

画像解析によるフォボスにみられるグループの形成過程に関する検討 Geological study on the formations of grooves on Phobos: Results of image analysis

菊地 紘^{1*}, 宮本 英昭¹
Hiroshi Kikuchi^{1*}, Hideaki Miyamoto¹

¹ 東京大学総合研究博物館

¹The University Museum, The University of Tokyo

フォボスとダイモスの表層画像は、現在でも Mars Express や Mars Reconnaissance Orbiter によって取得されている。火星に近い方の衛星であるフォボスは、現時点において約 3000 枚の高解像度画像が取得され、最も多くの画像が公開されている小天体の一つとなった。本研究はそれらの画像解析を行うことで、小天体上に見られるさまざまな地形の形成過程についてあきらかにしようとするものである。

フォボスの表層に見られる最も顕著な特徴のひとつは、グループと呼ばれる直線状の溝のような構造である。グループは他の多くの小天体にも見られる地形であるにも関わらず、成因はよくわかっていない。そのため最も多くの情報が得られているフォボスを例にグループの形成過程を明らかにすれば、小天体全体の表層進化過程の理解に大きく貢献するものと考えられる。

グループの形成過程として、主に次の 2 つが提案されている。まず 1 つ目はフォボス内部になんらかの作用で断層が生じることで形成されるというもの [1]、2 つ目はフォボスや火星への衝突で生じたイジェクタが 2 次衝突を生じて形成されたというもの [2]。後者の方がどちらかという有力であると考えられてきたが、火星から放出されたイジェクタが直線状に並ぶ必然性が無いことを、近年の数値シミュレーション [3] によって示されたことは、この仮説を強く否定する材料であると考えられる。

そこで私たちは高解像度画像を丁寧に分析することで、515 本のグループの位置や大きさを確認し、これらをフォボスの数値形状モデルの上に描写した。HiRISE によって撮影された地域については、より細部な測定をすることができた。この結果、グループの多くはリムを有していることがわかった。これはフォボスのグループは衝突由来であることを強く示唆している。さらにグループの長さに関して、ヒストグラムを作成した。特に 5km 以上の長いグループは信頼度の高いデータセットをつくることができた。

さらに本研究では 3 つの地域に対して直径 20m 以上のクレーター的位置もマッピングすることで、クレーター密度を測定することができるようになった。この結果、フォボスのクレーター密度はどの地域も幾何学的飽和に至っておらず、特に高緯度でクレーター密度が小さいことがわかった。また Sub-Mars 側と Anti-Mars 側ではクレーターサイズ頻度分布図が非常に類似している傾向があることがわかった。さらにフォボス上で見られるボルダーの大きさ、位置も調査することで、ボルダーは大きさが直径約 20m 程度のもが多く、赤道方向に多く分布していることがわかった。形成要因不明なリッジも発見した。こうした解析結果は既存の仮説に否定的である。本講演では、小惑星との衝突を起源とする新たな仮説で上の解析結果を矛盾なく説明できることを示す。

参考文献

- [1]Soter, S. and Harris, A., 1978. Nature 268, 421-422
- [2]Murray, J.B., Iliffe, J.C., 2011. Geomorphology. Geol. Soc. Spec. Publ., London, pp.21-41
- [3]Kenneth, R.R., James, W. H., 2013. Planetary and Space Science, 69-95

スーパー地球のマントル対流の数値シミュレーション Numerical models of thermal convection in the mantle of super-Earths

立浪 千尋¹, 小河 正基^{2*}, 亀山 真典³

Chihiro Tachinami¹, Masaki Ogawa^{2*}, Masanori Kameyama³

¹ 東京工業大学地球惑星科学専攻, ² 東京大学大学院総合文化研究科, ³ 愛媛大学地球ダイナミクス研究センター

¹Department of Earth Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Department of Earth Science and Astronomy, University of Tokyo at Komaba, ³Geodynamic Research Center, Ehime University

Numerical models are developed for thermal convection of compressible fluid in a deep mantle with the ratio of its depth to the thermal scale height D much larger than 1 to understand the nature of mantle convection in super-Earths. The viscosity is constant and the Prandtl number is infinite. A linear stability analysis shows that thermal convection is possible in super-Earths only when the thermal expansivity significantly decreases with increasing pressure, as is the case for the real mantle materials; thermal convection is totally inhibited when the thermal expansivity is constant. A systematic numerical simulation carried out to clarify the Nusselt number-Rayleigh number relationship shows that the efficiency of convective heat transport decreases by a factor of up to 2 as D increases. The Nusselt number may not be high enough to extract all the heat generated in the mantle by heat producing elements, and it may be difficult to sustain core-dynamo in super-Earths. Our numerical experiments also show that the Nusselt number significantly depends on the surface temperature. The mantle evolution may depend more strongly on the surface environment in super-Earths than it does in the terrestrial planets of our solar system.

キーワード: スーパー地球, マントル対流, 断熱圧縮, 数値シミュレーション

Keywords: super-Earth, mantle convection, adiabatic compression, numerical simulation

金星のレオロジー層構造から推察する金星表面のテクトニクス Rheological structure in Venus and implication to its surface tectonics

東 真太郎^{1*}, 片山 郁夫¹, 中久喜 伴益¹

Shintaro Azuma^{1*}, Ikuo Katayama¹, Tomoeiki Nakakuki¹

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Hiroshima University, Department of Earth and Planetary Systems Science

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。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。しかし、ケイ酸塩鉱物のような強い化学結合を持つ鉱物において、比較的低温では power-law タイプの流動則は適応できず、パイレスメカニズムが支配的になることが知られている (Tsen and Carter 1987)。

本研究では流動則からの外挿ではなく、改良型 Griggs 変形試験機を用い、斜長石とオリピンの2相系で変形実験を行い、強度比を直接決定しようと試みた。変形実験の条件は $T=600-1000$ °C, $P=2$ GPa である。また金星の表面温度 $T=470$ °C 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)、無水条件で実験を行った。さらに、変形速度に対するモホにおける強度差の影響を評価するために、一次元の数値計算も行った。一次元の数値計算では、3つのモデルを用意した、それぞれのモデルはレオロジー層構造の違いによって分類される。1つ目のモデルは地殻とマントルの間に強度差が無いもの、2つ目と3つ目は、モホにそれぞれ2桁、4桁の強度差があるモデルである。そして、深さ100km (下面の境界) における変形速度を 20cm/year、応力を 100MPa と仮定したときのそれぞれのモデルにおける表面速度 (上面の境界) を観察する。

無水条件における変形実験により、全ての温度条件でオリピンが斜長石よりも強度が大きいことが確認された。これは転位クリープの外挿からでは起こりえないことから、オリピン及び、斜長石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。この無水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領域であり、モホにおいて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、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、モホ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出来ない。また一次元の数値計算からも、モホにおいて大きい強度差があればあるほど、下面の速度に対して、表面速度は遅くなることがわかった。それゆえ、モホに大きい強度差があるとき、地殻の部分はマントルの変形に巻き込まれそうにない。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つの要因ではないかと考察される。

キーワード: 斜長石, かんらん石, 金星, 相対強度, 変形実験, テクトニクス

Keywords: plagioclase, olivine, venus, relative strength, deformation experiment, tectonics

予備圧縮したメタンのメガバール領域レーザー衝撃圧縮実験 Laser shock compression experiments for precompressed Methane in Mbar regime

小川 剛史^{1*}, 尾崎 典雅¹, Marius Millot³, 佐野 孝好², 浅海 雄人¹, 池谷 正太郎¹, 浦西 宏幸¹, 喜田 美佳¹, 近藤 良彦¹, 佐藤 友哉¹, 中塚 和樹¹, 宮西 宏併¹, 楊宗翰¹, Raymond Jeanloz³, Burkhard Militzer³, Gilbert W. Collins⁴, J. Ryan Rygg⁴, Jon H. Eggert⁴, Philip Sterne⁴, 坂和 洋一², 兒玉 了祐¹

Tsuyoshi Ogawa^{1*}, Norimasa Ozaki¹, Marius Millot³, Takayoshi Sano², Yuto Asaumi¹, Syotaro Iketani¹, Hiroyuki Uranishi¹, Mika Kita¹, Yoshihiko Kondo¹, Yuya Sato¹, Kazuki Nakatsuka¹, Kohei Miyanishi¹, Yang Tsung-Han¹, Raymond Jeanloz³, Burkhard Militzer³, Gilbert W. Collins⁴, J. Ryan Rygg⁴, Jon H. Eggert⁴, Philip Sterne⁴, Youichi Sakawa², Ryosuke Kodama¹

¹ 大阪大学大学院工学研究科, ² 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ³ カリフォルニア大学バークレー校, ⁴ ローレンス・リバモア国立研究所

¹Graduate School of Engineering, Osaka University, ²Institute of Laser Engineering, Osaka University, ³University of California Berkeley, ⁴Lawrence Livermore National Laboratory

The properties of methane at high density and temperature are of crucial interest for understanding the interiors of many giant planets, and the origin of their strong magnetic fields, as CH₄ is typically considered to represent 25 % of the planet's icy layer. Methane is a hydrogen-rich molecular material that is expected to dissociate at high pressure and temperature into an electrically conductive fluid.

We used static and dynamic coupling compression technique to generate icy planets core conditions in laboratory.

Methane was precompressed to ~0.4 GPa by DAC and then was shock compressed dynamically to pressures of more than 100 GPa.

We simultaneously measured pressure, density, temperature, and optical reflectivity for the highly compressed methane with velocity interferometers (VISAR) and optical pyrometer (SOP).

This work was performed under the joint research project of the ILE, Osaka University.

This work was partially supported by grants from the Core-to-Core Program of the JSPS, the Global COE Program CEDI of the MEXT, and the CREST of the JST.

キーワード: 高強度レーザー, 静動カップリング圧縮法, メタン, ダイヤモンドアンビルセル

Keywords: High-Power Laser, static and dynamic coupling compression, Methane, DAC

イオン性流体-プラズマ遷移領域における水および混合物の物性計測実験 Physical properties of water and alcohol?water mixtures in the transition region between ionic fluid and plasma

喜田 美佳^{1*}, 尾崎 典雅¹, 奥地拓生², 木村友亮³, 佐野考好², 坂和洋一², 兒玉了祐¹

Mika Kita^{1*}, Norimasa Ozaki¹, OKUCHI, Takuo², KIMURA, Tomoaki³, SANO, Takayoshi², SAKAWA, Youichi², KODAMA, Ryosuke¹

¹ 大阪大学工学研究科, ² 岡山大学地球物質科学センター, ³ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ⁴ 大阪大学レーザー核融合研究センター

¹Grad. school of Eng., Osaka Univ., ²Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama Univ., ³Geodynamics Research Center, Ehime Univ., ⁴Institute of Laser Engineering, Osaka Univ.

天王星や海王星をはじめとする氷巨大惑星の内部は、水、アンモニア、メタンなどの混合物で構成されていると考えられている。これら氷惑星の組成や形成過程を理解することは、既存の状態方程式に依存している。しかしながら、高温高圧下の状態方程式や物性データは、特に物理的・化学的性質が大きく変わる領域、すなわちイオン性流体から電子性流体（プラズマ）に遷移する領域において決定的に不足している。惑星内部の化学変化などを理解するためには、この遷移領域での物性実験が必要である。

ここでは、水と混合物に関する 100 GPa 超までのレーザー衝撃圧縮実験を報告する。

キーワード: 氷巨大惑星, 水, 混合物, 相転移, レーザー衝撃圧縮, 状態方程式

Keywords: ice giants, water, mixture, phase transition, laser shock compression, equation of state

ケンタウルス族の軌道進化と彗星活動 Orbital Evolution of Centaurs and their activity

樋口 有理可^{1*}, 小林 建¹, 井田 茂¹
Arika Higuchi^{1*}, Takeru Kobayashi¹, Shigeru Ida¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

ケンタウルス族の軌道進化とその彗星活動について調べた。

ケンタウルス族とは、カイパーベルト領域から太陽系の内側領域への軌道進化の途中にある天体であると考えられている。巨大惑星からの強い摂動により、ケンタウルス族の力学的寿命は短く、先行研究の軌道計算によると、それは 10^7 年以下である。3分の2は太陽系外に放出され、3分の1はさらに内側に軌道進化することで木星族彗星となる (Volk&Malhotra 2008 など)。Jewitt (2009) によると、これまでに16個の彗星活動をするケンタウルス族が観測により発見されている。ケンタウルス族が彗星活動を行っていることは非常に不思議であり、通常の彗星のように説明できない。なぜなら、これらの天体が存在する場所は、水の氷が昇華するには低温すぎるし、一酸化炭素の氷を保持するには高温すぎるからである。そこで、異なる彗星活動のメカニズムが提唱・議論されている (Jewitt 2009 など)。それは、もしケンタウルス族が非結晶氷を持っているとしたら、その構造の隙間に十分な一酸化炭素の気体を閉じ込めておくことができる、非結晶氷が結晶化するその組み換えの過程で一酸化炭素の気体が放出されるというものである。観測は、このような熱による物理過程が彗星活動の起源であることを支持している。しかし、この彗星活動がどれだけの期間維持されるのかはわかっていない。Guilbert (2012) は氷天体の熱進化を、3次元モデルを用いて季節変化も含めて詳細に調べた。その結果、結晶化は 10^4 - 10^5 年で完了するということがわかった。しかしながら、彼女の計算では固定された円軌道を仮定しており、短時間に大きな軌道進化を経験するケンタウルス族にそのままあてはめることはできない。

そこで、我々は熱進化モデルを軌道計算に組み込むことを目標とする。本研究では、ケンタウルス族の軌道進化の計算と併せて、天体の結晶化率を計算した。結晶化率の計算には、香内ら 1994 の、温度が一定でない場合も使える結晶化率の計算式である式 (26) を使用した。温度は、軌道計算で求まる太陽からの距離の関数として与えた。その結果、結晶化にかかる時間は非常に短く、Guilbert(2012) で求められた内部への熱伝導を考慮した結晶化タイムスケールより短いことが分かった。この Guilbert(2012) のタイムスケールを用いると、非結晶氷を持つ、すなわち彗星活動をしていると考えられるケンタウルス族の軌道分布は観測で得られた分布をおおまかに再現することが分かった。発表では、より詳細な数値計算の結果と、それから見積もられるケンタウルス族の流入量について議論する予定である。

キーワード: ケンタウルス族, 軌道進化, 非結晶氷, 彗星活動

Keywords: Centaurs, orbital evolution, amorphous ice, cometary activity

地球型惑星における衝突起源大気組成の多様性 Chemical composition diversity among impact-generated atmospheres on terrestrial planets: The effect of impact velocity

桑原 秀治^{1*}, 杉田 精司¹
Hideharu Kuwahara^{1*}, Seiji Sugita¹

¹ 東京大学 複雑理工学専攻

¹Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

Prebiotic chemistry and climate conditions of early Earth and/or Mars would have been suitable for origin and evolution of life. The chemical composition of atmospheres during early evolution stages is important for understanding these factors.

Impact-generated atmospheres would occur on terrestrial planets immediately after their accretion and perhaps during the late heavy bombardment (LHB) period in the solar system. The approaches taken by previous studies on impact-generated atmospheres, however, may not have been accurate; they estimate the composition of impact-induced vapor with equilibrium calculation as a function of temperature under constant pressures [e.g., 1, 2]. This approach is appropriate if chemical reaction in impact-induced vapor is controlled by radiative cooling because radiative cooling decreases temperature while pressure is kept approximately constant. In reality, impact-induced vapor adiabatically expands; nevertheless such behaviors have not been considered. Entropy gain during the shock-compression phase controls the temperature-pressure pathway of the decompression phase. Thus, estimation of the initial entropy gain and subsequent quenching are the key for accurate estimation of the chemical composition of impact-generated atmospheres. The goal of this study is to model chemistry within adiabatically expanding impact-induced vapor, and investigate how sensitively impact-generated atmospheres depend on impact velocity.

Thermodynamically stable chemical compositions depend on temperature, pressure, and elemental compositions. Thus, constraints on these values are required for modeling chemical compositions of impact-generated terrestrial atmospheres. In this study, we assume CI chondrites as the impactor that mainly contributes volatiles to terrestrial planets during the heavy bombardment [e.g., 3]. To determine the temperature-pressure paths of adiabatically expanding vapor, we estimate the entropy gain during the shock-compression phase using the Hugoniot equation of state for silica [4]. Then, we calculate the major composition of a gas and condensed phase along isentropic lines within a range of pressures (0.01-10000 bars) and temperatures (500-2500 K). The model calculations are performed using a Gibbs free energy minimization code [5]. Elements included in our calculations are H, C, O, N, S, Mg, Al, Si, Fe. Elemental abundances used in our calculations are taken from [6].

Our calculation results show that the redox disproportionation of carbon occurs at low entropy states achieved by low-velocity impacts (<13km/s). For high-velocity impact (>17km/s), impact-induced vapor is rich in diatomic molecules, such as CO and H₂. For low-velocity impact-induced vapor (<13km/s), CH₄ becomes thermodynamically stable even at high quenching temperatures (>1000K). This is because the adiabatic curve for low entropy states undergoes higher pressures at a given temperature. High pressure is thermodynamically favorable for the formation of polyatomic molecules, such as CH₄ and NH₃; i.e., Le Chatelier's principle. These calculation results strongly suggest that the chemical compositions of impact-generated atmospheres among terrestrial planets may be different even if the composition of accreting material were same, suggesting that early Mars and early Earth may have possessed a CH₄-rich reducing atmosphere and a CO- and CO₂-rich more oxidizing atmosphere, respectively.

References: [1] Hashimoto G. L. et al. (2007) JGR, 112, E05010. [2] Schaefer L. and Fegley B. (2010) Icarus, 208, 438-448. [3] Alexander C. M. O' D. (2012) Science, 337, 721-723. [4] Kurosawa K. et al. (2012) Am. Inst. of Phys., 855-858. [5] Gordon S. and McBride B. J. (1994) NASA Reference Publication 1311. [6] Wasson J. T. and Kallemeyn G. W. (1988) Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A, 325, 535-544.

キーワード: 衝突, 大気組成, 地球型惑星

Keywords: Impact, Atmospheric composition, terrestrial planets

クレーターエジェクタ速度のスケール則に関する実験的研究

Impact experiments on a granular layer: an implication for crater scaling laws and the artificial Hayabusa 2 SCI crater

辻堂 さやか^{1*}, 鈴木 絢子², 荒川 政彦¹, 保井 みなみ³Sayaka Tsujido^{1*}, Ayako Suzuki², Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui³¹神戸大学大学院理学研究科, ²惑星科学研究センター, ³神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Center for Planetary Science, ³Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

・はじめに

小天体表面での衝突クレーター形成に伴う放出物の速度分布を理解することは、小惑星のレゴリス形成や表層の衝突進化、微惑星の衝突集積過程を考える上で重要である。太陽系の小天体表層は様々な物性を持つと考えられる。すなわち、表層の空隙率、強度、密度等は、その形成進化過程により大きく変化する。したがって、小天体の衝突クレーター形成過程を明らかにするためには、強度、空隙率を系統的に変化させた標的におけるクレーター形成定数が必要である。

本研究では、空隙率を40~90%の間で変化させた粒子層に対するクレーター形成実験を行い、クレータースケール則に対する空隙率の影響を調べた。そのために、各空隙率において、弾丸密度、衝突速度を変化させた実験を行い、クレーターサイズ、エジェクタ速度分布、エジェクタ形状等の特徴を調べた。一方、この様な広いパラメーター範囲における実験結果は「はやぶさ2」に搭載予定の小型衝突装置 (Small Carry-on Impactor) によって形成されるクレーターから、小惑星表層の物性を明らかにするためにも重要である。エジェクタカーテンの形やその速度分布から表面物質の強度や空隙率、さらには層構造等を明らかにすることが可能となる。

・実験方法

クレーター形成実験には神戸大学の縦型軽ガス銃を用いた。弾丸加速ガスがエジェクタカーテンへ与える影響を排除するため、専用のサボストッパーを開発した。このサボストッパーにより、標的を入れたチャンバーへの加速ガスの侵入をほぼ完全に防ぐことができた。

標的粒子には、直径100 μmまたは500 μmのガラスビーズ球、直径1.3mmの粒状パーライト、あるいはそれを粉砕した直径100 μm程度の不定形パーライトの4種類を用いた。直径約30cm、深さ約11cmのステンレス製容器に粒子を入れ、標的粒子層を準備した。直径100 μmのガラスビーズ、直径500 μmのガラスビーズ、直径1.3mmのパーライトの空隙率はそれぞれ、37.6%、41.4%、96.7%、粉砕したパーライトの空隙率は84.9~88.4%である。標的を入れるチャンバー内の圧力は、 $<10^3$ Paもしくは大気圧とした。また、弾丸には、密度の異なる鉄、ジルコニア、アルミナ、ガラス、ナイロンの5種類を用いた。弾丸はどれも直径(2r)3mmの球である。衝突速度(v_i)は、25~217 m/sとした。

エジェクタ速度分布のスケール則を求めるため、放出された個々の標的粒子の軌跡を計測する実験を行った。粒子層に直径500 μmのガラスビーズ、弾丸にアルミナ球を用い、高速デジタルビデオカメラ (NAC, MEMRECAM HX73) を使用して、標的粒子放出の様子を撮影した。撮影はエジェクタカーテンの片側のみを拡大して、撮影速度10000コマ/秒で行った。取得したビデオから約30個の粒子の軌跡を追い、それぞれの粒子の放出速度と放出位置の関係を求めた。

次に、クレーターサイズのスケール則とエジェクタカーテンの形状を調べる実験を行った。直径100 μmのガラスビーズ層に密度の異なる5種類の弾丸を一定速度で撃ち込み、弾丸密度によるクレーターサイズの違い、またエジェクタカーテンの角度の変化を観察した。さらに、パーライトを用いた高空隙率層に対しても同様の実験を行い、クレーターの直径、深さを計測した。

・結果

個々の粒子の放出速度・位置計測により、衝突点に近いところから飛び出した粒子ほど放出速度が大きく、放出速度 v_0 と放出位置 x_0 に関して $v_0/v_i=0.66(x_0/r)^{-1.6}$ という関係を求めることができた。また、放出位置によらず、放出角度はほぼ一定(40°)となることがわかった。

一方、クレーターサイズに関して、 $[R*(t/m)^{1/3}]/[(t/p)^{0.03}]=1.9*[gr/(v_i^2)]^{-0.17}$ という関係が明らかになった(R:クレーター直径, t :粒子層密度, p :弾丸密度, m :弾丸質量, g :重力加速度)。この式の係数からガラスビーズ粒子層に対してカップリングパラメーター($C=r_0 v_i \mu^{-1}$)の2つの変数、 $\mu=0.40$, $\beta=0.36$ を決めることができた。

さらに破砕パーライト>80%の高空隙率粒子層では、空隙率が大きい程、クレーター直径は徐々に小さくなり、クレーター深さは大幅に大きくなることがわかった。また、空隙率83~88%の間でincompressiveクレーターからcompressiveクレーターへの形態変化を発見した。

衝突実験と数値計算におけるクレーターレイの形成 Crater rays in impact experiments and numerical simulations

門野 敏彦^{1*}, 鈴木 絢子², 和田 浩二³, 山本 聡⁴, 荒川 政彦⁵, 杉田 精司⁶, 中村 昭子⁵

Toshihiko Kadono^{1*}, Ayako Suzuki², Koji Wada³, Satoru Yamamoto⁴, Masahiko Arakawa⁵, Seiji Sugita⁶, Akiko M. Nakamura⁵

¹産業医科大学, ²惑星科学研究センター, ³惑星探査研究センター, ⁴国立環境研究所, ⁵神戸大学, ⁶東京大学

¹University of Occupational and Environmental Health, ²Center of Planetary Science, ³Planetary Exploration Research Center,

⁴National Institute for Environmental Studies, ⁵Kobe University, ⁶University of Tokyo

惑星や衛星表面上のクレーターに付随するレイは実験室でも出現する。天体上のレイや実験室のレイの形成機構は古くから議論されてきているが決定的な結論は得られていないようである。ここでは、粉体への室内衝突実験を通して放出物が飛散する際にパターンが形成される様子を高速カメラによって撮影し、最終的にクレーター周辺に出来るレイのパターンの観察、さらに離散要素法を使った数値計算による粉体が運動する際のパターン形成の様子を調べ、天体上に残されたクレーターに付随するレイのパターンとの比較を行った。

定性的なレイの特徴及び形成の機構として

- ・レイは必ずしも動径方向にまっすぐに伸びているわけではなく、互いに絡み合って複雑な構造を示している
- ・飛散している放出粒子はお互いに非弾性衝突していることがわかった。

キーワード: クレーターレイ

Keywords: crater ray

石灰岩標的において衝突角度がクレーターサイズに及ぼす影響 Effect of incident angle on crater dimensions with limestone targets

鈴木 絢子^{1*}, 木内 真人², 河本 泰成², 松本 恵里², 門野 敏彦³, 中村 昭子², 長谷川 直⁴, 黒澤 耕介⁴, 荒川 政彦², 杉田 精司⁵
 Ayako Suzuki^{1*}, Masato Kiuchi², Yasunari Komoto², Eri Matsumoto², Toshihiko Kadono³, Akiko Nakamura², Sunao Hasegawa⁴,
 Kosuke Kurosawa⁴, Masahiko Arakawa², Seiji Sugita⁵

¹ 惑星科学研究センター, 神戸大学, ² 神戸大学, ³ 産業医科大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構, 宇宙科学研究所, ⁵ 東京大学

¹CPS, Kobe Univ., ²Kobe Univ., ³Univ. Occupational and Environmental Health, ⁴ISAS / JAXA, ⁵Univ. Tokyo

衝突クレーターは太陽系内の全ての固体天体上で普遍的に見られるが、それらの多くは衝突角度が垂直以外の斜め衝突でできたと考えられている。衝突角度の影響は、クレーターのスケール則や二次クレーター形成において重要であると考えられるが、衝突銃自身の構造やシンプルな系で物理を理解する目的などから、特に強度支配域での斜め衝突実験は研究例が少ない。近年の惑星探査技術の向上によって、より小さいサイズのクレーターまで観察可能になってきたことに加えて、Carancas 衝突イベント (e.g., Tancredi et al. 2009) や Kamil クレーター (Folco et al. 2011) など、地球上でも強度支配域と考えられるクレーターがたくさん見ついている。強度支配域でのクレーターサイズや形状における衝突角度の影響を明らかにするため、石灰岩への斜め衝突実験を行った。

実験は、宇宙航空研究機構・宇宙科学研究所スペースプラズマ実験施設の二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸には直径 7 mm のナイロン球、標的には一辺 15 cm の立方体に加工した石灰岩を用いた。標的石灰岩の引っ張り強度、密度、空隙率は、それぞれ 4.6 MPa, 2.24 g/cm³, 約 17% である (Suzuki et al. 2012)。衝突速度は約 2.5 km/s で一定とし、標的への入射角度を水平から $\theta = 5, 10, 20, 30, 45, 90^\circ$ (垂直衝突) の 6 種類に変化させた。

衝突の様子は、高速デジタルビデオカメラで観察した。ショット後に標的上にできたクレーターの直径 (進行方向とそれに垂直方向) をノギスを用いて計測した。また、デジタルマイクロスコブ (キーエンス, VHX-1000) を用いてクレーターの立体図を起し、クレーターの体積と深さを得た。

衝突角度が 90° のときは、中心にピットを持つクレーターが形成されたが、 45° 以下では顕著なピットは見られなかった。できたクレーターの直径 (進行・垂直方向)、深さ、体積が衝突角度によってどのように変化するか調べた。それぞれ $\theta = 90^\circ$ での値で規格化すると、直径 (進行・垂直方向)、深さ、体積は、 $(\sin \theta)^{0.54 \pm 0.01}$, $(\sin \theta)^{0.49 \pm 0.01}$, $(\sin \theta)^{0.66 \pm 0.02}$, $(\sin \theta)^{1.61 \pm 0.09}$ に比例することがわかった。体積に着目してみると、 $\sin \theta$ のべきの値は、花崗岩にアルミニウム弾丸を衝突させた場合 (Gault and Wedekind 1978; 1.80 ± 0.16) と近い。強度支配域では、クレーターの体積は衝突のエネルギーのほぼ 1 乗 (衝突速度のほぼ 2 乗) に比例する。クレーター体積における衝突角度の影響は、衝突速度の垂直成分として考慮すれば良いという概念 (Gault and Wedekind 1978; Chapman and Mckinnon 1986) を比較的再現した結果となった。

クレーターの進行方向直径を垂直方向直径で規格化した値は、垂直から $\theta = 5^\circ$ に至るまで 1.11 ± 0.11 とほぼ一定で、進行・垂直直径比が 1 からずれ始める角度は Gault and Wedekind 1978 の 15° , Burchell and Whitehorn 2003 の 5° よりさらに小さくなった。これは、ナイロン弾丸は破壊されやすく弾丸の "impact decapitation" (e.g., Burchell and Whitehorn, 2003) が起こらず、進行方向の直径も垂直方向と同様に、減少に伴って小さくなったためであると考えられる。ただし、 $\theta = 5^\circ$ でできたクレーターでは、下流方向のリム付近が盛り上がり、クラックが入ったものはがれなかったと考えられる部分も観察された。強度支配域のクレーターでは、スポール破片がクレーターの直径に大きな役割を果たす。スポール破片がクレーター直径に及ぼす影響を排除するためにはショット数を増やす必要がある。

進行方向直径と垂直方向直径の平均値を平均直径とし、クレーターの深さを平均直径で規格化した値は、 $\theta = 20^\circ$ から 90° でほぼ一定で、 0.16 ± 0.01 となった。 $\theta = 5, 10^\circ$ では小さい値となった。直径・深さそれぞれの $\sin \theta$ 依存性を鑑みると、衝突角度が小さくなるにつれて直径より深さの方が小さくなりやすいことが効いている。これは、本実験で用いたナイロン弾丸の密度は石灰岩標的の約半分であり、弾丸が潜り込みにくい条件であったためと考えられる。

表面層構造の効果による見かけの熱慣性 Effect of surface layering on the apparent thermal inertia

吉田 朱里^{1*}, 豊田 丈典¹, 栗田 敬¹
akari yoshida^{1*}, Takenori Toyota¹, Kei Kurita¹

¹ 東京大学 地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Thermal inertia is a key property controlling diurnal temperature variation at the surface of planets. It is defined as a function of thermal conductivity, heat capacity, and density, all of which depend primarily on the physical structure of the surface layer. Thermal inertia of Mars has been derived from Viking, Mars Global Surveyor and Mars Odyssey data. It tells us a structure of the surface layer. For example, low thermal inertia indicates extensive dust deposits and higher thermal inertia suggests combination of particle size, rock abundance and induration of soils.

An extremely low thermal inertia values such as 5-60 tiu and 24-60 tiu have been reported in the equatorial and middle latitudes from these observations. Since the thermal conductivity is the most sensitive to the particle size under martian atmospheric pressure, such a low thermal inertia indicates small grain size as low as 10 micron. But, these particles can be easily blown away by a strong wind on Mars and it is difficult for them to form a uniform layer on the structure. In this presentation we consider the possibility that a layered structure yields apparent low thermal inertia.

To demonstrate possible effect of the layering we conducted laboratory experiments. We utilized the structure having an acrylic plate on top of a polystyrene form block or vesiculated particle layer. They are heated periodically by an infrared lamp from above. Using the infrared thermometer and thermocouples, we measured the temperature at the surface, bottom of the acrylic plate and inside the lower Polystyrene form and the granular layer.

Thermal relaxation time of this layered systems is the most fundamental factor here, which represents the time that the amplitude of temperature inside the material becomes 1/e compared with the surface.

We estimated the thermal inertia from experimental data. It is found that the thermal inertia is lower than the value calculated from the physical properties when the given period is longer than the thermal relaxation time of the surface layer. It is because the material behaves infinite body when the period is shorter than the thermal relaxation time.

On the other hand it behaves as a finite body if the period is longer than the relaxation time. In this situation the temperature at the bottom of the surface acrylic plate becomes high because of lower thermal conductivity of the lower layer. This means the thermal gradient becomes lower and the heat flux to the interior seems small, which results in apparently low thermal inertia.

In our experiments we can demonstrate a simple layered structure; a thin layer having higher thermal conductivity on top of a layer with low thermal conductivity can produce apparently low thermal inertia. In the martian remote sensing diurnal temperature variation is used to infer the thermal inertia, which measures the value of the surface within the thermal penetration depth of several to 10 cm. If the layered structure exists in this range having lower conductivity of the lower layer.

We discuss several geological processes to produce layered structure on Mars.

Keywords: thermal inertia, geological structure, thermal relaxation time

物性の温度依存性と表面ラフネスが小惑星 1999JU3 の表面温度に及ぼす効果について Effects of the temperature dependences and surface roughness of the asteroid 1999JU3 on the surface temperature mapping

滝田 隼^{1*}, 田中 智², 千秋 博紀³, 岡田 達明²

Jun Takita^{1*}, Satoshi Tanaka², Hiroki Senshu³, Tatsuki Okada²

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

¹Graduate school of science, Tokyo university, ²Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ³Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

はやぶさ2計画で実施される中間赤外カメラを用いた対象天体の表面温度観測で取得されたデータから、空間分解された表面温度分布を再現する仕組みの解明とそれを実現する計算手法を確立することが急務である。今回、数値計算上の制約から考慮されないことが多い熱伝導率や比熱の温度依存性を取り入れた計算を行い、また表面ラフネスが天体表面温度に与える効果について検討した。天体表面に細かな凹凸があることで生じる熱的な特徴に関しては、この構造自体が赤外カメラの持つ空間分解能を超えると同時に、仮に取得しても数値計算上現実的な節点数を大幅に上回ることから通常の熱モデルでは扱いが困難となる。しかし NEO やメインベルト小惑星の地上観測が行われた 90 年代当時から指摘されているようにこれは単に技術的な問題ではなく、表面輝度のライトカーブの再現には天体表面に見られる特徴的なミクロスケールの凹凸構造を適切に扱うパラメータが導入されている。また近年の米探査機の熱撮像データから明らかになった空間分解されたテンペル第1彗星やハートレイ第2彗星の表面温度分布の数値上の再現においても、近接撮像で取得できるレベルのマクロな形状モデルだけでは不十分で、やはりラフネスの効果なしでは成功していない。これの現状を鑑みると、温度分布およびその時間履歴から天体表面の物理的状態を解明するためには天体の軌道要素や固有の形状モデルだけでなく、天体の表面が持つ光学および熱的な表面特性をうまく近似するモデルの適用が必要である。こうすることでまた、表面の凹凸により天体表面の異なる面同士の間相互作用である輻射熱に起因する自己・相互加熱の効果も計算に含めることが可能となり、表面温度分布を大きく変える可能性が期待できる。

今回の検討では軌道6要素から天体の位置を計算し、これに自転軸の向きを合わせて考慮することで太陽からの距離変化と太陽光の入射角をシミュレートした。対象天体の形状に関しては球体を仮定し、この境界条件の下で非定常1次元熱伝導方程式を差分法で解くスキームを採用した。これを用いて天体表面の緯度経度をパラメータとして計算することで表面全体のマッピングを行った。天体の持つ物性に関しては、初期値は深さ方向に一様な値だが、温度で変化する熱伝導率と比熱を用いた。ただし密度は温度依存しないとした。これらの温度関数は月レゴリスの計測実験で得られた結果を応用したものである。熱物性の温度依存性を考慮した場合、例えば近日点付近においては1自転における最大温度が10K程度低くなるという結果が得られた。この結果は温度が高くなると熱慣性が大きくなることと整合的であるが、逆に TIR を用いた熱慣性の推定にはこの不確実性が無視できない可能性が高いことが今回示唆された。表面ラフネスに関しては、現状では初等的段階ではあるが、いくつかの簡単な近似モデルを適用してこれが表面温度に与える効果を見積もった。この結果も本講演で公表する予定である。

天体表面の熱慣性推定に対する TIR の適切な撮像レートを決定するためにも、表面温度に及ぼすラフネスや形状モデルのもつ幾何学的あるいは光学的な効果と、表面物質がもつ固有の熱慣性やその温度依存性をはじめとする熱的な効果とを明確に識別することが重要となる。これはまた、はやぶさ2探査で計画されている衝突装置によって人工クレータを生成する実験で発生するイジェクタ並びに衝突中心の観測可能性に対しても重要と思われる。

キーワード: はやぶさ2, 中間赤外カメラ, 熱慣性, 温度依存性, ラフネス, 熱伝導方程式

Keywords: Hayabusa2, thermal infrared imager, thermal inertia, temperature dependence, roughness, equation of heat conduction

真空下における焼結した粉体の熱伝導率測定

Thermal conductivity measurements of sintered powder under vacuum condition

津田 彰子^{1*}, 小川 和律¹, 坂谷 尚哉¹, 飯島 祐一¹, 本田 理恵², 田中 智¹Shoko Tsuda^{1*}, Kazunori Ogawa¹, Naoya Sakatani¹, Yu-ichi Iijima¹, Rie Honda², Satoshi Tanaka¹¹ 宇宙科学研究所, ² 高知大学¹Institute of Space and Astronautical Science, ²Kochi University

原始太陽系円盤内では粉体物質であるダストが集積して微惑星が形成され、それらの衝突合体によって原始惑星が形成されたと考えられている。衝突合体の効率は微惑星の物性（密度や強度）に依存するが、微惑星の初期物性、また熱変成によるそれらの時間変化については十分に理解されていない。また、微惑星の一部は隕石の母天体となり、隕石試料に残った熱変成の証拠から微惑星のサイズや形成年代を探る事が可能である。したがって、微惑星の熱進化、更にそれに伴う物性変化を知る事は重要である。

微惑星構成物質の熱伝導率はその熱進化を解明する上での重要パラメータの一つとしてあげられる。岩石の熱伝導率は一般的に 1W/mK 程度であるが、一方真空下での粉体は 0.001 W/mK オーダーであり、岩石に比べてきわめて低い値を持つ。このために、粉体の集まりである微惑星は断熱効果を持ち、直径 10 km 程度の小さな天体でも内部が高温になる可能性がある。Henke et al. (2012) は、粉体からなる多孔質物質な微惑星が 26Al と 60Fe を熱源として加熱され、コンドライト隕石の母天体となる可能性を調査した。その際、内部温度の上昇により粉体の焼結が起こり、熱伝導率が高くなる効果を取り入れた。Henke らの計算では、熱伝導率は空隙率のみの関数としており、粉体とコンドライト隕石のそれぞれの熱伝導率には実測値を適用したが、焼結体の熱伝導率の実測値は用いていない。

これまで粉体の熱伝導率は真空下で測定されているが、焼結体の熱伝導率が測定された例はほとんどない。Sakatani et al. (2012) は粉体のアナログ物質としてガラスビーズの熱伝導率を測定しており、その際、粉体の熱伝導率と粉体にかかる圧力に正の相関があることを観測している。これは圧力によって粉体間の接触面積が増加したためと考えられ、この結果から粉体焼結による接触面積増加に伴って熱伝導率が増加することが推測される。よって、まずは、空隙率ではなく、粉体焼結時の接触面積に対する熱伝導率の変化を精査する必要がある。

以上の事から、本研究では、集積期の微惑星の熱史に対する焼結の効果の解明を目的として、様々な条件下で作成した粉体のアナログ物質であるガラスビーズの焼結体の真空中での熱物性を測定するものとする。特に、焼結体の熱伝導率の接触面積依存性を明らかにすることを目的とする。

粉体においては焼結によって粒子間にネックが形成され、加熱温度や加熱継続時間によりネックの大きさ、すなわち接触面積が変化する。そこで接触面積をコントロールした焼結体試料を作成するために、ネック半径の加熱温度と加熱継続時間による変化を理論式 (Sirono, 1999; Poppe, 2003) を用いて推定した。その結果、加熱継続時間によってネック半径を 10 倍大きくするには 1000 時間加熱させる必要があり、これは加熱温度を 100 K 上げることと同等であることが分かった。よって、種々の焼結体を効率的に作成するために、本研究では加熱温度を主に変化させることにより、焼結体の接触面積をコントロールするものとした。また、接触面積は光学顕微鏡を用いて粒子を直接同定することとした。

焼結体の熱伝導率測定にはサンプル中に置かれたヒーター線を加熱したときのその温度上昇率から熱伝導率を推定する line heat source 法を用いることを検討している。これまでの予備実験により熱源のヒーター線に温度測定に用いる熱電対を樹脂によって接着させることで高精度の測定を実現できる見通しが立った。一方、熱電対の設置については、ヒーター線と熱電対を直接ガラスビーズ試料に埋め込んでそのまま焼結する方法と、同じ条件で焼結させた 2 つの試料で熱伝導率測定装置を挟む方法が考えられる。前者については、加熱による焼結の際にヒーター線が酸化して電気抵抗率が変化することと接着剤である樹脂が溶融してしまうことが問題となることが考えられる。よって後者の挟み込み法を選択して実験をすすめている。発表では、実験手法とその結果について報告する。

Reference

Henke et al. (2012), *Astronomy & Astrophysics*, 537, A45Poppe (2003), *ICARUS*, 164, 139-148Sakatani et al. (2012), *ICARUS*, 221, 1180-1182Sirono (1999), *Astronomy & Astrophysics*, 347, 720-723

キーワード: 焼結, 粉体, 熱伝導率

Keywords: sintering, powdered materials, thermal conductivity

粉体の低熱伝導率を考慮した微惑星の初期熱進化

Early thermal evolution of planetesimals considering low thermal conductivity of powdered materials

小川 真帆¹, 坂谷 尚哉^{1*}, 飯島 祐一¹, 小川 和律¹, 津田 彰子¹, 本田 理恵², 早川 雅彦¹Maho Ogawa¹, Naoya Sakatani^{1*}, Yu-ichi Iijima¹, Kazunori Ogawa¹, Shoko Tsuda¹, Rie Honda², Masahiko Hayakawa¹¹ 宇宙科学研究所, ² 高知大学¹Institute of Space and Astronautical Science, ²Kochi University

微惑星は原始太陽系円盤においてダストの集積により形成され、それらの衝突合体や熱変成により、原始惑星や小惑星に進化すると考えられている。衝突合体の効率は衝突天体の物性、及び内部構造に依存する。そのため、微惑星の熱変成による物性、及び内部構造の進化を考えることは重要である。これまで、隕石の分析から推定された変成温度や冷却速度などの情報と数値計算を組み合わせて、それらの母天体の熱進化を探る研究が多く成されてきたが、それらの計算における初期天体の物性値(密度や熱伝導率など)のほとんどは隕石と同じ値が用いられてきた。ダストから集積した微惑星は粉体からなる高空隙率天体であると考えられるため、上記の仮定には疑問が残る。微惑星の初期物性値は集積後の熱進化、それによる構造の変化を左右する重要なパラメータである。本研究はその物性値の中でも、特に熱伝導率に着目した。

粉体物質は同じ組成を持つ岩石に比べて、低い熱伝導率を持つことが知られている。特に真空下においては、シリケート質の物質から成る粉体は 0.001 W/mK オーダーの極度に低い熱伝導率を持つ。したがって、微惑星の初期構造として、高空隙率な粉体を仮定した場合、その後の熱進化は隕石と同様の物性を仮定した場合とは異なることが予想される。本研究は、粉体の低熱伝導率を考慮して無水の微惑星の熱進化を計算し、初期微惑星が粉体から成っていることの熱進化への影響を調査することを目的とする。

本研究では ²⁶Al と ⁶⁰Fe を熱源として、熱伝導率、空隙率、微惑星の形成年代とサイズをパラメータとし、1次元の球対称熱伝導方程式を数値計算によって解いた。本研究において最重要のパラメータである粉体の熱伝導率については、我々が別途行った真空下におけるガラスビーズ(空隙率 40%)の熱伝導率測定実験で得られた値を用いた。粉体の熱伝導率は温度の 3 乗に依存するため、熱進化中に熱伝導率の値はオーダーで変化する。熱伝導率の温度依存性についても実験データを参照し、熱計算に組み込んだ。また、初期構造による熱進化の違いを議論するために、空隙率 40% と 80% の微惑星を考え、空隙率 80% の場合は理論式により補正した熱伝導率を用いた。

計算の結果、半径 10 km 以下の微惑星であっても、微惑星中心において 2000 K 以上まで加熱されることが解った(図を参照)。これまでは、熱変成度の高い隕石が形成されるような高温まで加熱するためには、100 km 程度のサイズの微惑星が必要だと考えられてきた。本研究により、粉体の低熱伝導率を考慮することにより、10 km 以下の微惑星もコンドライト隕石、更には分化した隕石の母天体に成り得ることが明らかとなった。

熱伝導率の温度依存性を取り入れたモデルと取り入れないモデルを比較すると、前者の方がピーク温度は 500 K 程低くなった。また、後者の場合は 100 万年経過しても中心温度は最高温度を維持しているのに対し、前者の場合は 20 万年程でピーク温度の半分程度の温度まで下がることを解った。これらの傾向は温度の上昇に伴い、熱伝導率が高くなることと調和的であり、粉体熱伝導率の温度依存性をモデルに取り入れることは、微惑星の熱進化を探る上で重要である。

温度上昇によって起こる現象のひとつとして、粉体の焼結がある。粉体の焼結により熱伝導率は上昇し、その後の熱進化に影響を与える。また、焼結による物性変化は微惑星の衝突合体を考える上でも重要であろう。本発表では、この焼結現象を熱計算モデルに取り入れた結果も紹介する。

キーワード: 粉体, 微惑星, 熱進化

Keywords: powdered materials, planetesimal, thermal evolution

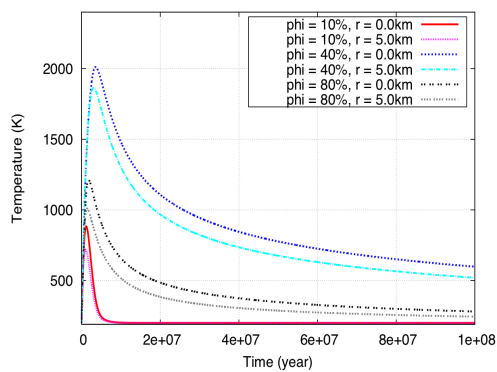


Figure: Thermal evolution of planetesimals of 10 km radius formed at 2 m.y. after CAI formation. "phi" and "r" in the legend refer to the porosity and distance from the center, respectively.

複数回衝突を受けた氷天体の衝突破壊強度に関する実験的研究

Experimental study on the impact strength of planetary bodies damaged by multiple collision

羽山 遼¹, 荒川 政彦^{1*}, 保井 みなみ², 鳶生 有理³

Ryo Hayama¹, Masahiko Arakawa^{1*}, Minami Yasui², Yuri Shimaki³

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部, ³ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ³Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

はじめに：氷小天体同士の高速度衝突破壊は、外惑星領域における微惑星成長やカイパーベルト領域におけるデブリディスク形成に重要な物理過程である。氷天体の衝突破壊に関する実験は、これまで多結晶氷や空隙をもつ雪に関して系統的に行われてきた。その結果、多結晶氷の衝突破壊強度は 90 J/kg であり、雪の衝突破壊強度は空隙率により複雑に変化することが分かっている。一方、現実の天体同士の衝突では、衝突破壊が起きる前に、同じ天体が複数回衝突を経験することは珍しくない。実際、現在観測される氷小天体には必ず衝突クレーターが観察され、その多くは天体サイズの $1/3$ にも及ぶ大きなクレーターを持つ。従って、室内実験の結果を天体同士の衝突により破壊が起こる条件に応用する時、全く傷もなく綺麗な結晶氷を用いて得られた衝突破壊強度を適用することは問題がある。すなわち、事前に複数回の衝突を経験して内部に多くの破断面を持つ天体は、内部にダメージを持たない天体よりはずっと破壊し易いと予想される。そこで、本研究では、多結晶氷の衝突破壊強度が、事前衝突によりどのように影響を受けるのかを定量的に調べることにした。その結果、事前衝突の回数やその時の衝突エネルギーが衝突破壊強度に及ぼす影響を定量化した。

実験方法：衝突実験は一辺 $3 - 10 \text{ cm}$ の立方体多結晶氷 ($M_t = 100 - 1000 \text{ g}$) と質量 (m_p) 1.5 g もしくは 0.2 g の円筒氷弾丸を用いて行った。実験はすべて $-10 - 15$ の低温室内に設置したガス銃を用いて行い、衝突速度 (v_i) は $100 \text{ m/s} \sim 480 \text{ m/s}$ とした。実験では、立方体の異なる面に対して複数回衝突させて標的を破壊する実験と同じ面に複数回衝突させて破壊する実験を行った。複数回衝突させる場合には、一度の衝突エネルギーを何通りか変化させてその影響も調べた。実験後は、試料が破壊していない場合、試料内を伝播する弾性波速度を複数位置で計測した。破壊後は、破片のサイズ分布を計測した。また、事前衝突により生じたクラックが静的破壊強度に及ぼす影響を調べるために、 250 m/s で一度衝突した 10 cm 試料をスライスして板状とし、その中を伝播する弾性波速度とその板状試料の貫入強度を変形試験機により計測した。この計測により、内部クラックによる弾性波速度の低下と静的強度の低下に関する経験式を決めることを試みた。

実験結果：標的の異なる面に衝突させた場合、エネルギー密度 ($Q = 0.5 m_p v_i^2 / M_t$) の積算値 Q と最大破片質量 (m_f) の関係は、衝突回数に関わらず無傷の氷の結果に一致するということが分かった。さらに破片の積算個数分布も最大破片付近では、ほぼ一致することが確認された。しかしながら、細粒破片の積算個数分布は、衝突毎のエネルギー密度が大きい方が大きくなる傾向があった。また、複数回衝突のうち、最後に破砕した時のエネルギー密度が無傷の氷を破砕する程の大きさの場合は、無傷の氷を破砕した場合とほぼ同じ破片サイズ分布を持つことがわかった。一方、同一面に複数回衝突させた場合は、氷標的を破砕させるのに必要な積算エネルギー密度 (Q) の大きさは明らかに上昇した。この衝突面の選択の違いを定量的に議論するに、事前衝突を受けた氷試料の静的破壊強度と弾性波音速の低下の関係を調べた。その結果、次のような実験式を得た。

$$Y/Y_0 = 1 - 3.4 \quad V/V_0^{0.78}$$

この関係を Mizutani et al. (1990) により提案された無次元衝突応力 P_f に適用し、最大破片質量との関係を調べると衝突面に関係なく、次のような関係ですべての実験結果を整理することができた。

$$m_f/M_t = 0.0413 P_f^{-4.82}$$

従って複数回衝突の最大破片に対する影響は、弾性波速度の低下により定量化できることがわかった。現実の小天体は複数回衝突により、内部に多くの破断面を持つものが多いと思われるが、そのような天体の衝突破壊強度を推定する手段として弾性波速度の計測が有効であると言える。

キーワード: 氷微惑星, 衝突破壊, クラック, 弾性波速度, 力学強度, スケール則

Keywords: icy planetesimals, impact disruption, crack, sound velocity, mechanical strength, scaling law

雪の動的圧密実験：氷微惑星の低速度衝突圧密への応用

Dynamic compaction experiments of snow: Implications for low-velocity impact compaction of icy pre-planetesimals

保井 みなみ^{1*}, 坂本花菜², 荒川 政彦³

Minami Yasui^{1*}, Kana Sakamoto², Masahiko Arakawa³

¹ 神戸大学自然科学系先端融合研究環, ² 神戸大学理学部, ³ 神戸大学大学院理学研究科

¹Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ²Faculty of Science, Kobe University, ³Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：太陽系形成標準モデルでは、cmサイズのダストボールから重力不安定によって微惑星が形成されると考えられている。しかし、この形成過程では円盤ガスの乱流の影響によりダストの沈殿が困難であることが問題点として挙げられる。そこで着目されたのが、cmから数100mサイズの天体を意味する pre-planetesimal (微惑星前駆天体) である。近年、この pre-planetesimal が衝突合体によって微惑星へと成長するという仮説が提案された。しかし、pre-planetesimal の成長過程にも問題点がある。それは衝突破壊が起こりやすいこと、短時間で太陽に落ちてしまうこと、そして衝突の圧密により天体同士が反発して合体成長しないことである。pre-planetesimal の成長過程についての理論的研究は幾つか行われている。Geretschauser et al. (2011) は多孔質シリケートダスト集合体の衝突モデルを提案し、SPH法を用いた数値計算を行った。その結果、衝突速度、弾丸・標的サイズ比によって異なる7つの衝突モード(圧密、破壊、付着)を発見し、モードによって圧密の程度が異なることが分かった。しかし、この研究ではモデルに実測した圧密曲線(圧力と空隙率の関係)を組み込んでいないため、実際の衝突現象を実現しているかは疑問が残る。そこで本研究では、氷 pre-planetesimal の衝突圧密条件を明らかにするため、高空隙雪を用いた低速度衝突実験を行った。そして、衝突後の時間変化に伴う密度の深さ分布、圧密領域のサイズ、標的に与えられる応力を調べ、衝突圧密時の密度分布および圧密領域に関する経験式を決めた。

実験方法：衝突実験は、北海道大学低温科学研究所にある-10℃の低温室で行った。弾丸は直径25mm、高さ40mm、質量149gのステンレス円柱を用いた。弾丸下部にはエジェクタの影響を抑えるため、直径26mmの塩化ビニル円盤を取り付けた。弾丸の加速方法は自由落下で、落下距離は50~900mmの間で9種類変化させた。衝突速度範囲は0.7~3.5m/sである。標的は空隙率の異なる円筒形の雪を用いた。直径26mmのアクリル筒に氷粒子を詰め、空隙率が70、80、90%となるよう氷粒子の質量を調整した。氷粒子は噴霧器を用いて液体窒素の中に水を散布し、その後液体窒素から氷粒子を取り出し、250ミクロンのふるいにかけて大きい粒子を取り除いた。粒径は50~500ミクロンである。雪標的は高さ100mmで、20mmごとに青い雪で境界を作り、深さに伴う密度変化を観察できるようにした。青い雪は市販のスプレーで液体窒素の中に青く染色した水を散布した。衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影した。シャッタースピードは20、50マイクロ秒、撮影速度は毎秒3000、5000コマである。衝突の際の応力を実測するため、弾丸上部に加速度センサーを設置した。加速度計が測定した電圧はオシロスコープ、またはデータロガーで記録した。データロガーの記録点は25万~100万点、サンプリング間隔は20マイクロ秒である。

実験結果：衝突の際に標的に与えられる応力は、加速度計データ、高速度ビデオカメラ画像の両方を用いた。その結果、応力曲線(応力の時間変化)上の最大応力 s_{max} は空隙率70%雪で 20 ± 100 Pa、空隙率80%雪で 15 ± 50 Paとなり、70%雪の方が1.3~2倍大きくなった。また、最大応力は各試料共に衝突速度と伴に大きくなった。加速度計から得た最大応力と高速度ビデオカメラの映像から得た最大応力を比較すると概ね一致し、さらに木下式雪硬度から求めた降伏強度 Y と各解析法から求めた応力も、概ね一致した。次に密度分布について調べるため、標的の最上層の衝突後の最終密度 r_1 と最大応力 s_{max} を比較した。その結果、最大応力 s_{max} と伴に最上層の密度 r_1 は大きくなった。そして、最大応力と最上層の密度の関係は空隙率70%雪で $r_1 = 1.7 \times 10^2 s_{max}^{0.2}$ 、空隙率80%雪で $r_1 = 1.2 \times 10^2 s_{max}^{0.3}$ となり、絶対値は70%雪の方が1.5倍大きくなるが、増加率を示すべきは0.2-0.3とほぼ一致した。最後に、木下式雪硬度 Y と標的全体の平均圧縮密度 r_{ave} の関係から、標的の見かけの体積弾性率 K を求めた。その結果、空隙率70%雪では1.8MPa、空隙率80%雪では0.2MPaとなり、70%雪は80%雪より約8倍大きくなった。氷の K は約10MPaであり、それと比べて約10-50倍小さくなった。

キーワード：氷微惑星前駆天体, 衝突圧密, 低速度衝突実験, 密度分布, 圧密領域, 体積弾性率

Keywords: icy pre-planetesimal, impact compaction, low-velocity impact experiment, density profile, compaction area, bulk modulus

太陽系外惑星系のウォーターワールド・レジームにおける水惑星の進化 Evolution of planets with oceans within the Water World Regime around a main sequence star

福島 俊^{1*}, 門屋 辰太郎¹, 田近 英一²
Satoshi Fukushima^{1*}, Shintaro Kadoya¹, Eiichi Tajika²

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

The Habitable Zone (HZ) around a main sequence star is the orbital condition in which planets could have liquid water on their surface, although greenhouse effect of the atmospheres due to some greenhouse gasses (e.g., CO₂) is generally required. On the other hand, we propose here the Water World Regime (WWR) which is the orbital condition for the planets to have liquid water even if the planetary atmospheres do not have any greenhouse gasses except water vapor. The WWR is therefore much narrower condition than the HZ, estimated to be an annual mean insolation from 1.07 to 1.41 S₀ (where S₀ is the solar constant for the present Earth). Most of the WWR condition is, however, under the moist greenhouse condition in which water should escape to space during the planetary evolution (e.g., Kasting, 1988). The time scale of water loss should therefore be discussed for the planets with different amount of H₂O and XUV from the central stars.

We estimated life time of oceans on the planets orbiting within WWR by assuming water loss due to hydrogen escape by diffusion-limited (Hunten, 1973 ; Walker, 1977), and energy-limited water loss mechanisms (Watson et al., 1981), with considering stellar luminosity evolution (Gough, 1981 ; Iben, 1967), and stellar EUV evolution (Lammer et al., 2009).

We will show that the life time of oceans may be longer than that considered generally. For example, if the Earth is orbiting within the WWR around a M-type star and has liquid water of 5 times the amount of ocean today, liquid water may be able to exist for 10 billion years.

キーワード: 系外惑星
Keywords: Extrasolar planet

炭素循環の機能する系外地球型水惑星の表層環境と進化 Climate evolution of extrasolar terrestrial planets with water and carbonate-silicate geochemical cycle

門屋 辰太郎^{1*}, 田近 英一²
Shintaro Kadoya^{1*}, Eiichi Tajika²

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 東京大学大学院新領域創成科学研究科
¹The University of Tokyo, ²The University of Tokyo

The surface environment of a habitable planet has been constrained in terms of orbital semi-major axis and an effective solar flux, focusing on the existence of liquid water, that is, the habitable zone (HZ) around main sequence stars (e.g., Kasting et al., 1993). It has been also pointed out that the carbonate-silicate geochemical cycle would be essential for maintaining the climate of a habitable planet (e.g., Tajika, 2003). However, the whole picture of evolution of climate of planets with carbonate-silicate geochemical cycle has not been known.

In this study, we investigate the climate evolution of an Earth-like planet (actually, the Earth itself) around a G-type star (= Sun). Steady states of climate of Earth-like planets are estimated systematically with a simple climate model coupled with a carbonate-silicate geochemical cycle model. We classified climates of Earth-like planets within the HZ into three modes, in terms of stabilizing mechanism. Then, the climate evolution is estimated based on the steady state solutions of the climate with models of the stellar evolution and the thermal evolution of planetary interiors. The results indicate that, on an Earth-like planet (the size of the Earth) orbiting around a G-Type star, climate depends on the thermal history of the planet in the early stages of its lifetime, and then depends on the stellar evolution. The climate evolutions are also estimated for the different mass both for stars and planets.

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, 炭素循環, EBM

Keywords: Extrasolar planetary system, Habitable zone, Habitable planet, Carbonate-silicate geochemical cycle, EBM

土星リング中における小衛星への粒子集積

Local N-body Simulation for Accretion of Particles onto Moonlets in Saturn's Rings

安井 佑貴^{1*}, 大槻 圭史², 台坂 博³Yuki Yasui^{1*}, Keiji Ohtsuki², Hiroshi Daisaka³¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 一橋大学商学部¹Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ., ²Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ./CPS, ³Hitotsubashi Univ.

周惑星円盤中での重力による粒子集積は、太陽系に存在する巨大惑星のリング-衛星系の起源に関わる重要な問題である。カッシーニ探査機による観測から、土星Fリングのすぐ外側を公転している衛星パンドラの軌道より内側に位置する小衛星は、空隙率の高い小さなリング粒子の集積によって形成されたと考えられている。またN体計算によって、高密度の大きな核の周りに小粒子が集積することで、その天体自身の重力圏を埋める天体が形成されることが示されている。さらに土星Aリングでは、プロペラ構造と呼ばれる構造が発見されており、それは観測では直接見えていない小衛星によって形成されていると考えられている。これら小衛星は、高密度の大きな破片に低密度の小粒子が集積することで形成された可能性がある。このように、リング中における集積現象はこれら小衛星の起源にも関係する可能性がある。

ロッシュ領域内での重力による粒子集積が起こるかどうかがという判定条件は、三体問題のヒル近似に基づいて導かれている。ここでその判定条件を「三体捕獲判定条件」と呼ぶが、その判定条件は衝突後、衝突した二粒子がそれらの重力圏内にあり、相対運動エネルギーと潮汐ポテンシャルの和が負であれば、重力的に束縛されたとみなすという条件である。また、この判定条件を用いて、三体軌道計算からリング粒子間の衝突後の捕獲確率が求められている。しかしリング粒子が集積し、アグリゲイトが成長するにつれて、マントル部分を構成する粒子群による多体効果が重要になると期待されるが、この効果は三体計算では考慮されていない。

本研究の局所N体計算では、計算領域の中心に小衛星を固定する。そしてタイムステップ毎に、軌道運動方向の境界から小衛星の摂動の影響を受けていない粒子を加える。また、軌道運動方向の境界を通して計算領域から出て行った粒子は領域から取り除く。一方で、動径方向の境界には周期境界条件を用いる。集積過程と小衛星の成長タイムスケールを詳しく調べるため、異なる二つの方法を用いて、アグリゲイトを構成している粒子数を数えた。初めに、小衛星と個々の衝突した粒子に対して粒子が小衛星の重力圏に重力的に捕獲されるかどうか、三体捕獲判定条件を用いて調べた。しかしこの方法では、小衛星に集積した粒子の自己重力は無視しており、時間とともに小衛星に集積する粒子数は増加するので、アグリゲイトを構成する粒子の数を過少評価してしまう。この問題を解決するために、二つ目の方法として、我々はアグリゲイトに接触している粒子をアグリゲイトの一員と考えて粒子数を数えた。この判定条件をここでは「アグリゲイト接触判定条件」と呼ぶ。

本研究では、このアグリゲイト接触判定条件を用いて、 $R_p=0.7$ に対応するような土星の距離において、集積率を時間の関数として計算した。ここで、 R_p は衝突している粒子の物理半径の和と重力半径の比である。集積の初期段階では、N体計算の結果から得られる集積率と三体計算の結果から得られるものがよく一致することを確認した。粒子集積が進むと、小衛星の周りに多数の粒子が集積してくるので、アグリゲイトの衝突断面積が増加し、N体計算から求められる集積率は三体計算のものよりわずかに大きくなることが示される。その後、アグリゲイトは自身の重力圏を粒子で埋め、ほぼ一定の構成粒子数となるような準平衡状態に達する。それから、アグリゲイトは粒子集積と粒子放出を交互に繰り返すということがわかった。上述のように、二つの判定条件を用いて、アグリゲイト構成粒子の数も数えた。その結果、三体捕獲判定条件ではアグリゲイトを構成する粒子の数を過少評価してしまうことがわかった。また、アグリゲイト接触判定条件を用いて数えたアグリゲイト構成粒子数の結果からも、準平衡状態では粒子の集積と放出が交互に繰り返されることが明らかとなった。

キーワード: 粒子集積, 小衛星, 土星リング, N体計算

Keywords: accretion, moonlet, Saturn's rings, N-body simulation

Inelastic Collisions between Icy Bodies: Dependence on Impact Velocity and Its Fluctuations

Inelastic Collisions between Icy Bodies: Dependence on Impact Velocity and Its Fluctuations

上西 幸司^{1*}, 矢野 良輔², 吉田 樹矢¹, 山上 敬祥¹, 鈴木 宏二郎²

Koji Uenishi^{1*}, YANO, Ryosuke², Tatsuya Yoshida¹, Keisho Yamagami¹, SUZUKI, Kojiro²

¹Dept Aero/Astronautics, Univ Tokyo, ²Dept Adv Energy, Univ Tokyo

¹Dept Aero/Astronautics, Univ Tokyo, ²Dept Adv Energy, Univ Tokyo

In a ring system, energy loss during collisions of particles may play a crucial role in determining not only the mean free path between collisions but also the physical characteristics of the ring (e.g., kinematic viscosity, spreading rate, thickness, shape) and the rate of cooling in the system. The coefficient of restitution is a key parameter for evaluating such energy loss during collisions (Dilley and Crawford, 1996). Icy particles are commonly found in the rings of Saturn, and due to their closeness to our living environment, their coefficient of restitution has been intensively studied. Earlier works on collisions of icy bodies normally suggest that the restitution coefficient strongly depends on the impact velocity. More recent approach to the problems of energy loss and cooling in a ring system includes the concepts developed in the theory of granular flow, but due to the lack of precise information about the velocity dependence of the restitution coefficient, it is often assumed that the coefficient is constant (velocity-independent) in granular flow-based analyses of inelastic collisions. Here, in order to better understand the physical characteristics of ice as a granular material and gain more quantitative information about the effect of impact velocity on the collisions of icy bodies, first, we experimentally monitor the mechanical behavior of an ice sphere impinging upon a plate of ice (235 mm x 320 mm x 60 mm) with a digital high-speed video camera system introduced in our laboratory. The diameter of an ice sphere is either 25 mm or 50 mm, and each sphere is kept in a freezer at a temperature of -10 degrees Celsius for more than 30 hours before every experiment starts. We intend to obtain the variation of the normal restitution coefficient for the free fall of spheres with 17 different falling distances between 40 and 450 mm. For that purpose, we take full-color digital photographs at a frame rate of 7,000 frames per second and record the collision process: From the photographs, we can calculate the velocities of an ice sphere just before and after the collision and with these velocities we may evaluate the normal restitution coefficient. We perform our preliminary series of experiments on collisions of ice spheres at least 10 times for each sphere size and falling distance at room temperature of 21 degrees Celsius. The range of falling distance mentioned above gives an impact velocity of 60-370 cm/s for 25 mm diameter spheres and 90-380 cm/s for 50 mm diameter ones. Care is taken not to induce any rotation and fracture of the ice spheres during the collision process. We also observe the roughness of the sphere surfaces as well as the fluctuations of the obtained coefficient for each sphere size and impact velocity. Then, based on the ED (Event-Driven) method, we perform numerical simulations of the cooling process during collisions of 3,000 ice spheres that are initially located randomly in a two-dimensional square. In the simulations, the experimentally obtained velocity-dependent restitution coefficient and its fluctuations are taken into account for the inelastic collisions between ice spheres. The results show the final temperature is about 4 % lower than that obtained without considering the fluctuations of the velocity dependence of the coefficient.

キーワード: ring system, icy bodies, inelastic collision, coefficient of restitution, cooling process, granular flow

Keywords: ring system, icy bodies, inelastic collision, coefficient of restitution, cooling process, granular flow

微小球状試料の簡易3次元形状測定システムの開発:コンドリュールへの応用 Development of a simplified 3D shape measurement system for micro spherical object: application to chondrules

西田 圭佑^{1*}, 津田 彩花¹, 高橋 栄一¹, 中本 泰史¹
Keisuke Nishida^{1*}, Ayaka Tsuda¹, Eiichi Takahashi¹, Taishi Nakamoto¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

コンドリュールのような直径1mm程度の微小球状物体の3次元形状を観察、測定するための光学写真撮影装置と画像解析手法を開発した。この装置は、民生用デジタル一眼カメラ、ペローズマクロレンズと自動ステージで構成され、最大で0.85 μm/pxの解像度で撮影することができる。カメラとサンプルを乗せた自動回転ステージはPCで自動制御する。撮影は、画像処理しやすいように試料とその周辺のコントラスト差が大きくなる、逆光状態に照明を調整し、回転ステージを2度ずつ動かして180度まで行う。撮影した画像は、自作の解析ソフトで二値化した後に輪郭の座標を抽出し、それぞれの角度ごとに行う事で、物体の外形の3次元座標を得る。得られた3次元座標から3DCADでよく使われるSTLファイル形式を作成し、様々な解析ソフトや3DCAD、CG用ソフトで利用できるようにした。

本研究では、この装置を使い実際にアエンデ隕石から分離したコンドリュールの3次元形状を測定したので、その結果も報告する(JGU2013 津田ほか)

キーワード: 3次元形状, コンドリュール, アエンデ隕石, 球状微小物体

Keywords: 3D shape, chondrule, Allende CV3 chondrite, spherical micro object

微惑星弧状衝撃波によるコンドリュール形成 Chondrule Formation by Planetesimal Bow Shocks

山崎 布美香^{1*}, 中本 泰史¹

Fumika Yamazaki^{1*}, Taishi Nakamoto¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

コンドリュールは、多くの隕石中に体積にして80%程度まで含まれるミリメートルサイズの球状珪酸塩粒子である。実験や観察から、星雲内のダスト粒子が瞬間的な加熱を受け溶融して形成されたことが分かっているが、その詳細な加熱プロセスについては明らかになっていない。このように特殊な形成プロセスを経て、さらに普遍的に存在しているコンドリュールの形成過程を理解することは、太陽系星雲内の環境や太陽系形成の解明につながることを期待される。

加熱プロセスの有力なモデルとして、衝撃波加熱モデルがある。これは、ダスト粒子が衝撃波に突入した時、ガス摩擦により加熱を受けるといものである (Hood & Horanyi, 1991; Iida et al., 2001 他)。本研究では、高離心率の微惑星のまわりに発生する微惑星弧状衝撃波でのダスト加熱によるコンドリュール形成についての詳細な検討を行った。

本研究では、微惑星まわりのガスの流れの中での2次元のダスト粒子の軌跡と熱履歴について、ダスト自身の溶融、蒸発を考慮した計算を行った。これらの効果は2次元のダスト軌跡を計算した先行研究では考えられてこなかったものである (Nakajima, 2010, 修士論文; Morris et al., 2012 他)。さらに詳細な検討のため、ガスの流れについては衝撃波直後の領域で支配的な化学反応であるH₂の解離・再結合を組み込んだ2次元数値流体計算により得た。

結果として、ダスト粒子が部分蒸発して微惑星との衝突を免れる場合があることが明らかになった。これはコンドリュールの形成効率や加熱後のダストサイズに影響する。さらに、パラメータサーベイによってコンドリュール形成のための星雲ガス密度、微惑星のガスに対する相対速度の条件を求めた。本研究で得られた形成条件は、最小質量原始太陽系星雲モデルよりも大きなガス密度あるいは3 AUよりも内側でのコンドリュール形成を支持する。

キーワード: コンドリュール, 弧状衝撃波, 微惑星, 太陽系形成, 流体力学計算

Keywords: chondrule, bow shock, planetesimal, solar system formation, hydrodynamics simulations

ガス衝撃波領域でのガス・ダスト熱的相互作用によるダスト集積 Dust accumulation caused by thermal interaction between gas and dust in gas shock regions

渡辺 圭亮^{1*}, 中本 泰史¹

Keisuke Watanabe^{1*}, Taishi Nakamoto¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo institute of technology

Meteorites are important clues to investigate the environment of the early solar system. Chondrules are 0.1mm ? 1mm sized spherical igneous structure which are abundantly found in chondritic meteorites. Chondrule precursor dust grains once experienced melting caused by certain heating event, then recrystallized and formed their spherical form. Experimental constrains suggest that heating event was intense, heating duration is of the order of a few minutes and these events continued intermittently about three million years. This heating process was surely dominant in the early solar system but details are still unknown.

The most promising heating source for chondrule formation is gas shock wave heating in the protoplanetary disk. Previous works showed that gas shock waves can heat up the precursor dust grain temperature above melting point due to frictional heating. Iida et al. (2001) also showed that the gas temperature is higher than the dust temperature when the dust stops in the gas and its temperature attains maximum. In such a situation, the dust acts as coolant for the gas.

The gas in a relatively high dust density region is preferentially subjected to cooling by the dust. This preferential cooling makes the gas pressure minimum. Then the gas flows into the region because of the gas pressure gradient. This flow drags the dust into the high dust density region and it leads to further dust density enhancement. This one way thermal instability process may cause dust accumulation. Previous works concerning the gas shock wave heating model did not consider this process at all.

Here we investigate the possibility of dust accumulation by gas dust thermal interaction. To this aim we consider a gas dust two component fluid. We carry out one dimensional numerical calculation which includes both momentum and energy interaction between the gas and dust.

In our model, the gas loses energy via thermal collision with the dust due to the gas dust temperature difference. The dust gains energy from the gas and emits energy to outside of the system by radiation. Only the dust absorbs radiation from surrounding radiation field. The dust receives gas drag force and the gas receives back reaction. Only the gas feels self pressure gradient.

As initial condition we assume that there is a dust density maximum in the gas. We add dust density profile with Gaussian form on uniformly distributed dust density. The gas density is constant. The dust to gas mass ratio is unity at the maximum of the dust density, and one percent at far from the dust density maximum. We adopt typical gas and dust temperature, which are plausible after dust heating by gas shock waves. The gas temperature is higher than the dust temperature. The gas and dust velocity is assumed to be zero at first. From this initial setting we evaluate time evolution of the system.

We find that the gas in high dust density region cools faster than the gas in low dust density region. This difference of the cooling time scale of the gas makes pressure gradient of the gas. The gas begins to flow into the low gas pressure region and the gas density increases in the region. Drag force induces the dust inflow and the dust density also increases there. Gas and dust density enhancement lasts until the minimum gas temperature attains the temperature of the surrounding radiation field and decreasing of minimum gas temperature stops. In our setting, we show that the maximum gas and dust density increase is around five times larger than the initial density.

The gas density increases as to the system becomes isobaric. Isobaric condition shows that the gas density enhancement is several times larger than the initial gas density. Drag force can enhance the dust density as the same order of the gas density increase.

Future work is to investigate the consequence of this dust density enhancement.

キーワード: 原始惑星系円盤, コンドリユール, 衝撃波加熱, ダスト集積, 熱的不安定

Keywords: protoplanetary disks, chondrule, shock wave heating, dust accumulation, thermal instability

原始惑星系円盤ガスのスーパー/サブケプラー境界におけるダストの動径方向の集積について Radial Accumulation of Dust Boulders at a Boundary between Super/Sub-Keplerian Flow in a Protoplanetary Disk

瀧 哲朗^{1*}, 藤本 正樹², 井田 茂¹
Tetsuo Taki^{1*}, FUJIMOTO, Masaki², IDA, Shigeru¹

¹ 東京工業大学, ² 宇宙航空研究開発機構

¹Tokyo Institute of Technology, ²JAXA

In the process of planetesimal formation, spiral-in of dust particles toward the host star is the most serious difficulty. One of the mechanisms to halt the spiral-in is a radial pressure bump in the disk, at which the boundary between local super/sub-Keplerian flow exists. However, according to accumulation of dust particles at the super/sub-Keplerian transition point, the dust frictional force alters the gas density profile (e.g., Kato et al., 2012).

We think that accumulation processes of the dust particles at the pressure bump, which has the similar size with the bump presented by Kato et al. (2009, 2010). We have investigated the time evolution of dust density distributions due to drag force from the protoplanetary disk gas, taking into account backreaction from the

dust particles to the gas consistently with local 1-D and 2-D hybrid simulations. We treat the disk gas as a grid-hydrodynamics and the dust particles as super-particles.

In 1-D simulations, we found that the gas density distribution is seriously deformed as the dust accumulates at pressure bump in the case with backreaction. At once, the dust density distribution is radially expanded around the boundary between super/sub-Keplerian flow. Finally, the dust particles resume the inward drifts,

and their density distribution achieves the gradual peak in the radial direction. Then the maximum dust-to-gas density ratio is unity.

In 2-D simulations, we confirm the driving of streaming instability in the dust dense region formed by the radial pressure bump. Due to the effect of streaming instability turbulence, the maximum dust-to-gas density ratio raises to 5, which is larger than 1-D results. However it is lower than the result of the 2-D or 3-D MHD simulations presented by Kato et al. (2012), which include the effect of inhomogeneous MRI turbulence.

These dust-to-gas density ratios is too small to drive the gravitational instability, which forms the planetesimals quickly, and the pressure bump is not able to maintain the halting of the dust particles. Therefore, we conclude that the halting mechanism of pressure bump is not able to form the planetesimals very well by itself. Then we suggest the possibility that the effect of the maintenance or restoration to the pressure bump might increase the dust density and form the planetesimals via gravitational instability.

キーワード: 微惑星形成, 原始惑星系円盤

Keywords: planetesimal formation, protoplanetary disk

原始惑星系円盤におけるダスト落下問題に対するダストプラズマと磁場の影響について

Dynamics of charged dust particles in the magnetic field related to the dust infall problem in protoplanetary disks

平井 研一郎^{1*}, 加藤 雄人¹, 寺田 直樹¹

Kenichiro Hirai^{1*}, Yuto Katoh¹, Naoki Terada¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹ Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

原始惑星系円盤においては、円盤内に存在する微細なダスト粒子が合体成長する事により、その粒径が大きくなり、微惑星へと成長すると考えられている。円盤を構成するガス中でのダスト粒子の運動を考えると、円盤ガスの圧力勾配によってダストの回転速度とガスの回転速度の間に速度差が生じる。これにより、ダストはガスの向かい風を受けて角運動量を失い、微惑星へと成長する前に中心星に落下してしまう。この問題は「ダスト落下問題」と呼ばれ、円盤内の電離度が非常に低く、背景磁場も弱いと考えられているため、多くの研究では電気的中性が仮定され議論されている。しかしながら、中心天体が固有磁場を持つ事を仮定すると、中心天体の近傍では一定の磁場強度となりうる事と、中心天体からの輻射によりガスの電離度が高くなる事を考慮すると、帯電したダスト粒子に働くローレンツ力は無視できない値となることが考えられる。本研究では、このダスト落下問題に対して、ダスト自身が持つ電荷により背景磁場から受ける影響について議論する。

最小質量円盤モデルで、円盤中でプラズマベータが一定の磁場モデルを仮定して、円盤上の各領域でのダスト粒子のジャイロ周期を求めた。その結果、例えば粒径 1cm のダストが 1AU の位置において、向かい風による減速のタイムスケール (e.g., Weidenschilling, 1977) とジャイロ周期が同程度となるには、ダストは $\sim 10^{17}$ e (e:電気素量) 程度帯電している必要があることが示された。

ダスト粒子の帯電に関して、土星探査器カッシーニによる土星の E リング周辺での観測結果を参照すると、 $1 \mu\text{m}$ サイズで 1000 e 程度帯電していることが示されている (Horanyi, 2004)。原始惑星系円盤において、この程度の電荷を持ったダストが衝突合体を繰り返し、粒径 1cm 程度の大きさになったと考え、帯電量はダストの体積に比例すると仮定すると、 10^{15} e 程度まで帯電すると見積もられる。このことから、1cm 程度の粒径のダストの運動において電磁気的作用を無視することができないことが示唆される。より詳細な検討には、ダストの成長過程と帯電量の関係を明らかにすると共に、ガスとの衝突による減速のタイムスケールとダスト粒子のジャイロ周期とが、円盤内でどのように分布し得るかを定量的に明らかにする必要がある。本発表では、より詳細な計算結果を示すとともに、計算で仮定したモデルの妥当性について議論する。

キーワード: 原始惑星系円盤, ダストプラズマ

Keywords: protoplanetary disk, dusty plasma

逆行ホットジュピターの潮汐軌道進化 Tidal orbital evolution of retrograde hot jupiters

岡澤 直也¹, 倉本 圭^{1*}

Naoya Okazawa¹, Kiyoshi Kuramoto^{1*}

¹ 北海道大学 理学院 宇宙理学専攻

¹Hokkaido University

近年、恒星の自転に対して逆行しているホットジュピターが複数見つかってきている。こうした軌道傾斜角の大きなホットジュピターは、惑星系円盤においてその場で形成されたとも、あるいは、形成後に円盤との相互作用によって現在の位置に移動してきたとも考えにくい。なぜならこれらの過程では、円盤面から軌道が大きく外れることはないためである。そこでこれらの高傾斜角惑星の形成シナリオとして「スリングショットシナリオ」が提案されている。このシナリオでは、惑星同士の重力散乱により軌道傾斜角の大きな楕円軌道の惑星がつけられ、その後中心星の潮汐作用によって軌道半径が小さくなり、ホットジュピターへと進化する。

以上の過程のうち、潮汐作用については不明な点が多い。例えば、従来の研究では楕円軌道からの軌道進化であることから、潮汐作用として、近点通過時にインパルス的に強い潮汐力が働く動的潮汐作用による円軌道化が想定されてきた (e.g. Nagasawa et al. 2008)。しかし、軌道進化によって離心率は小さくなっていくため、軌道進化の進んだ段階では静的潮汐作用を考えるのが適当であると思われる。また、潮汐摩擦の大きさにも大きな不定性が残されている。

そこで本研究では、主星の年齢が既知である6つの逆行ホットジュピターについて潮汐作用による軌道進化を理論的に考察することにより、これらの惑星に対する潮汐作用について、その機構や大きさを明らかにすることを試みた。

潮汐作用による軌道進化では、惑星の軌道角運動量と、惑星および主星の自転角運動量のベクトル和は保存される。また、これらの角運動量のうち、惑星の自転角運動量は非常に小さく進化経路にはほとんど影響しない。そして、逆行惑星の場合、軌道角運動量は常に恒星の自転角運動量へと輸送され、過去の軌道角運動量は現在よりも大きかったと考えられる。つまり、軌道角運動量が保存される軌道経路が最も近点距離の小さい経路となる。そこでまず、軌道角運動量の保存を仮定して軌道要素の進化経路を求め、長楕円軌道を有していた時に想定される近点通過の時定数を導いた。その結果、長楕円軌道においても、近点通過の時定数は惑星の固有振動の時定数に比べて長く、これは静的潮汐作用モデルが妥当であることを示す。

そこで、静的潮汐作用を仮定して系の年齢だけ時間を遡る数値計算を行った。潮汐摩擦の強さを規定する散逸定数は不確定性が大きいパラメータとし、長楕円軌道から現在の軌道に進化しうる値を探索的に求めた。

軌道進化計算の結果、全ての系について、初期軌道がスリングショットシナリオから予想される条件 (系の年齢だけ遡ったときの軌道長半径が2-3 AU、軌道進化の途上で主星と衝突しない) を満たす解が存在することが分かった。条件を満たすことのできる散逸定数は、各惑星に対して比較的狭い範囲に限定でき、惑星半径と散逸定数の間に相関があることが示唆された。木星衛星系の軌道力学から推定される木星の散逸定数もこの相関に乗る。こうして推定された散逸定数を用い、軌道進化に沿った過去の潮汐加熱の履歴を見積もることができる。その結果、各惑星は初期の数億年の間は中心星輻射の0.05-2倍の潮汐加熱を受けていた可能性があることがわかった。さらに、得られた散逸定数を用いた場合、惑星は中心星に今後急速に落下することなく、今の軌道長半径を準定常的に維持できる。これは多くのホットジュピターが存在している観測結果と整合的であると言える。

巨大灼熱惑星における磁氣的活動 On the magnetic activities in hot Jupiters

田中 佑希^{1*}, 鈴木建¹, 犬塚修一郎¹
Yuki Tanaka^{1*}, SUZUKI, Takeru K.¹, INUTSUKA, Shu-ichiro¹

¹ 名古屋大学理学研究科

¹Department of Physics, Nagoya University

Recently theoretical studies on thermal evolution of hot jupiters invoked Ohmic dissipation to account for extraordinary large radii of some objects.

Those analyses suggest the existence of significantly strong magnetic fields in hot jupiters.

To test this hypothesis it is important to investigate possible consequence of magnetic fields in gaseous giant planets.

Since gaseous giant planets are supposed to have large convection zones, magnetic field mediates energy transfer from the interior to the exterior of the atmosphere.

In this talk we develop a model of magnetically driven wind from a gaseous planet and investigate the resultant mass loss.

This work may provide a possible consistency check of theories with observations of hot jupiters.

キーワード: 系外惑星, 質量放出

Keywords: exoplanet, mass loss

周惑星円盤との相互作用による不規則衛星の捕獲と軌道進化 Capture and orbital evolution of irregular satellites by gas drag from circumplanetary disk

末次 竜^{1*}, 藤田 哲也¹, 大槻 圭史¹

Ryo Suetsugu^{1*}, Tetsuya Fujita¹, Keiji Ohtsuki¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ.

巨大惑星は数多くの衛星をもち、その衛星は規則衛星と不規則衛星に分類できる。規則衛星は離心率と軌道傾斜角が小さく惑星近傍を公転していることから周惑星円盤内で形成されたと考えられている。一方、不規則衛星は楕円で大きく傾いた軌道のため巨大惑星近傍を通過した微惑星がなんらかのエネルギー散逸により捕獲されたものが起源だと考えられている。巨大惑星同士が近接遭遇した時に周囲の微惑星を捕獲するモデル (Nesvorny et al. 2007) が有力とされているが、木星は他天体と近接遭遇しにくいため不規則衛星の形成を説明するのが難しい。

古くから提案されている周惑星円盤のガス抵抗による捕獲モデルは、微惑星を捕獲するようなガス密度だと、強いガス抵抗によって惑星へ落下してしまうという欠点があった。しかしながら Cuk & Burns (2004) で木星の特定の不規則衛星が周惑星円盤のガス抵抗によって捕獲された可能性が示された。また不規則衛星となった微惑星は木星に捕獲される前に惑星周りをしばらく公転する一時捕獲状態になっていたことが軌道計算によって明らかにされた。これはガス密度が低い場合でも一時捕獲された微惑星が何度も惑星に接近することで、少しずつエネルギーが減少し捕獲される可能性のあることを示している。従来、一時捕獲過程自体は詳しく調べられてなかった。最近、我々は一時捕獲について三体問題軌道計算を用いて詳しく調べた。その結果、一時的捕獲軌道は四つに分類できることや一時捕獲頻度を求め、捕獲前の軌道との関係も明らかにした (Suetsugu et al. 2011 AJ 142, 200; Suetsugu & Ohtsuki, MNRAS, in press)。

形成期の巨大惑星は周惑星円盤を持ち、円盤からのガス抵抗により微惑星を捕獲しうる (Fujita et al, submitted to AJ) が不規則衛星の起源を考えるうえでは、捕獲後の軌道進化も重要である。今回の発表では周惑星円盤との相互作用による微惑星の捕獲過程、及び捕獲後の軌道進化について報告する予定である。

キーワード: 惑星, 衛星

Keywords: planet, satellite