率依存性 Experimental study on equal-sized collision of sintered porous ice spheres: Porosity dependence of collisional sticking

鳶生 有理<sup>1\*</sup>, 荒川 政彦<sup>2</sup>

SHIMAKI, Yuri<sup>1\*</sup>, ARAKAWA, Masahiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Environmental Studies, Nagoya University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kobe University

原始惑星系円盤円盤での微惑星形成はダストアグリゲイトの衝突過程を経たと考えられているが、その詳細は未だ明らかになっていない。原始惑星系円盤のダスト同士の衝突速度は数 10m/s にも達する。近年の室内・数値実験から、原始惑星系円盤でのシリケートダストの付着成長は「反発の壁」に阻まれ、数 cm 以上への成長は困難であることがわかってきた [1]。一方、氷ダストアグリゲイト同士の衝突では衝突速度 50m/s までの成長が数値実験から示唆されたが [2]、氷ダストでは粒子サイズや焼結による構造変化などを考慮する必要がある [3]。そこで本研究では、空隙率 40-80% の焼結した直径 30mm の多孔質氷球同士の低速度衝突実験を行い、反発係数と衝突変形量の空隙率依存性を調べた。

実験は北大低温研の大型低温室内（室温-10℃）で行った。試料は直径 30mm、空隙率 40-80%（質量 7.57-2.54g）の焼結した多孔質氷球を用いた。試料は液体窒素中に微細な水を噴霧して凍結させた $\sim 28\mu\text{m}$  の氷微粒子を用い、これを体積一定の球形鋳型に入れて成形した。標的と弾丸を区別するため、標的は赤インクを添加した氷微粒子を用いて作成した。焼結時間は 15 分もしくは 1-2 日とした。2 段階落下装置を用いて同空隙率の試料同士を自由落下中に相対速度 0.43-4.12m/s でほぼ正面衝突させ、エアバッグを用いて試料を回収した。衝突の様子は 2 台の高速度ビデオカメラを用いて撮影し、衝突・反発速度 ( $V_i, V_r$ ) とインパクトパラメータを測定し、反発係数 ( $e=V_r/V_i$ ) を求めた。衝突後、回収された試料の質量と衝突痕面積を測定した。

衝突実験の結果、反発と付着合体が観察された。反発係数はインパクトパラメータと衝突速度には依存せず、空隙率 ( $P$ ) に強く依存し、空隙率 70% でほぼ 0 になることがわかった。この結果と氷の反発係数の結果 [4] から、氷の反発係数と空隙率に関する以下の経験式を得た；

$$e=11.3(1-P)^{-0.9\log(1-P)}.$$

衝突痕面積は衝突速度と空隙率の増加とともに増加した。推定された衝突変形体積と衝突エネルギーをベキ乗則でフィットしたところ、ベキは 0.81-1.34 となり、ほぼ比例することがわかった。衝突エネルギーが反発後の運動エネルギーと体積変形に分配されると仮定して試料の動的圧縮強度を推定したところ、静的圧縮強度の 2-4 倍となることがわかった。

[1] Blum 2010, Res. Astron. Astrophys. 10 1199. [2] Wada et al. 2009, Apj 702 1490. [3] Sirono 1999, A&A 347 720. [4] Higa et al. 1996, Icarus 44 917.

キーワード: 氷, ダストアグリゲイト, 衝突, 反発係数, 惑星形成

Keywords: Ice, dustaggregate, impact, restitution coefficient, planetary formation

## 岩石ラブルパイル天体の衝突破壊強度に関する実験的研究：構成岩塊の破壊が再集積プロセスに及ぼす影響

### Experimental Studies on Impact Disruption of Rocky Rubble-Pile Bodies

藤田 幸浩<sup>1</sup>, 荒川 政彦<sup>2\*</sup>, 長谷川 直<sup>3</sup>, 鳶生 有理<sup>1</sup>

FUJITA, Yukihiko<sup>1</sup>, ARAKAWA, Masahiko<sup>2\*</sup>, HASEGAWA, Sunao<sup>3</sup>, SHIMAKI, Yuri<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, <sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

惑星の成長過程では衝突破壊と再集積が繰り返され、ラブルパイル天体が数多く形成されたと考えられる。そのため、太陽系天体の衝突集積過程を解明するためにはラブルパイル天体が衝突破壊に及ぼす影響を理解することが不可欠となる。衝突破壊・再集積後の質量が  $0.5M_t$  ( $M_t$  は天体質量) になるときの衝突条件  $Q$  は、衝突破壊強度  $Q_{D*}$  として定義され、これまでに様々な物質について研究されている。Davis et al., (1979) では  $Q_{D*}$  を、天体を破砕するのに必要なエネルギー  $Q_{S*}$  (衝突破壊後の最大破片質量が  $0.5M_t$  になるときの  $Q$ ) と重力ポテンシャルのエネルギーの和で定義している。ラブルパイル天体は複数の岩塊が重力的に集まった天体であり、引張強度をほとんど持たない ( $Q_{S*} \approx 0$ )。そのため、 $Q_{D*}$  は重力ポテンシャルのみで決まる。しかし、衝突によって天体を構成する岩塊が破壊される場合は、破壊した岩塊破片の運動エネルギーとして衝突エネルギーが散逸し、その結果として  $Q_{D*}$  が大きくなると予想される。そこで本研究では、ラブルパイル天体模擬試料を用いた高速度衝突破壊実験を行い、ラブルパイル天体の再集積条件から高速度衝突破壊における  $Q_{D*}$  を見積もった。

ガラスビーズを構成要素として作成したラブルパイルターゲットを用いて高速度衝突実験を行い、衝突点付近で破壊されたビーズ破片質量と非破壊ビーズの飛翔速度を調べた。ターゲットに用いたビーズ直径は 7~16mm で、ビーズの組み方と個数 (4~1200 個) を変えてサイズと形状の異なるターゲットを 3 種類 (紡錘形、円筒形、立方体) 作成した。衝突実験には神戸大と宇宙研の二段式軽ガス銃を使用し、直径 6~7mm のナイロンの弾丸を 2~6.5km/s の速度範囲で衝突させた。弾丸運動エネルギー  $E_{imp}$  は、300~3500J であった。衝突の様子は高速度ビデオカメラを用いてターゲットからの散乱光とバックライトによる影を撮影した。撮影速度は、毎秒 1 万~25 万コマとした。

ラブルパイル天体の再集積条件は、衝突破片の総運動エネルギー  $E_{K.E}$  と天体の重力ポテンシャルエネルギーを用いて  $E_{K.E} < 3/5 GM_t^2/R$  と書くことができる。エネルギー分配率  $f = E_{K.E}/E_{imp}$  を定義し、本実験で得られたデータを用いてその値を計算すると  $f = 0.001 \sim 0.01$  となった。このことは、弾丸運動エネルギーの大部分が衝突点近傍で起こる構成ビーズの破壊とその飛散によって散逸されることを示している。得られた分配率  $f$  を用いて、衝突天体とラブルパイル天体の構成要素サイズが一緒で、そのサイズ比が 1:5 の場合の再集積条件を計算した。それらの結果からラブルパイル天体の  $Q_{D*}$  を求め、天体サイズとの関係調べると、ラブルパイル天体は高速度衝突による衝突破壊に対して非常に強い耐性を持つことが分かった。

キーワード: ラブルパイル天体, 衝突破壊

Keywords: Rubble-pile body, Impact disruption

## 衝突破壊実験生成物の3次元形状分布測定

### Measurement of 3D shape distribution of fragments ejected by impact experiments

島田 玲<sup>1\*</sup>, 土山 明<sup>1</sup>, 門野 敏彦<sup>2</sup>, 道上 達広<sup>3</sup>, 荒川 政彦<sup>4</sup>

SHIMADA, Akira<sup>1\*</sup>, TSUCHIYAMA, Akira<sup>1</sup>, KADONO, Toshihiko<sup>2</sup>, MICHIKAMI, Tatsuhiko<sup>3</sup>, ARAKAWA, Masahiko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター, <sup>3</sup> 福島工業高等専門学校, <sup>4</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science Osaka University, <sup>2</sup>Osaka University Institute of Laser Engineering, <sup>3</sup>Fukushima National College of Technology, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Kobe University

太陽系の歴史の中で、衝突現象は小惑星や小衛星といった小天体の形成や進化に重要な役割を果たしてきた。小惑星表面に存在するレゴリスも、小天体や宇宙塵などの物体の衝突によって生成されたと考えられる。小惑星探査機はやぶさによって持ち帰られたイトカワ表面のレゴリス粒子の初期分析がおこなわれ、マイクロX線CTにより粒子の表面構造やサイズおよび3次元形状分布が明らかにされ [1]、高分解能走査型電子顕微鏡による粒子表面の微細構造が観察された [2]。また、粒子表面での宇宙風化 [3] や太陽風希ガスの打ち込み [4] があったことが明らかにされ、これらを総合した小惑星表層で起こる諸現象が解明されようとしている。

本研究では、イトカワのレゴリス粒子との比較を目的として、クレーター生成と衝突破片粒子の回収実験をおこなった。実験は神戸大学の2段式ガス銃を用いて行った。衝突速度は4 km/s とし、ナイロン製の弾丸 (直径 2.2 mm、長さ 2.5 mm) を用いた。また、ターゲット (10 × 10 × 3 cm) は大理石 (圧縮強度 96.9 MPa) と石灰岩 (同 53.9 MPa) の2種類を用いた。レゴリスの形成過程を考慮すると、衝突の際、高速の破片は脱出速度を上回ることで宇宙空間に散逸し、低速の破片成分のみが表面に残りレゴリスとなったと思われる。したがって、実験の破片粒子とレゴリス粒子を比較する際には、破片の速度を区別して回収する必要がある。しかし、数少ない実験 [5,6] を除き、チャンバー内に飛散した破片全体を回収する従来の多くの実験では、そのようなことは困難であった。そこで本研究では、ターゲットの周囲を発泡スチロールの緩衝材で囲むことにより、高速の破片は緩衝材に貫入し、低速の破片は底面に落下することから、破片を速度で分けて回収した。

得られた破片は、大阪大学の高分解能X線CT装置 (Elescan) を用いて解析した。これまでの実験では、レゴリスやマイクロメーター、顕微鏡を用いて破片の解析が行われてきたため、大量の破片の詳細な形状データをとることは困難であった。今回の実験ではX線CTを用いて破片を楕円体近似することで、破片の3次元データを得ることに成功し、同様の手法で解析されたイトカワ粒子のデータとも比較することが可能となった。

得られた3次元データより、破片のサイズ分布及び3次元形状分布を求め、破片の速度やターゲット間での比較を行った。その結果、大理石、石灰岩双方のターゲットにおいて、高速の破片の方がより球に近い形状をもつ傾向にあることが分かった。また、イトカワ粒子との比較を行ったところ、低速の破片の方が近い形状分布を持つことが分かった。すなわち、クレーター形成破壊の破片の低速度成分であると考えられるイトカワ粒子の起源を支持する結果となった。

[1] Tsuchiyama A. et al. (2011) *Science*, 333, 1125-1128. [2] Matsumoto T. et al., (2012) JGUM abstract, this volume. [3] Noguchi T. et al. (2011) *Science*, 333, 1121-1125. [4] Nagao K. et al. (2011) *Science*, 333, 1128-1131. [5] Asada, N. (1985) *J. Geophys. Res.* 90, 12445-12453. [6] Yamamoto S. and Nakamura A. M. (1997) *Advances Space Res.*, 20, 1581-1584.

キーワード: 衝突実験, クレーター形成破壊, レゴリス, X線CT

Keywords: Impact experiments, Cratering, Regolith, X-ray microtomography

## ASTER スペクトルデータを用いた衝突クレーター判別の研究

### A study on identification of terrestrial impact craters using spectral data obtained by ASTER

山本 聡<sup>1\*</sup>, 松永 恒雄<sup>1</sup>, 中村 良介<sup>2</sup>, 関根 康人<sup>3</sup>, 平田 成<sup>4</sup>

YAMAMOTO, Satoru<sup>1\*</sup>, MATSUNAGA, Tsuneo<sup>1</sup>, NAKAMURA, Ryosuke<sup>2</sup>, SEKINE, Yasuhito<sup>3</sup>, HIRATA, Naru<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 国立環境研, <sup>2</sup> 産総研, <sup>3</sup> 東大新領域, <sup>4</sup> 会津大

<sup>1</sup>NIES, <sup>2</sup>AIST, <sup>3</sup>Univ. of Tokyo, <sup>4</sup>Univ. of Aizu

The 182 terrestrial impact craters have been identified so far [1]. This number is much lower than those on the other solid bodies in the Solar System such as Moon, Mars, or Venus. On the Earth, most of structures of impact craters have been eroded and tectonized. In addition, some of preserved impact structures may have been buried or obscured by sediments and vegetation. However, since there are few studies on the global survey of terrestrial impact craters using satellite remote sensing, it is still unclear whether or not more impact craters are preserved on the Earth. The recent survey by Google Earth images discovered a new impact crater in Egypt, which has been already identified as impact origin by the later geophysical analysis [2]. In addition, four new impact structures were confirmed as terrestrial impact craters last year [1], suggesting the existence of more unidentified impact craters on the Earth. Therefore, it is expected that more candidate structures of impact craters would be found by the global survey using satellite remote sensing data.

In this study, we discuss the feasibility to find candidates of impact craters using spectral data by the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) instrument, which is an imaging instrument with 14 bands, from the visible to the thermal infrared wavelengths, onboard NASA Terra satellite. We show that the discrete concentric patterns in the multispectral data obtained by ASTER can be identified for several terrestrial impact craters. We also analyze the ASTER data for volcanos or dome structures formed by intrusive rocks. Based on these results, we will discuss the feasibility of global survey to identify terrestrial impact craters by ASTER data.

[1] Earth Impact Database, 2012, <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/> Accessed: 02/Feb./2012.

[2] Folco, et al., The Kamil Crater in Egypt. *Science*, 329, pp.804-804, 2010.

キーワード: 分光, 衝突クレーター, リモートセンシング, ASTER, 地球観測, アストロバイオロジ

## ハビタブルゾーンとウォーターワールドレジーム Habitable Zone and Water World Regime around Main-Sequence Stars

田近 英一<sup>1\*</sup>, 門屋 辰太郎<sup>2</sup>

TAJIKA, Eiichi<sup>1\*</sup>, KADOYA, Shintaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>The University of Tokyo

Habitable zone (HZ) around main-sequence stars is defined as an orbital region in which H<sub>2</sub>O may exist as liquid water on the surface of terrestrial planets. The inner and outer limits of HZ should correspond to the condition of total evaporation and total freezing of water, respectively. It is, however, assumed implicitly that the atmosphere has enough greenhouse effects due to greenhouse gasses, such as CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and NH<sub>3</sub>, to maintain the climate warm enough for H<sub>2</sub>O to be liquid phase. In this respect, HZ is not a sufficient condition but just a necessary condition for H<sub>2</sub>O to be liquid water. That is to say, if there is not enough greenhouse effect, liquid water on the planet should freeze totally even when the planet is orbiting within HZ.

The condition for the planets to have liquid water on the surface is affected not only by semi-major axis (distance from the central star) but also by other factors such as orbital eccentricity, obliquity, degassing rate of CO<sub>2</sub> via volcanism, carbonate-silicate geochemical cycle, land-sea distribution, water abundance, and so on. It is therefore suggested that the concept of HZ should be extended to include these factors.

We also propose a sufficient condition for H<sub>2</sub>O to be liquid water if the planet has abundant H<sub>2</sub>O on the surface. This is an absolutely habitable zone, and we name it a "Water World Regime" (WWR). It is defined as an orbital condition which permits H<sub>2</sub>O as liquid phase unless there is no greenhouse gas other than water vapor in the atmosphere. If there is H<sub>2</sub>O on the planetary surface, it is in a liquid phase owing to the energy flux from the central star and greenhouse effect of water vapor without any other greenhouse gasses in the atmosphere. Ice giants and icy satellites around gas giants and/or ice giants, as well as terrestrial planets, are expected to have oceans if they are orbiting within the WWR.

キーワード: 太陽系外惑星系, ハビタブルゾーン, ハビタブルプラネット

Keywords: Extrasolar planetary system, habitable zone, habitable planet

## 巨大天体衝突による "ばらまき": その力学的影響と化学的影響 Debris Disk Ejected by Giant Impacts: Its Dynamical and Chemical Influences on the Terrestrial Planets

玄田 英典<sup>1\*</sup>, 小久保 英一郎<sup>2</sup>, 佐々木 貴教<sup>3</sup>, 上野 雄一郎<sup>3</sup>, 飯塚 毅<sup>1</sup>, 生駒 大洋<sup>1</sup>

GENDA, Hidenori<sup>1\*</sup>, KOKUBO, Eiichiro<sup>2</sup>, SASAKI, Takanori<sup>3</sup>, UENO, Yuichiro<sup>3</sup>, IIZUKA, Tsuyoshi<sup>1</sup>, IKOMA, Masahiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 自然科学研究機構国立天文台 理論研究部, <sup>3</sup> 東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, <sup>3</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

地球型惑星形成の最終段階は、巨大天体衝突ステージと呼ばれ、火星サイズ程度までに成長した原始惑星が互いに衝突を繰り返すことが知られている。このような巨大天体衝突が、現在の地球型惑星の様々な特徴、例えば、惑星の個数、大きさの分布、自転、組成、巨大衛星の有無などに影響を与えることがわかっている（例えば、Kokubo and Genda 2010）。

様々な衝突パラメータで原始惑星同士の衝突シミュレーションを行った Genda et al. (2012) では、衝突する原始惑星の合体条件について注目してきたが、さらに計算結果を解析することで、原始惑星の衝突によって、無視できない量の物質が惑星系にバラまかれることがわかった。巨大天体衝突ステージで起こる典型的な衝突では、原始惑星の約数%の物質がバラまかれる。そこで、原始惑星の軌道進化と天体衝突の両者を組み込んだハイブリッドコードによる数値計算を行った結果、巨大天体衝突ステージを通じて、バラまかれる物質の総量が、系の質量（約2倍の地球質量）の10%を超えることがわかった。また、その中に原始惑星のコアに由来する金属鉄も相当量含まれることがわかった。本発表では、原始惑星同士の衝突によって宇宙空間にバラまかれる物質に注目し、そのバラまかれた物質が、地球型惑星の特徴にどのような影響を及ぼすのかを検討する。

巨大天体衝突ステージを通じてバラまかれた物質は、原始惑星同士の合体によって形成された地球型惑星の軌道にも影響を与える可能性がある。特に、巨大天体衝突ステージで0.1程度まで上昇した惑星の離心率を、現在の0.01程度のレベルまで下げることが可能かもしれない。実際に、地球サイズの惑星に対して、質量の10%の微惑星をバラまいた系で、軌道計算を行った結果、離心率が十分に下がることが確認できた。

さらに、バラまかれた物質が、後に地球型惑星に時間をかけて再集積することを考えると、化学的な面で地球自体にも影響を与える可能性がある。特に、バラまかれた金属鉄が地球に再集積してくることによって、金属鉄中に含まれる強親鉄性元素が地球マントルに供給されたはずである。現在の地球マントル中で観測されている強親鉄性元素の過剰を説明する可能性があり、レイトベニア仮説の供給源となりうる。また、そのような金属鉄は地球表層の酸化還元状態を還元的にする可能性があり、初期地球の約10億年間は還元的な表層環境であった可能性を示唆する。

キーワード: 巨大天体衝突, ばらまき仮説, レイトベニア, 酸化還元状態

Keywords: giant impact, BARAMAKI, late veneer, redox state

## 新たな海形成機構の提案：地球と金星の初期表層環境への応用

### Newly proposed formation process of terrestrial ocean: Application to the early evolution of Earth and Venus

佐々木 貴教<sup>1\*</sup>, 玄田 英典<sup>2</sup>, 上野 雄一郎<sup>1</sup>, 飯塚 毅<sup>2</sup>, 生駒 大洋<sup>2</sup>

SASAKI, Takanori<sup>1\*</sup>, GENDA, Hidenori<sup>2</sup>, UENO, Yuichiro<sup>1</sup>, IIZUKA, Tsuyoshi<sup>2</sup>, IKOMA, Masahiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 東京大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>The University of Tokyo

地球の海の起源については、これまでも数多くの議論がなされてきた [e.g., Matsui & Abe, 1986; Gomes et al., 2005; Ikoma & Genda, 2006]。特に近年は、惑星形成段階でスノーラインが 1AU 以内まで動きうることが示され [Oka et al., 2011]、地球型惑星が獲得する水の質量についての制約が重要な研究課題となっている。また原始生命の発生と進化の観点からも、地球が形成初期に適切な量の水を獲得する（あるいは散逸する）ことが重要であると考えられている。

一方、地球の初期表層環境については、酸化還元度に関するパラドックスが存在する。希土類元素の濃度分析等により、地球のマントルは分化直後（43.5 億年前）にすでに FMQ（酸化的）にあったことが示されている [Trail et al., 2011]。ところが硫黄の同位体分析等によると、地球の大気は少なくとも 25 億年前まで還元的でなければならない [Farquhar et al. 2000]。また原始金星からの海洋散逸についても、問題点が提示されている。水蒸気大気の光解離により生じた水素はハイドロダイナミックエスケープにより宇宙空間に散逸させることが可能であるが、残された酸素は熱的・非熱的散逸や地表の酸化等のプロセスを考慮しても全てを消費することはできず、金星大気中から取り除くことができない [Sasaki & Abe, 2008]。

本研究では Genda et al. (in prep.) の結果をもとに、地球型惑星形成最終段階で必然的に起こると考えられる巨大衝突破片の再集積（= レイトベニア）による原始海洋の消失、およびその後の海再形成機構についての新しいシナリオを以下の通り提案する。

- (1) 原始海洋への金属鉄の集積による海の消失と大量の水素大気の発生
- (2) 水素大気の散逸および水素大気への火山ガス付加による海の再形成
- (3) 10 億年程度の時間をかけて 1 海洋質量の海が誕生
- (4) 初期地球における酸化的なマントルと還元的な大気の共存
- (5) 初期金星における 2 度の海洋消失イベントによる CO<sub>2</sub> 大気の形成

本シナリオにより、地球の海の形成、および地球と金星の初期表層進化についての統一的な理解が可能となり、これまで議論されてきた地球の海洋質量の調整・酸化還元度に関するパラドックス・金星の余剰酸素など、様々な問題が解決される。また本シナリオは、一般的な地球型惑星の形成過程において必然的に起こるであろうプロセスにより構築されたものであり、太陽系外地球型惑星の形成と初期進化を議論する上でも重要である。

キーワード: 海形成, 惑星初期進化, 地球, 金星, 大気散逸, 酸化還元度

Keywords: formation of ocean, early evolution of planets, Earth, Venus, atmospheric escape, redox

## 薄い周惑星円盤で集積するタイタンの原始大気：窒素大気の起源と内部分化への示唆

### Structure of the proto-atmosphere on Titan accreted in a gas-starved circumplanetary disk

岡田 英誉<sup>1</sup>, 倉本 圭<sup>1\*</sup>

OKADA, Hidetaka<sup>1</sup>, KURAMOTO, Kiyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学 大学院 理学院 宇宙理学専攻

<sup>1</sup> Department of CosmoSciences, Hokkaido University

タイタンは惑星に匹敵するほどの大きさを持つ土星最大の衛星であり、その著しい特徴として、N<sub>2</sub>を主体とした地表面で1.5気圧に達する大気をもつことが挙げられる。また探査機カッシーニのデータによると、タイタン内部は分化しており、タイタンはその熱史の中で氷が融解する温度を経験したと考えられる。このような大気の起源や内部の分化を明らかにするためには、タイタンの形成過程や集積期の熱的進化を理解することが重要となる。

Kuramoto and Matsui (1994) は、タイタンが真空中で集積することを仮定し、材料物質中の氷成分の蒸発により形成される原始水蒸気大気の保温効果を考慮して、集積期のタイタンの熱史を求めた。それによると集積時間が10<sup>5</sup>年よりも短い場合には、集積中に地表温度がH<sub>2</sub>Oの融点を超え内部が分化することを示した。また地表温度は最高で500K以上に達し、このような高温環境では大量の水蒸気がタイタンの重力圏外に流出することも示した。しかし、近年の衛星形成の理論の発展によれば、衛星は薄い周惑星円盤で集積することが有力視される (Canup and Ward, 2002, 2006)。したがってタイタンの原始大気はH<sub>2</sub>やHeも豊富に含むと考えられる。そこで本研究では、薄い周惑星円盤と静力学的に接続している集積期のタイタンの原始大気の熱的構造を数値的に調べ、タイタンの分化と窒素大気の形成過程への影響について考察した。

原始大気はH<sub>2</sub>とHeからなる円盤ガス成分と、H<sub>2</sub>Oからなる脱ガス成分との混合大気とし、周惑星円盤から温度と圧力が連続的に接続している等温の上層大気(成層圏)と、対流平衡にあり湿潤断熱減率を持つ下層大気(対流圏)からなるとする。大気の大気圏界面高度をパラメータとし、静力学的な原始大気の温度圧力構造を求めた。この構造に対して水蒸気と水素分子を吸収源と仮定して放射伝達を解くことにより、原始大気上端からの熱放射を計算した。タイタン軌道における周惑星円盤の温度圧力条件は先行研究 (Canup and Ward, 2002) をもとに与えた。

上記の仮定の下で大気構造を求めたところ、地表温度はおよそ300Kが上限となることがわかった。もし集積加熱によってこれよりも地表温度が高くなれば、静水圧性と連続性の仮定が崩れ、衛星ヒル半径において原始大気の圧力が円盤の圧力を上回って大気流出することになる。この静水圧条件を満たすことのできる上限地表温度を以下では臨界温度と呼ぶ。さらに、求めた大気上端からの熱放射と集積エネルギーの比較から、円盤圧力が10 Paよりも大きければ、タイタンの集積時間として長めの見積もりである100万年を仮定してもタイタンの地表温度は集積期にH<sub>2</sub>Oの融点を超える。さらに衛星からの熱放射には上限値がある。この射出限界の値は約400 W/m<sup>2</sup>で、これは集積時間が約40万年のときの集積エネルギーフラックスに相当する。もしこれよりも短時間でタイタンが集積すると、差分のエネルギーが昇温に使われ、地表温度が臨界温度を超え、大気流出が発生すると考えられる。タイタンの集積時間は1万年~100万年と見積もられており、実際にこのような温度上昇と大気流出を起こす可能性が高い。

大気流出が生じると、軽い円盤ガス成分が選択的に散逸する。今回のモデルでは、H<sub>2</sub>, He, H<sub>2</sub>O以外の成分は無視しているが、タイタンの材料物質の水の中にはNH<sub>3</sub>も含まれていたと考えられている。NH<sub>3</sub>は水溶性であるため、大気流出の際にも全てが散逸することなく液体の水に溶けて衛星に残る。一方、非水溶性のArは原始大気の流出に伴い散逸してしまうと考えられる。さらに、微衛星衝突の際の衝撃波によりNH<sub>3</sub>からN<sub>2</sub>への化学変化が起こり、大気中にN<sub>2</sub>が放出される可能性がある (McKay et al., 1988)。集積エネルギーの供給がおさまると、タイタンの大気はしだいに冷えて、水蒸気やNH<sub>3</sub>はほぼ完全に凝結する。現在のN<sub>2</sub>を主体とし、Arが欠乏したタイタンの大気の形成は、以上のシナリオで説明できるかもしれない。

## 初期地球大気からの流体力学的散逸の数値モデリング Numerical modeling of hydrodynamic escape from early Earth atmosphere

梅本 隆史<sup>1</sup>, 倉本 圭<sup>1\*</sup>

UMEMOTO, Takafumi<sup>1</sup>, KURAMOTO, Kiyoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

<sup>1</sup>Department of CosmoSciences, Graduate School of Sciences, Hokkaido University

酸素発生以前の初期地球大気の組成は水素の宇宙空間への散逸に伴って還元的なものから酸化的なものに変化していったと考えられており、その変化の速さは初期地球が生命前駆物質の合成に適した表層環境であったか議論する上で、また初期地球で起こった気候変動を理解する上でも重要である。旧来の理解では、若い太陽の強い太陽 EUV 放射が惑星の上層大気を加熱膨張することによって駆動される流体力学的散逸によって水素の散逸は急速に進んだと考えられていた。

これに対し、最近 Tian et al. (2005, 以下 T05) は初期地球大気からの水素分子の流体力学的散逸を数値的に調べ、従来の見積りよりも散逸率が小さく、そのため還元的な表層環境が長期間保持された可能性があると主張した。しかし、T05 の計算には質量保存を満たしていないという致命的な問題がある。

本研究では、まず T05 の再計算を行い、彼らが用いた Lax-Friedrichs 法による流体力学的散逸計算の妥当性について検討した。その結果、この流体力学的散逸計算は強い数値拡散によって質量保存を満たすことができず、エネルギー保存式も解いた場合、数値拡散の寄与を減らし質量保存を満たすほど、散逸率が上昇することが分かった。これは、T05 が散逸率を過小評価していることを意味する。

そこで、本研究では質量保存を満たす CIP 法と CIP-CSL2 法を用い、水素分子一成分、球対称一次元を仮定した時間発展非粘性流体方程式の数値モデルを新たに構築し、T05 と同様の条件を与えて、流体力学的散逸の物理的性質や計算結果を比較した。その結果、下端数密度が  $n_0 = 5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$  以上かつ現在の 5 倍以上の強さの太陽 EUV 放射を与えた場合、流体力学的散逸はエネルギー律速の性質を持ち、同じパラメータ設定における T05 の計算結果の 5-10 倍の散逸率を得た。一方、下部数密度や太陽 EUV 放射を小さくして大気へのエネルギー付与を小さくすると、散逸率は T05 よりもむしろ小さくなる。これは、新たな計算モデルでは上部境界から外向きに流出する熱伝導フラックスへのエネルギー分配が重要になるため、T05 では彼らの求めた温度分布から判断すると外向きの熱伝導フラックスが 0 となるように境界条件を置いたと思われる。

太古代後期に期待される太陽 EUV 放射が現在の 2.5 倍、地球内部からの水素脱ガス率が現在の 5 倍の条件を与えた場合、散逸率と脱ガス率が釣り合う下端水素分子数密度を新たな計算結果をもとに求めると、初期地球大気中の水素分子濃度は約 7% と推定され、T05 が提唱したような極めて高い水素混合率は実現されないと考えられる。また、恒星観測から太陽 EUV の強度は、太古代初期には現在の数倍以上あり、これが徐々に減衰してきたとみられることを考慮すると、散逸率と脱ガス率の釣り合う水素混合率は太古代を通じて上昇した可能性がある。水素混合率の上昇は、CO<sub>2</sub> に乏しい大気を形成したかもしれない。このような大気の気候は不安定になりやすいと考えられ、これは地質学的に確認されている約 22 億年前の全球凍結現象の発生と関連する可能性がある。

キーワード: 流体力学的散逸

Keywords: Hydrodynamic escape

## 水蒸気大気をもつ地球型惑星の2つの異なる初期進化経路 Two evolutionary paths of early terrestrial planets with steam atmospheres

濱野 景子<sup>1\*</sup>, 阿部 豊<sup>1</sup>, 玄田 英典<sup>1</sup>  
HAMANO, Keiko<sup>1\*</sup>, ABE, Yutaka<sup>1</sup>, GENDA, Hidenori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>The University of Tokyo

Recent studies with N-body simulations suggest that Earth-sized planets would experience giant impacts among planetary-sized bodies during formation, implying that the planets would form in a globally molten state. Orbital crossing during the giant impact stage would cause significant radial mixing of material throughout the terrestrial planet formation region. It means that even the planets located close to their host star would still have a chance to acquire some water during formation.

Our goal is to clarify controlling processes of thermal history and water budget of terrestrial planets after the last giant impact until the magma ocean solidifies. Since water vapor is a potent greenhouse gas, the amount of steam atmosphere would strongly affect the thermal history of the planets. On the other hand, high solubility of water into silicate melts suggests that the amount of steam atmosphere would be controlled by water exchange between the atmosphere and the magma ocean. Elkins-Tanton (2008) calculated atmospheric growth and solidification time of the magma ocean, considering such a water exchange. In her model, the effect of condensation of water is neglected on outgoing planetary radiation. Also, it is assumed that the total amount of water of the planets is constant during solidification.

As reported by Nakajima et al. (1992), however, water-saturated atmospheres have radiation limits. The values of the radiation limits are common to the planets with the same mass, while the planet closer to the host star receives the larger incident stellar flux. Therefore, the existence of the radiation limits could make a fundamental difference in the cooling rates of the planets located at different orbital distance from their star. The recent studies with N-body simulations also suggests that planet formation lasts about 10-100 Myr. Strong EUV radiation from a young host stars could drive intense hydrodynamic escape of atomic hydrogen, which would also affect the amount of steam atmosphere and therefore the cooling rate of the planets.

We developed a steam-atmosphere and magma-ocean coupled model, in which a radiative-convective equilibrium model of grey atmosphere was incorporated in order to consider the effect of condensation of water vapor on planetary radiation. Water loss caused by the hydrodynamic escape was also taken into account. Using this model, we investigated solidification time and water budget of Earth-like terrestrial planets orbiting around a Sun-like star with respect to planetary orbital radius and initial water inventory.

Our results suggest that there would be two types of evolutionary paths of terrestrial planets, depending on orbital radius. The condition that separates the two distinctive evolutionary paths is whether the net incident stellar flux that the planet receives exceeds the value of the radiation limit from steam atmosphere or not. In this presentation, we will show the controlling mechanisms and also its implications to exoplanet observations and the early evolution of Earth and Venus.

キーワード: マグマオーシャン, ジャイアントインパクト, 熱史, 水収支, ハイドロダイナミックエスケープ, 射出限界  
Keywords: Magma ocean, Giant impact, Thermal history, Water budget, Hydrodynamic escape, Radiation limit

## 放射対流平衡モデルを用いた H<sub>2</sub>-He 大気の冷却率の推定

### Estimation of Cooling Rate for H<sub>2</sub>-He Atmosphere with Radiative Convective Equilibrium Model

高橋 康人<sup>1\*</sup>, 石渡 正樹<sup>1</sup>, 倉本 圭<sup>1</sup>

TAKAHASHI, Yasuto<sup>1\*</sup>, ISHIWATARI, Masaki<sup>1</sup>, KURAMOTO, Kiyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>Hokkaido University

一般に惑星大気中での様々な大気循環は、鉛直対流が重要な駆動源の一つになっていると考えられている。そしてその対流の強度は放射による大気冷却率で決まり、対流による大気下層からの熱の供給がつりあって定常的な熱構造が維持されている。これは木星をはじめとした H<sub>2</sub> が主成分の厚い大気を持つガス惑星についても同様である。そこで本研究では、H<sub>2</sub>-He 大気中での放射と対流による熱輸送を解くことにより各種の放射特性を算出し、それらがどのような物理によって決まるのかをあきらかにすることを試みた。

モデルでは平行平板大気を仮定し、圧力 0.002-2 bar の範囲で Appleby and Hogan (1984) の定式化に基づき放射計算をおこなった。大気組成は H<sub>2</sub> および He からなるとし、吸収源については H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> および H<sub>2</sub>-He 衝突誘起吸収 (Borysow 1988, 2002) を考慮した。放射と吸収係数は波数 10-990 cm<sup>-1</sup> の範囲で波数別に計算を行っている。長波を対象としているため太陽放射は無視している。下部境界では温度を固定し、より下層からの放射の入射は拡散近似から求めて与えた。以上の条件のもとで放射計算を行った後、大気各層で対流不安定が存在するかどうかを判定した。不安定がある場合は対流層全体で対流調節が起こり、乾燥断熱減率に沿った温度分布となるものとした。温度構造の時間変化が十分に小さくなるまで以上の計算を続けることで熱平衡温度構造を求めた。計算に必要な各種パラメータについては木星を想定して与えた。

計算の結果、木星探査機ガリレオのプロープによるデータから推定された冷却率構造 (Sromovsky et al. 1998) と概ね調和的な構造が得られた。本研究では NH<sub>3</sub> をはじめとする微量成分と雲の存在を無視して計算を行っているが計算対象高度においてはこれらの成分の効果はあまり大きくないと見られる。冷却率構造は 0.7 bar 付近で極大値を持つ。この高度では各波長の光学的深さが概ね 1 程度になるため、放射が最も効率よく惑星外部へと抜ける。そのため放射による冷却効果が大きくなると解釈できる。冷却率の極大値は 0.016 K/day であり、地球対流圏の典型的な値である 1 K/day よりかなり小さい。これは想定した木星大気の気温が地球大気のそれに比べ小さいためである。また下部境界に向かうにつれて急激に冷却率が小さくなり 2 bar 付近に対流圏の下端が存在する可能性がある。

今回のモデルは H<sub>2</sub>-He 大気的基本的な性質を求めることを主眼としたが、より現実的な大気において先述の課題を議論するためには、太陽放射による加熱と微量成分の線吸収、および雲形成の影響を考慮し、適切に組み込む必要がある。

キーワード: ガス惑星, 大気, 冷却率, 放射, 対流

Keywords: gas giant planet, atmosphere, cooling rate, radiation, convection

## 金星大気における大気重力波の鉛直波数スペクトル Vertical wavenumber spectra of gravity waves in the Venus atmosphere

安藤 紘基<sup>1\*</sup>, 今村 剛<sup>2</sup>

ANDO, Hiroki<sup>1\*</sup>, IMAMURA, Takeshi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大・理, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所

<sup>1</sup>University of Tokyo, <sup>2</sup>ISAS/JAXA

欧州宇宙機関の金星探査機 Venus Express の電波掩蔽によって得られた金星大気の温度の高度プロファイルから、高度 65-80 km において重力波（鉛直波長 1.5-15 km）に伴うと思われる温度擾乱成分を抽出しその鉛直波数スペクトルを求め、さらに赤道域（0°-20°）、中緯度帯（20°-50°）、高緯度帯（50°-80°）、極域（80°-90°）の4つの緯度帯に分類した。その結果、観測から得られた全てのスペクトルに、その傾きが低波数側では平たく高波数側では右肩下がりという、地球成層圏・中間圏で見られるような特徴が見られた。また Tsuda et al. (1991) や Tsuda and Hocke (2002) で述べられている飽和理論スペクトルと観測で得られたスペクトルを比較したところ、赤道域のスペクトル密度は他の緯度帯のそれに比べて一桁程度小さく、また理論値にも届いていない。これは赤道周辺では重力波が飽和していないことを示唆している。中緯度帯では観測値が理論値に近いが、スペクトルの傾きが理論スペクトルよりも急である。そして高緯度帯や極域では理論スペクトルに殆ど整合的であり、重力波が飽和していることを示唆している。

さらに我々は電波が高度 70 km 付近を通過する時の受信電波強度のシンチレーションの周波数スペクトルを計算し、前述の4つの緯度帯で分類した。シンチレーションは大気密度の不均一構造がもたらす電波の回折によって生じる。周波数は空間波数に比例し、1 Hz はおよそ波長 1 km、10 Hz はおよそ波長 100 m に相当する。ここから、高緯度帯や極域で得られたスペクトルのパワーが、赤道域や中緯度帯に比べて3-4倍大きく、さらにスペクトルの傾きがコルモゴロフ則に良く従っていることを見出した。この空間スケールの密度擾乱を主に乱流が担っているとしたら、この結果は高緯度ほど強い乱流が生じていることを示すと同時に、これらの緯度帯で重力波が砕波し、それに伴う乱流拡散が生じていることの裏付けになると考えられる。乱流と重力波それぞれの密度擾乱への寄与について今後検討する。

キーワード: 金星大気, 大気重力波, 鉛直波数スペクトル

Keywords: Venus atmosphere, Gravity wave, Vertical wavenumber

## 太陽系外惑星・円盤直接撮像プロジェクト「SEEDS」の現状 Current status of Subaru Strategic Exploration of Exoplanets and Disks (SEEDS)

日下部 展彦<sup>1\*</sup>, 田村 元秀<sup>1</sup>, 神鳥 亮<sup>1</sup>, 工藤 智之<sup>1</sup>, 橋本 淳<sup>1</sup>, SEEDS/HiCIAO/AO188 チーム<sup>2</sup>  
KUSAKABE, Nobuhiko<sup>1\*</sup>, TAMURA, Motohide<sup>1</sup>, KANDORI, Ryo<sup>1</sup>, Tomoyuki Kudo<sup>1</sup>, Jun Hashimoto<sup>1</sup>, SEEDS/HiCIAO/AO188  
team<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台, <sup>2</sup> プロジェクトチーム

<sup>1</sup>National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), <sup>2</sup>Project team

地上や宇宙からのサーベイ観測により、候補も含めると、系外惑星の数は3000個を越えようとしている。その数多くの発見の中で、系外惑星の姿もホットネプチューンやスーパーアースなどといった多様性が見えはじめてきたが、いまだそれら系外惑星とその形成の理解には及ばない。しかし、様々な年齢の天体の伴星を数多く調べることにより、系外惑星の形成や進化についての重要な手がかりを得ることができる。

SEEDS(Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru) とは、最初のすばる望遠鏡戦略枠プロジェクトであり、高コントラスト撮像装置である HiCIAO と 188 素子補償光学を組み合わせ、近傍の太陽型星やより重い約 500 個の恒星において、巨大惑星および原始惑星系円盤・ダスト円盤を、数 AU から数十 AU の範囲において直接撮像サーベイ観測を行っている。系外惑星探索ターゲットは、年齢が $\sim 1$ -10 Myr の近傍にある星形成領域にある若い天体 (YSOs)、 $\sim 100$ -500 Myr の近傍の散開星団に属する天体、 $\sim 1$ Gyr の近傍の天体である。原始惑星系円盤のターゲットは近傍の星形成領域の YSOs、および、ダスト円盤の候補天体は Spitzer や AKARI などの赤外線衛星により観測された天体である。このプロジェクトのゴールは、(1) 太陽型星や、より重たい星の周りにおいて系外惑星の検出およびその個数調査、(2) 原始惑星系円盤およびダスト円盤の進化およびそれらの幾何構造の多様性、(3) 星周構造から系外惑星へのつながりを観測的に明らかにすることである。この系統的なサーベイにより、個々の興味深い天体の研究を可能にすると同時に、星・惑星形成において重要な統計的データを得ることができる。

その観測結果から発表された最近の代表的なものでは AB Aur という年齢約 100 万年の非常に若い星を観測し、惑星が産まれる現場である原始惑星系円盤を最も詳細に、かつ、最も中心に近い領域の構造を解明した。また、最近のものでは HR 4796 A という若い天体の周囲にあるチリのリングの撮影にも成功した。そのリングは、恒星の周囲にある未発見の惑星によって影響を受けたと考えられる特徴を持っていることがわかった。従来の観測では単純な円盤にしか見えなかったものも、HiCIAO の観測により複雑な構造が見えるようになり、その形状から未発見の惑星の存在を示唆することができるようになった。これらの成果から、これまで別々に進んでいた円盤の研究と系外惑星探索が結びついてきたと考えられる。

5 年間をかける SEEDS プロジェクトが 2009 年 10 月の観測が開始してから 2 年が経過し、成果が増え始めている。今回、プロジェクトの半分ほどが過ぎたことを受け、直接撮像した惑星質量天体も含め、現時点での SEEDS の進捗状況を報告する。

キーワード: 太陽系外惑星, 原始惑星系円盤, 近赤外, 直接撮像

Keywords: Exoplanet, Proto-planetary disk, Near infrared, Direct imaging

## 磁気乱流不活性領域を考慮した原始惑星系円盤の面密度分布の進化 Surface Density Distributions of Protoplanetary Disks with Dead Zones of Magneto-Hydrodynamic Turbulence

竹内 拓<sup>1\*</sup>, 奥住 聡<sup>2</sup>, 武藤 恭之<sup>1</sup>

TAKEUCHI, Taku<sup>1\*</sup>, OKUZUMI, Satoshi<sup>2</sup>, MUTO, Takayuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学, <sup>2</sup> 名古屋大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology, <sup>2</sup>Nagoya University

磁気回転不安定性 (MRI) 起源の乱流粘性がある原始惑星系円盤の面密度分布の進化を研究する。原始惑星系円盤は、電離度が低いいため、磁気乱流が活性化しない領域 (デッドゾーン) が円盤の内側部分に生じる。円盤内側部分は、乱流粘性による質量降着が抑えられ、外側部分から降着してきたガスがたまる。そこで、円盤内側部分の面密度は、外側部分より高くなることが予想される。デッドゾーンの境界は、数 AU-数 10AU にあり、ここで面密度が数倍程度、急激に上昇すると予想される。この面密度の跳びは、ALMA によるダスト連続波の観測で検出可能と期待される。

デッドゾーンがどこまで外側に広がるかは、ダスト表面での電荷再結合で決まるので、ダストの総表面積に依存する。ダストが成長すると、デッドゾーンの境界は円盤内側に移動する。一方、デッドゾーンが生じて、円盤表面を通じた降着があるが、その降着率は円盤を貫く縦磁場の強さに依存する。したがって、デッドゾーン境界での面密度の跳びは、縦磁場の強さに依存する。縦磁場は、円盤ガスとともに移流拡散するので、円盤密度構造と磁場分布はセルフコンシステントに決める必要がある。

本研究ではまず第 1 ステップとして、縦磁場の分布としてプラズマ  $\beta$  の値が一定の場合を考える。ダストサイズ、円盤降着率をパラメータとし、円盤電離度を計算し、円盤内でのデッドゾーンの広がりや面密度分布を求めた。電離度の計算は Okuzumi (2009, ApJ, 698, 1122)、磁気乱流による降着率の計算は Okuzumi & Hirose (2011, ApJ, 742, 65) に基づいて行った。その結果、降着率  $10^{-8} M_{\text{sun}} / \text{yr}$ 、ダストサイズ  $1 \mu\text{m}$ 、縦磁場の強さ  $0.1\text{mG}$  だと、20AU で約 3 倍の面密度の跳びがみられる。磁場が強いと、面密度の跳びは小さくなる。ダストサイズが大きいと、境界は内側に移動する。続いて、縦磁場が円盤ガスとともに移流拡散する効果を考慮した場合についても議論したい。

キーワード: 惑星形成, 原始惑星系円盤, 磁気乱流

Keywords: planet formation, protoplanetary disks, magnetohydrodynamic turbulence

## 中質量星における原始惑星系円盤の寿命

## The Lifetime of Protoplanetary Disks Surrounding Intermediate-mass Stars

安井 千香子<sup>1\*</sup>, 小林 尚人<sup>1</sup>, 齋藤 正雄<sup>2</sup>, Alan T. Tokunaga<sup>3</sup>  
 YASUI, Chikako<sup>1\*</sup>, Naoto Kobayashi<sup>1</sup>, SAITO, Masao<sup>2</sup>, Alan T. Tokunaga<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 国立天文台, <sup>3</sup> ハワイ大学

<sup>1</sup>University of Tokyo, <sup>2</sup>National Observatory of Japan, <sup>3</sup>IfA, University of Hawaii

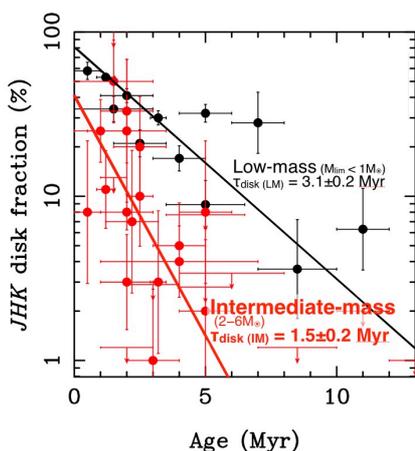
原始惑星系円盤の寿命は、惑星形成過程を決定する主要な基本量のひとつである。これまでに、小質量星の円盤の寿命は様々な研究により定量的に求められてきたが、中質量以上の星については定性的な示唆のみで、定量的な導出はなされていなかった。中質量星の円盤進化を知ることが、中質量星の惑星形成に制約をつけられるだけでなく、円盤進化の中心星依存性を知ることによって惑星形成モデルに制約をつけることができる点などから、非常に重要である。

われわれは、太陽近傍(距離約 3kpc 以内)に存在するこれまでによく知られた非常に多く(約 30 個)の星生成クラスターについて、近赤外線 JHK バンド (<=2um) の測光データを用いた robust な方法により、中質量星 (2-6 太陽質量) の原始惑星系円盤の残存率である disk fraction(以下、JHK IMF)を導出した。求められた JHK IMF は、クラスターの年齢とともにおよそ指数関数的に減衰することが分かり、減衰曲線のフィットから中質量星の characteristic decay timescale が、1.5 plus or minus 0.2 Myr と初めて定量的に見積られた。これは、小質量星(約 0.1-1 太陽質量)における decay timescale (約 3Myr) と比べておよそ半分であり、decay timescale は中心星質量 ( $M_*$ ) に対して  $M_*^{-0.5 \text{ plus or minus } -0.2}$  に比例するという依存性となることがわかった。

また、disk fraction がおよそゼロになるまでの年齢で定義される「円盤の寿命」について、近赤外線でトレースされる最も内側の円盤と、中間赤外線でトレースされるやや外側の円盤の進化には約 4Myr の有意な差が存在することも分かった。このような時間差は小質量星では見られなかったことから、この長い “transient phase” は中心星の質量が大きいほど planet formation rate が高いこと、小質量星に比べて inner disk が速く消失することなど、中質量星に特有の円盤進化を示唆しているのかもしれない。

キーワード: 原始惑星系円盤, 円盤進化, 中質量星, 系外惑星

Keywords: protoplanetary disk, disk evolution, intermediate-mass stars, exoplanet



## 木星形成に伴う土星の急速な形成 Rapid formation of Saturn after Jupiter completion

小林 浩<sup>3\*</sup>, クリス オーメル<sup>2</sup>, 井田 茂<sup>1</sup>  
KOBAYASHI, Hiroshi<sup>3\*</sup>, Chris Ormel<sup>2</sup>, IDA, Shigeru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> カリフォルニア大学バークレー校, <sup>3</sup> 名古屋大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institut, <sup>2</sup>Astronomy Department, University of California, Barkeley, <sup>3</sup>Department of Physics, Nagoya University

惑星は太陽から近い方から順に形成されるので、土星は木星の形成後に作られる。しかし、土星が木星よりも小さく、木星が移動せずに現在の位置にとどまっていることから、土星は木星の形成後に数百万年程度の短い時間でできたと考えられる。木星や土星のようなガス惑星は、10倍の地球質量程度の大きな惑星核を作り、その惑星核の強い重力により周りのガスを集積することで形成される。惑星核は周りの微惑星を集積し成長するが、時間がかかりすぎる。しかし、惑星核が大きくなるにつれて周りの微惑星の軌道を乱し、微惑星同士は衝突により破壊される。破片は強いガス抵抗を受けてランダム速度が小さくなり、非常に惑星核が集積しやすくなるため、惑星核の成長は促進される。その一方で、破片はガス抵抗を受けて角運動量を失い中心星に短時間で落下してしまうため惑星核の周りに材料物質がなくなり惑星核の成長しにくくなるという問題があった。しかし、木星が形成されると、ガス円盤に溝を作るため、破片の落下を妨げる。溝のすぐ外側では破片は全く落下しないと仮定すると、現在の太陽系の惑星の総質量と同程度の円盤で微惑星が1km程度なら、数百万年程度でガス集積を起こせる程の大きな惑星核は形成される。微惑星が大きくなる程、材料物質が多くなる必要がある(10kmならば4倍、100kmならば10倍)。しかし、このように木星が溝を作った場合でも破片が失われる可能性もある。そのような厳しい状況でもシミュレーションを行ったところ、微惑星が1kmとすると材料物質が今の太陽系の4倍程度あれば、大きな惑星核は十分作られる。このように厳しい状況でも短時間で土星は作ることができるので、土星は木星形成によって木星が作った溝の外側で急速にできたのだろう。

キーワード: 惑星形成, 衝突・破壊, 土星

Keywords: Planetary formation, Collisional fragmentation, Saturn

## 原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガス降着流：ギャップの効果 Gas Accretion Flow onto Circumplanetary Disks from Protoplanetary Disks: Effect of Gap

谷川 享行<sup>1\*</sup>, 町田 正博<sup>2</sup>, 大槻 圭史<sup>3</sup>

TANIGAWA, Takayuki<sup>1\*</sup>, Masahiro N. Machida<sup>2</sup>, OHTSUKI, Keiji<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 惑星科学研究センター / 北大低温研, <sup>2</sup> 九州大学理学研究科, <sup>3</sup> 神戸大学理学研究科 / 惑星科学研究センター

<sup>1</sup>CPS / ILTS, Hokkaido University, <sup>2</sup>Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Faculty of Sciences, Kobe University / CPS

巨大ガス惑星の周りに存在する衛星系のほとんどは規則衛星、つまり惑星の赤道面付近をほぼ円軌道で回っていることから、衛星は惑星周りにかつて存在していた周惑星円盤 (= 原始衛星系円盤) の中で形成したと考えられている。また、近年の数値流体シミュレーションにより、ガス惑星が原始惑星系円盤ガスの降着によって成長する時に、必然的に惑星の周りにガス円盤が形成されることが明らかになってきた。しかし、それらの研究は衛星形成に主眼を置いていないために、周惑星円盤構造に対する詳しい解析は行われていない。そこで本研究では、ガス惑星形成時に出来る周惑星円盤構造を高解像度で求め、周惑星円盤構造に着目して流れ場を詳しく解析した。特に今回は、ガス惑星の重力により形成するギャップ (惑星軌道上のガス密度の低いドーナツ状の領域) が、ガス降着流にどのように影響を及ぼすかを中心に調べた。

衛星形成は主に惑星半径の数十倍 (惑星の軌道半径の数百分の一) 以内で行われ、その領域を十分に空間的に分解するために、惑星近傍のみを効率よく高空間分解能で計算可能な多重格子法を用い、かつ惑星近傍のみを切り出した局所近似回転座標系を採用した。

得られた流れ場を解析した結果、原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガス降着流の構造は、ギャップの有無で定性的な変化はないことが分かった。つまり、ガス降着は、原始惑星系円盤の比較的上空 (円盤スケールハイト程度より上) から周惑星円盤外縁部を飛び越えて一気に惑星近傍の周惑星円盤へと落下している。また、周惑星円盤への質量フラックス・角運動量フラックスの動径方向分布については、惑星軌道を挟んで左右対称なギャップが存在する環境下ではギャップのない場合と違いが見られなかったのに対し、ギャップに非対称性がある場合は2つのフラックスはいずれも若干中心集中する傾向が見られた。これはギャップをまたいで両側から周惑星円盤へと降着しようとしているガス同士が衝突することにより効率的に角運動量を失っていることが原因と考えられる。実際のガス惑星形成過程においてはギャップに非対称性を持つことが予想されているため、周惑星円盤形成及びその長期的進化を考慮する場合にはこの効果を考慮する必要がある。

キーワード: 衛星形成, ガス惑星, 流体力学

Keywords: Satellite formation, giant planets, hydrodynamics

## 恒星・ガス惑星・氷惑星内部を念頭においた非弾性球殻対流モデルの構築 Development of an anelastic convection model in rotating spherical shells for stars, gas and icy giant planets.

佐々木 洋平<sup>1\*</sup>, 竹広 真一<sup>2</sup>, 中島 健介<sup>3</sup>, 倉本 圭<sup>4</sup>, 林 祥介<sup>5</sup>

SASAKI, Youhei<sup>1\*</sup>, TAKEHIRO, Shin-ichi<sup>2</sup>, NAKAJIMA, Kensuke<sup>3</sup>, KURAMOTO, Kiyoshi<sup>4</sup>, HAYASHI, Yoshi-Yuki<sup>5</sup>

<sup>1</sup>京大・数学, <sup>2</sup>京大・数理研, <sup>3</sup>九大・理・地球惑星, <sup>4</sup>北大・理・宇宙理学, <sup>5</sup>惑星科学研究センター/神戸大・理・地球惑星  
<sup>1</sup>Dept. Math., Kyoto Univ., Kyoto, Japan, <sup>2</sup>RIMS, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, <sup>3</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Kyushu Univ., Fukuoka, Japan, <sup>4</sup>Dept. CosmoScience, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, <sup>5</sup>CPS/Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ., Kobe, Japan

回転球殻内の対流問題は、恒星やガス惑星、氷惑星、そして惑星内部などで生じている大規模な対流現象の最も基本的なモデルとして精力的に研究されている。近年の計算機性能の向上により数値的な研究が精力的に行なわれつつあり、ブシネスク近似の下での対流の基本的な側面や特徴があきらかにされつつある。しかしながらブシネスク近似は系の圧縮性を無視する近似である。系の圧縮性を考慮するために非弾性系が用いた研究もいくつかあるものの、回転球殻中の圧縮性流体の対流はブシネスク系ほど研究されていない。恒星やガス惑星、氷惑星の深部対流運動を考える際には、対流層の厚さがスケールハイトの数倍～数十倍にもおよぶため、系の圧縮性を考慮する必要があるだろう。また、近年の天文観測技術の発達により太陽系外の惑星系が多数発見されている。現在観測されている太陽系外の惑星の多くは木星型惑星であり、回転球殻中の圧縮性流体の運動は、これら天体の深部大気の運動を考える際の基礎となる。

そこで本研究では、恒星・木星型惑星の深部対流運動を念頭においた回転球殻中の非弾性流体の数値モデルを構築し、幾つかのテスト計算を行なった。モデルの開発には、これまで我々が構築してきた回転球殻ブシネスクモデルを非弾性系に拡張することで行なった。定式化において、運動量フラックスをトロイダル・ポロイダルポテンシャルに展開することで、これまで構築してきた数値モデルを自然な形で拡張することが可能になった。

当日は構築したモデルを用いた計算例について報告するとともに、今後の展望について議論する。

キーワード: 回転球殻対流, 圧縮性対流, 非弾性方程式系

Keywords: Convection in rotating spherical shells, Compressible convection, Anelastic equations

## 隕石重爆撃期における原始地球大気の剥ぎ取り

### Revisited to the impact erosion of early Earth atmosphere during the heavy bombardment period

黒澤 耕介<sup>1\*</sup>, 濱野 景子<sup>2</sup>, 杉田 精司<sup>3</sup>, 門野 敏彦<sup>4</sup>

KUROSAWA, Kosuke<sup>1\*</sup>, HAMANO, Keiko<sup>2</sup>, SUGITA, Seiji<sup>3</sup>, KADONO, Toshihiko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所, <sup>2</sup> 東大理 地球惑星, <sup>3</sup> 東大 新領域 複雑理工, <sup>4</sup> 大阪大 レーザー研

<sup>1</sup> ISAS, JAXA, <sup>2</sup> Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo, <sup>3</sup> Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo,

<sup>4</sup> Inst. of Laser Eng., Osaka Univ.

天体衝突によって生じる急膨張する衝突蒸気雲は、惑星大気を加速し宇宙空間に散逸させる。この過程は "Impact erosion" と呼ばれ、80年代から盛んに研究されてきた。特に重力の小さい火星は隕石重爆撃期にほとんどの大気を失ったと考えられている [Melosh & Vickery, 1989]。

本研究ではこの過程が原始地球大気に与えた影響を考察する。Melosh & Vickery (1989) は、地球大気を脱出速度以上まで加速し、大規模に散逸させるためには $\sim 25$  km/s の衝突速度が必要と見積もった。それに対して隕石重爆撃期の最頻衝突速度が 13-15 km/s 程度と予想されているため [Chyba, 1991]、原始地球大気の Impact erosion は無視できると考えられてきた。しかし当時は、宇宙速度を超える衝突で蒸気雲に分配されるエネルギー量が不明であったために、彼らは膨張する蒸気雲が持つ内部エネルギーとして考えうる最小値を採用した。我々は、近年発展してきた高強度レーザー実験から得られた圧力-エントロピー平面上での Hugoniot 関係式を用いて、蒸気雲の内部エネルギー式を改良した。改良した式を Impact erosion の半解析的理論モデルである "Sector blow-off model" [Vickery & Melosh, 1990] に組み込んだ。従来のエネルギー式を用いた場合、大気が散逸を開始する衝突速度の閾値は $\sim 16$  km/s であるが、改良したエネルギー式では $\sim 13$  km/s にまで引き下げられることがわかった。わずか $\sim 3$  km/s の違いではあるが地球への衝突速度の最頻値をまたいで変化するので、原始地球の大気散逸過程は大きく変化すると予想される。

講演では衝突速度、初期大気圧、衝突天体総質量、衝突天体のサイズ分布を変化させた場合の計算例を示し、隕石重爆撃期の地球大気圧の変動に関して議論したい。

キーワード: 衝突蒸気雲, 原始地球大気, 大気散逸, 隕石重爆撃期, 原始太陽系円盤ガス, 希ガス

Keywords: Impact-induced vapor clouds, Early Earth atmosphere, Impact erosion, Heavy bombardment period, Solar nebula, Noble gases

## 珪酸塩鉱物の溶解沈殿による氷天体の分化 Differentiation of silicates from H<sub>2</sub>O ice in an icy body induced by ripening

城野 信一<sup>1\*</sup>

SIRONO, Sin-iti<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Environmental Sciences, Nagoya University

主成分が珪酸塩鉱物 + 氷である氷天体が太陽系には存在している。何らかの加熱イベントにより氷天体が溶融すると、密度が大きい珪酸塩鉱物が天体中心に沈降することにより、珪酸塩鉱物のコア + 氷マントルという構造に天体が分化する。

氷天体が始原的であった場合、珪酸塩鉱物の粒子サイズはミクロンサイズ程度となる。このような小さな粒子の水中の沈降時間はかなり長い。さらに、天体が溶融するようなイベントが発生したとすると、対流が引き起されるであろう。対流によって微粒子の沈降はますます困難になってしまう。微粒子の大きさがある程度大きくなり、沈降速度が十分早くならない限り氷天体の分化は進行しない。

そこで本研究では、珪酸塩鉱物の溶解 + 沈殿によって微粒子が成長する時間を算出し、氷天体の分化に必要な条件を明らかにした。その結果、溶融した水の pH が決定的に重要であることがわかった。水中に分散した微粒子は一般に表面に電荷を帯びる。その電荷の大小は水の pH に依存する。電荷が多くなると、微粒子同士が相互に反発するようになり微粒子の凝集はおこらない。この場合、微粒子は水の対流に沿って運動することになる。対流に逆らって沈降するためには溶解 + 沈殿によって粒子サイズが 1cm 程度まで成長する必要があり、それに必要な時間は非常に長くなる。よって、微粒子が凝集しない場合は氷天体の分化はおこらない。

一方で、Point of zero charge(PZC) と呼ばれる pH が存在し、その pH においては電荷がゼロとなる。PZC は鉱物種によって 2-11 程度まで変化することが知られている。溶融した水の pH が PZC 付近であると、微粒子の相互反発は無いので凝集が進行し、水中に氷微粒子のネットワークが形成される。しかし珪酸塩鉱物の溶解 + 沈殿は進行するので、ネットワークは局所的に切断される。切断によって微粒子集合体の破片が生成されることになる。一方、ネットワーク中の対流速度は十分小さいため、生成された破片は中心に向かって沈降することになる。したがって、この場合は氷天体の分化が進行する。

キーワード: 氷天体, 分化, ライプニング, 組成

Keywords: Icy body, Differentiation, Ripening, Composition

## 大気圏突入氷天体アブレーションガスの化学反応に関する放電を利用した極超音速風洞実験

### Hypersonic wind tunnel experiments on chemical reaction around an icy object with ablation using electric discharge

鈴木 宏二郎<sup>1\*</sup>, 渡邊保真<sup>2</sup>

SUZUKI, Kojiro<sup>1\*</sup>, WATANABE Yasumasa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科, <sup>2</sup> 東京大学大学院工学系研究科

<sup>1</sup>GSFS, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Grad. Sch. Eng., The University of Tokyo

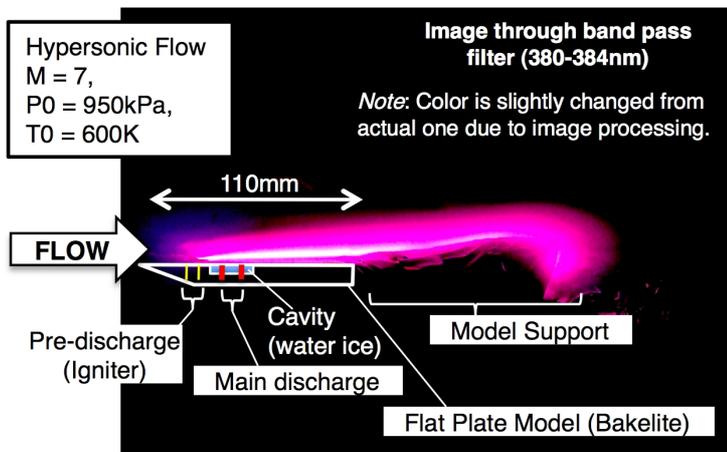
惑星大気圏に突入する天体前方には強い衝撃波が発生し、その背後の高温衝撃層では、大気成分と天体表面からのアブレーションガスが反応して生命前駆物質を含む様々な化学種が生成されると考えられる。それらは、突入天体の後流を経て惑星大気に供給されることになる。その検討のため、表面でH<sub>2</sub>Oのアブレーションガス噴出を伴う氷天体が、原始地球を想定したN<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>大気中を極超音速で飛行する際の化学反応流れについて、Navier-Stokes方程式による数値解析を行った (Suzuki, AIAA Paper 2011-3756)。28化学種 (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N, O, NO, NO<sup>+</sup>, e<sup>-</sup>, N<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, C, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CN, CO<sup>+</sup>, C<sup>+</sup>, H, H<sub>2</sub>, HCN, HCO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H, CH, H<sub>2</sub>O, OH) の非平衡化学反応を考慮し、熱的非平衡性については振動モードを並進モードと分離した2温度モデルを用いている。なお、これはCFRPアブレータを持つHayabusa回収カプセルまわりのN<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>大気圏再突入化学反応流解析用に開発した計算コードを基礎としている。計算結果から、氷天体前方にできる強い衝撃波の背後で生成されたCNが、アブレーションガスの分解で供給されるH<sub>2</sub>と反応することにより、淀み点領域の表面近傍でHCNを生成し、それが、肩部での急膨張流れを経て、ほぼ凍結状態のまま後流から流出されることがわかった。大気成分をCO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=0.93:0.07とし、現在の地球大気密度相当で高度60kmを速度8km/sで飛行する半径0.2mの氷球の風上側表面から一様に0.05kg/s<sup>2</sup>m<sup>2</sup>のH<sub>2</sub>Oアブレーションガスが噴き出すケースでは、放出されるH<sub>2</sub>O重量に対し、0.01%のオーダーのHCNが生成される結果が得られている。

大気圏に突入する宇宙輸送機の研究開発に用いられる極超音速風洞は、大気圏突入天体まわりの高速気流を模擬し、アブレーションなどの現象を観察する装置としても有用である (鈴木他, JpGU Meeting 2010, PPS004-10, 同 2011, PPS020-22, Imamura et al., AIAA Paper 2010-4512)。上述のように、極超音速流は衝撃波による急加熱や圧縮、膨張流による急冷却など非平衡性を生む環境に富み、様々な物質を生み出す化学反応炉として働いていると考えられる。しかし、極超音速風洞では設備の耐熱性の制約から化学反応が励起されるレベルの高温気流を作り出すことはできない。そこで、気流中に置く供試体に電極を設置し、放電による熱エネルギー注入 (Watanabe, Suzuki, AIAA Paper 2011-3736) を行うことを考える。実験は東京大学大学院新領域創成科学研究科が所有する極超音速高エンタルピー風洞 ([http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/wt/wt\\_index.htm](http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/wt/wt_index.htm)) で行われた。図はテストケースとして行った平板での実験結果である。平板上には放電電極に加え、あらかじめ氷を張ったキャビティを置くことで、そこからのアブレーションガスを原料とする極超音速気流中の化学反応を観察できる。これは波長382 ± 2nmのナローバンドパスフィルターを介した高速ビデオ画像 (露光時間1ms) であり、この中にCNの発光帯が含まれている。気流の淀み点温度は約600K、平板上の気流静圧は約300Paである。放電は、点火時に5kVの高電圧を要するが、その後、5Vで6Aの定常放電が約1秒持続する。別途行ったN<sub>2</sub>(1+)バンドの発光分光結果に対するフィッティングによると、放電部の中央では振動温度が約6000Kと見積られている。この図から気流中でのCN生成が確認されたが、Cは平板の材料であるベークライトの熱損耗から、Nは大気から供給されている。供試体の材質をアブレーションのないセラミックに変更し、アブレーション源として水の氷とドライアイスの混合物を用いることで、アブレーションガス中のCやHを原料とした化学種生成過程を観察できる。極超音速風洞と放電との組み合わせでは、気流や投入パワーなどの諸条件がわかっており、かつ、時間スケールも秒単位と比較的長い。計測や観測がしやすいというメリットを持つ。今後、大気圏突入天体まわりの化学反応模擬や数値解析の検証用データ取得に有用となるものと期待される。

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B) No. 21360413) の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

キーワード: 大気圏突入, 極超音速流れ, 風洞, アブレーション, 氷, 化学反応

Keywords: atmospheric entry, hypersonic flow, wind tunnel, ablation, ice, chemical reaction



## 海惑星と陸惑星を分ける条件：水量が気候に及ぼす影響について The Condition Dividing Aqua Planets and Land Planets: Effects of Water Amount on Planetary Climate

脇田 美幸<sup>1</sup>, 高尾 雄也<sup>1</sup>, 玄田 英典<sup>1\*</sup>, 阿部 豊<sup>1</sup>, 大石 龍太<sup>2</sup>, 阿部 彩子<sup>3</sup>

WAKIDA, Miyuki<sup>1</sup>, TAKAO, Yuya<sup>1</sup>, GENDA, Hidenori<sup>1\*</sup>, ABE, Yutaka<sup>1</sup>, O'ISHI, Ryouta<sup>2</sup>, ABE-OUCHI, Ayako<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学 大気海洋研究所, <sup>3</sup> 東京大学 気候システム研究センター  
<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, <sup>3</sup>Center for Climate System Research, The University of Tokyo

初の系外惑星の検出から15年以上が経ち、系外惑星の発見数は700個を超えた。近年では観測技術の向上にともなって地球型惑星と考えられる惑星も見つかってきており、生命を宿す可能性のある惑星の存在が期待される。生命が存在しうる惑星の条件として、惑星の表面に液体の水を持つことは非常に重要である。惑星表面の水分布は、地形の起伏による地表での水輸送プロセスと、大気循環による水輸送プロセスの競合で決まる。前者が卓越する惑星は、海惑星と呼ばれ、地球のように、降水や蒸発によらず惑星表面が海洋によって常に湿っている (Kasting et al. 1993)。後者が卓越する惑星は、陸惑星と呼ばれ、惑星表面の水分布が大気中の循環で支配されるため、低地でも海がない場所が存在しうる (Abe et al. 2005, 2011)。

大気循環が水輸送を支配すると考えられる、水が非常に少ない惑星の気候状態は、Abe et al. (2005) において、大気大循環モデルを用いた数値実験で調べられた。これによると、このような惑星では水が高緯度に局在化して低緯度が乾燥し、海惑星の気候とは様相が異なる。また、そのために、陸惑星のハビタブルゾーンが海惑星のハビタブルゾーンよりかなり広いことが、Abe et al. (2011) でわかっている。そのため、陸惑星と海惑星をわける条件を探ることが重要である。

安福 (2009) では、全球的につながった海を持つことが、地表での水輸送プロセスが卓越し海惑星になるための条件だと仮定した。そして、パーコレーション理論を用い、全球的につながった海を持つ条件が、惑星上を占める海の割合が全球の半分になることであると求め、これを、陸惑星と海惑星をわける条件であると結論づけた。

しかし、海が全球的につながることが、陸惑星と海惑星をわける条件であるのかは、本当のところはわからない。また、パーコレーション理論では、低いところから海ができると考えられているが、大気大循環モデルを用いた Abe et al. (2005) によると、降水は局在化するため、低いところがすべて海になるわけではない。そのため、大気大循環モデルを用いた数値実験を行い、安福 (2009) での仮定が正しいのかどうかを確かめる必要がある。

そこで、本研究では、地表での水輸送を考慮した上で、地球など現実の惑星を参考にして作ったランダムな4つの地形に対し、水量をパラメータにした系統的な実験を、大気大循環モデルを用いて行った。

その結果、惑星の気候状態は、陸惑星・海惑星と、その中間の状態の3領域にわけられ、陸惑星から海惑星への遷移は水量の変化とともに徐々に起こることがわかった。この結果は、安福 (2009) で得られた陸惑星と海惑星をわける条件が海の割合でシャープに変わるという結果とは異なったものであった。また、その境界は、水量よりも、惑星を占める海の割合によって決まることがわかった。海の占める割合が3~4割以下だと陸惑星的な気候状態、5割以上だと海惑星的な気候状態になり、その間は中間的な状態をとることがわかった。

### 引用文献

安福一快, 海惑星と陸惑星を分ける条件, 修士論文 (東京大学), 2009.

Abe, Y., Numaguti, A., Komatsu, G., and Kobayashi, Y., Four climate regimes on a land planet with wet surface: Effects of obliquity change and implications for ancient Mars, *Icarus* 178, 27-39, 2005.

Abe, Y., Abe-Ouchi, A., Sleep, N. H., and Zahnle, K. J., Habitable Zone Limits for Dry Planets, *Astrobiology* 11, 443-460, 2011.

Kasting, J. F., Whitmire, D. P., and Reynolds, R. T., Habitable Zones around Main Sequence Stars, *Icarus* 101, 108-128, 1993.

キーワード: ハビタブルゾーン, 陸惑星, 海惑星, GCM

Keywords: habitable zone, land planet, aqua planet, GCM

## 内部海を持つ地球型惑星の生命居住可能性

### The habitability of terrestrial planet that is covered with ice but has an internal ocean

上田 翔士<sup>1\*</sup>, 佐々木 貴教<sup>1</sup>

UETA, Shoji<sup>1\*</sup>, SASAKI, Takanori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学

<sup>1</sup>Tokyo Institute of Technology

系外地球型惑星と思われる天体や宇宙空間を漂う浮遊惑星が発見され始めている昨今、生命居住可能な系外地球型惑星や浮遊地球型惑星が存在するのかどうかということは非常に重要なテーマである。そういった状況の中で、表面が全球凍結しているが氷の内部が地熱によって溶けて、表面が氷に覆われた海(内部海)が出来ることが分かっており、内部海の生命居住可能性について数多くの研究がなされている。本研究では惑星内部からの熱フラックスによって、惑星進化のタイムスケールで内部海を保持する系外地球型惑星・浮遊地球型惑星について、惑星質量・中心星からの距離・惑星表面の水の量・放射性熱源の量をパラメータとしてふり、議論した。地球と同質量で温室効果がない系外地球型惑星は1AUにおいて地球の0.5-8倍の水を表面に持つ場合、または地球の0.4倍以上の放射性熱源を持つ場合に内部海をもつことが出来る。8倍以上の水を表面に持つ場合は、内部海の底に高圧氷が生じてしまい、ハビタブルでなくなる。内部海をもつ条件というのは質量依存性が高く、質量が地球の数倍の場合、内部海を保持する可能性が大きくなる。地球と同質量で温室効果がない浮遊地球型惑星は地球の2-8倍の水を表面に持つ場合、または地球の2倍以上の放射性熱源を持つ場合、内部海をもつことが出来ることが分かった。8倍以上の水を表面に持つ場合は、上と同様にハビタブルでなくなる。海惑星よりも内部海をもつ地球型惑星のほうが系外惑星や浮遊惑星において一般的であることが示唆されたため、研究や探査の際に海惑星以上に内部海を持つ地球型惑星にも留意しなくてはならない。

キーワード: 系外惑星, 地球型惑星, 生命居住可能性, 内部海, 放射性熱源, 浮遊惑星

Keywords: exoplanets, terrestrial planets, habitability, internal ocean, radiogenic heat, free-floating planets

## 太陽系外惑星系におけるウォーターワールドレジームの惑星環境 A Study on the Water World Regime around Extrasolar Planetary Systems and Planetary Environments

福島 俊<sup>1\*</sup>, 門屋 辰太郎<sup>1</sup>, 田近 英一<sup>2</sup>

FUKUSHIMA, Satoshi<sup>1\*</sup>, KADOYA, Shintaro<sup>1</sup>, TAJIKA, Eiichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo

Habitable zone (HZ) is defined as an orbital range around a main sequence star where planets could have liquid water on the surface (e.g., Kasting et al., 1993). It is, however, noted that, liquid water cannot exist on the surface of a planet without sufficient greenhouse effects of the atmosphere due to some greenhouse gasses, such as CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, even if the planet is orbiting within HZ (Tajika, 2008). In this sense, HZ is not a sufficient condition but just a necessary condition for the planets with liquid water.

There should be, however, an orbital condition for the planets which are close enough to their central stars to warm the climate to have liquid water without any other greenhouse gasses except water vapor in the atmospheres (Tajika, 2008). Such a condition is named here 'Water World Regime' (WWR).

In this study, the condition for WWR is estimated using a one dimensional (1-D) energy balance climate model with a radiation model for steam atmosphere. The 1-D radiative-convective equilibrium model of Nakajima et al. (1992) is adopted for outgoing infrared flux from the planet.

The orbital range of WWR is found to be approximated by an annual mean insolation from 243.4 to 293.9 W/m<sup>2</sup>. When the central star is the sun and orbital eccentricity is 0, the inner and outer boundaries correspond to 0.84 AU and to 0.94 AU, respectively. This range is very narrow compared with the traditional HZ (0.84 to >1.37 AU). This is because WWR is defined here as the condition for the planets without greenhouse gas in the atmosphere except for water vapor in contrast to the traditional HZ which implicitly assumes strong greenhouse effects of the atmosphere. Among the extrasolar planets discovered so far, there are 12 candidates for the planets which satisfy the WWR condition.

キーワード: 太陽系外惑星

Keywords: extrasolar planet

## 水の散逸を伴う地球型惑星の進化 Evolution of terrestrial planets with water loss

小玉 貴則<sup>1\*</sup>, 玄田 英典<sup>1</sup>, 阿部 豊<sup>1</sup>, ザンレ ケビン<sup>2</sup>

KODAMA, Takanori<sup>1\*</sup>, GENDA, Hidenori<sup>1</sup>, ABE, Yutaka<sup>1</sup>, Zahnle, Kevin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>NASA エイムズ研究所

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>NASA Ames Research Center

生命の誕生と進化を考える上で、液体の水の存在は重要であると考えられている。液体の水が惑星表面に存在できる中心星からの距離の範囲をハビタブルゾーン (HZ) と呼ぶ。Kasting ら [1] は、全球が海でつながった地球のような惑星 (海惑星と呼ぶ) の HZ を見積もり、その範囲を現在の地球軌道での太陽放射の約 90% から約 110% の範囲と見積もった。

一方、阿部ら [2] は、惑星の保持する水量がごく少量の仮想的な惑星 (陸惑星と呼ぶ) の気候について議論した。陸惑星は、惑星表面の水分布が大気中の水蒸気の循環にのみ支配される惑星であり、その重要な特徴は、降雨と蒸発が局所的にバランスし、水の局在化が起こることである。彼らは、大気大循環モデルを用いて、1 気圧の空気からなる大気をもつ陸惑星の HZ を現在の地球軌道の太陽放射の約 77% から約 170% の範囲と見積もった。その結果、陸惑星は、海惑星より広い HZ を持つ可能性が示唆された。また、彼らは、海惑星のような水を多く保持している惑星が、水の散逸を経験することによって、陸惑星へ進化するだろうと考え、新しい地球型惑星の進化の経路を提案した。

両研究により、惑星表面の水量は HZ を議論する上で重要であることが示唆された。そこで我々は、まだ詳細に検討されていない海惑星から陸惑星への進化のメカニズムを明らかにするため、惑星表面に保持する水量変化をモデル計算し、海惑星から陸惑星への進化の詳細を検討した。

我々は、大規模に水を散逸させる水の流体的散逸 [3,4] と恒星進化 [5,6,7] を考慮し、初期に様々な水量を保持している仮想的な惑星に対して、様々な距離における惑星の保持する水量の変化を計算し、その時の惑星の状態を調べた。そして、系外地球型惑星の観測に示唆を与えるために、「初期海洋質量」「恒星からの距離」の他、「恒星の質量」「惑星の質量」についてもパラメーターとして扱うことにより、海惑星から陸惑星への進化に対する影響を検討した。

海惑星から陸惑星への進化には、2つの重要なタイムスケールが存在する。1つは、中心星から受ける放射が増大するタイムスケール、もう1つは、水の散逸するタイムスケールである。前者は、恒星の質量と惑星から中心星までの距離に依存し、後者は、水の散逸によって惑星が保持する水量が陸惑星的な気候をとる水量になるまでに要する時間であるため、初期海洋質量に依存する。後者が、前者に比べ長い場合、海惑星は陸惑星へ進化することはできず、前者に比べ短い場合、海惑星は陸惑星へ進化することができる。太陽型の恒星周りの地球サイズで軌道半径 0.75[AU] の海惑星の場合、海惑星から陸惑星へ進化する境界の初期水量は、0.15 海洋質量 (現在の地球の海洋質量の 0.15 倍) と見積もれ、惑星の保持する水量がこれ以下の場合には陸惑星へ進化する可能性がある。

これまで発見された系外惑星は、様々なスペクトル型の恒星を回っており、その質量も様々である。一般に、太陽よりも軽い恒星は、暗く進化が遅い。また、地球よりも質量の大きな惑星は、重力が大きいため、水蒸気の拡散速度が遅い。そのため、軽い恒星周りの数倍の地球質量をもつスーパーアースなどは、海惑星から陸惑星へ進化しにくいと考えられる。しかしながら、海惑星から陸惑星へ進化した惑星のハビタブルな期間は、陸惑星へと進化しない惑星と比べ長い場合、惑星の水量変化を考慮したハビタブルゾーンの内側境界を適応することにより、観測によるハビタブルプラネットの検出サンプル数が増大すると考えられる。

### Reference

- [1] Kasting, J. F., Whitmire D. P., and Reynolds, R. T. (1993). *Icarus*, 101, 108-128.  
[2] Abe, Y., Abe-Ouchi, A., Sleep, N. H., and Zahnle, K. J., (2011). *Astrobiology*, 11, 443-460. [3] Guinan, E.F., Ribas, I., 2002. Vol. 269. *Astron.Soc. Pacific, San Francisco*, pp.85-106. [4] Walker (1977) [5] Gough, D. O (1981) *Solar Physics*, vol. 74, Nov. 1981, p. 21-34 [6] Iben, I. (1967) [7] Lammer et al. (2009). *A&A*, 506, 399-410.

キーワード: 地球型惑星, ハビタブルゾーン, 系外惑星

Keywords: terrestrial planet, habitable zone, extrasolar planet

## 系外地球型惑星における大気組成と海水量の関係

### Variety in atmospheric compositions of terrestrial exoplanets: effects of surface H<sub>2</sub>O mass

洪 鵬<sup>1\*</sup>, 関根 康人<sup>1</sup>, 杉田 精司<sup>1</sup>

HONG, Peng<sup>1\*</sup>, SEKINE, Yasuhito<sup>1</sup>, SUGITA, Seiji<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 複雑理工学専攻

<sup>1</sup>Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

惑星形成の際、炭素質隕石や彗星等の H<sub>2</sub>O に富む材料物質の集積によって、地球型系外惑星の多くは非常に深い海を保持することが予想されている。マントルからの脱ガス気体の酸化還元度は海の深さに強く依存するため、それら "海惑星" の大気の酸化還元状態も海の深さに応じた多様性を持つ可能性がある。実際、地球では陸上火山が放出する火山ガスが酸化能的なのに対して、海底火山は還元的なガスを噴出していることが知られている (Holland, 2002)。これは、陸上火山と海底火山では、マグマの温度と圧力が大きく異なることを反映しているためである (Kump & Barley, 2007)。そこで本研究では海の深さに着目して、地球型系外惑星の大気組成の多様性を調べ、深い海が存在によって大気が還元されるかどうかを議論する。

海の深さを変化させた時の、マントルからの脱ガス気体中の CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 比の変化を調べるため、熱水系では CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> が平衡になっていると仮定し、岩石と水の反応によって緩衝された水素分圧によって平衡条件が規定されているとした。地球の陸上火山の火山ガスは一般的に、ファイヤライト-磁鉄鉱-石英緩衝系 (FMQ) と平衡になっていると考えられており (Holland, 2002)、一方で海底熱水系のガスは磁硫鉄鉱-黄鉄鉱-磁鉄鉱緩衝系 (PPM) の平衡組成に近い (McCollom & Seewald, 2007)。そこで我々は地球型系外惑星の岩石組成が地球と似ていると仮定して、FMQ と PPM によって水素分圧が緩衝されているとして、平衡計算を行った。

また、様々な量・組成の脱ガスフラックスを注入した時の大気組成の変化を調べるため、原始地球のモデル (Pavlov et al., 2001) に基づいた、1 次元光化学モデルを構築した。モデルは H,C,N,O,S で構成される気体分子を含み、337 の反応式、69 の分子種が含まれる。計算は全て地表面気圧を 1 bar、温度 275 K の条件で行った。またモデルには、実験で得られた、大気中の C/O 比と有機物エアロゾル生成量の関係式 (Trainer et al., 2006) を用いて、有機物エアロゾル層による紫外線遮蔽効果も取り入れた。二酸化炭素分圧  $p\text{CO}_2$  は、炭素循環における化学風化率によって決まると考えられるが、海惑星における風化率には大きな不定性があるため、 $p\text{CO}_2$  は現在の値の 0.1 から 1000 倍の間で振った。

熱水系での平衡計算の結果、FMQ 緩衝系より酸化能的な PPM 緩衝系であっても、7000 bar を超えるような高圧下では脱ガス組成は極めて還元的になることがわかった。したがってもし系外惑星の岩石組成が現在の地球のような比較的酸化的な組成であっても、海の深さが 70 km を超えればマントルから脱ガスする気体中の炭素はほとんど CH<sub>4</sub> として出ることがわかった。

次に、大気中での光化学計算によって、脱ガスフラックスが現在の地球の脱ガスフラックスの数倍になると、大気組成が還元的 (CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> > 1) になることがわかった。そのような場合、大気中での CH<sub>4</sub> の重合反応によって有機物のエアロゾル層が形成される可能性がある。過去の地球の脱ガス率の変化を考慮すると (Tajika & Matsui, 1993)、深い海を持つ系外惑星ではタイタンのようなヘイズに覆われた大気が形成され、それらが今後の観測で検出される可能性がある。また、現在の地球に匹敵する脱ガスフラックスがあれば、大気中の CH<sub>4</sub> の混合比は著しく高くなることがわかった (10 - 1000 ppm)。このことは深い海を持つ系外惑星の地表温度やハビタビリティを考える際に、CH<sub>4</sub> が気候に与える放射効果を考慮しなければならないことを示唆している。

キーワード: 系外惑星, 熱水系, 光化学, 大気組成

Keywords: exoplanets, hydrothermal system, photochemistry, atmospheric composition

## 自転軸傾斜角及び大陸配置が炭素循環の機能する系外地球型水惑星の表層環境に及ぼす影響

### Surface environment of water-rich extraterrestrial planets with carbon cycle under various obliquities and geographies

渡邊 吉康<sup>1\*</sup>, 田近 英一<sup>2</sup>, 門屋 辰太郎<sup>1</sup>

WATANABE, Yoshiyasu<sup>1\*</sup>, TAJIKA, Eiichi<sup>2</sup>, KADOYA, Shintaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大・理・地惑, <sup>2</sup> 東大・新領域・複雑理工

<sup>1</sup>Earth and Planet. Sci., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

Water-rich terrestrial planets like the Earth are expected to be found in the extrasolar planetary systems in the near future. To discuss habitability of planets, we have to investigate characteristic features of climate system of the water-rich terrestrial planets. One of the key factors which controls climate is "obliquity", that is, the inclination of planet's axis. Considering a large influence of obliquity on the solar energy distribution on the planetary surface, obliquity variations could induce large climate change on the planets. The climate of the Earth has been stabilized on long timescales by a negative feedback mechanism involving removal of CO<sub>2</sub> from the atmosphere by weathering of silicate minerals on land followed by carbonate precipitation in oceans, and continuous supply of CO<sub>2</sub> from the planetary interiors to the atmosphere via volcanism. This mechanism should be required for water-rich extraterrestrial planets to maintain warm climate stably. Without this mechanism, the climate of planets cannot be stabilized against changes in the various climate forcings. Considering that the amount of weathering is strongly influenced by surface temperature and the area of continent available for weathering, and that temperature of continent responds to the insolation more rapidly than that of oceans, long-term climate mode would be different under different obliquity or geography.

While the climate of extraterrestrial planets with high obliquities was investigated by Williams and Kasting (1997), there are few studies which systematically investigate the effects of obliquity change on the climate of the planets with carbonate-silicate geochemical cycle. In this study, we therefore investigate systematically the climate of the water-rich terrestrial planets with a negative feedback mechanism of carbonate-silicate geochemical cycle under various obliquities, semi-major axes and different geographies.

We tested with 3 different geographies; "Slice" (continent is distributed at the same fraction for each latitude.), "Equatorial" (supercontinent is centered around the equator.) and "Bipolar" (supercontinent is centered around both poles.). We found that, while the "permanent ice-cap mode" (partially ice-covered throughout the year) and the "seasonal ice-cap mode" (partially ice-covered seasonally) exist stably at low obliquities, the ranges of semi-major axis for these climate modes shrink and finally disappear with an increase of obliquity. This is because latitudinal gradient of annual mean insolation becomes smaller with an increase of obliquity, resulting in meridional heat transport to be insufficient. When carbonate-silicate geochemical cycle is taken into account, the ranges of semi-major axis for all the climate modes expand at any obliquities, compared with the cases without carbon cycle, indicating that the carbon cycle strongly stabilizes the climate for the planets with any obliquities inside the habitable zone. These features are found at any geographies. Dependence of obliquity on climate modes is quite different among different geographies. The climate is cold for lower obliquities at Equatorial geographies, whereas the climate is cold for higher obliquities at Bipolar geographies. This characteristic of climate modes at Slice geography is intermediate, but is closer to those of Equatorial characteristic. The results derive from a negative feedback of carbonate-silicate geochemical cycle. If continent is centered on the equator, at the same semi-major axis, pCO<sub>2</sub> decrease with the decrease of obliquity, because weathering occurs effectively throughout 1 year at lower latitude where annual mean insolation and land fraction are large. In contrast, if continent is centered on poles, pCO<sub>2</sub> decreases with the increase of obliquity at the same semi-major axis, because weathering occurs effectively throughout 1 year at higher latitude where seasonal insolation largely changes and land is the largest.

キーワード: 自転軸傾斜角, 炭素循環, 大陸配置, 系外惑星, ハビタビリティ, 惑星気候

Keywords: obliquity, carbonate-silicate geochemical cycle, continental distribution, exoplanet, habitability, planetary climate

## 炭酸塩-珪酸塩の地球化学的循環を考慮した、系外惑星表層環境の長期進化 Long-term Evolution of Surface Environment on Extrasolar Planets with Carbonate-Silicate Geochemical Cycle

門屋 辰太郎<sup>1\*</sup>, 田近 英一<sup>2</sup>, 渡邊 吉康<sup>1</sup>

KADOYA, Shintaro<sup>1\*</sup>, TAJIKA, Eiichi<sup>2</sup>, WATANABE, Yoshiyasu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東大 理 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東大 新領域 複雑理工

<sup>1</sup>Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

Surface environment of extrasolar terrestrial planets has been discussed in terms of presence of liquid water. Kasting et al. (1993), for example, estimated habitable zone (HZ) in which the planets are able to have liquid water on its surface. They found that the inner and outer limits of HZ are 0.95 and 1.37 AU, respectively. They also considered the change of HZ due to stellar evolution, and suggested that HZ moves outward and diminishes with time. In their study, sufficient amount of greenhouse gas is assumed, but it has not been verified quantitatively.

We investigate the conditions where planets hold liquid water, considering their surface temperature and the amount of greenhouse gas. Surface temperature is estimated with one-dimensional energy balance model (North et al. 1981; Williams & Kasting, 1997; etc.). The greenhouse gas is assumed to be CO<sub>2</sub>, and its amount in the atmosphere is controlled by carbonate-silicate geochemical cycle, in which degassing rate is given and chemical weathering rate depends on surface temperature and partial pressure of CO<sub>2</sub>.

The results show that, with the degassing rate as much as that at present Earth's value, planets can avoid snowball mode until 1.05 AU from the central star. This limit may be much narrower than the one estimated from previous studies. However, if the degassing rate of CO<sub>2</sub> is higher, the outer limit moves outward farther from the central star. Under such condition, a planet has higher partial pressure of CO<sub>2</sub>, which makes meridional temperature distribution much uniform, resulting in shrink of partial ice cap.

The degassing rate of CO<sub>2</sub> becomes lower with time. In order to examine such effect, we consider thermal evolution of the planet (Tajika & Matsui, 1992) and consider on the long-term stability of surface climate.

キーワード: 系外惑星, 炭素循環, EBM

Keywords: extrasolar planet, carbonate-silicate geochemical cycle, EBM

## 陸惑星の完全蒸発限界：1次元EBMを用いた検討 The Complete Evaporation Limit for Land Planets: A Study with 1D EBM

高尾 雄也<sup>1\*</sup>, 玄田英典<sup>1</sup>, 小玉貴則<sup>1</sup>, 阿部豊<sup>1</sup>

TAKAO, Yuya<sup>1\*</sup>, Hideori Genda<sup>1</sup>, Takanori Kodama<sup>1</sup>, Yutaka Abe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地球惑星科学専攻

<sup>1</sup> Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo

地球型生命の存在や進化を考える上で、液体の水の存在は重要だと考えられる。中島ら(1992)は、液体の水が豊富にあり全球的に分布している惑星(海惑星と呼ぶ)について、1次元放射対流平衡灰色大気モデルを用いて、大気構造を解くことによって地表面温度と惑星放射の関係性を求め、射出限界の存在について議論した。海惑星では、射出限界を上回る太陽放射を受けると、それに釣り合うエネルギーを射出することができず、地面の水が全て蒸発するまで表面温度が上がり続ける。彼らの結果では、射出限界の値は、アルベドを0.3に固定した場合、1AUでの現在の太陽放射の123%相当であると見積もられた。

一方、阿部ら(2005)は、3次元大気大循環モデルを用いて、惑星表面の水量がごく少量の仮想的な惑星の気候について検討した。その結果、降雨と蒸発が局所的にバランスし、低緯度が乾燥し高緯度に水が集中する水の局在化が起こることがわかった。水の分布が大気の水蒸気輸送によって支配され、乾燥した低緯度地域と、液体の水を保持する高緯度地域がある惑星を陸惑星と呼ぶ。陸惑星の表面に存在する液体の水が全て蒸発する太陽放射(完全蒸発限界)を計算すると、陸惑星の完全蒸発限界は、惑星が持つ初期水量に依存せず、1AUでの現在の太陽放射の170%程度になると見積もられ、海惑星の射出限界を大きく上回ることがわかった(阿部ら2011)。

完全蒸発限界を考える上で、水の分布と局在化は重要である。しかし、阿部らが用いたモデルでは惑星表面での水輸送は考慮されていない。そこで我々は、完全蒸発限界のメカニズムを定性的に理解する為の第一歩として、水量が少ない惑星表面での水輸送を考慮した場合の惑星気候への影響を簡単なモデルを用いて検討した。

我々は、中島らの大気モデルを拡張し、地表面温度、水蒸気量、惑星放射の関係を調べ、水がごく少量含まれる大気についての温室効果を考慮したモデルを作成した。そしてNorth(1981)が用いた南北1次元EBM(Energy Balance model)に水の潜熱の効果を加え、地表での水輸送の効率をパラメータとして与えた実験を行った。

その結果、水が低緯度まで張り出す場合、完全蒸発限界は海惑星の射出限界と一致した。また水が高緯度に局在化するにつれて、完全蒸発限界は連続的に大きくなっていくことがわかった。したがって、完全蒸発限界は、水がどこまで張り出すかで決まっている。水が張り出す範囲は、大気中の水蒸気輸送の効率と地表の水輸送の効率とのバランスから決まっており、水量が多く水輸送の効率が良い場合、低緯度まで水が張り出し、海惑星的な気候状態になる。

また、完全蒸発限界のメカニズムを検討するために、地面が乾燥している領域と水のある領域で分けて、二つの領域間をエネルギーが輸送されるという簡単なモデルでの地表面温度の定常解について解析を行った。その結果、完全蒸発限界の付近では、地面が濡れている領域の惑星放射が射出限界より少し小さい時点で、安定な定常解が存在できなくなることがわかった。

## 気球搭載望遠鏡による惑星大気観測 A balloon borne telescope for planetary observations

山元 夢摘<sup>1\*</sup>, 田口 真<sup>1</sup>, 吉田 和哉<sup>2</sup>, 坂本 祐二<sup>2</sup>, 中野 壽彦<sup>2</sup>, 莊司 泰弘<sup>3</sup>, 高橋 幸弘<sup>4</sup>

YAMAMOTO, Mutsumi<sup>1\*</sup>, TAGUCHI, Makoto<sup>1</sup>, Kazuya Yoshida<sup>2</sup>, SAKAMOTO, Yuji<sup>2</sup>, Toshihiko Nakano<sup>2</sup>, Yasuhiro Syoji<sup>3</sup>, TAKAHASHI, Yukihiko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 立教大学理学部, <sup>2</sup> 東北大学工学部, <sup>3</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>4</sup> 北海道大学理学部

<sup>1</sup>Department of Science, Rikkyo University, <sup>2</sup>Department of engineering, Tohoku University, <sup>3</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>4</sup>Department of Science, Hokkaido University

惑星の大気圏やプラズマ圏で起こる現象を研究するためには長時間の連続観測が重要である。しかし、国内外の大型望遠鏡はマシンタイムが限られる上に、シーイングや天候不良のため十分な観測ができない状況である。そこで、極域成層圏での特徴を生かして惑星を連続観測することを目的として気球搭載望遠鏡を開発している。

気球搭載望遠鏡開発の主要な技術課題の1つが、フライト中のゴンドラ姿勢を制御し、観測機器を目標に指向させ維持するポインティング制御である。本研究では制御を第3段階に分けて徐々に精度を上げる3段階指向制御系の開発を行った。第1段階制御ではサンセンサーを用い、デカップリング機構とコントロールモーメントジャイロを用いてゴンドラを太陽方向に指向させる。第2段階制御ではスターセンサーを用いて、望遠鏡の経緯台で望遠鏡方向を制御し、目標天体を望遠鏡視野内に導入・追尾する。最後に、第3段階制御では目標天体位置を視野の中央に維持するために光電子増倍管とティップティルトミラーを用いて制御する。

光学系としては、有効口径 304.8mm、焦点距離 3048mm の MEADE 社製シュミットカセグレン望遠鏡を使用する。第2回気球実験のメインターゲットは木星である。2つの CCD カメラを用いて、それぞれ紫外 (380nm ~ 420nm) および近赤外 (880nm ~ 920nm) で撮像する。

金星をターゲットとして 2009年6月3日に北海道大樹町において第1回気球実験が行われた。しかし、搭載コンピューターの不具合により、気球搭載望遠鏡システムの性能確認ができなかった。この結果を踏まえて気球搭載望遠鏡システムの性能確認と金星観測を目的として、2012年8月に再び大樹町において気球実験を行う予定である。

キーワード: 気球, 望遠鏡, 大気, 惑星, 金星, 成層圏

Keywords: Balloon, Telescope, Atmosphere, Planet, Venus, Stratosphere

## 惑星科学研究センター (CPS) における知見アーカイブ

### A repository for knowledge of planetary science serving by Center for Planetary Science (CPS)

杉山 耕一郎<sup>1\*</sup>, 鈴木 絢子<sup>1</sup>, 中村 友昭<sup>2</sup>, 真鍋 翔<sup>2</sup>, 堺 正太郎<sup>3</sup>, 鶴巻 亮一<sup>3</sup>, 辰巳 信平<sup>2</sup>, 中岡 礼奈<sup>2</sup>, 加藤 則行<sup>2</sup>, 谷 伊織<sup>2</sup>, 梅本 隆史<sup>3</sup>, 押川 智美<sup>3</sup>, 惑星科学研究センター<sup>1</sup>

SUGIYAMA, Ko-ichiro<sup>1\*</sup>, SUZUKI, Ayako<sup>1</sup>, Tomoaki Nakamura<sup>2</sup>, Sho MANABE<sup>2</sup>, SAKAI, Shotaro<sup>3</sup>, Ryoichi Tsurumaki<sup>3</sup>, Shimpei Tatsumi<sup>2</sup>, NAKAOKA, Reina<sup>2</sup>, Noriyuki Katoh<sup>2</sup>, Iori Tani<sup>2</sup>, UMEMOTO, Takafumi<sup>3</sup>, OSHIKAWA, Tomomi<sup>3</sup>, Center for Planetary Science<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 惑星科学研究センター, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 北海道大学大学院理学院宇宙学専攻

<sup>1</sup>Center for Planetary Science, <sup>2</sup>Graduate school of Science, Kobe University, <sup>3</sup>Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

惑星科学研究センター (CPS) ではサービスの1つとして知見アーカイブ, すなわち情報基盤の活用による図書館, の提供を行っている。セミナーや研究会について講義をビデオ収録し, それを講義資料と合わせてインターネット上に公開する。これを受講者の復習や未受講者の学習に供することにより, 大学の枠を超えた教育研究資源を提供し全国の大学院教育全体のレベルアップに資する。こうした知見情報の集積と整合化を通して, 惑星系の起源・進化・多様性の全体を俯瞰する活動の促進を目指している。

上記を推進するために, セミナーや研究会の収録するための機器整備と作業手順の整理, および公開システム的设计・開発を行ってきた。作業手順や公開システムが整理されたことにより, 毎週一回行われる CPS セミナーの講義ビデオと講義資料がその日のうちに公開されるようになり, それ以外の CPS 主催・共催のセミナーや研究会も基本的に全てコンテンツ化されている。2001年から11年間におよび1100本以上の講義が資料と共に閲覧することができるようになっており, 講演者やタイトル等で検索可能である。

本講演では CPS における知見アーカイブ事業を紹介し, その特徴を解説する。

参考: <https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/>

キーワード: 知見アーカイブ

Keywords: A repository for knowledge of planetary science

## 原始惑星系円盤におけるダストの成長・内部密度進化：円盤オパシティに対する影響

## Growth and porosity evolution of dust aggregates in protoplanetary disks: Effects on the disk opacity

奥住 聡<sup>1\*</sup>, 田中 秀和<sup>2</sup>

OKUZUMI, Satoshi<sup>1\*</sup>, TANAKA, Hidekazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学, <sup>2</sup>北海道大学

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Hokkaido University

ダストは原始惑星系円盤のオパシティを決定づける存在である。オパシティはダストの成長・円盤内移動によって大きく変化するため、ダストの進化を理論的におさえることは惑星形成過程の解明のみならず円盤観測データの解釈においても重要である。逆に、ダスト成長モデルの違いがオパシティにどのように反映されるかがわかれば、円盤観測からダスト成長/微惑星形成シナリオの検証・制限を行うことも可能になる。特に、ALMAの本格運用を通じてダストのミリ波・サブミリ波連続放射の空間構造が詳細に明らかになることが期待されており、これに備えてダストの進化と円盤ミリ波放射スペクトルの進化の対応関係を理論的に明らかにしておくことが非常に重要である。

本研究では、ダスト成長モデルの観測による検証を視野に、ダストの成長・内部構造進化が円盤オパシティに与える影響を調べた。空隙率進化を考慮したダスト成長シミュレーション (Okuzumi, Tanaka, Kobayashi, & Wada, 2012) から得られるダストのサイズ・空隙率・空間分布に対して、空隙を含むダストに対する有効散乱理論である Maxwell-Garnett 理論を適用し、ミリ波帯オパシティの空間分布を計算した。その結果、従来の空隙率ゼロのダストモデルはオパシティ冪指数のピークが中心星から数十 AU から 100AU 程度の領域に出現することを予言する一方、我々の新モデルはピークの不出現を予言することを明らかにした。この値は光学的に薄い円盤の観測から直測定可能であるため、この空間分布を ALMA によって測定すれば、ダスト成長モデルの検証が実現できる可能性がある。

キーワード: ダスト, 成長, 空隙率, オパシティ, 原始惑星系円盤

Keywords: dust, coagulation, porosity, opacity, protoplanetary disk

## 微惑星円盤内での微惑星連星形成 Binary formation in Planetesimal Disks

台坂 淳子<sup>1\*</sup>, 小久保 英一郎<sup>1</sup>  
DAISAKA, Junko<sup>1\*</sup>, KOKUBO, Eiichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台

<sup>1</sup>National Observatory of Japan

太陽系の外側、カイパーベルトの領域では数十個の微惑星連星が発見されている。この連星は現在まで発見されている海王星以遠天体の1割弱を占めている。しかし、広く認められている惑星集積理論では連星形成は考慮されていない。微惑星連星形成を説明するモデルとしては、3体遭遇やexchangeモデル、また、CAC(Chaos Assisted Capture、準安定な2体に複数回3体目が遭遇し安定化する)モデルなどが提唱されている。

円盤の外側での計算のため長い積分時間を要することと、粒子数を多く必要としていることにより、通常の計算機では計算時間がかかりすぎるため、過去の計算では大規模なN体計算は行われていない。

本研究では、GRAPE-DRを用い、N体計算を行った。軌道長半径を固定し、物理半径を変化させた計算、同じく軌道長半径を固定し、面密度を変化させた計算、そして面密度を林モデルに合わせ軌道長半径を変化させた計算の3種類の計算を行った。それぞれ4-6の計算を走らせ、連星の形成率、その集積に与える影響を調べた。その結果、円盤の外側ほど連星は形成しやすいことが確認でき、微惑星連星形成を考慮すると、集積率が従来の値の数倍になる可能性があることがわかった。

微惑星円盤内の微惑星には質量分布をもたせ、パラメータサーチを行った。連星形成の、面盤面密度や微惑星の質量、ランダム速度などの依存性を検証した。また、形成された微惑星連星の離心率や軌道傾斜角の観測値との比較も行った。

キーワード: 微惑星連星, 海王星以遠天体, 微惑星集積

Keywords: planetesimal binary, TNO, accretion

## 微惑星弧状衝撃波における H<sub>2</sub> の解離・再結合の効果 Effects of H<sub>2</sub> Dissociation and Recombination on Planetesimal Bow Shocks

山崎 布美香<sup>1\*</sup>, 中本 泰史<sup>1</sup>  
YAMAZAKI, Fumika<sup>1\*</sup>, NAKAMOTO, Taishi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

コンドリュールは、多くの隕石に含まれている mm サイズの珪酸塩粒子で、加熱、溶融を経験したことが観察から分かっているが、加熱メカニズムについての詳細は未だ明らかになっていない。この加熱メカニズムの一説として、衝撃波加熱モデルがある。これは、コンドリュールの前駆体であるダスト粒子が衝撃波面に飛び込んでくると、ガスとの摩擦により加熱を受け、融点に達するというモデルである。このアイデアに基づいて、Ciesla et al. (2004)、Nakajima et al. (2012, in preparation) では、微惑星まわりの弧状衝撃波の流体シミュレーションを行い、弧状衝撃波によるコンドリュール形成の可能性を検証した。

彼らは、ガスは断熱であり水素分子で構成されていると仮定したため、水素分子の解離・再結合は考慮していなかった。しかし、Nakajima et al. (2012, in preparation) の計算結果では衝撃波後面で温度が 4000 K 以上にも達しており、実際には水素分子の解離が起こることが想定される。解離が起こればガスの温度も変わるはずであるので、微惑星まわりの弧状衝撃波を理解するには、水素分子の解離・再結合を考慮した計算が必要になってくる。

本研究では、H<sub>2</sub> の解離平衡計算コードを開発して ZEUS-2D コードに加え、微惑星のまわりで H<sub>2</sub> の解離・再結合が入った流体計算を行った。その結果、微惑星の前面で、断熱の計算結果よりも温度は低く、密度は高くなった。これは解離が起きたためであると理解できる。さらに再結合が起きる領域では、断熱の結果よりも温度が高くなることが分かった。また、衝撃波面の形もわずかに変化していた。

これらの結果から、H<sub>2</sub> の解離・再結合はコンドリュールの前駆体であるダスト粒子の加熱にも影響してくることが予想される。これは、ガス摩擦加熱がガス密度に大きく依存しているためである。したがって将来的に、H<sub>2</sub> の解離・再結合を考えた上でのダストの軌跡、熱履歴を調べる必要がある。

キーワード: 弧状衝撃波, 数値流体計算, H<sub>2</sub> の解離, コンドリュール

Keywords: bowshock, numerical hydrodynamics simulation, H<sub>2</sub> dissociation, chondrule

## 巨大惑星による微惑星一時捕獲過程 Temporary capture of planetesimals by a giant planet

末次 竜<sup>1\*</sup>, 大槻 圭史<sup>2</sup>

SUETSUGU, Ryo<sup>1\*</sup>, OHTSUKI, Keiji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ., <sup>2</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ./CPS

惑星近傍を微惑星が通過すると、微惑星は惑星と重力相互作用し、近接散乱されて遠方へとばされる。しかし稀に惑星の重力に微惑星が捕獲され、惑星を中心にしばらく公転して近傍にとどまった後、遠方へ飛ばされてゆくことがある。この現象を一時捕獲という。近年、この一時捕獲が短周期彗星の力学進化、不規則衛星の形成といった惑星系形成の重要な役割を担っている可能性が示唆されている。

我々はすでに微惑星が初期に離心率をもつ場合の、微惑星の一時捕獲軌道や、一時捕獲の頻度などを詳細に調べた (Suetsugu et al. 2011)。その結果、一時捕獲軌道は離心率とエネルギーによって四つの型に分類でき、これらの軌道の形や公転方向は微惑星の離心率とエネルギーに依存することがわかった。初期の離心率が小さいと惑星の重力圏付近を逆行で公転するが、離心率が大きいと重力圏の外で逆行に公転する一時捕獲軌道になる。一方、順行の長時間の一時捕獲は特定の離心率でエネルギーが非常に低い場合にしか起こらないことがわかった。一時捕獲が起こる頻度は離心率の増加とともに増加し続けることが示され、特にランダム速度卓越領域での増加はシア卓越領域と比べると、急激に増加する。これは上述の一時捕獲の軌道の型が離心率が大きい場合と小さい場合で異なるからである。順行の一時捕獲の頻度は長時間の一時捕獲が起こる離心率でピークをもつことがわかった。

Suetsugu et al. (2011) では微惑星と惑星の質量が中心星に比べ十分小さいと仮定したヒル近似下で三体問題軌道計算を行った。惑星の質量が小さい場合はこの近似で求めた結果が良く合うが、質量が木星程度ある大きい惑星の場合には曲率の効果があるため結果が異なる可能性がある。

そこで今回、円制限三体問題下で三体問題軌道計算を行い、微惑星の一時捕獲が惑星の質量にどのように依存するのかを調べた。これらの結果と、Suetsugu et al. (2011) で行った局所座標系での計算結果の比較について報告する予定である。

キーワード: 惑星, 衛星

Keywords: planets, satellites

## 周惑星円盤による微惑星捕獲 Capture of planetesimals by circumplanetary disks

藤田 哲也<sup>1\*</sup>, 大槻 圭史<sup>2</sup>, 谷川 享行<sup>3</sup>

FUJITA, Tetsuya<sup>1\*</sup>, OHTSUKI, Keiji<sup>2</sup>, TANIGAWA, Takayuki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 北海道大学低温科学研究所

<sup>1</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ., <sup>2</sup>Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ./CPS, <sup>3</sup>Low Temp. Sci. Inst., Hokkaido Univ./CPS

惑星の形成過程において、惑星はその重力により原始惑星系円盤からガスや固体微粒子を得て、周惑星円盤を形成する。ガリレオ衛星のような巨大惑星の規則衛星は、順行の円に近い軌道を持っているため、周惑星円盤の中で固体粒子が衝突合体して形成したと考えられている。大量のガスと固体粒子が周惑星円盤を通して成長途中の巨大惑星に供給されるため、周惑星円盤中の固体粒子の量は、衛星だけでなく、巨大惑星の形成や構成する重元素の起源に対しても重要な役割を果たす。円盤に供給される固体微粒子がメートルサイズ以下であると仮定すると、ガス抵抗力を強く受けるためにガスとともにやってくると考えられる。一方、大きい微惑星はそのランダム速度に依存した軌道で接近し、ガス抵抗を受けることで周惑星円盤に捕獲されることが考えられる。我々は巨大惑星に接近する微惑星の軌道進化を計算し、周惑星円盤への降着確率を調べた。

惑星が球対称な大気を持つ場合については、Tanigawa & Ohtsuki(2010) で研究されている。我々はそれと同様の手法で、円盤の場合について研究を行った。中心星、惑星、微惑星の3体を考え、惑星の周りには周惑星円盤を仮定する。円盤は、惑星を原点とする局所直行座標系において円運動しているとする。円盤の赤道面に対する円筒座標系において、ガス密度は動径方向に距離のあるべきで減少し、赤道面に垂直な方向には指数関数的に減少する。この構造により、円盤はケプラー速度よりもわずかに遅い速度で回転する。微惑星は Hill 圏内でのみガス抵抗を受けると仮定する。ガス抵抗を含んだ Hill 方程式を8次のルンゲクッタ法で解き、様々な軌道要素の微惑星について軌道進化を調べた。降着として、(i) エネルギーの減少に関係なく、惑星に衝突する場合、(ii) 円盤を通過することでガス抵抗を受け、エネルギーが十分減少し捕獲される場合の2種類を考える。衝突については、ランダム速度が大きい場合の衝突確率と衝突頻度が解析的に得られている。また数値計算もすでに行われているので、我々は主に(ii)の場合について計算を行った。

初めに、2次元の場合について解析を行った。円盤を通過する微惑星はガス抵抗を受けるため、エネルギーが散逸する。ガスは円運動しているために、ガスに対して順行か逆行かによりエネルギー散逸の値が違ってくるのが分かった。逆行の場合は、順行に比べてガスに対する相対速度が大きいため、強くガス抵抗を受ける。したがって、エネルギー散逸は逆行の方が大きい。また、ガス抵抗によってエネルギーが大きく散逸されるのは、ガス密度が大きい円盤内側の領域を通過したときであるため、微惑星の惑星に対する最近距離を考えることで、エネルギー散逸を見積もることができる。ランダム速度が小さい場合と大きい場合の2つの極限について、順行と逆行それぞれの解析解を得て、数値計算はそれに概ね一致することが分かった。

これを用いて、捕獲について考える。Hill 圏内で微惑星の力学的エネルギーが0以下となれば、微惑星は周惑星円盤によって捕獲されたとみなせる。エネルギー散逸量が無限遠での微惑星のエネルギーの値と等しくなる時の惑星からの距離を、捕獲半径と置く。これについても、2次元の場合はエネルギー散逸から解析解を得ることができる。さらに、ランダム速度が大きい場合については、捕獲半径と衝突確率から捕獲確率も解析的に得られる。実際に、捕獲確率の計算結果は解析解に一致することが分かった。捕獲頻度については、捕獲確率を解析的に積分することが困難であるため、数値積分と解析解との比較を行った。

3次元の場合は、微惑星が円盤をどのように通過するかは軌道傾斜角や近点経度によるため、エネルギー散逸の見積もりはさらに複雑になる。したがって、この場合は解析解を得ることが困難であるため、主に数値計算の結果に対して議論を行う予定である。

キーワード: 周惑星円盤, ガス抵抗, 衛星

Keywords: circumplanetary disk, gas drag, satellite

## 周惑星円盤の形成と進化における磁気乱流の効果 The Effect of Magnetic Turbulence on the Formation and Evolution of Circumplanetary Disks

藤井 悠里<sup>1\*</sup>, 奥住 聡<sup>1</sup>, 谷川 享行<sup>2</sup>, 犬塚 修一郎<sup>1</sup>

FUJII, Yuri<sup>1\*</sup>, OKUZUMI, Satoshi<sup>1</sup>, TANIGAWA, Takayuki<sup>2</sup>, Inutsuka Shu-ichiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup> 惑星科学研究センター

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>Center for Planetary Science

本研究では周惑星円盤の降着進化を理解することを目指し、周惑星円盤において磁気乱流が円盤のガス降着に重要であるかどうかを調べた。

母惑星の赤道面に公転軌道面をもち、ほぼ円軌道で回転している衛星は規則衛星と呼ばれる。周惑星円盤はこの規則衛星の形成現場であると考えられており、衛星形成を理解するためには、周惑星円盤進化の理解が不可欠である。しかし、周惑星円盤の降着メカニズムは詳しく分かっていないため、円盤ガスの降着率や面密度もよく分かっていないのが現状である。円盤ガスの降着メカニズムとしては、磁気回転不安定性 (Magnetorotational Instability: MRI) が最も有力であると考えられている。しかし、MRI が起こる領域の大きさは仮定しているモデルに依存すると考えられる。

モデルによる不定性をなくすためには、原始惑星系円盤から周惑星円盤への流入質量フラックスを調べ、これを用いて周惑星円盤の面密度分布を求めることが望ましい。周惑星円盤への流入質量フラックスは Tanigawa et al.(2012) によって詳細な解析が行われた。本研究ではこの質量フラックスを用いて円盤の拡散方程式を解き、周惑星円盤の面密度分布を求めた。そして、Fujii et al.(2011) で開発した計算法を用いて円盤の電離度を調べ、MRI が起こるかどうかを見積もった。その結果、周惑星円盤の降着初期には MRI 起源の乱流は発生しないことが分かった。

キーワード: 周惑星円盤, 磁気乱流, 衛星形成

Keywords: circumplanetary disks, magnetic turbulence, satellite formation

## 原始惑星の合体条件 :組成とサイズの依存性について MERGING CRITERIA FOR GIANT IMPACTS OF PROTOPLANETS : Dependence of Their Composition and Size

藤田 智明<sup>1\*</sup>, 玄田 英典<sup>1</sup>, 阿部 豊<sup>1</sup>

FUJITA, Tomoaki<sup>1\*</sup>, GENDA, Hidenori<sup>1</sup>, ABE, Yutaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup> Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

地球型惑星形成の最終段階では、火星サイズの原始惑星同士の衝突(巨大天体衝突)が頻繁に起こったと考えられている。巨大天体衝突は、惑星系の最終的な惑星の個数やそれぞれの大きさ、更には月の形成や水星の巨大金属コアの形成などに影響を与えることがわかっている(例えば Kokubo and Genda 2010)。したがって原始惑星同士の衝突現象の物理を詳細に知ることは、太陽系の地球型惑星の初期進化や惑星の特徴を知る上で重要である。また、近年、太陽系外の惑星が多数発見されるようになり、地球の数倍の質量を持つ惑星(super-Earths)や、大部分がH<sub>2</sub>Oでできているような惑星が、恒星の近くで多数発見されている。このような惑星の形成の最終段階においても惑星サイズ同士の衝突が頻繁に起こったと考えられている(Ogihara and Ida 2009)。

Genda et al. (2012)では、太陽系の地球型惑星形成の最終段階で起こる巨大天体衝突に注目し、鉄と岩石からなる火星サイズから地球サイズの原始惑星同士の衝突シミュレーションを様々な衝突パラメータで行い、原始惑星の合体条件を詳細に調べた。その結果、太陽系で起こったとされる巨大天体衝突の約半数は、実は、合体しない衝突であることが明らかになった。

しかしながら、Genda et al. (2012)で求めた合体条件は、系外惑星として発見されているsuper-EarthsやH<sub>2</sub>Oを主成分とする惑星の形成には適用できない。そこで、本研究では、H<sub>2</sub>Oを主成分とする原始惑星やサイズが地球よりも大きいsuper-Earths同士の天体衝突を様々な衝突パラメータでシミュレーションを行い、合体条件を求め、Genda et al. (2012)の結果と比較する。

計算手法は粒子法的一种であるSmoothed Particle Hydrodynamic法を用いており、惑星の質量、惑星の組成、衝突速度、衝突角度、等のパラメータを変化させ、衝突計算を行った。具体的には、惑星の質量は火星のサイズから地球質量の10倍サイズまで、惑星の組成は氷、岩石、鉄の3種、衝突角度は正面衝突に近い角度からぎりぎりかすめる程度の角度までをそれぞれ扱い、衝突後の2惑星が最終的に合体する場合とそのまま離れていく場合の境界となる「境界衝突速度」を決定することで、合体条件を求めた。

その結果、火星質量サイズで、コアが岩石かつマントルが氷の惑星同士を衝突させたとき、その合体条件はGenda et al. (2012)の結果と一致した。同様に、岩石のみでできた火星質量サイズの惑星同士、氷のみでできた火星質量サイズの惑星同士の衝突も、それぞれGenda et al. (2012)の結果と一致した。このことから、原始惑星の合体条件は、そのサイズが地球サイズ以下であれば、惑星の組成には依存しない、ということがわかった。

一方、組成の異なる2つの原始惑星(例えば、氷惑星と岩石惑星)を衝突させた計算も行ったが、この場合は、Genda et al. (2012)の結果とは大きく異なり、より遅い速度でしか合体しないという結果が得られた。衝突シミュレーションの結果を見ると、密度の高い原始惑星が密度の低い原始惑星の内部を突き抜けるようなことが起こっており、このことが、原始惑星同士を合体させにくくしている可能性がある。

また、地球質量の10倍の惑星(鉄と岩石からなる)同士を衝突させたところ、合体条件は、先行研究と大部分は一致したが、正面衝突に近い高速での衝突では合体しにくかった。このことから、サイズの大きな惑星が高速で衝突する際は、合体条件が厳しくなることがわかった。結果が異なった理由として、岩石の蒸発があげられる。火星サイズや地球サイズの天体衝突では大規模に岩石の蒸発は起こらないが、地球の10倍程度の天体衝突では、大規模に岩石が蒸発することがシミュレーションからわかった。このような大規模な岩石の蒸発によって天体同士の合体が阻害された可能性がある。

### 引用文献

Genda, H., Kokubo, E., and Ida, S., Merging Criteria for Giant Impacts of Protoplanets, *ApJ* 744, 137, 2012.

Kokubo, E., and Genda, H., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets Under a Realistic Accretion Condition, *ApJ* 714, L21-L25, 2010.

Ogihara, M., Ida, S., N-Body Simulations of Planetary Accretion Around M Dwarf Stars, *ApJ* 699, 824-838, 2009.

キーワード: 巨大天体衝突, 系外惑星, 合体条件, 原始惑星

Keywords: giant impacts, extrasolar planets, merging criteria, protoplanets

## 降着円盤内の惑星移動と地球型惑星の形成について Planetary migration in accretion disks and formation of Earth-sized planets

山田 耕<sup>1\*</sup>, 稲葉知士<sup>2</sup>  
YAMADA, Kou<sup>1\*</sup>, Satoshi Inaba<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学惑星科学研究センター, <sup>2</sup> 早稲田大学国際教養学部

<sup>1</sup>Center for Protoplanetary Science, Kobe University, <sup>2</sup>School of International Liberal Studies, Waseda University

Protoplanets form in a disk surrounding a young star. A low-mass protoplanet interacts with a gas disk gravitationally, which leads to a decrease in its semi-major axis. This is called the Type I migration of a planet. It is believed that the Type I migration is one of the most important physical processes in planetary formation. It is caused by the torques acting on a protoplanet by a disk. Recently, it was shown that a protoplanet is possibly trapped in a disk. Hasegawa & Pudritz (2011, MNRAS) comprehensively examined various mechanisms to halt the planet migration in a disk. They showed that a protoplanet might be trapped at the ice line, inside of which all the ice is evaporated and solid particles are composed of rocks and metals. The different opacity laws are used inside and outside of the ice line, resulting in a steep and shallow temperature distributions in the inner and outer regions, respectively. The large corotation torque acting on a protoplanet due to the steep temperature distribution suppresses the negative Lindblad torque in an inner region. On the other hand, the corotation torque on a protoplanet is too weak to cancel the negative Lindblad torque in an outer region. A protoplanet inside and outside of the ice line moves toward the ice line and is expected to accumulate at the ice line. However, it was shown that density waves can be altered by a thermal structure of a disk (e.g., Yamada & Inaba, 2011, MNRAS). It is not clear if protoplanets accumulate at the ice line even when we include dissipation processes in a disk. We make global two-dimensional hydrodynamic simulations and systematically examine the total torque acting on a protoplanet by an optically thick accretion disk, taking dissipation processes in a disk into account.

We study the type I migration of a protoplanet in disks with various opacities. We find that the total torque acting on a protoplanet by a disk strongly depends on opacity of the disk. We adopt a realistic opacity model and find that the sign of the total torque could change around the ice line of a disk. It is found that the total torque becomes zero in the region inside of the ice line if the timescale for the viscosity is nearly equivalent to the turnover time in the horseshoe orbit. This means that the accretion rate of the disk needs to be smaller than  $2 \times 10^{-8}$  solar mass/yr for the protoplanet to move outward in the optically thick accretion disk. Furthermore, using the N-body simulations, we investigate whether the accumulation of protoplanets around the ice line can accelerate further growth of protoplanets or not.

キーワード: 惑星系, 惑星移動, 地球型惑星, タイプ I 移動, 密度波

Keywords: planetary system, planetary migration, terrestrial planet, type I migration, density wave

## 紫外線と水による鉄カンラン石の変化 Change in fayalites with ultraviolet rays and water

小森 信男<sup>1\*</sup>  
KOMORI, Nobuo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 大田区立南六郷中学校  
<sup>1</sup>Minamirokugo junior high school

筆者は、紫外線と水による岩石の風化変質を実験的に調べる継続研究を中学校科学部の生徒研究として行っている。火星上に酸化鉄が多い原因の一つを明らかにするという目的のためである。

今回は、精製水に浸した八丈島産鉄カンラン石に紫外線を照射しその変化を調べた。火星上には、玄武岩が多く、この中には鉄カンラン石がおそらく存在する。また過去の火星上には水が存在していたと推定されている。そのため過去の火星においては、紫外線と水が、岩石を変質させる要因の一つになったと考える。

この研究では、精製水を満たした石英試験管に10g程の鉄カンラン石を入れた。鉄カンラン石は、3～5mm程度の粒状であり、暗緑色を呈している。そして254nmをピークとする紫外線を照射した。

対照実験として、同じ条件で紫外線を照射しない実験も行った。紫外線は3ヶ月照射した。なお、照射開始時の照度は40W/m<sup>2</sup>程である。

紫外線を照射したのものにも照射しないのものにも、薄褐色の0.1mm以下の微粒子が多数生じた。この微粒子の数は、紫外線を照射したものの方がずっと多い。この微粒子は、EPMAによる分析から、主に非晶質の水酸化鉄と考えられる。

以上のことから、紫外線は、水に浸した鉄カンラン石の酸化を促進すると考えられる。火星表面には、過去において水が存在していたことが、明らかになりつつある。火星表面においても紫外線と水によって、岩石中の鉄カンラン石の酸化が促進された可能性はあると考える。

キーワード: 紫外線, 水, 鉄カンラン石, 水酸化鉄, 火星  
Keywords: ultraviolet rays, water, fayalite, iron(III) oxide hydroxide., Mars



## 変形実験から考えられる金星と地球のレオロジー層構造とテクトニクスの相違 Difference on tectonics and rheological structure of Venus and Earth inferred from deformation experiments

東 真太郎<sup>1\*</sup>, 片山 郁夫<sup>1</sup>, 中久喜 伴益<sup>1</sup>

AZUMA, Shintaro<sup>1\*</sup>, KATAYAMA, Ikuo<sup>1</sup>, NAKAKUKI, Tomoeki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences System, Hiroshima university

これまで金星は密度、質量、体積、太陽の距離などから地球とよく似た地球型惑星だと考えられていた (Taylor and McLennan, 2008)。しかし現在では、Magellan mission によって、金星は温度、水、大気、地形、そして生命において地球とはかなり異なり、さらにプレートテクトニクスが働いていないことが明らかにされ、同じ地球型惑星でも金星は全く違う進化を辿ってきたと考えられている (e.g., Turcotte et al., 1999)。プレートテクトニクスは地球において最も重要な物質循環の1つである。そのため、このプレートテクトニクスの欠如が地球と金星の違いを生み出した1つの要因であると推察される。プレートテクトニクスを考える上で重要なものとして、惑星内部の強度や変形を考察するレオロジーが挙げられる。なぜなら岩石のレオロジーが惑星内部の強度や変形メカニズムを支配し、テクトニクスに大きな影響を与えるからである。先行研究では、金星のレオロジー層構造やテクトニクスは地殻を構成していると考えられるダイアベースの流動則を室内実験から求め、金星内部の温度・圧力に外挿することによって考察されてきた (e.g., Mackwell et al., 1998)。彼らによると金星の下部地殻と上部マントルには大きい強度コントラストが期待され、デカップリングを起こしている可能性が示唆されている。本研究では流動則からの外挿ではなく、改良型 Griggs で斜長石 (下部地殻の主要構成鉱物) とオリビン (上部地殻の主要構成鉱物) を用いて2相系で変形実験を行い、直接強度比を決定しようと試みた。実験条件は  $T=400-1000$  ,  $P=1\text{GPa}$  である。また金星の表面温度  $T=470$  であることから、かなりドライな惑星であると考えられ (e.g., Kaula 1990)、地球との違いも評価するために wet と dry 両方の条件で実験を行った。wet 条件の場合、オリビンと斜長石の相対強度が温度に敏感で、 $600$  を境界に逆転することが明らかになった (Azuma et al., 2010)。これは転位クリーブの外挿からでは起こりえないこと、さらに実験中におけるオリビンの温度と応力をプロットすると、power-law タイプの流動則から明らかに外れることから、オリビンの変形メカニズムが低温では Peierls メカニズムが支配的になっていることが示唆される。一方 dry 条件では、全ての温度条件でオリビンが斜長石よりもかなり強度が大きいことが確認された。この dry 実験より得られた強度比から金星内部のレオロジー構造を推察し、さらにプレートテクトニクスにより沈み込んでいる地球の海洋リソスフェアとの違いも考察した。まず地球の場合、海洋リソスフェアのレオロジー層構造は Byerlee 's law と power-law creep によってよく制約されている (e.g., Kohlstedt et al., 1995)。それによると、海洋リソスフェアのモホ面はまだ脆性破壊領域であり、地殻と上部マントルの間に強度のコントラストは無いと考えられる。そのため、地殻と上部マントルはよくカップリングし、一緒に地球深部へと沈み込むことができる。一方、金星のリソスフェアのレオロジー層構造を推察するとき、地殻の厚さを考えなければならないが、現在正確な金星の地殻の厚さは分かっていない。今回、地殻の厚さを  $7\text{ km}$  と仮定した。本研究の実験結果から金星のレオロジー層構造を考えると、下部地殻と上部マントルの間に大きい強度コントラストが期待できる結果となった。下部地殻と上部マントルの強度コントラストが大きいとデカップリングを起こす可能性が考えられる。この弱い下部地殻によって起こるデカップリングが強い上部マントルの変形から上部地殻を切り離し、地殻の水平移動を妨げていることが期待される。さらに強度の小さい物質は強度の大きい物質に沈み込むことは困難であることが予想されるため、リソスフェアの地殻の部分はマントル中に沈み込むことができない。以上のことから、この地殻とマントルのデカップリングが金星のプレートテクトニクスを阻止した1つの要因ではないのかと考察される。現在、この実験結果と金星のレオロジー層構造のモデルを用いて数値シミュレーションを行い、どのようなテクトニクスが起こるか検証している。その結果も併せて報告する予定である。

キーワード: 斜長石, オリビン, 強度比, 金星, レオロジー, プレートテクトニクス

Keywords: plagioclase, olivine, strength contrast, venus, rheology, plate tectonics

## ユゴニオ曲線に沿った高精度な半解析的状态方程式 An highly accurate semi-analytical EOS along Hugoniot curves

杉田 精司<sup>1\*</sup>, 黒澤 耕介<sup>2</sup>, 門野 敏彦<sup>3</sup>, 佐野 孝好<sup>3</sup>

SUGITA, Seiji<sup>1\*</sup>, KUROSAWA, Kosuke<sup>2</sup>, KADONO, Toshihiko<sup>3</sup>, SANO, Takayoshi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 大阪大学

<sup>1</sup>University of Tokyo, <sup>2</sup>JAXA/ISAS, <sup>3</sup>Osaka University

Recent rapid development of shock compression technology has revealed many exciting properties of geologic materials under highly shock-compressed states. A number of very sophisticated thermodynamics-based equations of state (EOS), such as SESAME and M-ANEOS, have been developed. These numerical EOS codes, however, use many model parameters to reproduce experimental data. Thus, it is difficult to find the optimum model parameters uniquely, requiring extensive experiments covering a wide range of thermodynamic conditions.

Such complex EOS's have widely been considered necessary because physics behind the EOS of highly shock-compressed geologic materials is very complicated. In fact, recent experimental result using high-power laser have revealed further intricate properties of silicates under high compression conditions, such as large departure of isochoric specific heat  $C_v$  from Dulong-Petit limit due to molecular dissociation and ionization. In order to incorporate such complex properties into a thermodynamics-based EOS properly, physics behind these materials needs to model well.

Such thorough understanding of material properties is essential for building a versatile EOS for hydro-code calculations. However, many planetary applications requires only thermodynamic properties along Hugoniot compression curve. For example, estimation of the fractions impact melt/vapor and the final molecular composition of impact vapor plume requires only the entropy gain due to initial impact shock. In this study, we propose a semi-analytical formula of on-Hugoniot EOS derived from the differential form of Rankine-Hugoniot equation and compare it with conventional EOS's and experimental data.

Most condensed matter under shock compression is known to follow the linear velocity relation between particle velocity  $U_p$  and shock velocity  $U_s$ :

$$U_s = C_0 + s U_p, (1)$$

where  $C_0$ , and  $s$  are bulk sound velocity and a constant, respectively. This relation is known to hold for a variety of materials over a wide range of impact velocity. Despite the wide applicability of this relation, most EOS's do not take advantage of this relation. Besides the  $U_p$ - $U_s$  relation (1), we use only general thermodynamic relations, the differential form of Rankine-Hugoniot relations, and Gruneisen EOS. From these relations, we obtain ordinary differential equations for temperature  $T$  and entropy  $S$ .

For extremely high-pressure shocks,  $C_v$  is not approximated by a constant value well; it may become well above Dulong-Petit limit. The effect of specific heats can be calculated easily with our new EOS. Although there is good agreement among different EOS's at relatively low shock pressures ( $\sim 150$  GPa), different EOS's yield significantly different results at higher shock pressures (several hundred GPa). This scatter results from the fact that there are not many experimental data available in the higher shock pressure range. Under such conditions, our EOS is useful because it does not require many data points to make accurate predictions along a Hugoniot curve. It can also be used as an anchor for the more sophisticated EOS for Hugoniot conditions.

Furthermore, because  $C_v$  is a very important property to characterize condensed matter, the capability to derive  $C_v$  from temperature data is very useful. A couple of examples of comparisons between our recent experimental data and our EOS predictions are obtained. The quartz data at 150 GPa requires  $C_v$  significantly larger than  $3R$ , but the shock temperatures of diopside at  $\sim 300$  GPa is consistent with the Dulong-Petit value. Such difference in  $C_v$  among different silicates is of great importance in planetary science.

キーワード: 天体衝突, 高圧状態方程式, ユゴニオ, 高速度衝突

Keywords: shock compression, High pressure EOS, hypervelocity impact

## 衝突閃光の岩小天体と氷小天体による違い How impact flashes differ between rocky impactors and icy impactors

柳澤 正久<sup>1\*</sup>  
YANAGISAWA, Masahisa<sup>1\*</sup>

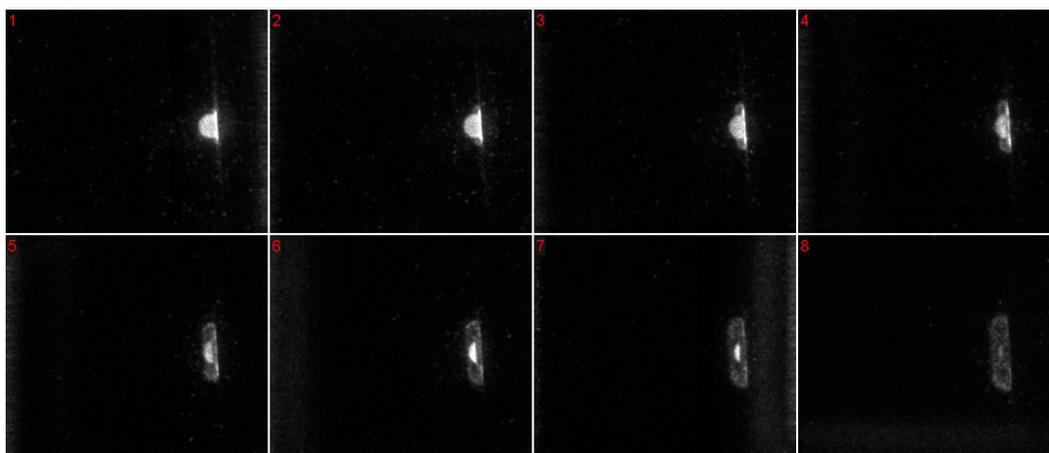
<sup>1</sup> 電気通信大学  
<sup>1</sup> Univ. Electro-Communications

弾丸が数 km/s という高速度で衝突すると閃光を発する(衝突閃光)。我々は ISAS/JAXA の二段式軽ガス銃を用いて、ナイロン 66 の球形弾丸(直径 7mm) をナイロン 66 のブロックに秒速 7km で衝突させ、現象を超高速度カメラ(nac ULTRA Neo)で撮影するとともに、衝突閃光をフォトダイオードで計測した。フォトダイオードから求めた光度曲線には、弾丸が貫入する時間幅、すなわち、弾丸直径を速度で割った時間幅(約 1 マイクロ秒)のパルスが存在する。この間、超高速度カメラは、ブロックに陥入しつつある弾丸が明るく光っている様子を捉えている(図を参照、shot1545)。図の左から右、そして上段から下段への 8 枚の画像は、50ns 毎に撮影されたものである(露光時間も 50ns)。球形弾丸は左から 7km/s で飛来し衝突した。弾丸と標的の衝突点付近が光り、その後、光が弱っていく様子が捉えられている。衝撃波圧縮による高温高圧部からの光が半透明のナイロン弾丸および標的を通して放射されていると考えられる。

実験結果を太陽系内での衝突現象に適用すると以下のことが言える。このパルス光は、衝突体である小天体も標的となる惑星表面も共に不透明な岩石質の場合には観測されないだろう。一方、小天体が氷でできており半透明な場合には観測される。惑星表面が氷の場合にも観測されるだろう。将来、自然界の衝突現象の超高速度撮影が可能になれば、パルス光の有無から衝突する小天体が岩石質か氷かの判別が付けられよう(惑星表面が岩石質か氷かは分かっているとして)。小惑星や木星の衛星に衝突する小天体が岩石質と氷とでどのような数割合になっているかという問題への一つの観測的研究手段となることも期待できる。

なお、本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部スペースプラズマ共同研究設備の支援を得て行われた。また、超高速度カメラ nac ULTRA Neo による撮影は株式会社ナックの支援を得て行われた。

キーワード: 高速度衝突, 衝突閃光, 太陽系小天体  
Keywords: high velocity impact, impact flash, small solar system objects



## 空隙の高い小天体に捕獲される高速ダスト粒子の貫入物理過程 Physical Process on Penetration of High Velocity Dusts Captured by Very Porous Small Bodies

岡本 尚也<sup>1\*</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 黒澤 耕介<sup>2</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>, 池崎 克俊<sup>3</sup>, 土山 明<sup>3</sup>

OKAMOTO, Takaya<sup>1\*</sup>, NAKAMURA, Akiko<sup>1</sup>, KUROSAWA, Kosuke<sup>2</sup>, HASEGAWA, Sunao<sup>2</sup>, IKEZAKI, Katsutoshi<sup>3</sup>, TSUCHIYAMA, Akira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 大阪大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Department of Planetary Science, Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, <sup>3</sup>Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

太陽系の小天体は始原的な天体だと考えられている。それらはガスとダストの円盤の中で合体・衝突を通して成長し、ガス円盤が晴れ上がった後はデブリ円盤内を運行したことが考えられる。このとき天体が運行することでダストを掃き集めることができる。特に空隙が大きく強度の小さな小天体では、ダスト捕獲の可能性が考えられる。そのようなダストは小天体のオリジナル物質ではなく、その天体の形成場所とは別の場所からやってきたダストである可能性が考えられる。そして、たくさんのダストの衝突は天体の表層構造や表面組成に影響を及ぼすであろう。

本研究の目的はそのような空隙の大きな小天体にダストが衝突したときにどのような物理過程を引き起こすのかを理解することである。これを解決するために高空隙な天体を模擬したターゲットを作成し、衝突実験を行った。

我々は高空隙率を持つターゲットを3種類作成した。ソーダライムガラスホウケイ酸を組成とする中空ガラスビーズを用いて焼結条件を変えることで空隙率94%と87%の焼結体を得た。また、低アルカリガラスを組成とする中空ではないビーズを焼結させて空隙率80%の焼結体を得た。

実験は宇宙科学研究所にある二段式軽ガス銃で衝突速度1.7-7.2km/sの範囲で行った。弾丸にはチタン、アルミニウム、玄武岩、ステンレスを用いている。弾丸の減速過程を調べるためにフラッシュX線を使用した。これによりターゲット内部を通過中の弾丸が撮影できる。この画像から、弾丸が抵抗係数、ターゲット密度、弾丸の断面積、弾丸速度の2乗に比例する抵抗を受けるとして解析を行った。

解析においてこれらは全てターゲット通過中に時間変化しないものとした。抵抗係数は初期動圧が増すとともに増加する結果を得た。

また、大阪大学にあるCT撮像装置を用いて弾丸が貫入して作った衝突トラックの形状を調べ、トラック体積・弾丸潜り込み深さを測定した。トラックの形状は衝突速度が遅いとき細長いニンジン型、衝突速度が速いときには太短いカブ型が観察された。これらはエアロジェルへのダスト貫入によってできるトラック形状と似ている(Horz et al.2006)。終端に残った粒子を調べると元の形を残しているものから、サイズが確認できないほどばらばらになったものもあった。

画像からトラック形状のプロファイルをとり、トラック体積を算出した。トラックの体積は弾丸の運動エネルギーとともに増加する。このような傾向はポリスチレンやポリウレタンなどの低密度物質に密度の大きな弾丸を衝突させたときに見られる(Kadono 1999)。終端粒子が元の形状をいくらか残しているとき、弾丸の運動エネルギーはトラックの質量に比例している。

本発表ではこれらの結果を元に、弾丸の潜り込み深さを予測するモデルを立てる。エアロジェルに弾丸が貫入しニンジン型のトラックを形成したときのモデルはNiimi et al.2011にある。これは速度の速いところでは上記の速度の2乗に比例した抵抗を受けるが、速度が遅くなってきたところでは、ターゲットの強度に比例した抵抗を受けるモデルである。Niimiモデルに必要な修正を行い、本実験の潜り込み深さとモデルの潜り込み深さとを比較し、議論する。

キーワード: 空隙率, 太陽系小天体, フラッシュX線, 抵抗則

Keywords: Porosity, Small bodies, Flash X-ray, Deceleration

## 衝突による高空隙率天体の運動量変化：弾丸衝突実験 Experimental Study on Momentum Change of Porous Small Bodies by Collisions

青木 隆修<sup>1\*</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 岡本 尚也<sup>1</sup>, 長谷川 直<sup>2</sup>

AOKI, Takanobu<sup>1\*</sup>, NAKAMURA, Akiko<sup>1</sup>, OKAMOTO, Takaya<sup>1</sup>, HASEGAWA, Sunao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency

小天体の運動に影響を与える重力以外の作用にはヤルコフスキー効果等の電磁波の放射によるもののほかに、小天体同士の衝突が考えられる。また、地球に接近する小惑星に宇宙機を衝突させて軌道を変更させる構想もある。これらのことを研究する上で小天体とその天体に比べて小さな物体の衝突による運動量変化を知ることがとても重要であると考えられる。ターゲット質量に比べて無視できる質量の小弾丸がターゲットにめりこむ衝突においてその前後で運動量は総量が一致するはずだが、ターゲット質量を一定と考えると衝突の反対方向に放出されるエジェクタの影響でターゲットの運動量は見かけ上増えることがわかっている。衝突後のターゲットの運動量の衝突前の弾丸の運動量に対する比を運動量移行効率と言う。運動量移行効率を測定するための室内衝突実験は今まで数多く行われてきており、モルタルの球体ターゲットにナイロン球を衝突させる実験において、弾丸の速度が大きくなるほど線形に移行効率が大きくなることがわかっている (Sirono et al. 1993)。しかし先行研究の多くはターゲットが低空隙率で強度が大きいものであった。近年の研究で、253Mathilde や 283Emma のような非常に空隙率が高いメインベルト小惑星が存在することがわかった (Baer et al. 2011)。これらの天体の空隙率はともに 50 % を超える。さらに空隙率が 40% ほどであるイトカワの表面は岩塊で覆われており、母天体が破壊され破片が再集積してできたラブルパイル天体で、再集積後何度も衝突を経験していることがハヤブサの観測でわかった。これらの衝突によってイトカワの軌道が再集積後からどれほど変化するかは様々な速度で衝突する小質量物体からの運動量移行効率を考慮することによって、理解をより深められるだろう。

そこで今回の実験では高空隙率のターゲットへの高速衝突実験を行ない、運動量の移行効率をもとめた。まず円柱ターゲットを 2 本の糸で吊り、それに二段式軽ガス銃によって 7.5km/s 以下で弾丸を衝突させ、弾丸からターゲットへの運動量移行効率を解析した。弾丸はアルミニウムとチタンで、ターゲットとしてはソーダライムホウケイ酸ガラス焼結体、低アルカリガラス焼結体、海砂の 3 種類の高空隙率ターゲットを用いた。それぞれの空隙率は 40~93 % である。解析には 3 台のハイスピードカメラをつかった。

ハイスピードカメラ画像を解析した結果、低空隙率物体に対する衝突実験と同様にエジェクタが弾丸運動量の数 10 % の運動量を担う場合があることがわかった。

キーワード: 空隙率, 小惑星, 衝突, 軌道

Keywords: porosity, asteroid, impact, orbit

## 同サイズ微惑星の低速度衝突に関する実験的研究：衝突破壊強度と破片速度の角度依存性

### Low-velocity impact experiments on equal-sized planetesimal collisions

河本 泰成<sup>1\*</sup>, 保井 みなみ<sup>2</sup>, 篤生 有理<sup>3</sup>, 荒川 政彦<sup>1</sup>

KOMOTO, Yasunari<sup>1\*</sup>, YASUI, Minami<sup>2</sup>, SHIMAKI, Yuri<sup>3</sup>, ARAKAWA, Masahiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 神戸大学自然科学系先端融合研究環, <sup>3</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, <sup>3</sup>Graduate School of Environmental Studies

太陽系の惑星は多孔質の微惑星同士が衝突破壊、再集積を繰り返すことで成長した。特に衝突成長の初期においては、同サイズの微惑星同士が脱出速度（数 10m/s）程度で衝突し、正面衝突に限らず様々な角度で衝突したと考えられている。先行研究 Arakawa (1999) では、弾丸・標的質量比 0.13、衝突速度 150-700m/s、衝突角度 0°-50° の氷球の斜め衝突実験を行い、破片の最小飛翔速度 ( $v_{min}$ ) と衝突角度 ( $\theta$ ) との間に  $v_{min}=A(\cos\theta)^{3.2}$  の関係があることを見つけた。本研究では、岩石微惑星と氷微惑星を模擬した試料を用いて、100m/s 以下の低速度における斜め衝突実験を行い、先行研究との比較から、斜め衝突破壊に対する弾丸・標的質量比の影響を調べた。実験では、衝突破壊強度と破片の飛翔速度を測定し、構成物質・衝突角度の依存性を調べた。

実験は一段式軽ガス銃を用いて行った。試料は氷と空隙率 55% の石膏を用い、岩石微惑星と氷微惑星をそれぞれ模擬した。試料は全て直径 30mm の球であり、これを弾丸と標的に用いた。石膏試料を用いた実験は神戸大学で行い、氷試料を用いた実験は北海道大学・低温科学研究所の大型低温室 (-10 °C) で行った。衝突速度 ( $v_i$ ) は正面衝突では 12.5-83.3m/s と変化させた。一方、斜め衝突では 65-75m/s で一定とした。斜め衝突の衝突角度は 0-75 ° で、15 ° 刻みとした。衝突破片は回収箱を用いて回収し、個々の破片の質量を計測した。衝突の様子は高速度ビデオカメラを用いて毎秒 3000-8000 コマの速度で撮影した。

破片速度を解析した結果、正面衝突では反対点速度 ( $v_a$ : 試料の中心に対して衝突点と対称な点での速度) と重心速度とほぼ一致し、完全非弾性衝突として説明できるとわかった。しかし氷の場合、カタストロフィック破壊が起こると、氷球同士がつぶれ、重心速度より 10~15m/s ほど遅くなった。同時に、衝突方向と垂直に細粒破片の飛び出しが観測され、その速度は最高で衝突速度と同程度になった。斜め衝突では、衝突角度が大きくなると反対点速度は小さくなった。一方、衝突点から氷球の接面上に広がるエジェクタの速度は、下流方向ではジェッティングにより衝突速度からその 1.5 倍程度まで加速されることがわかった。氷の場合、衝突角度が 0-45 ° では  $v_a=20(\cos\theta)^{3.6}$ 、45-75 ° では  $v_a=7.7(\cos\theta)^{0.95}$  が得られた。一方、石膏の場合、 $v_a=31(\cos\theta)^{1.3}$  が得られた。45-75 ° 衝突での氷試料や石膏試料の場合は、規格化最大破片質量が 0.5-1 の結果が多い。

衝突破壊強度  $Q^*$  は、規格化最大破片質量が 0.5 になる時のエネルギー密度  $Q$  で定義される。なお、 $Q$  は弾丸の運動エネルギーを弾丸と標的の質量を合わせたもので割った値である。正面衝突の場合、氷試料では、Arakawa et al. (1995b) と Arakawa (1999) より、弾丸・標的質量比 0.003-0.13 で  $Q^*=89\text{J/kg}$  が得られている。石膏の場合、Yasui and Arakawa (2011) より、弾丸・標的質量比 0.027-0.56 で  $Q^*=446\text{J/kg}$  が得られている。今回の実験の結果、同サイズ球の衝突でも、氷・石膏共にこれらの先行研究と同じような衝突破壊強度を示した。斜め衝突の場合、氷・石膏共に衝突角度に比例して最大破片も大きくなり、氷の場合  $m_f/M=0.044(\cos\theta)^{-1.4}$ 、石膏の場合  $m_f/M=0.44(\cos\theta)^{-0.62}$  が実験結果から得られた。また、斜め衝突の場合、弾丸速度の、衝突点の接面に垂直な成分が標的破壊に重要であると考え、 $Q_{ob} = Q(\cos\theta)^2$  をパラメータとして斜め衝突のデータを整理した。その結果、正面衝突と斜め衝突でデータの差異はほとんど見られなくなった。斜め衝突での破壊では、衝突速度の衝突点の接面に垂直な成分  $v_i \cos\theta$  が支配的であるということがわかった。

キーワード: 斜め衝突, 微惑星, 多孔質天体, 氷天体

Keywords: Oblique impact, Planetesimals, Porous body, Icy body

## 二段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析: 炭酸塩岩の衝突脱ガス Shock-induced devolatilization from calcite in an open system using a two-stage light gas gun

黒澤 耕介<sup>1\*</sup>, 大野 宗祐<sup>2</sup>, 杉田 精司<sup>3</sup>, 三重野 哲<sup>4</sup>, 松井 孝典<sup>2</sup>, 長谷川 直<sup>1</sup>

KUROSAWA, Kosuke<sup>1\*</sup>, OHNO, Sohuke<sup>2</sup>, SUGITA, Seiji<sup>3</sup>, Tetsu Mieno<sup>4</sup>, MATSUI, Takafumi<sup>2</sup>, HASEGAWA, Sunao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, <sup>2</sup> 千葉工大 惑星探査研究センター, <sup>3</sup> 東大 新領域 複雑理工, <sup>4</sup> 静岡大 理 物理  
<sup>1</sup>ISAS, JAXA, <sup>2</sup>PERC, Chiba Institute of Technology, <sup>3</sup>Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, <sup>4</sup>Faculty of Science, Shizuoka Univ.

We investigated shock-induced decarbonation of non-porous calcite in an open system at a wide range of peak shock pressures using a two-stage light gas gun and a quadrupole mass spectrometer. A new experimental technique that avoids chemical contamination from the acceleration gas from the gun was developed. We also conducted high-speed imaging and spectroscopic observations simultaneously to investigate the validity of our experimental procedure. We newly found that the decarbonation efficiency along the Hugoniot curve changes around 50 GPa, which is close to the predicted pressure for incipient decarbonation by ANEOS. Although shock-induced decarbonation was detected at the pressure lower than 50 GPa as well as the previous experimental studies, decarbonation may be caused by local energy concentration due to shear banding, resulting in low decarbonation efficiency. We constructed a simple theoretical model for shock-induced decarbonation during isentropic release based on the entropy method and the lever rule under our experimental condition. The predicted CO<sub>2</sub> amount as a function of peak shock pressure agrees well the experimental results at >50 GPa, strongly suggesting that the shock-induced CO<sub>2</sub> amount is determined only by the entropy for the peak shock state, incipient and complete decarbonation at the ambient pressure. We can use the new method for the quantitative measurements of the chemical composition of impact-induced gases from solid materials without any modification. The new technique is very useful to investigate the required peak shock pressure for vaporization/devolatilization of geologic materials and the final chemical composition in impact-induced vapor clouds.

キーワード: 衝突脱ガス, 気相化学分析, 開放系, 二段式軽ガス銃, 質量分析器, 炭酸塩岩

Keywords: Impact-induced devolatilization, Gas-phase chemical analysis, Open system, Two-stage light gas gun, Mass spectrometry, Carbonate

## K-Pg 境界衝突起源衝撃変成石英の平面変形構造 (PDFs) 分析によるイジェクタ飛散過程の解明

### Analyses of Planar Deformation Features (PDFs) of Shocked Quartz Grains Derived from K-Pg Boundary Deposits within and o

常 ユイ<sup>1\*</sup>, 田近 英一<sup>2</sup>, 後藤 和久<sup>3</sup>, 関根 康人<sup>2</sup>

CHANG, Yu<sup>1\*</sup>, TAJIKA, Eiichi<sup>2</sup>, GOTO, Kazuhisa<sup>3</sup>, SEKINE, Yasuhito<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東大 理 地球惑星科学, <sup>2</sup> 東大 新領域 複雑理工, <sup>3</sup> 千葉工業大学

<sup>1</sup>Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Chiba Institute of Technology

天体衝突現象は太陽系において普遍的な現象であり、惑星の起源と進化に大きな役割を果たしてきた。とりわけ、地球における天体衝突は表層環境を大きく変化させ、生命の絶滅と進化にも重大な影響を与えた可能性がある。衝突現象は、月をはじめとする様々な天体表面の衝突クレーターの画像解析や室内実験によって研究されてきた。しかし、地球のような大気を持つ天体における巨大衝突クレーター形成過程については、必ずしもよく分かっているわけではない。衝突起源物質であるイジェクタの放出過程についても不明な点が多い。地球上の巨大衝突クレーターの代表的なものとしてメキシコ湾ユカタン半島北部に位置するチチュルブクレーターがある。チチュルブクレーターは白亜紀-古第三紀 (K-Pg) 境界の大量絶滅をもたらした小天体衝突跡として広く知られている。その規模は地球史上最大級であり、全球的に衝突飛散物が分布している。しかし、その形成過程に関しては不明な点が多い。

地球上における天体衝突で発生する飛散物 (イジェクタ) の放出過程を明らかにする手がかりとして衝突起源物質である衝撃変成石英の平面変形構造 (PDFs) がある。PDFs は高压条件 (5~30GPa) を経験した石英粒子に形成される微細な面構造で、経験した圧力によって面方位が異なることから、最大圧力の指標として利用されている。

そこで本研究では、チチュルブ衝突クレーター内の掘削試料及び衝突地点近傍のキューバにみられる K-Pg 境界堆積物中の衝撃変成石英の PDFs を解析することによって、衝突クレーター内外に堆積した衝撃変成石英の鉛直分布及び PDFs の特徴を明らかにするとともに、チチュルブクレーター近傍におけるイジェクタの堆積過程を明らかにする。

キーワード: 衝撃変成石英, K-Pg 境界, 平面変形構造 (PDFs), 衝突クレーター, 飛散物 (イジェクタ)

Keywords: shocked quartz, K-Pg boundary, planar deformation features (PDFs), impact crater, ejecta

## 小惑星衝突における Impactor の破壊の程度 Fragmentation Degree of Impactor in Collision between Asteroids

長岡 宏樹<sup>1\*</sup>, 中村 昭子<sup>1</sup>, 三軒 一義<sup>1</sup>  
NAGAOKA, Hiroki<sup>1\*</sup>, NAKAMURA, Akiko<sup>1</sup>, SANGEN, Kazuyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：多くの隕石は小惑星のかげらであり、コンドライト母天体は太陽系形成のごく初期に熱的活動を停止したと考えられるため、太陽系初期の情報を得られると考えられている。また、隕石は母天体ごとに、さらに化学組成ごとに分類される。しかし、様々な母天体由来と思われる岩石が混じっている隕石がある。これらの隕石は異なった天体由来の物質が破片として集まってできた角礫岩化したものであり、普通コンドライトの20%程度が角礫岩化しているという報告もある。これらは小惑星表面に存在するボルダーもしくはレゴリスに他天体の隕石が衝突し、破片が捕獲されて形成されたと考えられている (e.g. Rubin et al. 1983)。

実際の角礫岩化した隕石中の他天体由来物質の破片サイズと衝突実験で得られる隕石模擬弾丸の破片サイズを照らし合わせ関係性をみつけることができれば、隕石母天体の過去の衝突歴史を知ることができると考えられる。本研究では隕石がレゴリスに衝突し、衝突破片がレゴリスに捕獲されたことを模擬して実験を行い、弾丸の破壊の程度を明らかにすることを目的にする。

実験方法：岩石を隕石模擬弾丸として小惑星のレゴリスを模擬した砂状の物質に撃ち込む。弾丸の加速には主に神戸大学の火薬銃を使用し、神戸大学の小型ガス銃も使用した。これまで、衝突速度167-429m/sでパイロフィライトを弾丸物質として用いた実験を行い、破片を500 μmサイズのふるいを用いて回収した。

結果：衝突エネルギー密度（本研究では弾丸の単位質量当たりの弾丸の運動エネルギーと定義した）と初期発生圧力に対する最大破片質量の関係を調べた。壊れ始めの値はパイロフィライトでは、エネルギー密度 $\sim 10^4$ J/kgとなり、これはターゲットの大きな場合の実験 (Takagi et al. 1984) の値と比べると2桁大きい。また、初期発生圧力 $\sim 300$ MPaで壊れはじめ、パイロフィライトの圧縮強度より大きい値であることがわかった。

今後は標的となる砂の粒径・弾丸の岩石の違いの影響についても実験を行い、結果を議論する。

キーワード: 小惑星, 隕石, 衝突

Keywords: asteroid, meteorite, impact

## 天体表層レゴリスの熱伝導率に関するパラメータ依存性調査実験 Experimental investigation of parameter dependence for thermal conductivity of regolith

坂谷 尚哉<sup>1\*</sup>, 小川 和律<sup>1</sup>, 飯島 祐一<sup>1</sup>, 本田 理恵<sup>2</sup>, 田中 智<sup>1</sup>

SAKATANI, Naoya<sup>1\*</sup>, OGAWA, Kazunori<sup>1</sup>, Yu-ichi Iijima<sup>1</sup>, HONDA, Rie<sup>2</sup>, TANAKA, Satoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙科学研究所, <sup>2</sup> 高知大学

<sup>1</sup>Institute of Space and Astronautical Science, <sup>2</sup>Kochi University

月や水星、小惑星表面はレゴリスで覆われている。レゴリスのような粉体の熱伝導率は真空下において、粒径、空隙率、温度、応力など様々なパラメータに依存する。月において、アポロ計画によって熱流量観測が行われ、レゴリス層の熱伝導率と温度勾配がその場測定された。しかし、レゴリス層の掘削により本来の熱伝導率とは異なる値が観測されたと考えられている (Langseth et al., 1976)。アポロ熱流量観測の補正、更に今後の天体表層でのその場熱流量観測のためには、レゴリス状態の変化による熱伝導率変化を定量化する必要がある。また、レゴリスのような粉体は真空下において、0.001 W/mK オーダーの非常に低い熱伝導率を持つ。したがって、微惑星のような小天体において強い断熱効果を持ち、その熱史に影響を与える (Akridge et al., 1998)。一方で、微小重力を持つ小天体表層のレゴリスの状態は不明確であるため、熱伝導率をモデル化しその範囲を制約する必要がある。本研は真空下において粉体の熱伝導率測定実験を行い、パラメータ依存性を調査することにより、熱輸送メカニズムを理解することを目指す。

真空環境での粉体の熱伝導率は粒子接触部を通じた熱伝導の寄与 (固体伝導率) と粒子表面間の熱輻射の寄与 (輻射伝導率) の和で表される。したがって、測定された熱伝導率の意味を考えるためにはそれぞれの寄与への分離が必要である。その方法の1つが温度依存性を調査する方法であり、輻射伝導率の温度依存性を仮定することにより2つの寄与への分離を行うことができる (Watson, 1964)。Merrill (1969) はいくつかの粒径のガラスビーズを用い、この方法により固体伝導率と輻射伝導率の粒径依存性を調査した。その結果、固体伝導率は粒径の減少関数で、熱抵抗となる接触点の単位体積当たりの個数で説明できると主張された。また、輻射伝導率は粒径の増加関数であり、粒子間距離の増加によるものと解釈された。しかしながら、彼が用いたガラスビーズは粒径によって空隙率が38?50%と大きく異なり、粒径の影響のみを反映した結果では無い可能性がある。熱輸送メカニズムを明らかにするためには、この空隙率コントロールの問題を解決し、粒径の影響のみを抽出できる実験系が必要である。そこで本発表では、粒径ごとにほぼ同じ空隙率を持つ粒径の揃ったガラスビーズを用いて、固体・輻射伝導率の粒径依存性を再調査した。

ガラスビーズは粒径 53-63, 90-106, 355-425, 425-500, 710-1000  $\mu\text{m}$  の5種類であり、空隙率は40?42%で、ほぼ同じ空隙率を持つ。熱伝導率は線熱法で測定した。サンプル容器の入った真空槽は恒温槽中に入れられており、系の温度を-25?50 degCまでコントロールした。先行研究と同様の方法によって、測定した熱伝導率を固体伝導率と輻射伝導率に分離し、それぞれの粒径依存性を調べた。

その結果、輻射伝導率は粒径が大きいほど高く、直線的に増加していた。これは粒子間距離の増加によるもので、接触した2つの粒子表面間を2つの平行板で近似したモデルによって説明できる。一方、固体伝導率は先行研究の傾向とは異なり、粒径の増加関数であった。先行研究との違いは空隙率コントロール精度の違いを反映しているのであろう。本研究の結果は(1)単位体積当たりの接触点数の影響のみでは説明できず、(2)1個当たりの接触面における熱コンダクタンスの影響を取り入れる必要があると考えられる。すなわち、粒径が大きいほど粒子間の接触半径は大きくなるため、接触熱コンダクタンスは増加し、(1)の影響はキャンセルされる。この2つのメカニズムを取り入れた理論モデル (Halajian and Reichman, 1969) では、固体伝導率は粒径に依存せず一定値を取ることもわかっており、理論推定値は本研究で得られた固体伝導率と同程度の値が得られた。

キーワード: レゴリス, 熱伝導率

Keywords: regolith, thermal conductivity

## 月惑星熱流量観測のための伸展式プローブの開発 Development of the extending probe for lunar and planetary heat flow measurement

堀川 大和<sup>1\*</sup>, 田中 智<sup>2</sup>, 小川 和律<sup>2</sup>, 小林 泰三<sup>3</sup>, 藤村 彰夫<sup>2</sup>

HORIKAWA, Yamato<sup>1\*</sup>, Satoshi Tanaka<sup>2</sup>, Kazunori Ogawa<sup>2</sup>, Taizo Kobayashi<sup>3</sup>, Akio Fujimura<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 福井大学

<sup>1</sup>Tokyo University, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>3</sup>Fukui University

月惑星における熱流量観測は、その惑星の内部活動状況や形成初期の熱的状态、材料物質に制約を与える手法として重要である。特に月の地殻熱流量は、内部に含まれる U や Th などの放射性発熱元素量に大きく寄与していると考えられており、また放射性発熱元素は難揮発性元素、液相濃集元素であるので、熱流量観測によって放射性元素の量や分布に制約を与えられれば、巨大衝突説やマグマオーシャン説の検証に関して不可欠な情報が得られる。これまで地球以外で熱流量観測が直接実施されたのはアポロ 15、17 号の観測のみであるが、熱流量プローブの一部が地表に達しており、この部分を介して計測機まで表面昼夜間温度差の影響を受けると考えられるため、正確な熱流量値を測定できなかった可能性がある。またペネトレータなどの貫入プローブにおいては、地表には露出していないが、貫入プローブ表面にある温度計やヒーターが周りのレゴリスに対して露出していること、貫入による周りのレゴリスの圧密や貫入プローブの熱伝導による周りの温度分布の変化を考慮すると、惑星本来の熱流量値を精密に決定することは困難である。

そこで本研究では、温度計やヒーターを入れた細い伸展プローブを貫入プローブの側面から伸ばし、貫入プローブから離れた位置で温度勾配や熱伝導率を計測することを提案する。この新方式を用いれば貫入プローブによるレゴリスの物理的状态変化から熱流量観測値を補正する必要がなくなる。さらにニードルプローブ法による熱伝導率の絶対値計測を可能にし、熱流量決定精度を大きく向上させることができる。また、惑星本来の熱流量を求められるだけでなく、貫入プローブからグラスファイバーを伸展し、先端を開けてスペクトル分析を行うことで、表層下での地質・生命探査も可能となる。

伸展プローブを開発するにあたって、特に伸展プローブの長さ・直径・材料について検討していく。

貫入プローブの熱数学モデルに基づくシミュレーション解析によって、貫入後のレゴリスの温度変化を推定し、貫入プローブ表面から熱屈折が働かない位置までの最短距離を伸展プローブの長さとする。もちろん観測前は伸展プローブを貫入プローブに収納させておくので、伸展プローブの長さによっては、収納・伸展が困難になる可能性がある。伸展プローブの長さだけでなく貫入プローブでの収納・伸展方法の検討も行う。

伸展プローブの直径は、できるだけ細い方がよい。それはラインヒートソース法を用いて熱伝導率を測るとき、伸展プローブ自体の熱伝導による誤差を極力低減させるためである。またレゴリスに伸展させるとき、その伸展にかける力をより小さくするためである。しかし伸展プローブを細くしすぎると、レゴリスの力学物性によっては座屈してしまう可能性もある。月惑星表層での力学特性に近づけた圧密模擬レゴリスと伸展プローブの試作機による貫入試験を行うことで、座屈しない細さを目指す。

伸展プローブの材料はステンレスが一般的である。しかし貫入プローブに収納できないときは、伸展プローブの材料として超弾性材料や形状記憶合金などを使用し、変形させて収納することができる。また材料の質量や熱伝導率などは計測しておく必要があり、できるだけ軽質量・低熱伝導率のものを選ぶ。

今回の発表では、伸展プローブに関わる解析・実験・開発などの進捗状況を報告する。

キーワード: 熱流量, 月, 惑星, レゴリス

Keywords: heat flow, moon, planet, regolith

## 1.6m 北大名寄ピリカ望遠鏡搭載の北教大可視光低分散分光器による天体スペクトルカタログの作成 Spectral Atlas with Hokkyodai Spectrograph on 1.6 m Pirca Telescope at Nayoro Observatory.

関口 朋彦<sup>1\*</sup>, 河北秀世<sup>2</sup>, 渡辺誠<sup>3</sup>

SEKIGUCHI, Tomohiko<sup>1\*</sup>, KAWAKITA Hideyo<sup>2</sup>, WATANABE Makoto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北海道教育大学, <sup>2</sup> 京都産業大学, <sup>3</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>Hokkaido University of Education, <sup>2</sup>Kyoto Sangyo University, <sup>3</sup>Hokkaido University

現在、北海道教育大学では教育学部理科教育専攻での卒業研究課題など大学教育での活用を視野にいたした天体分光データ一覧である「天体スペクトルカタログ」の作成を行っている。

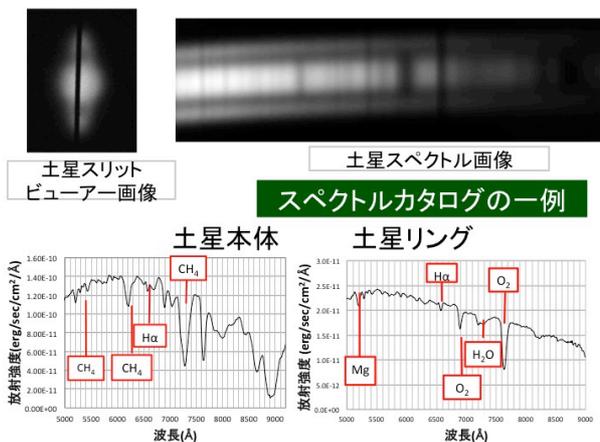
なよろ市立天文台設置の北海道大学附属 1.6m ピリカ望遠鏡は、太陽系天体特に惑星観測を目的として建設され、昨年度より本格運用に入っている。北海道教育大学ではこの望遠鏡に新規開発の可視光分光器を搭載し、2011年度より観測を開始した。この分光器は観測波長：500-900nm で、反射型回折格子を用いた波長分散：R > 300 の低分散可視光用である。

今年度は各スペクトル型を代表する恒星や輝線星雲などの基本分光データに加え、太陽系天体では惑星：水星、金星、火星、木星、土星、海王星、彗星：C/2001 P1 Garrad、小惑星：15 Eunomia のデータを取得した。これらの分光データを視覚化し、大学教育を意識した分光カタログ・アーカイブの作成を目指している。

本講演では初期年度である 2011 年の観測結果のまとめを報告する。

キーワード: 観測, スペクトル, 分光器, 可視光

Keywords: observations, spectroscopy, spectrograph, visible wavelength



## ダークマターハローおよび巨大分子雲による太陽系天体の軌道進化 Orbital evolution of solar system bodies due to dark matter haloes and giant molecular clouds

鈴木 貴之<sup>1</sup>, 樋口 有理可<sup>1\*</sup>, 井田 茂<sup>1</sup>  
SUZUKI, Takayuki<sup>1</sup>, HIGUCHI, Arika<sup>1\*</sup>, IDA, Shigeru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institut

本研究では、オールト雲彗星に対するダークマターハローの重力摂動の効果を調べた。オールト雲とは、太陽から数万 AU の距離に存在するとされている天体群の構造であり、長周期彗星の起源と考えられている。その天体群は直接観測する事は現在では不可能で、地球近辺で見られる長周期彗星の軌道要素からその存在が推定されている。また、それらの天体は太陽系天体の中で最も弱く太陽に束縛されており、銀河円盤、恒星、巨大分子雲などの太陽系外天体からの摂動をもっとも強く受けていると考えられる。一方、最近の N 体シミュレーションにより、ダークマター粒子は、ダークマターハローと呼ばれる球状の構造を作っている事が明らかになってきた、巨大分子雲と同様に、ダークマターハローもオールト雲天体に摂動を与えると考えられる。しかし、ダークマターハローは、銀河サイズのハローから太陽系サイズのハローまで幅広いサイズのハローが存在し、それらが総質量に等しく寄与している。これは、最も大きな物が総質量の大部分を占めている巨大分子雲や、質点と見なすことができる恒星とは全く異なった性質である。本研究では、任意のサイズ、構造を持つ太陽系外天体の影響を定式化した、この定式化は、恒星、分子雲、ダークマターハローのいずれに対しても適用できる。その結果、基本的には恒星による効果が最も大きい事が分かった、しかしながら、ダークマターハローについてはその質量-個数分布や構造に大きな不定性を持っているため、ダークマターハローが最も大きな効果を与えるようなパラメーター領域についても調べた。

キーワード: 彗星, オールト雲, 太陽系外縁天体, 巨大分子雲, ダークマターハロー

Keywords: Comet, Oort cloud, Trans-Neptunian objects, Giant molecular cloud, Dark matter halo

## 惑星リングに形成される自己重力ウェイクの形状 Self-gravity wakes in dense planetary rings

藤井 顕彦<sup>1\*</sup>

FUJII, Akihiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科

<sup>1</sup>University of Tokyo

惑星環は非弾性衝突をする無数の氷粒子の集合である。粒子の間には重力がはたらくため、重力による集積と差動回転による塊の破壊の競合によって環には自己重力ウェイクとよばれる網目状の構造が形成される。これらの構造は銀河円盤などをはじめとする無衝突の重力多体系にもみられ、ウェイク構造は自己重力相互作用をする円盤に共通して存在すると考えられている。

このように普遍的に存在する自己重力ウェイクの形状には、考えている円盤の物理的特徴（質量、衝突によるエネルギー散逸の強さ、重力・潮汐力比など）が反映される。しかし、これまでに行われた惑星リングに関する研究では、円盤の性質とウェイクの形状の関係性に注目した定量的な研究は理論、数値実験ともに行われていない。我々はこのような問題意識に基づき、惑星環の局所多体数値計算を十分高速かつ高解像度で遂行することが可能なシミュレーションコードを開発した。我々はこのコードを使い、自己重力ウェイクの形状が、円盤の特徴を表す数種類のパラメータにどのように依存しているかということを系統的に調べた。なお、重力計算部分の高速化には重力多体問題専用計算機である GRAPE-DR を使用した。

今回円盤のパラメータとして採用したのは（力学的な）光学的厚さ、非弾性衝突の跳ね返り係数、重力と惑星潮汐力の比を特徴づける物理半径・Hill 半径比の3つである。また自己重力ウェイクの解析については二体相関関数を通して軌道方向との間になす角度を計算した。これらの計算を行った結果、ウェイク角度が光学的厚みおよび物理半径・Hill 半径比と正の相関がある一方で、跳ね返り係数とは目立った相関がみられないことがわかった。発表ではこれらの物理的解釈についても述べる。

キーワード: 惑星リング, 自己重力, 局所 N 体シミュレーション

Keywords: planetary rings, self-gravity, Local N-body simulation

## Distribution of element abundances within achondrites Distribution of element abundances within achondrites

Peter Ness<sup>1\*</sup>, Hideaki Miyamoto<sup>1</sup>  
NESS, Peter<sup>1\*</sup>, Hideaki Miyamoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The University of Tokyo

<sup>1</sup>The University of Tokyo

Our understanding of the history of the solar system relies heavily on the analysis of meteorites. Many meteorites that fall to earth are achondrites, which are derived from the moon, mars (shergottites, nakhlites, chassignites) or from asteroid parent bodies (eucrites, howardites, diogenites, ureilites, iron meteorites etc). The chemistry and petrology of the different chemical groups of achondrites is known to differ substantially, which raises the question as to whether there are also major chemical differences within each/any of the various achondrite chemical groups.

To help answer this question we utilized a database that we compiled from meteorite element abundances and terrestrial from peer-reviewed papers, building on existing published databases [1-4]: we then used element abundances from these databases to analyze the major, minor and trace elements chemistry of achondrites. The meteorite database comprises 28,742 bulk chemical abundances from 2,112 meteorites compiled from 121 peer-reviewed papers published between 1953 and 2010: representing 78 atomic elements, 20 major chemistry analyses and a wide range of petrologic and chemical types. The terrestrial database comprises 71,245 bulk chemical abundances compiled from 2,848 rocks, from 66 peer-reviewed papers published between 1982 and 2011.

The results of our analysis suggest that there is no significant difference in major chemistry of most meteorites within the majority of achondrite groups. However, there can be significant differences in major chemistry for aubrites and iron meteorites. We also find that lodranites, aubrites and some meteorites from the moon and mars can also contain anomalous metal and trace elements. These anomalous element abundances often differ by many times the mean of their particular achondrite group, which might suggest that metals and other atomic elements have been injected/ depleted by hydrothermal/alteration or by other processes.

We found it difficult to analyze the major chemistry of iron meteorites due to a lack (absence) of major chemical abundances. Given that most iron mines on Earth use major chemistry for rock/material type interpretation we recommend a concerted effort to obtain better coverage of the major chemistry of iron meteorites.

The implication of this research is that a potential might exist for finding metal and trace element resources on the moon, mars, or even on some asteroid parent bodies.

キーワード: meteorites, achondrites, element abundances, distribution, major chemistry

Keywords: meteorites, achondrites, element abundances, distribution, major chemistry

## レーザー衝撃圧縮された鉱物の変成と衝撃波減衰 Shock-wave decay and shock metamorphism of laser-shocked minerals

永木 恵太<sup>1</sup>, 境家 達弘<sup>1\*</sup>, 近藤 忠<sup>1</sup>, 門野 敏彦<sup>2</sup>, 弘中 陽一郎<sup>2</sup>, 重森 啓介<sup>2</sup>

NAGAKI, Keita<sup>1</sup>, SAKAIYA, Tatsuhiko<sup>1\*</sup>, KONDO, Tadashi<sup>1</sup>, KADONO, Toshihiko<sup>2</sup>, Youichirou Hironaka<sup>2</sup>, SHIGEMORI, Keisuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Osaka Univ., <sup>2</sup>ILE, Osaka Univ.

It is important to recover the shock-compressed samples for understanding the synthetic mechanism of high-pressure phase, shock metamorphism and shock-melt vein in meteorites. In the past, many impact experiments have been conducted by using explosive or gas guns. In fact, although high-pressure phase in meteorites is recovered by the impact experiments (impact velocity is 1.5km/s and shock pressure is 26GPa) [1], the impact velocity in these methods is limited below 10km/s less than second escape velocity on the Earth. Recently, impact experiments at the velocity over 10km/s were conducted by using projectiles which were accelerated by high-power laser [2].

We developed the recovery technique of the laser-shocked materials at higher pressures (130-460GPa) in high-power laser system and estimated the pressure range of the production conditions from analyzing the structure of the shock metamorphism. We used the single crystal olivine (from San Carlos, USA) which is a major mineral of meteorites and of the Earth. We used the aluminum recovery cell. On this cell, titanium plate was located in the front of olivine to prevent the sample from being blow off. We used GXII/HIPER laser system at Institute of Laser Engineering (ILE), Osaka University [3]. The deformation, fracture and phase identification of the recovered olivine were observed comprehensively by optical microscopy, field emission-scanning electron microscopy (FE-SEM), electron backscatter diffraction (EBSD) and micro-Raman spectroscopy.

We recovered about 100 wt.% of the sample. There were some distinctive structures in the recovered sample. We estimated the shock wave attenuation rate from the distribution of these structures. The attenuation rates were 2.2-2.9 in our experiments. These attenuation rates were larger than that in previous experiment [4] and simulations [5, 6].

Part of this work was performed under the Joint Research of Institute of Laser Engineering, Osaka University.

### References

- [1] Tschauer, O. et al., Proceedings of the National Academy of Sciences, 106, 13691-13695, 2009.
- [2] Kadono, T. et al., Journal of Geophysical Research, 115, E04003, 2010.
- [3] Yamanaka, C. et al., Nucl. Fusion, 27, 19-30, 1987.
- [4] Nakazawa, S., et al., Icarus, 156, 539-550, 2002.
- [5] Ahrens, T. J., and J. D. O'Keefe, Int. J. Impact Eng., 5, 13-32, 1987.
- [6] Pierazzo, E., et al., Icarus, 127, 408-423, 1997.

キーワード: 衝撃波, 変成, オリビン, レーザー, 回収, 実験

Keywords: Shock wave, Metamorphism, Olivine, Laser, Recovery, Experiment

## レーザー衝撃を受けたマーチソン隕石由来の揮発性成分と回収試料の分析 Analysis of volatile components and recovery samples of laser-shocked Murchison meteorite

中林 誠<sup>1\*</sup>, 薮田 ひかる<sup>1</sup>, 境家 達弘<sup>1</sup>, 近藤 忠<sup>1</sup>, 大野 宗祐<sup>2</sup>, 門野 敏彦<sup>3</sup>, 重森 啓介<sup>3</sup>, 弘中 陽一郎<sup>3</sup>, 山中 高光<sup>4</sup>  
NAKABAYASHI, Makoto<sup>1\*</sup>, YABUTA, Hikaru<sup>1</sup>, SAKAIYA, Tatsuhiko<sup>1</sup>, KONDO, Tadashi<sup>1</sup>, OHNO, Sohsuke<sup>2</sup>, KADONO, Toshihiko<sup>3</sup>, SHIGEMORI, Keisuke<sup>3</sup>, HIRONAKA Yoichiro<sup>3</sup>, YAMANAKA, Takamitsu<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 千葉工業大学惑星探査研究センター, <sup>3</sup> 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, <sup>4</sup> カーネギー地球物理学研究所

<sup>1</sup>Earth and Space Sci., Osaka Univ., <sup>2</sup>PERC, Chiba Institute of Technology, <sup>3</sup>Inst. of Laser Engineering, Osaka Univ., <sup>4</sup>Geophysical Laboratory, Carnegie Inst.

It has been suggested that organics in meteorites and comets has delivered building blocks of life to the early Earth during the late heavy bombardment [1]. However, there has remained a missing link in the subsequent chemical evolution of these small bodies via their interaction with the early Earth. Although the shock experiments have been reported by using gas gun (e.g. [2]), which is an efficient method for consideration about impacts of meteorites and comets, these are performed under a closed system at lower impact velocities due to the experimental restrictions. Recently, the shock experiments using high-power laser have been available [3] under an open system at higher impact velocities (> 10 km/s). In this study, we have conducted a laser-shock experiment for Murchison meteorite under more realistic condition of impact events in order to identify the produced volatile components that might have been contributed to abiotic synthesis of organics and chemical composition of atmosphere in the early Earth.

Finely ground Murchison meteorite, CM2 chondrite, was used as starting material. Silica powder, which did not contain organics, was also used as a standard sample. Both samples were pressed into pellets in a diamond anvil cell. The thickness and diameter of pellets were about 100 μm and about 300~850 μm respectively. The aluminum foil of 50 μm thickness was located in front of the sample as the ablator for the laser and for preventing the sample from blowing out. The laser-shock experiments were conducted using GEKKO XII/HIPER laser at Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan [4]. The laser wavelength, pulse duration, and spot diameter were 1053 nm, 20 ns, and 0.4 mm, respectively. The experimental shock pressures were about 400 GPa and 200 GPa. The shocked sample was recovered by aluminum box or double glass vial. The ejected volatile components were analyzed on site by quadrupole mass spectrometry (QMS). The recovered material inside of the cell was extracted in solvent, and it was analyzed by gas chromatograph mass spectrometry (GC-MS).

The produced volatiles were the components with mass numbers of 16 and 26 at 400 GPa, and of 34 at 200 GPa, which could be identified as CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>S, respectively. Although small amounts of tiny solid particles have been recovered in the cell, some of them were possibly derived from aluminum foil, and it is not sure whether they are indigenous from the meteorite. No compounds were identified by GC-MS analysis of the solvent extracts of the cell. The product, CH<sub>4</sub>, in this study is partly consistent with the discussions by [5] that an atmosphere generated by impact degassing would tend to CO- or CH<sub>4</sub>- rich composition derived from the impacting bodies. These impact-induced volatiles were reducing species and might have worked effectively for abiotic synthesis of organics in the early Earth.

### References

- [1] Chyba, C., and C. Sagan (1992), *Nature* 355, 125-132.
- [2] Furukawa, Y. et al. (2009), *Nature Geoscience* 2, 62-66.
- [3] Ohno, S. et al. (2011), 42nd Lunar and Planetary Science Conference 1608, p. 1752.
- [4] Yamanaka, C. et al. (1987), *Nuclear Fusion* 27, 19-30.
- [5] K. Zahnle et al. (2010), *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* doi: 10.1101/cshperspect.a004895

## はやぶさりエントリーのインフラサウンド・地震観測 Infrasound and Seismic Observations of the Hayabusa Reentry

石原 吉明<sup>1\*</sup>, 平松 良浩<sup>2</sup>, 山本 真行<sup>3</sup>, 古本 宗充<sup>4</sup>, 藤田 和央<sup>5</sup>

ISHIHARA, Yoshiaki<sup>1\*</sup>, HIRAMATSU, Yoshihiro<sup>2</sup>, YAMAMOTO, Masa-yuki<sup>3</sup>, FURUMOTO, Muneyoshi<sup>4</sup>, Kazuhisa Fujita<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, <sup>2</sup> 金沢大学, <sup>3</sup> 高知工科大学, <sup>4</sup> 名古屋大学, <sup>5</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>RISE Project, NAOJ, <sup>2</sup>Kanazawa Univ., <sup>3</sup>Kochi Univ. of Tech., <sup>4</sup>Nagoya Univ., <sup>5</sup>JAXA

The Hayabusa, the world first sample-return minor body explorer, came back to the Earth, and reentered into the Earth's atmosphere on June 13, 2010. The Hayabusa Sample Return Capsule (H-SRC) was the third direct reentry event from the interplanetary transfer orbit to the Earth at a velocity of over 11.2 km/s. The H-SRC and the H-S/C reentries are very good analogue for studying bolide size meteors and meteorite falls. We, therefore, conducted a ground observation campaign for aspects of meteor sciences. We carried out multi-site ground observations of the Hayabusa reentry in the Woomera Prohibited Area (WPA), Australia. The observations were configured with optical imaging with still and video recordings, spectroscopies, and shockwave detection with infrasound and seismic sensors. In this study, we report details of the infrasound/seismic observations and those results.

To detect shockwaves from the H-SRC and the H-S/C, we installed three small aperture infrasound/seismic arrays as the main stations. In addition, we also installed three single component seismic sub-stations and an audible sound recorder. The infrasound and seismic sensors clearly recorded sonic boom type shockwaves from the H-SRC and disrupted fragments of the H-S/C. The audible recording also detected those shockwave sounds in the human audible band. Positive overpressure values of shockwaves (corresponding to the H-SRC) recorded at three main stations are 1.3 Pa, 1.0 Pa, and 0.7 Pa with the slant distance of 36.9 km, 54.9 km, and 67.8 km (i.e., the source altitude of 36.5 km, 38.9km, and 40.6 km), respectively. These amplitudes of shockwave overpressures are systematically smaller than those of theoretical predictions. The incident vectors of the shockwave from the H-SRC at all the three arrays are estimated by F-K spectrum and agree well with predicted ones. Particle motions of ground motions excited by the shockwave from the H-SRC show characteristics of typical Rayleigh wave.

We examine the relation between amplitudes of overpressures and ground motions, and consider the transfer function. We define the transfer function as,  $Z(w) = rV_S v_z(w)/p(w)$ , where,  $w$  is the angular frequency,  $p$  the pressure perturbation,  $r$  the density of elastic media,  $V_S$  the shear wave velocity of elastic media, and  $v_z$  the vertical ground velocity. Here the numerator represents the pressure in the elastic media. The obtained value of transfer function is  $\sim 2$  at frequency of around 8 Hz. We try to search elastic properties of each site ( $r$ : 1300 - 1700 kg/m<sup>3</sup>,  $V_P$ : 1200 - 1700 m/s,  $V_S$ : 100 - 300 m/s) to explain the observation. The optimum values are around  $r$  of 1500 kg/m<sup>3</sup>,  $V_P$  of 1400 m/s and  $V_S$  of 150 m/s. The effective depth of air-to-ground coupling of this frequency range is very shallow and observation sites are covered with fine soil. Therefore the estimated values are fully suitable.

キーワード: はやぶさ, 衝撃波, インフラサウンド, 地震波, 大気固体地球カップリング

Keywords: Hayabusa, shockwave, infrasound, seismic wave, air-to-ground coupling

## 金星山岳波の鉛直伝播特性に関する線形解析

### Linear analysis of the vertical propagation characteristic of the Venus mountain wave

安藤 紘基<sup>1\*</sup>, 前島 康光<sup>2</sup>, 今村 剛<sup>3</sup>, 高木 征弘<sup>1</sup>, 杉本 憲彦<sup>4</sup>

ANDO, Hiroki<sup>1\*</sup>, Yasumitsu Maezima<sup>2</sup>, IMAMURA, Takeshi<sup>3</sup>, TAKAGI, Masahiro<sup>1</sup>, Norihiko Sugimoto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東大・理, <sup>2</sup> 名大, <sup>3</sup> ISAS/JAXA, <sup>4</sup> 慶大

<sup>1</sup> University of Tokyo, <sup>2</sup> Nagoya University, <sup>3</sup> ISAS/JAXA, <sup>4</sup> Keio University

過去に行われた VEGA の Balloon 観測で、赤道上空高度 55 km 付近にて強い上下動が観測された。Young et al. (1987) は、それが赤道に存在する大規模な地形により引き起こされた山岳波に起因している可能性を指摘した。さらに Young et al. (1994) は、山岳波が金星の雲層の上まで非線形過程を通じて伝搬できることを示唆した。また最近では、欧州宇宙機関が打ち上げた Venus Express に搭載された VMC による紫外光画像の解析結果から、Picciali et al. (2011) は北半球高緯度において山岳波が雲層上端高度まで伝搬している可能性があることを主張している。

金星の山岳波については、理論的・観測的研究はまだ少ない。そして、緯度によって雲層内の対流層の厚みや背景風の構造が大きく異なるので、山岳波の鉛直伝播の様相は緯度によって異なると思われる。特に高緯度の対流層 (45-60 km) は他の緯度帯に比べて厚いために、実際に山岳波が対流層の上まで伝搬するかどうか疑問である。また、雲層の対流が山岳波の伝播に及ぼす影響を考慮した研究も存在しない。そこで手始めとして、我々は大きな拡散係数を雲層中の対流層の部分に与える事によって対流の影響を模擬的に表現した上で、山岳波の線形計算を行った。モデルは東西-高度方向の2次元で、鉛直座標は log p 座標系、高度領域は 0-100 km である。また境界条件は上下端は固定端で、東西方向は周期境界を仮定し、山岳を模擬した適当な正弦波を下端から入れた。本研究では、WKB 近似の下で山岳波に伴う鉛直流についての線形解を求めた。その結果、背景場の東西風の風速が小さいほど、また拡散係数 (= 対流の強さ) が大きいほど山岳波は伝播しにくいことが分かった。また、その振幅は励起源の水平波長にも依存することを見出した。本発表では線形解析の結果を具体的に示すと共に、非静力学モデル CReSS を用いて行っている非線形数値実験の結果についても述べたい。

キーワード: 金星, 山岳波

Keywords: Venus, Mountain wave

## 金星の雲層における対流の数値実験 Numerical modeling of cloud-level convection on Venus

樋口 武人<sup>1\*</sup>, 今村 剛<sup>2</sup>, 高木 征弘<sup>1</sup>, 前島 康光<sup>3</sup>, 杉本 憲彦<sup>4</sup>, 安藤 紘基<sup>1</sup>

HIGUCHI, Takehito<sup>1\*</sup>, IMAMURA Takeshi<sup>2</sup>, TAKAGI Masahiro<sup>1</sup>, MAEJIMA Yasumitsu<sup>3</sup>, SUGIMOTO Norihiko<sup>4</sup>, ANDO Hiroki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 名古屋大学, <sup>4</sup> 慶應義塾大学

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>3</sup>Nagoya University, <sup>4</sup>Keio University

金星は高度約 45-70km に存在する硫酸の雲に覆われている。過去に行われた VEGA の Balloon 観測で、赤道上空高度 55 km 付近にて対流に伴うと考えられる鉛直風が観測された。また、伝播掩蔽観測により得られた気温分布から雲層下部 50-55km 付近に中立成層があることが知られており、対流活動の存在を示唆している。この対流は下層大気からの上向き熱放射が雲底で吸収されることで生じていると考えられる。Venus Express 探査機搭載 Venus Monitoring Camera の雲頂付近でみられる水平スケールが数 100km にも及ぶセル状の構造も雲層下部の対流を反映するという説があるが、対流層と雲頂は高度が隔たっているため、関連は明確でない。

Baker et al.[1998] は、雲層高度での背景密度・温度分布や正味熱流束を仮定して、安定層へ貫入する対流の 2 次元の数値実験を行った。しかし、本来は放射輸送によって雲層を出入りする熱流速を拡散によって表現していることが問題点として挙げられる。また、再現されたセルの水平スケールが雲頂のセル状構造と比較してかなり小さく、十分に理解されたとは言い難い。金星の雲層における対流の基本構造を決める要因を理解するためには、より現実的な放射加熱をもとにした対流計算を行う必要がある。

本研究では、メソスケールの数値気象モデル CReSS[Tsuboki and Sakakibara, 2007] を使って金星の雲層における対流を計算する。短波放射は Baker et al.[1998] のものと同じであるが、長波放射は先行研究よりも現実に近い形で与える。そして加熱強制の大きさなどを変化させることで対流の性質がどのように変化するのか、計算結果をもとに議論を行う。

キーワード: 金星, 対流, 放射

Keywords: Venus, convection, radiation