

火成活動と組成分化を組み込んだ金星マントルの進化モデル

Evolution of Venusian mantle with magmatism and compositional differentiation in a numerical modeling

柳澤 孝寿^{1*}, 小河 正基²

Takatoshi Yanagisawa^{1*}, Masaki Ogawa²

¹ 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, ² 東京大学大学院 総合文化研究科

¹IFREE, JAMSTEC, ²Graduate School of Arts & Sciences, Univ. Tokyo

The surface age of Venus is estimated to be 300-600 Myr on average, and is young in contrast to Mars, where magmatism has mostly subsided on the early stage of its history. Detailed surface observations suggest that magmatism is still ongoing on Venus, at least locally. On the other hand, Venus is a planet where the lithosphere is stagnant and plate tectonics does not operate, which is similar to Mars. When the lithosphere is stagnant, the solid-state mantle convection is unlikely to cool the mantle so efficiently as to extract all the heat internally generated by heat producing elements. In such a situation, it is crucial to take account of melting of mantle materials in the modeling of thermal history, as we suggested for the evolution of Martian mantle (Ogawa and Yanagiawa, 2011, 2012). Here, we apply our numerical model of mantle evolution with coupled magmatism for Venus to understand its thermal history, the history of magmatism, and structural evolution of the mantle. In the numerical experiments, we discuss how the crust enriched in heat producing elements develops, how the crust recycles back into the mantle, and how the mantle evolves to affect the history of magmatism and the lithosphere in accordance with the crustal evolution. We take account of the barrier effect of the phase transitions at the top of the lower mantle, and our model allows compositional differentiation of the mantle by magmatism. Based on the numerical results, we discuss the difference of evolution between Venus and Mars.

Keywords: Venus, evolution of mantle, magmatism, numerical simulation

還元的な組成を持つ水星の内部構造と熱進化

Internal structure and thermal evolution of Mercury with highly reduced composition

中山 陽史^{1*}, 倉本 圭²Akifumi Nakayama^{1*}, Kiyoshi Kuramoto²¹ 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

2008年から探査を開始したMESSENGERによって得られた地形、表面組成、そして重力場のデータを用いて、水星の内部構造についての新たな提案がなされている (Smith et al., 2012). 新たに得られた慣性率に基づいて推定されたコア半径は 2030 ± 37 km, 固体マントル密度は 3650 ± 225 kg m⁻³ であり、高いマントル密度を説明するために、マントル下部にFeS層が存在することが示唆される。また、MESSENGERによって得られた水星の表面組成 (Nittler et al., 2011) はFeOに乏しい。これは水星がエンスタタイト (E) コンドライトの様な還元的な材料物質から形成されたことを示唆する (Wasson, 1988)。これらの結果は従来の内部構造モデルと大きく違い、水星の材料物質や熱進化の見直しが必要である。

E コンドライトは金属成分に多量のSを含む。もし水星のコアにも多量の軽元素が含まれているなら、高い水星の平均密度を説明するには、珪酸塩マントル層は極めて薄いと考えられる。従来考えられてきた相対的に厚い珪酸塩マントルを仮定した熱進化モデル (Stevenson et al., 1983 など) では、マントルの熱輸送効率が速やかに減少し、現在においては流体核が熱対流を起こさないと考えられていた。これを受け入れるとコア中でFeSが析出することも困難である。しかしマントルが薄ければ、マントル中の熱輸送効率がそれほど低くならず、十分低い温度までコアが冷却できるかもしれない。

そこで本研究では新しい内部構造に則した水星の熱進化計算を行い、水星の熱史とコアの熱的状态について考察を行う。球対称を仮定し、珪酸塩マントルの熱収支計算はAbe (1997) の混合距離理論、コアの熱収支計算はStevenson et al. (1983) のボックスモデルにそれぞれ従う。そして、水星の珪酸塩成分と金属成分はそれぞれE コンドライトと同様の化学組成を持つと仮定した。Smith et al. (2012) で推定されたコア半径および固体マントル密度と1標準偏差内で合致する珪酸塩マントル厚は170-340 kmであり、コア密度は6000-6981 kg m⁻³である。計算では水星の平均密度が説明できるよう、コア内の硫黄濃度を調節しながらマントル厚を仮定した。水星の珪酸塩マントルを想定したエンスタタイトの粘性率は地球上部マントルの約1000倍であり、対流による熱輸送の効率は低いと考えられる。初期条件としてマントルにはエンスタタイトのソリダス温度を与え、コアにはコア-マントル境界 (CMB) でマントルの温度と連続的になるような断熱温度分布を与える。コアの初期温度はFe-S合金の融解曲線よりも高く、コアは全溶融している。

今回計算を行ったすべてのマントル厚のモデルにおいて、対流による熱輸送は急速に弱まり、10億年程度で熱伝導主体の熱輸送に切り替わる。従来のモデルよりも珪酸塩マントルが薄い場合、熱伝導によって熱の輸送が効率的に行われる。珪酸塩マントルが270 kmよりも薄い場合、45億年の熱進化を経てCMBの温度がFe-FeS共晶系の共晶点程度まで低下する。これは、固体FeS層の形成を説明する。さらに、45億年後のCMB熱流量はコア中を熱伝導のみで輸送される熱流量を超えることが分かった。これは熱対流によって液体外核ダイナモを駆動することが可能であることを示唆する。

キーワード: 水星, 熱進化

Keywords: Mercury, thermal evolution

高レイリー数、高圧縮性、及び強い温度依存粘性を考慮したスーパー地球のマントル対流シミュレーション

Mantle convection in super-Earths with high compressibility, high Rayleigh number, and temperature-dependent viscosity

宮腰 剛広^{1*}, 立浪 千尋², 亀山 真典³, 小河 正基⁴

Takehiro Miyagoshi^{1*}, Chihiro Tachinami², Masanori Kameyama³, Masaki Ogawa⁴

¹ 海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域, ² 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻, ³ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ⁴ 東京大学大学院総合文化研究科

¹IFREE/Jamstec, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ³Geodynamics Research Center, Ehime University, ⁴Department of Earth Sciences and Astronomy, University of Tokyo

Understanding mantle convection in super-Earths is a key to clarifying their habitability, because mantle convection determines the surface environment and the magnetic field intensity through the influence on the activity of core convection. The large size of super-Earths implies that the depth of their mantle far exceeds the thermal scale height. In this paper, we present numerical simulation results of mantle convection in super-Earths with high compressibility, high Rayleigh number, strongly temperature-dependent viscosity and depth-dependent thermal expansivity.

Thermal convection of compressible infinite Prandtl number fluid is solved in a rectangular box under anelastic approximation by the ACuTEMAN (Kameyama et al. 2005). The model of the super-Earths, including depth-dependent thermal expansivity and density, is the same as Tachinami et al. (2013, submitted). The dissipation number is 5, which corresponds to terrestrial planets of ten times the Earth's mass. The Rayleigh number defined with the viscosity at the core-mantle boundary (CMB) Ra is from $6E6$ to $1E10$. A viscosity contrast r up to $1E7$ arises between the CMB and the surface owing to the temperature-dependence of viscosity. The employed grid number is 1024 (horizontal) and 256 (vertical).

Numerical results show that the efficiency of heat transport by the mantle convection in super-Earths becomes smaller than that in the Earth owing to adiabatic compression effect. For example, at $Ra=1E10$ and $r=1E3$, the Nusselt number is only about twenty, less than the expected value when the effect of adiabatic compression is neglected. This low efficiency of heat transfer strongly affects the evolution of the super-Earths. The magnetic field of super-Earths, for example, is probably weak because the core is not cooled efficiently. The weak magnetic field can be fatal for the habitability of super-Earths. We also found that in some cases it takes time longer than the age of the Universe for the calculated mantle convection to go through with the initial transient stage. This suggests that the initial transition stage, not the statistically steady stage, is more relevant to most of the time in the evolutionary history of super-Earths. The temperature and flow field show that at high Ra and at strong temperature-dependent viscosity the stratosphere develops in the middle of the mantle. Hot plumes from the CMB does not ascend to the surface of the planet. Cold plumes that grow at the base of the lithosphere are weak or are totally inhibited by the strong effect of adiabatic compression. The thermal structure of the mantle in super-Earths is totally different from that of the Earth.

キーワード: マントル対流, スーパー地球

Keywords: mantle convection, super-Earths

高強度レーザーを用いたスーパーアース内部状態の生成と観測 Laboratory generation and observation of super-Earth's interior using high-power laser

尾崎 典雅^{1*}, 木村 友亮³, 奥地 拓生⁴, マルティン フレンチ⁵, 掛下知之¹, 喜田美佳¹, 宮西 宏併¹, ロナルド レドマー⁵, 佐野 孝好⁶, 佐野智一¹, 清水克哉⁷, 寺井智之¹, 兒玉了祐¹

Norimasa Ozaki^{1*}, Tomoaki Kimura³, Takuo Okuchi⁴, Martin French⁵, Tomoyuki Kakeshita¹, Mika Kita¹, Kohei Miyanishi¹, Ronald Redmer⁵, Takayoshi Sano⁶, Tomokazu Sano¹, Katsuya Shimizu⁷, Tomoyuki Terai¹, Ryosuke Kodama¹

¹ 大阪大学 大学院工学研究科, ² 大阪大学 光科学センター, ³ 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター, ⁴ 岡山大学 地球物質科学研究センター, ⁵ ロストック大, ⁶ 大阪大学 レーザーエネルギー学研究中心, ⁷ 大阪大学 極限センター

¹Graduate School of Engineering, Osaka University, ²Photon Pioneers Center, Osaka University, ³Geodynamics Research Center, Ehime University, ⁴Institute for Study of The Earth's Interior, Okayama University, ⁵Institut für Physik, Universität Rostock, ⁶Institute of Laser Engineering, Osaka University, ⁷Center for Quantum Science and Technology under Extreme Conditions, Osaka University

スーパーアース内部に相当する状態を初めて実験室で生成した。高強度レーザーパルスを水の試料に照射し、100-200 GPaの圧力まで動的に圧縮した。得られた状態方程式実験データは、第一原理計算で予測されるスーパーアース GJ1214b の内部状態量とよく一致した。光反射率の測定も同時に行い、同領域で水がイオン性から電子性の伝導性をもつ流体に遷移することが示された。このパワーレーザーを用いた実験のアプローチは、系外巨大惑星内部構造の理解および惑星形成のシナリオの構築などに有効であると思われる。

キーワード: スーパーアース, 水, 超高压, 相転移, パワーレーザー, レーザーショック

Keywords: Super Earth, Water, High pressure, Phase transition, Power laser, Laser shock

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

佐々木 洋平^{1*}, 竹広 真一², 中島 健介³, 林 祥介⁴

Youhei SASAKI^{1*}, Shin-ichi Takehiro², Kensuke Nakajima³, Yoshi-Yuki Hayashi⁴

¹ 京大・数学, ² 京大・数理研, ³ 九大・理・地球惑星, ⁴ 惑星科学研究センター/神戸大・理・地球惑星

¹Department of Mathematics, Kyoto University, ²Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, ³Department of Earth Planetary Sciences, Kyushu University, ⁴Center for Planetary Science/Department of Earth and Planetary Science, Kobe University

回転球殻内の対流問題は、恒星・木星型惑星の深部大気や地球型惑星のマントル・中心核内で生じている大規模な対流現象の最も基本的なモデルとして研究されている。これまでの研究では主に流体としてブシネスク流体が用いられている。しかしながら、恒星や木星型惑星の深部対流運動を考える際には、対流層の厚さがスケールハイトの数倍～数十倍にもおよび、系の圧縮性を考慮する必要があるだろう。これまでも、系の圧縮性を考慮した、いわゆる非弾性系を用いた研究は幾つか行なわれている。しかしながら、それらの研究ではブシネスク系との比較が十分に行なわれておらず、回転球殻中の圧縮性流体の運動に関する理解は未だ断片的である。また、近年の天文観測技術の発達により太陽系外の惑星系が多数発見されている。現在観測されている太陽系外の惑星の多くは木星型惑星であり、回転球殻中の圧縮性流体の運動は、これら天体の深部大気の運動を考える際の基礎となる。

そこで本研究では、恒星・木星型惑星の深部対流運動を念頭においた回転球殻中の圧縮性流体の数値モデルを構築し、得られた対流構造とブシネスク系との比較を行なった。支配方程式系は基本場としてポロトロップ大気を仮定した非弾性方程式系である。モデルの構築は、我々がこれまで開発してきた階層的地球流体スペクトルモデル群 SPMODEL の一プログラムである回転球殻ブシネスク対流モデルを非弾性系に拡張することで行なった。

計算設定は、無次元パラメータとして内径外径比を 0.35、プラントル数を 1、エクマン数を 10^{-3} 、レイリー数を臨界値の 1.2 倍に固定し、密度スケールハイトの逆数 N を 10^{-5} , 1, 2, 3, 5 と変化させた。初期値として静止場に微小なエントロピー擾乱を加え、統計的平衡状態まで時間積分を行なった。 N が 10^{-5} の場合には、ブシネスク系の場合と同様に、回転軸に沿った螺旋渦柱が球殻内側境界付近に形成される。これに対して N を大きくすると、渦柱が形成される位置が球殻外側境界へ移動し、対流運動は球殻上層付近でのみ発生するようになる。

キーワード: 回転球殻対流, 圧縮性対流, 非弾性方程式系

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

Ancient Cratered Southern Highland Province, Mars: Ancient Cratered Southern Highland Province, Mars:

Dohm James^{1*}, 丸山 茂徳¹, 宮本 英昭²
James Dohm^{1*}, Shigenori Maruyama¹, Hideaki Miyamoto²

¹ 東京工業大学 地球生命研究所, ² 東京大学総合研究博物館

¹Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, ²The University Museum, The University of Tokyo

The geologic provinces of Mars, as identified through a synthesis of geologic, paleohydrologic, topographic, geophysical, spectral, and elemental information [1], are windows into its evolution, with the ancient southern highland province being a key to the extremely ancient geological and possible biological pasts. The ancient cratered southern highland province includes Noachian (>3.7Ga) geologic terrains that are marked by magnetic anomalies [1]. The terrains include: (1) Noachian mountain ranges, Thaumasia highlands and Coprates rise, both of which exhibit complex structures such as thrust and normal faults and rift systems, as well as cuestas and hogbacks along their margins, (2) basin and range topography, including salt-containing, structurally-controlled basins, as exemplified at Terra Sirenum, (3) faults that are tens to thousands of kilo-meters long, and (4) degraded promontories, many of which are interpreted as silica-rich volcanoes or in some cases, impact crater massifs.

These terrains can be aptly explained through dynamic endogenic activity, including some form of primitive plate tectonism and/or mobile crust, as well as planetary shrinkage due to cooling, rather than impact events. The ancient cratered southern highland province could comprise extremely ancient (>3.9 Ga) geologic and habitable environmental information, including granite and primordial continental crustal materials. Such materials are considered to be critical to the emergence to life on Earth [2].

References

- [1] Dohm, J.M. et al., (2013?in press), Mars evolution. Nova Science Publishers, Inc.
- [2] Shigenori Maruyama, this conference.

木星大気における対流圏界面高度の決定と雲頂の形成メカニズム Control mechanisms of the tropopause level and cloud top in Jovian atmosphere.

高橋 康人^{1*}, はしもと じょーじ², 大西 将徳³, 倉本 圭¹

Yasuto TAKAHASHI^{1*}, George HASHIMOTO², Masanori Onishi³, Kiyoshi Kuramoto¹

¹北海道大学, ²岡山大学, ³神戸大学

¹Hokkaido Univ, ²Okayama Univ, ³Kobe Univ

対流圏界面は下層の対流領域と上層の安定成層領域の境界として定義される。しかし一般には、時間平均的な鉛直気温プロファイルにおいて、地表に最も近い温度極小の高度を指して対流圏界面と呼ぶことが多い。この定義は対流領域と安定成層領域で鉛直温度勾配の符号が逆転することを利用した一種の近似である。対流圏界面高度付近での温度減率の変化が急激な地球大気においては、この近似は本来の定義で決まる高度との差が小さく有効であるが、他の惑星の大気においても同様の近似が成り立つかは明らかではない。

木星大気については、ガリレオやヴォイジャーの観測から温度極小点が0.1bar付近にあることがわかっている。木星大気を対象とした主要な平衡雲凝結モデル (Weidenschilling and Lewies 1973) や雲対流モデル (Sugiyama et al. 2011) では、この高度より下層で対流が生じていると仮定している。しかしこの仮定については、先に述べたとおり注意深く考察する必要がある。実際、木星大気の放射対流平衡モデル (Appleby and Hogan 1984) では、たしかに温度の極小は0.1 bar 付近に存在するが、放射卓越層と対流卓越層の境界はより深い0.5-0.75 bar に位置する。このことは「対流によって形成されたNH₃雲が雲頂を成している」という従来の描像が、実際には成り立っていないことを示唆する。なぜならこのような深い領域においては、NH₃がほとんど凝結しない可能性があるためである。

我々は木星大気において対流圏界面がどのように決まるのか、最新の気体吸収モデルと大気組成に関するデータを取り込んだ独自開発の放射対流平衡数値モデルを用いて調べてきた。このモデルでは平行平板大気を仮定し、下部境界 (10 bar) 温度をガリレオプローブの観測結果に基づいて与え、0-10,000 cm⁻¹の長波放射による熱輸送を解く。凝結性分子 (H₂O, CH₄, NH₃) の線吸収については HITRAN2008 データベース (Ruthman et al. 2009) を用い、また H₂-H₂ および H₂-He 衝突による連続吸収については Borysov (1989, 2002) を用いて吸収係数を与える。放射計算によって各大気層の放射加熱率あるいは冷却率を求めて気温の時間変化を計算し、対流不安定層に対しては対流調節を適用する。温度変化が十分に小さくなるまで逐次計算を行うことで、放射対流平衡状態を求める。

予備的な数値実験の結果から、本来の定義に基づく対流圏界面の高度が、凝結性分子の混合比に関係なく0.5bar付近に現れることが確認できた。ただし、本計算では太陽放射を無視しているため、ほとんどの場合で高度とともに温度が単調減少している。太陽放射を導入すると、成層圏温度が上昇するため対流圏界面はより深くなると予想される。また、得られた温度プロファイルをNH₃の凝縮曲線と比較すると、NH₃の濃度が観測的に推定された値かそれ以下 (1 barでの混合比を全層に与える) の場合には、対流圏においてはほとんどNH₃凝結が起こらないことも分かった。一方でNH₃が凝結可能な気層は、対流圏界面より上部に現れる。このことから、木星大気の雲頂は対流雲ではなく、おもに成層圏雲や圏界面を貫く上昇流に伴う対流雲から構成されることが示唆される。雲頂は惑星アルベドを決めるのに重要な役割を果たしているため、木星大気における放射エネルギー収支を理解するためには成層圏における雲形成のモデル化が不可欠かもしれない。

キーワード: 木星, 大気, 雲, 対流圏界面, 放射輸送

Keywords: Jupiter, Atmosphere, Cloud, Tropopause, Radiative transfer

小天体衝突が惑星大気組成に与える影響：SL9 彗星衝突時に木星大気に放出された揮発性分子の時間変動観測から Follow-up Observation of Jupiter's Atmosphere 19 Years after the SL9 Event

飯野 孝浩^{1*}, 中島 拓¹, 長濱 智生¹, 水野 亮¹

Takahiro IINO^{1*}, Tac Nakajima¹, Tomoo NAGAHAMA¹, Akira Mizuno¹

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所

¹ Solar-terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Cometary Impact as the Supply Source of Volatile Gases on Planetary Atmosphere

In 1994, the impact of comet Shoemaker-Levy 9 (hereafter SL9) had changed the Jupiter's atmospheric composition. The abundance of CO and HCN had increased vigorously to realize 10^3 to 10^4 times larger value than before the SL9 event. Besides, some S-bearing molecules were found and produced newly (Moreno et al. 2003). Similarly, on Neptune, it is expected that similar impact process has realized 50 ? 1000 times as large CO abundance as the other three gas giants (Lellouch et al. 2005) (A. Marten et al. 2005). Studies on such huge disturbance induced by cometary impact is very important because such process can affect the atmospheric composition of gas giant largely. Revealing the chemical evolution of the solar system planet's atmosphere is main issues in planetary science. Detailed studies on the entire chemical processes from cometary impact to the end of reaction are needed.

Our observation in 2012

Studies on the SL9 event and its aftermath are very important especially because it is the only case where the cometary impact can be monitored in detail. Even now, little is known about how long the influence of the SL9 continues to affect on Jupiter's atmosphere. Constructing and examining the chemical evolution are the key for full understanding of cometary impact as part of atmospheric evolution processes.

We have focused on the sulfur chemistry because CS and S-bearing species were known to be produced after the SL9 event. Studies on the chemical evolution of S-bearing species suggest that CS is a daughter species of S₂ and CS₂, and had been continuously produced for a year after the SL9 event (Moses et al. 1995). This scenario is supported by stable abundance variations measured from 1995 to 1998 (Moreno et al. 2003). However, since no observation was reported since 2003, we have planned a new observation of impact remnant gases to obtain their abundance and derive their decay time in 2012. We observed CS(J=2-1), CO(J=1-0) and HCN(J=1-0) rotational lines in millimeter waveband using Nobeyama 45-m telescope of NAOJ. Our observation found that CS abundance has decreased significantly, placing its upper limit as one tenth of the abundance measured in 1995. The finding may allude to a hypothetical scenario that the CS destruction process has already begun and its destruction mechanism may be due to photochemical evolution.

CS Destruction Processes and Our New Observation Plans

It is suggested that only a few processes can remove CS permanently (Moses et al., 1996). Furthermore, photo-dissociation process is important as well because the lifetime of CS against photolysis is very short at 1AU (Canaves et al., 2001) and as to be taken into account. We have tested the recycling process of photolysis with simple one-box model. The modeled time variation of the CS abundance, assuming the lifetime of CS only, as against photolysis has shown clear discrepancy with the observed result. Thus, dissociated S atom is suggested to be recycled.

We are planning new observation to obtain CS abundance with more sensitive observation in sub-millimeter waveband. Next, survey observation of S-bearing species which are candidates of daughter species of CS. In this presentation, detail of our observation and a model of chemical processes will be presented.

Moreno, R, A. Marten, H.E Matthews, and Y Biraud. 2003. *Planetary and Space Science*, 51, 591-611

Lellouch, E, R Moreno, and G Paubert. 2005. *A&A*, 40, 37-40.

Marten, A, H E Matthews, T Owen, R Moreno, T Hidayat, and Y Biraud. 2005. 1097-1105.

Moses, J. I. 1996. *The Collision of Comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter: IAU Colloquium 156*, 243 - 268

Moses, J. I, A, Allen. 1995. *GRL*, 22, 1597-1600

Canaves, M. V., A. A. de Almeida, D.C. Boice, G. C. Sanzovo. 2007. *Adv. In Space Res.* 39, 451-457

キーワード: 木星, 彗星, 電波天文学

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS21-08

会場:304

時間:5月20日 11:15-11:30

Keywords: Jupiter, comet, radio astronomy

極限状態における橄欖石の Hugoniot 曲線: 原始地球表層環境への O₂ の供給 Hugoniot curve for forsterite under extreme conditions: O₂ supply into the surface environment on the early Earth

黒澤 耕介^{1*}, 門野 敏彦², 弘中陽一郎³, 重森 啓介³, 桑原 秀治⁴, 境家 達弘⁵, 佐野 孝好³, 大野 宗祐⁶, 関根 利守⁷, 尾崎 典雅⁸, 兒玉了祐⁸, 橋 省吾⁹, 松井 孝典⁶, 杉田 精司⁴

Kosuke Kurosawa^{1*}, Toshihiko Kadono², Yoichiro Hironaka³, Keisuke Shigemori³, Hideharu Kuwahara⁴, Tatsuhiro Sakaiya⁵, Takayoshi Sano³, Sohsuke Ohno⁶, Toshimori Sekine⁷, Norimasa Ozaki⁸, Ryosuke Kodama⁸, Shogo Tachibana⁹, Takafumi Matsui⁶, Seiji Sugita⁴

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 産業医科大学 医学部, ³ 大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター, ⁴ 東京大学 大学院神領域創成科学研究科, ⁵ 大阪大学 理学研究科, ⁶ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ⁷ 広島大学 大学院理学研究科, ⁸ 大阪大学 工学研究科, ⁹ 北海道大学 大学院理学研究院

¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, ³Institute of Laser Engineering, Osaka University, ⁴Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo, ⁵Department of Earth and Space Science, Osaka University, ⁶Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ⁷Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ⁸Division of Electrical, Electronic and Information Engineering, Osaka University, ⁹Earth and Planetary System Science Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

アポロ探査以来の月試料分析, 詳細なりモセンデータによるクレータ年代解析, 最新の惑星形成理論によれば, 後期隕石重爆撃期の開始は4.1億年ほど前であり, 力学的に励起された天体群の平均衝突速度は ~ 30 km/sにも及ぶとされている。このような超高速衝突の際に何が起るか, 発生する蒸気の量さえ明らかになっていない。これは技術的困難によって実証的研究が進まず, 200 GPaを超える衝撃圧力に適用可能な Hugoniot 曲線が確立されておらず, 相図上での断熱解放線がわからないことが主原因である。近年の多くの数値的研究で用いられている M-ANEOS と呼ばれる状態方程式は, 衝撃圧縮時のエントロピー増加量を過小評価することが知られており, 得られた結果に対しては, その不定性を考慮した評価が必要である。我々は阪大レーザー研に設置された高強度レーザー「激光 XII 号 HIPER」を用いて, 主要な珪酸塩鉱物である橄欖石を 1200 GPa まで圧縮し, 衝撃圧力と温度を同時計測した。温度と圧力を同時に計測することができれば, 熱力学関係式を用いてエントロピー増加量を算出することができる。得られた圧力-エントロピー平面上の Hugoniot 曲線を M-ANEOS の予測値と比較したところ, M-ANEOS はエントロピー増加量を大幅に過小評価していることがわかった。衝撃圧縮状態からの解放過程が断熱であり, 熱力学平衡を保ち続けると仮定すると, 発生する蒸気量はレバールを用いて算出することができる。その結果, 発生する珪酸塩蒸気量は M-ANEOS の予測値の 1.5-2 倍になることがわかった。大量の珪酸塩蒸気は衝突蒸気雲の酸化還元状態を大幅に変化させ得る。炭素質隕石を仮定し, ~ 30 km/s の衝突時の等エントロピー線に沿った熱化学平衡計算の結果, 原始地球表層には存在しないと考えられてきた分子状酸素が放出されることがわかった。後期隕石重爆撃で想定される超高速衝突は原始地球表層に大量の酸素を供給していたのかもしれない。酸素は強力な酸化剤として振る舞い, 大きな自由エネルギーを供給するため, 原始地球表層の化学進化を考える上で重要であったかもしれない。

キーワード: 天体衝突, 橄欖石, 後期隕石重爆撃, レーザー衝撃圧縮, Hugoniot 曲線, 原始地球表層環境

Keywords: Meteoritic impacts, Forsterite, Late heavy bombardment, Laser shock compression, Hugoniot curve, Surface environment on the early Earth

天体スケールにおける衝突破壊モデルの再検討 Revised fragmentation model of planet-sized collisions

藤田 智明^{1*}, 玄田 英典¹, 小林 浩², 田中 秀和³, 阿部 豊¹

Tomoaki Fujita^{1*}, Hidenori Genda¹, Hiroshi Kobayashi², Hidekazu Tanaka³, Yutaka Abe¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 名古屋大学理学系研究科, ³ 北海道大学低温科学研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Department of Physics, Nagoya University, ³Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

惑星形成過程において、微惑星同士または微惑星と原始惑星の衝突はかなり頻繁に起こる。そして、その様な衝突を繰り返しながら天体は成長し現在の惑星系を形成するとされているが、最近の研究(例えば、Kobayashi and Tanaka 2009)によると、天体衝突によってばら撒かれる小破片の量やサイズ等により、形成される惑星のサイズの上限が変わることが示唆されている。すなわち、衝突によって天体がどの程度破壊もしくは削られるのかを詳細に調べることは、より正確な惑星形成論を構築する上で重要な課題となっている。これまでに、衝突前の質量の半分が飛び散ってしまう様な破壊的な衝突を引き起こす衝突エネルギー値 Q_D^* は、様々な条件で調べられており(例えば、Benz and Asphaug 1999)、惑星形成を論じる際にはそのエネルギー値以上の衝突のみが重要視されてきた。しかし、解像度の悪さや解析手法の不明確さから、 Q_D^* の値の正確さには疑問が残る。また実際に惑星形成を考える上では、破壊ほどエネルギーが大きくないような小規模な衝突も重要な影響を及ぼすことがわかっている(Kobayashi and Tanaka 2009)。先行研究では、破片総質量が衝突エネルギーに対して線形に変化することを仮定しているのだが、そのようなエネルギー範囲での衝突については、実際には詳しく調べられていない。

そこで本研究では、物質強度が無視できるような天体スケールにおける様々な衝突エネルギーでの衝突シミュレーションを SPH 法を用いて行い、 Q_D^* の値の再確認、並びに衝突エネルギーに対する破片総質量の系統的調査を行った。具体的には、直径 100km, 10km サイズの天体に対して様々な質量の天体を様々な衝突速度で衝突させ、それぞれ飛び散る破片の総質量を求めた。この際、結果の解像度依存性を調べた上で、十分と認められる解像度をもって検証した。また、先行研究では不明確であった破片総質量の解析に関しては、客観的評価が可能となる独自の解析手法を確立し、それを用いて解析を行った。

まず Q_D^* の値を再評価した結果だが、先行研究(Benz and Asphaug 1999)の結果よりも 1 桁近く小さくなることがわかった。センスとしては、衝突破壊の際天体はこれまで考えられてきたよりも破壊されやすい結果となった、と言える。

また、衝突エネルギー値が Q_D^* より小さい様な小規模衝突領域では、破片総質量は衝突エネルギーに対して線形とはならず、水平面に対する衝突から考えられる予想に反する結果となった。これは、ターゲット天体の曲率が影響しているためと結論付けることができた。一方、衝突エネルギーが十分小さい様な領域では、曲率の効果は小さく、水平面衝突で近似できることが考えられる。従って小規模衝突の破壊モデルは、水平面衝突と曲率の効果で評価できることがわかった。

また、既存の SPH コードに改良を加え、直径 1km サイズ以下の衝突のような、物質強度が支配するスケールの衝突についても同様に評価できることが可能となったため、その結果についても発表をする予定である。

キーワード: 惑星形成, 衝突破壊, 微惑星

Keywords: planet formation, fragmentation, planetesimals

衝撃変成石英分析に基づくチクシュループ・クレーター内部におけるイジェクタ堆積過程の制約

Analysis of shocked quartz grains inside the Chicxulub crater and constraints on ejecta deposition processes.

常 ヨイ^{1*}, 後藤 和久², 関根 康人³, 田近 英一³
Yu Chang^{1*}, Kazuhisa Goto², Yasuhito Sekine³, Eiichi Tajika³

¹ 東大理 地球惑星科学, ² 東北大学 IRIDeS, ³ 東大 新領域 複雑理工

¹Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo, ²Tohoku Univ. IRIDeS, ³Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

Impact cratering is a ubiquitous process which occurs on terrestrial planets and small bodies in the solar system. Geological and geochemical studies of impact craters on Earth provide essential and unique information, such as a three-dimensional structure and lithological characteristics of craters, for understanding impact cratering process. The Chicxulub crater, located in the Yucatan Peninsula in Mexico, is 180-200 km in diameter, which is one of the largest impact structures found on Earth. This impact event is considered to have caused a mass extinction at the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) boundary at 66 Ma. Thus, knowledge on the cratering process associated with the Chicxulub impact event will be important both for understanding the cratering process of a large-scale impact and its environmental consequences. However, the detailed formation processes of the Chicxulub crater have been still unknown.

In this study, we analyzed both the size distribution of and planar deformation features (PDFs) on shocked quartz grains contained in the Yaxcopoil-1 (YAX-1) drilling core samples derived from the Chicxulub crater. PDFs are planar micro structures generated under high-pressure conditions (~10-35 GPa). The crystallographic orientation of PDFs is known to preserve information of shock pressure achieved by impacts. We found 525 shocked quartz grains from top to bottom of impactite sequences in the YAX-1 core. In the present study, 574 sets of PDFs were measured from fifteen vertical levels in the impactite sequences.

We found that shocked quartz grains in the impact melt layer (Unit 5) of the YAX-1 core were predominantly undergone high shock pressures (>25 GPa). Whereas, shocked quartz found in other impactite sequences (i.e., Units 6 and 4-1, in ascending stratigraphic order) are mixtures of quartz grains experienced various shock pressures. These results suggest that Unit 5 is likely to have been formed by an outward flow of impact melt-sheet from the transient crater cavity during the central uplift and collapse of the transient crater. In Unit 1, i.e., the uppermost impactite units, we found an opposite correlation between shocked quartz grains undergone high peak shock pressures (>25 GPa) and those undergone medium degree of shock pressures (12-25 GPa) associated with upward grain fining in the sequences. These results strongly support the idea that Unit 1 was repeated impact-induced tsunami deposits. Given both our results of impact melt-sheet origin of Unit 5 and the results of hydrodynamic simulation of the Chicxulub crater, Unit 6, underlying Unit 5, could be interpreted as ejecta curtain deposits. Our results of ejecta curtain deposits of Unit 6 provide the geological evidence that the position of YAX-1 core is located outside the transient crater cavity, which support the hydrodynamic simulations and seismic data of the Chicxulub crater.

キーワード: 衝突現象, クレーター, 衝撃変成石英, チクシュループ・クレーター, 平面変形構造 (PDFs)

Keywords: impact cratering, Chicxulub crater, shocked quartz, Planar deformation features (PDFs)

雪・氷の二層構造標的上へのクレーター形成実験 Impact crater formation on the snow-ice layered structure

荒川 政彦^{1*}, 齊田美香¹, 保井 みなみ²

Masahiko Arakawa^{1*}, Mika Saita¹, Minami Yasui²

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

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

背景と目的: 太陽系内のほとんどの固体天体表面には、小天体の高速度衝突による衝突クレーターが普遍的に観察される。そこでこれまでクレーターの形成条件を定量的に理解するためのクレータースケール則の研究が、様々な標的物質に対するクレーター形成実験によって行われている。外惑星領域に広く存在する氷天体は、密度・大きさについて非常に多様性に富んでいるおり、中・大氷衛星は、雪レゴリスが基盤氷を覆う表層構造をとっている。こういった天体にも衝突クレーターは存在し、その形状や形成条件は表面雪層の影響を考慮する必要がある。これまでの研究では、岩石・氷等の均質標的や、岩石天体表層のレゴリス層を模した標的に対する衝突実験は行われているが、氷天体のレゴリス層-基盤氷を模した標的に対する実験は行われていない。本研究では、氷天体表層を模した標的に対するクレーター形成実験を行い、レゴリス層の厚さがクレーター形成に与える影響を明らかにすることを目的とする。また、レゴリス層-基盤氷の衝突において基盤氷に形成されるクレーターサイズを見積もるには、レゴリス層の粒子速度を知る必要がある。そこでレゴリス層を模した雪板を用いた衝突実験を行う。これらの実験結果を用いて、既存のスケール則を改良し、氷天体の層構造表面に適用可能なクレータースケール則を構築する。

実験方法: クレーター形成実験には北海道大学低温科学研究所の低温室に設置したガス銃を用いた。実験温度は約-10℃で、衝突速度 (v_i) は 300,450m/s の 2 種類で行った。用いた弾丸は、氷弾丸とポリカーボネート弾丸の 2 種類で共に円柱形であり、その質量はそれぞれ 1.60, 1.68g である。また、密度 (ρ) はそれぞれ 0.92g/cm³ と 1 g/cm³ である。氷標的はブロック状の直方体多結晶氷で、その質量は約 8kg である。氷ブロック状に載せる雪は、氷を細かく砕き、ふるいを用いて 710 μ m 以下の氷粒子を用いた。その厚さは 5-30mm の間で変化させ、載せる際には紙で作成した枠を置き、ふるいで満たした後、すり切った雪層とした。実験後、クレーターの直径、深さ、体積を計測した。雪板の衝突実験にも前述のガス銃を用いた。弾丸は円柱形の氷弾丸とポリカ弾丸を用いて、質量はそれぞれ 1.60, 1.68g である。衝突速度は 300,450m/s の 2 種類で行った。打ち抜く雪板は、はがき大の大きさで、厚さは 10-40mm の間で変化させた。空隙率は、約 50% であった。高速度ビデオカメラ画像の解析から、板の反対点の粒子速度を求めた。両方の実験とも、高速度ビデオカメラを用いて記録した。フレームレートは 2 万-5 千コマ/s、シャッタースピードは 1/5 万-1/10 万 s である。

結果と考察: 雪板の衝突実験では、氷・ポリカ弾丸ともに雪の厚みが増加するにつれて粒子速度が減少することがわかった。またポリカ弾丸に比べて、氷弾丸の方がより減少度合いが大きかった。氷弾丸は衝突後に弾丸が破壊されずに残っているかは確認できなかったが、ポリカ弾丸は少々の変形はあっても破壊されていなかった。粒子速度 (v_e) と雪板の厚み (t) の関係は以下のように求めることができた、 $v_e/v_i = a(t/d)^{-b}$, ここで d は弾丸の厚みで 10mm である。

クレーター形成実験では、まず、同じ速度・同じ雪の厚みで比べた場合、氷弾丸よりもポリカ弾丸の方がクレーターが大きかった。雪の厚みが増加するにつれて、直径や深さ、体積は減少するが、氷弾丸の方がより絶対値は小さく、減少度合いも大きいことがわかった。Dohi et al.(2012) でクレータースケール則を二層構造標的に拡張するために提案された ($*Y = Y/\rho v_e^2$, Y は強度) を、今回の実験にも適用した。ただし、氷弾丸の場合、弾丸は雪層の衝突時に破壊しているため、実際に基盤氷に衝突するのは雪層であると考えて $*Y$ の弾丸の密度を雪の密度 (0.45g/cm³) とした。その結果を整理するとすべての実験結果は次の経験則で現れることが分かった、 $v_e = 2.05 \times 10^{-9} *Y^{-2.6}$ 。

Dohi, K., Arakawa, M., Okamoto, C., Hasegawa, S. and Yasui, M. (2012) The effect of a thin weak layer covering a basalt block on the impact cratering process, *Icarus*, 218, 751-759.

キーワード: レゴリス, 氷天体, クレーター, 層構造, スケール則, 衝撃波

Keywords: regolith, icy bodies, crater, layered structure, scaling law, shock wave

PERC 超小型衛星プロジェクト：流星観測キューブサット S-CUBE (S3) PERC CubeSat project: Meteor-observing satellite S-CUBE (S3)

石丸 亮^{1*}, 坂本祐二², 小林正規¹, 竝木則行¹, 千秋博紀¹, 和田浩二¹, 大野宗祐¹, 石橋高¹, 山田学¹, 荒井朋子¹, 松井孝典¹, 細川繁¹, 田邊勇太², 八木澤仁史², 阿部新助³, 黒澤耕介⁴, 中須賀真一⁵, 吉田和哉², 秋山演亮⁶, 佐藤光輝⁷, 高橋幸弘⁷
Ryo Ishimaru^{1*}, SAKAMOTO, Yuji², KOBAYASHI, Masanori¹, NAMIKI, Noriyuki¹, SENSHU, Hiroki¹, WADA, Koji¹, OHNO, Sohsuke¹, ISHIBASHI, Ko¹, YAMADA, Manabu¹, ARAI, Tomoko¹, MATSUI, Takafumi¹, HOSOKAWA, Shigeru¹, TANABE, Yuta², YAGISAWA, Hitoshi², ABE, Shinsuke³, KUROSAWA, Kosuke⁴, NAKASUKA, Shinichi⁵, YOSHIDA, Kazuya², AKIYAMA, Hiroaki⁶, SATO, Mitsuteru⁷, TAKAHASHI, Yukihiko⁷

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 東北大学, ³ 国立中央大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構, ⁵ 東京大学, ⁶ 和歌山大学, ⁷ 北海道大学

¹Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ²Tohoku University, ³Institute of Astronomy, National Central University, ⁴JAXA, ⁵The University of Tokyo, ⁶Wakayama University, ⁷Hokkaido University

Introduction: A CubeSat is a type of miniaturized satellite for space research. The standard 10*10*10 cm cubic satellite is often called a 1U CubeSat meaning one unit, and has a mass of 1 kilogram. CubeSat has been a familiar tool for engineers to test new technologies in space and often used for Earth remote-sensing, too. On the other hand, use of CubeSat for astronomical and planetary sciences has been rare because of severe constraints on payload. We propose in this work to use a CubeSat for the first time in planetary sciences, specifically to observe meteors entering into Earth's atmosphere. A development of a science-oriented CubeSat brings about many difficulties, but our challenge can possibly open a new field of observational research in astronomy and planetary sciences. An advantage to use a CubeSat in comparison with previous missions led by national space agency is that a CubeSat project can be carried out within a limit of cost, technology, and organization available in academy. This allows a development of a satellite in a few years.

Our new project is called "Shooting star Sensing Satellite (S3: S-CUBE) Project." The S-CUBE Project was a project started by a partnership between Planetary Exploration Research Center of Chiba Institute of Technology (PERC/Chitech) and Tohoku University to develop a 3U CubeSat (30*10*10 cm; 4 kg) based on the design of RAIKO that was developed and launched by Tohoku University in October, 2012. The S-CUBE is equipped with optical sensors, such as a camera and photomultipliers, to observe luminous emission of meteors from a low-Earth orbit. The launch date is planned in the 2014. For command uplink and data downlink, an UHF antenna and an S-band antenna at Chitech are used.

Scientific Objectives: Meteors are luminous phenomena induced by hypervelocity entry of meteoroids into the Earth's atmosphere. Because most meteoroids are thought to be originated from comets and asteroids, the meteor give us valuable opportunities of an indirect exploration of the primordial objects in the solar system.

Although meteors have been observed mainly from the ground so far, the ground-based observations have weak points: narrow observational range and weather dependent. In contrast to the ground-based observations, a space-based observation by an earth-orbiting satellite enables a continuous global observation of meteors. Further, a space-based observation can detect ultra-violet emission from meteors because it is not hindered by ozone layer.

The S-CUBE is designed to be equipped with one camera and 2 (or possibly 4) photo multiplier. The camera points nadir direction to take images of meteors during flight over the night side of the Earth. We can estimate the meteoroid size from brightness of meteors. The photo-multipliers are attached with UV band-pass filters so as to extract UV light of meteors from lights from the Earth. Detection of UV light of meteors is used as a trigger of the camera. It is also suggested that UV light of meteors includes emissions of some light elements, such as sulfur, which have not been observed by previous ground-based observations.

キーワード: 流星, キューブサット, 光学観測, 紫外光観測

Keywords: Meteor, CubeSat, Optical observation, UV observation

3次元FDTD法によるRosetta/CONSERTレーダトモグラフィ観測シミュレーション 3D FDTD simulation of Rosetta/CONSERT radar tomography observation

小林 敬生^{1*}

Takao Kobayashi^{1*}

¹ 韓国地質資源研究院

¹ Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Rosetta is a comet exploration project of ESA which aims to approach Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in 2014. It carries various onboard missions, one of which is a radar tomography mission called Comet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission (CONSERT). CONSERT consists of two radar systems on the Rosetta platform and on the Philae lander, and is to perform bi-static radar sounding observations by using CONSERT transmits radar pulses of which the center frequency is 90 MHz.

We built a 3D simulation code based on Finite Difference Time Domain (FD-TD) algorithm. It simulates CONSERT observation in which the Philae lander transmits radar pulses and the Rosetta platform received them. The Philae radar transmitter is approximated by a point current source whose pulse shape is a differentiated Gaussian. Received echo at the Rosetta platform was approximated by the electric field at the receiving point, which was calculated by based on Near-to-Far-Field conversion algorithm. The comet nucleus model is represented by spatial distribution of dielectric constant in the simulation space.

The simulation results are utilized in developing the tomography imaging algorithm.

キーワード: Rosetta, CONSERT, レーダ, トモグラフィ, FDTD, シミュレーション

Keywords: Rosetta, CONSERT, radar, tomography, FDTD, simulation

月惑星熱流量の精密観測手法に関する検討と測定プローブの基礎開発 Investigation for the precise measurement method of lunar and planetary heat flow and development of heat flow probe

堀川 大和^{1*}, 田中 智², 坂谷 尚哉³, 滝田 隼¹, 小川 和律²

Yamato Horikawa^{1*}, Satoshi Tanaka², Naoya Sakatani³, Jun Takita¹, Kazunori Ogawa²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 総合研究大学院大学

¹The University of Tokyo, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³The Graduate University for Advanced Studies

月惑星における地殻熱流量を精密に観測することは、天体内部の温度分布や熱進化、材料物質に制約を与える上で重要である。地球以外の天体で直接、熱流量観測が実施されたのは月におけるアポロ15号、17号着陸地点の2地点のみである。将来の月惑星探査における地球物理学的観測を一度のミッションで複数地点で行うために、宇宙科学研究所においてペネトレータが開発された。これには熱流量観測システムが搭載されているが耐衝撃性を重視した設計の結果、熱流量計が構体表面上、もしくは内部に搭載されているため、レゴリスと貫入プローブの熱伝導率の違いによるプローブ周りのレゴリス温度場の変化に影響されやすく、熱流量を10%以下の高精度で決定するのは困難である。

そこで本研究では、熱流量計を入れた細いプローブを貫入プローブの側面から伸展させることで、貫入による熱擾乱の影響が少ない位置で熱流量値を目標とする10%より高い精度で計測できる装置を検討した。本発表では、熱伝導率と温度勾配の測定原理や、ペネトレータ熱数学モデルに基づいた数値シミュレーションから、熱流量プローブの熱流量決定精度を推定した。さらに熱流量プローブを試作し、その性能試験に基づいて熱伝導率測定精度を求め、両者の比較検討を行った結果を報告する。

数値シミュレーションではペネトレータの熱数学モデル、周囲のレゴリスの熱物性を適切に設定し、熱流量プローブを温度勾配精度が最も高いプローブの先端部分と、熱伝導率精度が最も高いプローブの中心部分に配置するモデルを構築した。プローブを設置して十分時間が経過した定常状態における熱流量精度は、月レゴリスで約2.4%、火星レゴリスで約1.9%を得た。構体からの適切な距離を設定することは伸展プローブ材料の種類・長さ・直径を制約する。

熱伝導率測定精度を評価するために、ステンレス管にヒーターと温度センサーを挿入したセンサー（ニードルプローブ）を試作した。通常ではプローブの中心（中央）位置を測定するが、温度勾配測定はペネトレータ構体からできるだけ離して配置したいことを考慮して端点を含む複数の測温点を持つ熱流量プローブを製作した。また、センサーの全長は搭載性の観点から10cmとした。また、比較の為に線加熱法によるプローブを複数点実施した。大気圧と真空下でのガラスビーズの熱伝導率測定実験を行った結果、大気圧ではプローブの測温点を中心～中心から3cmの位置に配置すれば、目標とする熱伝導率測定精度（5%程度）を達成できることが分かった。プローブの中心に測温点を配置したとき、熱伝導率測定精度は最高値となる1.8%と求められた。一方、真空下では、熱流量プローブでの熱伝導率測定値と、比較測定のための線加熱法で測定した熱伝導率（0.0022W/m/K）とを比較すると、測温点の位置がプローブ中心から1-3cmの範囲で約35-84%の相対誤差が生じた。したがって月などの真空環境における熱伝導率測定精度は、熱伝導率の測定原理から求めた理論値と異なる傾向を示し、またリファレンスとした測定結果からも大きく異なる結果となった。

この差異が生じた原因を調べるために、測定物質（ガラスビーズ）を除去した状態、つまり空気中での温度上昇プロファイルを測定し、真空下において生じた相対誤差がプローブ由来の要因かガラスビーズ由来の要因かを調べた。その結果、期待したよりも温度上昇プロファイルはばらつくことが明らかになり、センサーの製造のばらつきの原因が示唆された。今後、真空下における熱流量プローブの測定精度を決めるために、この誤差要因を定量的に考察する必要がある。

キーワード: 熱流量, 月, 惑星, レゴリス

Keywords: heat flow, moon, planet, regolith

真空下における粉体物質の熱伝導率の圧縮応力依存性

Effect of compressional stress on thermal conductivity of powdered materials under vacuum

坂谷 尚哉^{1*}, 小川 和律¹, 飯島 祐一¹, 津田 彰子¹, 本田 理恵², 田中 智¹Naoya Sakatani^{1*}, Kazunori Ogawa¹, Yu-ichi Iijima¹, Shoko Tsuda¹, Rie Honda², Satoshi Tanaka¹¹ 宇宙科学研究所, ² 高知大学¹Institute of Space and Astronautical Science, ²Kochi University

月や小惑星の表層は粉体で覆われている。また、太陽系形成初期の微惑星は粉体で構成されていると考えられる。このような天体の熱的な状態や熱進化を探る上で、粉体物質の熱伝導率は欠かすことの出来ない情報の一つである。特に真空環境では、粉体は 0.001 W/mK のオーダーの低熱伝導率を持つことが知られているため、粉体であることの上記問題に対する影響度は大きい。例えば、月の地殻熱流量観測を行うためには、表層レゴリスに熱流量プローブを挿入する必要があるが、挿入時のレゴリスの圧密(密度と応力場の変化)による熱伝導率の変化は避けられない問題である(Grot et al. 2010)。本来の熱伝導率と測定された熱伝導率の違いは、直接、熱流量の推定誤差に影響するため、正確な熱流量計測のためには圧密度の予測とそれによる熱伝導率の補正が重要である。また、微惑星の熱進化を計算する上での粉体の熱伝導率を考えることの重要性は小川(2013)によって示されている。彼女の結果によれば、粉体の断熱性のために 10 km 程度の小さな微惑星であっても、その中心部は熔融、分化を経験する温度に達する可能性がある。

粉体の熱伝導率の予測を難しくしている要因の一つが、真空下での熱伝導率が粒径や密度、応力などの多くのパラメータに依存しており、これらのパラメータを取り入れたモデル化が行われていないことである。我々はこれまでに熱伝導率に影響を与えるパラメータについて、それらの依存性を調査してきた。本発表では、応力依存性を調査した結果について報告する。この応力依存性は、これまでの先行研究では実験的に調査されておらず、熱流量観測値の補正や、微惑星サイズ(重力)による熱伝導率の違い、またはその深さ方向の分布を考える上で、本質的なパラメータであると思われる。

熱伝導率の応力依存性を測定するにあたり、新規の装置の設計・製作を行った。我々が目指す応力範囲は比較的低下の数十 kPa である。これを達成するために、6 つのおもりをサンプルに順々に載せていき、サンプルにかかる荷重をコントロールする手法を採用した。それぞれのおもりは糸を通して 2 cm 間隔で吊るされており、超音波モーターにより上下運動が可能である。おもりの合計質量は 7.5 kg、最大応力は 18 kPa 程度である。このような加圧システムの下に低容量のダイヤフラム式応力センサを取り付けたサンプル容器を置くことにより、比較的低下でサンプル中の応力をコントロールすることを可能にした。なお、サンプル容器には線加熱法による熱伝導率測定システムも取り付けられている。サンプルは粒径約 0.1 mm の球形ガラスビーズを用いた。これは加圧による粒子の配置構造の変化を最小にし、応力のみの影響を捉えるためである。上記のような装置を真空槽に入れ、無荷重状態と各おもりを載せた際の熱伝導率を測定した。

測定の結果、熱伝導率の値は 0.003 から 0.008 W/mK の範囲で、応力が大きいほど熱伝導率が高くなるという明確な傾向が見られた。この傾向は加圧により粒子が弾性変形し、接触面積が増加することにより、粒子間の熱伝達率が増加したためだと考えられる。

真空下での実効的な熱伝導率は固体粒子を通った熱伝導の寄与(固体伝導率)と粒子表面間の輻射の寄与(輻射伝導率)の和で与えられる。応力による熱伝導率増加は固体伝導率の増加によるものと考えられるため、同じサンプルに対して別途実験で決定した輻射伝導率の値(Sakatani et al., 2013)を取り除くことにより、固体伝導率の応力依存性を導出した。これらのデータを適切な関数でフィッティングした結果、固体伝導率は応力の 0.32-0.4 乗に比例することが明らかとなった。これは接触半径が応力の 1/3 乗に比例するという、Hertz の球の接触理論の予測値と近い値となっており、粒子の弾性変形が原因であること、更に固体伝導率が接触半径に比例することを強く裏付けている。

キーワード: 熱伝導率, 粉体, 圧縮応力, 真空

Keywords: thermal conductivity, powdered materials, compressional stress, vacuum

準惑星セレスの形成・熱進化の理解に向けた熱水実験生成物の化学・鉱物分析 Formation and thermal evolution of Ceres inferred from hydrothermal experiments and mineralogical analyses

森 愛美^{1*}, 関根 康人², 桑谷立², 澁谷岳造³, 鈴木勝彦⁴, 正木裕香⁴

Megumi MORI^{1*}, Yasuhito Sekine², KUWATANI, Tatsu², SHIBUYA, Takazo³, SIZUKI, Katsuhiko⁴, MASAKI, Yuka⁴

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学新領域創成科学研究科複雑理工学専攻, ³ JAMSTEC・プレカンブリアンエコシステムラボ, ⁴ JAMSTEC・IFREE

¹ Dept. Earth & Planet. Sci., Univ. Tokyo, ² Dept. Complexity Sci. & Engr., Univ. Tokyo, ³ Precambrian Ecosys. Lab., JAMSTEC, ⁴ IFREE, JAMSTEC

準惑星セレスは、小惑星帯における最大の天体であり、原始惑星の姿を現在まで留めている数少ない天体のひとつである。また、その密度や形状から、セレス内部は岩石コアと氷マントルに分化している可能性が示唆されている。熱史モデルによると、このような内部構造を説明するためには、セレスは形成初期に大規模融解を経験した可能性が高いことが示唆されている [Castillo-Rogez and McCord, 2010]。その場合、内部では熱水反応に伴い、オリビンなどの始原的鉱物が水質変成を経験したと考えられる。このような水質変成で形成される二次鉱物の組成は、温度条件や水溶液組成によっても大きく異なる。したがって、セレスの鉱物組成を知ることは、その集積時期、微惑星の化学組成や初期太陽系の温度構造を知る上で大変重要となる。近年の地上望遠鏡によるセレスの反射スペクトルから、表面にはオリビンの熱水反応によってできるブルーサイト、鉄に富む蛇紋石、マグネシウムに富む炭酸塩、磁鉄鉱が存在することが示唆された [Milliken and Rivkin, 2009]。しかしながら、これらの鉱物がどのような温度条件・水溶液組成で生成されるのか、各条件の違いが生成される鉱物・化学組成にどのような影響を及ぼすのかについてはよくわかっていない。

本研究では、このような二次鉱物が生成される条件を明らかにするため、オリビンの熱水反応実験を行なった。特に、温度と水溶液中のCO₂量に注目し、この二つのパラメータを変化させて、形成される二次鉱物の化学組成にどのような影響が出るのか調べた。熱水実験には、インコネル合金製オートクレーブを用い、初期鉱物としてサンカルロス産オリビンの粉末 (Mg/(Mg+Fe) = 0.9) を用いた。水溶液にはCO₂源としてNaHCO₃を0.02%もしくは0.6%加え、NH₃を~1%加えた。圧力は400気圧で固定し、温度は200、300、400で行なった。実験後、固体成分を回収し、その鉱物組成をX線回折で分析し、構造や化学組成を電子線マイクロアナライザで分析した。

二次鉱物組成に対する温度依存性については、2価鉄の酸化反応の反応速度の違いがこれに大きく影響することがわかった。200では300に比べて磁鉄鉱が形成されにくく、蛇紋石中のFe/Mg比は300に比べて、200の方が高くなることがわかった。さらに、ブルーサイトは200では固体成分中に存在しなかったが、300では多く存在していた。これらの結果は、300では、オリビンに含まれていた2価鉄が効率的に酸化され磁鉄鉱になるため、蛇紋石がマグネシウムに相対的に富むことになったと解釈される。一方、200では、鉄の多くが2価のまま蛇紋石に留まったと解釈される。400ではオリビンが熱力学的に安定となり、二次鉱物はほとんど生成されなかった。

二次鉱物組成に対する初期CO₂量依存性については、炭酸塩生成による二次鉱物間の元素分配の変化が重要となることがわかった。ブルーサイトはCO₂が少ない条件では固体成分中に多く存在し、CO₂が多い条件では非常に稀にしか存在しなかった。反対に、炭酸塩は、CO₂が少ない条件では存在量は低く、CO₂が多い条件では、マグネシウムを含む炭酸塩が多く存在した。また、蛇紋石中のFe/Mg比は、CO₂が多い条件の方が少ない条件に比べて高くなることがわかった。これらの結果は、CO₂が多い場合、マグネシウムイオンの多くが炭酸塩に分配されるため、ブルーサイトが生成されにくく、マグネシウムが炭酸塩生成に使われるため蛇紋石中の鉄の割合も相対的に高くなったものと解釈される。

今回の実験においては、セレス表面スペクトルから推定される二次鉱物がすべてできる単一の条件(温度・CO₂量)は存在しなかった。特に、ブルーサイトはCO₂の少ない条件で生成しやすいのに対し、鉄に富む蛇紋石は比較的低温(<~200)でCO₂の多い条件で生成しやすい傾向がある。したがって、セレスの表面はクレーター形成などにより、異なる条件で生成した内部物質が露出・放出され、組成的に不均質になっている可能性が考えられる。本実験結果は、ブルーサイトが大量に生成するためには、初期セレスの内部温度が少なくとも300程度まで上昇する必要があることを示唆している。熱史モデル [Castillo-Rogez and McCord, 2010] によると、内部がこのような高温になるには、セレスが太陽系形成からおおよそ200~300万年後に集積する必要があることを示しており、本研究は、セレスのような原始惑星は、このような太陽系形成後の比較的早い段階で形成していた可能性があることを示唆する。

キーワード: 熱水反応, セレス, 初期太陽系, 鉱物分析

Keywords: hydrothermal reactions, Ceres, early solar system, mineralogical analysis

アイスレンズ形成実験と惑星表層環境への応用 Experimental study of ice lens formation and application for planetary surface environment

猿谷 友孝^{1*}, Alan W. Rempel², 栗田 敬¹
Tomotaka Saruya^{1*}, REMPEL, Alan W.², Kei Kurita¹

¹ 東京大学地震研究所, ² オレゴン大学

¹Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ²University of Oregon

Ice lenses are formed by the migration and freezing of water in partially frozen state during soil freezing. Nucleation and growth of ice lenses cause the upwards displacement of ground surface and formation of periglacial landforms. Beyond the terrestrial environment, similar processes are believed to occur in planetary environment. For example, periglacial landforms or high-purity ice are observed at the Phoenix landing site on Mars. Formation of ice lenses is complicated phenomena including heat and mass transport. Several theoretical models address its physical processes in terrestrial environment, however, many questions still remain for the formation of ice lenses. Especially, experimental constraints are not enough. We performed systematic cooling experiment using granular materials to observe the behavior of ice lenses. Our experimental results demonstrate the relationships between the behavior of ice lenses and particle size, temperature conditions and force balance. We also compared our experimental results to numerical model of ice lens formation that focuses on the force balance of thermomolecular force and hydrodynamic force. As a results of comparison, qualitative consistency is obtained, however, important quantitative differences existed. We developed initial numerical model using kinetic effect around particle surface and obtained good agreement.

Application experiments that simulate planetary surface environments are also performed (e.g., low pressure environment, carbonated water etc.) and we observed different behaviors as compared with basic experiments.

In this presentation, we report the comparison between the experimental results and theoretical model and application experiment under simulated planetary environment.

キーワード: アイスレンズ
Keywords: ice lens

原始惑星系円盤初期における物質移動と固体の化学組成変化 Large scale transportation of materials and chemical evolution in protoplanetary disc

永原 裕子^{1*}

Hiroko Nagahara^{1*}

¹ 永原裕子

¹Hiroko Nagahara

Introduction: Large scale material transport in protoplanetary disks has been proved by finding of the high temperature components in comet Wild 2, and it has been supported by physical consideration (e.g., Ciesla, 2009). Meteorites show a wide range of variation of oxygen isotopic compositions, which have been thought to be inherited from the precursor molecular cloud. However, recent high precision by ion microprobes has revealed that the variations are a mixture of isotopic mixing and mass-dependent isotopic fractionation [e.g., Tenner et al., 2012].

Model: In order to understand material transport and oxygen isotopic characteristics recorded in meteorites in a protoplanetary disk, we have developed a model that describes mixing of two components, one transporting outward from the inner edge and one transporting inward by accretion of a protoplanetary disk with different oxygen isotopic compositions. We assume that the proto-sun had ¹⁶O-rich composition as suggested by the solar wind component captured by the Genesis mission, which is represented by refractory inclusions and forsterite grains in primitive chondrites. The planetary composition is represented by the Earth with slight deviation as Mars and asteroids. The materials from outer region were assumed to have oxygen isotopically heavy composition, which we tentatively assume to be that observed in magnetite in a unique carbonaceous chondrite.

The model investigates isotopic trajectory of solid materials condensed at high temperature region with proto-Sun composition, which changed the composition by isotopic exchange in gas with heavy oxygen isotope composition. The solid materials cool exponentially with time. The system has the composition of the solar abundance elemental ratios except for H₂O as a source of heavy oxygen isotope in gas; isotopic exchange is temperature dependent; material transport flux is a steady state. The model contains two free parameters; one is cooling rate and the other is isotopic mixing rate.

Results and Discussions: The solids become isotopically heavier with time due to isotopic exchange, and the time of the increase is shorter and the final composition becomes heavier when the mixing rate is large. The time of the increase of the heavy isotope becomes later and the final composition becomes isotopically lighter with decreasing mixing rate. Considering that the planetary composition of oxygen isotopes is $\delta^{18}\text{O}=\text{zero}$ by definition, the most plausible mixing rate is obtained. We have confirmed that the mixing lines on the three oxygen isotopic plot are straight for both solids and gas, which means that the solid changed its composition from -50 to 0 permil and that the gas from +200 to 0 permil.

A plausible range of the mixing rate was obtained for a range of cooling rates. The mixing ratio of solids with light oxygen and gas with heavy oxygen and cooling rate are linearly related in logarithmic plots. In other words, more abundant low temperature component with heavy oxygen is required if the solid materials cool rapidly. The model results are converted to the real scale for forsterite grains condensing in light oxygen gas, which moves outward, cools, and exchanges oxygen isotopes with ambient gas with heavy composition. Cooling rate of the model corresponds to advection or diffusion rate at the midplane and the mixing rate corresponds to the ratio of inward flux of isotopically heavy water ice to outward flux of high temperature condensates with light oxygen isotopes. Larger values of cooling rate and mixing rate may be realized at the early stage of disk evolution.

In summary, planetary oxygen isotopes were achieved through the evolution of the disk due to larger inward and outward transportation of materials and ice at the early stage and smaller transportation at the later stage.

キーワード: 原始惑星系円盤, 固体物質, 輸送, 酸素同位体

Keywords: protoplanetary disc, solid materials, transportation, oxygen isotope

銀河系内縁部における中質量星の原始惑星系円盤の寿命 Disk lifetime of protoplanetary disks surrounding intermediate-mass stars in the inner Galaxy

安井 千香子^{1*}, 小林尚人¹, 齋藤 正雄², Alan T. Tokunaga³
Chikako Yasui^{1*}, Naoto Kobayashi¹, Masao Saito², Alan T. Tokunaga³

¹ 東京大学, ² 国立天文台, ³ ハワイ大学

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

原始惑星系円盤の寿命は、惑星形成過程に直接影響を及ぼす最も重要な基本量のひとつである。円盤の寿命は、これまで太陽近傍 ($D < \sim 3 \text{kpc}$) の様々な領域における詳細な観測から、 $\sim 5\text{--}10 \text{ Myr}$ と求められてきた。しかし、この結果は太陽金属量下の限られた環境においてのみ適用できるものであり、より普遍的な惑星形成を考える上では、様々な環境での円盤寿命を明らかにすることが必須となる。また、異なる環境下における円盤寿命の変化の有無を調べることにより、円盤進化モデルに制約をつけることができる可能性がある。

われわれはこれまでに、金属量が低い ($\sim -1 \text{ dex}$) ことで知られる“銀河系外縁部” (銀河中心からの距離 $R_g > \sim 15 \text{kpc}$) における星生成領域の近赤外線での disk excess の残存率 (disk fraction) を求め、原始惑星系円盤の寿命が太陽近傍のものに比べて非常に短いことを明らかにし、円盤寿命に金属量依存性があることを示唆した。次のステップとして、太陽近傍に比べて金属量が高いことが予想される銀河系内縁部 ($R_g \sim 4 \text{kpc}$) に着目し、明るいために多数のデータがアーカイブから得られる中質量星の disk fraction をまず導出した。その結果、太陽近傍の円盤寿命を大きく越えた年齢 ($\sim 20 \text{ Myr}$) の星生成領域においても高い disk fraction が得られたが、これは銀河系内縁部では円盤寿命が非常に長いことを示唆する。

本学会では、上記の結果と太陽近傍における中質量星の円盤寿命 (2012 年合同大会、PPS21-17 安井他)、および低金属量下における中質量星の円盤寿命の結果を合わせ、円盤寿命の金属量依存性について議論したい。

キーワード: 原始惑星系円盤, 金属量, 惑星形成

Keywords: protoplanetary disk, metallicity, planet formation

スノーラインにおけるダストアグリゲイトの集中 Concentration of dust aggregates at the snow line

城野 信一^{1*}
Sin-iti Sirono^{1*}

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科
¹ Nagoya University

惑星形成過程でいまだに不明なプロセスの一つとして微惑星形成過程がある。ミクロンサイズのダスト微粒子からキロメートルサイズの微惑星への成長過程において、大きく二つの困難が存在している。その一つはダストアグリゲイトが中心星に向かって落下してしまう問題である。ガス抵抗によりダストアグリゲイトは中心星方向へドリフトする。その速度は最大で 50m/s にもなる。この速度になると、1AU の距離を 100 年程度で落下してしまう。この時間スケールは、ダストアグリゲイトの成長の時間スケールよりも十分短い。もう一つの問題は、50m/s の速度でアグリゲイトが衝突すると破壊が起こる可能性が高いことである。本研究では、これら二つの困難を統合的に解決するモデルを提案する。

中心星から離れた場所では温度が低いためにダスト微粒子の主成分は氷となる。氷主体のダストアグリゲイトがガス抵抗によって中心星方向に落下すると温度が上昇する。温度上昇にともない、本来なら氷の昇華が進行するのであるが、中心星から離れた場所ではすでに周囲が H₂O で飽和しているために昇華は起こらない。H₂O で飽和している領域としていない領域の境界は「スノーライン」とよばれ、これよりも内側で氷の昇華が進行する。氷の蒸気圧は温度に指数関数的に依存するため、スノーラインよりも内側にアグリゲイトが落下すると急速に昇華が進行する。昇華にともなって H₂O の分圧が上昇する。局所系に分圧が上昇するため、その領域の動径方向の圧力勾配が逆転する。

この逆転にともない、ダストアグリゲイトの運動方向も逆転する。運動方向が逆転するため、局所的にアグリゲイトの数密度が上昇する。数値シミュレーションの結果、数百年でアグリゲイトの空間密度がガス密度と同程度になり、落下速度が数 10cm/s まで低下する。このためアグリゲイトが衝突しても破壊を免れる。また、数密度が大幅に上昇するため、極めて短時間に微惑星まで合体成長することが明らかとなった。

キーワード: グレインアグリゲイト, 微惑星, 昇華
Keywords: grain aggregate, planetesimal, sublimation

アエンデ隕石中のコンドリュールの3次元形状と内部組織の関係 Three dimensional shapes and internal structure of chondrules from Allende CV3 chondrite

津田 彩花¹, 西田 圭佑^{1*}, 高橋 栄一¹, 中本 泰史¹, 横山 哲也¹, 佐々木 理², 鹿納 晴尚², 柳田 泰宏³, 奥村 聡³, 中村 美千彦³
Ayaka Tsuda¹, Keisuke Nishida^{1*}, Eiichi Takahashi¹, Taishi Nakamoto¹, Tetsuya Yokoyama¹, Osamu Sasaki², Kanou Harumasa²,
Yasuhiro YANAGIDA³, Satoshi Okumura³, Michihiko Nakamura³

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 東北大学総合学術博物館, ³ 東北大学大学院理学研究科地学専攻地球惑星物質科学講座

¹Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, ²The Tohoku University Museum, ³Department of Earth Science, Graduate School of S

隕石中に含まれる直径 1 mm 程度の球状のコンドリュールは原始太陽系星雲中で形成されたと考えられているが、その形成過程はまだわかっていないことが多い。本研究はコンドリュールの成因に関する衝撃波加熱モデル (Miura et al, 2002, 2005, 2008) を検証するため、コンドリュールの3次元形状を統計的に調べた。

これまでもコンドリュールの3次元形状観察は、Allende 隕石から分離したコンドリュールについて、X線CTを用いて行われている (Tsuchiyama et al 2003)。しかしながら、その結果は prolate (ラグビーボール型) と真球に偏っており、oblate (どら焼き型) が存在しなかった。これは理論モデルから予想される分布と一致せず、22 粒と観測点も少なく、統計的に正しい分布が得られていないと考えられる。そこで本研究では、コンドリュールの真の形状分布を調べるため、同じく Allende 隕石から分離した合計 160 粒のコンドリュールについて、東北大学自然史標本館設置の X線CT装置を用いて撮影した。また、短時間かつ簡易に3次元形状が観察できる光学装置を開発した (Nishida et al. JPGU 2013)。

X線CTで撮影したコンドリュールのうち、マトリックスの付着が少なく外形測定が可能な 50 粒のコンドリュールの外形を調べた。なお、25 個の真球に近いコンドリュールは時間節約のため、本研究では X線CTの撮影は行っていない。Fig. 1 に示すように、コンドリュールの3次元形状は、prolate-真球-oblate のすべての領域に分布し、prolate への偏りは見られなかった。porphyritic 組織のコンドリュールは、全ての形状の領域にみられた。granular 組織 (porphyritic よりも溶融度が低い) も、同様に均一に分布していた。barred olivine 組織 (メルトからの急冷組織) は、真球と oblate の領域に分布した。今後、衝撃波加熱モデルの観点から、本研究のコンドリュール外形分布と内部組織の特徴の議論が期待される。

キーワード: Allende, コンドリュール, X線CT, 3次元形状, 衝撃波加熱理論

Keywords: Allende, Chondrule, X-ray CT, Three-dimensional shape, Shock-wave heating model

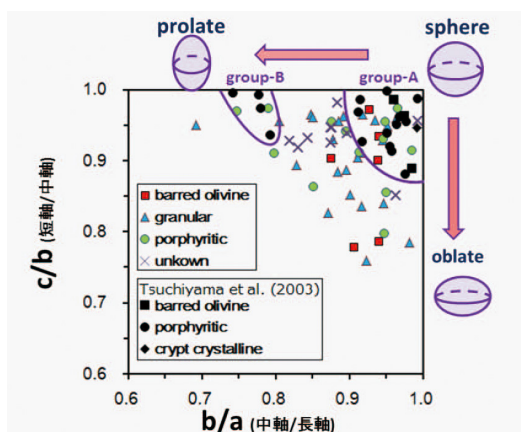


Fig.1 3D shape and internal texture of chondrules in Allende CV3 chondrite

ダスト - 円盤ガス - 惑星間の重力相互作用 Planetary Migration in Dust-Rich Disks

山田 耕^{1*}, 稲葉知士²
Kou Yamada^{1*}, Satoshi Inaba²

¹ 早稲田大学大学院政治学研究科, ² 早稲田大学国際教養学部

¹Graduate School of Political Science, Waseda University, ²School of International Liberal Studies, Waseda University

There are still serious problems in the theory of planet formation. One of the problems is how to keep protoplanets with Earth-masses in a disk for a sufficiently long time until the disk gas is dispersed. A protoplanet growing in a disk interacts with a gas disk gravitationally and, as a result, changes the radial distance from the central star. This process is called the type I migration of a protoplanet. A variety of structures of extrasolar planetary systems might be a natural outcome resulted from the type I migration. The corotation torque and the Lindblad torque act on a protoplanet, leading to the type I migration of the protoplanet. The migration velocity of the protoplanet is determined by the sum of the torques. Recently, Yamada & Inaba (2012) showed that the magnitude of the torques depends on a thermal structure of a disk. The positive corotation torque acting on a protoplanet in a disk inside of the ice line becomes large enough to cancel the negative Lindblad torque. Protoplanets might accumulate at the location of the ice line of a disk with small viscosity.

Once dust particles grow, they move in a disk interacting with gas. Particles lose angular momentum and migrate inward toward the inner region of a disk. The particle density in the inner region of a disk is increased with time. Birnstiel et al. (2012) studied the evolution of the particle surface density considering the growth and fragmentation of particles and the radial motion of the particles as well. They showed the greatly increased particle-to-gas ratio in an inner region of a disk with small viscosity in 1Myr. We study the effect of particles on the type I migration of a protoplanet. We compare the torques acting on a protoplanet by disks with and without dust particles. Parameters in this model are particle radius (0.1mm to 1cm) and particle-to-gas mass ratio (0.01 to 0.1). We find that the magnitude of the positive corotation torque acting on a protoplanet is dependent on the particle size and increases with an increase in the particle-to-gas mass ratio. A protoplanet may be prone to migrate outward in dust-rich disks.

キーワード: タイプ I 移動, 密度波, ダスト, 惑星系, 重力相互作用, 共回転共鳴トルク

Keywords: type I migration, density wave, dust, planetary system, corotation torque, gravitational interaction

ダスト整列の起源の解明に向けた単一微小結晶の磁場整列実験

Detection of magnetic anisotropy of a single grain crystal orientated to investigate the origin of dust alignment.

植田 千秋^{1*}Chiaki Uyeda^{1*}¹ 大阪大学大学院理学研究科¹ Graduate School of Science, Osaka University

星間、星周における磁場ベクトルの方向は、ダスト整列による可視・赤外偏光で推定され、その観測データに基づいて、恒星・惑星の形成過程への磁場の寄与が研究されている。しかし銀河空間の平均元素組成を考慮すると星間ダストは反磁性または弱い常磁性の状態にあり、一方で磁場強度は微弱である。このため既存の磁気科学で知られているメカニズムでは、ダスト整列が説明できない。私たちはダストが磁化率異方性によって整列する可能性を室内実験のデータに基づいて検討してきた。一般に希薄な分散媒の中に浮遊した粒子は、粒子に誘導される異方性エネルギーが回転ブラウン運動のエネルギーを1桁以上、上回った時に磁場配向する。即ち、整列に要する磁場強度は分散媒に依らず温度、粒子質量および(物質固有の)磁化率異方性のみで決定される。近年の赤外 emission 観測によると、原始惑星系円盤近傍では結晶質の Forsterite, Enstatite および非晶質のシリカが共存する。従ってこの領域での整列のメカニズムを検証するには、上記シリケート粒子の実効的な磁気異方性が必要になる。ただし近年の研究によると、微小結晶の実効的な異方性は、そのサイズの減少と共にバルク結晶の文献値から逸脱する事例が報告されている。従って配向磁場の評価には、実際の粒子サイズでの異方性を用いる必要がある。さらに宇宙鉱物の中には、微小な粒子結晶でしか存在しないものが多く存在する。しかし既存の計測法では mm サイズより小さい試料で弱磁性の異方性を検出することは困難である。しかし既存の計測法では、mm サイズより小さい試料で弱磁性の異方性を検出することは困難である。

私たちは微小重力空間で、粒子結晶の磁氣的安定軸を磁場により回転振動させることで異方性を検出する方法を開発した。そして sub-mm レベルの結晶で測定を実現した。磁気異方性を計測する標準的な手法であるトルク法では、水平磁場の中に試料をファイバーで吊し、発生した磁気異方性トルクとファイバーのネジレ復元トルクをつり合わせることで、異方性を検出する。この方法による測定感度は、ネジレ復元トルクで限定されてしまう。そこで、上記の回転振動の周期から、微弱な異方性を検出する原理の有効性を実験で検証した。この方法では、ネジレ復元力の影響なしに、また、試料の質量計測をすることなく異方性が得られる [1]。上記の異方性測定を通常分析法として実用化する場合、現行の大規模微小重力施設の利用は、作業量や費用の観点から必ずしも適さない。仮に小型の落下 box を、長さ 200 cm の短いシャフト(大気圧)の中で落した場合、持続時間は 0.6 秒以下になるものの、その間、比較的良質の微小重力が得られる。従って、もし上記の回転振動に要する時間を従来の報告の 1 秒レベルよりも短縮できたなら、通常の実験室内に上記のシャフトを設置することで異方性測定が実施できる。この条件に関しては、試料サイズを sub-mm レベルにすることで試料の回転半径が減少し、振動周期を 0.5 秒以下に抑えることができた。(磁場強度 ~ 0.5T, 異方性 > 1E-8 [emu/g] の場合)。これにより最低でも 1 周期分の運動が観察でき、振動が磁気異方性に起因していることを確認できるようになった。また観測装置全体を小型 box 内に収納する必要があるが、これは小型のネオジム磁石プレート 2 枚からなる磁気回路を新たに製作することで、磁場発生部を従来の 40cm から 5cm 以下に縮小することで実現した。

今回、sub-mm 粒子の異方性を観測する技術が確立したことで、今後ミクロンサイズあるいはそれ以下のサイズの粒子の異方性を計測する展望が得られた。今後、測定可能な試料サイズを減少させることで、ダストサイズにおける実効的な異方性が得られると期待される。

[1] C.Uyeda et al: Jpn. Phys. Soc. Jpn. 79, 064709 (2010).

キーワード: 磁場整列, 磁気配向, ダスト整列, 微小重力, 反磁性異方性, アパタイト

Keywords: magnetic alignment, rotational oscillation, dust alignment, apatite, diamagnetic anisotropy, micro-gravity

原始惑星のガス捕獲による軌道進化 Orbital evolution of eccentric, gas-accreting protoplanets

菊地 章宏^{1*}, 樋口 有理可¹, 井田 茂¹
Akihiro Kikuchi^{1*}, Arika Higuchi¹, Shigeru Ida¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

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

近年の直接撮像による観測で、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が発見されている。しかし、このような惑星の形成は惑星形成の標準理論であるコア集積モデルではうまく説明できない。コア集積モデルでは、巨大ガス惑星は以下のように形成される。まず、微惑星の集積により原始惑星が形成される。さらなる集積により原始惑星の質量が限界コア質量に達すると、原始惑星を覆う大気が平衡を保てなくなり、暴走的にガスが流入し始める。このようにしてガスを捕獲することで、巨大ガス惑星が形成される。しかし、微惑星集積のタイムスケールは惑星のケプラー周期や原始惑星系円盤の質量分布に依存する。中心星から遠い場所では集積タイムスケールが長くなるため、原始惑星が限界コア質量に達する前に円盤が消失してしまう可能性が高い。そうすると遠方ではガス惑星は形成されない。そこで、集積タイムスケールの短い内側で作ったガス惑星を、別の巨大惑星の散乱で遠方に輸送するという、遠方のガス惑星形成シナリオがある。このモデルでは遠方に離心率の高いガス惑星が形成されるが、円軌道に近い軌道は実現できない。

本研究では、他の内側の惑星の散乱により遠方楕円軌道に進化した原始惑星が、ガスを捕獲しながら円軌道化するモデルを考える。つまり、原始惑星から巨大ガス惑星になる途中の段階の、ガスを捕獲する段階において、軌道進化することを考える。このモデルでは、原始惑星の形成時間を回避することができ、コア集積モデルによって巨大ガス惑星が形成される。モデルの詳細は以下ようになる。まず円盤の比較的内側で原始惑星コアが形成され、その後原始惑星が自身より内側にある巨大ガス惑星によって散乱されることで、離心率の大きな楕円軌道になる。楕円軌道にある原始惑星は、速度の異なるガスを捕獲することで軌道進化する。原始惑星は楕円軌道にある一方でガスは円軌道にあるので、ガスを捕獲することで円軌道化すると考えられる。また、ガスを捕獲するたびに衝突エネルギーが失われるが、失われる量が小さければ、軌道長半径はそれほど減少せず、長周期の惑星が形成されうる。

本研究では、楕円軌道にある原始惑星がガスを捕獲することによって、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が形成されるかどうかを調べた。ここではまず、無限に広がる円盤内に楕円軌道の原始惑星がある場合を考えた。また、円盤ガスが十分にあって収縮律速になっている場合を考えた。つまり、原始惑星のまわりのガスエンベロープの収縮速度が質量増加率を決めている場合で、質量増加率は円盤の密度や温度に依存しない。質量増加率は軌道上の各位置において等しく、1公転周期での軌道変化が微小だという仮定をすることで、軌道平均を行った。こうして1周期での変化を求めて、それを積分することで長期での軌道進化を求めた。このように解析的に導出した結果、軌道要素について、初期値と質量の依存性を明らかにした。ガスを捕獲することで、離心率は減少する一方、軌道長半径はあまり減少せず、初期の半分程度が限界であることがわかった。これより、原始惑星のガス捕獲による軌道進化で、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が形成されることがわかった。

次に、円盤構造を変えた場合を考えた。原始惑星が離心率の大きな楕円軌道にあるとき、円盤の大きさによっては原始惑星の軌道が円盤の外側に出ってしまう場合が考えられる。つまり、円盤半径の内側では収縮律速でガスを捕獲できる一方、円盤半径の外側では供給律速になっている場合である。供給律速のときは、円盤からのガスの流入速度が質量増加率を決めているので、原始惑星のガス捕獲率は円盤ガスの密度や温度に依存する。ここではまず、円盤半径の外側では全くガスを捕獲できない場合を考えた。その結果、円軌道化したときの軌道長半径と円盤の大きさに関係があることがわかった。発表では、多様な円盤構造と原始惑星の軌道進化の関係について詳しく議論する。

キーワード: 系外惑星, 円軌道長周期巨大ガス惑星, 惑星形成, ガス捕獲, 軌道進化

Keywords: exoplanet, distant jupiters in circular orbits, planetary formation, gas accretion, orbital evolution

円盤回転則の変化を考慮した惑星による円盤面密度ギャップの形成 Gap formation by a planet in a protoplanetary disk considering the change of disk rotation law

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

Kazuhiro Kanagawa^{1*}, Hidekazu Tanaka², Takayuki Muto³, Takayuki Tanigawa², Taku Takeuchi⁴

¹ 北海道大学大学院理学学院宇宙理学専攻, ² 北海道大学低温科学研究所, ³ 工学院大学基礎・教養教育部門, ⁴ 東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of cosmosciences, Gradient School of science, Hokkaido University, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ³Division of Liberal Arts, Kogakuin University, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤内で数地球質量以上に成長した惑星は、その重力で円盤ガスをはねのけることで、惑星軌道付近にガス密度の減少した、いわゆる円盤ギャップを形成する。さらに惑星が重くなりギャップが深くなると、惑星軌道内側への円盤ガス降着を阻害し、円盤内側でガス密度が大幅に減少したインナーホールが形成されると考えられている。円盤ギャップ構造やインナーホールは最近の星周円盤観測により多く発見されているが、これらの観測結果とそこに存在する惑星を直結する定量的な理論モデルは未だ存在していない。

本研究では、従来の密度波理論をもとにした惑星円盤重力相互作用モデルを用いて、惑星軌道付近の1次元粘性円盤進化の方程式を解くことで、惑星によるインナーホール及びギャップ形成モデルの構築を目指している。ギャップの形成に伴い、ギャップ内の急峻な円盤ガスの圧力勾配によって円盤回転速度はケプラー回転からずれる。そのずれは音速程度にもなるが、従来のギャップ形成モデルでは、この効果は見落とされてきた。本研究では、このギャップ内の円盤回転速度の変化を考慮し、それと無矛盾にギャップ面密度分布を決定するよう定式化を行い、これを解くことで円盤回転則の変化がギャップの構造に与える影響を調べ、以下の結果を得た。

(1). 円盤の回転速度の変化はギャップの粘性角運動量輸送を促進する効果があり、従来のギャップ形成モデルよりもギャップが浅くなることが明らかになった。重い惑星でより深いギャップが形成される場合には、この効果はより顕著になり、従来のモデルより何倍もギャップ内面密度を上昇させる効果がある。

(2). ギャップが十分深い場合においては、回転円盤の安定性条件であるレイリー条件を破るところまで円盤回転則が変化する。そのような場合レイリー条件をぎりぎり満たす中立安定な構造が実現されると考えられる (Tanigawa & Ikoma 2007)。この効果は粘性角運動量輸送を促進し、円盤ギャップをさらに浅くすることも明らかにした。

本講演では上記の結果に加え、数値流体シミュレーションと我々にモデルの比較についても報告したい。

キーワード: 原始惑星系円盤, 円盤-惑星相互作用, 円盤進化, ギャップ形成

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

中心星加熱円盤における惑星のタイプI軌道移動の数値計算と解析的見積もり Numerical simulations and analytical evaluations of type I migration in disks heated by the stellar irradiation

前島 直彦^{1*}, 渡邊 誠一郎¹

Naohiko Maeshima^{1*}, Sei-ichiro WATANABE¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科地球惑星環境科学専攻

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University

惑星は原始惑星系円盤の中で形成され、円盤ガスとの重力的相互作用により動径方向に移動する。そのうち低質量惑星についておこる「タイプI軌道移動」は、等温的な円盤では移動速度が大きく惑星は短時間で中心星へ落下してしまうという問題があった。ところが最近の研究では、断熱過程を考慮した円盤ではエントロピーの勾配が負の場所で惑星は外向きにも移動できることが分かっている (Paardekooper & Mellema 2006; Baruteau & Masset 2008; Paardekooper & Papaloizou 2008)。非等温円盤におけるタイプI軌道移動の数値計算を行った研究があるが (Lyra et al. 2010)、彼らの研究では中心星放射による円盤の加熱を考慮していない。

本研究では、中心星放射によって加熱される非等温円盤において惑星はタイプI軌道移動によってどのように軌道を変化させるかを数値計算によって求めた。円盤加熱機構として粘性加熱と中心星放射の両方を考慮した。円盤内には惑星に働くトルクがゼロになる「平衡半径」ができ、それは円盤進化タイムスケールで中心星方向へ移動する。惑星は急速に平衡半径に移動した後、平衡半径とともに内側へ移動し、やがてガス密度が十分薄くなると移動を止める。数値計算により、円盤加熱の主体が粘性加熱から中心星放射に遷移する領域に平衡半径が1つでき、それに追従して移動する $10M_E$ 惑星の最終到達位置は約 1AU になるという結果が得られた。粘性の大きさや光蒸発の質量放出率、中心星質量などのパラメータに対する依存性はあまり強くない、いずれの場合でも最終惑星位置はほぼ 1 AU 程度となった。一方で、円盤の比較的内側の領域から移動を開始した惑星は中心星近傍 (円盤の内縁) まで到達する。このような惑星がガス捕獲していた場合、ホットジュピターになると思われる。また、平衡半径のできる位置や惑星到達位置に関する解析的に求め、それが数値計算結果と良く一致することを確認した。

観測されている系外惑星の分布と比較する。現在、0.1AU 以内と 1AU 以遠の領域で特に多くの巨大惑星 ($>100M_E$) が発見されており、両者の個数の比は約 3:5 となっている。0.1 AU から 1 AU の範囲には系外惑星は少ない。このようなバイモーダルな系外惑星の軌道長半径分布は本研究の結果と整合的である。本発表では、2つの領域における惑星の数の比が定量的にどう理解できるのかについても議論する。

引用文献

Baruteau, C., & Masset, F. 2008, ApJ, 672, 1054

Lyra, W., Paardekooper, S.-J., & Mac Low, M.-M. 2010, ApJ, 715, L68

Paardekooper, S.-J., & Mellema, G. 2006, A&A, 459, L17

Paardekooper, S.-J., & Papaloizou, J. C. B. 2008, A&A, 485, 877

キーワード: タイプI軌道移動, 原始惑星系円盤, 系外惑星

Keywords: type I migration, protoplanetary disk, exoplanet

Hot-Jupiter の蒸発が系外惑星分布に与える影響 Effects of Evaporation of Hot-Jupiters on Exoplanets Population

黒川 宏之^{1*}, 中本 泰史¹

Hiroyuki Kurokawa^{1*}, Taishi Nakamoto¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

観測数の増加により、系外惑星の質量や半径の分布について、統計的な議論が可能となってきた。Hot-Jupiter の分布において、軌道長半径もしくは公転周期と、惑星質量や惑星表面重力、密度に相関があることが指摘されてきた (Mazeh et al., 2005; Southworth et al., 2007; Jackson et al., 2012)。そのような分布を説明するメカニズムとして提案されているのが、中心星 XUV(X-ray + EUV) の上層大気加熱が引き起こす大気散逸による、Hot-Jupiter のエンベロープの蒸発である (Lammer et al., 2003; Jackson et al., 2012 など)。

従来の Hot-Jupiter 蒸発に関する理論研究では、熱進化や質量損失に伴う惑星の半径や密度の変化を無視していたり、単純な energy-limited escape の見積もり (Erkaev et al., 2007) が用いられてきた。しかし、質量損失に伴う惑星の半径変化は暴走的な質量損失を引き起こす可能性が指摘されている (Baraffe et al., 2004)。その過程では Roche-lobe overflow が散逸に寄与することも考えられる。さらに、大気散逸にとって重要な、若い中心星の強力な XUV 放射のもとでは、上層大気は高電離状態にあり、Lyman-alpha 放射による冷却効果が散逸率を支配する (recombination-limited escape) と考えられている (Murray-Clay et al., 2009; Owen and Jackson et al., 2012)。本研究では、形成直後からの惑星の熱進化と質量損失進化を同時に解く数値計算を行った。さらに、質量損失進化については、半解析的な上層大気モデルをつくることにより、上述の高 XUV における recombination-limited escape と Roche-lobe overflow をモデルに取り入れた。

結果として、惑星のエンベロープが全て失われるような散逸は、中心星近傍 (1 木星質量の場合、0.015AU 以内) で起こり、主に energy-limited escape ではなく、recombination-limited escape のもとで起こることがわかった。さらに、質量損失は惑星半径の膨張につながり、暴走的な質量損失を引き起こして、最終的に Roche-lobe overflow での蒸発を起こすことがわかった。この暴走的な進化をとげるかは惑星の初期質量に依存するため、各軌道長半径において、数十億年でエンベロープが全て蒸発するクリティカルな質量を定義することができる。そのような軌道長半径-クリティカル質量の関係を本研究の進化計算から求め、観測されている系外惑星の質量分布との比較を行った。Hot-Jupiter のコアサイズや形成史 (migration の有無) などに応じてクリティカル質量を求め、観測と比較することで、惑星形成理論への示唆を与えることができる。本研究の結果からは、Hot-Jupiter が典型的に 10 地球質量程度の小さいコアを持っていた場合、観測されている質量分布と整合的である。

キーワード: 系外惑星, 大気散逸, ガス惑星, ホットジュピター

Keywords: exoplanet, atmospheric escape, gas planet, Hot-Jupiter, stellar XUV

水に富むスーパーアースの限界質量と限界半径：Kepler 候補天体の組成に対する示唆

Theoretical threshold mass and radius for close-in low-mass water-rich super-Earths: Implications for the main composition

黒崎 健二^{1*}, 生駒 大洋², 堀 安範³

Kenji Kurosaki^{1*}, Masahiro Ikoma², Yasunori Hori³

¹ 東京工業大学, ² 東京大学, ³ 国立天文台

¹Tokyo Institute of Technology, ²Tokyo University, ³National Astronomical Observatory of Japan

これまでに 3600 個以上の系外惑星が発見されてきている。近年の観測技術の向上により、地球の数倍程度の大きさの系外惑星(以下、スーパーアース)も発見され始めている。短周期スーパーアース(主に 0.1AU 以内)の中には、鉄・岩石を主成分とする地球や水星と比べて、非常に低密度な惑星(例えば、GJ1214b)が多数、確認されている(Nettelmann et al. 2010)。低密度なスーパーアースは恐らく、鉄・岩石以外に揮発性成分に富んだエンベロップ(例えば、水素・ヘリウムや水)を有していると考えられる。一方で、中心星近傍のスーパーアースは中心星からの強烈な X 線や UV の照射に晒されているため、質量散逸も経験している可能性が高い。低密度なスーパーアース(半径が大きな惑星)ほど質量散逸の影響も受けやすい。そのため、観測から示唆される多様なスーパーアースの質量・半径関係を調べる必要がある。しかし、過去の研究では、CoRoT-7b (Valencia et al. 2010)、や Kepler-11 系 (Lopez et al. 2012) の個別のスーパーアースについてのみ議論されていた。

そこで、本研究では、様々な軌道長半径を持つスーパーアース(初期質量 0.1-10 地球質量)について、質量散逸を考慮して 100 億年の熱進化計算を行い、惑星質量・半径の関係を求めた。本講演では、内側から岩石コア、水マントル、水蒸気大気を持つ、「水に富むスーパーアース」についてのみ紹介する。結果は次の通りである。

(1) 水素・ヘリウム大気と比べて、水蒸気大気の熱膨張は抑制されるため、中心星近傍にある小さなスーパーアースでも水に富むエンベロップを保持可能。

(2) 水に富むエンベロップを保持可能な惑星の最小質量と軌道長半径の関係から、「水に富むスーパーアース」の存在可能領域と「岩石むき出しのスーパーアース」の領域を制約。

これらの結果を用いて、本講演では「水に富むスーパーアース」の存在可能な領域と観測で発見された短周期スーパーアースの分布を比較することで、スーパーアースの組成および起源を議論する。

キーワード: スーパーアース, 質量散逸, 内部構造

Keywords: Super-Earth, Mass loss, Interior structure

系外巨大ガス惑星周りのハビタブルムーンの形成とその安定性 Formation and stability of habitable moons around extrasolar giant planets

佐藤 貴央^{1*}, 佐々木 貴教¹
Takao Sato^{1*}, Takanori Sasaki¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

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

近年多くの太陽系外惑星が発見されるにつれて、それらの中に生命居住可能（ハビタブル）な惑星は存在するの否かという問題は、重要な研究テーマとなってきている。しかしハビタブルゾーン内で地球型惑星を発見することは、観測的にはまだまだ難しい。一方、視線速度法による系外惑星観測の結果によると、ハビタブルゾーン内には大量の巨大ガス惑星が存在していることがすでにわかってきている。そこで本研究では、系外巨大ガス惑星周りに存在していると考えられる系外衛星に注目した。

系外衛星がハビタブルであるために必要な衛星質量の下限値が、先行研究（Williams et al., 1997）によって見積もられており、およそ地球質量の0.1-0.2倍程度の衛星質量が必要であると考えられている。本研究では、ガス惑星がハビタブルゾーン内に存在したとき、これらの質量を保持した衛星（ハビタブルムーン）の形成可能性や軌道安定性を、複数の先行研究をもとに検証した。その結果、形成についてはその起源である周惑星円盤の温度構造から、岩石衛星が形成されやすいことが示された。また、軌道安定性についても、ガス惑星のタイプII軌道移動の影響や、ガス惑星からの潮汐力による影響を受けることなく、ハビタブルゾーンで長期間安定して存在し続けられることが示された。

よって本研究から、ハビタブルゾーン内に巨大ガス惑星が存在した場合、その周りにはハビタブルな衛星が存在している可能性が高いことが示唆された。

キーワード: ハビタブルムーン, 系外惑星, 系外衛星, 衛星形成, 軌道安定性

Keywords: habitable moon, exoplanet, exomoon, satellite formation, orbital stability