

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^{1*}, 荒川 政彦², 長谷川 直³, 藤田 幸浩⁴, 門野 敏彦⁵

YASUI, Minami^{1*}, ARAKAWA, Masahiko², HASEGAWA, Sunao³, FUJITA, Yukihiro⁴, KADONO, Toshihiko⁵

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

¹Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ²Graduate School of Science, Kobe University, ³Japan
Aerospace Exploration Agency, ⁴Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ⁵Institute 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^{1*}, 荒川 政彦¹HAYAMA, Ryo^{1*}, ARAKAWA, Masahiko¹¹ 神戸大学大学院理学研究科¹ 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。

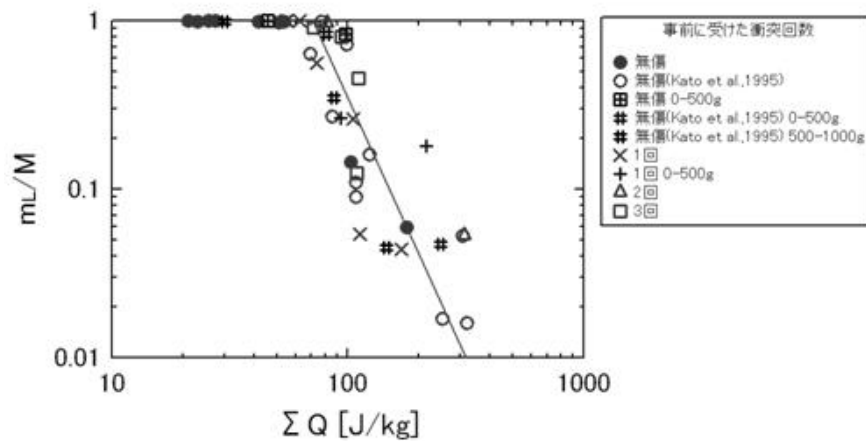
さらに、事前衝突の Q をすべて積算した値で m_L/M を見た場合、複数回衝突を受けたターゲットの m_L/M は、無傷の氷の結果によく一致することが分かった。図は事前の衝突回数でマーカー分けした、 m_L/M と積算エネルギー密度の関係である。縦軸は m_L/M で横軸は積算エネルギー密度 Q である。図をみると m_L/M の値は、 Q に依存し、事前の衝突回数やターゲット質量によらないことがわかる。これらのデータをべき乗関数でフィッティングした結果、 $m_L/M = 7.8 \times 10^5 Q^{-3.2}$ という経験式を得た。

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^{1*}, 荒川 政彦²

SHIMAKI, Yuri^{1*}, ARAKAWA, Masahiko²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 神戸大学大学院理学研究科

¹Environmental Studies, Nagoya University, ²Graduate 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¹, 荒川 政彦^{2*}, 長谷川 直³, 鳶生 有理¹

FUJITA, Yukihiko¹, ARAKAWA, Masahiko^{2*}, HASEGAWA, Sunao³, SHIMAKI, Yuri¹

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

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Graduate School of Science, ³Japan 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^{1*}, 土山 明¹, 門野 敏彦², 道上 達広³, 荒川 政彦⁴

SHIMADA, Akira^{1*}, TSUCHIYAMA, Akira¹, KADONO, Toshihiko², MICHIKAMI, Tatsuhiro³, ARAKAWA, Masahiko⁴

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

¹Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science Osaka University, ²Osaka University Institute of Laser Engineering, ³Fukushima National College of Technology, ⁴Graduate 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によって宇宙空間に散逸し、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^{1*}, 松永 恒雄¹, 中村 良介², 関根 康人³, 平田 成⁴

YAMAMOTO, Satoru^{1*}, MATSUNAGA, Tsuneo¹, NAKAMURA, Ryosuke², SEKINE, Yasuhito³, HIRATA, Naru⁴

¹ 国立環境研, ² 産総研, ³ 東大新領域, ⁴ 会津大

¹NIES, ²AIST, ³Univ. of Tokyo, ⁴Univ. 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^{1*}, 門屋 辰太郎²

TAJIKA, Eiichi^{1*}, KADOYA, Shintaro²

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 東京大学大学院理学系研究科

¹The University of Tokyo, ²The University of Tokyo

Habitable zone (HZ) around main-sequence stars is defined as an orbital region in which H₂O 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 CO₂, CH₄, and NH₃, to maintain the climate warm enough for H₂O to be liquid phase. In this respect, HZ is not a sufficient condition but just a necessary condition for H₂O 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 CO₂ 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 H₂O to be liquid water if the planet has abundant H₂O 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 H₂O as liquid phase unless there is no greenhouse gas other than water vapor in the atmosphere. If there is H₂O 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^{1*}, 小久保 英一郎², 佐々木 貴教³, 上野 雄一郎³, 飯塚 毅¹, 生駒 大洋¹

GENDA, Hidenori^{1*}, KOKUBO, Eiichiro², SASAKI, Takatori³, UENO, Yuichiro³, IIZUKA, Tsuyoshi¹, IKOMA, Masahiro¹

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

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, ³Department 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^{1*}, 玄田 英典², 上野 雄一郎¹, 飯塚 毅², 生駒 大洋²

SASAKI, Takanori^{1*}, GENDA, Hidenori², UENO, Yuichiro¹, IIZUKA, Tsuyoshi², IKOMA, Masahiro²

¹ 東京工業大学, ² 東京大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²The 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 CO₂ 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¹, 倉本 圭^{1*}

OKADA, Hidetaka¹, KURAMOTO, Kiyoshi^{1*}

¹ 北海道大学 大学院 理学院 宇宙理学専攻

¹Department 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、N₂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10⁵年よりも短い場合には、集積中に地表温度がH₂O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H₂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H₂とHeからなる円盤ガス成分と、H₂O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H₂O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/m²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、H₂, He, H₂O以外の成分は無視しているが、タイタンの材料物質の氷の中にはNH₃も含まれていたと考えられている。NH₃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NH₃からN₂への化学変化が起こり、大気中にN₂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NH₃はほぼ完全に凝結する。現在のN₂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¹, 倉本 圭^{1*}

UMEMOTO, Takafumi¹, KURAMOTO, Kiyoshi^{1*}

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

¹Department 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、CO₂ 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^{1*}, 阿部 豊¹, 玄田 英典¹
HAMANO, Keiko^{1*}, ABE, Yutaka¹, GENDA, Hidenori¹

¹ 東京大学大学院地球惑星科学専攻

¹The 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 H₂-He 大気のコoling率の推定

Estimation of Cooling Rate for H₂-He Atmosphere with Radiative Convective Equilibrium Model

高橋 康人^{1*}, 石渡 正樹¹, 倉本 圭¹

TAKAHASHI, Yasuto^{1*}, ISHIWATARI, Masaki¹, KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学

¹Hokkaido 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 H₂ 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、H₂-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 H₂ および He からなるとし、吸収源については H₂-H₂ および H₂-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⁻¹ 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 NH₃ 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コoling率が地球大気のコoling率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 H₂-He 大気のコoling率の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^{1*}, 今村 剛²

ANDO, Hiroki^{1*}, IMAMURA, Takeshi²

¹ 東大・理, ² 宇宙科学研究所

¹University of Tokyo, ²ISAS/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^{1*}, 田村 元秀¹, 神鳥 亮¹, 工藤 智之¹, 橋本 淳¹, SEEDS/HiCIAO/AO188 チーム²
KUSAKABE, Nobuhiko^{1*}, TAMURA, Motohide¹, KANDORI, Ryo¹, Tomoyuki Kudo¹, Jun Hashimoto¹, SEEDS/HiCIAO/AO188 team²

¹ 国立天文台, ² プロジェクトチーム

¹National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), ²Project 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で、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、 ~ 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^{1*}, 奥住 聡², 武藤 恭之¹

TAKEUCHI, Taku^{1*}, OKUZUMI, Satoshi², MUTO, Takayuki¹

¹ 東京工業大学, ² 名古屋大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²Nagoya 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 β 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 0.1mG 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^{1*}, 小林 尚人¹, 齋藤 正雄², Alan T. Tokunaga³
 YASUI, Chikako^{1*}, Naoto Kobayashi¹, SAITO, Masao², Alan T. Tokunaga³

¹ 東京大学, ² 国立天文台, ³ ハワイ大学

¹University of Tokyo, ²National Observatory of Japan, ³IfA, University of Hawaii

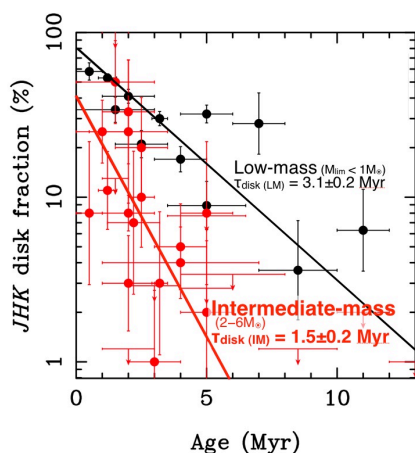
原始惑星系円盤の寿命は、惑星形成過程を決定する主要な基本量のひとつである。これまでに、小質量星の円盤の寿命は様々な研究により定量的に求められてきたが、中質量以上の星については定性的な示唆のみで、定量的な導出はなされていなかった。中質量星の円盤進化を知ることが、中質量星の惑星形成に制約をつけられるだけでなく、円盤進化の中心星依存性を知ることによって惑星形成モデルに制約をつけることができる点などから、非常に重要である。

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^{3*}, クリス オーメル², 井田 茂¹
KOBAYASHI, Hiroshi^{3*}, Chris Ormel², IDA, Shigeru¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ² カリフォルニア大学バークレー校, ³ 名古屋大学大学院理学研究科
¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institut, ²Astronomy Department, University of California, Berkeley, ³Department 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^{1*}, 町田 正博², 大槻 圭史³

TANIGAWA, Takayuki^{1*}, Masahiro N. Machida², OHTSUKI, Keiji³

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

¹CPS / ILTS, Hokkaido University, ²Faculty of Sciences, Kyushu University, ³Faculty 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^{1*}, 竹広 真一², 中島 健介³, 倉本 圭⁴, 林 祥介⁵

SASAKI, Youhei^{1*}, TAKEHIRO, Shin-ichi², NAKAJIMA, Kensuke³, KURAMOTO, Kiyoshi⁴, HAYASHI, Yoshi-Yuki⁵

¹京大・数学, ²京大・数理研, ³九大・理・地球惑星, ⁴北大・理・宇宙理学, ⁵惑星科学研究センター/神戸大・理・地球惑星
¹Dept. Math., Kyoto Univ., Kyoto, Japan, ²RIMS, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, ³Dept. Earth Planet. Sci., Kyushu Univ., Fukuoka, Japan, ⁴Dept. CosmoScience, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, ⁵CPS/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^{1*}, 濱野 景子², 杉田 精司³, 門野 敏彦⁴

KUROSAWA, Kosuke^{1*}, HAMANO, Keiko², SUGITA, Seiji³, KADONO, Toshihiko⁴

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

¹ ISAS, JAXA, ² Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo, ³ Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo,

⁴ 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 ~ 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 ~ 16 km/s であるが、改良したエネルギー式では ~ 13 km/s にまで引き下げられることがわかった。わずか ~ 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 H₂O ice in an icy body induced by ripening

城野 信一^{1*}

SIRONO, Sin-iti^{1*}

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Graduate 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^{1*}, 渡邊保真²

SUZUKI, Kojiro^{1*}, WATANABE Yasumasa²

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 東京大学大学院工学系研究科

¹GSFS, The University of Tokyo, ²Grad. 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H₂O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N₂-CO₂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 (N₂, O₂, N, O, NO, NO⁺, e⁻, N⁺, O⁺, N₂⁺, O₂⁺, C, C₂, C₃, CO₂, CO, CN, CO⁺, C⁺, H, H₂, HCN, HCO, C₂H₂, C₂H, CH, H₂O, 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N₂-O₂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H₂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CO₂:N₂=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/s²m²のH₂Oアブレーションガスが噴き出すケースでは、放出されるH₂O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) 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N₂(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

