

NASA' s Planetary Science Missions Present and Future Plans

*James L Green¹

1. NASA Headquarters

Planetary Science missions have revolutionized our understanding of the origin and evolution of the solar system. Planetary scientists are also enabling human space exploration by studying and characterizing planetary environments beyond Earth and identifying possible resources that will enable safe and effective human missions to destinations beyond low Earth orbit. Robotic explorers are gathering data to help us understand how the planets formed, what triggered different evolutionary paths among planets, what processes are active, and how the Earth formed, evolved, and became habitable. To search for evidence of life beyond Earth, we' ve used this data to map zones of habitability, studied the chemistry of unfamiliar worlds, and revealed the processes that lead to conditions necessary for life. In addition, we have significantly increased our ability to detect, track, catalog, and characterize near-Earth objects that may either pose hazards to Earth or provide destinations and resources for future exploration.

NASA' s Planetary Science Division (PSD) and space agencies around the world are collaborating on an extensive array of missions exploring our solar system. NASA has always encouraged international participation on our missions both strategic and competitive and other Space Agencies have reciprocated and invited NASA investigators to participate in their missions.

NASA PSD has a fleet of assets and partnerships that are focused on the exploration and understanding of the Solar System. Indeed, we are living in a golden age of discovery with a large number of operating missions ranging from orbiting Mercury to heading for beyond Pluto.

In my talk I will present an overview of current and possible future PSD missions. As we have we just launched OSIRIS-Rex, and announced the Discovery Program selections, we continue the implementation of the New Frontiers mission and the InSight mission. As our present fleet of missions continue to provide immense amounts of data from the Moon, Mars, and all the way to Pluto, we continue work to deliver NASA's contributions to fly on international missions such as ESA's JUICE mission consisting of one U.S.-led science instrument and hardware for two European instruments: the radar, ultraviolet spectrometer, and the particle environment package.

Future NASA Mars missions include NASA' s InSight lander designed to study the Mars interior and the Mars 2020 rover that will produce rock cores from a geologically diverse sight for potential future return. In addition to the strong international scientific program at Mars, NASA is developing the capabilities needed to send humans to Mars in the 2030s and beyond.

The exploration of the outer Solar System has recently revealed remarkable information regarding "ocean worlds" such as Europa and Enceladus, which have oceans or seas of liquid water beneath their icy surfaces. The Cassini mission has discovered vast oceans of liquid hydrocarbons on Saturn' s moon Titan and a submerged salt-water sea on Saturn' s moon Enceladus. Titan also has seas and lakes of liquid methane/ethane on its surface. With these new discoveries, small worlds have become a primary focus in the search for possible life elsewhere in the Solar System.

But regardless of the destination, international partnerships are an excellent, proven way of amplifying the

scope and sharing the science results of a mission otherwise implemented by an individual space agency. The exploration of the Solar System is uniquely poised to bring planetary scientists, worldwide, together under the common theme of understanding the origin, evolution, and bodies of our solar neighborhood. In the past decade we have witnessed great examples of international partnerships that made various missions the success they are known for today. As Director of Planetary Science at NASA I will continue to seek cooperation with our strong international partners in support of planetary missions.

Keywords: NASA, Planetary, Missions, International

JUICE/GALA-J (1) : JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA) - 概要およびプロジェクト進捗

JUICE/GALA-J (1) : The Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission - Introduction and current status

*塩谷 圭吾¹、並木 則行²、小林 正規³、木村 淳⁴、野田 寛大²、荒木 博志²、鹿島 伸悟²、宇都宮 真²、石橋 克彦³、小林 進悟⁶、押上 祥子⁵、水野 貴秀¹、尾崎 正伸¹、山脇 敏彦¹、東原 和行¹、義文 義文¹、鎌田 俊一⁷、松本 晃治²、倉本 圭⁷、佐々木 晶⁴、岩村 哲⁸、飯田 光人⁹、藤代 尚文¹⁰、藤井 雅之¹¹、Hussmann Hauke¹²、Lingenauber Kay¹²、Kallenbach Reinald¹²、Jaenchen Judit¹²、Behnke Thomas¹²、Althaus Christian¹²、DelTogno Simone¹²、Oberst Juergen¹²、Loetzke Horst-Georg¹²、Michaelis Harald¹²

*Keigo Enya¹, Noriyuki Namiki², Masanori Kobayashi³, Jun Kimura⁴, Hirotomo Noda², Hiroshi Araki², Shingo Kashima², makoto Utsunomiya², Katsuhiko Ishibashi³, Shingo Kobayashi⁶, Shoko Oshigami⁵, Takahide Mizuno¹, Masanobu Ozaki¹, Toshihiko Yamawaki¹, Kazuyuki Touhara¹, Yoshifumi Saito¹, Shunichi Kamata⁷, Koji Matsumoto², Kiyoshi Kuramoto⁷, Sho Sasaki⁴, Satoru Iwamura⁸, Teruhito Iida⁹, Naofumi Fujishiro¹⁰, Masayuki Fujii¹¹, Hauke Hussmann¹², Kay Lingenauber¹², Reinald Kallenbach¹², Judit Jaenchen¹², Thomas Behnke¹², Christian Althaus¹², Simone DelTogno¹², Juergen Oberst¹², Horst-Georg Loetzke¹², Harald Michaelis¹²

1. 宇宙科学研究所、2. 国立天文台、3. 千葉工大、4. 大阪大、5. 工学院大、6. 放医研、7. 北海道大、8. MRJ、9. PLANET、10. アストロオプト、11. 明星電気、12. DLR

1. ISAS, 2. NAOJ, 3. CIT, 4. Osaka University, 5. Kogakuin University, 6. NIRS, 7. Hokkaido University, 8. MRJ, 9. PLANET, 10. astroopt, 11. Meisei Electric, 12. DLR

JUICE (the Jupiter Icy Moon Explorer) ミッション搭載ガニメデレーザー高度計 GALA (the Ganymede Laser Altimeter) の概要およびプロジェクト進捗について報告する。

JUICE は欧州が主導する 2022 年打ち上げ予定の L クラスミッションであり、GALA はその搭載科学観測機器のひとつである。JUICE において最も重要で詳細に観測する対象は、最大の衛星であり代表的な氷衛星であるガニメデである。GALA によって初めてガニメデ表面の起伏の定量的な情報や、天体全体の形状とその時間変化を測ることができる。こうした観測を通して、GALA は JUICE が掲げる『生命居住可能領域の探査』の本質的役割を担い、氷に支配された天体の進化の解明に不可欠な情報を史上初めて獲得することを目指している。

GALA では高度 500 km からの距離測定のため、波長 1064 nm、出力 17 mW のレーザーを射出し、ガニメデ表面からの反射光を口径 25 cm の受光望遠鏡で集光する。受信光は狭帯域フィルターを含む後置光学系を経て APD 検出器で受け、信号はアナログエレクトロニクスおよびそれ以降のモジュールへと出力される。

GALA はドイツ、日本、スイス、スペインによる国際プロジェクトである。GALA の開発において日本は後置光学系、PAD 検出器モジュール、およびアナログエレクトロニクスモジュール担当という大きな役割を果たす。本発表の申し込み時点（2017 年 2 月 16 日）現在、熱構造モデルを始めとするハードウェアの開発が始まっている。講演では学会開催時の最新のプロジェクト進捗状況を含めて報告する。

キーワード : JUICE、GALA、木星、ガニメデ、レーザー高度計

Keywords: JUICE, GALA, Jupiter, Ganymede, Laser altimeter

Variations of Io's volcanic activity seen in Jupiter's extended sodium nebula

*米田 瑞生¹、土屋 史紀²、鍵谷 将人²、De Kleer Katherine³、坂野井 健²

*Mizuki Yoneda¹, Fuminori Tsuchiya², Masato Kagitani², Katherine De Kleer³, Takeshi Sakanoi²

1. キーペンハウアー太陽物理学研究所、2. 東北大学大学院理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター、3. カリフォルニア大学バークレー校

1. Kiepenheuer Institute for Solar Physics, 2. Tohoku University, PPARC, 3. University of California, Berkeley

Io, which is one of the Galilean moons of Jupiter, is the most volcanically active body in the Solar System. Volcanic atmosphere is ionized and picked-up by Jupiter's co-rotating magnetic fields. This plasma distributes in Jupiter's inner magnetosphere and forms a structure called Io plasma torus. Major constituents in the torus are sulfur and oxygen ions, and most of these ions have emissions lines at UV wavelengths. Although this is a minor constituent, NaCl⁺ should be included in the torus since Cl⁺ ions was detected from the ground, and neutral sodium atoms show the most distinct emission at sodium D-line wavelengths in the torus. Not only in the torus, sodium emission can be observed also in a vast region whose extent is 1,000 Jupiter's radii around Jupiter. This structure is called Jupiter's sodium nebula, or Mendillo-sphere. This means these sodium atoms have enough velocity to escape from Jupiter's and Io's gravitational-spheres.

These sodium atoms seem to be originated from sodium chloride in Io's volcanic gas. This gas becomes Io's ionospheric plasma. Pick-up of these NaCl⁺ ions from Io's ionosphere and their subsequent destruction in the plasma torus produces fast from of neutral sodium atoms, then Jupiter's sodium nebula is formed. This sodium nebula can be observed from the ground using small telescopes.

We have been making observations of Jupiter's sodium nebula atop Heleakala in Maui island, Hawaii, and found the nebula shows variations that seem to correspond to those in Io's volcanic activity. Since 2013, we have been making the observations in conjunctions with the Hisaki and Juno spacecraft. The most distinct event during this campaign was seen in 2015. Other than this, several minor enhancements were observed.

In this presentation, we will show latest sodium data that is representative of Io's volcanism. Also, comparisons of the sodium data with Hisaki's torus data and Io's infrared observations will be shown.

キーワード：イオ、木星、火山

Keywords: Io, Jupiter, volcanism

ハイパースペクトルリモートセンシングによる月でのD型スペクトル探し A Survey of D-type Spectra on the Moon based on Hyperspectral Remote Sensing

*山本 聡¹、渡邊 誠一郎²、松永 恒雄¹

*Satoru Yamamoto¹, Sei-ichiro WATANABE², Tsuneo Matsunaga¹

1. 国立環境研究所、2. 名古屋大学

1. National Institute for Environmental Study, 2. Nagoya University

小惑星の中でアルベドが暗く、可視・近赤外スペクトルが赤く、特徴的な鉱物吸収を持たないものとして、D型小惑星が挙げられ、一般に有機物を含む岩石から成ると考えられている。火星の衛星であるフォボスとデイモスはD型スペクトルを示すことから、その成因としてD型小惑星捕獲説があるが、赤道面内円軌道化が困難であることなど問題が多い。一方、これら衛星の成因として火星への巨大衝突で生じた周火星破片円盤中で集積してできたとの説もあり、強い変成や宇宙風化を受けた岩石がD型スペクトルを示している可能性が指摘されている。また、フォボス表面には相対的に青い領域と赤い領域が混在することが知られているが、その物質的違いもわかっていない。さらに、月の高地領域で宇宙風化を受けたと考えられる斜長岩の露頭の示すスペクトルは、相対的に暗く、赤いスペクトルを示し、また特徴的な鉱物の吸収バンドを持たないということが、最近のリモートセンシング研究により明らかにされている。つまり、そもそもD型スペクトルの持つ天体が、どのような物質からできているのかについては、まだ良くわからないというのが現状であり、さらなる研究が必要とされている。

このような観点から、我々は豊富なスペクトルデータが蓄積されている月に着目し、そもそも月面上にD型に類似したスペクトルを示す領域があるのか、あるとすれば、それはどのように分布し、どのような特徴を示すのかについて、かぐや搭載の連続分光計であるスペクトルプロファイラ(SP)のデータを使って調査を進めている。本発表では、全SPデータを使ったデータマイニング解析により、月面上の暗い物質の分布とその特徴について議論を行う。

キーワード：リモートセンシング、ハイパースペクトル、月、火星、小惑星、かぐや/セレーネ

Keywords: Remote Sensing, Hyperspectra, Moon, Mars, Asteroid, Kaguya/SELENE

月の断層活動終了年代の推定方法の提案：一次元クレーター年代学の開発と適用例

A new method to constrain the termination ages of lunar tectonic structures

*嵩 由美子¹、山路 敦¹、佐藤 活志¹

*Yuko Daket¹, Atsushi Yamaji¹, Katsushi Sato¹

1. 京都大学理学研究科

1. Graduate School of Science, Kyoto University

月のテクトニクス史の解明は、そのテクトニクスの原因と考えられているマスコン・全球冷却・軌道進化を解明する上でも重要であると言える。テクトニックな構造（リッジ、リルやLobate scarp）の形成開始年代は、構造形成に伴って変形した溶岩体の堆積年代をクレーター年代学で見積もり、制約することが行われてきた（例えばLuchitta and Watkins, 1978 ; Daket et al., 2016）。また、形成終了年代は、変形したクレーターの年代による制約が行われてきた（例えばWatters et al., 2010）。クレーターの形成年代は、地形の風化度観察による定性的な方法が用いられてきた。そこで本研究では、より定量的に形成終了年代を見積もるための手法の提案・開発を行い、雨の海北西部に位置するリッジへ適用した。

本研究では、断層上に分布する非変形クレーターの線密度から、断層活動終了年代を見積もる方法を提案する。この新しく提案する方法を一次元クレーター年代学と呼ぶことにする。断層上には、断層で変形したクレーターと変形していないクレーターが混在している。変形したクレーターは、断層活動終了前に形成されたクレーターであり、断層上にあるにも関わらず変形していないクレーターは、断層活動終了後に形成されたクレーターである。つまり、月面のクレーター生成頻度が既知であるならば、断層上の非変形クレーターの線密度から断層活動終了後の経過年数を見積もることができる。

数値実験により模擬的な月面を再現し、一次元クレーター年代学で重要な二つの関係式、クレーター線密度と経過年数の関係(One-dimensional chronology function)とクレーターサイズと生成頻度の関係(One-dimensional production function)を推定した。また、提案した一次元クレーター年代学を雨の海北西部に位置する南北走向のリッジへ適用したところ、そのリッジの形成活動終了年代は約0.2 Gaであることがわかった。

キーワード：月、テクトニクス、形成年代

Keywords: Moon, Tectonics, Formation Age

焼結の効果を入れたダストアグリゲイトの3次元衝突シミュレーション 3D collision simulation of sintered dust aggregates

*長尾 整道¹、奥住 聡¹、城野 信一²、田中 秀和³

*Masamichi Nagao¹, Satoshi Okuzumi¹, Sin-iti Sirono², Hidekazu Tanaka³

1. 東京工業大学、2. 名古屋大学、3. 東北大学

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Nagoya University, 3. Tohoku University

ダストアグリゲイトは、粒子の衝突合体によって作られる粒子の集合体であり、微惑星の材料になる。ダストアグリゲイトが形成されるには、アグリゲイト同士がぶつかっても壊れないことが必要であり、破壊が起こる衝突速度についていくつかの3次元衝突シミュレーションが行われてきた。しかし、これまでの3次元衝突シミュレーションでは焼結の効果は考慮されていなかった。焼結とは、融点より少し低い温度で物質を温めることによりその物質の表面分子が移動する現象のことである。焼結が進むと、その物質は硬化する一方、塑性は失われて脆くなる。アグリゲイトの焼結を考慮した場合、粒子同士の接触面が太くなり、アグリゲイト同士をぶつけた時の挙動も変わってくる。現在、2次元での焼結の効果を入れたアグリゲイト衝突シミュレーションはすでに行われている。その研究結果は、焼結がおこるとアグリゲイトは壊れやすくなることを示している。

本研究では、焼結の効果を入れた3次元衝突シミュレーションを行った。その目的は、焼結がダストアグリゲイトの衝突に与える影響に関して、2Dと3Dの比較を行うことである。

まず、先行研究ですで行われた焼結の効果を入れた2次元衝突シミュレーションをもとに、3次元に適用できるモデルをたてた。ここで、2次元シミュレーションでは考慮されない、接触している2粒子がねじれる際にかかる力を導入した。シミュレーションでは、破壊が起こる速度について調べた。また衝突の結果接触点の数がどのように変化するかも見た。

3次元のシミュレーションの結果、焼結の進み具合により異なる、破壊が起きる衝突速度が得られた。焼結が進んだアグリゲイトの破壊が起きる速度は、焼結が起こっていないアグリゲイトのものとは比べ、低くなった。また、3次元シミュレーションの結果は、2次元シミュレーションと比べて定性的な傾向は似ているが、跳ね返りについての違いなども見られた。

本研究によって、3次元においても焼結がダストアグリゲイトの衝突に影響を与えることが示された。つまり、2次元での結果と同様に、焼結が起こるとアグリゲイトは、壊れやすくなるようである。

今後は、本稿では示していない、衝突によって生まれる破片の分布や衝突による圧縮の度合いについてさらに研究する必要がある。

キーワード：焼結、ダストアグリゲイト、シミュレーション

Keywords: Sintering, Dust aggregate, Simulation

高空隙率ダストアグリゲイトの温度上昇

Heating inside a highly-porous dust aggregate

*城野 信一¹

*Sin-iti Sirono¹

1. 名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University

惑星形成過程の初期において、ダスト微粒子の付着成長によりダストアグリゲイトが形成される。このダストアグリゲイトの空隙率は非常に高いものと考えられている。原始惑星系円盤の低温部では、ダスト微粒子の主成分はH₂O氷となる。このH₂O氷は結晶では無く、形成時はアモルファスであったと推定されている。ここで注目すべきは、アモルファス氷の熱伝導率は結晶のそれと比べて5桁ほど低いということである (Kouchi et al.1992)。ここから、それほど大きくないダストアグリゲイトにおいても、シリケートコアに含まれる放射性元素の崩壊による発熱で温度が上昇する可能性がある。そこで本研究では、輻射と分子移動による熱輸送を考慮し、氷ダストアグリゲイトの温度がどこまで上昇するのかを求めた。その結果、アモルファス氷の結晶化に伴う潜熱放出が進行し、温度がさらに上昇することが分かった。これに伴い、氷グレインの焼結も進行する。ここから、氷ダストアグリゲイトの力学的物性が大きく変化することが予想される。結晶化潜熱は氷の組成に依存するため、H₂O氷に含まれる不純物の量によってこの結果は変化する。

キーワード：ダストアグリゲイト、温度上昇、焼結

Keywords: dust aggregate, heating, sintering

原始惑星系円盤形成段階における氷ダストアグリゲイトの合体成長と内部密度進化

Collisional Growth and Internal Density Evolution of Icy Dust Aggregate in Disk Formation Stage

*本間 謙二¹、中本 泰史¹

*Kenji Homma¹, Taishi Nakamoto¹

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Planetesimals are building blocks of planets so it is important to investigate when and where planetesimals form in protoplanetary disks. However, there are some obstacles to form planetesimals from dust by collisional growth. One of the most serious barrier is the radial drift of macroscopic dust aggregates toward the central star due to the gas drag. On the other hand, it is suggested that highly porous dust aggregates break through the radial drift barrier. In the minimum mass solar nebula model, highly porous icy dust aggregates can grow to planetesimal-sized objects by direct collisional growth inside the disk (Okuzumi et al. 2012, Kataoka et al. 2013). However in these studies, it is not considered when the collisional growth begins in protoplanetary disks. If there is no process that suppresses collisional growth of icy dust aggregates, collisional growth may begin from the protoplanetary disk formation stage.

To investigate how the disk evolution in disk formation stage affects the collisional growth and internal density evolution of porous icy dust aggregates, we have calculated the evolution of radial size distribution of icy dust aggregates using the disk model including mass accretion from molecular cloud core developed by Nakamoto & Nakagawa (1994) and Hueso & Guillot (2005).

As a result, we find that icy aggregates cannot become highly porous as previous studies (Okuzumi et al. 2012, Kataoka et al. 2013), and they suffer the radial drift without growth to planetesimal-sized object. Because the small dust particles from molecular cloud core contribute the growth of aggregates in earlier phase of their growth, the aggregates cannot have many voids until they become large size that collisional compression works effectively. This result suggests that a process that suppresses collisional growth of icy dust aggregates in early stage of protoplanetary disks is present and the age of planetesimals would not be very young.

ダストからの摩擦反作用を考慮した原始惑星系円盤のガス・ダスト共進化 Dust and gas co-evolution with dust-gas backreaction in protoplanetary disks

*植田 高啓¹、金川 和弘²、武藤 恭之³、奥住 聡¹

*Takahiro Ueda¹, Kazuhiro Kanagawa², Takayuki Muto³, Satoshi Okuzumi¹

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系、2. シュチェチン大学、3. 工学院大学基礎・教養教育部門

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. University of Szezecin, 3. Division of Liberal Arts, Kogakuin University

Planetesimal formation has to overcome two major barriers. The first one is the radial drift barrier. Dust particles in protoplanetary disks feel a headwind from the surrounding disk gas. Due to the gas-dust friction, dust particles lose their angular momentum and drift inward. The second one is the fragmentation barrier. The collision velocity of dust particles can be too high for the particles to stick together. Recently, Gonzalez et al. (2017) have shown in their 3D SPH simulations that the backreaction from dust to gas affects the disk gas structure so that the dust particles can overcome these barriers. In their simulations, dust particles pile up due to the fragmentation or rapid growth. This dust concentration provides a positive torque for the surrounding gas and makes the gas moving outward. The modified gas structure prevents dust particles from drifting inward. However, Gonzalez et al. (2017) have only performed simulations with large viscosity and specific disk conditions, hence how the effect of the backreaction depends on disk parameters is still unclear.

Here we present analytic expressions of gas and dust velocities in protoplanetary disks including the effect of backreaction from dust to gas. These analytic formulas allow us to describe the dust and gas co-evolution including the effect of the frictional force from dust particles. The analytic formulas suggest that the backreaction forces the gas move outward even if the dust-to-gas mass ratio is lower than the standard value of 10^{-2} , as long as the gas viscosity is small. We also present the results of 1D and 2D dust-gas two-fluid simulations to demonstrate the backreaction changes their evolution. We find that when the viscosity is small or the dust-to-gas mass ratio is high, the outward motion of the gas provides a positive surface density gradient in some part of the disk.

キーワード：原始惑星系円盤

Keywords: protoplanetary disks

低密度ダスト円盤の重力不安定による岩石微惑星形成

Rocky Planetesimal Formation by Gravitational Instability of a Porous Dust Disk

*辰馬 未沙子^{1,2}、道越 秀吾³、小久保 英一郎^{2,1}*Misako Tatsuuma^{1,2}, Shugo Michikoshi³, Eiichiro Kokubo^{2,1}

1. 東京大学、2. 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台、3. 筑波大学

1. The University of Tokyo, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. University of Tsukuba

Recently, it is proposed that porous dust aggregates are formed by pairwise accretion of silicate dust aggregates, which can avoid the radial drift and fragmentation barriers during their growth if the dust monomer size is on the order of nm [1]. Indeed, it is suggested that dust monomers in protoplanetary disks are not same as sub μm -sized interstellar dust grains, but they have experienced evaporation and condensation [1]. Moreover, matrix grains in primitive meteorites [2] and interplanetary dust particles [3] contain nm-sized grains.

We investigate the gravitational instability (GI) of the disk consisting of porous dust aggregates of nm-sized silicate monomers. We calculate the equilibrium random velocity of the dust aggregates considering gravitational scattering and collisions among them, gas drag, and turbulent stirring and scattering according to Michikoshi & Kokubo (2016) [4], and then evaluate Toomre's stability parameter Q [5]. The condition for the GI is defined as $Q < 2$ taking into account the non-axisymmetric mode [6]. We find that for the minimum mass solar nebula (MMSN) model at 1 au, the disk becomes gravitationally unstable as the dust aggregates evolve through gravitational compression if turbulent strength is $\alpha < 5 \times 10^{-5}$. We also derive the critical disk mass and dust-to-gas ratio for the GI as a function of α .

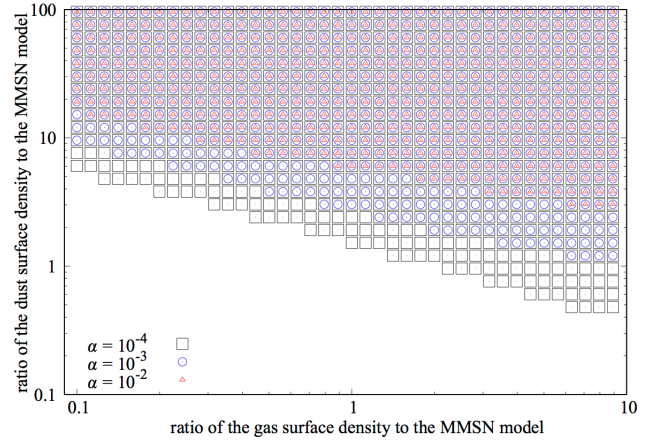
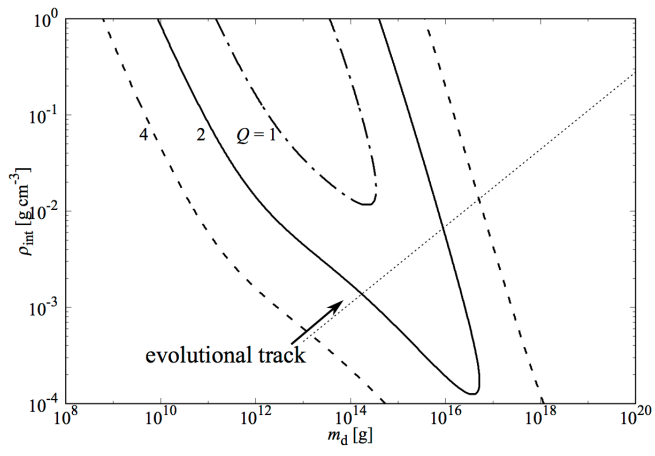
References: [1] Arakawa, S., & Nakamoto, T. 2016, *ApJL*, 832, L19 [2] Toriumi, M. 1989, *Earth and Planetary Science Letters*, 92, 265 [3] Keller, L. P., & Messenger, S. 2011, *GeoCoA*, 75, 5336 [4] Michikoshi, S., & Kokubo, E. 2016, *ApJL*, 825, L28 [5] Toomre, A. 1964, *ApJ*, 139, 1217 [6] Toomre, A. 1981, in *Structure and Evolution of Normal Galaxies*, ed. S. M. Fall & D. Lynden-Bell, 111–136

Figure 1. (left) Toomre's Q in the $m_d - \rho_{\text{int}}$ plane at 1 au for the MMSN disk with $\alpha = 10^{-5}$, where m_d is the mass and ρ_{int} is the mean internal density of the dust aggregates. The dash-dot, solid, and dash contours correspond to $Q = 1, 2,$ and 4 , respectively. The dot line shows the evolutonal track of dust aggregates.

Figure 2. (right) Disk parameters for the GI at 1 au. The red triangle, blue circle, and black square shows $\alpha = 10^{-2}, 10^{-3},$ and 10^{-4} , respectively.

キーワード：微惑星形成、原始惑星系円盤、重力不安定、低密度ダスト

Keywords: planetesimal formation, protoplanetary disk, gravitational instability, porous dust aggregate



Condition of the efficient formation of dense dust clumps due to the streaming instability

*瀧 哲朗¹、長谷川 稜²、藤本 正樹²

*Tetsuo Taki¹, Ryo Hasegawa², Masaki Fujimoto²

1. 自然科学研究機構国立天文台、2. 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

1. National Astronomical Observatory of Japan, 2. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Planetesimal formation is the key process for the planetary system formation. There are, however, many theoretical difficulties to form planetesimals. The fragmentation barrier is one of the most serious problem for planetesimal formation (Blum & Munch, 1993). The maximum size of dust particles is limited to about millimeters to centimeters by this barrier. We need a model to connect these small dust particles or pebbles to planetesimals.

The streaming instability is one of the promising process to form planetesimals (Youdin & Goodman, 2005; Johansen et al., 2012). This instability can form the dense dust clumps consisting of millimeter- or centimeter-sized particles. These dense dust clumps are sometimes gravitationally bound and are considered to form planetesimals by subsequently self-gravitational collapse.

Whether the streaming instability can form dense dust clumps depends on the particle size and the dust-to-gas ratio of protoplanetary disks. Carrera et al. (2015) conducted a parameter survey to find the critical dust-to-gas ratio for strong clumping due to the streaming instability at each particle size.

In this study, we focus on the efficiency of the formation of dense dust clumps. We conducted 2D simulations of dust-gas system like Carrera et al. (2015). We investigated how much dust particles contribute to clumping in the parameter space where indicated as being appropriate for formation of dense dust clumps by Carrera et al. (2015). Then we compared the mass of the entire dust particles that contributed to clumping with the mass of solar system planets, looking for conditions suitable for solar system formation. We found that a sufficient amount of particles contribute to clumping when dust-to-gas ratio is 0.04 even though the dust particles have relatively small radius about 1 mm.

キーワード：原始惑星系円盤、微惑星形成、惑星系形成

Keywords: Protoplanetary disk, Planetesimal formation, Planetary system formation

コンドリュールと高空隙率マトリックスの共集積 Co-Accretion of Chondrules and Fluffy Matrices

*荒川 創太¹、中本 泰史¹

*Sota ARAKAWA¹, Taishi Nakamoto¹

1. 東京工業大学

1. Tokyo institute of technology

コンドリュールはコンドライト隕石の主要構成物である。すなわち、我々の太陽系において、岩石微惑星はコンドリュールの集積によって形成されたはずである。しかしながら、どのようにコンドリュールを中心とする微粒子が微惑星へと成長したのかは未だ明らかになっていない。

隕石の観察事実から、コンドライト隕石はそのマトリックスにナノ粒子を含んでいることがわかっている。これらのナノ粒子は結合力が強いので、ダスト粒子の集積過程において重要な役割を果たすことが期待される。そこで我々は、コンドリュールと、非常に低密度に進化したマトリックス粒子の集合体との、同時集積による岩石微惑星形成シナリオを提示した。

計算の結果、我々はこのシナリオが微惑星形成における中心星落下問題や衝突破壊問題を回避し微惑星を形成することが可能であることを確認した。しかし、低密度なマトリックスからコンドリュールが飛び出し、コンドリュールを保持できない、つまり、「コンドライト隕石的」な微惑星を形成することは困難であるという問題も同時に明らかになった。

キーワード：岩石微惑星、コンドリュール

Keywords: Rocky planetesimal, Chondrule

磁場駆動円盤風がタイプI惑星移動へ与える影響

Effects of magnetically-driven disk winds on type I migration

*荻原 正博¹、小久保 英一郎¹、鈴木 建²、Morbideilli Alessandro³、Crida Aurélien³

*Masahiro Ogihara¹, Eiichiro Kokubo¹, Takeru Suzuki², Alessandro Morbidelli³, Aurélien Crida³

1. 国立天文台、2. 東京大学、3. コートダジュール天文台

1. National Astronomical Observatory of Japan, 2. University of Tokyo, 3. Observatoire de la Cote d'Azur

Magnetically-driven disk winds would alter the surface density slope of gas in the inner region of a protoplanetary disk ($r < 1$ au), which in turn affects migration of low-mass planets (type I migration). Recently, the effect of disk wind torque has been considered, showing that it would carve out the surface density of the disk from the inside out.

The direction and rate of type I migration depend on the surface density slope of gas and saturation of the corotation torque. We investigate migration of low-mass planets in disks evolving via disk winds. In MRI-active disks, the surface density slope can be flat in the inner region, and migration of super-Earth mass planets is suppressed. In MRI-inactive disks, in which a positive surface density slope can be achieved, planets in the sub-Earth mass range may undergo outward migration.

It has also been pointed out that the wind torque induces global gas flows (wind-driven accretion), which may modify the desaturation effect of the corotation torque. Then, we investigate effects of wind-driven accretion (global gas flows) on type I migration. In MRI-inactive disks, in which the wind-driven accretion dominates the disk evolution, the gas flow at the midplane plays an important role. If this flow is large, the corotation torque is efficiently desaturated. Then, the fact that the surface density slope can be positive in inner region due to the wind torque can generate an outward migration region extended to super-Earth mass planets. In this case, we observe that no planets fall onto the central star in N -body simulations with migration forces imposed to reproduce such migration pattern.

キーワード：磁場駆動円盤風、タイプI移動、原始惑星系円盤、N体計算

Keywords: Magnetically-driven disk winds, Type I migration, Protoplanetary disk, N-body simulation

周惑星円盤内でのペブルアクリーションによる衛星形成

Satellite formation via pebble accretion in circumplanetary disks

*芝池 諭人¹、奥住 聡¹、佐々木 貴教²、井田 茂³*Yuhito Shibaïke¹, Satoshi Okuzumi¹, Takanori Sasaki², Shigeru Ida³

1. 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、2. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室、3. 東京工業大学 地球生命研究所
 1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Astronomy, Kyoto University, 3. Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

木星の四つの巨大な氷衛星すなわち「ガリレオ衛星」は、木星の周惑星円盤の中で形成されたと考えられている。Shibaïke et al. in prep. においては、定常な周惑星円盤内でのダストの合体成長と木星への落下（ドリフト）を計算し、微衛星の形成条件を調べた。その結果、ダストの合体成長によって周惑星円盤内に微衛星が形成されるためには、周惑星円盤に流入するダスト/ガス質量フラックス比が1以上でなければならず、それ以外の場合はダストは全て木星に落下してしまうとわかった。しかし、この条件の達成は困難である。

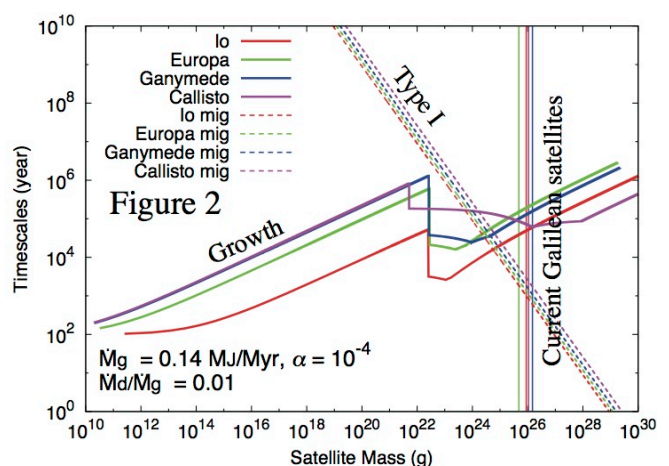
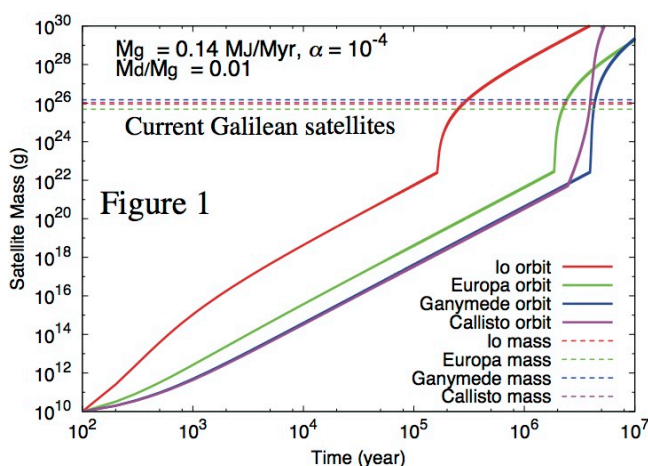
一方で、近年惑星形成において、少数の原始惑星が原始惑星系円盤遠方からドリフトしてきたcmサイズのダスト（ペブルと呼ぶ）を大量に集積し急速に惑星まで成長する、「ペブルアクリーション」モデルが注目されている。

本研究では、この「ペブルアクリーション」モデルを衛星形成に応用した。周惑星円盤内に流入したダストが、成長及びドリフトしつつ原始衛星に集積した場合の、原始衛星の成長を計算した。図1は、ガスの流入質量フラックスが $0.14 M_J/\text{Myr}$ 、乱流の強さ $\alpha=10^{-4}$ の粘性降着円盤内での、現在のガリレオ衛星の軌道を周回する原始衛星の成長を示す。周惑星円盤に流入するダスト/ガス質量フラックス比が0.01であっても、 10^5 - 10^7 年で現在のガリレオ衛星のサイズ($\sim 10^{23}$ kg)にまで成長できる可能性があることがわかった。図2は、原始衛星の成長タイムスケールとType I移動による原始惑星の落下タイムスケールを示す。およそ 10^{21} kgにまで成長した段階で、成長のタイムスケールがType I移動のタイムスケールよりも長くなることから、原始衛星は木星に落下してしまうことが示唆された。

これらの推定は定常状態を仮定したシンプルな計算手法を用いている。講演においては、非定常状態、すなわち周惑星円盤や原始衛星軌道の時間進化についても議論する予定である。

キーワード：衛星、ペブルアクリーション、原始衛星、周惑星円盤、ガリレオ衛星、Type I移動

Keywords: Satellite, Pebble accretion, Protosatellite, Circumplanetary disk, Galilean satellites, Type I migration



Terrestrial magma ocean origin of the Moon: A numerical study of a giant impact incorporating the difference of the equations of state for liquids and solids

*細野 七月^{1,2}、唐戸 俊一郎³、牧野 淳一郎^{4,2,5}

*Natsuki Hosono^{1,2}, Shun-ichiro Karato³, Junichiro Makino^{4,2,5}

1. 京都大学、2. 理化学研究所、3. Yale大学、4. 神戸大学、5. 東京工業大学

1. Kyoto University, 2. AICS, RIKEN, 3. Yale University, 4. Kobe University, 5. Tokyo Institute of Technology

The origin of the Moon is one of the most important topics in the planetary science and geophysics.

Since the giant impact (GI) scenario was suggested, it has been believed that the Moon was formed by the impact of relatively large object (Mars-size) to a growing Earth.

Recently, however, the GI has been challenged; the isotope ratios of particular elements show nearly identical values for the bulk component of the Earth and that of the Moon.

This means that the Moon should have been formed from the proto-Earth originated materials.

However, previous numerical simulations of the GI concluded that the Moon was formed from the impactor.

In order to resolve this problem, several modified models to the GI have been suggested.

However, most of them have difficulties to explain much higher angular momentum and the dissimilarity of the FeO content.

Recently, a new model, to form the Moon from the Earth's magma ocean, is suggested.

According to this scenario, the majority of heating occurs in the terrestrial magma ocean, which results in the ejection of the target-originated materials.

Since the formation of the FeO-rich magma ocean is a natural consequence of the formation of the proto-Earth, this scenario can also explain the dissimilarity of the FeO content.

We carried out the numerical simulations of GI in which the magma ocean is modeled with an equation of state for liquid.

We show the comparisons of the GI between liquid equation state and solid one.

地球型惑星形成巨大衝突ステージにおける微惑星の衝突・破壊の重要性 Collisional fragmentation of planetesimals in the giant impact stage

*小林 浩¹、佐藤 雄太郎¹

*Hiroshi Kobayashi¹, Yutaro Sato¹

1. 名古屋大学理学研究科

1. Department of Physics, Nagoya University

地球型惑星形成最終ステージでは、原始惑星系円盤の中で形成された火星サイズの原始惑星が、原始惑星円盤の散逸後に衝突・合体をくりかえし地球や金星に成長していく。原始惑星の軌道が歪み大きな離心率を持たないと衝突が引き起こされないため、この過程で形成される地球型惑星の離心率は非常に高くなってしまふ。そのため、形成後に現在の太陽系の地球型惑星の離心率まで下げる機構が働いたと期待されており、残存微惑星による力学的摩擦が考えられている。力学的摩擦により惑星の離心率が下がる時、微惑星の離心率は非常に高くなるため、微惑星同士の衝突はとて激しくなる。その結果、微惑星の衝突・破壊はさけられない。破壊された微惑星は衝突カスケードにより速やかにミクロンサイズまで小さくなり、輻射圧で吹き飛ばされるため、微惑星の総質量は破壊によって減少していく。力学的摩擦は微惑星の総質量が多いほど効くので、破壊が起きると力学的摩擦の効果が弱くなっていく。これまでの研究では、微惑星の破壊を考慮した力学的摩擦のN体シミュレーションは、破壊により粒子数が増えてしまうため難しかった。本研究ではN体シミュレーションに統計的手法を組み合わせることで、微惑星の破壊を取り扱えるN体シミュレーション手法を確立した。また、このシミュレーションにより、地球型惑星の離心率を下げるために必要な条件を導出した。さらにこの結果から期待される、新たな地球型惑星形成シナリオについて議論したい。

キーワード：惑星形成、衝突・破壊

Keywords: Planet formation, collisional fragmentation

地球型惑星形成：水星形成の条件に迫る

Terrestrial Planet Formation: Constraining the Formation of Mercury

*ソフィアリカフィカ パトリック¹、伊藤 孝士²

*Patryk Sofia Lykawka¹, Takashi Ito²

1. 近畿大学 総合社会学部 (天文学分野)、2. 国立天文台

1. Astronomy Group, School of Interdisciplinary Social and Human Sciences, Kindai University, 2. National Astronomical Observatory of Japan

(英文のアブストラクトをご参照ください)

キーワード：惑星形成、内側太陽系、地球型惑星、水星、太陽系

Keywords: planet formation, inner solar system, terrestrial planets, Mercury, solar system

木星衛星ガニメデの画像データの再解析 Re-analysis of images of GANYMEDE

*平田 直之¹

*Naoyuki Hirata¹

1. 神戸大学

1. Kobe University

ガニメデは木星の衛星である。ガニメデは、これまでVoyager探査機とガリレオ探査機によって、表面の画像が多く得られた。これらを利用することで、Dark TerrainやBright Terrainのような大きな構造の有無や20km以上のクレーターの全球分布を調べることはできる。一方で、ほとんどの地域が1km/pixel以下の解像度しかない。それゆえ、5km以下のクレーターやFurrows、Groovesのような構造の全球分布を調査することはできない。こういったより細かな構造を解析するべく、既存画像データの再解析に取り組んだ。複数枚の画像を解析することで、高解像度化やノイズの低減ができることがしられている。これらの手法を利用し、これまで見えづらかった構造をクリアに調査できる可能性があることがわかった。

キーワード：ガニメデ

Keywords: GANYMEDE

隕石重爆撃期の地球型惑星大気の進化：元素分配の寄与

Atmospheric Evolution of the Terrestrial Planets during the Heavy Bombardment: the Effects of the Element Partitioning

*櫻庭 遥¹、黒川 宏之²

*Sakuraba Haruka¹, Hiroyuki Kurokawa²

1. 東京工業大学、2. 東京工業大学 地球生命研究所

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Earth-Life Science Institute

The atmospheres on terrestrial planets are believed to be formed as a consequence of the impact degassing and erosion of volatiles during the Heavy Bombardment Period. Despite their common origin, there are distinct gaps in the noble gas abundances in the atmospheres on Venus, Earth, and Mars; compared to Earth, Venus is enriched and Mars is depleted in noble gases roughly by two orders of magnitude, respectively. The origin of these gaps has been poorly understood.

A possible mechanism to create these gaps is the partitioning of elements in the different surficial environments: the runaway greenhouse on Venus, the carbon cycle on Earth, and the CO₂-ice formation on Mars. Although noble gases are mainly partitioned into the atmosphere, the distinct environments on the three planets create the differences in the noble gas concentrations in their atmospheres, leading the differences in the escape rates of noble gases due to the impact erosion.

We calculated the evolution of early atmospheres during the Heavy Bombardment Period by solving deterministic differential equations. Atmospheric components are, H₂O, CO₂, N₂, and noble gases. Because the abundances of noble gases are small, we treated both N₂ and noble gases as a component N₂ in our numerical model. The new idea of this work is to consider the partitioning of elements between atmosphere and other reservoirs. Whereas all volatiles are partitioned into atmosphere on Venus, H₂O and CO₂ are partitioned into oceans and carbonates on Earth and into ice on Mars. We set the upper limits of the partial pressures of H₂O and CO₂ considering the phase equilibrium and the steady state of the carbon cycle. Impact erosion of atmospheres and impactors are taken into account by using models of Svetsov (2000) and Shuvalov (2009). We assumed carbonaceous chondrites from the main asteroid belt as impactors. Total masses of impactors correspond to 1% of the planetary masses.

We found that the resulting abundances of N₂ and noble gases differ only by ~10% among the three planets. This is caused by the dominance of the replenishment of atmophiles over the erosion. The small differences in the abundances were due to the differences in the surface temperature and in the size of planets. The partitioning of elements was found to be less important for the abundances of N₂ and noble gases in the assumed conditions, where the delivery of atmophiles dominates. We also investigated the dependences on the impact erosion models, impactor size distributions, and types of impactors. Based on the results, we discuss the implications for the origins of volatiles and early planetary environments at ~4 Ga.

キーワード：隕石重爆撃期、衝突脱ガス、希ガス

Keywords: Heavy Bombardment Period, impact erosion, noble gases

水素に富む大気をもつ地球型惑星の固化と初期表層環境

Effects of hydrogen on thermal evolution of magma ocean and early surface environment

*濱野 景子¹、玄田 英典¹、阿部 豊²

*Keiko Hamano¹, Hidenori Genda¹, Yutaka Abe²

1. 東京工業大学 地球生命研究所、2. 東京大学 地球惑星科学専攻

1. Earth-Life Science Institute (ELSI), Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

形成の段階で巨大衝突を経験した地球型惑星は大規模に熔融し、マグマの海（マグマオーシャン）に覆われると予想される。揮発性物質を獲得していた場合、マグマオーシャン上には大気が形成され、その保温・温室効果は惑星の固化速度に影響を与える。この大気とマグマオーシャンの共進化問題は、強い温室効果気体である水蒸気・二酸化炭素からなる酸化的な大気について検討されてきた(e.g. Elkins-Tanton 2008, Hamano et al. 2013, 2015, Lebrun et al. 2013)。一方で、円盤ガスの捕獲や巨大衝突時に撒き散らされた金属鉄との反応など、惑星がもつ初期大気組成の酸化還元度は多様であることが予想される。

本研究では、大気の酸化還元状態がマグマオーシャンの熱収支にどのような影響を与えるのかを明らかにするため、水素-水蒸気大気の新灰色放射対流平衡計算を行った。高温な地表温度では、水蒸気大気では惑星放射は射出限界を下回らない。一方で、水蒸気分圧を一定とし比較すると、惑星放射は水素のモル分率とともに減少する。これは、水蒸気の気柱質量の増加と水素の保温効果によって生じる。惑星放射の減少は温度が低いほど顕著である。脱ガスにより大気中の主成分が水蒸気になるまで、マグマオーシャンからの熱フラックスは低下することがわかった。本発表では放射対流平衡計算の結果と、海洋形成時期・固化後の初期表層環境への影響を議論する。

キーワード：マグマオーシャン、還元的な大気、海洋形成、初期表層環境

Keywords: Magma ocean, Reducing atmospheres, Formation of oceans, early climate and surface environment

火星は厚いCO₂大気を持っていなかった？マンガン酸化実験から探る初期火星の大気組成

LOW-CO₂ ATMOSPHERE ON EARLY MARS INFERRED FROM MANGANESE OXIDATION EXPERIMENTS.

*今村 翔子¹、野田 夏実¹、関根 康人¹、上杉 宗一郎¹、栗栖 美菜子¹、宮本 千尋¹、田畑 陽久¹、村上 隆¹、高橋 嘉夫¹

*Shoko Imamura¹, Natsumi Noda¹, Yasuhito Sekine¹, Soichiro Uesugi¹, Minako Kurisu¹, Chihiro Miyamoto¹, Haruhisa Tabata¹, Takashi Murakami¹, Yoshio Takahashi¹

1. 東京大学

1. University of Tokyo

Introduction

Both CO₂ and O₂ are important atmospheric components for climate and chemical evolution on early Mars. Several lines of geological and geomorphological evidence show that early Mars has been once warm sufficient to hold liquid water on the surface at least episodically in the late Noachian and early Hesperian [1]. Although early Mars would not be warmed sufficiently by CO₂ alone, climate models presume the presence of a thick CO₂ atmosphere to decrease outgoing longwave radiation and to cause effective collision-induced absorption. However, pCO₂ on early Mars is poorly constrained by geochemical evidence thus far. On the other hand, the Curiosity rover has discovered Mn oxides in fracture-filling materials in sandstones of the Kimberley region of the Gale crater [2]. Given pO₂ capable for deposition of Mn oxides (pO₂ > ~0.01 bar) [3], the findings of Mn oxides indicate that early Mars had a substantial O₂ in the atmosphere.

The present study aims to further constrain the composition of early Mars' atmosphere, especially the CO₂/O₂ mixing ratio, at the time when the Mn oxides were formed. We performed laboratory experiments to generate Mn precipitates from Mn²⁺ in solutions by introducing CO₂/O₂ gas mixtures. We investigated the compositions of Mn precipitates under various compositions of CO₂/O₂.

Materials & Methods

The Mn²⁺ starting solution with 20 mM and pH 8–9 was prepared in an Ar-purged glovebox, where pO₂ remained < 10⁻¹² bar. The starting solution was deaerated by pure Ar gas for more than 6 hours prior to the use. Then, we introduced gas mixtures of pure CO₂ and artificial air (N₂/O₂ = 4; pCO₂ < 1 ppm) into the starting solution at four different mixing ratios (CO₂/O₂ = 2, 0.2, 0.02, and artificial air) in the glovebox. Note that MnO₂ is thermochemically stable under all of these conditions. Solution samples were collected in several times during the experiments. The samples were filtered through a membrane with pore size of 220 nm. After the reactions, Mn precipitates were collected by filtering the rest of the solutions using a membrane with 220 nm. Mn²⁺ concentrations of the filtered solution samples were measured using inductively-coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). The collected Mn precipitates were analyzed with X-ray absorption fine structure (XAFS) and X-ray diffraction (XRD).

Results

Our results of the ICP-AES analysis show that Mn²⁺ concentrations in the filtered solutions decrease over reaction time, which indicate that a part of dissolved Mn²⁺ was converted into solid precipitates. Despite both the wide range in CO₂/O₂ ratios and thermochemical stability of MnO₂ under the experimental conditions, the results of XAFS analyses show that all of the Mn solid precipitates formed under these

conditions are mainly composed of Mn carbonate, namely MnCO_3 . These results are consistent with our XRD results. Our results show that MnCO_3 precipitated before the formation of MnO_2 even very low CO_2/O_2 of 0.02. This suggests that kinetics of formation of MnCO_3 and Mn oxides are the critical factor. On the other hand, the major peaks of the XANES spectra for the collected solid precipitates at $\text{CO}_2/\text{O}_2 = 0$ (namely, pure artificial air) would be a mixture of Mn oxides and Mn(OH)_2 .

Discussion

Our results show that, in order to form MnO_2 in Mn^{2+} solutions by reactions with CO_2/O_2 gas mixtures, the CO_2/O_2 ratio should be lower than 0.02. Assuming $p\text{O}_2$ of $\sim 0.01\text{--}0.2$ bar, which is capable to form and preserve MnO_2 in sediments [3], the observations of both a lack of MnCO_3 and presence of MnO_2 in Gale infer that $p\text{CO}_2$ on early Mars would have been less than 0.004 bar, or 4 mbar. This implies that early Mars may have possessed a low- CO_2 and high- O_2 atmosphere.

[1] Ehlmann, B.L. et al. (2011). *Nature* 479, doi:10.1038/nature10582.

[2] Lanza, N.L. et al. (2016). *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7398-7407.

[3] Shaw, T. et al. (1990). *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 1233-1246.

キーワード：火星、惑星進化、大気組成

Keywords: Mars, planetary evolution, atmospheric composition

G, K, M型星でのスーパーフレア Superflares on G-, K-, M- type stars

*野津 湧太¹、前原 裕之²、行方 宏介¹、野津 翔太¹、幾田 佳¹、本田 敏志³、野上 大作¹、柴田 一成⁴
*Yuta Notsu¹, Hiroyuki Maehara², Namekata Kosuke¹, Shota Notsu¹, Kai Ikuta¹, Satoshi Honda³,
Daisaku Nogami¹, Kazunari Shibata⁴

1. 京都大学理学研究科宇宙物理学教室、2. 国立天文台岡山天体物理観測所、3. 兵庫県立大学天文科学センター、4. 京都大学理学研究科附属天文台

1. Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Okayama Astrophysical Observatory, NAOJ, 3. Center for Astronomy, University of Hyogo, 4. Kwasan and Hida Observatories, Graduate School of Science, Kyoto University

Flares on G, K, M-type stars are sudden releases of the magnetic energy stored around the starspots, like solar flares. Recent high-precision photometry from space shows that "superflares", which are $10\text{-}10^4$ times more energetic than the largest solar flares, occur on many G, K, M-type stars including Sun-like stars (slowly-rotating G-type main-sequence stars like the Sun) (e.g., Maehara et al. 2012 Nature). Such superflares emit harmful UV/X-ray radiation and high-energy particles such as protons, and may suggest that exoplanet host stars have severe effects on the physical and chemical evolution of exoplanetary atmospheres (cf. Segura et al. 2010 Astrobiology, Takahashi et al. 2016 ApJL). It is then important to know the detailed properties of such superflare events for considering the habitability of planets.

In this presentation, we present statistical properties of superflares on G, K, M-type stars on the basis of our analyses of Kepler photometric data (cf. Maehara et al. 2012 Nature, Shibayama et al. 2013 ApJS, Notsu et al. 2013 ApJ, Maehara et al. 2015 EPS). We found more than 5000 superflares on 800 G, K, M-type main-sequence stars, and the occurrence frequency (dN/dE) of superflares as a function of flare energy (E) shows the power-law distribution with the power-law index of $-1.8\sim-1.9$. This power-law distribution is consistent with that of solar flares.

Flare frequency increases as stellar temperature decreases. As for M-type stars, energy of the largest flares is smaller ($\sim 10^{35}$ erg) compared with G,K-type stars, but more frequent "hazardous" flares for the habitable planets since the habitable zone around M-type stars is much smaller compared with G, K-types stars.

Flare frequency has a correlation with rotation period, and this suggests young rapidly-rotating stars (like "young Sun") have more severe impacts of flares on the planetary atmosphere (cf. Airapetian et al. 2016 Nature Geoscience). Maximum energy of flares and flare frequency also depends on the area of starspots, and this suggest existence of large starspots is important factor of superflares.

The statistical properties of superflares discussed here can be one of the basic information for considering the impacts of flares on planet-host stars.

キーワード：フレア、ケプラー宇宙望遠鏡、ハビタビリティ

Keywords: flare, Kepler, habitability

The effect of spectral type of central star on climate and climatic evolution of the Earth-like planets in habitable zone

*門屋 辰太郎¹、田近 英一¹

*Shintaro Kadoya¹, Eiichi Tajika¹

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 Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

The climate of the Earth depends on both insolation and the amount of greenhouse gases, especially CO₂, in the atmosphere. Owing to a negative feedback mechanism in carbonate-silicate geochemical cycle system (so called the “Walker feedback”), the amount of CO₂ in the atmosphere ($p\text{CO}_2$) is regulated so that the climate of the Earth may be warm (i.e., the climate is warm enough for liquid water to exist on the surface of the Earth). However, if the CO₂ degassing rate via volcanic activities is below some critical value, the Walker feedback mechanism cannot maintain a sufficient amount of CO₂, and the Earth becomes globally ice-covered. Here, the critical value of the CO₂ degassing rate is a critical condition under which the Earth becomes globally ice-covered owing to a large ice-cap instability. Since albedo of ice depends on the spectrum of the insolation, the critical condition for the Earth to be globally ice-covered is expected to be different from previous estimates when the central star is different from the Sun. The difference in the spectral type of the central star due to different mass also results in different evolutionary timescale of its luminosity which affects the habitable zone (HZ) around it. In this study, we examine the climate and the climatic evolution of the Earth-like planets around different-mass stars. We use a one-dimensional energy balance model coupled with a carbon cycle model to estimate the climate, and the planetary albedo model is improved in order to examine the effect of the difference in the spectrum of the insolation from the central star. The evolution of the climate is examined based on the evolutions of CO₂ degassing rate and insolation, which are estimated by a parameterized convection model coupled with a mantle degassing model and a luminosity evolution model, respectively. Four types of stars (i.e., M-, K-, G-, and F-type stars) are considered.

Comparing stars with different mass (e.g., M- and G-type stars), $p\text{CO}_2$ of an Earth-like planet around a light star (i.e., the M-type star) tends to be lower than that of an Earth-like planet around a heavy star (i.e., G-type star) for the same luminosity and CO₂ degassing rate. This is because the peak wavelength of the insolation of the light star is longer than that of the heavy star, and because the ice absorbs longer-wavelength radiation more than shorter-wavelength radiation. As a result, the critical CO₂ degassing rate is less in the inner region of the HZ around the light star than in the region around the heavy star. However, when the Earth-planet is in the outer region of the HZ, and $p\text{CO}_2$ is high owing to the Walker feedback, the critical CO₂ degassing rate of the Earth around the light star is almost the same as that of the Earth around the heavy star especially in the outer region of the HZ because the surface albedo does not affect the planetary albedo owing to the dense atmosphere. Thus, regardless of the spectral type of the central star, the timescale for the warm climate of Earth-like planet is about 4 billion years which depends, not on the insolation, but strongly on the evolution of the CO₂ degassing rate of the planet. These results indicate that we should search for the inner region of the HZ around young stars to find Earth-like habitable planets.

キーワード：系外惑星、炭素循環、ハビタブル惑星

Keywords: Exoplanet, Carbonate-silicate geochemical cycle, Habitable planet

スーパーアースGJ1214bにおける鉱物雲のモデル化: 大気金属量への示唆

Modeling Dust Cloud Structure in Super-Earth GJ1214b: Implications for the Atmospheric Metallicity

*大野 和正¹、奥住 聡¹

*Kazumasa Ohno¹, Satoshi Okuzumi¹

1. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, Tokyo Institute of Technology

Recent transit observations have revealed that many exoplanets have featureless spectra. Such spectra indicate extremely metal-enhanced atmospheres or the presence of opaque clouds at high altitude. Although thick high-altitude clouds prevent us from directly probing the atmosphere beneath them, their existence might provide us some information about the dynamics and/or composition of the lower atmosphere. However, it is still unclear how atmospheric dynamics and composition would affect cloud structure in exoplanets because most previous studies neglected or at least parameterized the growth microphysics of condensate particles.

In this study, we aim to understand the relationship between the atmospheric metallicity and the vertical extent of dust clouds. Recently, we have developed a new cloud model that takes into account the vertical transport of condensate particles and particle growth via both condensation and coalescence (Ohno & Okuzumi 2017). With our cloud model, we examine the vertical distributions of dust clouds in GJ1214b as a function of atmospheric metallicity.

We find that the cloud top reaches beyond 10^{-3} bar for atmospheric metallicities of $10\times$ solar abundance, but does not reach the height of 10^{-5} bar for all choices of the model parameters. From timescale arguments, we find that the dust cloud structure can be classified into three regimes: *Condensation-Diffusion regime*, *Coagulation-Diffusion regime*, and *Coalescence-Sedimentation regime*. The maximum height of the cloud top occurs at the transition of the *Coagulation-Diffusion* and *Coalescence-Diffusion* regimes. Comparison between the maximum height of the cloud top predicted from our model and the height indicated from the observations of GJ1214b rules out atmospheric metallicities of $1-100\times$ solar abundance for this particular exoplanets. Consequently, our results suggest that the atmosphere of GJ1214b is depleted in hydrogen as suggested by previous independent modeling, or the cloud in GJ1214b is composed of haze particles produced by photochemical reactions at high altitude.

キーワード：スーパーアース、鉱物雲、大気金属量

Keywords: super-Earth, Dust Clouds, Atmospheric Metallicity

スーパーアースのマンテル対流シミュレーション：惑星サイズ依存性 The structure of mantle convection in super-Earths of various sizes

*宮腰 剛広¹、亀山 真典²、小河 正基³

*Takehiro Miyagoshi¹, Masanori Kameyama², Masaki Ogawa³

1. 海洋研究開発機構、2. 愛媛大学、3. 東京大学

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Ehime University, 3. University of Tokyo

The structure of convection in the mantle of super-Earths is one of the most important issues in studies of their thermal history and surface environment which is linked to the habitability of planets. In our past studies (Miyagoshi et al., 2014 ApJL, 2015 JGR), we showed that the effects of strong adiabatic compression substantially reduces the activity of hot ascending plumes and the efficiency of convective heat transport in massive super-Earths (about ten times the Earth's mass).

In this paper, we show that how convective structure changes as the mass of the planet increases. In the Earth-like size planet, hot plume activity is high, but the activity is reduced as the planet mass increases. When M_p (the planet mass divided by the Earth's mass) exceeds 4, hot plumes become faint compared with cold ones and their activity becomes negligible. The dimensional thickness of the lithosphere increases as M_p increases in spite of the increasing Rayleigh number. The rms velocity of thermal convection does not significantly depend on M_p . These results suggest that plate tectonics becomes harder to operate as M_p increases.

We also explored the initial transient stage of thermal convection in massive super-Earths. When the shallow mantle is initially hotter than expected from the adiabatic extrapolation from the deep mantle, as expected when the planet is formed from giant impact, transient layered convection continues for as long as several to ten billion years before it yields to a whole layer convection that occurs as the structure in the statistically steady state. Our results suggest that the interior of many of massive super-Earths may be still in the transient stage rather than the steady state now.

キーワード：スーパーアース、マンテル対流

Keywords: super-Earths, mantle convection

混合距離理論に基づく 1次元熱進化計算法の改良

An improvement of a 1D thermal evolution calculation scheme based on mixing length theory

*鎌田 俊一¹

*Shunichi Kamata¹

1. 北海道大学 創成研究機構

1. Creative Research Institution, Hokkaido University

固相熱対流は固体天体の熱進化にとって重要な働きをもつ。対流を考慮した熱進化計算に当たっては、2次元または3次元数値モデルが必要となり、これには多大な計算コストが掛かる。混合距離理論 (MLT) に基づく1次元熱進化計算法はそれらと比較してかなり低コストで済むためパラメータスタディに適しているが、計算精度に関する詳細な研究が行われていないことが課題である。本研究では様々な曲率、レイリー数、粘性率コントラストにおいて、1次元MLT法で得た定常状態における鉛直1次元の温度構造と3次元数値計算で得られたものを比較し、計算誤差を求めた。粘性率が一樣な場合、平均温度とヌッセルト数の相対誤差はそれぞれ>100%、~50%になることが分かった。そこで、計算精度を向上させるため、熱対流による熱輸送効率を左右するパラメータ、「混合距離」の新たな決め方を提案する。混合距離が最大となる深さ a と、その深さにおける混合距離 b をそれぞれ小さく、大きくすることで誤差が減少することが分かった。誤差が小さくなる a と b の経験式を導出した。同様の解析を、温度依存性を考慮した粘性率を用いた場合でも行い、 a と b の経験式を得た。さらに、この方法を熱進化計算にも適用し、その有効性を確認した。

キーワード：熱進化、数値計算

Keywords: thermal evolution, numerical calculation

衝突破砕岩石中の粘性加熱: 衝撃熔融開始条件の再評価

Viscous heating in shock-comminuted rocks: A reappraisal of the shock melting threshold by using a shock physics code

*黒澤 耕介¹、玄田 英典²

*Kosuke Kurosawa¹, Hidenori Genda²

1. 千葉工業大学 惑星探査研究センター、2. 東京工業大学 地球生命研究所

1. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2. Earth Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

Impact melts are among the most curious geologic samples because they provide clear evidence of hypervelocity collisions between two planetary bodies at several km/s. Thus, the required shock pressure for incipient melting after pressure release has been studied extensively. It is widely assumed that pressure release is an isentropic process. This assumption is expected to be valid when the shocked matter behaves as a perfect fluid. Since the archived shock pressure under typical collisions between two planetary bodies is thought to be much larger than the Hugoniot Elastic limit, the yield strengths of both intact and comminuted rocks have been neglected in a lot of cases. In this study, we focused on collisions at relatively low velocities, which are that the effects of the material strength cannot be neglected. The effects of internal friction in comminuted rocks, i.e., the yield strength of shock-comminuted rocks, on thermodynamic behavior on an entropy-pressure plane were investigated using the iSALE shock physics code to revisit the threshold of incipient melting against the peak shock pressure. We will present a preliminary result obtained through the numerical experiments at the meeting.

A vertical impact of a sphere onto a flat target are numerical modeled in a two-dimensional cylindrical coordinate. The analytical equation of state (ANEOS) for dunite were used for both projectile and target. Impact velocity was fixed at 6 km/s, which is slightly lower than the bulk sound velocity of dunite. The projectile radius was divided into 50 cells, which is thought to be large enough to investigate the shock pressure distribution with a high accuracy. We assumed that the projectile and the target have any temperature gradients at initial. The initial temperature was set to 220 K, which is close to a radiative-equilibrium temperature at the main belt region. The constitutive model for dunite parameterized in Johnson et al. (2015) was also used with the same input parameters except for the coefficient of internal friction. Lagrangian tracer particles were inserted into each computational cell. We stored the time variation of pressure and entropy into the tracers.

We found that the entropy gradually increases during pressure release in the case of a highly-frictional target contrary to the assumption of isentropic release. A larger value of the internal friction leads to a larger increase of entropy. We also found that the shock melting occurs after ~40 GPa shock compression under our experimental conditions if we used a typical value for the coefficient of the internal friction. This value is lower than a widely-used threshold for shock-induced melting. Our results suggest that (1) the shock melting occurs at a lower impact velocity than previously thought and that (2) the input parameters of the constitutive model in numerical models largely affect the thermodynamic response of geologic materials.

Acknowledgement: We appreciate the developers of iSALE, including G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, J. Melosh, and D. Elbeshausen.

キーワード：天体衝突、衝突熔融物、数値衝突計算

Keywords: Hypervelocity collisions, Impact melts, Numerical modeling of impact phenomena

磁場勾配が存在する宇宙空間における一般の固体粒子の物質分離特性 Efficiency of material separation caused by magnetic field in outer space recognized for solid particles in general

*植田 千秋¹、寺田 健太郎¹、久好 圭治¹

*Chiaki Uyeda¹, Kentaro Terada¹, Keiji Hisayoshi¹

1. 大阪大学大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻

1. Institute of earth and Space Science Graduate School of Science Osaka University

銀河内の大多数の領域において、磁場と固体微粒子（グラファイト、ダイヤモンド、ケイ酸塩、金属粒子）が共に存在することが、観測で明らかとなっている。しかしながら、これまでの宇宙科学、惑星科学では、主として磁場と電離ガスの相互作用が注目され、磁場と固体粒子との相互作用については十分に論じられてこなかった。一方、宇宙空間や星形成の現場では、有機物/ケイ酸塩鉱物や金属球などのダストに関して分布の偏りが観測されているが、それらは物質の揮発性/難揮発性に起因する「温度勾配」に伴う現象と考えられてきた。近年私たちは、磁場勾配中に浮遊させた反磁性の固体粒子が、その磁性によらず磁場ゼロの方向へ並進することを見出し、さらにその終端速度が質量に依存せず、物質固有の磁化率 X (emu/g)のみに依存することを報告した[1][2]。今回、同じ原理を用いることで、異種の反磁性粒子および常磁性粒子の集団が、物質の種類ごとに分離されることを確認したので、その結果を報告する[3]。一般に磁気分離は、粒子内に発生する磁気的ポテンシャルによって引き起こされるが、これまでの磁気科学では、強磁性、フェリ磁性および強い常磁性物質のみで分離が有効と考えられてきた。

上記の分離の有効性を調べる目的で、小型のボックスを1.8mのシャフト内で落下させ、短時間の微小重力環境を発生させた。このボックス内に、ネオジム磁石で作成した小型の磁気回路（ $1.5 \times 2.0 \times 2.0$ cm）を設置し、その中に試料台および試料をセットした。上記の装置をガラス製・真空容器内に密閉し100Paまで減圧した。試料粒子の集団は磁場勾配力が最大になる位置にセットされており、微小重力の開始と共に、反磁性粒子は磁場ゼロの方向へ並進し、一方、常磁性粒子は磁場中心の方向に並進した（動画はYouTube: Magnetic separation of general solid particles realized by a permanent magnetを参照）。一般に、 x 軸方向に単調減少する磁場中で、磁化率 X 、質量 m の粒子に誘導される並進運動は、 $(1/2)mXB(0)^2 = (1/2)mv(T)^2$ のエネルギー保存則に従う。但し $B(0)$ は初期位置の磁場強度、 $v(T)$ は終端速度を表す。即ち $v(T)$ は m に依存せず、物質固有の X のみに依存するため、上記の物質分離が実現する。今回観測された粒子の速度から、その粒子の X 値が求められたが、それらは全て文献値と一致した。これにより観測した分離が上記のエネルギー保存則に従って進行したことが確認された[3]。観測した X 値の範囲は、自然界の主要な物質の値の範囲をほぼカバーしており、固体粒子全般の分離が、物質固有の X 値の差異と「磁場勾配」によっても起こりうることを示唆する。このことは宇宙空間における物質分布の発生機構に新たな視点を提供しえる。また惑星科学では異種粒子の混合試料を扱う場合が多いが、今回の分離技術は、その分析の前処理過程としても利用できる。

References

- [1] K. Hisayoshi, S. Kanou and C. Uyeda : Phys.:Conf. Ser., 156 (2009) 012021.
- [2] C. Uyeda, K. Hisayoshi, and S. Kanou : Jpn. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 064709.
- [3] K. Hisayoshi, C. Uyeda and K. Terada : Sci. Rep. (Nature Pub) 6 (2016) 38431

キーワード：物質分離、磁場勾配、反磁性物質、常磁性物質

Keywords: material separation, field gradient, diamagnetic anisotropy, paramagnetic anisotropy

球標的へのクレーター形成実験：標的の曲率がクレーター効率に与える影響

Cratering experiments with spherical targets: The curvature effects on the cratering efficiency

*鈴木 絢子¹、岡本 千里²、黒澤 耕介³、門野 敏彦⁴、長谷川 直¹、平井 隆之⁵

*Ayako I Suzuki¹, Chisato Okamoto², Kosuke Kurosawa³, Toshihiko Kadono⁴, Sunao Hasegawa¹, Takayuki Hirai⁵

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、2. 神戸大学大学院理学研究科、3. 千葉工業大学 惑星探査研究センター、4. 産業医科大学医学部、5. 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門

1. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2. Graduate School of Science, Kobe University, 3. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 4. University of Occupational and Environmental Health, 5. Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency

近年の惑星探査によって、小惑星・小氷衛星等の表面にも衝突クレーターが多数存在することが明らかになった。小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は主に以下の2点において異なる。まず重力加速度が小さいことだ。すると、相対的に天体表層の物質強度がクレーターサイズを制御する。直径1km程度の小惑星に存在する衝突クレーターは全て強度支配域であるという見積りもある(Jutzi et al., 2015)。二つ目は、大きなクレーターで特に小天体そのものの曲率が無視できなくなることだ。つまり、曲率を持つ面に対する強度支配域の衝突クレーター形成過程を明らかにすることは、小天体の衝突史を理解する上で重要である。

曲率を持つ面に対する強度支配域の衝突クレーターの研究は、Fujiwara et al. (1993, 2014)によって実験的に調べられ、曲率が高くなるほどクレーターの直径、深さ、質量が増大することが示されているが、実験データ数や調査パラメータが十分でない現状がある。本研究では、直径の異なる球に衝突クレーターを作り、高精度3次元形状測定を行った。また、簡単なモデルを構築し、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。

実験は宇宙科学研究所にある超高速衝突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9 cm, 15 cm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 1.08 g/cm³、引っ張り強度は 2.4 MPa である。弾丸は直径 3.2 mmのナイロン球で、約 3.4 km/s で標的に衝突させた。この場合の弾丸/標的サイズ比 (=規格化した曲率)は0.013-0.041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は、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、0.2 mmごとの地形データを取得した。クレーターの無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と深さを得た。衝突前表面においてクレーターが占める面積と等しい面積を持つ円の半径を、クレーター半径とした。

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。曲率が大きい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、曲率と共に大きくなったが、深さはほぼ一定であった。スポール部の体積やクレーターのプロファイルと比較すると、ピット部には曲率による大きな差は見られないが、スポール部は曲率と共に広く、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。

衝突によって標的表面にかかる力の垂直成分に注目して簡単なモデルを構築した。半径増加率 (平面にできるクレーター半径に対するクレーター半径) と規格化曲率のグラフ上で、実験データは妥当なパラメータ (等圧コア半径と衝撃圧の減衰率) を用いて描けるモデル曲線の範囲に収まった。このモデルでは、干渉領域は考慮せず、曲率によって等圧コアから標的表面までの距離が変化することのみを表現している。つまり、標的の

曲率によってクレーターサイズが異なるのは、曲率が高いほど標的表面が近くなるという形状効果の寄与が大きいと言える。いくつかの小惑星の最大クレーターは、本研究で調査した曲率の範囲内にある。実験結果を直接適応することは難しいが、実際の小惑星の大きなクレーターにおいても、曲率によって半径が拡大しているかもしれない。

キーワード：衝突クレーター、衝突実験、小天体、地形、二段式軽ガス銃

Keywords: impact craters, impact experiments, small bodies, morphology, two-stage light-gas gun