

宇宙生物学のフレームワークの創成 A way to establish a framework of Astrobiology

丸山 茂徳^{1*}; 戎崎 俊一²; 中村 栄三³

MARUYAMA, Shigenori^{1*}; EBISUZAKI, Toshikazu²; NAKAMURA, Eizo³

¹ 東京工業大学地球生命研究所, ² 理化学研究所, ³ 岡山大学地球物質科学研究センター

¹Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, ²RIKEN, ³Institute for study of the Earth's interior, Okayama University

One of an ultimate mysteries of Science is the existence of life in the Universe. In regard to this question, three ideas have been provided; (1) The Universe teems with life, (2) No other life other than Earth life, and (3) between 1 and 2. Also, we have two simple questions about life. (1) Is primitive life constantly emerging on present Earth? (2) Once whole life is killed, another new Earth life will emerge on the Earth? The answer to both questions is No.

Astrobiology is the academic field that can provide minimum conditions to bear life in the Universe, and also collateral conditions to make a planet to have civilization. Here we summarize such conditions to have life with civilization. To emerge life on the Earth, there are numerous kinds of conditions which are intricately interrelated. Here, we categorized such complex conditions into three groups. (1) Conditions to make life-sustainable planets derived from planetary formation theory. This category lists 19 conditions. For example, elliptical orbit is unacceptable condition for life. Even if such planet is covered by liquid water, planet is to experience snowball for half the year, and for other half year water component turn to vapor due to red hot scorching environment like Venus. (2) Conditions to emerge and evolve life on the planet. This category includes 7 significant conditions which control the emergence and evolution of life. One of conditions is lifetime of carbon. Carbon is necessary component for life body, however the amount of carbon for life is decreasing through time. Carbon will be depleted in 1 billion years, indicating termination of life. (3) Conditions to have civilization on the planet. This category has 5 conditions. The most significant condition is brain development. Discontinuous upgrowth of brain differentiate human being from chimpanzee, and human is to establish civilization finally.

御池山クレーターで発見した spherule に隕石物質を含む可能性 Possible meteoritic materials in spherules discovered in the Oikeyama impact crater

坂本 正夫^{1*}; 蜷川 清隆²; 西戸 裕嗣³; グチック アーノルド⁴
SAKAMOTO, Masao^{1*}; NINAGAWA, Kiyotaka²; NISHIDO, Hirotsugu³; GUCSIK, Arnold⁴

¹ 飯田市美術博物館, ² 岡山理科大学, ³ 岡山理科大学, ⁴ ヨハネスブルグ大学

¹Iida City Museum, ²Okayama University of Science, ³Okayama University of Science, ⁴University of Johannesburg

1 はじめに

長野県飯田市しらびそ高原では、御池山クレーターからインパクトを示す衝撃変形石英が報告された (Sakamoto et al, 2010)。この構造では負の重力異常も報告された (坂本・志知, 2011)。また、fallback した角礫層も存在していることが明らかになっている。この度、クレーターの周辺から spherule を多数発見し、その組織や成分などを分析したので報告する。

2 spherule の分布と産状

御池山クレーターは直径約 900m でその半分以上が欠けた地形になっている。クレーター縁から外側へ約 400m 離れた丘の斜面を約 1m 掘った土壌の中から、spherule が密に詰まった偽礫 (rip-up crust) を多数発見した。偽礫は粘土質の土壌の中に散在し、半固結で強く握ると壊れる程度の硬さがある。偽礫は、約 8 割が spherule の完全体や破片で占め、約 1 割は周辺の地質の岩片で、その他はマトリックスの泥である。

3 spherule の形態

御池山で見つかった spherule は、概ね直径 0.2mm~0.02mm の範囲で、主に白色で表面がざらついた球状や円盤状・楕円状・多角面状などの形状をもつチャート質の岩石である。こうした形状が保たれた完全体の spherule はたいへん少なく、多くは割れて形状がはっきりしない破片である。spherule は、半透明のものが多く内部がおぼろげに見えるものが多い。spherule の内部や表面に酸化した金属などの不透明物質が散らばっていたり、pyrite (黄鉄鉱) の結晶が食い込んでいたりする粒子もある。spherule の集合内には pyrite の大小の結晶固体も混ざっている。

4 光学顕微鏡の観察

薄片にして光学顕微鏡で観察すると、オープンニコルではほとんど組織は見えないが、クロスニコルでは、多様な色や組織で不均質な組織が観察できる。spherule の内部は、再結晶して波動消光するものや、微晶質から隠微晶質になっているもの、小さな spherule が取り込まれたり合体したりしているもの、spherule の縁を異なった物質が覆っているものなどがある。また、中心付近に核となった不透明物質があるものや、同心円状になっているものもある。

5 LA-ICP-MS 分析の結果

レーザーアブレーションによる誘導結合プラズマ質量分析 (LA-ICP-MS) で、spherule の元素イオン強度を測定して元素分布のマッピングを行なった。その結果、spherule の各粒子や破片では、たいへん不均質な元素分布を示していることが分かった。特に Ni、V、Cr、Mg、Mn、Fe の元素で不均質に高い濃度を示す部分があった。粒子によっては内部まで高濃度を示すものもあるが、spherule の縁に沿った部分だけが低い値を示すものもあった。似た事例はオーストラリアなどから報告されている (Izmer et al, 2013)。

これらの元素の内 Ni、V、Cr は、御池山一帯の地質や火山灰にはほとんど含まれない元素である。御池山一帯は、砂岩・泥岩・チャートの互層から成る付加体の比較的単純な地質であり、火山岩や深成岩・変成岩は存在しない。御池山一帯の地質の成分は SiO₂ が圧倒的な割合を占めている。また、日本列島の広域の火山灰や中部日本の火山灰も降っているが、鉄鉱類はほとんど磁鉄鉱とチタン鉄鉱であり、pyrite (FeS₂) は含まれない。それにも関わらずこの spherule 層には pyrite のみが目立つ。このような現地の地質と spherule との成分の違いは、小規模なクレーターからも報告されている (Reimold et al, 1998)。

以上の検討から、この spherule に検出された高濃度で不均質な元素は、隕石物質である可能性が高い。落下してくる隕石の多くは、大気圏に突入しながら蒸発して雲状に散布される。同時に御池山では衝突して舞い上がった山体の極微粒子が、隕石の蒸気と混じり合っ て spherule が形成される。そのため、隕石成分も不均質に入り込んだものと見られる (Goderis et al, 2013)。

6 引用文献

M.Sakamoto, et al, 2010, Meteorit. & Planet. Sci. 45, 坂本・志知, 2010, 日本惑星科学会誌 19,4, Izmer et al, 2013, J. Anal. At. Spectrom. 28, Reimold et al, 1998 J. of African Earth Sci. Goderis et al, 2013, 2013, Earth & Planet. Sci. 376.

キーワード: 御池山クレーター, インパクト, スフェリユール, 黄鉄鉱, ニッケル, 隕石物質
Keywords: Oikeyama Crater, impact, spherule, pyrite, nickel, meteoritic material

Riemann Solver を用いない Weighted Particle Hydrodynamics 法の開発 Weighted Particle Hydrodynamics without Riemann Solver

細野 七月^{1*}; 牧野 淳一郎¹
HOSONO, Natsuki^{1*}; MAKINO, Junichiro¹

¹ 理化学研究所 計算科学研究機構, ² 東京工業大学 地球生命研究所

¹RIKEN Advanced Institute for Computational Science, ²Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

天文学や地球惑星科学の分野において、流体の数値計算は非常に重要である。特に、流体の粗密の大きい系強く、かつ自己重力などの導入が安易な、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法とされている粒子的手法が、現在まで広く用いられている。

しかしながら近年、この SPH 法に関するいくつかの問題点が指摘されるようになった。一つの問題点は、流体不安定が起きないということである。この問題点に関しては、近年様々な研究がなされ、解決された。しかしながら SPH 法にはもう一つの問題点が指摘されてきた。それは、円盤構造が適切に計算できないというものである。天文や惑星科学の分野では、星周円盤や原始惑星系円盤など、円盤構造は頻出の構造であるため、円盤構造が適切に計算できないのは大きな問題である。

一方近年、Weighted Particle Hydrodynamics (WPH) 法と呼ばれる新たな粒子法的流体数値計算手法が開発された。様々なテスト計算が行われた結果、本手法では SPH 法の問題点である、流体不安定が起きないという点、また、円盤が適切に計算できないという点という問題点がどちらも解消されている事がわかった。WPH は、強力な流体数値計算手法になる事が期待される。

しかしながら、WPH は今のところ粒子間相互作用の計算に Riemann Solver を用いており、状態方程式が理想気体に限定されてしまっている。惑星科学の分野では、岩石や鉄といった物質を扱う必要があり、このままでは WPH は適用しづらい。そこで、本研究では、Riemann Solver の代わりに人工粘性を用いることで、WPH を任意の状態方程式に拡張することを考えた。いくつかのテスト計算を行った結果、人工粘性を用いても、WPH のメリットである、流体不安定が正しく描画できる、円盤が適切に計算できるといった点は失われていない事が確認された。我々の実装は任意の状態方程式を用いる事ができる、汎用性の高い手法であると言える。

キーワード: 流体力学, 数値計算, 原始惑星系円盤

Keywords: methods: hydrodynamical, methods: numerical, protoplanetary disks

月マグマオーシャン化学進化：密度逆転構造形成の再評価 Chemical evolution of lunar magma ocean: evaluation of density overturn

堀 文子¹; 永原 裕子^{1*}

HORI, Ayako¹; NAGAHARA, Hiroko^{1*}

¹ 東京大学地球惑星科学専攻

¹Dept. Earth Planet. Sci., The Univ. Tokyo

Hess and Parmentier (1995) discussed gravitational instability of a highly fractionated heavy layer and proposed a mantle overturn model, which well explains the role as a source for high-TiO₂ mare basalts erupted several hundred millions years later. However, Hess and Parmentier (1995) themselves pointed out that the timescales for the IBC layer formation is longer than the onset of gravitationally instability between the IBC layer and underlying mantle, so the density instability should have resolved during LMO differentiation with small scale overturn. We constructed a model that describes differentiation of interstitial melt trapped in the cumulate layer with three parameters, critical crystal fraction, porosity of the cumulate layer, and grain size, and the percolation is evaluated as the time to the onset of instability between lighter trapped melt and the overlying heavier residual melt in the magma ocean body.

The results show that the density contrast between LMO and the trapped melt becomes significantly large once plagioclase appears, on the other hand viscosity of the melt is. The percolation time varies by up to about two orders of magnitude for the variation of porosity by two times, whereas it varies by up to about 5 orders of magnitude for the variation of grain size by one orders of magnitude, and the effect of X is not essentially. Comparing the percolation time at the critical crystal fraction for each step of differentiation calculation and the duration of the whole LMO crystallization, we can conclude that the percolation time is much shorter than the crystallization time if the grain size is larger than 1.0 cm. If we assume that the grain size of crystallizing grains in LMO is 0.1 to 1 cm in order, which is the average size in terrestrial magmas, melt overturn between LMO and trapped melt takes place easily during crystallization of LMO, which would make formation of extremely dense layer below the anorthosite crust at the final stage of LMO crystallization difficult.

キーワード: 月, マグマオーシャン, 密度逆転

Keywords: The Moon, magma ocean, density overturn Hess and Parmentier (1995) discussed gravita

形成期の水星におけるコア-マントル間の硫黄の分配と水星の材料物質 Partitioning of sulfur between core and mantle on early Mercury and its building materials

笹森 映里^{1*}; 倉本 圭¹
SASAMORI, Eri^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学大学院理学院

¹ Hokkaido University, Graduate school of Science

水星は自重による圧縮の効果を除くと太陽系の中で最も高密度の惑星であり、大きなコアを持つことが示唆されている。近年、水星を周回探査した MESSANGER 探査機による γ 線スペクトロメータを用いた観測により、水星表面の元素組成が初めて詳しく求められた (Evans et al., 2012)。その結果、S 濃度が予想外に大きく、1.9-2.7 wt% であった。S はコア形成時に熔融金属に分配されやすいため、太陽系の岩石惑星の岩石圏では一般に存在度が低いと考えられている。例えば地球の大陸地殻には 0.04 wt% 程しか含まれておらず、水星表面になぜ高濃度の硫黄が存在するのかはわかっていない。一方で、同様の観測から求められた Fe 濃度は 1.6-2.2 wt% であった。これは FeO 濃度に換算すると 2.1-2.8 wt% と、地球 (約 8 wt%) や火星 (約 16 wt%) の地殻平均値よりも少なく、地上からの反射スペクトル観測から推定されてきた FeO に乏しい水星表面組成と調和的である。鉄の酸化還元度に着目した隕石学的考察から、水星の材料物質として FeO に乏しい E コンドライト様の化学組成をもつ物質が有望視されている (Wasson, 1988)。

一般的に S はコア形成時に金属相に選択的に分配されるため、岩石圏ではごく低濃度になると考えられている。しかし硫黄分配の傾向は酸化還元状態によって変化し、還元的な環境ではケイ酸塩メルトに分配される硫黄が多くなることが知られている。そのため、水星が還元的な物質から形成したならば、水星表面に見られる高濃度の硫黄は、コア形成時にケイ酸塩相に分配されたものに由来する可能性がある。

そこで本研究では、形成期の水星におけるコア-マントル間の硫黄の分配を、工業化学分野で経験的に知られているケイ酸塩メルトへの硫化物溶解度モデルを拡張して調べ、そして水星表面の組成から水星の材料物質を推定することを試みた。ケイ酸塩メルト相と熔融金属鉄相間の化学平衡を考えることによって、任意に与えた水星材料物質組成に対して、硫黄分配を支配する重要な熱力学量の一つである酸素フガシティー f_{O_2} を得、そして硫化物溶解度モデルからケイ酸塩メルト中の S 濃度が得られる。硫化物の溶解度を示すサルファイドキャパシティーには Taniguchi et al. (2009) のモデルを採用した。水星材料物質の組成は、次のように仮定する。まず E コンドライト平均組成における相対元素存在度を保持して、酸化物と非鉄系 (陽イオンが非親鉄性元素) の硫化物を混ぜたものをケイ酸塩メルトの基準組成モデルとする。また同様に金属鉄と硫化鉄を混ぜたものを金属メルトの基準組成モデルとする。そこから出発組成や圧力を変化させて元素分配計算を行った。材料物質組成に対する依存性は、FeO/Si 比、非鉄系硫化物/Si 比、金属相の S 濃度を変化させることで調べた。温度は全熔融を仮定し 2000 K とし、圧力依存性は、反応による体積変化から推定し、1-10 GPa の範囲で計算を行った。

基準組成モデルに対して元素分配計算を行った場合、ケイ酸塩相に分配される S 濃度、FeO 濃度はそれぞれ 1.6 wt%、0.024 mol% と、S 濃度は観測値とほぼ一致したが、FeO 濃度は観測される Fe 濃度を説明するには、2 桁小さい結果となった。材料物質の FeO/Si 比を大きくするほど分配される S 濃度は小さくなる。また、非鉄系硫化物/Si 比を大きくするほど FeO 濃度は小さくなり、S 濃度と FeO 濃度の増減は逆相関の関係にある。金属相の S 濃度を上げると、ケイ酸塩メルトの S 濃度はあまり変化せずに、最大 0.06 wt% まで FeO 濃度が大きくなる。S の分配結果に圧力依存性はほとんど見られなかったが、圧力が上がるにつれて分配される FeO 濃度がやや減少した。

以上のように E コンドライトの組成に近い出発組成を与えて分配計算を行うと、幅広い条件で観測値を説明できる濃度の S がケイ酸塩相に分配される。これは水星の材料物質が実際に E コンドライト様の物質であることを支持する。しかしながら、同時にケイ酸相中に分配される FeO 濃度は Fe の観測値を説明するには小さすぎるように見える。観測原理上、水星表面の Fe の酸化還元状態は現時点では不明なことには注意が必要である。水星表面の Fe は、コア形成後に水星表面に付加した Fe や、隕石衝突により薄い水星マントルを貫いて掘削され放出されたコア由来の Fe で説明できるかもしれない。

キーワード: 水星, 硫黄, 分配

Keywords: Mercury, sulfur, partitioning

金属鉄-ケイ酸塩間の塩素分配：地球表層の塩素枯渇の起源への示唆 Metal-silicate partitioning of chlorine: Implications for the origin of terrestrial missing chlorine

桑原 秀治^{1*}; 後藤 弘匡²; 小川 展弘³; 山口 飛鳥³; 石橋 高⁴; 八木 健彦⁵; 杉田 精司⁵
KUWAHARA, Hideharu^{1*}; GOTOU, Hirotsada²; OGAWA, Nobuhiro³; YAMAGUCHI, Asuka³; ISHIBASHI, Ko⁴;
YAGI, Takehiko⁵; SUGITA, Seiji⁵

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 東京大学物性研究所, ³ 東京大学大気海洋研究所, ⁴ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ⁵ 東京大学大学院理学系研究科

¹Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, ²Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, ³Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ⁴Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ⁵Graduate School of Science, The University of Tokyo

地球表層の塩素存在量は始原天体と比較して同程度に揮発性をもつ元素よりもさらに枯渇している (Sharp & Draper, 2013)。この塩素欠乏に対する提案仮説は二つある。一つは核-マントル分化時において塩素が核に優先的に取り込まれたとする仮説である。もう一つの仮説は核への塩素の取り込みが限定的であった場合、親水性の高い塩素は海洋により多く分配されるため、惑星形成期に原始海洋の損失が起こったと考えるものである (Sharp & Draper, 2013)。特に惑星形成期の水圏の散逸問題は地球型惑星の大気・海洋の起源にも直結する問題であるため、上記の提案仮説を検証することは非常に重要な意味がある。本研究では地球表層の塩素の枯渇がどのような惑星形成過程を反映しているかを制約するため、マグマオーシャン中の金属鉄-ケイ酸塩間の塩素の分配係数を実験的に求めることを目的とする。

元素の分配挙動は主にマグマオーシャンの温度、圧力、酸素フガシティーに影響を受ける。本研究ではまず、塩素分配係数の酸素フガシティー依存性を調べた。出発試料として粉末状の SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Fe を CI コンドライト組成になるよう調製し、そこへ FeCl₂ を 2wt.% 含めたものを用いた。酸素フガシティーは試料に金属 Si を加えることで調整した。実験は東大物性研のマルチアンビル型高圧発生装置 (KAMATA700ton プレス) を用いて行った。試料はグラファイトカプセルに詰め、4GPa, 1900K の条件で 15 分間保持した後、加熱電源を落として急冷、減圧し、回収した。回収試料は東大大気海洋研に設置されている波長分散型電子線マイクロプローブアナライザにより元素組成を分析した。

実験回収試料中の金属鉄-ケイ酸塩間の塩素の質量濃度比は酸素フガシティー ($\log f_{O_2}(\Delta IW) = -1 \sim -6$) に依らず、0.001~0.01 となり、塩素は親鉄性に非常に乏しいことが明らかとなった。マグマオーシャン中の金属鉄-ケイ酸塩間の塩素分配係数がより高圧条件下においても 1 を超えないのであれば、核への塩素の取り込みは限定的となり、塩素枯渇の起源として原始海洋損失の可能性が示唆される。

参考文献: Sahrp, Z.D. and D.S. Draper, 2013, Earth Planet. Sci. Lett. 369-370, 71-77.

キーワード: 塩素, 元素分配, 原始海洋, 核組成

Keywords: Chlorine, Partitioning of elements, Primordial oceans, Core composition

レゴリス層を模擬した粉粒体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 Experimental study on propagation process of impact-induced seismic wave in quartz sand

松榮 一真^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ¹; 松本 恵里¹; 辻堂 さやか¹; 高野 翔太¹; 長谷川 直²
MATSUE, Kazuma^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami¹; MATSUMOTO, Eri¹; TSUJIDO, Sayaka¹;
TAKANO, Shota¹; HASEGAWA, Sunao²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙科学研究所

¹ Graduate School of Science, Kobe University, Japan, ² Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA

はじめに

探査機はやぶさで観測された小惑星イトカワの表面地形のように、小惑星表面はボルダーなどのレゴリス層で覆われていることが明らかになった。レゴリス層で覆われた小惑星の表層地形は、天体衝突のような外的要因によって変化すると考えられている。例えば小惑星エロスに小さなクレーターが少ない理由は、天体衝突による衝撃がエロス全体を揺さぶり、クレーター孔を支えるレゴリス層の構造が崩れるからだと考えられている (Richardson et al.2005)。このように天体衝突によって発生する振動は小惑星の表層地形進化を支配しているが、衝突励起振動に着目した実験的研究は少ない。McGarr et al.1969では、月震計で得られた小天体衝突時の地震波形を解析するため、月表層を模擬した試料への衝突実験を行い、衝突励起振動を実測した。最近では我々が 100m/s までの低速度衝突実験を行い、ガラスビーズ中 (バルク密度は 1.51g/cm³, 安息角は 22°) を伝播する衝突励起振動の減衰過程を調べた (Yasui et al. in prep)。本研究では、よりレゴリス層を模擬した石英砂を標的試料として用い、衝突速度を小惑星帯での平均衝突速度まで拡張し衝突励起振動の計測を行った。

実験方法

衝突実験は、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃と宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸に直径 4.7mm のポリカーボネート球を用いて 0.2-6.9km/s の速度、直径 3mm のアルミナ、ステンレス、銅球を用いて 0.2km/s の速度で衝突させた。標的試料には直径 500 μ m (バルク密度は 1.48g/cm³, 安息角は 32°) の石英砂を用いた。標的表面に加速度計 (日本アビオニクス製 SV1113; 電荷感度 5.47pC/ms⁻², 応答周波数:0.5Hz-10kHz) を、衝突点からの位置を変化させて 2.5cm 埋めて設置した。加速度計の信号はチャージアンプを通した後、A/D 変換速度 100kHz のデータロガーで記録した。なおチャンパー内は 1000Pa から 10Pa で真空引きしている。

実験結果

観測された加速度波形は単一のピークを示す単発波形で、立ち上がり時間は約 0.5ms であった。得られた加速度波形の解析から次のことがわかった。(1) ピークの最大値から最大加速度 g_{max} を計測し、加速度計までの距離 x が大きくなると伴に最大加速度が小さくなり、衝突点からの距離が同じ時には衝突速度が大きくなると伴に最大加速度が大きくなることがわかった。さらに、クレーター半径 R で規格化した距離 x と最大加速度の関係から、衝突速度によらず一つの経験式 ($g_{max}=156(x/R)^{-2.98}$) で表すことができた。最大加速度の減衰率は石英砂では -2.98 であるが、ガラスビーズでは -2.4 (Yasui et al.) であり、減衰率は標的物質によって変化することがわかった。(2) 加速度が最大になる時間の差を計測することで標的物質中を伝播する振動の速度を計測した。石英砂標的中の伝播速度は衝突速度によらず約 56m/s となり、AE センサーを用いて計測した S 波の速度 (約 50m/s) と近い値となった。一方、ガラスビーズ標的で計測された速度 (106m/s) より遅いことがわかった。(3) 加速度波形のピーク値の半値幅を計測することで加速度の持続時間を見積もった。衝突速度によらず約 0.8 m s となり、これは弾丸の貫入時間とオーダーで一致することがわかった。

これらの結果を用いて、小惑星上の天体衝突により励起された振動でレゴリス層が流動化し、地形が変化する範囲を推定した。仮定として天体重力によらずこの実験で得られた経験式が適用できるとした。衝突条件を、直径 10cm の玄武岩質天体が小惑星に 2km/s で衝突したとする。レゴリス層が崩壊し地形が変化する条件は、レゴリス層に与えられた加速度が表層での重力加速度より大きくなったときに生じるとする (Richardson et al.2005)。本研究で得られた経験式を用いて振動加速度が各天体の地表面での重力加速度まで減衰するまでの距離 x/R を示す。1999JU3、エロス、地球で計算すると、 x/R がそれぞれ 20,11,2.5 となり重力の小さな天体の方がより広範囲の地形が変化的ことが期待される。我々の今後の目標は、このような実験と議論を通してレゴリス層で覆われた小惑星表面地形の衝突進化を明らかにすることである。

キーワード: 衝突, クレーター形成, 衝突励起振動, レゴリス層

Keywords: impact, cratering, impact-induced seismic wave, regolith layer

真空下における粉体物質の熱伝導率モデル Thermal conductivity model for powdered materials under vacuum

坂谷 尚哉^{1*}; 小川 和律²
SAKATANI, Naoya^{1*}; OGAWA, Kazunori²

¹ 宇宙科学研究所, ² 神戸大学

¹ISAS/JAXA, ²Kobe University

太陽系の過去から現在において、粉体物質は普遍的に存在し、太陽系天体の進化に重要な役割を果たしてきた。例えば、太陽系初期に惑星形成に先立って形成されたと考えられている微惑星は、星雲中のダスト（粉体）の集合体であったと推定される。また、現在の月や小惑星などの表層はレゴリスと呼ばれる岩石の粉砕物で覆われている。このような真空環境における粉体物質の熱伝導率は、空隙のない岩石に比べて2桁以上低いことが知られており、粉体物質の存在は、たとえ天体表層を薄く覆う場合でも天体の熱進化および現在の熱的な状態に大きな影響を与える。一方、粉体物質の熱伝導率は温度、粒径、空隙率、圧縮応力などの多くのパラメータに依存し、一桁以上変化することが知られている。実際の天体上に存在する粉体の環境（温度、圧縮度）および物理的状態（粒径、空隙率など）は様々であり、粉体物質の存在を考慮した熱的な問題に取り組むためには、これらのパラメータ依存性を統合的に取り入れた熱伝導率モデルを確立することが重要な課題である。

我々はこれまでに、アナログ物質として主にガラスビーズを用い、真空下での熱伝導率のパラメータ依存性を実験的に調査してきた。これらの実験結果に基づいて、粉体中の熱輸送メカニズムについての理解を進めてきた。本発表では、実験的に明らかとなった熱輸送メカニズムに従って理論的に構築した、真空下での粉体物質の熱伝導率モデルについて紹介する。

粉体熱伝導率についての先行研究において、単純立方格子などの規則的な充填を仮定したモデルや、実験値へのフィッティングによって決定した経験式などが提案されてきたが、物理メカニズムに則した完全な理論モデルは構築されていない。また、先行研究において蓄積されてきた室内実験の結果を再現することはできておらず、モデルによっては1桁以上の差が生じている。そのため、多種多様な状態で存在する天体上での粉体の熱伝導率を精度よく推定することが困難であった。

本研究で構築した粉体熱伝導率モデルは、ランダムに充填する単一サイズの球体を仮定し、物理メカニズムに従って定量化された初めてのモデルである。本モデルは温度、粒径、空隙率、圧縮応力などのパラメータ依存性を統合的に記述しており、これらのパラメータの値を与えることで、様々な状態での粉体熱伝導率を推定することができる。我々がこれまでに室内実験によって取得したガラスビーズの熱伝導率の値と比較すると、本研究の熱伝導率モデルは最大値を与えることに成功しており、相対的な差は3倍以下であることが分かった。

キーワード: 熱伝導率, 粉体

Keywords: thermal conductivity, powdered material

球対称な小天体の温度分布を高精度で求める逐次近似法 An iterative method for determining temperature distribution of a spherically symmetric body in a planetary system

関谷 実^{1*}; 下田 昭仁²

SEKIYA, Minoru^{1*}; SHIMODA, Akihito²

¹九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ²九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University

自転運動と離心率をもつ公転運動をする球対称な小天体の温度分布を準解析的に求める逐次近似法を考案した。その解をもとに、ヤーコフスキー効果による軌道要素の時間変化率を求める公式を導出した。

先行研究の Sekiya and Shimoda (2013) に比べて改良された点は、離心率が 0 でない場合も計算できるようにしたことである。先行研究の Vokrouhlicky and Farinella (1999) と比べて改良された点は、温度分布が自転軸に対して軸対象という仮定を取り除いたことである。すなわち、任意の自転軸傾斜角で、任意の自転周期をもつ小天体に対して、0.7 以下の離心率の場合に温度分布の時間変化を求めることができる。逐次近似法を用いるので、繰り返しの回数を上げることでより、任意の精度の値を得ることが可能である。

形状がわかっている個々の小惑星の温度分布は数値計算で求めるほうがよいが、そのような場合でも、数値コードのチェックには、本研究の解を用いることができる。

以下に、具体的な手法の説明をする。

(1) 太陽放射加熱項を余緯度、経度について球関数展開、平均近点離角についてフーリエ展開する。離心率が 0.8 以上の場合は、フーリエ展開の収束が悪くて本研究の手法は利用できない。

(2) 天体の温度分布を求める際に、拡散方程式ではなく、自転の移流項を含む熱伝導方程式を用いた。これにより、解は、自転による変動を含まずに、公転による変動のみを含むようになり、非常に単純化された。余緯度と経度に関する球関数展開と平均近点離角に関するフーリエ展開を用いて解析解を求めた。

(3) 境界条件は、太陽加熱、放射冷却、天体内部への熱伝導のエネルギーフラックスのつり合いの式となる。放射冷却は絶対温度の 4 乗に比例するので非線形である。この部分を 1 次まで展開した式を、繰り返し用いることにより、逐次近似解（すなわち非線形解に限りなく近づく解）を求める方法を開発した。

(4) 上記の解を用いて、ヤーコフスキー効果による軌道要素の時間変化率を計算するための公式を導出した。

詳細については、Sekiya and Shimoda (2014) を参照されたい。

(参考文献)

Sekiya, M. and Shimoda, A.A. (2013) *Planetary and Space Science*, 84, 112-121.

Sekiya, M. and Shimoda, A.A. (2014) *Planetary and Space Science*, 97, 23-33.

Vokrouhlicky, D. and Farinella, P. (1999) *Astronomical Journal*, 118, 3049-3060.

キーワード: 小惑星, 太陽系, 惑星, 隕石, 天体力学, 軌道

Keywords: asteroid, solar system, planet, meteorite, celestial mechanics, orbit

粉体標的における衝突クレーター形成過程の衝突速度依存性：レーザー変位計を用いたその場計測による実験的解明 Impact velocity dependence of transient crater growth in granular targets

山本 聡^{1*}; 長谷川 直²; 鈴木 絢子²; 松永 恒雄¹
YAMAMOTO, Satoru^{1*}; HASEGAWA, Sunao²; SUZUKI, Ayako²; MATSUNAGA, Tsuneo¹

¹ 国環研, ²JAXA

¹NIES, ²JAXA

固体天体地表における卓越地形の一つである衝突クレーターの解析を行うため、これまで数多くの衝突クレーター形成実験が行われていきました。一方、過去の研究の多くでは、衝突素過程をブラックボックス的に捉え、実験後に回収されたクレーターの最終形状の測定を行い、それらのデータを統計的に解釈するという方法が用いられてきた。その為、例えば衝突クレーター形成に対するスケーリング則の衝突速度依存性や標的物性依存性などが、よく分かっていないのが現状である。これらを解明するためには、クレーター形成過程のその場観測を行い、その物理的解釈に基づいてスケーリング則を再考することが重要である。過去に行われたクレーター形成過程のその場観測手法として、レーザー光を用いた方法が提案されている。またこの手法により、重力支配域における掘削流の時間発展に対する定量的測定が行われ、それを基にした掘削流モデル式が提案されている (Yamamoto et al. 2009, *Icarus*, 203, 310-319)。しかし、この実験では、弾丸の衝突速度がいずれも約 0.3km/s 以下の低速度領域で行われたものであった。一方、実際の地球型惑星で起こる天体衝突は数 km/s を超える高速度衝突であることから、掘削流モデル式についての衝突依存性を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、宇宙科学研究所の大学共同利用施設である超高速衝突実験施設に設置されている新型の縦型二段式軽ガス銃を用いて、衝突速度 0.8km/s から 6 km/s での粉体標的に対する高速度衝突実験を行い、新たに開発したレーザー変位計による手法を使って、掘削流のその場観測を行った。本発表では、今回新たに得られた高速衝突条件下における結果を基にして、掘削流モデル式およびスケーリング則に対する衝突速度依存性について議論を行う。

キーワード: 衝突クレーター, 衝突実験, スケーリング則, 重力支配域

Keywords: impact crater, impact experiment, scaling law, gravity regime

石膏球面にできる衝突クレーターの形状 Morphologies of impact craters formed on spherical gypsum

鈴木 絢子^{1*}; 黒澤 耕介²; 長谷川 直¹; 平井 隆之¹; 岡本 千里³
SUZUKI, Ayako^{1*}; KUROSAWA, Kosuke²; HASEGAWA, Sunao¹; HIRAI, Takayuki¹; OKAMOTO, Chisato³

¹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ²千葉工業大学惑星科学研究センター, ³神戸大学大学院理学研究科
¹ISAS/JAXA, ²PERC/Chitech, ³Graduate School of Science, Kobe University

1. 背景

小惑星などの小さな天体上での衝突クレーター形成過程は、大きな天体上でのそれと様々な点で衝突条件が異なることが知られている。例えば、標的の空隙率が高いこと（例えば、Britt et al., 2002）や重力が小さいこと、衝突速度が小さいこと（例えば、Bottke et al., 1994; Marchi et al., 2013）、クレーターの大きさに対して不規則な形状の表面であること（Sullivan et al., 2002）などだ。

最近の宇宙惑星探査において、例えばイダ、エロス、イトカワなどの小惑星上で、不規則な形状の面に形成されたクレーターが多数見つかっている。

今回は特に標的の曲率が衝突掘削に与える影響について注目している。これまでに探査された小惑星上では曲率の大きな面に形成されたクレーターが報告されている。Fujiwara et al. (1993, 2014) は様々な半径を持つ球や円柱標的への衝突実験を実施し、クレーター深さや直径が標的の曲率に依存することを確かめた。本研究では、直径の異なる球面にできたクレーターのプロファイルの違いを高精度3次元形状計測によって定量化し、標的の曲率がクレーター形成過程に影響を与えるメカニズムを提案する。

2. 実験概要

実験は宇宙科学研究所にある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。標的は含水石膏で、一辺が約9cmの立方体と、直径がそれぞれ7.8 cm, 10.9 cm, 17.0 cm, 24.8 cmの球である。標的のバルク密度は1.05 g/cm³, 引っ張り強度は2.03 MPaである。弾丸は直径3.2 mmのナイロン球で、約3.3 km/sで標的に衝突させた。この場合の弾丸/標的サイズ比は0.13-0.41となる。標的は発泡スチロールボックスの中に設置し、ショット後に破片と共に回収した。形成されたクレーターを高精度3次元形状測定システム（COMS MAP-3D）を用いてスキャンし、地形データを取得した。クレーターのない部分の地形データを用いて近似的に求めた平面・球面を衝突前表面とし、それとの差分としてクレーターの体積を得た。

また、数値衝突計算コードiSALEを用いて（Amsden et al., 1980; Ivanov et al., 1997; Wunnemann et al., 2006）、球標的中の衝撃圧力分布が曲率とともにどのように変化していくかを調べた。

3. 結果と考察

できたクレーターは、中心のピットをスポールが囲む形状をしていた。曲率が大きくなるほどスポール領域が顕著になった。クレーターの体積や直径は、曲率が大きくなると大きくなったが、深さはほぼ一定であった。平面にできたクレーターに対し、曲率が一番大きい直径7.8cm球にできたクレーターは、体積は3.5倍になった。ただし、ピット体積は1.8倍に留まった。クレータープロファイルを極座標系で比較すると、ピット部に大きな差は見られないが、曲率が大きくなるとスポール部が広く、深くなっていた。このことから、クレーター体積増加にはスポール体積の増加が効いていることがわかった。

iSALEの計算結果を極座標系で比較すると、曲率が大きくなると、衝突による高い圧力を経験するエリアが相対的に遠くまで達することがわかった。深部に高圧部があると自由表面に向かって圧力勾配ができ、実験でスポールの面積が広がったことを説明できると考えられる。

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。また、含水石膏の強度測定に協力して下さった宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の後藤健准教授と戸島英貴さんに感謝申し上げます。

キーワード: 衝突クレーター, 衝突実験, 石膏, 曲面, 地形, 二段式軽ガス銃

Keywords: impact craters, impact experiments, gypsum, curved surface, morphology, two-stage light-gas gun

人工流星の空力加熱過程のその場観察 In-situ observations of the ablation processes of artificial shooting stars

黒澤 耕介^{1*}; 千秋 博紀¹; 鈴木 宏二郎²; 春日 敏測³; 杉田 精司⁴; 松井 孝典¹
KUROSAWA, Kosuke^{1*}; SENSU, Hiroki¹; SUZUKI, Kojiro²; KASUGA, Toshihiro³; SUGITA, Seiji⁴;
MATSUI, Takafumi¹

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ³ 国立天文台, ⁴ 東京大学大学院理学系研究科

¹PERC/Chitech, ²Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, ³NAOJ, ⁴Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo

大気をもつ惑星・衛星へ小天体が突入すると、その運動エネルギーは大気中で熱エネルギーや大気を伝わる衝撃波エネルギーへ変換される。このとき蒸発した小天体物質と惑星大気が混合し、惑星大気中の平均場からはずれた化学反応を駆動する。太陽系の歴史の中でこのようなイベントは頻繁に起こっていたはずであり、惑星大気進化に影響を与えた可能性があるが、その重要性については理解されていない。これは上記のエネルギー分配過程が複雑な物理・化学過程を介して引き起こされるために十分に理解されていないことが一因であると考えられる。

我々は千葉工業大学惑星探査研究センターに設置された二段式水素ガス銃を用いた人工流星実験を開始している。ガスを満たした真空チャンバ中に飛翔体を撃ち込むことで、人工的に流星を生成し 50 cm の至近距離からの観測を実施する。本発表ではプラスチック弾丸を窒素ガス中に撃ち込んだ結果について報告する。至近距離から人工流星体を観察することで 0.5 μ s, 100 μ m の時空間分解能で撮像・分光計測を行うことに成功した。人工流星体の空間構造、化学種分布、黒体放射温度などを計測することができている。今後は数値流体計算による解析と実験結果を比較し、運動エネルギーから熱エネルギーへの分配素過程に迫っていく予定である。

キーワード: 小天体, 流星, 空力加熱, 二段式軽ガス銃, 高速撮像計測, 時間分解発光分光計測

Keywords: Small bodies, Shooting stars, Aerodynamic ablation, Two-stage light gas gun, High-speed imaging, Time-resolved emission spectroscopy

MUレーダー・流星ヘッドエコー観測によるメテオロイドの軌道決定 Orbit Determination of Meteoroids by MU Radar Meteor Head Echo Observations

阿部 新助^{1*}; Kero Johan²; 中村 卓司³; 藤原 康德⁴; 渡部 潤一⁵; 橋口 浩之⁶
ABE, Shinsuke^{1*}; KERO, Johan²; NAKAMURA, Takuji³; FUJIWARA, Yasunori⁴; WATANABE, Jun-ichi⁵;
HASHIGUCHI, Hiroyuki⁶

¹ 日本大学理工学部航空宇宙工学科, ² スウェーデン宇宙物理研究所, ³ 国立極地研究所, ⁴ 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻, ⁵ 国立天文台, ⁶ 京都大学生存圏研究所

¹Department of Aerospace Engineering, Nihon University, ²Swedish Institute of Space Physics (IRF), ³National Institute of Polar Research, ⁴The Graduate University for Advanced Studies, ⁵National Astronomical Observatory, ⁶Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

The various mass ranges of meteoroids ranging between 10-15 and 1015g are continuously colliding with the Earth. Most of them are so called micrometeoroids, micrometeorites or IDPs (Interplanetary Dust Particles) whose diameters are estimated between 10 and several 100 micrometres. It is indicated by radar, high-flying aircraft and zodiacal cloud observations that a daily mass influx of meteoroids is ranging from 100 to 300 tones. However, it is still a matter of finding parent bodies of most meteoroids, while parent bodies for the most of major meteor showers have been identified as comets or dormant comets. Their physical and chemical aspects such as composition, structure as well as their origins are also poorly known. The influx rate of interplanetary dusts and artificial space debris onto the Earth's surface are essential for the human space activities. Thus, it is very important to investigate influx, orbits and mechanical strength of meteoroids that can be observed as meteors after interacting with the upper atmosphere.

High power large aperture (HPLA) radar observation is a recent technique to provide useful information on meteor influx and orbits, as well as interactions with the atmosphere. The recent development of the technique carried out using the middle and upper atmosphere radar (MU radar) of Kyoto University at Shigaraki (34.9N, 136.1E), which is large atmospheric VHF radar with 46.5 MHz frequency, 1 MW output transmission power and 8330 m² aperture array antenna, has established very precise orbital determination from meteor head echoes. More than 150,000 meteor orbits have been measured since 2009.

In this study, we present the physical quantities of meteoroids such as orbital parameters, flux rate and ablation characteristics obtained from the MU radar meteor head echo observations. The origin and internal structure of meteoroids compared with comets, asteroids and space debris will be discussed.

キーワード: 流星, 小惑星, 彗星, レーダー

Keywords: Meteors, Asteroids, Comets, Radar

微惑星サイズと原始惑星系円盤の乱流の強さ Planetesimal size and turbulence strength in a protoplanetary disk

小林 浩^{1*}; 田中 秀和²; 奥住 聡³
KOBAYASHI, Hiroshi^{1*}; TANAKA, Hidekazu²; OKUZUMI, Satoshi³

¹ 名古屋大学理学研究科, ² 北海道大学低温科学研究所, ³ 東京工業大学大学院理工学研究科

¹Nagoya University, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ³Graduate School of Science, Tokyo Institute of Technology

惑星形成において微惑星形成は非常に重要であり、小惑星帯やカイパーベルトの天体や彗星がその生き残りだと考えられてきた。一方、微惑星形成の困難が大問題であったが、近年解決の方策がみえつつある。微惑星の生き残りと考えられる小天体のサイズからそのサイズが微惑星の形成過程が議論されることも多い。また、微惑星形成後の惑星形成は微惑星の大きさは、その後の惑星形成に非常に強い影響を与える。本研究では、微惑星形成によりできた微惑星は、その後の衝突・合体によりサイズが変化し、小惑星や彗星の大きさや惑星形成の材料である微惑星の大きさを決めるのはこの合体・成長であることを示す。この、合体・成長で決まるサイズ分布というのは、天体間の相対速度に強く依存するため、原始惑星系円盤の乱流の強さに強く依存する。本公演では、ガス惑星を作るのに必要な乱流の強さ、また、小惑星帯の天体のサイズ分布を説明するのに必要な乱流の強さについて議論する。

キーワード: 惑星形成, 微惑星, 小惑星, 彗星

Keywords: planet formation, planetesimal, asteroids, comets

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

戎崎 俊一^{1*}; 今枝 佑輔¹
EBISUZAKI, Toshikazu^{1*}; IMAEDA, Yusuke¹

¹ 独立行政法人理化学研究所
¹RIKEN

2014年度から科研費新学術研究、「冥王代生命学の創生」が開始された。A05 生命惑星班は、生命惑星「地球」が存在しえる惑星系形成論を構築することを目的とする。

われわれは、中心星からの重力と熱放射のほかに、非熱的な電離放射線および自己発熱による熱電離を考慮して、1次元定常降着円盤の解をもとめた。ガスの電離状態の変化によって Magneto-Rotational Instability (MRI) の起動・不起動条件を明らかにした。その結果、0.5AU-5AUあたりに、電離が小さすぎてMRIが起動しない静穏領域が、その内側（主に熱電離による）と外側（主に宇宙線による）の両方に、MRIによる乱流領域が現れることが分かった。静穏領域の柱密度は乱流領域に比べて1ケタ程度高くなると期待される。この静穏領域の両端（~1AUと~10AU）には、固体微粒子、微惑星などの固体成分がガス円盤との相互作用によって集積し、微惑星形成が進むことが期待される。降着率が 10^{-8} solar mass yr⁻¹程度にまで下がると、ガス円盤の中心星に近い部分から、電離紫外線による電離蒸発が進み消散することも分かった。本講演では、生命惑星班の研究戦略と、2014年度の成果の概略について述べる。

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

原始太陽系星雲中で成長する火星の混成型原始大気の熱的構造 The thermal structure of the hybrid-type proto-atmosphere of Mars growing in the solar nebula

齊藤 大晶^{1*}; 倉本 圭¹
SAITO, Hiroaki^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
¹ Cosmo Sci., Hokkaido Univ

隕石年代学から、火星は少なくとも 3 Myr 以内に $0.5 M_{Mars}$ (=火星質量) にまで成長したことが示唆されている (Dauphas et al., 2011). これは原始太陽系星雲の散逸時間よりも短く、火星の集積の大部分は原始惑星系星雲中で起こったと考えられる。一方、微惑星の衝突速度は、原始火星が月サイズ ($0.1 M_{Mars}$) 以上になると十分大きくなり、微惑星から H_2O をはじめとする揮発性成分が脱ガスする。したがって集積中の原始火星には星雲ガスおよび脱ガス成分の双方からなる、混成型原始大気が形成されたと考えられる。

そこで、本研究では 1 次元放射対流平衡モデルを構築し、集積期の火星における混成型原始大気の熱的構造について調べた。モデルの概要は以下のとおりである。まず大気は、上層が星雲ガス由来成分で構成され、下層が微惑星脱ガス成分で構成される二重大気層からなると仮定した。星雲ガス成分と脱ガス成分には密度差があるため、互いに混じらないものとし、これら大気層の境界を組成境界と呼ぶことにする。この組成境界高度が高いほど、脱ガス大気質量が大きいことを意味する。脱ガス成分は、 H_2 , H_2O , CH_4 , CO からなり、これら分子種の混合比には、金属相-シリケート相-気相間の熱化学平衡を理論的に求めた結果 (Kuramoto, 1997) を適用する。また、輻射輸送には、 H_2 , He , H_2O , CO , CH_4 による吸収を考慮する。大気組成の鉛直分布と断熱減率には H_2O の凝結を考慮した。火星軌道上の星雲ガスの温度と圧力は Kusaka et al. (1970) に従って与えた。放射対流平衡構造は、集積加熱率および、脱ガス成分大気質量の関数として得られる。集積時間は、年代学的制約と矛盾のない 1 - 6 Myr とし、質量集積率は一定とした。

組成境界高度をパラメータに、脱ガス大気質量に対する温度構造の依存性を調べると、混成型原始大気の熱的構造には以下の様な特徴が見いだされる。まず星雲ガス成分のみで大気が構成される場合、集積時間に依らず地表面温度は 700 K を超えないが (Hayashi et al., 1979)、組成境界高度を上昇させ、脱ガス大気質量を増加させると、地表面温度も上昇する。これは脱ガス大気成分の平均分子量および平均吸収係数がともに星雲ガスよりも大きいことによる。今回与えた脱ガス大気組成の場合、脱ガス大気成分の大気質量が火星質量の約 1% 以上、なおかつ集積時間が 6 Myr 以内ならば、集積最終段階の火星の地表面温度は、岩石の融点 (1500 K を仮定) を超える。

また、原始火星質量に対する脱ガス大気質量の割合を一定として、原始火星の各成長段階 ($0.1 M_{Mars}$ - $1 M_{Mars}$) における地表面温度を比較した。まず、脱ガス大気質量が原始火星質量の約 1% 以上もしくは、0.001% 未満である場合、原始火星質量が大きいほど地表面温度が高くなる。一方、脱ガス大気質量が原始火星質量の約 0.001 - 1% の場合には、原始火星質量が増加するとむしろ地表面温度が低下することがある。このような複雑な振る舞いが生じる原因として、成長中の原始火星において、対流圏界面がどちらの大気層の、どの位置に現れるかや、対流圏界面の相当温位が密接に関係している。

電場加熱による磁気乱流の抑制が引き起こす重力不安定 Gravitational instability by suppression of magnetic turbulence by electric-field heating

森 昇志^{1*}; 奥住 聡¹
MORI, Shoji^{1*}; OKUZUMI, Satoshi¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科

¹ Graduate School of Science, Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤内の乱流は、その角運動量を外側へ輸送しガスを中心星へと降着させるため、円盤の進化を考える上で本質的に重要である。円盤で乱流を起こす機構の1つとして磁気回転不安定性 (MRI) が考えられている (Balbus & Hawley 1991)。中心星から十分遠い領域では MRI は十分発達すると考えられているが、そこでは MRI 乱流に付随する電場が電子を加熱することが指摘されている (電子の電場加熱; Inutsuka & Sano, 2005)。電子の電場加熱が起こると、加熱電子がダストに衝突し吸着されやすくなるために、気相中の電離度が減少し、結果として磁場が散逸し得る (Okuzumi & Inutsuka, 2015)。MRI において磁場の散逸は磁気乱流の抑制を意味する。我々はこれまでの研究において、電場加熱が原始惑星系円盤のどこでどの程度磁気乱流が抑制されるかを調べてきた。その結果、中心星からおおよそ 100AU 以内の赤道面の領域で非常に磁気乱流が抑制されることを見積もった (惑星科学会 2014 年秋季講演)。

本研究の目的は、電場加熱領域を考慮した際に、円盤のどこの領域でガスが蓄積されるかを調べることである。円盤内で乱流が強い領域では、乱流によって円盤の角運動量を輸送しガスが中心星へと降着する。一方、乱流が強い領域では、角運動量輸送が非効率なため、円盤外側から流れてきたガスはその場所に蓄積される。そのため、広い領域で乱流が抑制されると、ガス面密度の大局的な構造を変化させる可能性が考えられる (Mori & Okuzumi, in prep.)。従来の研究では、降着したガスが円盤内側の MRI が起こらない領域 (デッドゾーン) に蓄積し、重力不安定になる可能性が指摘されていた (Martin & Lubow, 2011)。我々の電場加熱を考慮することで、ガスはより広い領域にガスが蓄積されることが予想される。

我々は、定常降着を仮定して、電場加熱領域の各場所における面密度と質量降着率の関係を求めた。円盤モデルとしては、0.1 μm のダストをダストガス比 0.01 で含み、赤道面の磁気圧に対するガス圧を 10^4 倍とした。その結果、質量降着率 $10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$ の時、70AU 以内では定常降着を実現する面密度が存在しないことが分かった。従来のデッドゾーンの描像で 15AU 以内で定常解が存在しなかったことと比べると、我々の結果はガスの蓄積が非常に広い領域で起きることを示唆している。そのような場所では、ガスが蓄積し続けるために面密度が増加し、最終的には重力不安定になることが予想される。

キーワード : 原始惑星系円盤, 磁気流体力学, 磁気回転不安定, 重力不安定, 降着円盤

Keywords : protoplanetary disk, MHD, magnetorotational instability, gravitational instability, accretion disk

離心率の減少にともなう巨大ガス惑星の軌道進化 Impact of eccentricity damping on the migration of a giant planet

植田 高啓^{1*}; 井田 茂²; 竹内 拓¹
UEDA, Takahiro^{1*}; IDA, Shigeru²; TAKEUCHI, Taku¹

¹ 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻, ² 東京工業大学地球生命研究所

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

近年、直接撮像法によって長周期かつ円軌道に近い巨大ガス惑星が発見されてきている。これに伴い、惑星形成モデルとして、円盤自己重力不安定モデルが注目されてきている。円盤自己重力不安定モデルでは、重力的に不安定な原子惑星系円盤が分裂・収縮することにより、軌道長半径が 50AU を超え、質量が 10 木星質量を超えるような、長周期巨大ガス惑星が形成されうると考えられている。本研究では、このように遠方で形成された惑星の軌道進化を、特に惑星の離心率に着目して調べた。惑星が離心率をもつとき、周囲の円盤ガスとの間に相対速度が生じ、力学的摩擦とよばれる円盤と惑星の重力相互作用が生じる。この効果により、惑星は円盤ガスの運動に馴染むように離心率が減少する。力学的摩擦を考慮して軌道計算をした結果、長周期の惑星の場合、離心率が減少している間、角運動量は力学的エネルギーに比べてほとんど変化しないため、角運動量は保存していると仮定できることがわかった。また、離心率が 0.3 を超えるような場合には、離心率の減少に伴う軌道長半径の変化のタイムスケールが、Type I 軌道進化よりも速いことがわかった。さらに本研究では、円盤の乱流によって離心率がどの程度上昇するかを調べた。その結果、強い乱流下においても惑星の離心率は大きく上昇しないことがわかった。

キーワード: 巨大ガス惑星, 軌道進化, 重力相互作用
Keywords: giant planet, migration, disk-planet interaction

巨大惑星によって励起される密度波の伝播が原始惑星系円盤ギャップの形成に与える影響について Effect of wave propagation for a planet-induced gap formation in protoplanetary disks

金川 和弘^{1*}; 武藤 恭之²; 田中 秀和¹; 谷川 享行³; 竹内 拓⁴

KANAGAWA, Kazuhiro^{1*}; MUTO, Takayuki²; TANAKA, Hidekazu¹; TANIGAWA, Takayuki³; TAKEUCHI, Taku⁴

¹ 北海道大学科学研究所, ² 工学院大学基礎・教養教育部門, ³ 産業医科大学医学部, ⁴ 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻

¹ILTS, Hokkaido University, ²Division of Liberal Arts, Kogakuin University, ³School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤内の巨大惑星は円盤との重力相互作用によって周囲のガスを吹き飛ばし、惑星軌道に沿ってリング状のガス密度が減少した領域(ギャップ)を作る。このようなギャップの形成による惑星周辺のガス密度の低下は、惑星への円盤ガスの降着を制限し惑星の成長を妨げる。さらに、タイプ I 惑星移動からタイプ II 惑星移動への遷移のように、惑星移動を定性的に変えてしまう。このため、ギャップの深さ・幅と惑星質量の関係は惑星の質量・軌道進化を考える上できわめて重要である。

さらに、このような円盤ギャップの形成は近年、多数発見されているリング状の隙間を持つ「前遷移円盤」の形成に直結する過程であると考えられている。このような円盤観測の結果と惑星形成を結びつける上でも惑星によるギャップ形成の理論モデルの構築が求められている。

我々の円盤中の密度波の伝播と動径方向の圧力勾配による円盤回転則の変化を考慮した 1 次元理論モデルを用いた解析によると (Kanagawa et al. 2015)、密度波が減衰する位置によってギャップの幅だけでなく深さが大幅に変わることが示唆されている。そこでオープンな数値流体計算コードである FARGO を用いて惑星周りの定常ギャップ構造を計算し、ギャップが開いた場合の密度波の伝播・減衰過程を調べた。従来では、木星サイズの重い惑星の場合、密度波はすぐさま粘性や衝撃波によって散逸・減衰し、円盤ガスに角運動量を受け渡すと考えられてきた。しかし、今回の結果はその描像とは異なり、密度波は相当量の角運動量をギャップの外側にまで運んでいることを示唆している。本講演では、この結果を紹介しつつ、密度波の減衰過程とギャップの幅・深さの関係について議論する。

キーワード: 原始惑星系円盤, 円盤-惑星相互作用, 円盤進化

Keywords: protoplanetary disk, disk-planet interaction, disk evolution

集積中の巨大ガス惑星からの短波長放射について On Shortwave Emission from Accreting Gas-Giant Planets

青山 雄彦^{1*}; 谷川 享行²; 生駒 大洋¹
AOYAMA, Yuhiko^{1*}; TANIGAWA, Takayuki²; IKOMA, Masahiro¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 産業医科大学医学部
¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health

形成初期の恒星は原始惑星系円盤と呼ばれる円盤を伴っており、惑星はこの原始惑星系円盤の中で形成されると考えられている。実際、原始惑星系円盤を伴った若い恒星はすでにいくつか発見されている。また、アルマ望遠鏡による観測では円盤中に空隙が見つかっており、形成中の惑星と円盤ガスの相互作用によって形成された可能性が示唆されている。円盤内で形成中の惑星を直接観測することは、形成論の観点からも重要である。本研究では、形成中の巨大ガス惑星の直接観測が可能であるかを検討する。

巨大ガス惑星形成に関するコア集積モデルでは、臨界質量を超えた固体コアが周囲のガスを暴走的に獲得することで巨大ガス惑星が形成される。このガス獲得過程で惑星は広範囲のガスを集積するため、惑星に対して角運動量を持ったガスは周惑星円盤を形成する。この周惑星円盤は原始惑星系円盤の赤道面に存在し、ヒル半径程度の大きさを持つ。Tanigawa et al. (2012) の数値計算によると、原始惑星系円盤のガスが周惑星系円盤に取り込まれる際、赤道面から二次元的に流入するのではなく、上空から円盤に落下するように流入する。このとき、ガスはほぼ自由落下速度で周惑星円盤に衝突し、周惑星系円盤の惑星近傍での温度は衝撃波加熱により最大数万ケルビンに達する。

したがって、このような高温ガスの放射光を観測することができれば、原始惑星系円盤内で形成中の巨大ガス惑星の存在を確かめることができる。そこで本研究では、Tanigawa et al. (2012) の結果に基づき、衝撃波加熱からガスの温度を推定し、主要成分である水素の輝線を中心にそのスペクトルを計算する。例えば、林モデル円盤内の 5.2AU を回る 130 地球質量の惑星からの水素の輝線光度は 1021 W 程度と見積もられた。この光度は、円盤ガスの数密度に比例するため、円盤ガスが散逸するまで継続する。これに星間物質や原始惑星系円盤ガスの吸収の効果を含めて、形成中の巨大ガス惑星の直接観測の可能性を議論する。

キーワード: 惑星形成, 木星型惑星, 系外惑星, 直接検出

Keywords: Planet Formation, Gas-Giant Planet, Exoplanet, Direct Detection

SEEDS の 5 年：すばる望遠鏡による系外惑星・円盤直接観測 Five Years of SEEDS: Direct Imaging of Exoplanets and Disks with Subaru

田村 元秀^{1*}; SEEDS チーム¹
TAMURA, Motohide^{1*}; SEEDS, Team¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹The University of Tokyo, Graduate School of Science

SEEDS プロジェクトは、第一回すばる望遠鏡戦略プログラムとして、2009 年から約 500 個の主に太陽型星および中質量星のまわりの数 AU から数十 AU 領域に位置する巨大惑星、および、星周円盤の直接観測による探査を行ってきた。観測天体は、約 1Myr から約 1Gyr の比較的若い近傍の恒星であるが、少数の（より古い）視線速度法で惑星が検出された天体も含む。観測には、我々が開発した高コントラストカメラ HiCIAO を用いた。主たるサーベイは大きなトラブルなく 2015 年 1 月で終了したが、一部のフォローアップは継続中である。その主たる結果としては、直接観測による 4 惑星の発見・検出、2 個以上の褐色矮星の検出、2 個以上の視線速度惑星系における伴星の発見、20 個以上の星周円盤のこれまでにない微細構造の解明が挙げられる。円盤に見られる太陽系スケールでのギャップ・アーム構造は惑星存在の兆候とも考えられる。講演では、この 5 年間のサーベイの結果を紹介する。

キーワード: 系外惑星, 円盤, 直接撮像, 赤外線
Keywords: exoplanet, disk, direct imaging, infrared

GJ1214b 大気の流れ力学的散逸 Hydrodynamic escape from GJ 1214b atmosphere

渡辺 健介^{1*}; 倉本 圭¹
WATANABE, Kensuke^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Graduate School of Sciences, Hokkaido University

2009年に発見が報告された系外惑星 GJ 1214b は、地球の約 2.7 倍の半径と約 6.5 倍の質量を持ち、その密度は 1.9 g/cm^3 と、岩石と氷の中間の値になっている。そのため、GJ 1214b は巨大氷惑星として誕生し、その初期には海王星と同様に水素を大量に保持していた可能性がある。一方、最近のトランジット観測（例えば Kreidberg et al., 2014）によると、GJ 1214b は高い分子量の気体で構成された大気を持つと推定され、ここから過去に恒星の強い EUV（極端紫外線, Extreme Ultra Violet）放射によって流体力学的散逸が起き、水素がほぼすべて失われた可能性が示唆される。

これに対し Lammer et al. (2013) は GJ 1214b に水素が豊富な大気を仮定し、現在の EUV フラックスを与えてその流体力学的散逸を数値的に解き、散逸率がホットジュピター HD 209458b に対し観測的に推定されている水素流出率 (Vidal-Madjar et al., 2003) の一割未満とする結果を得た。これを当てはめると、GJ 1214b の質量は惑星史を通じてほとんど変わらず、GJ 1214b が海王星や天王星と同様に大量の水素を形成時に獲得していた場合には、現在でも水素大気を保持していることになる。しかし、Lammer et al. (2013) の結果を吟味すると、エネルギー律速を仮定した場合の散逸率に比べて数値解が著しく小さい。先行研究の求めた加熱率分布は、EUV 放射が計算領域の下端に達する前に大気にほぼ全て吸収されることを示しているが、大気に吸収される単位時間あたりの総エネルギーは、惑星に入射する EUV エネルギーよりも一桁ほど小さくなっている。おそらく先行研究は放射伝達計算に問題があり、散逸率が過小評価されていると考えられる。

そこで本研究では高い質量保存性とエネルギー保存性を持つ CIP 法と CIP-CSL2 法を用い、先行研究と同様に水素原子一成分、球対称一次元を仮定した時間発展非粘性流体方程式の数値モデル (Kuramoto et al., 2013 を修正) を GJ 1214b に適用して散逸率の再評価を行い、水素の流体力学的散逸が GJ 1214b に与える影響を考察した。質量フラックスの一様性とエネルギーの保存性を確認の上、Lammer et al. (2013) と同等の条件 (下端温度: 475K, 下端数密度: $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, EUV 放射: 現在の太陽の 470 倍) を与えた計算を行ったところ、彼らよりもおよそ 6 倍以上もの散逸率が得られた。

本計算で得られた散逸率と恒星年齢に依存した EUV フラックスを惑星形成時から現在まで時間積分した値によると、GJ 1214b の水素の総散逸量は、惑星質量の約 15% ~ 88% と見積もることが出来た。このことから、現在までに GJ 1214b が保持していたであろう水素大気はほぼ全て散逸する可能性があることを示唆し、これは観測 (Kreidberg et al., 2014) と整合的な結果である。また惑星形成初期に現在までの総散逸量分の水素大気があったと仮定すると、GJ 1214b の初期質量は現在の 1.15 ? 1.9 惑星質量 (現在の海王星質量の 0.43-0.72 倍) となり、海王星に似た惑星であったと考えられる。

キーワード: 流体力学的散逸, GJ 1214b

Keywords: Hydrodynamic escape, GJ 1214b

生命保有可能系外惑星 GJ667Cc の気候モデリング Climate modeling of an exoplanet possibly holding life GJ667Cc

成田 一輝^{1*}; 倉本 圭²
NARITA, Kazuki^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi²

¹ 北海道大学理学部地球惑星科学科, ² 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

¹Department of Earth Sciences, School of Science, Hokkaido University, ²Department of CosmoSciences, Graduate School of Sciences, Hokkaido University

近年の系外惑星発見数の増加に伴い、数値モデリングを通じ系外惑星のハビタビリティ (生命存在可能性) を考察する研究が行われるようになった (例えば Wordsworth et al., 2011; Lecointe et al., 2013). 地球同様に地表に液体の水を保有する系外惑星の中でも、観測可能性の高さの観点から赤色矮星の周りを同期回転する地球型惑星が研究対象として重要である。

こうした背景に鑑み、本研究では地球類似性指数 ESI (Schulze-Makuch et al., 2011) が 2014 年 11 月 20 日現在で最も高い (PHL, 2012) 系外惑星 GJ667Cc を対象に、大気大循環モデルのひとつである dcpam5 (高橋他, 2013) を用いた気候シミュレーションを行った。M 型星を公転するこの惑星は、その軌道と推定年齢から、潮汐固定作用を受け同期回転、すなわち常に同じ面を中心星に向けていると考えられる。また対照実験として地球設定での計算も行った。これらの結果をもとに、地表面温度と降水量の地球平均値と分布の地球との比較、地表面温度分布や降水量分布と大気循環との照合、全球風化率の推定、夜半球に水が局在化するタイムスケールの推定を行った。これらの項目の検討を通じて、GJ667Cc の取りうる気候を大局的に考察することを試みた。

GJ667Cc 軌道上の中心星放射は、地球軌道上の太陽放射の約 90% であり、もしアルベドが等しければこの惑星の平衡温度は約 7K 地球より低い。大気量や重力加速度などを、地球の値から質量スケールリングして与えたシミュレーションの結果、GJ667Cc 設定は地球設定に比べて地球平均地表面温度が約 40K 低く、また年間降水量が約 320mm 少なかった。降水量、風速、気温の分布をみると、GJ667Cc 設定の昼半球は恒星直下点を中心に高温多雨で、夜半球は高緯度に寒極がありその周囲に微量の降水が分布していた。GJ667Cc 設定に特徴的な大気循環構造として、高緯度に達する昼半球のハドレー循環、極を通る昼夜対流、スーパーローテーション、そして夜半球の寒極を中心とする渦が確認された。GJ667Cc 設定の地表面温度や降水量の分布はこの大気循環構造によりある程度説明できる。GJ667Cc の全球化学風化率 (地表の岩石からの陽イオン溶出率) は、平均地表面温度と平均降水量がともに地球よりも低いにも関わらず、地球の約 5.8 倍と見積もられた。これは恒星直下点付近の気温が顕著に高く、また降水量も多いため、この領域で大量の風化が生じることによる。風化は温室効果気体である大気中の CO₂ を消費するプロセスであるが、供給プロセスである火成活動を質量スケールリングにより地球の 3.8 倍と仮定すると消費が供給を上回るため、ウォーカー・フィードバック (Walker et al., 1981) の作用により地表面温度はモデル計算値よりさらに低温になると予想される。昼夜境界付近から夜半球にかけては、

持続的に地表が氷点下になっており、ここに輸送された水分は氷として固定され、惑星表面の H₂O の分布が局在化してしまう可能性がある。GJ667Cc に地球スケールリングした総表層 H₂O 量を仮定し、寒冷域の降雪・降霜フラックスをもとに見積もると、水の局在化に要する時間は約 1870 万年と推定された。この推定で考慮しなかった風化との相互作用を勘案すると実際の局在化時間はこれよりも長くなる可能性が高い。

本研究は地球にもっとも似るとされる系外惑星 GJ667Cc を例にとり、その気候を理解するために検討すべき内容を項目別に考察した。実際の気候のふるまいは複数の要素が相互に関わって実現されるものである。このモデルを発展させて、物質循環、風化、水の局在化といった要素からなる気候システムの挙動を明らかにし、その長期的安定性の議論を通して GJ667Cc をはじめとする同期回転地球型惑星の気候や大気構造、そしてハビタビリティを考察することが今後の課題である。

キーワード: 生命保有可能系外惑星, GJ667Cc
Keywords: exoplanets possibly holding life, GJ667Cc

同期回転水惑星大気構造の惑星半径依存性に関する数値実験 A numerical experiment on dependence of the atmospheric structure of a synchronously rotating planet on planetary radius

石渡 正樹^{1*}; 増田 和孝¹
ISHIWATARI, Masaki^{1*}; MASUDA, Kazutaka¹

¹ 北海道大学 大学院 理学院/理学研究院
¹ Hokkaido Univ. Graduate school of Science

本研究では、同期回転水惑星気候の惑星半径に対する依存性を調べるために大気大循環モデル (GCM) を用いたパラメータ実験を行なった。これまでに行われた、地球程度の質量を持つ系外惑星の気候に関する数値実験では、特定の惑星を想定した設定を用いたものが多く、惑星半径を大きく変更した計算はあまり行われていない。たとえば、Heng and Vogt (2011) は、Gliese581g を想定し、惑星半径と重力加速度の値を地球の 1.46 倍から 1.71 倍まで変えた計算を行っている。彼らは、いずれのパラメータにおいても表面温度分布は恒星直下点で最大値、対蹠点で最小値を持つ同様のものになるという結果を示している。しかし、より大きな惑星半径では結果が変わってくる可能性がある。自転角速度を固定して惑星半径を増加させた場合には、惑星半径に対する変形半径の比が減少するので、それに応じて循環構造が変化し、表面温度分布も変化すると考えられるからである。ここでは、惑星半径をより広く変更した実験を行うことにより大気構造の惑星半径依存性を調べることにした。

用いたモデルは、惑星大気大循環モデル DCPAM5 (高橋他, 2013) である。その力学過程は 3 次元球面プリミティブ方程式系から成り、水平方向には球面調和関数変換によるスペクトル法、鉛直方向には σ 座標系での差分法を用いる。全球の地表面に対して沼条件 (swamp condition) を仮定した。重力加速度、表面気圧、太陽定数などは地球の値を用いた。自転角速度に関しては、Gliese 581g の予測値を用いた。惑星半径の値として、 $R_*=0.5$ から $R_*=8$ までの 8 通りの値を与えた (R_* は地球の値で規格化した惑星半径)。

計算の結果、惑星半径 R_* の増加に従い、表面温度の夜半球平均値は単調減少することがわかった。 $R_*=1.0$ の場合に比べて、 $R_*=8.0$ の場合では夜半球平均温度は 15 K 低くなる。表面温度の水平分布においては、夜半球の高緯度域における値が R_* の増加とともに減少していた。これに対して、恒星直下点の表面温度は R_* の増加とともに増加した。 $R_*=1.0$ の場合に比べて、 $R_*=8.0$ の場合では恒星直下点温度は 20 K 高くなる。昼夜間熱輸送量も R_* の増加に応じて単調減少しており、昼夜間の温度差が増加することと整合的になっている。惑星半径が大きい同期回転惑星では、表面温度において空間的变化が大きい気候状態があらわれる傾向にあると言えるかもしれない。

キーワード: 系外惑星, 同期回転惑星, 惑星半径, 大気大循環モデル

Keywords: exoplanets, synchronously rotating planets, planetary radius, general circulation model

ホット・ジュピターの半径異常：層対流の実現可能性とその効果の再評価 Radius Anomaly of Hot Jupiters: Reevaluation of the Possibility and Impact of Layered- Convection

黒川 宏之^{1*}; 犬塚 修一郎¹

KUROKAWA, Hiroyuki^{1*}; INUTSUKA, Shu-ichiro¹

¹ 名古屋大学素粒子宇宙物理学専攻

¹Dept. of Phys., Nagoya University

系外惑星の質量と半径はその組成を制約する上で基本的な物理量である。しかしながら、大部分の短周期巨大ガス惑星(ホット・ジュピター)が水素とヘリウムで構成された惑星の理論モデルと比較して、異常に大きい惑星半径を持つことが観測的に明らかになっている(Baraffe et al., 2010; Baraffe et al., 2014)。この半径異常の成因を理解することは、系外惑星の組成、ひいてはその起源を理解する上で極めて重要である。

半径異常を説明するメカニズムとして、内部の組成不均質性に起因する冷却収縮の遅れが提案されている(Chabrier & Baraffe, 2007)。組成の不均質性は大スケールのオーバーターン型対流の発生を阻害し、境界層に隔てられた小スケールの層対流を誘発する可能性がある(Rosenblum et al., 2011; Mirouh et al., 2012; Wood et al., 2013)。この層対流の熱輸送の非効率性が超断熱温度勾配を生み出すことで、冷却収縮の遅れが生じる。Chabrier & Baraffe (2007)はホット・ジュピター内部の層対流構造を仮定し、その効果によって半径異常を説明可能であることを示した。

しかし、層対流は density ratio の逆数、 $R\rho^{-1} = \alpha\mu / \nabla_T - \nabla_{ad}$ によって記述される限られたパラメータ範囲でのみ発生する。ここで、 $\alpha_T = -(\partial \ln\rho / \partial \ln T)_{p,\mu}$, $\alpha\mu = (\partial \ln\rho / \partial \ln\mu)_{p,T}$, $\nabla_{ad} = (\partial \ln T / \partial \ln p)_{S,\mu}$, $\nabla_T = d \ln T / d \ln p$, and $\nabla\mu = d \ln\mu / d \ln p$ である。系が $0 < R\rho^{-1} < 1$ を満たす場合、オーバーターン型対流が発生する。系が $1 < R\rho^{-1} < (P_r+1)/(P_r+\tau)$ を満たす場合、層対流もしくは turbulent diffusion が発生する。ここで、 P_r はプラントル数、 τ は組成拡散係数と熱拡散係数の比である。系が $R\rho^{-1} < 0$ もしくは $(P_r+1)/(P_r+\tau) < R\rho^{-1}$ を満たす場合、系は安定である(Rosenblum et al., 2011; Mirouh et al., 2012; Wood et al., 2013; Leconte & Chabrier, 2012)。

我々はこれらの対流様式の自己無撞着な取り扱いを組み込んだホット・ジュピターの進化計算を行った。ホット・ジュピターの内部構造の熱進化を Henyey 法(Kippenhahn et al., 1967)を用いて計算した。Henyey 法では静水圧平衡にある内部構造を半径方向の1次元に対して計算する。対流様式は density ratio $R\rho^{-1}$ に基づいて決定した。オーバーターン型対流については Umezu & Nakakita (1988)の組成勾配を考慮した混合距離理論を用いた。層対流については Leconte & Chabrier (2012)の輸送モデルを用いた。

結果として、Chabrier & Baraffe (2007)と同様の単調な化学組成勾配を仮定した場合、組成の不均質性が惑星半径に及ぼす効果は限定的であることを示す。効果が限定的であった理由は層対流が発生しないことである。約10億年程度の時間まで、対流様式はオーバーターン型対流である。オーバーターン型対流が発生した場合、その効率的な熱輸送により、系の温度勾配は中立安定状態に近づく。従って、超断熱温度勾配は $\nabla_T \sim \nabla_{ad} + \alpha\mu / \alpha_T \nabla\mu$ 程度に限定される。約10億年が経過し惑星が冷却した後、層対流構造が形成する。しかし、層対流における温度勾配も $\nabla_T < \nabla_{ad} + \alpha\mu / \alpha_T \nabla\mu$ のように限定される。従って、ホット・ジュピターの半径異常をこのメカニズムのみで説明することは困難である。

キーワード: 系外惑星, ホット・ジュピター, 熱進化, 二重拡散対流, 層対流

Keywords: exoplanet, hot Jupiter, thermal evolution, double-diffusive convection, layered convection

惑星トラップとスーパーアース：質量-半径図への示唆 Planet Traps and Super-Earths: Implications for the Mass-Radius Diagram

長谷川 靖紘^{1*}
HASEGAWA, Yasuhiro^{1*}

¹ 国立天文台
¹NAOJ

The discovery of a large number of super-Earths both by the radial velocity and by the transit has enabled a careful investigation of their composition that can provide fundamental constraints on their formation mechanisms. We present a statistical analysis for the population of planets that grow by the core accretion process at planet traps where rapid type I migration is halted. Evolutional histories of forming and migrating planets in evolving gas disks are computed theoretically in this model. We show statistically that the minimum mass of planets formed at planet traps via the core accretion scenario is about 5 Earth masses. These low-mass planets formed in our model are regarded as failed gas giants that contain a negligible or low mass atmosphere. Our results therefore imply that the composition of super-Earths may change from solid materials to gaseous/icy ones at about 5 Earth masses. Using a latest empirical mass-radius relationship, this transition value of planetary mass roughly corresponds to the recent estimate inferred from the Kepler data.

水蒸気大気の圏界面の推定とハビタブルゾーンの内側境界 Tropopause of steam atmosphere and inner edge of habitable zone

大西 将徳^{1*}; はしもと じょーじ²; 倉本 圭³; 高橋 芳幸¹; 石渡 正樹³; 高橋 康人³; 林 祥介¹
ONISHI, Masanori^{1*}; HASHIMOTO, George²; KURAMOTO, Kiyoshi³; TAKAHASHI, Yoshiyuki O.¹;
ISHIWATARI, Masaki³; TAKAHASHI, Yasuto³; HAYASHI, Yoshi-yuki¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 岡山大学大学院自然科学研究科, ³ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ²Department of Earth Sciences, Okayama University, ³Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

1. はじめに

ハビタブルゾーンの内側境界は、2つの境界で特徴付けられる。1つは、惑星が受け取る日射が、水蒸気大気の射出限界と等しくなる状態で、暴走温室限界 (runaway greenhouse limit) と呼ばれる。惑星が暴走温室限界よりも中心星の近くに存在すると、惑星が受け取る日射量が惑星放射を上回るため、惑星の表面付近は暴走温室状態に陥る。そしてやがて海はすべて蒸発してしまう。もう1つの内側境界は、水の散逸による限界 (water loss limit) と呼ばれ、惑星表面に長期間水が存在する条件で与えられる。水蒸気は大気上層で分解され宇宙空間に散逸するため、水の散逸限界より中心星に近い惑星は、46億年程度の期間にわたって、惑星表面に水を保つことができない。水を長期間保持できるかどうかは、大気上空の水蒸気の混合比がある閾値を越えるか超えないかによって規定され、上空の水蒸気量は対流圏界面の温度に依存する。

Kasting 1988, Kopparapu et al, 2013 では、太陽系を模した条件でハビタブルゾーンの2つの内側限界を推定している。惑星大気は 200[K] となる高度に圏界面が設定され、圏界面より下層は断熱温度構造、上層は等温大気が仮定されている。圏界面を 200[K] に設定することについて、Kasting 1988 では圏界面温度が、射出限界の値に対して敏感でないことが述べられており、暴走温室限界の推定には圏界面の位置は重要でない。一方、水の散逸限界の推定には、圏界面の温度が直接影響する。そのため水の散逸限界を推定するためには、圏界面を放射対流平衡を満たすように決めることが重要である。ただし、放射対流平衡の温度構造を line-by-line 放射計算により求めることは容易ではない。そこで本研究では、水蒸気を含む大気について、上空まで断熱温度勾配を持つ大気を仮定して放射計算を行い、その加熱率分布から圏界面の位置を推定し、水の散逸限界について考察する。

2. モデル概要

大気は上空まで対流混合していると仮定し、擬湿潤断熱温度勾配 (Nakajima et al., 1992) で温度分布を与えている。吸収物質は水蒸気のみで、バックグラウンド大気として非吸収物質が存在している。水蒸気は常に飽和した状態を仮定している。光学データは、線吸収は HITRAN2008 (Rothman et al., 2009), 連続吸収は MT_CKD 2.5 (Mlawer et al., 2012), 紫外領域の吸収は Chan et al., 1993 を用いている。line shape は voigt 線形を与えている。中心星放射は太陽のスペクトルを仮定し、地表面アルベドは近赤外から高波数領域で 0.2 としている。放射伝達方程式は 2 流近似 (Toon et al., 1989) を用い、波数領域 0 - 25000 [cm⁻¹] を波数分解能 0.01[cm⁻¹], 25000 - 100000 [cm⁻¹] を波数分解能 10[cm⁻¹] で計算している。

地表面温度 (250 - 400[K]) とバックグラウンド大気量 (1e+3, 1e+4, 1e+5, 1e+6, 1e+7 [Pa]) をパラメタとし、それぞれのプロファイルについて加熱率の分布から圏界面の位置の推定を行った。

3. 結果

本研究では圏界面は 150[K] 付近に推定され、先行研究よりも低温に圏界面が存在することが示唆された。これは圏界面の水蒸気量がより少なくなることを意味し、水の散逸限界はより中心星側に位置すると考えられる。

キーワード: 水蒸気大気, 放射過程, ハビタブルゾーン, 水の散逸限界

Keywords: steam atmosphere, radiative property, habitable zone, water loss limit

水蒸気大気におおわれたマグマオーシャンの寿命と放射スペクトル進化 Lifetime and spectral evolution of a magma ocean with a steam atmosphere: its detectability by future direct imaging

濱野 景子^{1*}; 河原 創¹; 阿部 豊¹; 大西 将徳²; はしもと じょーじ³

HAMANO, Keiko^{1*}; KAWAHARA, Hajime¹; ABE, Yutaka¹; ONISHI, Masanori²; HASHIMOTO, George³

¹ 東京大学大学院地球惑星科学専攻, ² 神戸大学地球惑星科学専攻, ³ 岡山大学自然科学研究科

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ³Department of Earth Sciences, Okayama University

惑星形成論によれば地球型惑星は巨大衝突を経験し、形成直後は溶融し全球的にマグマに覆われていたと推測される。また、マントル・コアの分離や月の斜長岩地殻といった地質学的・地球化学的痕跡もこうしたシナリオと整合的である。よって太陽系内の地球型惑星では、初期に大規模に溶融していたという仮説はよく支持されている。岩石の融点を超えるような高温の地表からは、赤外だけでなく、近赤外・可視領域からも強い放射が射出される。これが惑星の大気によって完全に吸収・散乱されずに十分残る場合、高温の惑星特有のスペクトルとして系外惑星系でも観測されうる。

直接撮像での検出可能性を議論するには、主星に対する惑星の放射フラックスの大きさ（光の強さ）と主星からの離角（軌道半径）が重要である。また、惑星が溶融してられる期間は存在確率を規定する。発表者はライン・バイ・ラインでの放射スペクトル計算コードの開発を行い、その結果をこれまで用いてきた水蒸気大気とマグマオーシャンの進化モデルに組み込んだ。本発表では固化に伴う地表温度・大気量進化と整合的な惑星放射スペクトル、継続時間、およびその惑星軌道半径への依存性について発表する。

キーワード: マグマオーシャン, 水蒸気大気, 直接撮像, 熱放射スペクトル

Keywords: Magma ocean, Steam atmosphere, direct imaging, thermal emission spectrum

タイタンおよび初期地球大気中における有機物エアロゾルの生成過程と溶媒への溶解度

Formation and solubility of organic aerosols in the atmospheres of Titan and early Earth

田畑 陽久^{1*}; 関根 康人¹; 菅 寿美²; 小川 奈々子²; 高野 淑識²; 大河内 直彦²TABATA, Haruhisa^{1*}; SEKINE, Yasuhito¹; SUGA, Hisami²; OGAWA, Nanako O.²; TAKANO, Yoshinori²;OHKOUCHI, Naohiko²¹ 東京大学 大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 海洋研究開発機構 生物地球化学研究分野¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Department of Biogeochemistry, JAMSTEC

地質記録の少ない初期地球における生命の起源を明らかにする上で、太陽系天体における初期地球の類似環境を通じ、当時の化学進化過程を理解することは重要である。土星の衛星タイタンは、 N_2 と CH_4 を主成分とする弱還元的大気を持ち、大気化学反応により有機物エアロゾルが活発に生成している。タイタン大気で起きている化学反応は、 N_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 からなる、同様の弱還元的大気が存在したと考えられる初期地球大気における化学反応と、そこでの化学進化を理解する鍵となりうる。過去の実験的研究では、タイタン大気を模した N_2 と CH_4 の混合ガスに、土星磁気圏からの荷電粒子を模した低温プラズマを照射する方法で、模擬有機物エアロゾル(ソリン)を生成する方法が行われてきた。さらに近年では、初期地球大気を模擬した N_2 - CH_4 - CO_2 - CO 混合ガスから生成する、初期地球ソリンに関する実験的研究も行われつつある。しかしながら、これら多様な大気組成から生成するソリンの、生成初期過程に着目した研究は少ない。さらに、初期地球やタイタンの大気中で生成したエアロゾルは、地表の液体中で溶解などのさらなる化学反応を経験すると考えられる。しかし、初期地球ソリンに対して、溶媒抽出を行いその溶解度や溶存成分を調べた研究はまだない。

そこで我々は、 N_2 - CH_4 及び N_2 - CH_4 - CO 、 N_2 - CH_4 - CO_2 の3種類の混合ガスを用いたソリン生成実験を行い、タイタンソリン及び初期地球ソリンの生成過程を明らかにすることを目的とし研究を行った。生成中のソリンに対しては、気相成分の質量分析およびプラズマの発光分光分析の2種類のその場分析を行った。生成したソリンに対しても、赤外分光分析及びエリプソメトリによって化学構造と生成率を調べた。さらに、様々な有機溶媒を用いて生成したソリンの溶媒抽出を試みた。

その結果、ソリンの成長率を出発ガス組成で比較すると、 N_2 - CH_4 混合ガスを出発ガスとするタイタンソリンが最も効率よく生成が起き、次いで CO を含むガス組成での初期地球ソリン、 CO_2 を含むガス組成での初期地球ソリンの順に生成率が低下していくことがわかった。また、その場分析の結果、タイタンソリン生成過程の第1ステップは CN ラジカルの生成であり、 CN ラジカルからソリン前駆分子となる HCN や CH_3CN などのシアン化合物の生成が起きることが示唆された。これらシアン化合物や芳香族炭化水素の重合によって、最終的に $C=N$ 結合や多環芳香族を含むタイタンソリンが生成すると考えられる。初期地球ソリンの生成過程の第1ステップも同様に CN ラジカルの生成であるが、 CO_2 の解離による CO の生成も重要な初期反応であり、 CO もソリンの前駆分子となって、 $C=O$ 結合や $C=N$ 結合を含む初期地球ソリンの生成に寄与したと考えられる。

また、生成した初期地球ソリンに対する有機溶媒への溶解実験の結果、初期地球ソリンは、主に極性を有する有機化合物で構成されているが、部分的に極性の低い化合物も存在することが示され、親水基・疎水基の両方を有する化学構造を持つことが示唆される。また、比較的極性の低い有機溶媒であるジクロロメタンに溶解したソリンに対し、紫外可視分光分析を行ったところ、溶解した成分は多環芳香族炭化水素や複素環式化合物に特徴的な吸収を示した。そのような吸収を示す化合物の候補としては、初期生命にとって重要なポルフィリン環も含まれる。これらの結果からは、初期地球大気中で生成した有機物エアロゾルは、窒素を含む複素環式化合物や、親水・疎水基を持つ高分子炭化水素を原始海洋に供給するという重要な役割を果たした可能性が示唆される。

キーワード: タイタン, 初期地球, 還元的大気, 有機物エアロゾル, 化学進化

Keywords: Titan, early Earth, reducing atmosphere, organic aerosol, chemical evolution

地球型惑星が持つ水量が惑星表層環境に与える影響の検討：高圧氷と炭素循環 Effects of Water Amount on the Surface Environment of Terrestrial Planets: High Pressure Ice and Carbon Cycle

中山 陽史^{1*}; 阿部 豊¹
NAKAYAMA, Akifumi^{1*}; ABE, Yutaka¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary, Graduate School of Sciences, The University of Tokyo

ハビタブルゾーンと呼ばれる、惑星表面に液体の水を保持できる軌道領域に数 wt% の H₂O を持つ地球型惑星の存在が理論的に予測されている [Raymond et al., 2004]。惑星に水が供給されるプロセスの多様性を考慮すると、系外惑星系の地球型惑星は様々な水量をもちうる。本研究では、地球のように部分的な海洋を持つ惑星を部分海惑星、全球が海洋で覆われた惑星を海惑星と呼び、水量が異なる場合の表層環境を考える。表層環境を決める重要な要因として、CO₂ に着目する。

全球的な炭素循環は地表面温度を安定化させる気候調節メカニズムである。炭素循環の主要プロセスである風化作用として、大陸風化と海洋地殻で生じる海洋底風化が存在する。地球では、大陸風化による負のフィードバックが働くことで低い CO₂ 分圧に保たれている [Walker et al., 1981]。しかし、地球と同じ部分海惑星でも大陸比の違いにより、大陸風化効率は大きく変わりうる [Tajika and Matsui, 1993]。一方、海洋底風化の理解はまだ十分でなく、pH [Caldeira, 1995]、熱水循環量 [Sleep and Zahnle, 2001]、海底温度 [Brady and Gislason, 1997] などの依存性が提案されている。

海惑星では、大陸風化が存在しないため、海洋底風化が重要となる。また、惑星が持つ水量の増加は大気 CO₂ 量に大きく影響を及ぼすと考えられる。水量の増加に伴う海底温度上昇によって、海洋底風化が効率的に働くことが予測される。一方、水量が多いことは揮発性物質の供給が多いことと考えられるから、惑星が持つ総炭素量も多いと予測される。これは、脱ガス率を増加させ、大気中の CO₂ 量を増大させる。つまり、海惑星の大気 CO₂ 量はこれらの競合で決まると考えられる。さらに水量が増加すると、海底に高圧氷が形成する可能性が指摘されている [Leger et al., 2004]。高圧氷が形成された場合、一般には海洋底風化が機能せず、大気中の CO₂ 量は高くなると考えられる。しかし、CO₂ 量の増加により海底温度が上昇すると、形成した高圧氷が消滅してしまう可能性がある。そのような場合に、どの程度の大気 CO₂ 量を持つかは明らかでない。

惑星の保持する水量は、炭素循環の主要プロセスである風化作用に影響を与え、大気中の CO₂ 量を変えうる。本研究では、炭素循環と高圧氷に着目し、地球型惑星が保持する表面水量と大気 CO₂ 量の関係を検討する。特に、部分海惑星と海惑星とで、大気 CO₂ 量はどれだけ異なるかに着目する。

地球の炭素循環モデル [Tajika and Matsui, 1992] に、新たに海洋底風化を付け加えたモデルを構築した。脱ガス率は惑星の炭素量に依存するとした。炭素も水と同様に惑星に供給されたと仮定し、水量に合わせて炭素量も増加させている。部分海惑星では大陸比を、海惑星では海洋水量をそれぞれパラメータとし、脱ガス率と再ガス率が釣り合う平衡状態における大気 CO₂ 量を求めた。また、高圧氷形成による炭素循環への影響も考慮している。

部分海惑星では、大陸比が 0.1 以上では大陸風化が主体となり、海洋底風化は大きく影響しないことが分かった。脱ガス率を現在の地球の 5 倍にしても、30P* (P* は現在の地球の大気 CO₂ 量を表す) 以下の低い大気 CO₂ 量に保たれる。海惑星では、海洋水量の増加は海洋底風化効率の増大に比べ、脱ガス率増加に大きく寄与することが分かった。海洋底風化が最も効率的に働く場合でも、海洋水量の増加に伴って大気 CO₂ 量は増加し、~1000 P* の高い CO₂ 分圧を持つ。また、海底に高圧氷が形成された場合、高圧氷形成 (海洋底風化消滅) と高圧氷消滅 (海洋底風化再開) の振動を示すと考えられる。高圧氷形成条件はその振動の中で最も低い大気 CO₂ 量を表している。120 地球海洋水量以上では高圧氷が形成され、大気 CO₂ 量は急激に増加する。これらの結果は大陸風化主体の部分海惑星と海惑星では、保持する大気 CO₂ 量は大きく異なることを示唆する。そして、地球型惑星が持つ水量によって、大気 CO₂ 量を決めるプロセスが変化し、表層環境が大きく変わることを示唆する。

キーワード: 炭素循環, 海洋底風化, 高圧氷, 二酸化炭素, 地球型惑星, 系外惑星

Keywords: carbon cycle, seafloor weathering, high-pressure ice, carbon dioxide, terrestrial planet, extrasolar planet

地球類似惑星のハビタブル条件における惑星質量依存性 The duration of habitable condition for large and small Earth-like planets

門屋 辰太郎^{1*}; 田近 英一²

KADOYA, Shintaro^{1*}; TAJIKA, Eiichi²

¹ 東京大 理 地球惑星科学, ² 東京大 新領域 複雑理工

¹Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo, ²Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

The orbital condition for the Earth-like planets which may have liquid water on its surface is known as the habitable zone (e.g., Kasting et al., 1993; Kopparapu et al., 2013). However, the condition for the Earth-like planets which can maintain the warm and wet climate through the evolution may be different from that for the habitable zone. The climate of the Earth-like planets would actually depend on the CO₂ degassing rate via volcanism because the amount of the atmospheric CO₂ is controlled by the carbonate-silicate geochemical cycle (Kadoya & Tajika, 2014, ApJ, 790:107). The CO₂ degassing rate decreases with time owing to decrease in mantle temperature and attenuation of volcanic activity (Tajika & Matsui, 1992, EPSL, 113). The thermal evolution of the planets should, however, depend on the planetary mass.

In this study, we apply a parameterized convection model to the thermal evolution of the Earth-like planet with different masses and with plate-tectonics in order to estimate the evolution of average mantle temperature, seafloor spreading rate, melt generation depth, melt production rate, and the CO₂ degassing rate for the planets. The results are compared with the climate mode diagram for the Earth-like planets proposed by Kadoya & Tajika (2014), and also, the evolutions of the climate of the Earth-like planet are discussed.

The average mantle temperature monotonically decreases with time when an initial average mantle temperature is higher than 3000 K. As expected, the average mantle temperatures of large planets cool more slowly than that of small planets do. However, the difference between the mantle temperatures of the planets is smaller than 100 K, which is consistent with the recent work (e.g., Schaefer & Sasselov, 2015). The seafloor spreading rate is larger on large planets than on small planets because the heat flow is higher on large planets than on small planets. On the other hand, the melt generation depth of large planets is smaller than that of small planets owing to the difference in the surface gravity. The net result of the melt generation rate is larger on large planets than on small planets although the difference is smaller than those of the seafloor spreading rate and the melt generation depth. In addition, because large planets have a larger surface area than small planets, the CO₂ uptake rate via silicate weathering on large planet is larger than that on small planets when the temperature distribution is the same. As a result, the climate evolutions of large and small planets are almost the same as long as the areal ratio of continents and oceans is the same.

キーワード: 系外惑星, ハビタブルゾーン

Keywords: exoplanet, habitable zone

不均質な表面をもつ惑星で暴走温室効果を引き起こす気候不安定について
A new climate instability that triggers the runaway greenhouse in a 3-dimensional heterogeneous world.

阿部 豊^{1*}; 新田 光¹; 阿部 彩子²; 大石 龍太²; 高尾 雄也³
ABE, Yutaka^{1*}; NITTA, Akira¹; ABE-OUCHI, Ayako²; O'ISHI, Ryouta²; TAKAO, Yuya³

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 東京大学大気海洋研究所, ³ 東京工業大学 広報センター

¹School of Science, University of Tokyo, ²Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, ³Center for Public Affairs and Communications, Tokyo Institute of Technology

The onset condition of the runaway greenhouse is considered that the atmosphere takes in more incoming solar radiation than a "runaway threshold." The runaway threshold is important because it defines the absolute inner limit of the habitable zone. Most of previous studies on the runaway threshold used one-dimensional radiative-convective equilibrium model and considered the atmospheric state where the ocean cannot exist in a equilibrium state. Such studies indicated that the runaway threshold is the "radiation limits," which is an asymptotic value or an upper limit of the planetary radiation (Nakajima et al., 1992,).

Recently, the runaway threshold of planets with heterogeneous surface water distribution has been investigated using 3 dimensional dynamic models (Abe et al., 2011; Leconte et al., 2013; Nitta et al., in preparation). The threshold strongly depends on the surface water distribution and it can be quite different from the radiation limit. Therefore, we have to understand the controlling mechanism of the runaway threshold in a 3-dimensional world.

Here, we report a new climate instability that triggers the runaway greenhouse based upon the analysis of GCM results and the linear stability analysis of a simplified model. The instability requires horizontal transport of heat and water vapor, thus it does not appear in one-dimensional world. On the other hand, surprising enough, this instability does not require the radiation limit. Namely, the instability is not directly related to the asymptotic value or the upper limit of the planetary radiation. This result suggests that the onset of the runaway greenhouse in 3-dimensional heterogeneous world may not be understood in terms of the simple radiation limit.

キーワード: 暴走温室効果, ハビタブルゾーン, 射出限界, 気候不安定

Keywords: runaway greenhouse, habitable zone, radiation limit, climate instability

大質量スーパーアースのマントル対流の活発さと対流レジームダイアグラムについて The vigor and the regime diagram of thermal convection in the mantle of massive super-Earths

宮腰 剛広^{1*}; 亀山 真典²; 小河 正基³
MIYAGOSHI, Takehiro^{1*}; KAMEYAMA, Masanori²; OGAWA, Masaki³

¹ 海洋研究開発機構, ² 愛媛大学, ³ 東京大学
¹Jamstec, ²Ehime University, ³University of Tokyo

Understanding thermal convection in the mantle of super-Earths is a key to clarifying their thermal history and habitability. In massive super-Earths, the strong adiabatic compression influences thermal convection in the mantle in contrast to the Earth's one. In this paper, we present numerical models of thermal convection in massive (ten times the Earth's mass) super-Earths calculated at the relevant adiabatic compression effect and various values of Rayleigh number Ra and temperature-dependent viscosity contrast r .

Strong effects of adiabatic compression reduce hot plume activity significantly, while keeping cold plume activity high. The effects on hot plumes become more prominent as r increases, because the lithosphere becomes thicker as r increases and the potential temperature of the isothermal core increases. This results in decreasing difference of potential temperature between hot plumes and surround material, thus in decreasing buoyancy force of hot plumes.

We also studied the convective regime diagram on the plane of Ra and r . The threshold value of r for transition to the stagnant lid regime from small viscosity contrast regime increases as Ra increases in super-Earths in contrast to the diagram of the earlier Boussinesq model [Kameyama and Ogawa, 2000]. At high Ra relevant to massive super-Earths, the threshold value is larger than that expected in the Earth. To understand the reason why the threshold value of r increases as Ra increases, we present the viscosity contrast between the surface of the planet and the bottom of the lithosphere $reff$. In contrast to the increasing the threshold value of r , the $reff$ is constant even the Rayleigh number increases. Thus, the $reff$ is more relevant to transition to the stagnant lid regime rather than the viscosity contrast r in the whole mantle.

We also found that the Nusselt number Nu , which is the efficiency of heat transport by thermal convection, is considerably reduced compared with the earlier Boussinesq model. At $Ra=10^{10}$ and $r=10^7$, the Nu is only 2.7 and 14% of the value expected from the earlier Boussinesq model. The thickness of the lithosphere is about 30% of the depth of the whole mantle. From systematic numerical simulation, Nu is fitted as a function of Ra and r . The power index on Ra is 0.27. This value is somewhat smaller than that in the earlier Boussinesq model (0.31) [Christensen, 1984].

The thick lithosphere shown in our model implies that plate tectonics is difficult to operate in super-Earths. However, the high threshold value in r for regime change suggests that the lithosphere moves in a way different from plate tectonics. Thermal convection may be in the small viscosity contrast regime in super-Earths and the surface may be fully involved in the convective current.

Keywords: super-Earths, mantle, thermal convection, compressible fluid, stagnant lid, numerical simulations

内部海を持つ氷衛星における潮汐共鳴 Tidal resonance in icy satellites with subsurface oceans

鎌田 俊一^{1*}; Matsuyama Isamu²; Nimmo Francis³
KAMATA, Shunichi^{1*}; MATSUYAMA, Isamu²; NIMMO, Francis³

¹北海道大学, ²LPL/Univ. Arizona, ³UC Santa Cruz
¹Hokkaido Univ., ²LPL/Univ. Arizona, ³UC Santa Cruz

潮汐散逸は、巨大惑星の氷衛星に対する重要な熱源の一つである。様々な観測や理論モデルから、いくつかの氷衛星の内部には液体の海があると考えられている。氷衛星の潮汐に関する研究はこれまでも行われてきており、大きく分けて固体部分での散逸を考えたものと液体部分での散逸を考えたものに分けられる。前者においては（準）定常な海が仮定されている上、内部海が存在が散逸に与える影響を調べた研究はない。また後者においては、海の上の氷地殻の効果が無視されてきた。本研究では、前者の研究で用いられる粘弾性重力理論に基づく潮汐変形計算式の見直しを行い、慣性項を含み、かつ氷地殻の効果も含めた汎用的な計算方程式群の導出を行った。モデル計算の結果、定常な海を仮定した場合と異なり、海が浅い場合に潮汐共鳴が起きることが分かった。これは、海の中の情報伝達速度が重力波速度で決まることに由来している；浅い海においては、重力波速度が遅く、軌道速度に近くなる。定常な海を仮定した場合、伝達速度は常に無限であり、共鳴は起きない。衛星内部が冷えるに従って海が浅くなり共鳴条件に近づくにつれ潮汐変形とそれに伴う散逸は大きくなり、氷衛星の熱進化・軌道進化に大きく影響すると考えられる。共鳴条件は海の厚さだけでなく、氷地殻の厚さや物性に大きく依存することが分かった。これらの結果は、潮汐散逸において海のダイナミクスや氷地殻という「蓋」の効果が非常に重要であることを示している。

キーワード: 氷衛星, 内部海, 潮汐, 共鳴

Keywords: Icy satellites, Subsurface ocean, Tidal response, Resonance

火星内部のレオロジー構造とその進化 The temporal evolution of rheological structure of Martian interior

東 真太郎^{1*}; 片山 郁夫¹
AZUMA, Shintaro^{1*}; KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学
¹Hiroshima University

火星は地球と同じく主に岩石と金属から成る地球型惑星である。しかし、現在の火星には液体の水や生命は存在しない、そして地球において定常的な物質循環を支配するプレートテクトニクスが火星では働いていないことが分かっている [e.g., Solomatov and Moresi 1997]。これらのことから火星は地球と異なる進化の道を進んできたことが予想される。このような惑星の進化やテクトニクスを考察する際、重要な要因の一つとして、レオロジー構造が挙げられる。レオロジー構造は惑星内部の変形機構や強度を表わし、温度に強く依存するため、惑星内部に強いレオロジー層構造を形成する [e.g., Burgamann and Dresen, 2008]。このレオロジー層構造が惑星のテクトニクス、対流様式を支配し、結果として惑星の進化に大きな影響を及ぼす。本研究では、火星内部のレオロジー構造の決定と、その時間進化を考察することが目的である。

レオロジー構造は温度に敏感であるため、火星内部の温度構造を決定することが必要になる。今回は比較的浅い部分 (0-100 km) に焦点を当て、熱生産 (heat production) [Hahn et al., 2011] や、熱流量 (heat flow) [McGovern., 2002; Ruiz et al., 2011] を用いた熱伝導方程式から、North Pole(低地) そして Solis Planum(高地) における 10 億年ごとの温度構造を決定した。

この温度構造を基に、斜長石 (地殻) [Rybacki and Dresen 2000; Azuma et al., 2014] と、かんらん石 (マントル) [Karato and Jung, 2003; Katayama and Karato, 2008] の流動則を用いてレオロジー構造を決定した。また過去の先行研究では、火星のレオロジー構造は power-law creep の流動則から考察されているが (e.g., Grott and Bruer, 2008)、比較的溫度が低く、応力の高い領域 ($<1000^{\circ}\text{C}$, $>400\text{MPa}$) では、Peierls mechanism が岩石のレオロジーを支配することが指摘されている (Tsenn and Carter, 1987)。本研究では、power-law creep だけでなく、この Peierls mechanism と diffusion creep も考慮し、より正確なレオロジー構造の決定を試みた。このレオロジー構造から、火星におけるそれぞれの時代のリソスフェアの強度、厚さ、そして elastic thickness の評価も行った。

計算されたレオロジー構造において、火星のモホ付近では power-law creep ではなく Peierls mechanism が支配的であることがわかった。これは power-law creep で予測された火星のリソスフェアの強度は過大評価されている可能性を示す。そして、どの時代においてもドライな条件よりウェットな条件のほうが、惑星のリソスフェアの厚さは薄く、強度が低くなることがわかった。さらにドライな条件とウェットな条件ではリソスフェアの発達に大きな差が生まれる可能性が示された。これは水が豊富に存在する惑星では、ドライな惑星と比べて、内部の対流様式の進化が遅くなる可能性がある。過去のリソスフェアの強度に関しては、4Ga から 3Ga のウェットな条件で、火星はプレートテクトニクスの開始に必要な不可欠なプレート境界を形成できるポテンシャルを持っていたことが示された (200-300 MPa)。

キーワード: 火星, レオロジー構造, プレートテクトニクス, リソスフェア, パイレスメカニズム, 時間進化
Keywords: Mars, Rheological structure, Plate tectonics, Lithosphere, Peierls mechanism, Temporal evolution

月惑星探査における年代その場計測を目指した開発 Development of an in-situ dating package for lunar/Mars missions

長 勇一郎^{1*}; 芝崎 和夫¹; 梅山 未紗子¹; 大石 峻裕³; 亀田 真吾¹; 三浦 弥生²; 吉岡 和夫³;
齋藤 義文³; 横田 勝一郎³; 笠原 慧³; 吉光 徹雄³; 岡崎 隆司⁴; 大竹 真紀子³; 諸田 智克⁵;
古賀 すみれ⁷; 杉田 精司⁶

CHO, Yuichiro^{1*}; SHIBASAKI, Kazuo¹; UMEYAMA, Misako¹; OISHI, Takahiro³; KAMEDA, Shingo¹;
MIURA N., Yayoi²; YOSHIOKA, Kazuo³; SAITO, Yoshifumi³; YOKOTA, Shoichiro³; KASAHARA, Satoshi³;
YOSHIMITSU, Tetsuo³; OKAZAKI, Ryuji⁴; OHTAKE, Makiko³; MOROTA, Tomokatsu⁵; KOGA, Sumire⁷;
SUGITA, Seiji⁶

¹ 立教大学, ² 東京大学地震研究所, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 九州大学, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 東京大学地球惑星科学専攻, ⁷ 東京大学複雑理工学専攻

¹Rikkyo University, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ³ISAS, ⁴Kyushu University, ⁵Nagoya University, ⁶Dept. Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ⁷Dept. Complexity Science and Engineering, University of Tokyo

月や火星に残された地質記録の絶対年代を決定することができれば、惑星進化に関する重要な知見が得られるに違いない。発表者らはこれまで、惑星着陸探査において岩石のカリウム・アルゴン年代をその場計測することを目指し、原理の実証実験を進めてきた。一方で、惑星探査機に計測器を搭載するには、装置の小型軽量化や熱設計を含む工学面の開発が不可欠である。そこで本発表では、探査機搭載を目指して行ってきた開発の進捗について報告する。

第一に、年代計測装置パッケージの構成と各機器の配置を決定し、全体の重量や消費電力、および計測手順を明確化した。

第二に、試料採取と受け渡しに関する機構を決定した。直線移動を避け、回転移動のみを用いるようにした。また、真空系へのダストの侵入を防止するような配置を考案した。

第三に、以下に述べる真空シール部の課題に重点的に取り組んだ。岩石から抽出される微量のアルゴンガスを計測するためには、試料を真空容器に入れ、これを高真空に保つ必要がある。そのような計測は、実験室では金属製のガスケットを用いて行われており、NASAの火星探査車 Curiosity に搭載された SAM(Sample Analysis at Mars) でも、銅のガスケットが使用されている。しかし、重量や電力が大きく制限される惑星探査において、金属の塑性変形に必要なトルクを発生させることは容易なことではない。もし、ゴム製の O リングを使ったアルゴン分析が可能になれば、真空容器の開閉が非常に容易になる。そのような機構は「ひさき」を含む地球周回衛星で既に実用化されているため、技術的な実現可能性が飛躍的に高まることとなる。そこで本研究では、金属ガスケットの代わりにバイトンおよび Nexus SLT(低温耐性のある O リング)を使って、アルゴンのブランク計測を行った。質量分析装置は、従来の原理実証実験で使われてきたものを用いた。その結果、周囲が真空である月では、事前に十分なベーキングを施しておけば、バイトンゴムを使っての計測が可能であることが分かった。また、周囲が約 6 hPa の火星でも、ダブル O リングを用いた差動排気を用いることで、十分にアルゴンのブランクを低くできることが明らかになった。

以上の三つの開発を通じて、探査機搭載に向けた年代計測装置の姿が見えてくるとともに、ガス分析に関連する大きな技術課題の一つが克服された。

キーワード: カリウム・アルゴン年代, その場年代計測, 月探査, 火星探査

LIBSによるその場K-Ar年代測定法の基礎実験 Verification of in-situ K-Ar dating using LIBS

芝崎 和夫^{1*}; 奥村 裕¹; 長 勇一郎¹; 亀田 真吾¹; 三部 賢治²; 三浦 弥生²; 杉田 精司²
SHIBASAKI, Kazuo^{1*}; OKUMURA, Yu¹; CHO, Yuichiro¹; KAMEDA, Shingo¹; MIBE, Kenji²;
MIURA, Yayoi N.²; SUGITA, Seiji²

¹立教大学, ²東京大学

¹Rikkyo University, ²The University of Tokyo

背景: 惑星表面の形成年代を知ることは重要である。近年ではサンプルリターンを行わずにその場で年代測定をする方法が模索されている。しかし、これまでに地球外で行われたその場年代測定は、NASAのローバCuriosityが火星で行った1例のみである。CuriosityはKを α 粒子X線分光計(APXS)、Arを四重極質量分析計(QMS)で測定し、K-Ar年代測定を行った。これらの装置は大型であり、運用には大型のローバが不可欠である。そこで、本研究ではLIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy:レーザー誘起絶縁破壊分光装置)でKとAr両方を検出するその場K-Ar年代測定を検討している。本手法はNASAの手法と比較し検出機器が1つで済むため、大幅な小型軽量化が期待できる上、LIBSの特性上遠隔性があり、迅速な測定が可能になる。しかし、これまでLIBSを用いた岩石中のArの検出例はなかった。

目的: そこで本研究では、LIBSによる岩石中のAr検出の可能性を検証するための実験を行った。

Ar検出実験: 大気圧下で生成されるレーザー生成プラズマの典型的な温度と電子密度はそれぞれ1 eV (11600 K)、 10^{17} cm⁻³である。これらの値を使いSahaの式を用いて輝線強度を計算すると、104.8 nmと106.7 nmの中性原子が発する輝線強度が卓越する。そこで本研究では真空紫外領域で分光測定を行った。試料にはAISTの玄武岩標準試料JB-1aと、この標準試料にArを加えた試料(Ar含有量0.1 cc/g)を使用した。レーザーにはNd:YAGレーザー(波長1064 nm, パルス幅5-7 ns, パルスエネルギー50 mJ)を用いた。レーザー照射によって生成されたプラズマは凹面回折格子で分光される。検出器には蛍光面付MCPを使用し、蛍光面に映ったスペクトル像をCCDカメラで撮像してスペクトルを得た。

結果と議論: 純粋なSiを試料として予備実験を行ったところ、106.7 nmに当初想定していなかったSi⁽³⁺⁾輝線を検出した。高い励起エネルギーを必要とする輝線を検出したことから、プラズマの温度が予想よりも高温であると考えられる。高温を考慮すると、Arは電離していると考えられるので、中性原子の輝線より検出可能性が高いと考えられる83.5 nmにあるAr⁴⁺の輝線検出実験も行ったが、O⁽²⁺⁾輝線(83.4 nm)の存在によりAr輝線を検出することはできなかった。本研究では、真空紫外領域でOやSiの多価イオンの輝線を多数検出し、106.7 nmのSi⁽³⁺⁾輝線と83.4 nmのO⁽²⁺⁾がAr輝線と重なることが明らかになった。プラズマの温度は時間とともに急速に減少していくので、岩石のLIBS分析には高速時間ゲートをかけて多価イオン輝線を取り除くことが有効だと考えられる。

キーワード: LIBS, その場年代計測, K-Ar法

Keywords: LIBS, in-situ dating, K-Ar method

「惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表」の概要 An outline of the road map of planetary sciences and solar system sciences

倉本 圭¹; 荒井 朋子²; 小林 直樹³; 杉田 精司⁴; 橘 省吾¹; 寺田 直樹⁵; 並木 則行^{6*}; 松本 晃治⁶; 渡邊 誠一郎⁷

KURAMOTO, Kiyoshi¹; ARAI, Tomoko²; KOBAYASHI, Naoki³; SUGITA, Seiji⁴; TACHIBANA, Shogo¹; TERADA, Naoki⁵; NAMIKI, Noriyuki^{6*}; MATSUMOTO, Koji⁶; WATANABE, Sei-ichiro⁷

¹ 北海道大学大学院理学学院宇宙理学専攻, ² 千葉工業大学惑星探査研究センター, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁴ 東京大学大学院理学系研究科, ⁵ 東北大学大学院理学研究科, ⁶ 国立天文台・RISE 月惑星探査検討室, ⁷ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Graduate School of Sciences/Hokkaido University, ²PERC/Chiba Institute of Technology, ³ISAS/JAXA, ⁴Graduate School of Science/The University of Tokyo, ⁵Graduate School of Science/Tohoku University, ⁶RISE/NAOJ, ⁷Graduate School of Science/Nagoya University

宇宙科学研究所の求めに応じて、日本惑星科学会会長およびその諮問委員会から2015年2月2日に「惑星科学／太陽系科学 研究領域の目標・戦略・工程表」(以下では太陽系探査RFIと呼ぶ)(*)が提出された。『研究領域の目標・戦略・工程表』とは、研究領域ごとの戦略的な宇宙科学・探査のロードマップであり、宇宙科学研究所(宇宙理学委員会・宇宙工学委員会・宇宙環境利用科学委員会)の作る宇宙科学・探査ロードマップの情報源として提供されるものである。同時に、戦略的中型計画および小規模プロジェクトの評価・選定の際の参考文献となり、今後20年を見据えた宇宙科学・探査ロードマップの策定のための源泉資料として分析と評価がなされる。

太陽系探査RFIは将来月惑星探査の指針を示す重要な資料であるが、募集文書の発出(2014年11月27日)から提出までが短期間であったため、原案の作成状況について随時周知を行ってほしいものの、惑星科学／太陽系科学のコミュニティ内で十分に議論を尽くすことはできなかった。その前書きにも述べられている通り、太陽系探査RFIの検討の熟度はまだ低く、今後も恒常的にロードマップについての議論を重ね、随時改訂していく作業が不可欠である。太陽系探査RFIの策定に関わった諮問委員会メンバーはその必要性を重く受け止め、太陽系探査RFIとその策定過程についてコミュニティへ周知を図るために本講演を企画する。

太陽系探査RFIの策定はフェーズ1とフェーズ2に分けて行われた。フェーズ1では太陽系探査RFIの主題を提案し、フェーズ2ではこれを具体的な工程表に落としこむことを試みた。フェーズ1の諮問委員会では最初に太陽系探査RFIの策定にあたって、以下の点が特に重要な制約であると判断した。

1. 本筋の明確な戦略性

新宇宙計画基本法に明示されている太陽系探査の『プログラム化』という方針からは、今後20年の太陽系探査を貫徹する主題を明示することを求められている。

2. 開発体制

惑星科学分野は小型を中心に鍛錬を積みながら、ミッションを支える開発グループを形成していくことを期待されている。

3. 技術ロードマップ

太陽系探査は理学と工学の密接な連携のもとに進めるべきであり、理学研究のロードマップにおいても要素技術の開発計画は十分に考慮する。

4. 国際情勢

太陽系探査は日本の科学技術のためのみならず、世界人類の知的財産の獲得のためにも貢献するものでなければならない。そのためには、宇宙科学・宇宙探査の国際情勢を鑑みて太陽系探査の目標を設定する。

5. 既存のWGとの整合

日本惑星科学会では2010年より、「月惑星探査の来る10年」という活動を通じてフラグシップミッションの立案とコンセプトの作成を行ってきた。太陽系探査RFIにはその経験を踏まえ、広く意見を吸い上げる。

6. 政策的宇宙探査のとの協調

太陽系科学における政策的宇宙探査の役割は、非常に不確実性が大きく、且つ、甚大な影響がある。慎重な検討が求められる。

以上の観点から、フェーズ1では「太陽系における前生命環境進化—生命圏の誕生・持続に至る条件の解明—」という主題を掲げるに至り、メーリングリストを通して中間報告を行った。次いでフェーズ2では第一に、この主題の下に(i)物質科学、(ii)内部構造探査、(iii)惑星大気の3分野について20年後のゴールを設定することから議論を開始した。第二回会合で、ゴールに向かって20年間でどのような機器開発が必要か、という作業項目について検討を行った。第三回会合では、ゴールと機器開発を組み合わせて、ミッション候補をあげて検討を行った。そして最後に、ミッション候補の規模と重要性を考察し、物質科学・大気科学の流れを汲む火星衛星からのサンプルリターン探査と、重力天体の地

PPS21-38

会場:A02

時間:5月25日 12:15-12:30

質学, 内部構造科学の流れを汲む月 KREEP 物質・年代探査の二案を将来の戦略的中規模ミッション候補として絞り込んだ。両ミッション計画の実施時期が重なる場合には、コミュニティ主導で科学と実現性の評価を行い、2018年度までに優先順位を決めることを提言している。

謝辞 本 RFI の策定にあたっては、多くの個人、団体に情報提供と現状分析を依頼した。頂いた情報は太陽系探査 RFI に陽に現れずとも、議論の貴重な礎となった。深く感謝の意を表す。

(*) 太陽系探査 RFI の提出版は下記の URL からダウンロードできる。 <http://urx2.nu/hctx>

キーワード: 工程表, 将来計画, 太陽系探査, 惑星探査

Keywords: road map, future plan, solar system exploration, planetary exploration