

# NASA' s Planetary Science Missions Present and Future Plans

\*James L Green<sup>1</sup>

## 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<sup>1</sup>、並木 則行<sup>2</sup>、小林 正規<sup>3</sup>、木村 淳<sup>4</sup>、野田 寛大<sup>2</sup>、荒木 博志<sup>2</sup>、鹿島 伸悟<sup>2</sup>、宇都宮 真<sup>2</sup>、石橋 克彦<sup>3</sup>、小林 進悟<sup>6</sup>、押上 祥子<sup>5</sup>、水野 貴秀<sup>1</sup>、尾崎 正伸<sup>1</sup>、山脇 敏彦<sup>1</sup>、東原 和行<sup>1</sup>、義文 義文<sup>1</sup>、鎌田 俊一<sup>7</sup>、松本 晃治<sup>2</sup>、倉本 圭<sup>7</sup>、佐々木 晶<sup>4</sup>、岩村 哲<sup>8</sup>、飯田 光人<sup>9</sup>、藤代 尚文<sup>10</sup>、藤井 雅之<sup>11</sup>、Hussmann Hauke<sup>12</sup>、Lingenauber Kay<sup>12</sup>、Kallenbach Reinald<sup>12</sup>、Jaenchen Judit<sup>12</sup>、Behnke Thomas<sup>12</sup>、Althaus Christian<sup>12</sup>、DelTogno Simone<sup>12</sup>、Oberst Juergen<sup>12</sup>、Loetzke Horst-Georg<sup>12</sup>、Michaelis Harald<sup>12</sup>

\*Keigo Enya<sup>1</sup>, Noriyuki Namiki<sup>2</sup>, Masanori Kobayashi<sup>3</sup>, Jun Kimura<sup>4</sup>, Hirotomo Noda<sup>2</sup>, Hiroshi Araki<sup>2</sup>, Shingo Kashima<sup>2</sup>, makoto Utsunomiya<sup>2</sup>, Katsuhiko Ishibashi<sup>3</sup>, Shingo Kobayashi<sup>6</sup>, Shoko Oshigami<sup>5</sup>, Takahide Mizuno<sup>1</sup>, Masanobu Ozaki<sup>1</sup>, Toshihiko Yamawaki<sup>1</sup>, Kazuyuki Touhara<sup>1</sup>, Yoshifumi Saito<sup>1</sup>, Shunichi Kamata<sup>7</sup>, Koji Matsumoto<sup>2</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>7</sup>, Sho Sasaki<sup>4</sup>, Satoru Iwamura<sup>8</sup>, Teruhito Iida<sup>9</sup>, Naofumi Fujishiro<sup>10</sup>, Masayuki Fujii<sup>11</sup>, Hauke Hussmann<sup>12</sup>, Kay Lingenauber<sup>12</sup>, Reinald Kallenbach<sup>12</sup>, Judit Jaenchen<sup>12</sup>, Thomas Behnke<sup>12</sup>, Christian Althaus<sup>12</sup>, Simone DelTogno<sup>12</sup>, Juergen Oberst<sup>12</sup>, Horst-Georg Loetzke<sup>12</sup>, Harald Michaelis<sup>12</sup>

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<sup>1</sup>、土屋 史紀<sup>2</sup>、鍵谷 将人<sup>2</sup>、De Kleer Katherine<sup>3</sup>、坂野井 健<sup>2</sup>

\*Mizuki Yoneda<sup>1</sup>, Fuminori Tsuchiya<sup>2</sup>, Masato Kagitani<sup>2</sup>, Katherine De Kleer<sup>3</sup>, Takeshi Sakanoi<sup>2</sup>

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<sup>+</sup> should be included in the torus since Cl<sup>+</sup> 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<sup>+</sup> 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<sup>1</sup>、渡邊 誠一郎<sup>2</sup>、松永 恒雄<sup>1</sup>

\*Satoru Yamamoto<sup>1</sup>, Sei-ichiro WATANABE<sup>2</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、山路 敦<sup>1</sup>、佐藤 活志<sup>1</sup>

\*Yuko Daket<sup>1</sup>, Atsushi Yamaji<sup>1</sup>, Katsushi Sato<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>、城野 信一<sup>2</sup>、田中 秀和<sup>3</sup>

\*Masamichi Nagao<sup>1</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>, Sin-iti Sirono<sup>2</sup>, Hidekazu Tanaka<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>

\*Sin-iti Sirono<sup>1</sup>

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H<sub>2</sub>O氷となる。このH<sub>2</sub>O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、H<sub>2</sub>O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<sup>1</sup>、中本 泰史<sup>1</sup>

\*Kenji Homma<sup>1</sup>, Taishi Nakamoto<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、金川 和弘<sup>2</sup>、武藤 恭之<sup>3</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>

\*Takahiro Ueda<sup>1</sup>, Kazuhiro Kanagawa<sup>2</sup>, Takayuki Muto<sup>3</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>

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<sup>1,2</sup>、道越 秀吾<sup>3</sup>、小久保 英一郎<sup>2,1</sup>\*Misako Tatsuuma<sup>1,2</sup>, Shugo Michikoshi<sup>3</sup>, Eiichiro Kokubo<sup>2,1</sup>

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  $\mu\text{m}$ -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  $\alpha$ .

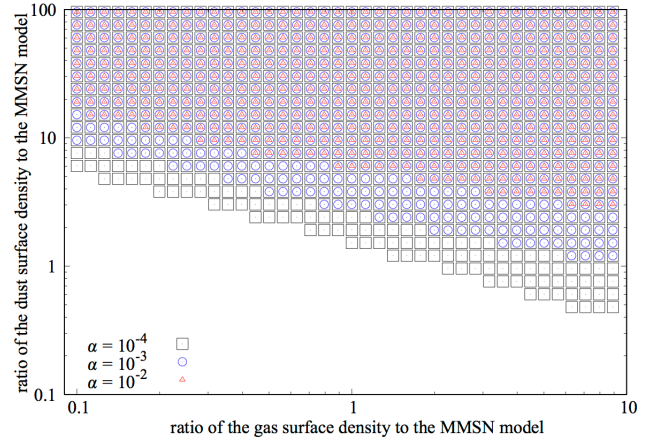
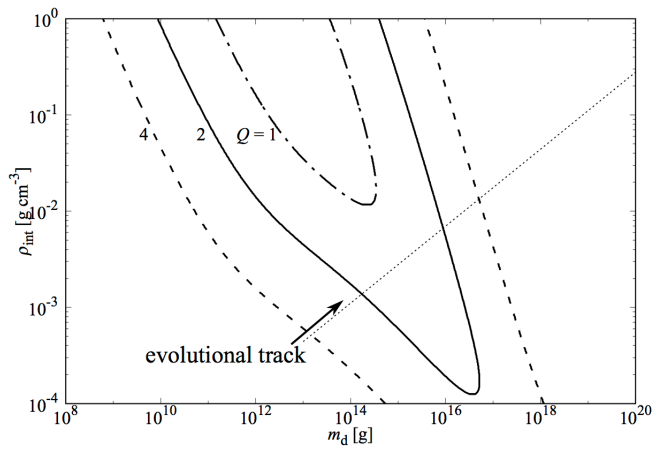
References: [1] Arakawa, S., & Nakamoto, T. 2016, *ApJL*, 832, L19 [2] Toriumi, M. 1989, *Earth and Planetary Science Letters*, 92, 265 [3] Keller, L. P., & Messenger, S. 2011, *GeoCoA*, 75, 5336 [4] Michikoshi, S., & Kokubo, E. 2016, *ApJL*, 825, L28 [5] Toomre, A. 1964, *ApJ*, 139, 1217 [6] Toomre, 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  $\rho_{\text{int}}$  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 evolutionary 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<sup>1</sup>、長谷川 稜<sup>2</sup>、藤本 正樹<sup>2</sup>

\*Tetsuo Taki<sup>1</sup>, Ryo Hasegawa<sup>2</sup>, Masaki Fujimoto<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>、中本 泰史<sup>1</sup>

\*Sota ARAKAWA<sup>1</sup>, Taishi Nakamoto<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、小久保 英一郎<sup>1</sup>、鈴木 建<sup>2</sup>、Morbidei Alessandro<sup>3</sup>、Crida Aurélien<sup>3</sup>

\*Masahiro Ogihara<sup>1</sup>, Eiichiro Kokubo<sup>1</sup>, Takeru Suzuki<sup>2</sup>, Alessandro Morbidelli<sup>3</sup>, Aurélien Crida<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>、佐々木 貴教<sup>2</sup>、井田 茂<sup>3</sup>\*Yuhito Shibaïke<sup>1</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>, Takanori Sasaki<sup>2</sup>, Shigeru Ida<sup>3</sup>

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。

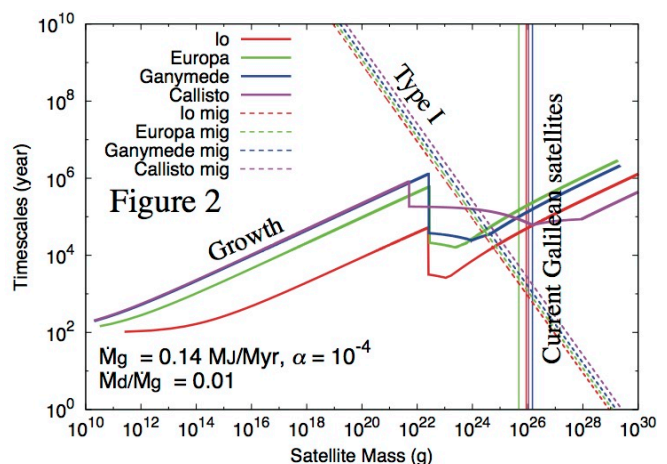
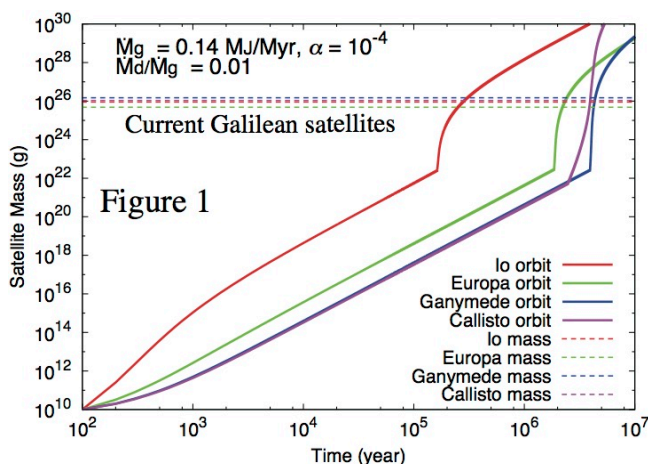
一方で、近年惑星形成において、少数の原始惑星が原始惑星系円盤遠方からドリフトしてきたcmサイズのダスト（ペブルと呼ぶ）を大量に集積し急速に惑星まで成長する、「ペブルアクリーション」モデルが注目されている。

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<sup>1,2</sup>、唐戸 俊一郎<sup>3</sup>、牧野 淳一郎<sup>4,2,5</sup>

\*Natsuki Hosono<sup>1,2</sup>, Shun-ichiro Karato<sup>3</sup>, Junichiro Makino<sup>4,2,5</sup>

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<sup>1</sup>、佐藤 雄太郎<sup>1</sup>

\*Hiroshi Kobayashi<sup>1</sup>, Yutaro Sato<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、伊藤 孝士<sup>2</sup>

\*Patryk Sofia Lykawka<sup>1</sup>, Takashi Ito<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>

\*Naoyuki Hirata<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、黒川 宏之<sup>2</sup>

\*Sakuraba Haruka<sup>1</sup>, Hiroyuki Kurokawa<sup>2</sup>

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 CO<sub>2</sub>-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, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, and noble gases. Because the abundances of noble gases are small, we treated both N<sub>2</sub> and noble gases as a component N<sub>2</sub> 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, H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> are partitioned into oceans and carbonates on Earth and into ice on Mars. We set the upper limits of the partial pressures of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> 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 N<sub>2</sub> 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 N<sub>2</sub> 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<sup>1</sup>、玄田 英典<sup>1</sup>、阿部 豊<sup>2</sup>

\*Keiko Hamano<sup>1</sup>, Hidenori Genda<sup>1</sup>, Yutaka Abe<sup>2</sup>

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CO<sub>2</sub>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-CO<sub>2</sub> ATMOSPHERE ON EARLY MARS INFERRED FROM MANGANESE OXIDATION EXPERIMENTS.

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

\*Shoko Imamura<sup>1</sup>, Natsumi Noda<sup>1</sup>, Yasuhito Sekine<sup>1</sup>, Soichiro Uesugi<sup>1</sup>, Minako Kurisu<sup>1</sup>, Chihiro Miyamoto<sup>1</sup>, Haruhisa Tabata<sup>1</sup>, Takashi Murakami<sup>1</sup>, Yoshio Takahashi<sup>1</sup>

1. 東京大学

1. University of Tokyo

### Introduction

Both CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> alone, climate models presume the presence of a thick CO<sub>2</sub> atmosphere to decrease outgoing longwave radiation and to cause effective collision-induced absorption. However, pCO<sub>2</sub> 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 pO<sub>2</sub> capable for deposition of Mn oxides (pO<sub>2</sub> > ~0.01 bar) [3], the findings of Mn oxides indicate that early Mars had a substantial O<sub>2</sub> in the atmosphere.

The present study aims to further constrain the composition of early Mars' atmosphere, especially the CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixing ratio, at the time when the Mn oxides were formed. We performed laboratory experiments to generate Mn precipitates from Mn<sup>2+</sup> in solutions by introducing CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> gas mixtures. We investigated the compositions of Mn precipitates under various compositions of CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>.

### Materials & Methods

The Mn<sup>2+</sup> starting solution with 20 mM and pH 8–9 was prepared in an Ar-purged glovebox, where pO<sub>2</sub> remained < 10<sup>-12</sup> 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 CO<sub>2</sub> and artificial air (N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> = 4; pCO<sub>2</sub> < 1 ppm) into the starting solution at four different mixing ratios (CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> = 2, 0.2, 0.02, and artificial air) in the glovebox. Note that MnO<sub>2</sub> 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. Mn<sup>2+</sup> 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 Mn<sup>2+</sup> concentrations in the filtered solutions decrease over reaction time, which indicate that a part of dissolved Mn<sup>2+</sup> was converted into solid precipitates. Despite both the wide range in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> ratios and thermochemical stability of MnO<sub>2</sub> 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  $\text{MnCO}_3$ . These results are consistent with our XRD results. Our results show that  $\text{MnCO}_3$  precipitated before the formation of  $\text{MnO}_2$  even very low  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  of 0.02. This suggests that kinetics of formation of  $\text{MnCO}_3$  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  $\text{Mn(OH)}_2$ .

### Discussion

Our results show that, in order to form  $\text{MnO}_2$  in  $\text{Mn}^{2+}$  solutions by reactions with  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  gas mixtures, the  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  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  $\text{MnO}_2$  in sediments [3], the observations of both a lack of  $\text{MnCO}_3$  and presence of  $\text{MnO}_2$  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- $\text{CO}_2$  and high- $\text{O}_2$  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<sup>1</sup>、前原 裕之<sup>2</sup>、行方 宏介<sup>1</sup>、野津 翔太<sup>1</sup>、幾田 佳<sup>1</sup>、本田 敏志<sup>3</sup>、野上 大作<sup>1</sup>、柴田 一成<sup>4</sup>  
\*Yuta Notsu<sup>1</sup>, Hiroyuki Maehara<sup>2</sup>, Namekata Kosuke<sup>1</sup>, Shota Notsu<sup>1</sup>, Kai Ikuta<sup>1</sup>, Satoshi Honda<sup>3</sup>,  
Daisaku Nogami<sup>1</sup>, Kazunari Shibata<sup>4</sup>

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<sup>1</sup>、田近 英一<sup>1</sup>

\*Shintaro Kadoya<sup>1</sup>, Eiichi Tajika<sup>1</sup>

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 CO<sub>2</sub>, in the atmosphere. Owing to a negative feedback mechanism in carbonate-silicate geochemical cycle system (so called the “Walker feedback”), the amount of CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> degassing rate via volcanic activities is below some critical value, the Walker feedback mechanism cannot maintain a sufficient amount of CO<sub>2</sub>, and the Earth becomes globally ice-covered. Here, the critical value of the CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>1</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>

\*Kazumasa Ohno<sup>1</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、亀山 真典<sup>2</sup>、小河 正基<sup>3</sup>

\*Takehiro Miyagoshi<sup>1</sup>, Masanori Kameyama<sup>2</sup>, Masaki Ogawa<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>

\*Shunichi Kamata<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、玄田 英典<sup>2</sup>

\*Kosuke Kurosawa<sup>1</sup>, Hidenori Genda<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>、寺田 健太郎<sup>1</sup>、久好 圭治<sup>1</sup>

\*Chiaki Uyeda<sup>1</sup>, Kentaro Terada<sup>1</sup>, Keiji Hisayoshi<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、岡本 千里<sup>2</sup>、黒澤 耕介<sup>3</sup>、門野 敏彦<sup>4</sup>、長谷川 直<sup>1</sup>、平井 隆之<sup>5</sup>

\*Ayako I Suzuki<sup>1</sup>, Chisato Okamoto<sup>2</sup>, Kosuke Kurosawa<sup>3</sup>, Toshihiko Kadono<sup>4</sup>, Sunao Hasegawa<sup>1</sup>, Takayuki Hirai<sup>5</sup>

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もりもある(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/cm<sup>3</sup>、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。クレーターのない部分の地形データを用いて近似的に求めた平面・球面を衝突前表面とし、それとの差分としてクレーターの体積と深さを得た。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

## JUICE/GALA-J (2): JUICE搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA)が木星氷衛星で目指す科学

### JUICE/GALA-J (2): Science targets of the GAnymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

\*木村 淳<sup>1</sup>、鎌田 俊一<sup>2</sup>、松本 晃治<sup>3</sup>、押上 祥子<sup>8</sup>、並木 則行<sup>3</sup>、倉本 圭<sup>2</sup>、佐々木 晶<sup>1</sup>、塩谷 圭吾<sup>4</sup>、小林 正規<sup>5</sup>、小林 進悟<sup>6</sup>、荒木 博志<sup>3</sup>、野田 寛大<sup>3</sup>、石橋 高<sup>5</sup>、斎藤 義文<sup>4</sup>、Husmann Hauke<sup>7</sup>、Lingenauber Kay<sup>7</sup>

\*Jun Kimura<sup>1</sup>, Shunichi Kamata<sup>2</sup>, Koji Matsumoto<sup>3</sup>, Shoko Oshigami<sup>8</sup>, Noriyuki Namiki<sup>3</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>2</sup>, Sho Sasaki<sup>1</sup>, Keigo Enya<sup>4</sup>, Masanori Kobayashi<sup>5</sup>, Shingo Kobayashi<sup>6</sup>, Hiroshi Araki<sup>3</sup>, Hirotomo Noda<sup>3</sup>, Ko Ishibashi<sup>5</sup>, Yoshifumi Saito<sup>4</sup>, Hauke Husmann<sup>7</sup>, Kay Lingenauber<sup>7</sup>

1. 大阪大学、2. 北海道大学、3. 国立天文台、4. 宇宙科学研究所、5. 千葉工業大学、6. 放射線医学総合研究所、7. ドイツ航空宇宙センター、8. 工学院大学

1. Osaka University, 2. Hokkaido University, 3. National Astronomical Observatory Japan, 4. Institute of Space and Astronautical Science, 5. Chiba Institute of Technology, 6. National Institute of Radiological Sciences, 7. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 8. Kogakuin University

欧日の協同体制で準備が進められている木星氷衛星探査計画JUICE（2022年の打ち上げ、2029年木星系到着、2032年ガニメデ周回軌道投入）において、我々はドイツ航空宇宙センター（DLR）などと協力してレーザ高度計GALAの開発を進めている。GALAは、JUICE探査機から標的の天体表面へとレーザを発射し、表面で反射し探査機へ戻ってくるまでの時間を計ることで距離を測定（レーザ測距）する。これによって、天体表面の詳細で定量的な起伏の情報や、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。

JUICEの主ターゲットは、木星系最大にして太陽系最大の衛星、ガニメデである。ガニメデは、惑星級のサイズや金属核起源の固有磁場、大規模なテクトニクスを持つなどの点で、氷天体の代表的な存在と言えるが、過去の数回のフライバイ探査にとどまる知見は極めて限定的である。JUICEは、史上初めての（地球の月以外の）衛星周回探査を行うことによってガニメデの全容を把握し、見出される起源と進化の描像は太陽系内天体の多様性の起源を紐解く鍵となるだけでなく、太陽系内天体の認識に根ざした従来の概念を覆す多様な系外惑星の理解にも大きな寄与を果たす。

GALAによる観測は、氷天体に対する世界初のレーザ測距となる。ガニメデでは周回軌道からの全球測定、エウロパおよびカリストではフライバイ領域での測定を行う。これにより、多様な地形形態と分布が把握でき、氷衛星の地質活動（氷テクトニクス）の理解が飛躍的に向上するだけでなく、その活動様式をケイ酸塩鉱物でのそれと対比することで、地球のプレート・テクトニクスの再考察にも繋がる。また、木星による潮汐の大きさや回転変動の測定を通して地下海の存否が判別できるほか、内部構造に関わる因子の精度が大きく向上する。さらに反射パルスの強度と形状は、レーザ波長での表面反射率や10 m規模の粗度を反映するため、表面の風化侵食の程度や組成の情報を日射角などの観測条件に依存しないデータとして得ることができる。こうした観測と理解の過程には、地球における長年の研究の蓄積が活かされることは言うまでもない。例えばGALAが得る表面地形や粗度・アルベドのデータは、地球の極域や氷河に関する雪氷学や衝突・変形実験などによって得られた知見を通して氷テクトニクスの描像へと繋がる。また潮汐に関するデータは、地球や月（かぐや計画）、小惑星（はやぶさ1, 2計画）を対象に長年培われた測地学を基盤として、氷衛星の内部を見通す窓となる。

GALAの観測が直接的にもたらす氷テクトニクス、表面組成、そして地下海など内部構造に関する情報は、他の搭載機器からも多角的な視点で考察を得ることができる。例えば、カメラ（JANUS）が得る画像データはGALAの計測位置を特定し、点の情報を面的な表面地質の理解へと繋げる最も重要な連携機器であ

る。氷層を透過するレーダのRIMEや重力場測定を行う3GMは地質の産状や内部構造の把握に寄与し、可視・近赤外撮像分光計（MAJIS）や紫外撮像分光計（UVS）、サブミリ波観測器（SWI）は、様々な波長で表層の組成に関する情報を得る。磁力計（J-MAG）は木星磁場の変動に伴う衛星の電磁感応をモニターし、プラズマ環境観測パッケージ（PEP）や電波・プラズマ波動観測器（RPWI）による観測のサポートを得て地下海の規模や組成（電気伝導度）を制約する。このようにGALAが得る観測データは、他機器が取得するデータと密接に関係し合い、それらの科学目標の基盤あるいはサポート的役割を担う。

# 水星探査機MESSENGERの観測データに基づく水星外部磁場の周期特性 Period characteristics of Mercury's external magnetic field from MESSENGER magnetometer observation

\*桂 貴暉<sup>1</sup>、藤 浩明<sup>2</sup>

\*Takaaki Katsura<sup>1</sup>, Hiroaki TOH<sup>2</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地球物理学教室太陽惑星系電磁気学講座、2. 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター

1. Solar-Planetary Electromagnetism Laboratory, Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Graduate School of Science, Kyoto University

MESSENGER(MERcury Surface, Space Environment, Geochemistry, and RAnding)は初めて水星の周回軌道に投入された探査機であり、2011年から約4年にわたって磁場をはじめとする電磁環境観測を行った。このデータに基づき、水星のマグネトポーズとバウショックの平均的な形状と位置が決定された(Winslow et al., 2013)。さらに時間変化する磁気圏磁場によって水星コアで誘導される磁場の研究から、測地的な方法とは独立に水星コアの半径が推定された(Johnson et al., 2016)。

しかし、今のところ水星外部磁場の変動周期としては水星の軌道離心率が大きいことによる年周変化のみが考慮されている。一般に複数の周期で電磁誘導現象を考えることができれば、導体球（又は球殻）の厚さと電気伝導度のパラメタの分離など、天体の内部電気伝導度構造についてより精度の良い情報を得られることが期待される。そこで本研究では水星外部磁場変動の周期特性を見積もるために磁場変動の指標としてサブソーラーディスタンスに着目した。マグネトポーズは天体の固有磁場と太陽風のバランスで決定されるので、サブソーラーディスタンスは外部磁場変動の指標となり得る。

今回の発表では、まずMESSENGER探査機の取得した15水星年分のベクトル磁場データからマグネトポーズの位置を同定し、それをサブソーラーディスタンスに変換、さらにその時間変化を解析することで水星外部磁場の周期特性を調べた結果について報告する。

キーワード：水星、メッセンジャー、マグネトポーズ

Keywords: Mercury, MESSENGER, Magnetopause

## 月画像解析によるクレーター光条線長さの計測 Zモデルとの比較

### Measurement of crater ray length by analysis of lunar images: A comparison with Z model

\*木下 敏輝<sup>1</sup>、中村 昭子<sup>1</sup>、和田 浩二<sup>2</sup>

\*Kinoshita Toshiki<sup>1</sup>, Akiko Nakamura<sup>1</sup>, Koji Wada<sup>2</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻、2. 千葉工業大学惑星探査研究センター

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of technology

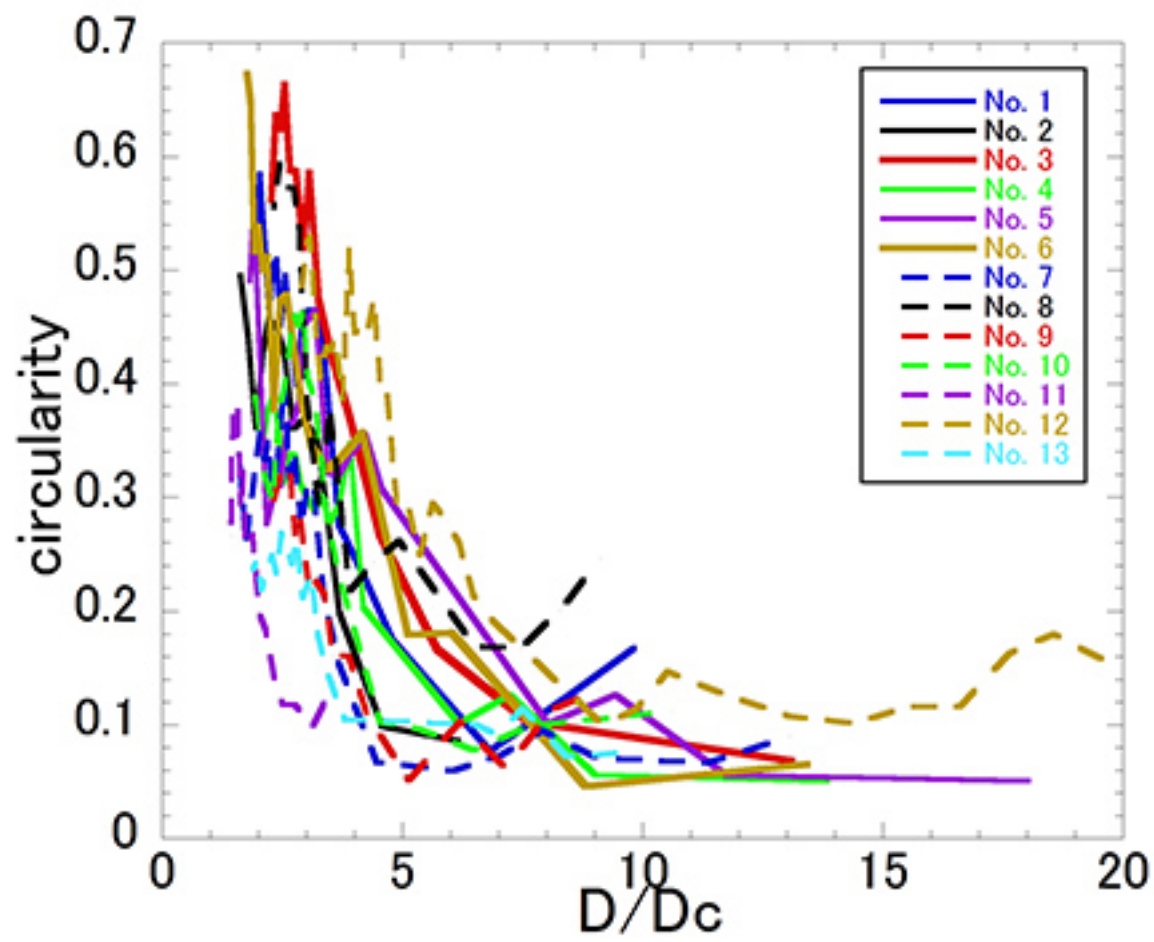
クレーターの直径から得られる衝突天体にかかわる情報は速度、密度、半径が一体となった結合変数Cという形以上に分解することができない(Holsapple and Schmidt, 1987)。当研究ではクレーター放出物（光条線エジェクタとcontinuous ejecta）の空間的広がりから衝突天体が持っていたと予測できるパラメーターを制限するのが可能であるかを検証するため、これらを定量化することを考える。

今回は月探査衛星「かぐや」のMIによって得られた画像を解析した。サンプルとして嵐の大洋上のKeplerの南西の領域に存在する直径1km程度の小規模なクレーター13個を用いた。まず、エジェクタ飛散モデルであるZモデルから算出されるエジェクタ厚さと比較できる領域を考察するためにMI画像において任意の反射率閾値以上の領域を抽出し、領域形状の円形度を測定した。図は横軸が領域の等価円直径をクレーター直径で規格化したもの、横軸が円形度である。反射率閾値を低いものから高いものに変化させるにつれ、領域形状の円形度は上昇の傾向を示し、クレーター直径の4倍程度を境にしてその傾きが変化している。この結果からおよそ4クレーター直径以内のエジェクタは中心対称であり、Zモデルの結果が適用できると考える。

前述の結果からZモデルを適用するのが相応ではないと判断された約4クレーター直径以遠の領域では、光条線領域に降着したエジェクタは等方的に放出されたエジェクタが、その飛行中に非弾性衝突をすることにより、ある方向にのみ空間密度が卓越した結果のものであると仮定した(Kadono et al., 2015)。つまり、隣り合う光条線は、その間の方向に放出されたエジェクタを分け合ったと考えた。この仮定の下で、各光条線の角度間隔と光条線の幅を用いてZモデルから予想される各光条線におけるエジェクタの量を計算し、クレーター直径との関係について議論する。

キーワード：光条線、エジェクタ、かぐや

Keywords: crater ray, ejecta, Kaguya





# エピポーラ拘束を用いた小惑星画像の対応点決定における精度向上手法 Correct correspondence selection between points on two asteroid images using epipolar constraint

\*大山 順平<sup>1</sup>、太田 直哉<sup>1</sup>、尾川 順子<sup>2</sup>

\*Junpei Ohyama<sup>1</sup>, Naoya Ohta<sup>1</sup>, Naoko Ogawa<sup>2</sup>

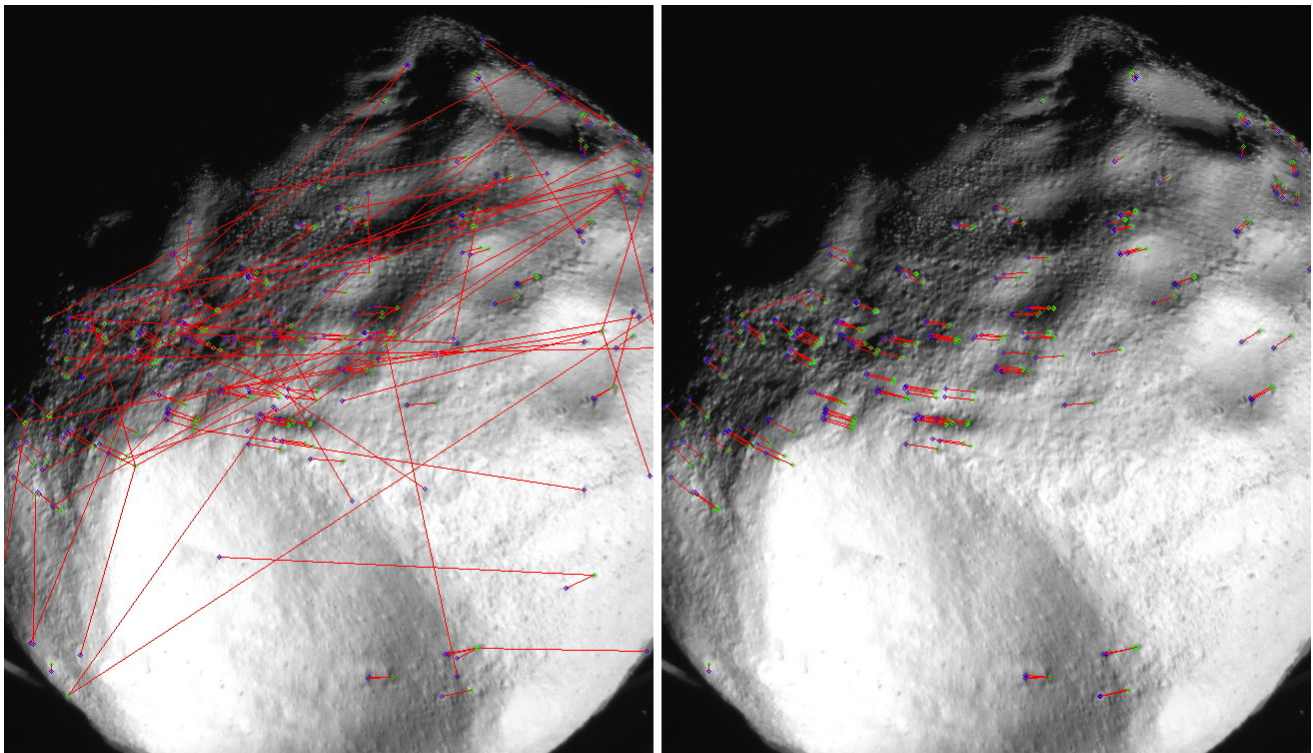
1. 群馬大学、2. 宇宙航空研究開発機構

1. Gunma University, 2. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

はやぶさ2などの小惑星の探査では、小惑星の形状を探査機が小惑星に到着した後に撮影された画像から復元する必要が生じる。その処理の際には、異なった位置から撮影された画像間で、小惑星上の同一点の画像上で位置を決定する必要がある。これを画像処理を用いて自動で行うために、画像の特徴点を抽出し、それぞれの画像での特徴点の類似度を元に対応を取るが、この評価基準だけでは誤対応が比較的多く含まれる。しかし、剛体を異なった位置から撮影した時に画像上の対応点に成り立つ関係であるエピポーラ拘束を用いることで、誤対応を除去することができると考えられる。本報告ではこの実験を行った。実験ではJAXAで作成した小惑星の模型を撮影した画像を用い、画像特徴はAKAZE(Alcantarilla et al. 2013)を用いた。また、正しい対応か否かの判定は目視によった。その結果、特徴点の類似度のみで対応を決定した場合に正解率が68%であった画像では、エピポーラ拘束を用いることにより97%に向上した。このことより、小惑星画像の対応点決定処理でエピポーラ拘束を用いることは有効であると考えられる。

キーワード：エピポーラ拘束、基礎行列、小惑星画像、対応点、AKAZE

Keywords: epipolar constraint, fundamental matrix, asteroid image, point correspondence, AKAZE



correspondances without epipolar constraint

correspondances with epipolar constraint

## 小惑星画像の対応点決定を目的としたSIFTとAKAZEの性能比較 Performance comparison between SIFT and AKAZE for corresponding point computation on asteroid images

\*山口 裕輝<sup>1</sup>、太田 直哉<sup>1</sup>、尾川 順子<sup>2</sup>

\*Hiroki Yamaguchi<sup>1</sup>, Naoya Ohta<sup>1</sup>, Naoko Ogawa<sup>2</sup>

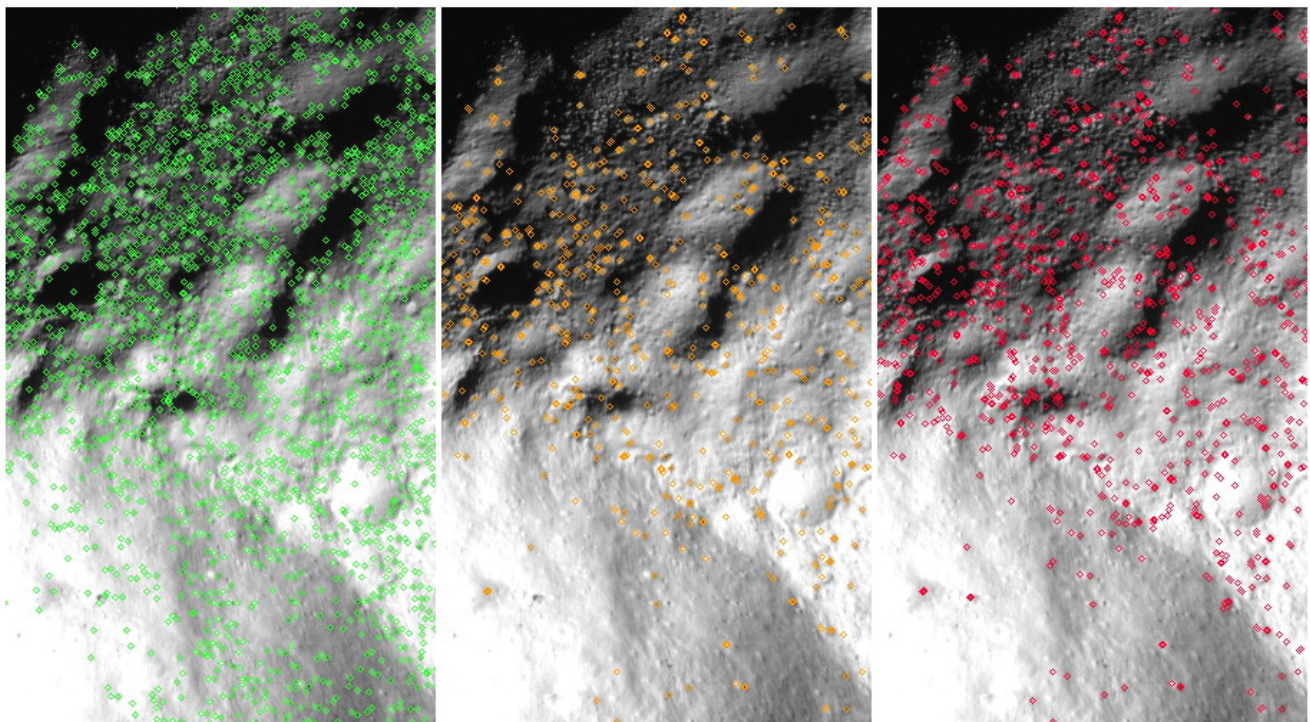
1. 群馬大学、2. 宇宙航空研究開発機構

1. Gunma University, 2. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

はやぶさ2などの小惑星の探査では、小惑星の形状を探査機が小惑星に到着した後に撮影された画像から復元する必要が生じる。その処理の際には、異なった位置から撮影された画像間で、小惑星上の同一点の画像上で位置を決定する必要がある。これを画像処理を用いて自動で行うために、画像の特徴点を抽出するが、その方法としてSIFT(Lowe 2004)と呼ばれる特徴が良好な特性を持っていることが知られている(Takeishi et al. 2015)。しかしSIFTは特許で保護されており、使用目的によってはこれが問題となる場合がある。一方SIFTの後に提案されたAKAZE(Alcantarilla et al. 2013)と呼ばれる特徴にはそのような制限が無い。そこで本報告では、小惑星画像を対象とした場合にSIFTとAKAZEの性能を比較した。実験ではJAXAで作成した小惑星の模型を撮影した画像を用いた。特徴点として抽出される点の数はSIFTの方が多い(例えば6000程度)が、AKAZEでもここでの目的のためには十分な数の特徴点が抽出される(例えば3000程度)。また位置を変えて撮影した画像間での対応の正解率もほぼ同等(誤差率30~40%)で、AKAZEが優れる場合(誤差率がSIFT 36%に対してAKAZE 32%)もある。このことより小惑星の対応点決定法として、AKAZEも実用的であると考えられる。

キーワード : SIFT、AKAZE、小惑星画像、画像特徴、対応点

Keywords: SIFT, AKAZE, asteroid image, feature point, point correspondence



feature points by SIFT

common feature points

feature points by AKAZE

# 地球接近天体(1566)Icarusとその同一起源候補天体2007 MK6の近赤外測光観測

## Near-Infrared Photometry of Near Earth Asteroid (1566) Icarus and 2007 MK6

\*櫻井 友里<sup>1</sup>、浦川 聖太郎<sup>2</sup>、高橋 隼<sup>3</sup>、谷川 智康<sup>4</sup>、中村 小百合<sup>5</sup>、はしもと じょーじ<sup>1</sup>

\*Yuri Sakurai<sup>1</sup>, Seitaro Urakawa<sup>2</sup>, Jun TAKAHASHI<sup>3</sup>, Tomoyasu TANIGAWA<sup>4</sup>, Sayuri NAKAMURA<sup>5</sup>, George HASHIMOTO<sup>1</sup>

1. 岡山大学大学院自然科学研究科、2. 日本スペースガード協会、3. 兵庫県立大学、4. 三田祥雲館高校、5. 岡山大学理学部

1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Japan Spaceguard Association, 3. University of Hyogo, 4. Sanda Shouinkan Highschool, 5. Okayama University

地球接近天体(1566)Icarusの自転周期はラブルパイル構造の天体が分裂するとされている自転周期2.2時間より少しだけ長い2.2726時間と推定されている(Warner, 2015)。また、地球接近天体2007 MK6は、軌道計算の結果からIcarusを起源とする天体であることが示唆されている(Ohtuska et al., 2007)。直径1km程度のIcarusにはYORP効果が働いて自転が速くなる可能性があることを考えると、「YORP効果によってIcarusの自転周期が速くなり、Icarusから2007 MK6が分裂した。分裂の過程でIcarusは2007 MK6に角運動量を渡し、現在のIcarusの自転周期は2.2時間よりも少し長い2.2726時間になった」という仮説を立てることができる。この仮説を検証するため、西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡と近赤外線撮像装置NICを用いて、J, H, Ksの3バンドでIcarusと2007 MK6に対して3色同時測光観測をおこなった。2007 MK6がIcarusから分離したのであれば、両者の反射スペクトルは同じであると期待される。また、近い過去に分裂したならば、天体の表面には分裂によって露出した宇宙風化の影響をほとんど受けてない新しい面が存在する。表面に宇宙風化に起因する不均一があるかどうか確認することで、分裂の可能性を検証することができる。

Icarusの観測は2015年6月18日~6月21日に、2007 MK6の観測は2016年6月15日~6月18日に実施した。NICの視野内に対象天体と標準星を同時に入れることができなかつたため、対象天体と標準星は交互に撮像した。標準星は対象天体の近傍にあるG2V型星を使い、標準星の各バンドの明るさは2MASSのカタログ値を使用した。Icarusと2007 MK6それぞれについて反射スペクトルを決定するとともに、自転にともなう反射スペクトルの変化から表面の不均一について推定した。また、Icarusと2007 MK6の反射スペクトルを比較することで、起源について考察した。

キーワード：小惑星、測光、地球接近天体

Keywords: Asteroid, Photometry, Near-Earth Objects

## 地球接近天体(1566)Icarusとその同一起源候補天体2007 MK6の可視測光観測

### Observation of near-earth object (1566) Icarus and the split candidate 2007 MK6

\*浦川 聖太郎<sup>1</sup>、大塚 勝仁<sup>2</sup>、阿部 新助<sup>3</sup>、木下 大輔<sup>4</sup>、花山 秀和<sup>5</sup>、宮地 竹史<sup>5</sup>、奥村 真一郎<sup>1</sup>、綾仁 一哉<sup>6</sup>、前野 将太<sup>6</sup>、黒田 大介<sup>5</sup>、福井 暁彦<sup>5</sup>、成田 憲保<sup>5,7,8</sup>、はしもと じょーじ<sup>9</sup>、櫻井 友里<sup>9</sup>、中村 小百合<sup>9</sup>、高橋 隼<sup>10</sup>、谷川 智康<sup>11</sup>、Otabek Burhonov<sup>12</sup>、Kamoliddin Ergashev<sup>12</sup>、伊藤 孝士<sup>5</sup>、吉田 二美<sup>5</sup>、渡辺 誠<sup>13</sup>、今井 正堯<sup>14</sup>、倉本 圭<sup>14</sup>、関口 朋彦<sup>15</sup>、石黒 正晃<sup>16</sup>

\*Seitaro Urakawa<sup>1</sup>, Katsutoshi Ohtsuka<sup>2</sup>, Shinsuke Abe<sup>3</sup>, Daisuke Kinoshita<sup>4</sup>, Hidekazu Hanayama<sup>5</sup>, Takeshi Miyaji<sup>5</sup>, Shin-ichiro Okumura<sup>1</sup>, Kazuya Ayani<sup>6</sup>, Syouta Maeno<sup>6</sup>, Daisuke Kuroda<sup>5</sup>, Akihiko Fukui<sup>5</sup>, Norio Narita<sup>5,7,8</sup>, George HASHIMOTO<sup>9</sup>, Yuri SAKURAI<sup>9</sup>, Sayuri Nakamura<sup>9</sup>, Jun Takahashi<sup>10</sup>, Tomoyasu Tanigawa<sup>11</sup>, Otabek Burhonov<sup>12</sup>, Kamoliddin Ergashev<sup>12</sup>, Takashi Ito<sup>5</sup>, Fumi Yoshida<sup>5</sup>, Makoto Watanabe<sup>13</sup>, Masataka Imai<sup>14</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>14</sup>, Tomohiko Sekiguchi<sup>15</sup>, MASATERU ISHIGURO<sup>16</sup>

1. 特定非営利活動法人日本スペースガード協会、2. 東京流星ネットワーク、3. 日本大学、4. 国立中央大学、5. 国立天文台、6. 美星天文台、7. アストロバイオロジーセンター、8. 東京大学、9. 岡山大学、10. 兵庫県立大学、11. 三田祥雲館高校、12. Ulugh Beg Astronomical Institute Uzbekistan Academy of Science、13. 岡山理科大学、14. 北海道大学、15. 北海道教育大学、16. ソウル大学

1. Japan Spaceguard Association, 2. Tokyo Meteor Network, 3. Nihon University, 4. National Central University, 5. National Astronomical Observatory of Japan, 6. Bisei Observatory, 7. Astrobiology Center, 8. University of Tokyo, 9. Okayama University, 10. University of Hyogo, 11. Sanda Shounkan Highschool, 12. Ulugh Beg Astronomical Institute Uzbekistan Academy of Science, 13. Okayama University of Science, 14. Hokkaido University, 15. Hokkaido University of Education, 16. Seoul National University

**Background & Aim:** A numerical simulation proposes that the origin of near-Earth object 2007 MK<sub>6</sub> (hereafter, MK6) is a near-Earth object (1566) Icarus (hereafter, Icarus) [1]. In addition to it, the orbital parameters of the daytime Taurid-Perseid meteor swarm are in good agreement with those of Icarus. Thus, it is considered that MK6 is split from the parent object Icarus by a rotational fission and/or an impact event, and the produced dust became to the daytime Taurid-Perseid meteor swarm. To confirm such a hypothesis, we need to obtain the observational evidence that the color indices of Icarus and MK6 are same. Moreover, if MK6 split by the rotational fission due to the YORP effect, the rotation period of Icarus would be shorten compared with the past rotation period. When the MK6 split by an impact event, the rotation period of MK6 would shorter than the spin limit of 2.2 hours. We require the observation for Icarus and MK6 to test these hypotheses.

**Observations:** We conducted the observations for Icarus in 2015 and MK6 in 2016, respectively. The observation summary is shown as followings: Icarus (June 2015): Nayoro Observatory 1.6 m Pirka telescope of the Hokkaido University (visible photometry), Ishigakijima Astronomical Observatory (IAO) 1.05 m Murikabushi telescope ( $g'$ ,  $R_C$ , and  $I_C$  band simultaneous photometry), Maidanak Observatory (MO) 0.6 m telescope ( $R$  band photometry), Nishi-Harima Astronomical Observatory (NHAO) Nayuta 2.0m telescope ( $J$ ,  $H$ , and  $K_S$  band simultaneous photometry), Lulin and Kinmen Observatory 0.4 m telescopes (visible photometry), Lowell Observatory (LO) 1.1 m, 1.8 m, and 4.3 m telescopes (visible photometry and visible spectroscopy), MK6 (June - July 2016): IAO 1.05 m Murikabushi telescope ( $g'$ ,  $R_C$ , and  $I_C$  band simultaneous photometry), MO 1.5 m telescope ( $R$  band photometry), NHAO Nayuta 2.0 m telescope ( $J$ ,  $H$ , and  $K_S$  band simultaneous photometry), Lulin Observatory 1.0 m telescope (visible photometry), LO 1.8

m and 4.3 m telescopes (visible photometry and visible spectroscopy), University of Hawaii 2.24 m telescope (visible photometry), Okayama Astrophysical Observatory 1.88 m telescope ( $g'$ ,  $r'$ , and  $z'$  band simultaneous photometry).

**Results:** Previous studies indicated that the taxonomic type of Icarus is an S-type or a Q-type [2][3]. We obtained that the color indices  $g' - R_C$  and  $R_C - I_C$  are  $0.828 \pm 0.027$  mag and  $0.397 \pm 0.025$  mag, respectively. These are consistent with the color indices of an S-type asteroid. Moreover, the color indices implied the slight rotational color variation, though the further data analysis is needed. On the other hand, the color indices and the rotation period of MK6 have not been revealed in the previous study. In addition to the color indices of Icarus, we will present the result the color indices of MK6 and the rotation period of both Icarus and MK6.

**References:** [1] Ohtsuka K. et al. (2007) *ApJ*, 668, L71-L74. [2] Chapman C. R., Morrison D., and Zellner B. (1975) *Icarus*, 25, 104-139. [3] Hicks M. D., Fink U., and Grundy W. M. (1998) *Icarus*, 133, 69-78.

キーワード：小惑星、測光、地球接近天体

Keywords: Asteroids, Photometry, Near-Earth Objects

## 原始惑星系円盤での乱流によるダストアグリゲイトの焼結

### Sintering of icy dust aggregates due to turbulence in a protoplanetary disk

\*児玉 季里子<sup>1</sup>、城野 信一<sup>1</sup>

\*Kiriko Kodama<sup>1</sup>, Sin-iti Sirono<sup>1</sup>

1. 名古屋大学大学院環境学研究科

1. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

原始惑星系円盤はガスとダスト微粒子で構成されている。ダスト微粒子の付着成長が惑星形成の第一ステップであるので、ダスト微粒子が付着成長できるか否かを知ることは重要である。ダスト微粒子には氷ダストと岩石ダストがある。本研究で注目している氷ダストアグリゲイトは、加熱されると焼結が進行する。焼結とは表面積が小さくなる方向に物質が移動する現象であり、ダストアグリゲイトが焼結するとダストのつなぎ目のネックが成長する。焼結したダストアグリゲイトは衝突すると跳ね返り成長できなくなるので、焼結の進行が惑星形成の初期に影響する。

原始惑星系円盤では、熱源は中心星の可視光照射である。赤道面付近のダスト微粒子によって照射は遮られるため、円盤表面のダスト微粒子のみ加熱される。そのため、乱流によって氷ダストアグリゲイトが高温の円盤表面付近に輸送されると、焼結が進む可能性がある。

Sirono, (2011, ApJ, 735, 131)では、赤道面での温度分布から焼結が進行するのに必要なタイムスケールが示されている。しかし、先行研究では氷ダストアグリゲイトの鉛直方向の運動は考慮されていない。そこで本研究では、数値シミュレーションにより各ダストアグリゲイトの鉛直方向の運動を算出し、乱流輸送を考慮した焼結タイムスケールを求めた。

ダストアグリゲイトの鉛直方向の運動は乱流による拡散と、中心星の重力による沈降の2つである。乱流拡散と沈降を数値シミュレーションで再現することで、各ダストアグリゲイトの運動を算出する。一定時間経過すると、ダストアグリゲイトの分布は定常状態になる。定常状態になるまでのタイムスケールは沈降タイムスケール程度である。分布が定常状態でも、各ダストアグリゲイトは円盤内鉛直方向を上下に動き、高温である円盤表面に到達すると焼結する。そのため、焼結したダストアグリゲイトの比は時間とともに増加する。焼結は温度に強く依存しているため(Sirono, 2011, ApJ, 735, 131)、氷ダストアグリゲイトは高温領域である円盤表面以上の高さを経験すると、付着成長に影響するまで焼結すると仮定する。数値シミュレーションによって、高温領域を経験し、焼結したダストアグリゲイトの割合を算出し、そこから焼結タイムスケールを得る。

焼結タイムスケールは円盤表面が下がるにつれ短くなり、円盤表面がダストアグリゲイトのスケールハイト程度である時、乱流輸送による焼結が十分に進む。円盤表面までの距離は、オパシティに依存している。アグリゲイトの成長につれオパシティが下がれば、先行研究の焼結領域に対し、新たな焼結領域が出現することが期待される。しかし、小さいアグリゲイトが少量でも存在すると、円盤表面までの距離は十分に下がらないので、円盤表面付近への輸送による焼結は進行しない。

キーワード：原始惑星系円盤、焼結、乱流

Keywords: protoplanetary disk, sintering, turbulence

## 捕獲された微惑星の周惑星円盤内での分布

### Distribution of captured planetesimals in circumplanetary disks and implications for accretion of regular satellites

\*末次 竜<sup>1</sup>、大槻 圭史<sup>2</sup>

\*Ryo Suetsugu<sup>1</sup>, Keiji Ohtsuki<sup>2</sup>

1. 産業医科大学、2. 神戸大学

1. University of Occupational and Environmental Health, 2. Kobe University

木星や土星などの巨大惑星の周りには、衛星が公転している。こうした衛星はほぼ円軌道で惑星の赤道面を公転している。そのため巨大惑星の形成過程において惑星周りに形成された周惑星円盤内で衛星は誕生したと考えられている。現在の衛星形成モデルでは、周惑星円盤に降着するガス流とともに流入してくるダストサイズの固体物質が衛星の主な材料物質と考えられている。ところが、最近の軌道計算を用いた固体物質の周惑星円盤への供給過程を調べた研究から、衛星の材料となった固体物質は従来のダストサイズのものだけでなく、比較的大きな固体物質(10m-1km)も、周惑星円盤に供給されることが明らかになった。しかしながら、周惑星円盤に供給された固体物質の円盤内での空間分布は、衛星の形成や軌道進化に大きな影響を与えるにも関わらず、ほとんど解明されていない。そこで本研究では周惑星円盤からのガス抵抗によって捕獲された微惑星サイズの固体物質の周惑星円盤内での空間分布を軌道計算を用いて調べた。計算の結果、周惑星円盤内にある捕獲された微惑星は、捕獲後、順行方向に公転するもの、逆行方向に公転するもの、そして捕獲されず円盤を通過していくものの三種類に分類できることが明らかとなった。それらの面数密度を求めた結果、現在の木星のガリレオ衛星が公転している領域において捕獲された微惑星が分布することがわかった。また惑星軌道近傍の微惑星のギャップによる非一様分布を考慮した場合、周惑星円盤内の捕獲された微惑星の面数密度はギャップの拡大とともに減少していくことが明らかとなった。得られた数値計算結果をもとに、周惑星円盤内におけるダストと捕獲された微惑星の面密度を簡単に見積もり、それらの比較も行った。

キーワード：惑星、衛星

Keywords: planets and satellites

## 楕円軌道惑星による小天体の一時捕獲

## Temporary Capture of Small Bodies by an Eccentric Planet

\*樋口 有理可<sup>1</sup>、井田 茂<sup>2</sup>

\*Arika Higuchi<sup>1</sup>, Shigeru Ida<sup>2</sup>

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

We have investigated the probability of temporary capture of asteroids in eccentric orbits by a planet in a circular or an eccentric orbit by analytical and numerical calculations. We found that in the limit of the circular orbit, the capture probability is  $\sim 0.1\%$  of encounters to the planet's Hill sphere, independent of planetary mass and semimajor axis. In general, the temporary capture becomes difficult, as the planet's eccentricity ( $e_p$ ) increases. We found that the capture probability is almost independent of  $e_p$  until a critical value ( $e_p^c$ ) that is given by  $\sim 5$  times of Hill radius scaled by the planet's semimajor axis. For  $e_p > e_p^c$ , the probability decreases approximately in proportional to  $e_p^{-1}$ . The current orbital eccentricity of Mars is several times larger than  $e_p^c$ . However, since the range of secular change in Martian eccentricity overlaps  $e_p^c$ , the capture of minor bodies by the past Mars is not ruled out.

キーワード：火星衛星、小惑星

Keywords: Martian moons, asteroids



# 磁気回転不安定性の空間分布に依存するスノーラインの位置 Position of Snow Line Depending on Spatial Distribution of Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks

\*森 昇志<sup>1</sup>、奥住 聡<sup>1</sup>

\*Shoji Mori<sup>1</sup>, Satoshi Okuzumi<sup>1</sup>

1. 東京工業大学大学院 理学院 地球惑星科学系

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

原始惑星系円盤において、氷ダストは固体物質の質量の大部分を占め、微惑星形成において重要な役割を果たしている。それに加え、氷ダストは岩石型惑星の海の起源とも関連しており、惑星形成過程において氷ダストの分布を知ることは、惑星形成のみならず生命の起源を考える上でも欠かせない。氷ダストは、氷の昇華境界(スノーライン)以遠で存在することができ、スノーラインの位置を決定している円盤の温度構造を理解することが特に重要である。円盤が散逸するまでは、スノーラインが存在する円盤内側は光学的に厚いので、降着ガスの重力エネルギーが乱流粘性によって変換された熱が円盤に蓄積し、円盤内側の温度構造を決定すると考えられている。すなわち、この粘性加熱によって、円盤赤道面付近のスノーラインの位置が支配されている (Oka et al. 2011)。

粘性加熱を考慮する際、加熱率が赤道面に集中する分布がよく仮定される。しかし、このような仮定は必ずしも現実的であるわけではない。原始惑星系円盤内における乱流の駆動源の1つは、磁場と円盤ガスとの相互作用によって引き起こる磁気回転不安定である。しかしこの機構は、ガスの電離度が比較的高い円盤の表面部でのみ起こると考えられている。このような場合、円盤内部での熱の蓄積が十分に起こらず、赤道面の温度上昇が起こりにくいことが輻射磁気流体シミュレーションによって示されている (Hirose & Turner 2011)。

本研究では、この事実に着目し、磁気乱流構造に基づいた円盤の温度構造を求め、スノーラインの位置を調べる。具体的には、成層構造と電離度分布を考慮した3次元の磁気流体計算を行い、得られたエネルギー散逸率の分布から動径方向温度構造とスノーラインの位置を求める。数値計算の結果、円盤赤道面から3スケールハイト程度の高さで、エネルギー散逸率が最大値をとることを確認した。これは、Hirose & Turner (2011)の結果と矛盾しない。また、その加熱率の最大値の位置で降着エネルギーが解放されると仮定して、スノーラインの位置を求めた。その結果、中心星への質量降着率が $10^{-8} M_{\text{solar}}/\text{year}$ のときのスノーラインの位置は、赤道面での加熱を仮定すると3auであるのに対し、3スケールハイト程度の高さでの加熱を仮定すると0.7auになることがわかった。この結果は、スノーラインの位置が円盤の磁気乱流構造によって大きく変わりうることを示すものである。また、エネルギー散逸率の初期磁場に対する依存性についても調べ、初期の磁場強度に対するスノーラインの位置の依存性についても議論する。

キーワード：原始惑星系円盤、磁気流体力学、スノーライン

Keywords: Protoplanetary disk, Magnetohydrodynamics, Snow line

# Ripped-apart icy moon説による土星のリング形成のSPH数値解析

## Numerical simulation of Saturn ring formation using SPH

\*村嶋 慶哉<sup>2</sup>、細野 七月<sup>1</sup>、山敷 庸亮<sup>1</sup>

\*keiya murashima<sup>2</sup>, Natsuki Hosono<sup>1</sup>, Yosuke Yamashiki<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院総合生存学館、2. 京都大学理学部

1. Global Water Resources Assessment Laboratory - Yamashiki Laboratory Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability Kyoto University, 2. Faculty of Science, Kyoto University

土星の輪は、氷でできた土星の月が土星の潮汐力で砕かれてバラバラになってできたという、Ripped-apart icy moon起源説が有力である。

この仮説では、氷でできた月はロシュ限界で壊れるが、岩石でできた核は土星の内部まで壊れないため、リングはほとんど氷で形成され、反射率が高く明るいと言われていた。

我々はこの、土星リングの形成過程を先行研究と同様のSPHコードを用いて流体数値計算を行い、より詳細な結果の粒子数や初期条件の依存性に関して、調べる事を試みた。

可能であれば、固体の効果を加味した結果についても紹介する予定であり、我々のコードは隕石衝突や土石流などの計算にもそのまま応用可能になる予定である。

キーワード：潮汐力による氷衛星剥離、SPH、プロペラ構造

Keywords: Ripped-apart icy moon, SPH, propeller structure

## 巨大微惑星の潮汐破壊による巨大惑星リングの形成

### Ring formation around giant planets by tidal disruption of a passing large Kuiper belt object

\*兵頭 龍樹<sup>1,2,3</sup>、Charnoz Sebastien<sup>2</sup>、大槻 圭史<sup>3</sup>、玄田 英典<sup>1</sup>

\*Ryuki Hyodo<sup>1,2,3</sup>, Sebastien Charnoz<sup>2</sup>, Keiji Ohtsuki<sup>3</sup>, Hidenori Genda<sup>1</sup>

1. 東京工業大学 地球生命研究所、2. Institut de Physique du Globe de Paris、3. 神戸大学大学院理学研究科

1. Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2. Institut de Physique du Globe de Paris, 3. Graduate School of Science, Kobe University

土星などの巨大惑星周りには多様なリング（輪）が存在する。土星リングはその質量の95%以上が水氷から形成されているが、天王星や海王星のリングは岩石成分も多く含まれると考えられている。しかし、このように多様なリングの形成起源は長らく明らかになっていない。

一方、近年の惑星形成モデルにおいて約38億年前に起こったとされる後期重爆撃期に海王星以遠の微惑星円盤には少なくとも1000-3000個の冥王星サイズの巨大な微惑星が存在していた可能性が明らかになった。そして、このような巨大微惑星は後期重爆撃期に巨大惑星と複数回の近接遭遇を経験することが明らかになった。

本研究では、まずSPH計算を用いる事で、分化した冥王星サイズの微惑星と巨大惑星の近接遭遇時に微惑星が潮汐破壊され、破片が惑星に重力的に捕獲される過程を詳細に調べ上げた。その結果、現在のリングの質量を十分に説明できる質量が捕獲されることが明らかになった。しかし、捕獲直後の破片サイズは数キロメートルと観測されるサイズと比べて非常に大きい。また、捕獲直後の破片の軌道は非常に楕円軌道であった。

そこで、次に我々は、惑星の扁平を考慮したN体計算を用いて破片の長期的な軌道進化を調べた。その結果、長期的な進化において破片は歳差運動をすることで軌道方向がランダムに分布し、惑星赤道面に対称なトーラス構造を形成することが分かった。その後、破片は互いに高速衝突を経験し、破壊され、さらに衝突ダンプングで、惑星赤道面に落ち着いた円軌道で小さな粒子からなるリングになることが明らかになった。

さらに、土星は密度が天王星や海王星に比べて小さいことから、土星では近接遭遇してきた分化天体のマントル（氷）部分のみが破壊・捕獲される近接遭遇しか起こらないが、天王星や海王星では、マントルのみだけでなくコア（岩石）まで破壊・捕獲されることが明らかになった。ゆえに、本研究で示した巨大微惑星の潮汐破壊によるリングの形成モデルは、観測に矛盾しない多様なリングを形成しうるものである。

本研究は、Hyodo,R.,Charnoz,S.,Ohtsuki,K.,Genda,H. 2017,Icarus,282,195-213 に掲載されている。

キーワード：リング、衛星、巨大惑星

Keywords: Rings, Satellites, Giant planets

## Effect of Planetary Spin on Giant Impacts

\*細野 七月<sup>1,2</sup>、小久保 英一郎<sup>3</sup>

\*Natsuki Hosono<sup>1,2</sup>, Eiichiro Kokubo<sup>3</sup>

1. 京都大学、2. 理化学研究所、3. 国立天文台

1. Kyoto University, 2. RIKEN, 3. NAOJ

In planetary science, impact phenomena between two objects play an important role, e.g., the Moon-forming impact.

Thus, to date, a lot of numerical simulations of giant impacts are carried out.

A potentially important effect on giant impacts is the spin of colliding bodies.

However, most previous works neglected the spin.

It is more natural that the bodies have pre-impact rotations.

In this work, we systematically investigate the effect of the spin on giant impacts.

We employ the Density Independent SPH, which is an improved version of the standard SPH method.

We show the dependence of the collisional outcome on the spin period.

# 小惑星の形状形成の解明へ向けて：微惑星形状の衝突条件依存性

## The Origin of Asteroid Geometries: Dependence on Conditions of Planetesimal Collisions

\*杉浦 圭祐<sup>1</sup>、犬塚 修一郎<sup>1</sup>、小林 浩<sup>1</sup>

\*Keisuke Sugiura<sup>1</sup>, Shu-ichiro Inutsuka<sup>1</sup>, Hiroshi Kobayashi<sup>1</sup>

1. 名古屋大学大学院理学研究科

1. NAGOYA UNIVERSITY Graduate School of Science

近年のその場観測やライトカーブの詳細な解析により、多くの小惑星はイトカワのような球から離れた不規則な形状をしていることが明らかとなってきた。このような不規則な形状は微惑星の衝突破壊・合体によって形成されたと考えられている。衝突速度や衝突角度といった衝突条件とその結果できる天体の形状を関連付け、現在の太陽系に存在する小惑星の形状と比較することにより、太陽系の過去の環境に迫ることができると期待される。

微惑星のような比較的小さい天体の場合、自己重力だけではなく物質強度や粉々になった岩石間の摩擦力も重要となってくる。我々は微惑星の衝突破壊、及び重力再集積によってできる天体の形状を調べるため、弾性体力学に拡張されたSmoothed Particle Hydrodynamics法の計算コードを開発した (Sugiura and Inutsuka 2016, 2017)。さらにひび割れ破壊のモデル (Benz and Asphaug 1995) 及び摩擦のモデル (Jutzi 2015) も計算コードに導入した。摩擦のモデルを導入することにより、衝突で粉々になった岩石が自己重力で集積してできたラブルパイル天体の形状形成も再現することができる。開発した計算コードは自己重力も同時に計算しているため、衝突破壊とその後の自己重力再集積を統合的に取り扱うことができる。

我々はこの計算コードを用いて、半径50km程度の岩石微惑星どうしの衝突の数値計算を衝突速度、衝突角度、質量比を様々に変えながら実行し、その結果できた天体のなかで比較的大きいものの軸比を測定した。本講演では衝突によってできる天体の形状と衝突条件の関連性、及びそのような形状ができるメカニズムについて議論する。

キーワード：小惑星形状、微惑星衝突、SPH法、弾性体力学

Keywords: asteroid geometry, planetesimal collision, SPH, elastic dynamics

## 高空隙率シリカ層への衝突実験と空隙率を考慮したクレーターサイズスケール則の構築

### Impact cratering on a silica dust layer with high porosity and the effect of porosity on the crater size scaling law

\*石黒 琢也<sup>1</sup>、荒川 政彦<sup>1</sup>

\*Takuya Ishiguro<sup>1</sup>, Masahiko Arakawa<sup>1</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kobe University

Recent planetary exploration revealed that small bodies in the solar system could have a large porosity as large as 80% for comet nuclei and less than 75% for asteroids. Impact craters found on such highly porous bodies were recognized to be quite different from that found on rocky bodies without porosity, that is, there were several craters on their surface which sizes were beyond their radius. These large craters were supposed to be formed by pore collapse during the impact compression and so it was recently classified into a compressive type crater. Classically, the impact crater is classified into two types depending on the physical mechanism controlling the final crater size: they are a crater formed in a gravity dominated regime and a crater formed in a strength dominated regime. These classical type craters have been studied to construct the crater size scaling law, and now the  $p$  scaling law was widely accepted to use for the planetary impact phenomena. However, the effect of porosity on this  $p$  scaling law for the crater size was not clarified yet although limited studies have been conducted by Housen and Holsapple (2003) and others. The  $\pi$  scaling law applicable for the porous asteroids is necessary for the impact experiment on small asteroid Ryugu by Hayabusa-2 small carry-on impactor because one candidate for the surface condition on Ryugu is fine-grained layer with a high porosity.

In this study, commercial amorphous silica dusts with the average particle size of 0.5mm and the density of  $2.2\text{gcm}^{-3}$  ( $\rho$ ) were used to prepare the target with the bulk porosity from 50% to 78%, and the target was simply consolidated by the cohesion force of Van Der Waals force with the tensile strength from 100 Pa to  $10^4$  Pa. We made impact cratering experiments using this porous target to study the effect of the porosity on the crater morphology including the crater size. Impact experiments were conducted by using a horizontal type two-stage light gas gun set at Kobe University and a glass bead projectile with the diameter of 2mm and the mass of 10 mg ( $m_p$ ) was launched at the impact velocity at  $3.60\text{ km s}^{-1}$ . The projectile was impacted on the target surface normally set in a large vacuum chamber less than 20 Pa. The crater morphology was found to change with the increase of the porosity, that is, the shallow dish type crater was observed on the target with the porosity of 50% having the tensile strength of  $10^4$  Pa, and as the porosity increased the impact spherical cavity was formed to grow and expanded below the shallow dish crater. The recovered target was hardened by epoxy resin and cut at the center of the crater to observe the cross section to measure the cavity diameter ( $D$ ), the depth of the crater ( $d$ ) and the diameter of the shallow dish crater. The relationship between the distension ( $a = \rho / \rho_{\text{bulk}}$ ) and the normalized cavity diameter,  $\pi_D = (\rho_{\text{bulk}} D / m_p)^{1/3}$ , was found to follow the empirical equation of  $\pi_D = 3.8a^{0.7}$ , where  $\rho_{\text{bulk}}$  is bulk density of the target, and the relationship between the distension and the normalized depth,  $\pi_D = (\rho_{\text{bulk}} d / m_p)^{1/3}$ , was found to follow the empirical equation of  $\pi_D = 3.0a^{1.0}$ . While the crater diameter of the shallow dish crater found at the entrance of the cavity was recognized to be constant irrespective of the porosity. These empirical equations could be used to incorporate the effect of porosity on the crater size scaling law.

キーワード：衝突クレーター、スケール則、多孔質天体  
Keywords: Impact crater, scaling law, porous bodies

## 隕石を模擬した試料の衝突破壊強度の確率分布と小惑星強度のサイズ依存性への応用

### Probability distribution of impact strength on the target simulating meteorites and implication for the size dependence of asteroid strength

\*長友 文哉<sup>1</sup>、荒川 政彦<sup>1</sup>、岡本 千里<sup>1</sup>

\*Fumiya Nagatomo<sup>1</sup>, Masahiko Arakawa<sup>1</sup>, Chisato Okamoto<sup>1</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kobe University

Impact strength of asteroids is one of the most important physical parameter to control the size frequency distribution of asteroids in the main belt. The impact strength has been studied in the laboratory using cm-scale targets simulating various type asteroids such as rocky, icy and metal bodies, and these previous studies revealed that the impact strength strongly depended on materials and internal structure such as porosity. However, actual collision among asteroids happen at the scale of several orders of magnitude larger than that at the laboratory scale. Therefore, the size dependence of the impact strength is quite important to consider the asteroid collision. There is a traditional theory for material strength and it is well known that the material strength follows probability distribution: it scatters according to Weibull distribution. This probability distribution of the material strength is theoretically connected to the size dependence of the material strength: so called the Weibull statistical fracture theory. This size dependence is confirmed at the static deformation condition so far, then we try to extend this Weibull theory to the dynamic deformation condition corresponding to high-velocity impact for the purpose of asteroid collisions.

We made impact disruption experiments by using a vertical type gas gun set at Kobe University. A nylon ball projectile with the diameter of 10mm was launched at the velocity from 65 to 208 ms<sup>-1</sup>, and was impacted on the target surface normally. The targets were a gypsum-glass beads mixture (GG) with the mean density of 1.9gcm<sup>-3</sup> or a gypsum-bentonite mixture (GB) with the mean density of 0.77 gcm<sup>-3</sup>; both had a shape of cylinder whose diameter was 30mm. GG and GB targets were analogues of chondritic meteorites, so the glass beads with the size of 1mm simulated a chondrule. The impact experiments were conducted 10 times at the same impact condition for each target: the constant energy density (Q: the kinetic energy of projectile divide by target mass) was applied to the target, and we measure the mass of the largest fragment (LFM) at each time, then we noticed that the resultant 10 data were so scattered. We studied the probability distribution of the largest fragment mass, and then we obtained the impact strength (Q<sup>\*</sup>) from the largest fragment mass on the basis of the typical relationship between LFM and Q. Impact experiments at two different energy densities were conducted for each target. We also measured the tensile strength of GG and GB targets more than 10 times by the static deformation test to study the probability distribution of the tensile strength.

We obtained the Weibull parameter ( $\Phi$ ) to characterize the probability distribution of the strength for the tensile fracture:  $\Phi=7$  and  $8$  for GG and GB target, respectively; they are similar to the values obtained for basalt and granite. The cumulative probability,  $P$ , of the fracture for the materials is shown as follows according to the Weibull theory,  $P=1-\exp(-V/V_0(\sigma/\sigma_0)^\Phi)$  (eq.1), where  $V$  is volume of the target and  $\sigma$  is strength, and the suffix 0 shows the standard condition. The largest fragment mass recovered from impact experiments was found to scatter so much; e.g. GG target showed the scattering in one order of



magnitude. The average impact strength of GG and GB target for 20 experiments in each was obtained to be 34 and 158  $\text{Jkg}^{-1}$ , respectively, and we tried to make the relationship between P and  $Q^*$  according to eq.1 by substituting  $Q^*$  for  $\sigma$ , where  $Q^*$  was determined from each LMF using the typical relationship between LFM and Q, then  $\Phi$  was obtained from the probability distribution of the impact strength:  $\Phi$  is 1.8 and 2.6 for GG and GB target. Thus, the size dependence of the impact strength could be estimated from eq.1 setting  $P=0.5$ :  $Q^*=Q_0 D^{-n}$ , where D is the target size and n is 1.6 and 1.2 for GB and GG target, respectively.

キーワード：衝突破壊強度、衝突スケール則、小惑星

Keywords: Impact strength, Impact scaling law, Asteroids

## 含水率を変化させた粒子層への高速度衝突クレーター形成実験 High-velocity impact cratering experiments on granular layer with various water contents

\*田澤 拓<sup>1</sup>、荒川 政彦<sup>1</sup>、松榮 一真<sup>1</sup>

\*Taku Tazawa<sup>1</sup>, Masahiko Arakawa<sup>1</sup>, Kazuma Matsue<sup>1</sup>

1. 神戸大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, Kobe University

Recent study on numerical simulations of large scale impact cratering showed that complex crater such as a central-peak type crater was formed within the region where the materials composing the surface crust lost their shear strength by high shock pressure, and that this fluidized region should have a rheological property like Bingham fluid: it has a finite yield strength and behaves as Newtonian fluid beyond the yield strength. Although there are a lot of studies on the large scale complex craters by numerical simulations by using iSLAE, there is little studies to compare these simulations with laboratory experiments. Thus, the numerical results should be confirmed by the laboratory experiments to assure their numerical models. One of the most important points of the numerical model is rheological properties of the fluidized region and how it behaves during the crater formation process. Then, we try to study the crater formation process of fluidized material with various rheological properties such as yield strength and viscosity. In this study, we used granular materials including various water contents in order to control the rheological properties of target. Glass beads with the size of  $100\ \mu\text{m}$  and quartz sand with the size of  $100\ \mu\text{m}$  were used for the target with the water contents from 0 to 24.5 wt.%, and we found that the pore space in the granular layer was completely filled with water at the content larger than 19.3 wt.%. The yield strength,  $Y$ , of the wet glass beads layer was measured by means of indentation tests and the obtained  $Y$  rapidly increased from 1kPa to 50kPa when the water content changed from 0 to 3wt.%, then it gradually increased from 50kPa to 100kPa until 17.5wt.%. Beyond the content of 17.5wt.%, the  $Y$  suddenly dropped below 5kPa until 19.5wt.%. Moreover, the relationship between the  $Y$  and the indentation speed for the wet glass beads layer with the content of 20wt.% was studied, and it was clarified that the  $Y$  of this saturated layer was proportional to the square root of indentation speed. We used this wet glass beads with various rheology for the high-velocity cratering experiments. The impact experiments were made by using a vertical type gas gun set at Kobe University, and the target box was set below a wind shield in a sample large chamber. The glass bead projectile with the size of 3mm was launched at the velocity of 170m/s, and the cratering process was observed by a high-speed digital video camera with the frame rate of  $2 \times 10^3$  FPS.

The crater shape was found to change with the water content: a bowl type for 0 to 3wt.%, a pit type with fractured rim for 3wt.% to 17.5wt.%, and a pit type with deformed rim for  $> 17.5$ wt.%. The high speed camera image was used to characterize the ejecta corresponding to the crater morphology. The bowl type crater was associated with a continuous ejecta curtain, and the pit type crater with a fractured rim was associated with many fragments composed of clumps. The pit type crater with a deformed rim formed small amount of ejecta and was associated with low velocity ejecta curtain undetached from the surface. The crater diameter was found to monotonically decrease with the water contents up to 18.3wt.% irrespective of the crater morphology, but the crater depth decreased until 15wt.% and then it rapidly increased from 15wt.% to 18.3wt.% corresponding to the pit type crater with a deformed rim. Thus, the depth to the diameter ratio could be classified into 3 region depending on the crater morphology: it simply increased from 0.1 to 0.5 for a bowl type, and it was a constant of 0.5 for a pit type with a fractured

rim, and then it rapidly increased again for a pit type with a deformed rim. The crater depth could be controlled by the yield strength of the wet sand, but the crater diameter could not be controlled by the yield strength at the water content larger than 17.3wt.%. In this region, the wet sand showed non-newtonian behavior, thus this rheological property might cause the decrease of the crater diameter in this region.

キーワード：複雑クレーター、レオロジー、高速度衝突現象

Keywords: Complex crater, Rheology, High-Velocity impact phenomena

## 硫黄の宇宙風化作用に対する影響

### The effect of sulfur on space weathering

\*田中 宏和<sup>1</sup>、佐々木 晶<sup>1</sup>、岡崎 瑞祈<sup>1</sup>、廣井 孝弘<sup>2</sup>

\*Hirokazu Tanaka<sup>1</sup>, Sho Sasaki<sup>1</sup>, Mizuki Okazaki<sup>1</sup>, Takahiro Hiroi<sup>2</sup>

1. 大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻、2. ブラウン大学 地球環境惑星科学

1. Department of Earth and Space Sciences, School of Science, Osaka University, 2. Department of Earth, Environmental and Planetary Sciences, Brown University

宇宙風化作用は大気のない岩石天体表面で光学的性質の変化を引き起こし、反射スペクトルの暗化、赤化、吸収バンドの弱化が見られる。このような変化は、太陽風の照射や微小隕石の衝突などによるナノ鉄微粒子の生成が原因であるということが知られている。水星の表面でも宇宙風化作用は観察されているが、そこには宇宙風化の光学的性質の変化の担い手である鉄は少なく、その一方で鉄よりも質量でより多くの硫黄が存在しているということがメッセンジャーの探査から分かった。このことから、宇宙風化による光学的性質の変化に鉄微粒子だけでなく硫黄やその化合物も寄与している可能性が示唆されている。そして、硫化鉄を加えたかんらん石の試料では宇宙風化が促進されるということが先行研究によって明らかになった。しかも、この研究の顕微鏡観察 (SEM) によって、かんらん石の粒子の周囲に硫黄の蒸着層が存在し、これが水星表面で起こっているような宇宙風化の原因になっていることが示唆されている。本研究では、私たちは単体の硫黄を混ぜたかんらん石の試料に対して宇宙風化を模擬したレーザーの照射を行い、このときどのような変化が起きるのか調べた。まず、かんらん石と硫黄を混合した試料に対して真空チャンバー内でパルスレーザーを照射する実験を行った。試料はかんらん石と10 wt %の硫黄の混合物 (ともに粒径45-75 nm) から作成し、5 mJのレーザーを照射した。さらに、レーザー照射後の試料に対して熱疲労実験も行った。そして、光学的性質の変化を調べるため、それぞれの実験の後にこれらの試料の反射スペクトル (波長範囲250-2500 nm) を分光器で測定した。

レーザー照射実験の結果、硫黄を含んだ試料では硫黄を含んでいないものに比べ、反射スペクトルのより大きな赤化が見られることが分かった。熱疲労実験の結果からは、加熱によって硫黄が蒸発するに従い、反射スペクトルも複雑な変化をすることが分かった。これらの結果を踏まえると、硫黄は宇宙風化作用における光学的性質の変化に影響を与えているということが言える。

## Performance report of solar wind ion irradiation equipment

\*仲内 悠祐<sup>1</sup>、松本 徹<sup>2</sup>、安部 正真<sup>2,1</sup>、土山 明<sup>3</sup>、瀧川 晶<sup>3,5</sup>、渡部 直樹<sup>4</sup>、浅田 祐馬<sup>3</sup>

\*Yusuke Nakauchi<sup>1</sup>, Toru Matsumoto<sup>2</sup>, Masanao Abe<sup>2,1</sup>, Akira Tsuchiyama<sup>3</sup>, Aki Takigawa<sup>3,5</sup>, Naoki Watanabe<sup>4</sup>, Yuma Asada<sup>3</sup>

1. 総合研究大学院大学物理科学研究科、2. 宇宙航空研究開発機構、3. 京都大学、4. 京都大学白眉センター、5. 北海道大学  
1. The Graduate University for Advanced Studies, 2. The Japan Aerospace Exploration Agency, 3. Kyoto University, 4. The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, 5. Hokkaido University

For understanding the evolution of the solar system, the material distribution in the early solar system is important. Meteorites provide large information on materials of the solar system, but they do not retain direct evidences for which parent body each meteorite came from.

The comparison between reflectance spectra of asteroids and meteorites suggest that the origins of almost all meteorites are asteroids. However, there are clear differences between reflectance spectra of asteroids and meteorites [references], which may be due to the space weathering on the surfaces of the asteroids. Recent studies proposed the importance of the influence of the solar wind implantation on the asteroidal surfaces in the near-Earth orbit [e.g. 1, 2]. Solar wind is composed of ~95% hydrogen, ~4% helium and other atoms [3]. However, space-weathering effects by low energy proton and helium ions consisting of the solar wind have not been understood well. In this study, we established ion beam irradiation equipment in ISAS/JAXA. This equipment is composed of an ion gun, main chamber (ion irradiation room), load lock chamber (sample preparation and FTIR measurement room), and FTIR. We can select ions with a specific mass and valence using the electric and magnetic fields. The maximum acceleration energy of ions is 5 keV. The reflection spectra of the irradiated samples can be measured without exposing the sample to the atmosphere. The optical path of FTIR can be purged with nitrogen. Therefore, the FTIR spectra of irradiated samples are obtained with minimized influences of adsorbed water and atmospheric fluctuations. In this presentation, we report the performance (e.g. beam current, beam shape) of ion beam irradiation equipment.

[1] C.M. Pieters et al., *Science*, 326(5952):568–572, 2009.

[2] T. Noguchi et al., *MPS*, 49(2):188–214, 2014.

[3] J.T. Gosling, *Encyclopedia of the Solar System (Second Edition)*, pages 99 –116, 2007.

キーワード：太陽風、宇宙風化

Keywords: solar wind, space weathering

# 系外惑星探査データベースExoKyotoを用いた系外惑星探査システムの構築

## Development of Exoplanet Observation System using ExoKyoto

山敷 庸亮<sup>1</sup>、土井 隆雄<sup>3</sup>、\*佐々木 貴教<sup>2</sup>、山中 陽裕<sup>5</sup>、齋藤 優樹<sup>5</sup>、竝木 茂朗<sup>5</sup>、村嶋 慶哉<sup>5</sup>、細野 七月<sup>1</sup>、野津 翔太<sup>2</sup>、野津 湧太<sup>2</sup>、黒木 龍介<sup>1</sup>、佐藤 啓明<sup>4</sup>、高木 風香<sup>6</sup>  
Yosuke Yamashiki<sup>1</sup>, Takao Doi<sup>3</sup>, \*Takanori Sasaki<sup>2</sup>, Akihiro Yamanaka<sup>5</sup>, Yuuki Saito<sup>5</sup>, Shigeru Namiki<sup>5</sup>, Keiya Murashima<sup>5</sup>, Natsuki Hosono<sup>1</sup>, Shota Notsu<sup>2</sup>, Yuta Notsu<sup>2</sup>, Kuroki Ryusuke<sup>1</sup>, Hiroaki Sato<sup>4</sup>, Fuuka Takagi<sup>6</sup>

1. 京都大学大学院総合生存学館、2. 京都大学大学院理学研究科、3. 京都大学宇宙総合学研究ユニット、4. 京都大学工学部、5. 京都大学理学部、6. 京都大学農学部

1. Global Water Resources Assessment Laboratory - Yamashiki Laboratory Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability Kyoto University, 2. Graduate School of Science, Kyoto University, 3. KYOTO UNIVERSITY UNIT OF SYNERGETIC STUDIES FOR SPACE, 4. Faculty of Engineering, Kyoto University, 5. Faculty of Science, Kyoto University, 6. Faculty of Agriculture, Kyoto University

太陽系外惑星データベースソフトウェア ExoKyoto を開発し開発・公開した。

ExoKyotoでは、現在までに発見された系外惑星の基本情報のほか、アルベドを仮定した惑星の推定温度や推定軌道、主星の情報などを一覧表示することができる。また、他のデータベースとの相互参照が可能なほか、欠損データ(惑星質量、半径等)の推定値表示、HYG恒星リストを備えたStellar画面やGoogle Skyを用いた系外惑星や周辺星の表示等、既存のデータベースにはない新機能が含まれる。推定機能を用いて欠損データを補間すると、これまで発見された系外惑星については、Sub-Neptuneサイズ(1.9-3.1R<sub>earth</sub>)が最も多く(969個)、次にSuper-Earthサイズ(1.2-1.9 R<sub>earth</sub>)が多いという分布が得られた(680個)。

太陽系相当天文単位SEAUを用いると、見つかった系外惑星のほとんどが金星軌道相当内側(3034)となり、ハビタブル・ゾーン(金星-火星相当軌道内)に位置するのは202個となる。これをKopparapu et al.(2013)で分類すると、Recent Venus軌道相当内側(3068)となり、ハビタブル・ゾーン(暴走温室限界-最大温室効果)に位置するのは122個となる。例えばKepler-560bはSEAUの定義ではハビタブルゾーン範囲内に存在するが、Kopparapu et al. (2013)の定義では範囲外となる。

更に系外惑星の公転周期・半径・推定質量(Larsen & Geoffrey, 2014)や、トランジットパラメータ(最大減光率)、および主星の情報(位置、等級、スペクトル型等)等を元に、観測ターゲット選定への活用も可能である。

現在、京都大学花山天文台などで ExoKyoto を活用した既知の系外惑星の追観測を開始している。今後はアマチュア天文家ネットワークを通じて、系外惑星データの収集、および新たな系外惑星の発見を推進していく予定である。さらに将来的には、京都大学 3.8m 望遠鏡を用いて系外惑星候補天体の確定観測を行い、データベースの更新も行っていく予定である。

ExoKyotoは系外惑星データベースのホームページ(<http://www.exoplanetkyoto.org>)にて公開されている。このホームページでは、系外惑星に関する基本的なデータの他、有名な系外惑星についての詳細な解説や系外惑星の探査方法などが、イラストとともに示されており、系外惑星に関する天文教育のポータルサイトとして随時更新が行われており、全ての情報が日本語と英語で紹介されている。イラストについてはSGH滋賀県立守山高校などの協力を経て、各惑星から見た景色などの想像図が掲載されており、高大連携プロジェクトの推進も行っている。

本発表では、データベースとともに、いくつかの追観測結果を紹介する。

キーワード：太陽系外惑星、エクソプラネットキョウト、ハビタブル・ゾーン

Keywords: Extrasolar Planets, Exoplanetkyoto, habitable zone



自転軸の傾いた非同期回転系外惑星における大気循環：  
観測される光度曲線への示唆

Atmospheric Dynamics on Non-Synchronized Tilted Exoplanets:  
Implications on Observed Thermal Light Curves

\*大野 和正<sup>1</sup>、Xi Zhang<sup>2</sup>

\*Kazumasa Ohno<sup>1</sup>, Xi Zhang<sup>2</sup>

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. カリフォルニア大学サンタクルーズ校

1. Department of Earth and Planetary Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Department of Earth and Planetary Science, University of California Santa Cruz

Various theoretical studies of atmospheric dynamics have investigated the dynamical structure on close-in synchronized exoplanets and succeeded to explain the phase curve observations. As the planets are farther away from their central stars, they are not likely to be tidally locked. Recent studies also begin to examine the atmospheric dynamics on non-synchronized exoplanets (e.g., Showman et al. 2015); however, they assume the planetary obliquity, the angle between orbital normal and planetary spin axis, is zero that is usually not true for non-synchronized planets.

In this study, we investigated the atmospheric dynamics on non-synchronized tilted exoplanets with a 2D general circulation model. We find that the temperature structure is considerably different from that on the synchronized exoplanets. Non-zero obliquities induce the temperature structure that is dominated by diurnal mean insolation if the radiative timescale is longer than rotation period but shorter than orbital period. The temperature is dominated by annual mean insolation if the radiative timescale is longer than both rotation and orbital periods. Seasonal variation as function of orbital phase is analyzed. We also predict the shape of observed thermal light curves for non-synchronized tilted exoplanets. Our prediction suggests that the amplitudes of light variation for high-obliquity exoplanets might be several times larger than that for the low-obliquity exoplanets but the differences depend on the parameters such as the radiative timescale and the line of sight from an observer. Furthermore, we find that the thermal light curves for tilted exoplanets might have a peak after the secondary eclipse if they are transiting, whereas for synchronized planets the phase curve peak always occurs before the secondary eclipse. Consequently, our results suggest that the planetary obliquity has the crucial impacts on the interpretations of observed phase curves for non-synchronized exoplanets.

キーワード：系外惑星、大気循環、光度曲線

Keywords: Exoplanets, Atmospheric Dynamics, Thermal Light Curve



# 様々な元素組成・温度構造を持つ太陽系外ガス惑星大気の平衡化学構造 Equilibrium chemical structure of extrasolar gas giant planets with various elemental abundance and temperature profiles

\*野津 翔太<sup>1</sup>、野村 英子<sup>2</sup>、Walsh Catherine<sup>3</sup>、Eistrup Christian<sup>4</sup>

\*Shota Notsu<sup>1</sup>, Hideko Nomura<sup>2</sup>, Catherine Walsh<sup>3</sup>, Christian Eistrup<sup>4</sup>

1. 京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 宇宙物理学教室、2. 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系、3. School of Physics and Astronomy, University of Leeds, UK、4. Leiden Observatory, Leiden University, The Netherlands  
1. Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Department of Earth and Planetary Science, Tokyo Institute of Technology, 3. School of Physics and Astronomy, University of Leeds, UK, 4. Leiden Observatory, Leiden University, The Netherlands

原始惑星系円盤(以下、'円盤')内では凍結温度の違いにより、分子種(e.g., H<sub>2</sub>O, CO, HCN, CO<sub>2</sub>)ごとにスノーラインの位置は異なると考えられる。その為、円盤ガス・ダスト中のC/O比は、中心星からの距離に応じて変化すると考えられる。例えばH<sub>2</sub>Oスノーラインの外側では、多くの酸素がH<sub>2</sub>Oの形でダスト表面に凍結する一方、炭素の多くはCOなどの形で円盤ガス中に留まるので、ガス中でC/O比が大きくなる。また、近年太陽系外ガス惑星大気のC/O比が見積もられ始めているが、観測されたホットジュピターの中にはC/O<sup>~</sup>1のガス大気を持ち、円盤外側での形成・大気獲得を示唆するものも存在する(e.g, Madhusudhan et al. 2011)。この様に円盤と惑星大気のC/O比を比較する事で、惑星大気獲得・移動の過程に制限を加えられる事が検討されている(e.g., Oberg et al. 2011, Eistrup et al. 2016)。

これまで我々は、円盤の化学反応ネットワーク計算と放射輸送計算の手法を用いて、円盤内のスノーライン位置とC/O比の分布や、それらを同定するのに適した分子輝線(赤外線~サブミリ波)の調査を進めてきた(e.g., Notsu et al. 2016, ApJ, 827, 113; 2017, ApJ, 836, 118)。今回我々は、まずGuillot et al. (2010, A&A, 520, A27)の手法を用いて、中心星からの照射で決まる系外ガス惑星大気の放射平衡な物理構造を計算した。その上で、系外惑星大気の化学構造と惑星形成環境の関係を探るべく、中心星からの距離、およびC, O, Nの元素組成比などを様々に変えた場合について、系外ガス惑星大気の化学平衡計算を行っている。その結果、大気温度が減少するとCH<sub>4</sub>の組成が増加する傾向が見えた。また同様の大気物理構造の場合でも、C/O比が太陽の値に比べて高くなると、大気下部でCH<sub>4</sub>, HCNなどの組成が増加する事などが見えてきた。講演では、現状の計算結果を紹介した上で、観測で得られた系外ガス惑星大気の化学構造との関連についても簡単に議論する予定である。

キーワード：太陽系外惑星、ガス惑星大気、化学平衡、C/O比、スノーライン、原始惑星系円盤

Keywords: Extrasolar planet, Gas planetary atmosphere, Chemical equilibrium, C/O ratio, Snowline, Protoplanetary Disk

## Simulation of the early Martian climate using a general circulation model, DRAMATIC MGCM: Impacts of thermal inertia

\*鎌田 有紘<sup>1</sup>、黒田 剛史<sup>2</sup>、笠羽 康正<sup>1</sup>、寺田 直樹<sup>1</sup>

\*Arihiro Kamada<sup>1</sup>, Takeshi Kuroda<sup>2</sup>, Yasumasa Kasaba<sup>1</sup>, Naoki Terada<sup>1</sup>

1. 東北大学大学院理学研究科、2. 国立研究開発法人 情報通信研究機構

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. National Institute of Information and Communications Technology

There are many fluid traces on the Martian surface supposed to be made before ~3.8 billion years ago. If they were made by the liquid H<sub>2</sub>O, the environment of the ancient Mars should be suitable for huge amount of liquid water, at least under higher temperature and larger atmospheric pressure than today. In order to reproduce such early Martian climate, several modeling studies have been performed so far. The solar insolation at that time is thought to be ~75% of today from a standard stellar evolution model. In this condition, a preceding study using the LMD Martian General Circulation Model (MGCM), with vertical 15 layers up to ~50 km altitude assuming the pure CO<sub>2</sub> atmosphere, showed that the surface temperature above 273 K could not be reproduced in the range of the surface pressure in 0.1 - 7 bars [Forget et al., 2013, hereafter F13], which is so-called the 'Early faint Sun paradox'.

In F13 the discussion of the effects of thermal inertia on the surface temperature was simplified, just describing the differences of results between the soil (surface albedo of ~0.22 in average and thermal inertia of 250 J s<sup>-1/2</sup> m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, hereafter the unit is omitted) and ice (surface albedo of 0.4 and thermal inertia of 1,000) surfaces. If ancient Martian surface was covered with wet and ice-free soil, the thermal inertia should become much larger than that of today, with the surface albedo of lower than 0.4 (the ground covered by ice). In this case, the results of surface temperature should be different from those which have been shown in F13.

From this point of view, we performed the simulations of the ancient Martian environment, especially focusing on the sensitivity of thermal inertia, using our improved MGCM, DRAMATIC (Dynamic, RAdiation, MAterial Transport and their mutual InteraCtions) [e.g., Kuroda et al., 2005]. We assumed the pure CO<sub>2</sub> atmosphere as F13. We have implemented the radiative effects of CO<sub>2</sub> gas assuming the sub-Lorentzian profile [Fukabori et al., 1986] and considering also the collision induced absorptions [Gruszka and Borysow, 1997]. For the comparison with F13' s results, the obliquity, eccentricity, surface albedo and thermal inertia are set to be the same as their standard simulation. Also the vertical coordinate of the model is set to 15 layers to ~50 km altitude, as well as F13, and horizontal resolution is set to 64x32 (5.625deg latitude by 5.625deg longitude). The radiative effects of CO<sub>2</sub> ice clouds are also considered in solar and infrared wavelengths as well as F13, although the radiative effects of dust are not considered. At first, in order to check the validity of our model, we simulated with globally constant thermal inertia of 250 (soil) for the globally averaged surface pressure of 0.1 - 3 bars (realistic pressure range of early Mars). The results showed that annual mean surface temperature in the equilibrium state increased with surface pressure, but the annual mean temperature was ~225 K for 2 bars and ~237 K for 3 bars, far below the H<sub>2</sub>O melting point. The infrared optical depth of CO<sub>2</sub> ice clouds reached the highest value of  $\tau \sim 1.4$  for the surface pressure of 1.5 bars, probably because of the profiles of CO<sub>2</sub> condensation temperature and simulated annual-mean temperature against surface pressure which indicated the most favorable production of CO<sub>2</sub> ice clouds at ~1.5 bars. The radiative effects of CO<sub>2</sub> ice clouds affect to increase the global mean temperature for several Kelvins in maximum, while ~10 K in F13.

Next, we simulated with globally constant thermal inertia of between 1,000 (ice) and 5,000 (wet soil assumption) for the surface pressure of 2 and 3 bars. The results showed that annual mean surface

temperature in the equilibrium state greatly increased with increased thermal inertia. Daily mean surface temperatures in northern low- and mid-latitudes and Hellas basin, where are in low altitude and considered to be the places of ancient ocean/lake, are above 273 K almost throughout the Martian year for 3 bars and thermal inertia of 5,000.

Our results suggest that the surface conditions could be the key of the existence of liquid water in early Mars. The surface with high thermal inertia may be able to produce the surface temperature higher enough to keep liquid water even with the pure CO<sub>2</sub> atmosphere under the solar insolation which was ~75% of today.

キーワード：火星、古気候、熱慣性、全球大循環モデル、サブローレンシアン、衝突惹起性吸収

Keywords: Mars, paleoclimate, thermal inertia, GCM, sub-Lorentzian, collision induced absorption

# 集積成長する火星上に形成する成層した混成型原始大気

## Stratified hybrid-type proto-atmosphere on accreting Mars

\*齊藤 大晶<sup>1</sup>、倉本 圭<sup>1</sup>

\*Hiroaki Saito<sup>1</sup>, Kiyoshi Kuramoto<sup>1</sup>

1. 北海道大学 理学研究院

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

火星隕石の Hf-W 同位体分析によると、火星は CAI 形成後少なくとも  $1.8 \pm 1.0$  Myr 以内に現質量の 1/2 に成長し、なおかつコア・マンツルの分化が進行していた可能性が高い (Dauphas and Pourmand, 2011). この短い集積時間は、火星の集積が基本的に原始太陽系星雲中で進行したことを示唆している。一方で、原始惑星が月質量以上になると微惑星から  $H_2O$  をはじめとする揮発性成分が衝突脱ガスをし始めることから、原始火星は星雲ガスおよび脱ガス成分の双方からなる原始大気を形成した可能性がある。そこで我々は、上層が星雲ガス成分からなり、下層が脱ガス成分からなる混成型原始大気の熱的構造について調べてきた。その結果、火星材料物質に 2 成分モデルから推定される 4 wt% の濃度の揮発性成分を与えた場合、集積が 4 Myr 以内に完了すれば、高温な原始大気が形成され、最終質量に達するまでに、地表面温度が岩石の融点 (1500K) を超えることがわかった。このことは、マグマオーシャンの形成によって年代学が示すようなコア・マンツルの分化が効率よく進行した可能性があることを示唆する。

以上のモデル計算では、星雲ガス成分と脱ガス成分は両者の密度差のために互いに混合しないと仮定してきた。しかし、実際には対流、分子拡散等による混合が起こる可能性がある。また、材料物質中の揮発性成分濃度についても不定性があると考えられる。原始大気の混合や揮発性成分濃度によって、大気の熱的構造が大きく変わる可能性がある。

そこで本研究では、組成境界と対流圏界面の位置、および分子拡散のタイムスケールと集積時間の比較をすることで、星雲ガス成分と脱ガス成分の両者が集積時間以内に分離状態を保つための条件を調べた。集積時間として、隕石年代学と矛盾のない 1–6 Myr をパラメタとして与えた。材料物質から脱ガスする揮発性成分の濃度 ( $f_{deg}$ ) が 4 wt% の場合、与えた集積時間や原始火星質量によらず、組成境界は常に対流圏界面の上部に位置する。つまり、対流による混合は生じない。また分子拡散によって星雲ガス成分と脱ガス成分が混合する場合、両層間で水素分子の交換が起こると考えられる。組成境界高度における水素分子の拡散係数と組成境界と対流圏界面の高度差、星雲ガス層下端における水素濃度から星雲ガス大気層から脱ガス大気層への水素流入フラックス  $F_{H_2}$  が求まる。質量交換のタイムスケールは、脱ガス大気層に存在する水素分子の質量を  $F_{H_2}$  で割ることで見積もることができる。このとき、質量交換のタイムスケールは集積時間に比べ  $10^2$  倍以上大きい。すなわち、分子拡散による混合は、集積時間内にほとんど生じない。両成分が混合しないと仮定すると、保温効果は  $f_{deg}$  を小さくするにつれて弱くなる。 $f_{deg}$  が約 0.1 wt% 未満の場合、隕石年代学が示唆する集積時間では、地表面温度は岩石の融点に達しない。一方、 $f_{deg}$  が約 2 wt% よりも小さい場合、対流圏界面が組成境界よりも上部に位置するため、星雲ガス層と脱ガス大気層をまたぐ対流が生じ、両成分が混合する可能性がある。このとき、大気の熱的構造が変化すると考えられるが、定量的な見積もりについては、現在解析中である。

キーワード：原始火星、原始大気

Keywords: Proto Mars, Proto-Atmpsphere

## 酸性水溶液中に浸した岩石と紫外線による鉄イオンの増加

### Increase in ferrous ion by soaking basalt in acid water solution and UV rays

\*小森 信男<sup>1</sup>

\*Nobuo Komori<sup>1</sup>

1. 東京都大田区立蒲田中学校

1. Ota Ward Kamata Junior High School

火星探査機による調査により、43億年前程の火星には、大洋があったことが最近わかってきた。この大洋は、酸性だった可能性がある。この火星の海を前提条件として、火星の海に関する以下の2つのシュミレーション実験を行った。

実験1では、玄武岩による硫酸と塩酸の中和の際に、溶液中に溶け出る鉄イオンの濃度を調べた。その結果、0.3規定(pH1)の塩酸では0.03規定(pH2)の5倍程度の鉄イオンが溶け出ることがわかった。

実験2では、精製水、塩酸、硫酸に浸した鉄カンラン石と、玄武岩に紫外線を照射した場合に溶液中に溶け出る鉄イオンの濃度を測定した。この結果、紫外線を照射した場合は照射しない場合よりも1.5倍程度、鉄イオンの濃度が大きくなることがわかった。

以上の実験により、過去の火星上では海が消滅するまでに、玄武岩等の岩石による酸の中和により大量の鉄イオンが溶け出た可能性がある。さらに太陽から降り注ぐ紫外線Cによって、溶け出る鉄イオンはより増えた可能性がある。

キーワード：紫外線、鉄イオン、鉄カンラン石、玄武岩、酸性水溶液

Keywords: ultraviolet rays, ferrous ion, fayalite, basalt, acid aqueous solution

太陽系の起源は、何故?という問いによって探究される。

惑星の法則はニュートンの万有引力によって解明された。

ボーデの法則を利用した、小惑星帯と月と大赤斑の起源を同時に説明できる仮説で、アブダクションにより統一的に説明できた。

Origin of Solar system is explored by the question "Why?".

Operation of Planet was elucidated by Newton's law.

“Multi-impact hypothesis” that unifiedly explains Origins of Asteroid belt, Moon, Jupiter's red spot, using Abduction.

\*種子 彰<sup>1</sup>

\*Akira Taneko<sup>1</sup>

1. SEED SCIENCE Lab.

1. SEED SCIENCE Lab.

**アブダクション (地球も人類も形成されていない過去への起源探究の手段) による証明, 物理的な意味を持つ仮説で現状の複数の謎を統一的に説明できるなら, 由一の太陽系の進化・歴史の検証を受けた真理として, 其の仮説の正当性が支持されたと理解する。**

特に起源の根拠を示せる仮説は, 実験も理論計算もできない地球物理学の起源問題の有効な手段として画期的である。

**マルチインパクト仮説**はボーデ法則のセレス位置に惑星CERRAが形成され, 木星摂動で離心率が増大し. セラが木星の潮汐力で約40億年前に分裂し◎小惑星帯の起源となった. 更にマントル破片が地球に衝突 (12.4km/s, 36.5度: 値は仮説より導出)して◎月が現在の距離(60RE)に形成された. 衝突位置は○太平洋であり地殻剥離した跡はアイソスタシーでダーウィン隆起となった. 複数破片の○マルチインパクトが生物種大絶滅の起源となり, ○マントル亀裂とプレート境界の形成の原因となり, ○深海洋底と地球二山頻度形成の起源でもある. ◎プレートテクトニクスやウエゲナーの大陸移動説や海洋底更新説等の駆動力として地球自転力と○地球コア偏芯と慣性能率アンバランス補償の効果が示された.

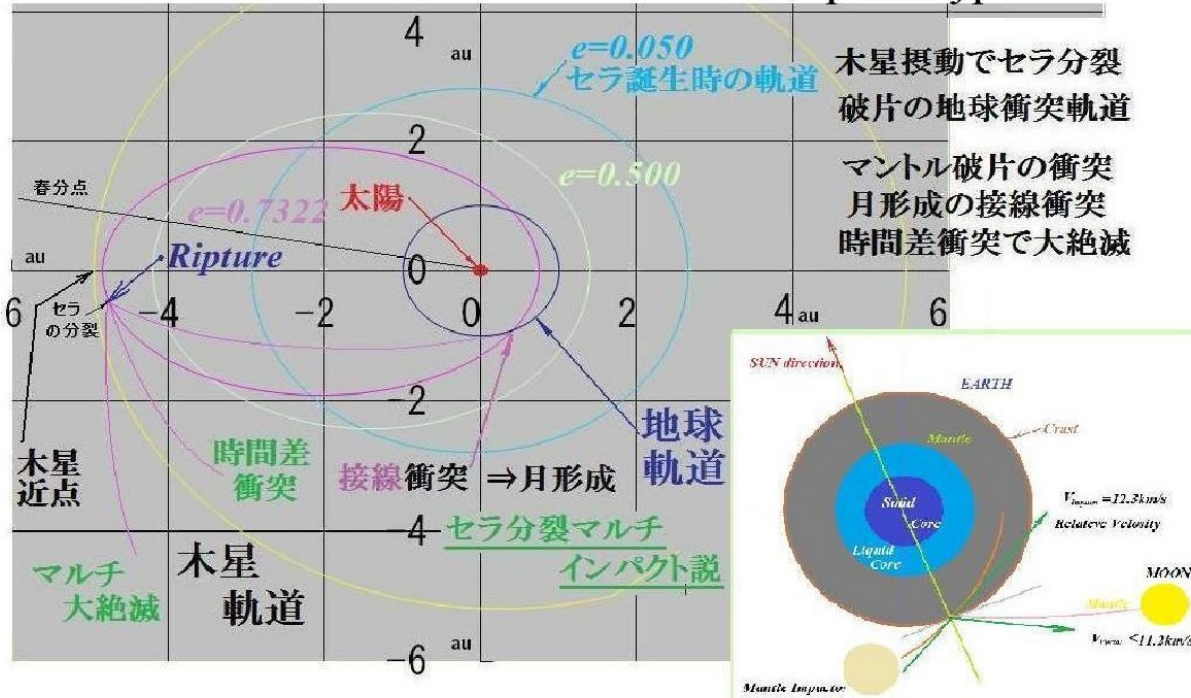
更に環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源,平均深度5kmの起源は衝突によるマントル剥離とアイソスタシー,凹プレート海盆と凸プレートの押し合いは,プレート相互の潜り込みの起源となる.

プレートテクトニクスの駆動力は,地球の慣性能率が,マントル衝突剥離によるアンバランスと地球自転方向による均等化による.プレートにモーメントが発生するので,皺が依らずに平衡に移動する.プレート境界は衝突時のマントル亀裂であり,圧力低下により融点が下がりマントルが熔融する.

キーワード: アブダクションによる起源の解明,一度限りの進化での実証、ティティウス・ボーデの法則の証明,集積メカニズム、月の起源、小惑星帯と隕石の起源、木星大赤斑の起源、深海洋底の起源

Keywords: Elucidation of origin by abduction, actual proof by one-time evolution, Proof of Titius Bode's Law, Mechanism of Accumulation, Origin of the moon, Origin of asteroid belt and meteorite, Origin of Jupiter Large Red Spot, Origins of deep ocean floor

# The Origin of The Moon and The deep sea floor bottom and Plate-Tectonics elucidated with Multi-Impact Hypothesis.



08-08 The Origin of the Deep Ocean Floor and the Plate-Tectonics, Elucidation of the Driving Force, The Origin of the Moon and the Earth Deep Ocean Floor with Multi-Impact Hypothesis 2016 9-14

## 8. プレートの駆動力, 同じ密度のプレートが上下に重なる理由

8.1. プレートの駆動力は謎であった。①. マントル対流仮説(.ホームズ)  
 ②. 前引き, 後押し仮説 ③. リソフェア厚さ傾斜仮説 ④. プリューム仮説  
 ⑤. 慣性モーメントアンバランス解消偶力説 (本仮説) 偏芯の解消偶力.  
 マルチインパクト仮説で地殻プレートが図Aの状態⇒図Bの均質安定状態.

8.2. 同じ密度のプレートが他方の下に潜り込んで, 海溝と和達・ベニオフ帯を形成するメカニズムの謎も有った. 衝突剥離時のアイソスタシーで凹海盆  $\alpha$

が形成された.  
 凸プレートと,  
 凹プレートが押し合うと, 凸プレートが折れ曲がって, 凹プレートの下に潜り込む.  $\beta$ .  
 更に深く和達・ベニオフ帯を形成して, 地震発生面に成る.

