

衝突破壊における破片形状分布が示す破壊過程 Fracture process inferred from fragment shape in impact disruption

門野 敏彦^{1*}; 谷川 享行¹; 水谷 仁²
KADONO, Toshihiko^{1*}; TANIGAWA, Takayuki¹; MIZUTANI, Hitoshi²

¹ 産業医科大学, ² ニュートンプレス

¹University of Occupational and Environmental Health, ²Newton Press

The results of the previous impact experiments show that the shape of the fragments, characterized by the triaxial dimensions a , b , and c , ($a \geq b \geq c$), behaves in a very regular way (e.g., Fujiwara et al. 1989). In widely different experimental conditions, the axial ratios, b/a and c/a , have distributions peaked at about each mean value, ~ 0.7 and ~ 0.5 , respectively, and flattened (i.e., small c/a) fragments are almost absent.

We find that, if the distribution of the shape parameters, (b/a , c/a), is homogeneous, and there is no fragment at $c/a < k$, where k is a constant ($0 < k < 1$; in Fujiwara et al. (1978) k was ~ 0.2), the averages of the shape parameters, (0.7, 0.5) can be realized. Then, we discuss the fracture processes to represent the homogeneous distribution in the shape parameters. The expected dominant fracture process in impact fragmentation is reported.

Fujiwara, A., et al., Nature 272, 602-603, 1978.

Fujiwara, A., et al., in Asteroids II, pp. 240-265, 1989.

キーワード: 衝突, 破壊, 破片, 形状, 破壊過程

Keywords: impact, disruption, fragment shape, fracture process

鉄質天体の衝突破壊に関する実験的研究：破壊の温度依存性 Experimental study on collisional destruction of iron bodies: Temperature dependence

小川 諒^{1*}; 中村 昭子¹
OGAWA, Ryo^{1*}; NAKAMURA, Akiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：鉄隕石は Fe と Ni からなる合金であり、いくつかはウィドマンシュテッテン構造といった特異な構造を持ち、また低温下では金属特有の延性が弱まり脆性的な振る舞いを見せる。こういった鉄隕石物質は分化天体のコアとして形成されると考えられており、鉄隕石物質は分化天体の形成、特に惑星形成の重要な手がかりとなると思われる。鉄隕石物質は分化天体内で形成されるものであるが、分化天体の大規模な衝突があれば宇宙空間へ放出され、小さな鉄質の天体になると考えられる。しかしそういった鉄質小天体の存在はまだはっきり確かめられていない。その候補天体とされる M 型小惑星では近年の観測から、低密度なものがあることがわかってきた。

こういった背景から、鉄質小天体は一枚岩だけではなく、鉄破片の集合体“鉄質ラブルパイル天体”の形態をとる可能性もある。そのため、鉄隕石物質が衝突破壊によって再集積可能なのか調べる必要がある。そこで本研究では、ラブルパイル形成に関する衝突破壊の基礎データ収集を目的とし、破壊の程度と破片の放出速度の温度依存性を調べるために標的温度が 298K と 150~170K の場合の衝突破壊の様子を比較した。

実験方法：標的には円柱形の SS400 または鉄隕石、弾丸には円柱形の SUS またはナイロン球を使用した。弾丸の射出には一段式縦型火薬銃と二段式軽ガス銃を用いた。前者は SUS を速度 600~1200m/s で、後者はナイロン球を速度 6800~7300m/s で標的に衝突させた。また二段式軽ガス銃の実験については室温標的でのみ行い、火薬銃の実験では室温 298K の標的と、液体窒素を用いて低温 150~170K にした標的で衝突実験を行った。破壊後、破片速度分布・破片質量累積分布・エネルギー密度と最大破片質量割合の関係を比較し、温度が及ぼす影響を調査した。破片速度は高速度カメラの画像から求めた。そして、温度だけでなく標的 (SS400) のアスペクト比 (高さ/直径) を 0.37, 1 と変化させ、その破壊への影響についても調べた。

結果：測定した破片速度は 20~900m/s であり、温度によらず 130m/s (鉄質小天体の有力候補 Psyche の脱出速度) を超えない破片が多数存在するという結果になった。また、“破片質量累積分布”、“エネルギー密度と最大破片質量割合の関係”については温度による違いが見られた。

破片質量累積分布に関して、元の標的質量の 1% 未満の破片の占める割合を調べたところ室温では 0.0012~0.18、低温では 0.024~0.25 と、低温で小さな破片の占める割合が大きくなった。また、アスペクト比が 0.37 の場合、破壊に必要な単位標的質量あたりのエネルギーは低温の方が小さくなるという結果が得られ、これは先行研究では見られなかった結果である。

キーワード: 鉄隕石, 衝突, ラブルパイル

Keywords: iron meteorites, impact, rubble-pile

粉粒体の小天体表面の空隙率 - 圧力と空隙率の関係 Porosity of Granular Surface of Small Bodies - Relationship between Pressure and Porosity

大村 知美^{1*}; 木内 真人¹; Guettler Carsten²; 中村 昭子¹
OMURA, Tomomi^{1*}; KIUCHI, Masato¹; GUETTLER, Carsten²; NAKAMURA, Akiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

月表面や、多くの小惑星表面にはレゴリス層が存在する。レゴリス層の空隙率は様々である可能性があり、空隙のある粉体層に圧力を加えると空隙率は減少するはずである。圧力と空隙率の変化の関係を明らかにすることで、例えば衝突してきた惑星間塵や隕石がどこまで貫入できるか、また着陸機での小惑星探査の際、機体のもぐりこむ程度等を予想することができる。同様に空隙をもった天体として微惑星も挙げられる。ダスト塊から成る微惑星の空隙率は90%程度であると考えられている (Kataoka et al., 2013)。一方、このような高空隙のダスト塊から成る標的にダスト塊をふるい落として衝突させると表面の層は圧密を受けるという実験結果があり (Meisner et al., 2012)、惑星形成時の微惑星同士の衝突においても圧密による空隙率の変化の可能性がある。この関係を明らかにすることは、惑星への進化過程での空隙率を推定することにも役立つ。

ここで、まずは圧力を受ける前の空隙率を決定する必要がある。本研究では小惑星上のレゴリス層、すなわち微小重力下で降り積もった粉体層を考える。空隙率は粒子の配置によって決まり、影響する要素としては粒子径、粒子形状、粒子間力、重力などが考えられる。粒子間力と重力の比から粉体層の空隙率を予測する経験式が提案されている (Yu et al., 2003; Kiuchi and Nakamura, 2014)。ただしこの経験式は1G下での実験結果から導きだされた経験式であるため、小惑星表面のような微小重力下でも成り立つかを調べる必要がある。また、この式には粒子径分布幅等の要素は含まれていないが、レゴリス層は衝突破片から成りその大きさは均一ではないため、粒子径分布の影響について考える必要がある。衝突破片のサイズ分布はべきで表されることが多く、このようなサイズ分布を持つ粒子の空隙率については、タッピング充填など密な充填構造を持っている場合については粒子の幾何学的配置から空隙率を予測するモデルが提案されている (Suzuki et al., 2001)。しかしゆるみ充填の場合の空隙率はモデルによる予測値から外れる。そのため、レゴリス層の堆積初期の空隙率を予測するためには、ゆるみ充填の場合の空隙率と粒子径分布の関係についてさらなる研究が必要である。

次に衝突や着陸の際、すなわちレゴリス層に圧力がかかる場合を考える。本研究では、粒子形状、粒子径分布幅、組成の異なる6種類の試料に対し遠心加速装置と圧縮試験機を用いて粉体層の圧密実験を行い、試料ごとにかかる圧力と空隙率の関係を調べた。

試料には粒子形状が同じで粒径分布の異なる海砂1-3 (それぞれメジアン径13 μm 、24 μm 、73 μm) と、フライアッシュ (4.5 μm)、溶融アルミナ (5.3 μm)、玄武岩衝突実験でできた破片のうち直径が210 μm 以下のもの (以下玄武岩) (29 μm) を用いた。これらを直径5.8 cm、深さ3.3 cm (玄武岩は直径2.7 cm、深さ1.4 cm) の容器にふるい入れてすり切り充填した。圧密前の空隙率に注目すると、海砂2と玄武岩ではメジアン径は近いが空隙率はそれぞれ58%、52%と玄武岩の方が低い。粒子径累積分布を粒子径のべきで表した時のべき指数はそれぞれ0.53と0.78であるため、ここから Suzuki et al. (2001) における、ゆるみ充填の場合はべき指数が大きいほど空隙率が小さくなる傾向と同様の結果が得られた。これらに遠心加速装置では1-18 G、圧縮試験機では 10^6 Paまでの力をかけ、遠心加速装置を用いた実験では遠心加速装置から取り出した後の表面高さから、圧縮試験機を用いた実験では圧縮変位から体積を求め、圧密後の空隙率を決定した。

本発表では、実験結果を複数の既存の粉体圧縮の式と比較すると共に、圧力と空隙率の変化、また空隙率による圧縮強度の変化について、主に粒子径分布と関連づけて議論する。

キーワード: 微惑星, 小惑星, 空隙率, 粉粒体

Keywords: planetesimals, asteroids, porosity, powder and granular material

粘性流体へのクレーター形成実験：彗星核上のクレーターの形成及び緩和過程への応用 Impact experiments in viscous fluid: Implications to crater formation and viscous relaxation on cometary nuclei

阿部 仁美^{1*}; 荒川 政彦²; 保井 みなみ²
ABE, Hitomi^{1*}; ARAKAWA, Masahiko²; YASUI, Minami²

¹ 横浜国立大学大学院工学府, ² 神戸大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Engineering, Yokohama National University, ²Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：彗星核は氷・有機物・岩石の混合物であると考えられている。また、彗星核の内部は形成から現在に至るまで熱変成度が非常に低く、太陽系でもっとも始原的な天体の一つであるといわれている。しかし、彗星核試料を直接得ることは困難であり、その内部構造はいまだ解明されていない。一方、彗星核表面に観測される衝突クレーターは彗星核の内部構造を反映した形状を持つ可能性があるといわれている。そのため、彗星核の内部構造を明らかにするため、彗星核上の衝突クレーターの実験的研究が期待されている。現在観測されている彗星核表面上の孔構造は、月や火星などの岩石天体に見られる衝突クレーターとは大きく異なった形状をしている。彗星核は中心に近づくほど氷の含有率が多くなると考えられており、従って構成物質の組成と力学特性が深さと伴に変化する。このことが孔構造の形成メカニズムへ複雑に寄与する。加えて、彗星核表面は氷が昇華して残った有機物と岩石の混合物からなると考えられており、そのため孔構造は有機物の粘性の効果により他の岩石天体にできるものとは異なる挙動を示すと思われる。彗星核表面上にみられる孔構造を衝突クレーターとみなすなら、深さによる力学特性の変化と、表面の粘性効果による寄与が存在すると考えられる。本研究では、後述で述べられた彗星核表面上の有機物の持つ粘性に着目し、クレーターの再現実験を行った。

粘性流体への高速度衝突実験を行った先行研究 (Fink et al., 1984) では、一時クレーターの体積および直径・深さ比が標的の粘性に依存することが示された。また、標的の粘性率が低くなると、粘性率の変化に対してクレーター体積がほぼ変化しない重力支配的な挙動を示し、粘性率が高くなると粘性率の増加に伴ってクレーター体積が減少する粘性支配的な挙動を示すことが確認された。彼らの実験は衝突速度範囲が 0.43~6.62km/s であり、彗星核上の衝突クレーター形成過程を明らかにするには、幅広い速度範囲でこの振る舞いが成り立つかどうかを調べる必要がある。そこで本研究では、先行研究よりも 10~100 倍 (桁) 低い衝突速度域での実験を行った。

実験方法：実験は神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った。標的には粘性流体として水あめを使用し、水を加えることでその粘性率を 0.02~47Pas まで変化させた。また比較のため、粘性率が 10^{-3} Pas である水も使用した。弾丸は直径約 10mm、厚さ約 5mm の円柱状にくり抜いた寒天を用いた。寒天を弾丸として用いた理由は、衝突時に破壊される弾丸を用いる事で、弾丸の破壊の影響を調べるためである。また、弾丸加速時の破壊を防ぐため、弾丸後方に寒天と同じ大きさのウレタン製サボを取り付けて発射した。実験は大気圧下で行い、衝突速度は 50~80m/s とした。また、クレーター形成の様子は高速度ビデオカメラで撮影し、動画を用いてクレーター深さの時間変化、最大直径を調べた。

結果：高速度ビデオカメラの画像を用いて、クレーターの直径及び深さの時間変化を計測し、それぞれのサイズが粘性率にどう依存するかを調べた。まず、クレーター深さは、時間の経過と共に深さが増加し、ある時間経つと深さが減少することがわかった。そこで、この最大深さとその時のクレーター直径を用いてクレーター体積を求め、粘性率との関係を調べた。今回は、無次元クレーター体積項 $\pi^{1*} = (V/\rho m) \cdot (1.61gD_p/u^2)^a$ (V がクレーター体積, ρ が標的密度, g が重力加速度, D_p が弾丸直径, u が速度, a が定数) と無次元粘性項 $\pi^{2*} = (\eta/(\rho D_p u)) \cdot (1.61gD_p/u^2)^{(a-1)/2}$ (η が粘性率) を用いて整理した。その結果、 π^{2*} が小さいと π^{1*} は粘性率に依らずほぼ一定になり (重力支配域)、 π^{2*} が大きいと粘性率の増加とともに π^{1*} は小さくなった (粘性支配域)。この傾向は先行研究でも同様にみられたことから、衝突速度が 1?2 桁異なっても同様の関係がなりたつことが示された。一方、本研究で得られた結果は粘性支配域と重力支配域の境界の π^{2*} が先行研究よりも小さくなった。さらに、同じ π^{2*} でも本研究の結果が全体的に π^{1*} が小さく、粘性支配域での関係を示すベキ乗則のベキが大きくなった。

また、クレーター深さが最大から減少して 0 になるまでの過程を緩和過程とし、クレーターの深さが最大の深さの 1/e 倍になるまでの時間を緩和時間として計算した。その結果、粘性率が大きくなるほど緩和時間が長くなることが確認された。クレーターの緩和時間に関する理論式 $t_R \cong 8\eta/(\rho g D_c)$ (D_c は直径) を用いて計算した理論値と実験値を比較したところ、粘性率が低く小さくなるにつれて実験値は理論値よりも大きな値を示した。

キーワード: 衝突クレーター, 彗星核, 粘性率, 緩和時間

Keywords: impact crater, cometary nuclei, viscosity, relaxation time

コンドリュールと岩石試料の引張強度、圧壊強度、衝突破壊強度とそれらの関係 Tensile, crushing, and impact strength and their relationships for chondrules and other rock samples

紫垣 沙央^{1*}; 中村 昭子¹
SHIGAKI, Sae^{1*}; NAKAMURA, Akiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kobe University

コンドリュールの形成については諸説あるが、コンドリュールは形成された後にコンドライト母天体に取り込まれ、衝突や熱進化のプロセスを経て、現在に至ったと考えられている。Beitz et al. (2013) はコンドライト模擬物への衝突圧縮実験を行い、圧力と空隙率の関係を調べた。さらにコンドライト中のコンドリュールのうち壊れずに元の形状を維持しているものの割合と、コンドリュールの引張強度の関係から、コンドライト母天体が受けた最大圧力を推定できる可能性を示唆した。しかし、実際のコンドリュールの引張強度は分かっていない。そこで、コンドリュールの引張強度の推定を行うことでコンドライト母天体が経験した圧力について考察することを目的とし、本研究に取り組んだ。

コンドリュールの測定から得られる強度は、球形試料の圧壊強度である。一般に引張強度は試料を整形して測定するが、コンドリュールを整形することは困難である。そこで、他の比較用試料を用いて圧壊強度と引張強度の関係を調べることでコンドリュールの圧壊強度から引張強度を推定することとした。

我々は、30個のコンドリュールについて静的圧縮実験を行った結果、その圧壊強度約8MPaを得た(紫垣&中村, 日本惑星科学会 2014 秋季講演会)。また、かんらん岩の強度測定から、圧壊強度と引張強度はほぼ等しいことが分かった。さらにガラスビーズの実験を通して、圧壊強度を衝突破壊強度との比較から推定することも試みた。そして Ueda et al. (2001) より推定したコンドリュールの衝突破壊強度から圧壊強度を推定した結果、コンドリュールの圧壊強度は30MPaであり、静的圧縮実験による測定結果と異なった。この相違の原因として圧壊強度と衝突破壊強度の関係が試料物質ごとに異なる可能性が挙げられる。

そこで、今回はより多くの岩石試料について引張強度、圧壊強度および衝突破壊強度を測定して各強度間の関係を調べ、コンドリュールの引張強度の推定精度を上げることとした。これら3種類の強度の比較のための試料として用いたのが、かんらん岩、玄武岩、ペレア砂岩、凝灰質砂岩であり、それぞれについて円盤形・球形の試料を用意した。またコンドリュールについてはこれまで Allende(CV3) から直接掘り出したものを用いて測定を行っていたが、今回から Saratov(L4) および Allende(CV3) 隕石から冷凍・解凍法にて取り出したものを使用する。さらに、コンドリュールを弾丸としてステンレス板に衝突させる実験を行い、コンドリュールの衝突破壊強度を本研究でも直接測定する。

本発表では、今回から新たに用いた岩石試料も含めこれまでの試験から得られた各試料の引張強度・圧壊強度・衝突破壊強度とそれらの岩石間・強度間の関係、さらに現時点でそこから考察されるコンドリュールの引張強度について紹介する。

キーワード: コンドライト, コンドリュール

Keywords: chondrites, chondrules

原始惑星の巨大衝突に伴う軌道傾斜角の進化 The inclination evolutions of protoplanets through giant impacts

松本 侑士^{1*}; 長沢 真樹子²; 井田 茂²
MATSUMOTO, Yuji^{1*}; NAGASAWA, Makiko²; IDA, Shigeru²

¹ 国立天文台, ² 東京工業大学

¹NAOJ, ²Tokyo Institute of Technology

The Kepler mission has reported over 3500 planetary candidates (e.g., Batalha et al., 2014).

There are 899 transiting planet candidates in 365 multiple-planet systems, and 333 systems are only composed by 818 ungiant candidates, whose radii are smaller than 6 Earth radius, and which are composed by Neptunes and super-Earth.

When multiple planets are detected by the transit method, the mutual inclinations can be estimated by the ratio of transit duration times.

Fabrycky et al. (2014) suggested that the typical mutual inclination between Kepler candidates in multiple-planet systems lies in 1.0 degree - 2.2 degree.

Inclinations of protoplanets are excited by the mutual scatterings between them.

It is expected that protoplanets can excite the inclinations up to the half values given by their escape velocities.

The excited inclination is estimated as $i_{esc} = 5.4$ degree for a 10 Earth mass planet at 0.1 AU.

The small inclinations of observed ungiants suggest that if they are formed in-situ accretion, some inclination damping mechanism is working.

Since the eccentricities of the merged protoplanets are damped through giant impacts between protoplanets, as pointed out by our previous study, the inclinations is expected to be damped by the giant impacts.

On the other hand, for a Earth mass planet at 1 AU, $i_{esc} = 8.6$ degree.

The resultant planets from N-body simulations in the giant impact stage normally have $i = 3$ degree without any damping forces (e.g., Kokubo et al. 2006).

Ths smaller inclinations of calculated planets also suggest that inclinations are damped through the giant impact.

We investigate inclination evolutions through the collisions in the giant impact stage by N-body simulations.

We find that the inclination of the merger body is smaller than the larger inclination of the colliding two protoplanets.

The inclination after a collision is expressed as the function of the mutual inclination and the angular momenta.

Our N-body simulations suggest that the inclinations of observed ungiant planets can be reproduced by the in-situ accretion of planets in the gas-free environment.

キーワード: 惑星集積, 巨大衝突段階, 軌道傾斜角

Keywords: planetary accretion, giant impact phase, inclination

木星型連惑星の形成確率 The formation probability of the binary planet

荒川 創太^{1*}; 長沢 真樹子¹; 中本 泰史¹
ARAKAWA, Sota^{1*}; NAGASAWA, Makiko¹; NAKAMOTO, Taishi¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo institute of technology

連惑星とは、2つの惑星が互いのまわりを回転しながら、中心星の周りを公転する系である。厚い大気をもつ木星型惑星の場合、惑星散乱過程で惑星同士が接近したときに潮汐力による捕獲が発生し、連惑星が形成され得る。

一般に、動的潮汐によって散逸するエネルギーの大きさは惑星間距離に強い幂で依存しており、また、連惑星として惑星が互いを捕獲するためには惑星同士が物理半径の数倍程度まで接近する必要がある。軌道不安定による惑星同士の近接の程度は、質点の重力相互作用のみから求めることができ、潮汐モデルの詳細には依存しない。さらに、惑星同士の近接は中心星と惑星の近接と異なり連続して発生することがほとんどない。そこで、本研究では、惑星散乱によって2つの惑星が接近して連惑星が形成される確率を、惑星の最接近距離を調べることによって求めた。加えて、連惑星の形成時期が軌道不安定の初期に集中していることから、本研究では軌道計算の時間を10000周で打ち切り、10000試行といった大量の計算を行うことで、どのような連惑星が形成されるかを調べた。

本研究では、軌道不安定によって惑星同士がどの程度の距離に接近するのかを求め、接近時に連惑星が形成されるかどうかをJacobiエネルギーを用いて判定した。結果は、潮汐相互作用を考慮して軌道計算を行った先行研究(Ochiai et al. 2014)とほぼ一致し、連惑星の形成確率は10%程度となった。また、この研究では軌道計算後に潮汐をパラメータとして変化させることができる。潮汐散逸の大きさを4倍と変化させたところ、連惑星の形成確率はおよそ2倍となり、また、潮汐散逸の大きさを4分の1とすると形成確率は4分の1となることが明らかになった。

キーワード: 連惑星, N体計算

Keywords: binary planet, N-body simulation

ヘイズを持つ系外惑星の大気透過スペクトルモデル：ヘイズ粒子の成長と沈降の影響
Transmission spectrum models of exoplanet atmospheres with haze: Effects of growth and settling of haze particles

川島 由依^{1*}; 生駒 大洋¹
KAWASHIMA, Yui^{1*}; IKOMA, Masahiro¹

¹ 東京大学
¹The University of Tokyo

Since the first discovery of an exoplanet in 1995, detection of more than 1500 exoplanets has been reported. Recently, in addition to detection, multi-wavelength transit observations have been done to characterize detected exoplanets. From a decline in apparent stellar brightness due to a planetary transit, we can measure the planetary radius. Also, the observed wavelength-dependent radius (which is often called the transmission spectrum) provides the information of absorption and scattering of stellar light by molecules in the planetary atmosphere. Thus, the composition of the planetary atmosphere can be constrained by comparison between the observational and theoretical transmission spectra. The constraint on atmospheric composition is expected to give an important clue to the origin of the planet.

Until today, transmission spectra of 20 exoplanets have been obtained. Some of the recent observations detected flat or featureless spectra, inferring the existence of particles such as hazes floating in the atmosphere. This means the existence of hazes would obscure the predicted spectral features of molecular absorption, making it difficult to prove its atmospheric composition. Also, the transmission spectra seem to be somewhat diverse. Some contain the Rayleigh-slope feature in the visible, some show molecular and atomic features in the near-IR. These observational facts raise questions such as how common hazy atmospheres are beyond the solar system, how diverse transmission spectra of hazy atmospheres are, and how much information of atmospheric composition one can obtain from hazy atmospheres.

There are a few theoretical studies of transmission spectra of exoplanet atmospheres that consider the effect of haze in the atmosphere (e.g., Howe & Burrows 2012; Morley et al. 2013). However, the models of haze are ad hoc; they treated the size, number density, and vertical distribution of haze particles as parameters. While they found parameter ranges in which the theoretical transmission spectra match the corresponding observations, they did not discuss if the viability of those haze properties is physically supported.

In this study, to derive realistic properties of hazes in the atmospheres of transiting exoplanets, we have developed a new theoretical model that considers the creation, collisional growth, and settling of haze particles. Also, with obtained properties of hazes, we have modeled transmission spectra of the atmospheres, using the numerical code that we developed previously. We have found that the haze particles tend to distribute in a wider region than previously thought and that haze particles of various sizes are formed in the atmosphere, which in general yield flat spectra. Simulating the transmission spectra for wide ranges of parameters concerning haze such as atmospheric composition, temperature, and UV irradiation from the host star, we constrain the parameter ranges that result in observed features in the transmission spectra. We also find the parameter ranges that show features of molecular absorptions in the spectra without being obscured by haze, making it possible to derive the information of the atmospheric composition from the observation of the transmission spectra.

キーワード: 系外惑星, トランジット, 透過スペクトルモデル, 大気組成, ヘイズ
Keywords: exoplanets, transits, transmission spectrum models, atmospheric composition, haze

原始太陽系星雲における同位体比均質化の可能性 The possibility of the homogeneization of the isotopic ratio in the primordial solar nebula

竹石 陽^{1*}; 中本 泰史¹
TAKEISHI, Akira^{1*}; NAKAMOTO, Taishi¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

序論

星・惑星系は、分子雲コアの重力崩壊で形成される。分子雲は多数の超新星爆発や赤色巨星から放出された物質からなるので、分子雲コア中に存在する固体物質の同位体比はさまざまであると考えられる。一方、太陽系の地球や月、火星や隕石などの固体物質の同位体比は、第一近似ではほぼ均質であることが知られている。同位体比が均質となるためには原子レベルでよく混合されることが必要だが、このことは、過去の太陽系において、すべての固体物質が気化するほどの高温（たとえば 2000K 以上）を経験したことを示唆している。しかし、原始太陽系星雲でそのような高温現象がどのように起こり得るのかは、まだよくわかっていない。

目的

本研究では、分子雲コアの重力崩壊に始まる原始太陽系星雲の形成と進化を考え、原始太陽系星雲内のほとんど全ての固体物質が一度は蒸発・再凝結を経験するような進化経路があるかどうかを調べる。

モデル

初期状態として、1 太陽質量を持ち、剛体回転している分子雲コアを考える。分子雲コアにはガスと固体微粒子が含まれるが、個々の固体微粒子は異なる同位体比を持つとする。一方で、固体微粒子は分子雲コア内では機械的によく混合されているとする。分子雲コアの重力崩壊とそれに続く原始太陽系星雲形成と進化は、Cassen & Moosman (1981) に基づきモデル化する。すなわち、分子雲コアの重力崩壊による質量降着率は時間的に一定とし、落下場所は初期角運動量に応じた遠心力半径で決まるとする。また、原始太陽系星雲内には乱流が生じており、乱流粘性が作用してガスの円盤降着が起こるとする。さらには、原始太陽系星雲の自己重力による重力トルクも考慮する (Nakamoto & Nakagawa 1995)。固体微粒子はガスと一緒に動くとともにガスに対して相対的に拡散するが、その様子は乱流拡散モデル (Wehrstedt & Gail 2002) を用いて計算する。原始太陽系星雲の温度は、乱流粘性加熱と円盤表面から外部に放出される輻射冷却の釣り合いにより求める。このモデルにおけるモデルパラメータは、初期分子雲コアの温度と剛体回転角速度の 2 つである。固体微粒子の温度が一定温度 (2000K) 以上になった場合は気化するとし、その温度を再度下回った場合は同位体比が均質化した固体微粒子が凝結するとする。そして、同位体比が均質化した固体微粒子の空間分布の時間変化を計算し、十分時間が経った時（微惑星形成の直前期）の固体微粒子同位体比が、太陽系全体にわたって均質化しているかどうかを調べる。

結果

原始太陽系星雲の温度は、太陽に近いほど高温の分布となる。このため、初期分子雲コアの温度が高い方が、また、回転角速度が小さい方が、半径の小さい原始太陽系星雲が形成されることとなり、蒸発・再凝結を経験する固体微粒子の割合が高くなった。たとえば、初期分子雲コアの温度が 15K、回転角速度が $(2-3) \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ の場合、原始太陽系星雲内のすべての固体微粒子の同位体比が均質となった。すなわち、形成される原始太陽系星雲の半径が小さければ、現在の太陽系で見られるような均質な同位体比をもつ惑星系が形成されることがわかった。

議論

観測によれば、分子雲コアの回転角速度は 10^{-14} s^{-1} から 10^{-13} s^{-1} 程度のものが多い (Goodman et al. 1993)。したがって、現在の太陽系に見られる均質な同位体比分布が本研究で考えたようなモデルで作られたとすれば、太陽系を作った分子雲コアは平均値よりも小さい回転角速度を持っていたと推定される。このことは、回転角運動量が小さい分子雲コアからは連星よりも単独星が形成されやすい (Matsumoto & Hanawa 2003) という傾向と調和的である。

結論

分子雲コアの重力崩壊に続く原始太陽系星雲の形成と進化を調べた結果、原始太陽系星雲内のほとんど全ての固体微粒子が蒸発と再凝結を経験し、同位体比が均質化するような進化経路が存在することがわかった。すなわち、形成される原始太陽系星雲の半径が小さければよく、それは、分子雲コアの温度が高い場合、もしくは分子雲コアの回転角速度が小さい場合に対応する。

大赤斑の起源と衝突による月と地球の深海洋底の形成 Origin of the Great Red Spot and Formation of Moon and Earth's deep ocean-floor caused by Collision of mantle asteroid

種子 彰^{1*}
TANEKO, Akira^{1*}

¹SEED SCIENCE Labo.
¹SEED SCIENCE Labo.

1. マルチインパクト仮説

: MI は、月と惑星地球進化への新仮説で、「小惑星帯や木星大赤斑と月と地球の謎」への統一的な解釈を可能とする。

◎ (1). 「マルチインパクトによる月と深海洋底の起源仮説」マントル片の地球への新しい衝突メカニズムを提案。

○原始惑星セラは、証明されていないチチウス・ボーデの法則の、小惑星帯位置に形成された。

○何故、原始惑星セラが破壊したのか? = 木星摂動による原始惑星 CERRA の軌道の偏平化と潮汐力による破断。

● (2). 「巨大惑星衝突仮説: GI(キャメロン etc.)」の問題点を下記に検討した。

×分化した火星サイズの原始惑星は、公転面上斜め後方からの(偶然による)衝突による。=不可能。

×マントル成分だけの月を形成する仮説で、地球の進化と現状を説明できない。 =月を形成するための仮説

2. 二つの仮説の比較検討

*****MI *****VS *****GI *****

○ (1). 月形成時の衝突速度は、MI マルチ衝突 (**12.4km/s・36.5度**) vs GI 巨大衝突 (~8km/s:最第・約30度)

○ (2). 衝突エネルギーでは、MI($8.01 \times 10^{30}J$) であり vs GI($2.05 \times 10^{31}J$)= MI の約2.56倍も巨大

○ (3). 衝突確率と時期・メカニズム 高い約40億年前・必然メカニズム vs 低い 約46億年前・偶然

3. マルチインパクト仮説の効果

*****「地球の謎」への統一的な理解が可能である。*****

◎ (1) 何故、地球表面積の70%もの広さの深海洋底(-5km)が形成されたのか? ⇒複数個の潮汐断裂片の衝突による。

○ (2). 何故、地球では五たび以上の生物大絶滅が起きたのか? ⇒複数破片の地球へのマルチインパクト MI が原因。

□ (3). 隕石に未分化コンドライトと分化石英エコンドライト・鉄隕石が、何故混在するのか? ⇒原因は MI である。

● (4). 何故、小惑星帯では惑星に成れなかった(旧説)のか? ⇒CERRA の潮汐破壊が原因で、□小惑星帯の起源。

◎ (5). プレートテクトニクスの Plate 境界は何故その位置に形成したか? ⇒地殻剥離と深海洋底形成の起源を提案。

◎ (6). 何故月と太陽系がほぼ同一公転面に形成され、マントルだけで形成されたのか? ⇒マルチインパクト仮説。

◎ (7). 何故、環太平洋地震帯が形成され、背弧海盆が形成されたのか? ⇒地殻剥離、マントル欠落、アイススタシー

◎ (8). 大陸移動と深海底更新の起源と、駆動力の謎を解明した。 ⇒駆動力=MI による慣性モーメントの偏芯の補完。

◎ (9). 何故キンバーライトパイプが南アのプレミアやロシアのミルーヌィ地区に形成されたのか? ⇒ハワイ位置

の衝突後の大陸移動や、ミルーヌィ鉱山の反対側の Drake Passage に衝突し、南極大陸が移動して安定化。

◎ (10). 何故地軸が公転面から 23° 傾いたか? ⇒その Drake(高緯度)位置への CERRA 分裂片の衝突と推定した。

◎ (11). 何故、地球のコア偏芯(約10%)が起きたか? ⇒CERRA 破片衝突、地球マントルが欠損し、アイススタシー。

□ (12). 木星大赤斑の何故と如何に? を考える ⇒MI マントル片の衝突による。***これは世界初の新仮説です***

□ (13). 外惑星はガス・氷なのに、冥王星が何故シリケイト準惑星なのか? ⇒MI マントル破片のスイングバイで。

この様に、本マルチインパクトによる月と地球進化の起源仮説は、今後の統一的な理解と解釈に役立つ。

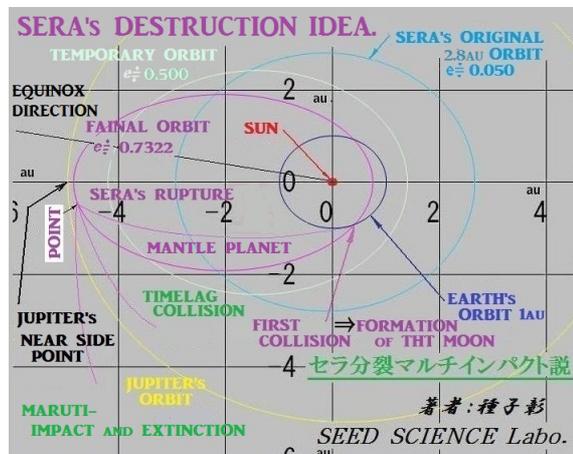
キーワード: 木星摂動による CERRA 潮汐分裂, 地球への衝突, 月形成, 地球深海洋底の形成, 大赤斑の起源, 小惑星帯と隕石の起源

Keywords: The CERRA tide division by Jupiter perturbation, Collision of the Earth, Moon formation, Formation of Earth's Deep Oceanfloor, Origin of the Great Red Spot, Origin of the asteroid belt and the meteorite

PPS21-P10

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 18:15-19:30



地球型惑星大気における1次元雲形成モデルとその定常解 A one-dimensional cloud model for Earth-like exoplanets and its stationary solution

大野 和正^{1*}; 奥住 聡²
OHNO, Kazumasa^{1*}; OKUZUMI, Satoshi²

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 東京工業大学大学院理工学研究科

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institut, ²Graduate School of Science, Tokyo Institute of Technology

近年の系外惑星の透過スペクトル観測において、分子の吸収線が表れない平坦なスペクトルを持つものが見ついている。平坦なスペクトルが表れる理由として2つの可能性が示唆されている。1つ目は系外惑星が平均分子量の高い大気を持っている場合である。この場合、大気が低高度に集中することで薄い大気となり、それによって吸収線が表れない。2つ目に大気に光学的に厚い雲が存在する場合、雲が中心星からの輻射を遮ってしまうため、吸収線が表れない。現在の観測では、平坦なスペクトルが上述のいずれの現象によるものなのか判断することが困難である。そのため、系外惑星に光学的に厚い雲が形成されるかを、理論的な雲モデルを用いて推定することは重要となる。

先行の系外惑星雲モデルに Zsom et al.2012 というものがある。このモデルは凝縮過程の微物理を考慮する一方、雲の頂点(雲頂)の位置と雨粒によって掃き集められる雲粒の割合は不定パラメーターとしている。しかし、先行のモデルには問題点があり、雲の光学特性がこれらの不定パラメーターに大きく依存してしまっている。

本研究は雲粒の凝縮過程だけでなく、雲粒・雨粒の衝突過程まで考慮に入れた1次元雲形成モデルを作成することを目的とする。そこで雨粒と雲粒の衝突過程を物理的に考慮するため、雲粒と雨粒の進化を同時に計算するモデルを作成した。我々のモデルでは、上昇気流速度という物理パラメーターが新しく導入される一方で、雲頂の位置と雨粒の掃き集め効率は自動的に決定される。¥¥

作成したモデルを地球に適用することで次の結果が得られた。上昇気流速度が0.1m/s以下となる穏やかな大気では、光学的に薄い雲が形成される可能性がある。この結果は上昇気流が弱いほど雲頂が低くなり、雲量が減少することに起因している。また、地表の雲凝結核の数密度が 10cm^{-3} 以下の条件でも、光学的に薄い雲が形成される可能性があることが分かった。これは凝縮のみを考えた場合と比較して、雲粒の個数が衝突過程によって減少したこと、特に雨粒によって雲粒の70%程度が取り除かれたことに起因している。これらの光学的に薄い雲が形成されうるという結果は、雲頂の位置と衝突過程を考慮することで新たに得られるようになった結果である。

本研究によって、環境条件に対する定常な雲の分布、光学特性を求めるモデルが作成された。今後は本研究で作成したモデルを応用して、系外惑星の雲が観測スペクトルへ与える影響を推定することが課題である。

初期地球における海洋潮汐の半解析的検討 Semi-analytical estimation of the ocean tide on the early Earth

元山 舞^{1*}; 綱川 秀夫¹; 高橋 太²
MOTOYAMA, Mai^{1*}; TSUNAKAWA, Hideo¹; TAKAHASHI, Futoshi²

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 九州大学大学院理学研究院

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Faculty of Sciences, Kyushu University

海洋潮汐は、地球表層環境のみならず生命誕生・進化に大きな影響を与えてきた。地球に作用する潮汐力は両者の距離の3乗に逆比例するため、月の軌道進化により大きく変化したと考えられる。特に、初期地球(46~25億年前)では、地球・月間の距離は3Re~40Reと考えられ(Goldreich, 1966)、平衡潮汐を考えれば現在と桁違いの振幅をもつ海洋潮汐になる。しかし、Abe et al. (1997)、Abe & Ooe (2001)は、一様深度(1000m, 2600m, 4200m)の海洋を仮定して次数2の潮汐力(半日潮)について数値シミュレーションを行った結果、潮汐の振幅は0.1m程度と小さいことを示した。これは、海洋の自由振動の固有周期が地球自転周期と異なるため、強制振動としての海洋潮汐が抑えられるからである。

海洋の自由振動については、海洋深度と大陸の分布が大きく影響する。大陸成長については多くのモデルが提唱されているが、有力なモデルでは、地球形成後5~20億年間は大陸がほとんどなかったと考えられている。一方、地質学的・地球化学的記録から約40億年前には海が存在していたと考えられているが、海洋深度の正確な推定は確立しておらず、現在の数倍程度であったという説もある。そこで、本研究では、地球全表面を一様深度の海洋が覆っていたと仮定し、海洋深度を連続変数のパラメータとして潮汐共振を半解析的に検討した。また、従来は次数2のみの潮汐力を扱っていたが、共振があれば次数3のモードが相対的に大きくなりうることも考え、両方のモードを検討対象とした。

海洋の自由振動における固有振動数は深度と固有振動モードに依存し、ラプラスの潮汐方程式で表される。Longuet-Higgins (1968)は、粘性を考慮しないラプラスの潮汐方程式を数値的に解き、流体の各モードに対する固有振動数をラムのパラメータの関数として求めた。この解を海洋の自由振動に適用すると、海洋深度と地球自転角速度を連続的なパラメータとして取り扱った固有振動数を表示できる。次数2のモードとして P_2^2 、次数3のモードとして P_3^1 及び P_3^3 を仮定し、地球自転角速度が現在値の1~4.8倍の範囲をとりうるとして、共振が起きうる海洋深度 h の範囲を求めた。検討の結果、 P_2^2 では $h = 17 \sim 420$ km、 P_3^1 では $h = 0.5 \sim 13$ km、 P_3^3 では $h = 18 \sim 480$ kmとなった。 P_2^2 、 P_3^3 のモードが共鳴を起こして卓越する海洋深度は、現在の深度の6倍以上になる。一方、 P_3^1 のモードは現在の海洋深度でも、月軌道進化の過程で共振した可能性がある。ただし、 P_3^1 モードが P_2^2 モードよりも大きくなる可能性については、粘性を考慮した共振を検討する必要がある。

キーワード: 海洋潮汐, 地球月系の力学的進化, 初期地球, 固有振動数, 固有関数, 潮汐力

Keywords: Ocean tide, Dynamical evolution of earth-moon system, primitive Earth, eigenfrequency, eigenfunction, tidal force

iSALE shock physics code を用いた数値衝突計算: 衝撃波伝播過程の再評価 The attenuation behavior of shockwaves induced by hypervelocity impacts investigated using the iSALE shock physics code

黒澤 耕介^{1*}; 鎌田 俊一²
KUROSAWA, Kosuke^{1*}; KAMATA, Shunichi²

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 北海道大学大学院理学研究院
¹PERC/chitech, ²Graduate School of Science, Hokkaido University

固体惑星表面に残る多数の衝突クレータは、太陽系天体が激しい衝突にさらされてきたことを物語る。衝突天体が持ち込んだ莫大な運動エネルギーは衝撃波へと変換され標的天体内部に伝播し、様々な相変化(蒸発、熔融、高圧相転移)や特徴的な破碎構造(例えばシャッターコーン構造など)を作り出す。地質に残る高圧相鉱物や破壊構造は天体衝突が起きたという証拠をもたらす。太陽系衝突史を紐解くための手がかりを与えてくれる。近年はアポロ計画で回収された月試料や隕石からも高圧相鉱物が次々と発見されている。回収試料から衝突史を探るには衝突の規模に対して衝撃圧、昇温度、その持続時間を記述する物理モデルが必要となる。ところが標的天体の重力加速度、空隙率、物質強度、表面及び地下温度構造によって、衝撃波の伝播過程がどのように変化するかは十分に理解されているとはいえない。

このような状況を受けて我々は iSALE shock physics code を用いて衝撃波の伝播過程を調べる数値実験を行っている。iSALE を用いることで、衝撃波と希薄波の干渉による衝撃波減衰を数値的に解くことができる。また物質の粘弾塑性体応答を取り扱うための物質モデルや無限小空隙の圧密モデルが実装されており、今回の目的には最適の数値計算コードであると言える。これまでに、(1) 空隙の存在は衝撃波の減衰率を大幅に増加させること、(2) 完全流体標的よりも粘弾塑性体標的の方が衝撃波が減衰しやすいこと、(3) 標的の内部摩擦が衝撃波の波形に影響を与え得ること、(4) 標的溫度が上がると衝撃波減衰率が大きくなること、などの結果を得ている。今後は多数の数値実験の結果をもとにして、それらを統一的に解釈できる衝撃波伝播モデルを構築することを目標としている。

謝辞

iSALE の開発者である Gareth Collins, Kai Wunnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausen の各氏に感謝致します。

キーワード: 天体衝突, 衝撃波伝播, 高圧相鉱物, シャッターコーン, 数値衝突計算

Keywords: Hypervelocity impacts, Shock propagation, High-pressure minerals, Shutter cones, Shock physics code

衝突貫入シミュレーションのための圧縮性非膨張性流体ソルバーの開発 Development of Compressible and Non-Expanding Fluid Solver for Simulation of Impact and Penetration Dynamics

鈴木 宏二郎^{1*}
SUZUKI, Kojiro^{1*}

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科
¹GSFS, The University of Tokyo

天体の表面に衝突し、地下に貫入することで内部探査を可能とするペネトレータは、小型ミッションによる月・惑星探査で有用な技術と期待される。その開発には、天体表面に衝突、貫入するダイナミクスの解析モデル構築が必須である。極超音速飛行体の空力特性推算用であるニュートン流理論をベースとした荷重モデルが月ペネトレータの貫入軌道を良く予測できること (Suzuki, et al., 20th ISTS, 96-i-02V, 1996) や、同様なモデルが氷をターゲットとしたペネトレータでも有効であること (Suzuki, et al., 30th ISTS, 2015, to be presented) は、機体まわりのレゴリスや破碎された氷片の挙動がマクロな流体として近似できることを示唆している。しかし、これらの流れにおいて、負荷による圧縮は発生するものの、除荷や真空にさらされた際に膨張は起こらない。これは、通常の圧縮性気体の力学と異なり、構成粒子のランダムな熱運動が存在していないためである。ここでは、ペネトレータ貫入や天体衝突現象への適用を目的として、「圧縮性非膨張性流体 (Compressible and Non-Expanding Fluid)」モデル (以下、CNEF モデル) を考案し、その数値シミュレーションのためのリーマン解法を試作した。これを用いた衝突問題の数値解を示し、この流体モデルの性質について考察していく。

衝突を流体問題として数値解析する手法としては、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法が知られている。SPH 法は、連続体の大変形や高速破壊を表現し得る点でこの種の衝突シミュレーションに適しており、ゴドノフ法の適用などにより計算の安定化も図れる (難波他, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, D02-2, 2014) が、粒子法であるため、計算効率が悪く、また、全てが粒子で表現されるため、突入体やターゲット容器箱の表面など、剛体面の扱いに問題がある。CNEF の数値解析には有限体積法を用いることとした。

レゴリスや細かい氷片群では、粒子間のばらつきや不均一性が大きいと思われるが、それらを無視し、マクロな流体として考える。CNEF モデルと通常の圧縮性気体の違いは、膨張に対する挙動にある。気体の場合、減圧や真空開放によって膨張し密度が低下していくが、固体粒子群の場合、これらの除荷があっても膨張は起こらない。ここでは、理想的な場合として、除荷によって密度を保ったまま、圧力が瞬間的に 0 に落ちるものとする。このような流体では、衝撃波はできても膨張波はできず、その代わりに、物質と物質の間で空隙の発生を許容する。粒子間の衝突や摩擦による粘性や拡散を無視すると、CNEF のダイナミクスは、通常のエイラー方程式 (質量と運動量の保存則) で記述される。簡単のため圧力は密度のみの関数とするが、上記のように負荷と除荷によって値が異なるため、もはや状態量ではないことに注意する。CNEF は真空と共存できるため、物質の境界を扱う必要があるが、ここでは VOF 法 (Hirt, C. W. and Nichols, B. D., J. Comp. Phys., 39, 1981) を使い、各セルにおける物質の体積占有率を補助変数として導入する。この式を有限体積法で離散化して解くことになるが、ゴドノフ法を適用する際にリーマンソルバーが必要となる。基本解のパターンとしては今のところ、(a) 真空中の物質移動、(b) 追突による前後 2 つの衝撃波の発生、(c) 追突により前方物質が先行し、間に除荷領域が発生、(d) 前方物質の速度が速く、前方後方にすき間が発生、の 4 ケースを見出している。今後、新たなパターンが見つかる可能性はある。

CNEF に対するリーマン問題について、全ての基本解を得たという保証はないが、負荷中の圧力変化が密度変化に比例する (つまり音速一定) することを仮定し、基本解の解析解を求め、ゴドノフ法によって数値解析に適用した。1 次元正面衝突問題を数値解析したところ、真空中を進む 2 つの流体が衝突し、膨張することなく 1 体化するなど、CNEF モデルが期待した性質を持っていることを波動線図上で確認した。今後、計算例を増やし、その数学的妥当性を検証しつつ、実際の衝突問題に適用するための改良を加えていく。

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B) No. 25289301) 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: 衝突, 数値シミュレーション, 流体力学, リーマンソルバー
Keywords: impact, numerical simulation, fluid dynamics, Riemann solver

ガス・ダスト混合流体の一次元平行平板衝撃波：微惑星周りの弧状衝撃波によるコンドリュール形成シミュレーションに向けて 1-D Plane Parallel Shock Waves of Dust-Gas Mixed Fluid: For Simulations of Chondrule Forming Planetesimal Bow Shocks

勝田 祐哉^{1*}; 中本 泰史¹
KATSUDA, Yuya^{1*}; NAKAMOTO, Taishi¹

¹ 東京工業大学
¹Tokyo Institute of Technology

コンドリュールは mm サイズの球形をしたケイ酸塩組成組織であり、多くのコンドライト隕石の主要な構成要素である。岩石学的な考察から、コンドリュールは太陽系初期に急激な加熱を受けて溶融したと考えられている。その加熱プロセスの有力なモデルの一つとして衝撃波加熱モデルがあり、我々は楕円軌道を持つ微惑星を衝撃波の発生源として有力視している。

微惑星周りの弧状衝撃波でのコンドリュール形成についてはいくつかの計算がなされている (e.g. Boley et al., 2013; Ciesla et al., 2004)。これらの計算では太陽系元素組成からダスト・ガス質量比が $1:100$ と考えている。一方で、岩石学的な考察からコンドリュールが溶解した際の周囲の酸素分圧は高かったことが推定されている。ダストの蒸発によりこの酸素分圧を供給したとすれば、そのダスト・ガスの質量比は太陽系元素組成から見積もられる標準的なダスト・ガス質量比の百倍ないし千倍程度ダストの多い $1:1$ ないし $10:1$ である (Jones et al. 2000)。この場合ダストが衝撃波の流れに与える影響は無視できず、ダストを多く含んだ衝撃波をシミュレーションする必要がある。

ダスト・ガス質量比が高い微惑星周りの弧状衝撃波への応用を目指し、本研究ではまず、1次元平行平板におけるガスとダストの混合流体の衝撃波について物理的な性質を調べた。特に、衝撃波後面における諸物理量がダスト・ガス質量比に対してどのように変化するか注目した。次に、将来的に2次元流や輻射の効果を含めた衝撃波のシミュレーションを行う準備として、1次元平行平板流の数値計算コードの開発も行った。

本研究では簡単のため、ダストは微小なサイズのみ存在するものとし、ダストが常にガスと同じ速度と温度を持つものと仮定する。一方、ダストは 2000 K 以上で全て気化するものとする。

まず、熱エネルギー輸送のない断熱の場合について、衝撃波後面での温度、密度、速度、圧力などを解析的に求めた。ダストがない場合についてはランキン=ユゴニオ関係としてよく知られているものをダスト粒子が入った場合、さらに温度によってダスト粒子が蒸発した場合に対して拡張した。その結果、衝撃波後面での密度や圧力、速度はダスト・ガス比にあまりよらないが、ダスト・ガス比が高いほど温度が高くなることがわかった。圧力については衝撃波前面の運動量流束(動圧)からほとんど決まること、密度と速度については質量流束で決められることから理解することができる。一方で、温度は、ダスト・ガス比が上がると気体の粒子数が少なくなり、同じ圧力を達成する為には高い温度が必要となることから理解することができる。

次に、ZEUSスキーム (Stone and Norman, 1992) を用いて1次元シミュレーションを行った。計算の結果は、解析的に得られた結果とよく一致した。よって、輻射の効果を含めた2次元シミュレーションにスキームを応用する見通しも得られた。

キーワード: コンドリュール, 衝撃波, 流体シミュレーション
Keywords: chondrule, shock wave, hydrodynamics simulation

小惑星の複雑形状を反映した天体表面温度の自転波形に関する数値シミュレーション A numerical simulation on diurnal thermal waves of an asteroid surface with detailed topographical model

滝田 隼^{1*}; 田中 智²; 千秋 博紀³
TAKITA, Jun^{1*}; TANAKA, Satoshi²; SENSHU, Hiroki³

¹ 東京大学大学院, 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, ²ISAS/JAXA, ³Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology

小惑星イトカワの形状に関しては、空間解像度が1 m程度で全体形状が数値モデルとして復元されており、現在これを利用した天体の表面温度の空間解像度に対する振る舞いについて検討を進めている。これは将来の探査による近接観測に対して重要となる熱モデルに用いるべき形状モデルの空間解像度を決定し、期待される観測結果の誤差に対する知見を得るためである。探査機の天体までの距離で観測装置の持つ天体の空間解像度が決まるが、熱的な観測結果を説明するのに十分な形状モデルの空間解像度はいかほどであるのかを知るための具体的検討が必要であり、実施した結果を今回公表する。月や水星のようなほぼ完全に球形で近似できる天体の場合の検討は過去に行われ成功を収めている。小惑星の熱モデルに関しては、数十年程度の歴史を持つが、主に望遠鏡を用いたライトカーブの観測結果を説明するのが主要な用途であり、これら古典的スタイルは近年の探査の結果を説明するのに必ずしも有用ではないことが明らかになりつつある。できるだけパラメータを物理的に意味の明確な形で取り入れられ、観測結果を明示的に説明できるモデルが望まれており、そのひとつが本件が含まれる天体の複雑形状を考慮した熱的なモデリングに関する研究である。NEA型小惑星の表層物質は、地上観測の結果からは熱赤外領域での振舞いを見た場合、低アルベドで黒体に近い輻射率をもつことがわかっているが、複雑形状を考慮することで付随する2次的な加熱効果に関する適切な取り扱いがモデル適用の妥当性を決める要因となる。

本発表は、はやぶさ2探査機に搭載されている中間赤外カメラによる対象天体1999JU3の撮像画像を元に熱慣性を推定する方法の検討に関する位置づけとなる。近接撮像で空間解像度が上がるにつれ単純な熱モデルとの相違が出始めることが予想されるが、この懸案に関する具体的な検討である。具体的には、天体が非点熱源であり、かつ表面形状が非球面的な振る舞いをするような天体表面の熱的モデリングを行った場合の結果である。この場合新たに付随する熱的效果は3つあり、まず表面の凹凸に起因する局所的な陰影ができ冷却する効果、次に表面で太陽の熱量を一度吸収した後に輻射熱として再放出されるエネルギーが周囲を暖める効果、および天体表面で太陽光が散乱反射することで温まる効果であるが、これらを考慮した条件下で表面温度の計算を実施した。小惑星のアルベドと輻射率からは特に前者2つの加熱冷却現象が重要になる。本発表では、特に天体の局所的な温度を追跡して再現した自転に伴う温度の上下を表す、一日の波形の詳細な形について計算した結果を発表する予定である。これは局所的な凹凸のみならず、大域的な形状による陰影などの影響を反映しており、探査機による現実の天体表面の近接観測では無視できない熱的現象の効果を把握するのに有用と思われる。天体表層の物理的状態を知る指標のひとつに熱慣性があるが、これは加熱時刻に対する時間的な遅れとして把握できる。しかしながら探査機が取得する画像の撮像頻度如何では推定精度が最大温度等ほかの方法に劣る恐れがあり、このことから逆にどの程度の撮像運用が必要かを知るのに重要な結果となることが見込まれる。

キーワード: 小惑星, 表面温度, 形状モデル, 熱モデル, 地形, 熱慣性

Keywords: asteroid, surface temperature, spatial resolution, thermal modeling, topography, thermal inertia

小惑星ベスタの熱進化の数値シミュレーション Thermal evolution simulation of asteroid Vesta

野上 竜彦^{1*}; 城野 信一¹

NOGAMI, Tatsuhiko^{1*}; SHIRONO, Sin-iti¹

¹ 名古屋大学 大学院環境学研究科, ² 名古屋大学 大学院環境学研究科

¹Division of earth and planetary science, Nagoya university, ²Division of earth and planetary science, Nagoya university

Vesta has been regarded as the parent body of the HED meteorites. From the observation of DAWN spacecraft, the uppermost layer of Vesta is composed from howardite ranging from 50km to 80km (Jutzi et al. 2013). It is known that the ratio of the number of eucrites to diogenites is around two. Based on these facts, rapidly cooled magma layer on Vesta should be more than 10km in thickness.

In this work, I studied the evolution of internal thermal evolution of Vesta due to heating of decay of ²⁶Al. I calculate the temperature distribution by solving numerically heat conduction equation. According to Formisano et al.(2013), if Vesta completed its formation within 1.4Ma from the injections of ²⁶Al into the solar nebula, the degree of silicate melting of inside Vesta exceeds 50 vol%. But in that work, convection and melt migration were not taken into account. These two mechanisms contribute to cool Vesta. So it is expected that the formation of Vesta is completed more early if these are taken into account. By the way, it is known that it takes about a few hundreds year for Vesta-size planet to complete its formation in planetary formation standard model.

As a convection model, I adopted the simple model of Kaula (1979). It was assumed that generated melt migrates the surface instantaneously, and the migrating melt to the surface was accounted as the rapidly cooled magma. There are two parameters in this study, including a (the percentage of melt migration) and t₀ (formation time of Vesta), and perform simulation taking into account the convection and melt migration.

As a result, convection and melt migration substantially change the evolution of internal thermal structure, and total eruptive volume of melt considerably depends on a and t₀. The magma volume increases as a increases. On the other hand, the magma volume decreases as t₀ increases.

When t₀=0, corresponding to no decay of ²⁶Al at the beginning, and a>0.3, the erupting magma layer of 10km in thickness is formed. When a=1, that is all melt is erupted, the erupting magma layer of 10km is formed if t₀<0.9Ma. According to these results, Vesta should be completed its formation within 0.9Ma after CAI formation, and more than 30% of generated melt should migrate the surface. But all generated melts aren't necessarily erupted, and if a<1, Vesta has to be completed more early.

Therefore, it is suggested that the formation time of Vesta should be more early than the estimate by Formisano et al.(2013), and that planetary formation standard model might have to be reviewed.

デッドゾーン縁辺における木星型惑星コア形成：ガス面密度分布依存性 Jovian core formation at the boundaries of dead zone: dependence on the gas surface density ditribution

城野 信一^{1*}; 片山 将文¹
SIRONO, Sin-iti^{1*}; KATAYAMA, Masahumi¹

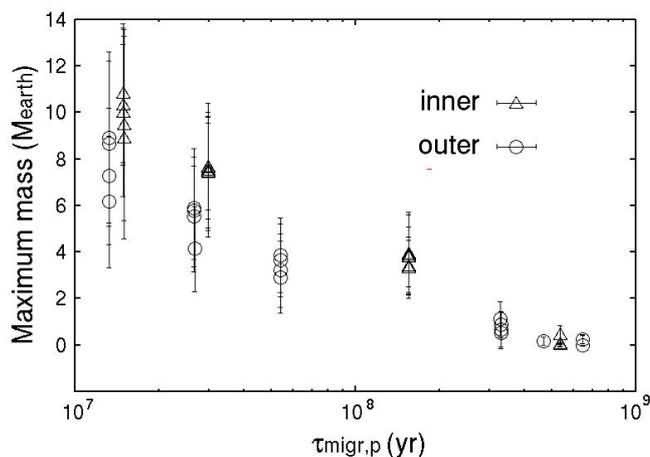
¹ 名古屋大学大学院環境学研究科
¹ Graduate School of Environmental Sciences, Nagoya University

原始惑星系円盤には、「デッドゾーン」と呼ばれる乱流が弱い領域があると考えられている。デッドゾーンの外部と内部で乱流による粘性が大きく変化することになる。この粘性の大きな変化が渦を発生させ、ダストアグリゲイトが渦に捕獲されることにより効率的に原始惑星を形成するメカニズムが Lyla et al. (2009, A&A 497, 869) によって提案されている。このシナリオにそって原始惑星が特定の領域で形成されたらその後の進化はどうなるか？ という問題意識の下、Sandor et al. (2011, ApJ 728, L9) によって N 体シミュレーションが行われた。このシミュレーションにおいては、デッドゾーンの外側縁辺において原始惑星が形成されるとしている。また、デッドゾーンの内側外側縁辺それぞれにガス面密度分布のピークが存在し、その二カ所が惑星移動の平衡半径となっている。つまり、ガス円盤からのトルクによって原始惑星はこの二カ所のどちらかに移動する。シミュレーションの結果、数十万年という短いタイムスケールで 10 地球質量程度の天体がデッドゾーンの外側縁辺に形成されることが示された。

このモデルではガス面密度分布の二つのピークにおいてコアが形成されることになるが、面密度分布は別のシミュレーションから得られた分布を用いられている。そこで我々は面密度分布のピークの高さを変化させ、最も重い天体の質量がどう変化するかを調べた。Sandor et al. (2011) で用いられたガス面密度分布を基準にし、そこから定数倍することで面密度分布のピークの高さを変化させた。惑星の移動時間スケールはピークの高さに反比例した。最大天体質量は惑星の移動時間スケールの対数に依存して変化することが分かった (図参照)。木星型惑星コアの形成においては、ガス面密度分布の時間進化も無視できないことが分かる。発表では、ガス面密度分布の時間進化も取り入れた計算の結果についても議論する。

図 1：形成された天体の最大質量。横軸は移動時間スケール。inner は内側、outer は外側の平衡半径における最大質量を示す。誤差は 100 シミュレーションの標準偏差を示す。

キーワード: 木星型惑星, コア, デッドゾーン, ガス面密度分布
Keywords: jovian planet, core, dead zone, gas surface density distribution



衝突実験による玄武岩標的中の密度・誘電率・クラック量の測定 Measurements of the density, permittivity, and crack distribution in basalt targets based on the impact experiment

石山 謙^{1*}; 熊本 篤志¹; 高木 靖彦²; 中村 教博³; 長谷川 直⁴

ISHIYAMA, Ken^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi¹; TAKAGI, Yasuhiko²; NAKAMURA, Norihiro³; HASEGAWA, Sunao⁴

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 愛知東邦大学経営学部地域ビジネス学科, ³ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ⁴ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

¹Department of Geophysics, Tohoku University, ²Department of Regional Business, Aichi Toho University, ³Department of Earth Science, Tohoku University, ⁴ISAS/JAXA

約 46 億年前に形成された月は、その表面に多くの隕石が衝突し、多くのクレーター地形が残されている。月の表側には、巨大な隕石衝突による盆地構造が形成されており、その内側では、玄武岩が厚く堆積し、海領域が形成されている。月周回衛星 SELENE (かぐや) に搭載された月レーダーサウンダーは、月の海領域における地下構造探査に成功した [Ono et al., 2009]。この観測データを使って、湿りの海において推定された最上層の玄武岩の誘電率からこの玄武岩層が 20% 以上の空隙率をもつことが示唆された [Ishiyama et al., 2013]。この空隙率は、アポロサンプルの空隙率を上回ることから月表層の玄武岩には隕石衝突で形成されたクラックによるものと推定されているが、衝突によるクラックが実際に地下にどのような分布で形成され、誘電率にどのように反映されていたかは、空隙が均等に混合された媒質を想定する等価誘電率モデルでは正確に検討できない。そこで、本研究では、衝突実験により玄武岩標的にクレーターを形成し、その内部の密度・クラック量・誘電率の測定を行った。

衝突実験は、2014 年 12 月に宇宙科学研究所の横型二段式軽ガス (水素) 銃を使用して行われた。標的には 20 cm × 20 cm × 10 cm の玄武岩、弾丸には直径 0.32 cm のステンレス球 (質量 0.133 g) を用い、衝突速度依存性を調べるため、3.5, 4.5, 5.5, 6.5 km/s の各速度で衝突させた。再現性確認のため、同じ条件の実験を 2 回ずつ行った。次に、形成されたクレーター周辺部で、クラック異方性による誘電率の相違を調べるため、1 つの試料から衝突に平行な方向と垂直な方向に沿った直径 2.5 cm ・長さ約 8~10 cm の円柱状のコアサンプルを切り出した。このクラックの異方性の調査により、空隙が不均一に混合された媒質を想定する誘電率モデル [e.g., Sihvola, 1988] で説明できるかどうか分かる。最後に、切り出したコアサンプルを約 4 mm の厚さごとに切断し、厚片を作成した。また、厚片内のクラック分布の同定をしやすくするため、厚片の表面を研磨した。密度は、厚片の重量と体積の測定から見積もり、クラック量は厚片の表面をスキャナで読み取ることで調べた。誘電率は、東陽テクニカ社の誘電体測定システム (12962A 型誘電率測定インターフェイスと 1260 型インピーダンスアナライザ) で 5 MHz の周波数で測定した。講演では、この衝突実験で得られた試料の初期解析結果を報告する。

謝辞: 実験は、JAXA 宇宙科学研究所のスペースプラズマ共同利用により行われた。

原始星降着円盤の構造と微惑星形成 (II) Structure of the accretion disk around a protostar and the planetesimal formation (II)

今枝 佑輔^{1*}; 戎崎 俊一¹
IMAEDA, Yusuke^{1*}; EBISUZAKI, Toshikazu¹

¹ 理化学研究所
¹RIKEN

固体粒子の濃集が局所的に生じうる原始惑星系円盤モデルを、定常粘性降着円盤の範囲で構築した。原始惑星系円盤において固体粒子が濃集することは、ダスト層の重力不安定を通じた微惑星形成にとって非常に重要な過程である (Youdin and Shu 2002)。小さなダストは原始惑星系円盤内で合体成長し、粒径が大きくなるとガスに対して相対的に移動するようになることが知られている。移動の方向はガスの圧力勾配の向きに依存し、典型的な原始惑星系円盤ではダストの移動方向は内向きである。またその移動のタイムスケールは非常に速く、典型的には 1000 年程度で中心星に落下してしまうことが示唆されていて、微惑星形成の一つの困難と考えられている。

今回我々は、粘性加熱を考慮した定常降着円盤において、電離源として系外宇宙線、円盤内の放射性物質の崩壊に加え、熱電離の効果も取り入れて原始惑星系円盤モデルを構築した。様々な先行研究が示すように、原始惑星系円盤の外縁部は宇宙線による電離が十分なため、磁気回転不安定 (MRI) による乱流領域となる一方、宇宙線が十分遮蔽される内側高密度領域は赤道面で MRI 乱流が生じない静穏領域となる。今回の場合、熱電離も電離源として考慮したことにより、そのさらに内側に熱速度による衝突電離を起源とする MRI 乱流領域が形成される。そしてこの内側の乱流領域と静穏領域の境界は圧力勾配が正になりうる。多くの先行研究では (Balbus and Hawley 2000 等) この境界層は 0.1AU 程度と中心星に近い位置に存在している。一方我々のモデルではガス円盤の粘性加熱を考慮したことにより、この遷移領域が質量降着率が 10^{-7} Ms/yr 程度の進化段階では 1AU 程度に位置しうる。そのため境界層の温度が 1300K 以下に抑えられる。この境界層温度が抑制される効果は重要で、圧力勾配逆転層において固体成分が固体成分のまま溶けずに運動することを示唆している。

これを受け、我々は次のような微惑星形成のシナリオを描いている。ガス運動からわずかにデカップルしたダストはガス円盤から向かい風を受け角運動量を失い中心星に向かって落下する。落下に従い周囲の温度は上昇するものの、ダストは固体の状態を保ったまま 1AU 付近の圧力勾配逆転層にまで達する。そこで今度はガス円盤から追い風を受けることになり、角運動量をもらって外側に移動する。従ってこの境界層近傍では固体成分の濃集が生じ、ダスト層の重力不安定による微惑星形成が促される。我々は今回、この固体成分のトラップに必要なダストサイズが 1cm 程度であることを明らかにした。これにより、mm サイズ以下の固体成分とそれ以上の大きさをもった固体成分が進化の過程で選別される。また、1000K を超える領域で微惑星形成が行われることで、揮発成分が乏しい微惑星が形成され、地球型惑星の構成要素が水に乏しいことが示唆される。この原始惑星系円盤モデルの詳細について発表する。

キーワード: 原始惑星系円盤, 微惑星形成, 磁気回転不安定

Keywords: protoplanetary disk, planetesimal formation, magnetorotational instability

巨大氷惑星の熱進化における氷成分凝縮による熱進化への影響 The effect of the condensation of ice components on the theoretical estimate of the thermal evolution of ice giants

黒崎 健二^{1*}; 生駒 大洋¹

KUROSAKI, Kenji^{1*}; IKOMA, Masahiro¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

天王星と海王星はどちらも同じような質量・半径を持つが、それらの熱放射強度や大気組成は互いに異なっている。天王星と海王星はどちらも有効温度が 59K であるため、天王星の熱放射は海王星に比べて小さいことが知られている (Hubbard et al., 1995)。惑星内部が全対流すると仮定して、水素エンベロープ・氷マントル・岩石コアの 3 層からなる惑星の熱進化計算を行った結果、海王星の有効温度は 3 層構造の惑星モデルで説明可能だが、天王星の有効温度は熱進化計算で得られる値より低いことが示された (Fortney et al., 2011; Nettelmann et al., 2013)。これまでの研究では惑星大気の氷成分の凝縮の影響を考慮していなかった。

天王星と海王星の進化を分けた原因の一つとして、巨大衝突の有無が挙げられる。天王星は自転軸が大きく傾いていることから、過去に巨大衝突を受けたことが示唆されている (Slattery et al. 1992)。巨大衝突を受けた天王星は氷成分が水素エンベロープに巻き上げられ、均質に混ざる可能性がある、他方、海王星は固体コアの周りに円盤ガスが降着して形成し、巨大衝突は受けていないと考えられる。したがって、天王星と海王星では初期の内部組成分布が異なることが予想される。特に前者のような巨大衝突を受けた惑星は大気中に氷成分を多く保持することになるため、凝縮の影響が大きいと考えられる。これまでの惑星熱進化計算は、大気を境界条件とし、内部で全対流する惑星を扱ってきた。低温度環境下では惑星大気中の氷成分は熱進化に伴い、凝縮する可能性があるが、凝縮を考慮した大気を持つ惑星の熱進化の議論はまだされていない。天王星と海王星の熱進化の違いを議論することは天王星と海王星の起源を制約するだけでなく、今後系外惑星のキャラクタリゼーションを行い、それぞれの気組成やバルク組成、起源を理解する上でも重要である。

本研究では、氷成分凝縮を伴う大気を考慮した惑星の熱進化モデルを構築した。今回の発表では、水の凝縮を考慮した場合の結果を示す。惑星大気中において水が凝縮すると、凝縮による湿潤対流の発生と、水の沈降による湿潤対流の抑制が起こると考えられる。湿潤対流が維持されると、大気構造の変化に伴い惑星放射が変わり、射出限界 (Nakajima et al., 1992) に従う惑星放射で冷却が起こるようになる。その結果、凝縮の効果を無視した場合と比較して、惑星の熱進化が早くなることがわかった。これは、凝縮による潜熱解放を考慮しない場合だと、惑星大気の温度が低いいため、惑星放射が小さくなるが、凝縮を考慮すると、惑星大気の温度が高くなるため、惑星放射が大きくなり、惑星の冷却が効率良く働くためである。これらの結果は、今後天王星・海王星の熱進化の違いを議論する上で重要であると考えられる。

キーワード: 巨大氷惑星, 熱進化

Keywords: ice giants, thermal evolution