

異なるハビタブルゾーン定義の比較のための系外惑星データベース「ExoKyoto」の開発 Development of Exoplanet database "ExoKyoto" aiming for inter-comparison with different criteria of Habitable zones

山敷 庸亮¹、伊藤 岳陽³、嶋田 侑治³、稲澤 真里子⁴、*佐々木 貴教²、西浦 理⁴、野津 翔太²、石川 裕之⁵、鈴木 杏那⁶、坂上 峻仁⁵、野津 湧太²、中村 尚樹²、行方 宏介⁵、磯部 洋明¹、柴田 一成²、下崎 紗綾⁷、藤田 汐音⁷

Yosuke Yamashiki¹, Takaaki Ito³, Yuji Shimada³, Mariko Inazawa⁴, *Takanori Sasaki², Osamu Nishiura⁴, Shota Notsu², Hiroyuki Ishikawa⁵, Anna Suzuki⁶, Takahito Sakaue⁵, Yuuta Notsu², Naoki Nakamura², Kosuke Namekata⁵, Hiroaki Isobe¹, Kazunari Shibata², Saaya Shimozaaki⁷, Shione Fujita⁷

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、3.京都大学農学部、4.京都大学工学部、5.京都大学理学部、6.京都産業大学大学院理学研究科、7.SGH滋賀県立守山高校

1.Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability Kyoto University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3.Faculty of Agriculture, Kyoto University, 4.Faculty of Engineering, Kyoto University, 5.Faculty of Science, Kyoto University, 6.Graduate School of Science, Kyoto Sangyo University, 7.SGH Shiga Prefectural Moriyama High School

存在が確認された系外惑星系をより理解し、異なるハビタブルゾーンの定義を互いに比較するための系外惑星データベース「ExoKyoto」を開発した。「ExoKyoto」のコアモジュールはC++で記載され、「系外惑星」「ホスト星」などを始めとする異なるクラスが定義されている。ハビタブルゾーンの定義はKopparapu et al. (2013)の定義が参照ケースとして定義されているが、その他に太陽系相当天文単位(SEAU)が定義され、系外惑星の位置と太陽系での想定されうる位置を理解することができる。

データベースはまた、すでに存在するExoplanet.eu, Open Exoplanet CatalogueやNASA exoplanet archiveなどとの相互比較参照モジュールを有し、相対的に信頼できる値を得ることができる。ほとんどの「ケプラー衛星」により発見された惑星のほとんどはトランジット法でのみ確認され、質量が同定されていないため、スーパーアースサイズの惑星に関してはLarsen and Geoffrey(2014)の方法を参照にした質量推定モジュールを有している。これによって、発見されている質量推定可能な系外惑星(計1988個)の分類としてスーパーアースサイズが最も多く(794個)になっており、超木星サイズ(480個)を上回り、木星サイズ以上(合計926個)に迫る。実際にはスーパーアースの中の140個しか質量が視線速度法で同定されていない。またKopparapu et al.(2013)によるM型星まわりのハビタブルゾーン判定は、他の判定に比較して個別要素による影響が大きく、さらなる改良が求められる。スーパーフレアの系外惑星への影響もデータベースにより議論可能である。

また、アウトリーチ目的のため、ExoKyotoはGoogle Skyによる位置検索インターフェースを有している。

Lauren M. W. and Geoffrey W. M. 2014. The mass-radius relation for 65 exoplanets smaller than 4 earth radii. *The Astrophysical Journal Letters*, 783:L6

Kopparapu R. K. et al. 2013. Habitable Zones Around Main-Sequence Stars: New Estimates. *The Astrophysical Journal*, 765:131

キーワード：系外惑星、ハビタブルゾーン、太陽系相当天文単位

Keywords: Exoplanet, Habitable Zone, SEAU

ハレアカラT60望遠鏡のDIPOL-2を用いた系外惑星の観測と解析

observation and analysis of exoplanets by using Dipol-2 of T60 telescope at Haleakala mountain

*前田 東暁¹、坂野井 健¹、鍵谷 将人¹

*Haruaki Maeda¹, Takeshi Sakanoi¹, Masato Kagitani¹

1.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

1.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

我々は、ハワイ・ハレアカラの口径60cm望遠鏡と偏光観測装置DIPOL-2 (a double image high precision polarimeter, Pirola et al., 2014) を使い、系外惑星の偏光観測を2015年1月に開始した。主星を光源とし、惑星大気により散乱・反射されて観測者に届く光は、公転に伴い周期的な偏光の変化を生じる。観測者は、ほぼ無偏光の主星からの光と、直線偏光した惑星性大気からの散乱・反射光とを合わせた光を観測することとなる。その結果、最大で $10^{(-4)}-(-5)$ の振幅を持つ周期的な直線偏光の変化が観測されると期待される。これらを検出できる精密な偏光測定を系外惑星の様々な公転位相角について実施することで、トランジット天体に限定することなく、惑星の軌道要素や、惑星の大気の情報を引き出すことも可能と考えられる。また、我々が用いた偏光観測装置DIPOL-2は、可視光の3つの波長帯 (B, V, Rバンド) での同時測定が可能であり、系外惑星大気散乱の波長依存性を知ることが出来る。しかし、これまで実際に系外惑星の偏光観測に成功した例は1天体にとどまる (Berdyugina et al., 2008, 2011)。本研究では、系外惑星の偏光観測のメトリックを踏まえ、観測と解析方法の確立を目指している。

系外惑星の偏光観測の容易さ、すなわち期待される直線偏光の変動の振幅は、主星と惑星の距離、および惑星の半径という2つの条件に主に依存する。加えて、S/N向上のためには、主星が明るいことが重要となる。既知のホットジュピターに分類される系外惑星において、期待される偏光度の振幅を検討したところ、 $10^{(-5)}$ 以上の精度での偏光測定が必要であると考えられる。この精度の実現には、望遠鏡と偏光観測装置の固有の偏光 (機器偏光) を校正し、その時間安定性を必要な測定精度の範囲に収めることが不可欠である。

我々は、まず観測装置の直線偏光の基準方向を決定するために、既知の直線偏光天体 (HD204827, HD25443) を観測し、ストークスパラメータの基準軸を決定した。また、機器偏光を決定するために、2015年1月、5月、8月、10月にそれぞれ19個、12個、18個、10個、合計59個の無偏光標準星の観測を実施した。その結果、十分な追尾機能を備えていなかった2015年1月の観測データを除く、40個の無偏光標準星についてストークスパラメータを求め、機器偏光を $10^{(-5)}$ の精度で決定した。また、これらの観測と並行して、既知の系外惑星を含む3天体 (tau Boo b, HD189733 b, 55 Cnc e) の観測もおこなった。系外惑星の偏光状態については、観測値から機器偏光を差し引くことで求めることができる。またこれら観測対象とした系外惑星は、短期間に異なる公転位相角でのデータが収集できることから、公転周期が既知 (数日) であるホットジュピター型の系外惑星を選定した。今後は同様の系外惑星においてデータを増やすと同時に、異なる種類の系外惑星についても観測をおこなうことを検討している。今回の発表では、これらの機器偏光の校正結果、既知の系外惑星の偏光度推定手法、および、観測した3つの系外惑星大気偏光観測の解析と結果について発表する。

キーワード：系外惑星、偏光、観測、大気、散乱

Keywords: exoplanet, polarization, observation, atmosphere, scattering

紫外線望遠鏡による系外惑星観測の検討

UV space telescope for exoplanetary systems

*堀越 寛己¹、亀田 真吾²、村上 豪³、生駒 大洋⁴、成田 憲保⁵

*Hiroki Horikoshi¹, Shingo Kameda², Go Murakami³, Masahiro Ikoma⁴, Norio Narita⁵

1.立教大学大学院理学研究科、2.立教大学理学部、3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、4.東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、5.国立天文台

1.Graduate School of Science, Rikkyo University, 2.School of Science, Rikkyo University,
3.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 4.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 5.National Astronomical Observatory of Japan

1995年に系外惑星が発見されてから数多くの観測が行われ、現在では1900個以上の惑星が検出されている。また、一部の惑星では大気組成に関する情報が得られている。

地球と太陽系内の他の惑星の大気組成を比較すると、地球は酸素が多いことが特徴的であり、この酸素は主に植物の光合成によって生成される。従って、惑星における酸素の検出は、惑星を特徴付けるうえで一つの大きな要因となる。そこで、本研究では惑星大気中の酸素原子の発光（波長130.6 nm）を紫外線望遠鏡によって検出することを目指している。

惑星は主星の周りを公転しているので、惑星の光はドップラーシフトによって波長がわずかに変化して観測される。従って、惑星の光のドップラーシフトが大きく、恒星の連続光成分が無ければ、惑星の輝線は高分散分光器を利用して主星の光と分離することができ、直接観測することができる。低温度星のハビタブルゾーンは主星に近いので、地球が低温度星のハビタブルゾーンに存在すると、公転速度は速くなり、ドップラーシフトは大きくなる。また、低温度星は、波長130nm付近で連続光成分がほとんど無い。そこで本研究では、地球が低温度星のハビタブルゾーンに存在すると仮定して検討を行った。これより、惑星の輝線は主星の光と分離することができ、惑星の輝線のコントラストを向上させることが可能となる。検討の結果、O I輝線の強度は非常に弱いので、検出にはハッブル宇宙望遠鏡を超える大口径かつ高効率の望遠鏡で長期間観測する必要があることが示された。

NASAやESAで提案されている将来計画の観測波長域は可視～赤外であり、系外惑星観測専用の紫外線望遠鏡の将来計画は無い。そこで我々は、系外惑星観測に特化した紫外線望遠鏡の開発を検討している。本発表では、本研究の検討状況と具体的な観測装置の仕様について発表する。

キーワード：系外惑星、紫外線、宇宙望遠鏡

Keywords: exoplanet, ultraviolet, space telescope

BepiColombo 日欧共同水星探査ミッション

BepiColombo Euro-Japan Joint mission to Mercury

*早川 基¹、前島 宏則¹*Hajime Hayakawa¹, Hironori Maejima¹

1. 独立行政法人宇宙航空研究開発機構

1. The Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い灼熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であり、2011年3月からの米国MESSENGERによる観測が初めてのものである。MESSENGERの探査から、この小さな惑星の表面には従来考えられていたものをはるかに超える量の揮発性物質が存在し、惑星磁場も双極子の中心が惑星半径の2割も北にずれているなど予想外の発見をもたらしたが、その究明は未だこれからの課題となっている。「ベピ・コロombo (BepiColombo)」は、欧州宇宙機関（以下、ESA）との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を初めて多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査＝「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらす。また、磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核など水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。

本計画は、観測目標に最適化された2つの周回探査機、すなわち表面・内部の観測に最適化された「水星表面探査機(MP0)」(3軸制御、低高度極軌道)、磁場・磁気圏の観測に最適化された「水星磁気圏探査機(MM0)」(スピン制御、楕円極軌道)から構成される。ISAS/JAXA は、日本の得意分野である磁場・磁気圏の観測を主目標とするMM0 探査機の開発と水星周回軌道における運用を担当し、ESA が残りの全て、すなわち、打ち上げから惑星間空間の巡航、水星周回軌道への投入、MP0 の開発と運用を担当する。

両探査機に搭載する数々の科学観測装置は、2004年の搭載機器選定以降開発は着々と進行し、日本側の詳細設計審査は平成23年11月に終了した。JAXAの開発するMM0は昨年3月に総合試験が終了し、4月にESA/ESTECへと輸送した。単体の作業を12月に終了し、ESA側製作のモジュールと組合わせた環境試験の開始を待っているところである。環境試験終了後、各モジュールは射場である仏領ギアナへ輸送され、2017年に打ち上げの予定である。一方MM0電気モデルはドイツへ輸送され2012年10月から電気モデル試験に参加した。今後第2回電気モデル試験に参加する予定である。

水星到着後の観測は、選ばれた装置開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成する「BepiColombo 科学ワーキングチーム」(年1回程度開催)で立案・実施される。本講演では、初の大型日欧協力となったBepiColomboプロジェクトに関してのこれまで、今後についての状況を報告する。

キーワード：水星、惑星探査、国際協力

Keywords: Mercury, Planetary Exploration, International Collaboration

JUICE/GALA-J (2): JUICE搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA)が拓くサイエンス

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

*木村 淳¹、鎌田 俊一⁵、松本 晃治²、押上 祥子²、並木 則行²、倉本 圭⁵、佐々木 晶⁸、塩谷 圭吾⁴、小林 正規³、小林 進悟⁶、荒木 博志²、野田 寛大²、石橋 高³、斎藤 義文⁴、Hussmann Hauke⁷、Lingenauber Kay⁷
 *Jun Kimura¹, Shunichi Kamata⁵, Koji Matsumoto², Shoko Oshigami², Noriyuki Namiki², Kiyoshi Kuramoto⁵, Sho Sasaki⁸, Keigo Enya⁴, Masanori Kobayashi³, Shingo Kobayashi⁶, Hiroshi Araki², Hiroto Noda², Ko Ishibashi³, Yoshifumi Saito⁴, Hauke Hussmann⁷, Kay Lingenauber⁷

1.東京工業大学地球生命研究所、2.国立天文台、3.千葉工業大学、4.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究
 所、5.北海道大学、6.放射線医学総合研究所、7.ドイツ航空宇宙センター、8.大阪大学

1.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2.National Astronomical Observatory Japan, 3.Chiba Institute of Technology, 4.ISAS/JAXA, 5.Hokkaido University, 6.National Institute of Radiological Sciences, 7.German Aerospace Center, 8.Osaka University

The JUUpiter Icy Moons Explorer (JUICE), led by European Space Agency, has started development toward launch in 2022 (arrival at Jupiter in 2029, and Ganymede orbit insertion in 2032), and we are now developing the GALA instrument onboard JUICE spacecraft collaborating with German Aerospace Center (DLR) and other institutions in Europe. Primary objective of GALA is to acquire the key information for understanding the evolution of icy bodies and to play an essential role in the JUICE's purpose: exploration of deep habitat.

Jovian icy moon Ganymede, which is the largest moon in the Solar System and the primary target of the JUICE, can be said to be one of the typical solid bodies along with terrestrial planets in terms of its size and the intrinsic magnetic field originated from the metallic core. However, current knowledge provided by previous explorations is extremely limited since it comes from only several fly-bys. The JUICE will uncover the whole picture of Ganymede by the first "orbiting" in the history around extra-terrestrial moon. Expected new big picture of the origin and evolution of Ganymede will not only be a key to unveil the origin of diversity among the Solar System bodies, but also contribute to understand exoplanets with a wide diversity.

The GALA will measure a distance between the spacecraft and the surface of icy moons and acquire the topography data (globally for Ganymede, and fly-by region for Europa and Callisto). It will be a first-ever laser altimetry for the icy object. Such information makes surface geologies clear and tremendously improves our understanding of the icy tectonics. By comparing their tectonic styles on the rocky planets/moons, GALA data leads to reconsider the Earth's plate tectonics. In addition, the GALA will confirm a presence/absence of the subsurface ocean by measuring tidal and rotational response, and also the gravitational information reflecting the interior structure will be greatly improved. In addition, strength and waveform of laser pulse reflected from the moon's surface have information about surface reflectance at the laser wavelength and small scale roughness, and therefore we can see degrees of erosion and space weathering without being affected by illumination condition through GALA measurements.

In order to interpret and understand such measurements, accumulated studies for the Earth over the years will be effectively utilized: e.g., the data for surface topography, roughness and albedo will lead to describe the icy tectonics through the knowledge from terrestrial glaciology and experiments on impact and deformation process. The tidal measurements by GALA will also be a window to see its interior based on our knowledge and experiences cultivated through the past geodetic observations, e.g., the SELENE mission for the terrestrial Moon.

Characterization of the icy moons will be achieved not only from the GALA measurements but also

synergy of other scientific instruments onboard JUICE spacecraft, for examples, surface images taken by optical camera (JANUS) will confirm the position of GALA laser footprint to complement the GALA “point” data for precise topographic mapping. A radar sounder (RIME) and a radio science experiment (3GM) probe the interior structure, especially interior of the icy crust to figure out an occurrence of tectonic features. A visible and infrared imaging spectrometer (MAJIS), an ultraviolet imaging spectrograph (UVS) and a sub-millimeter wave instrument (SWI) will acquire a surface and atmosphere compositional data. A magnetometer (J-MAG) monitors moons’ inductive response to the Jovian magnetic field and probes the subsurface ocean with the help of a particle environment package (PEP) and a radio and plasma wave investigation (RPWI). The GALA works closely together with these instruments and plays a leading and a supporting role to clarify the whole picture of Ganymede and other icy moons.

JUICE/GALA-J (3): JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における回線設計・性能モデルシミュレーション

JUICE/GALA-J (3): Performance model simulation of Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

*荒木 博志¹、並木 則行¹、野田 寛大¹、石橋 高²、塩谷 圭吾³、尾崎 正伸³、水野 貴秀³、宇都宮 真³、齋藤 義文³、東原 和行³、押上 祥子¹、鹿島 伸悟¹、木村 淳⁴、小林 進悟⁵、小林 正規²、Steinbruegge Gregor⁶、Stark Alexander⁶、Althaus Christian⁶、del Togno Simone⁶、Lingenauber Kay⁶、Hussmann Hauke⁶
 *Hiroshi Araki¹, Noriyuki Namiki¹, Hirotomo Noda¹, Ko Ishibashi², Keigo Enya³, Masanobu Ozaki³, Takahide Mizuno³, Shin Utsunomiya³, Yoshifumi Saito³, Kazuyuki Touhara³, Shoko Oshigami¹, Shingo Kashima¹, Jun Kimura⁴, Shingo Kobayashi⁵, Masanori Kobayashi², Gregor Steinbruegge⁶, Alexander Stark⁶, Christian Althaus⁶, Simone DelTogno⁶, Kay Lingenauber⁶, Hauke Hussmann⁶

1.国立天文台 RISE月惑星探査検討室、2.千葉工業大学 惑星探査研究センター、3.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、4.東京工業大学地球生命研究所、5.放射線医学総合研究所、6.ドイツ宇宙航空センター

1.National Astronomical Observatory of Japan, 2.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 3.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 4.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 5.National Institute of Radiological Sciences, 6.Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

The laser altimeter GALA (GAnymede Laser Altimeter) is one of the payload instrument of JUICE (JUperiter ICy moons Explorer) project led by ESA to be launched in 2022. GALA is developed by the international collaboration by Germany, Japan, Switzerland, and Spanish teams.

In order to clarify the requirement on the interface conditions between modules of GALA, we developed the performance model of GALA based on the model of BELA (Bepi-Colombo Laser Altimeter). The performance model quantifies the link budget, range accuracy, albedo measurement accuracy, and probability of false detection (PFD). In the performance model, background noise from scattered sunlight from the Ganymede surface, surface and bulk dark currents of APD, noise floor of APD-TIA, shot noise, and speckle noise are taken into consideration. Black-body emission from the Ganymede surface is also taken into account while its influence to SNR is negligible compared with other noises. EMI noise shall be included after the evaluation of the verification model.

Scientific requirements on GALA performance is summarized into the following four criteria: [1] For Europa fly-by, PFD is less than 0.2 from an altitude of 1300 km or lower, [2] Under the worst observation condition for albedo and surface slope of GC0500 (Ganymede Circular Orbit whose height is 500km), the accuracy of the ranging is less than 10 m and PFD is less than 0.2. [3] Under the nominal observation condition of GC0500, the accuracy of the ranging is less than 2 m and PFD is less than 0.1. [4] Under the best observation condition of GC0500, the accuracy of the ranging is less than 1 m and PFD is less than 0.1.

Returned laser pulse is converted to analogue signal in Japanese Analogue Electric Module (AEM), then to digital signal and transferred to Swiss Range Finder Module (RFM). RFM applies matched filtering to the digital signal to determine the range as accurately as possible. The signal processing in RFM constrains the performance of AEM, therefore, GALA-J developed its own matched filter simulation aiming to determine the signal-to-noise ratio (SNR). The matched filtering in RFM is a convolution of signal and Gaussian filter whose width in time domain is adjustable. The filtering is thus equivalent to moving average weighted by Gaussian filter in time domain. In this

simulation, the length of range gate is 8192 and the sampling frequency is 66.7 MHz which is lower than the current design of ADC of 200 MHz. The band-pass filtering by trans-impedance amplifier of APD (APD-TIA) is taken into account by filtering the return pulse and APD noise by 100 MHz. By changing input SNR and width of the Gaussian filter, the lower bounds of the output SNR that satisfy the system requirements are investigated. The requirements for the input SNR obtained by the investigation are then confirmed well below the analogue SNRs calculated by the performance model.

The return signal is assumed to have a Gaussian form in both spatial and time domain in this performance model, however, the broadening occurs on a reflection by the surface topographic roughness and filtering processes in AEM and RFM. These effects on the results are now investigated and will be shown at the poster presentation.

キーワード：木星、ガニメデ、JUICE、GALA、レーザー高度計、回線設計

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

JUICE/GALA-J (4): JUICE 搭載ガニメデレーザー高度計 (GALA) におけるエレクトロニクス・検出器
関連開発

JUICE/GALA-J (4): Electronics and detector development for Ganymede Laser Altimeter (GALA)
for the JUICE mission

*小林 正規¹、奥平 修¹、石橋 高¹、藤井 雅之⁶、塩谷 圭吾²、並木 則行³、荒木 博志³、野田 寛大³、押上 祥
子³、鹿島 伸悟³、尾崎 正伸²、水野 貴秀²、宇都宮 真²、斎藤 義文²、東原 和行²、木村 淳⁴、小林 進悟⁵
、Hussmann Hauke⁷、Lingenauber Kay⁷、Behnke Thomas⁷、DelTogno Simone⁷

*Masanori Kobayashi¹, Osamu Okudaira¹, Ko Ishibashi¹, Masayuki Fujii⁶, Keigo Enya², Noriyuki Namiki³
, Hiroshi Araki³, Hiroto Noda³, Shoko Oshigami³, Shingo Kashima³, Masanobu Ozaki², Takahide Mizuno²
, Shin Utsunomiya², Yoshifumi Saito², Kazuyuki Touhara², Jun Kimura⁴, Shingo Kobayashi⁵, Hauke
Hussmann⁷, Kay Lingenauber⁷, Thomas Behnke⁷, Simone DelTogno⁷

1.千葉工業大学惑星探査研究センター、2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、3.国立天文台 RISE月惑星
探査検討室、4.東京工業大学地球生命研究所、5.放射線医学総合研究所、6.FAMサイエンス、7.ドイツ宇宙航空
センター

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.Institute of Space and
Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3.National Astronomical Observatory of
Japan, 4.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 6.National Institute of
Radiological Sciences, 5.National Institute of Radiological Sciences, 6.FAM Science Co., LTD.,
7.Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

2022 年打ち上げ予定のESA 木星探査計画(JUICE; JUpiter ICy moons Explor) でレーザ高度計(GALA,
Ganymede Laser Altimeter) の搭載が予定されている。GALA はドイツ、日本、スイス、スペインの4 国で共同
開発され、日本チームはレーザ反射光受信光学系のうち、バックエンド光学系(BEO)、APDセンサモジュールお
よびAPDモジュールが収められる焦点面アセンブリ(FPA)、そしてアナログの電子モジュール(AEM)の開発を担当
している。本講演では、APDモジュールとAEMの開発について状況を説明する。

採用したAPDモジュールは、APDセンサ、プリアンプ(トランスインピーダンスアンプ、TIA)、温度センサ、ペ
ルチエ素子を含むハイブリッドICで構成されている。TIAの出力信号の帯域は100MHzとする。このAPDセンサは
1060nmで約40%まで高められた量子効率を持っていて、1064nmのYAGレーザを利用する装置には有利な仕様と
なっている。

光学系からの受光パルスをAPDモジュール内のAPDセンサで電流信号に変換し、それをTIAで電圧信号に変換して
AEMに送り、その波形をアナログ・デジタル変換(ADC)回路によってデジタルデータに変換する。デジタルサ
ンプリングされた波形信号は距離測定モジュール(RFM)に送信される。

現在、APDモジュールで使われるセンサの放射線耐性を調べる試験や、開発課題をクリアするためにAEMのブ
レッドボードモデルを製作して、性能評価を進めているところである。

キーワード：JUICE、GALA、APD、ガニメデ、レーザー高度計

Keywords: JUICE, GALA, APD, Ganymede, Laser Altimeter

JUICE/GALA-J (5): JUICE搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) のための放射線解析

JUICE/GALA-J (5): Radiation analysis for Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

*小林 進悟¹、DelTogno Simone²、小林 正規³、尾崎 正伸⁴、塩谷 圭吾⁴、水野 貴秀⁴、宇都宮 真⁴、齋藤 義文⁴、東原 和行⁴、石橋 高³、並木 則行⁵、荒木 博志⁵、野田 寛大⁵、押上 祥子⁵、鹿島 伸悟⁵、木村 淳⁶、Althaus Christian²、Lingenauber Kay²、Husmann Hauke²

*Shingo Kobayashi¹, Simone DelTogno², Masanori Kobayashi³, Masanobu Ozaki⁴, Keigo Enya⁴, Takahide Mizuno⁴, Makoto Utsunomiya⁴, Yoshifumi Saito⁴, Kazuyuki Touhara⁴, Ko Ishibashi³, Noriyuki Namiki⁵, Hiroshi Araki⁵, Hirotomo Noda⁵, Shoko Oshigami⁵, Shingo Kashima⁵, Jun Kimura⁶, Christian Althaus², Kay Lingenauber², Hauke Husmann²

1.国立研究開発法人 放射線医学総合研究所、2.ドイツ宇宙航空センター、3.千葉工業大学 惑星探査研究センター、4.宇宙航空研究開発機構、5.国立天文台、6.東京工業大学 地球生命研究所

1.National Institute of Radiological Sciences, 2.Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 3.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 4.Japan Aerospace Exploration Agency, 5.National Astronomical Observatory of Japan, 6.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

The radiation environment around the Jupiter consists of electrons and protons that are trapped by the Jupiter's magnetosphere, solar energetic particles and galactic cosmic-rays. The trapped electrons are the most harmful to devices on the JUICE because the trapped electron flux is the most intense and the its penetrability is relatively higher than the other charged particles. The solar energetic particles are of secondary importance in spite of the lower flux because its energy spectrum is hard and the high energy protons easily penetrate a shield.

The most sensitive device to radiation on the GALA is the avalanche photo diode (APD) to detect the laser pulses returned from the Ganymede's surface. The maximum tolerance, total ionizing dose (TID), is relatively lower than the other devices and is 30 krad. Thus, an adequate shielding is required to reduce the degradation of the performance of the APD. In order to estimate the radiation dose at the APD, a simulation application, GALA-sim and GALA-analy, based on Geant4 [1] and ROOT [2] was developed by GALA Japan to estimate the radiation dose during Jupiter cruising. The application can import for a radiation analysis a three dimensional CAD model which is produced as a result of our structural and strength design of the GALA instrument. It also can estimate the influence of secondary neutron production by nuclear reactions in JUICE in addition to the primary trapped electrons and the solar energetic particles.

The preliminary three dimensional model of the GALA Transceiver Unit (TRU), GAL-TRU-i1.4-Shielding, was developed to analyze the radiation dose during the JUICE mission. The average thickness of mass around the APD in this model is 11.4 g/cm² which corresponds to aluminum which 42 mm thickness. The TRU was irradiated with trapped electrons and solar energetic particles by the GALA-sim based on Geant4 version 9.6.p03 and 10.01.p01 and TIDs at the APD due to trapped electrons and solar energetic particles were estimated. They are 21.2 and 0.72 krad (Figure of safety, FoS=2), respectively, if calculated by Geant4.10.01. The sum of TIDs fell below the maximum tolerance of the APD (30 krad). The radiation dose due to the trapped electrons is 30 times higher than that of solar energetic particles as expected. It is found that the trapped electrons with an energy of 10-40 MeV mainly contributes the TID. No dependency on the versions of Geant4 was observed and both results are consistent each other within 3% difference. The result was also confirmed by the calculation by FASTRAD [3].

The total non-ionizing dose (TNID) which is the energy deposition on a material via non-ionizing

processes such as Coulomb scattering, nuclear elastic scattering and nuclear reactions, and results in displacement damage is also estimated based on the theory of non-ionization energy loss by [4] with the help of GRAS [5]. The TNID due to the primary trapped electrons, the primary solar protons and the secondary neutron at the APD is $7.52 \times 10^7 \text{ MeV/g}$ (FoS=2) which is equivalent to the 50 MeV proton flux of $1.75 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. The contributions of each particles to TNID were 71%, 24% and 5%, respectively.

In summary, we have developed a simulation code to estimate the radiation damage of the devices in GALA instrument. We found the reasonable solution for the radiation shielding of the APD. The results of calculation are used for the radiation test of the APD at a beam irradiation facility and the improvement of the design of TRU.

[1] S. Agostinelli et al., Nucl. Instr. and Meth. A506 (2003) 250-303.

[2] R. Brun and F. Rademakers, Nucl. Inst. & Meth. A389 (1997) 81-86.

[3] TRAD, <http://www.fastrad.net/>

[4] I. Jun et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 50 (2003) 1924-1928.

[5] G. Santin et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 2294-2299.

キーワード：木星、ガニメデ、JUICE、GALA、レーザー高度計、耐放射線解析

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

JUICE/GALA-J (6) : JUICE 搭載ガニメデレーザ高度計 (GALA) における受光部の光学/構造/熱設計

JUICE/GALA-J (6): Optical/thermal/structural design for the receiver part of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the JUICE mission

*塩谷 圭吾¹、小林 正規²、石橋 高²、鹿島 伸悟³、宇都宮 真¹、岩村 哲⁴、飯田 光人⁵、松本 吉昭⁵、藤井 雅之⁶、藤代 尚文⁷、山室 智康⁸、尾崎 正伸¹、水野 貴秀¹、斎藤 義文¹、東原 和行¹、並木 則行³、荒木 博志³、野田 寛大³、押上 祥子³、木村 淳⁹、Althaus, Christian¹⁰、DelTogno, Simone¹⁰、Lingenauber, Kay¹⁰、Husmann, Hauke¹⁰

*Keigo Enya¹, Masanori Kobayashi², Ko Ishibashi², Shingo Kashima³, Shin Utsunomiya¹, Satoru Iwamura⁴, Teruhito Iida⁵, Yoshiaki Matsumoto⁵, Masanori Fujii⁶, Naofumi Fujishiro⁷, Tomoyasu Yamamuro⁸, Masanobu Ozaki¹, Takahide Mizuno¹, Yoshifumi Saito¹, Kazuyuki Touhara¹, Noriyuki Namiki³, Hiroshi Araki³, Hiroto Noda³, Shoko Oshigami³, Jun Kimura⁹, Christian Althaus¹⁰, Simone DelTogno¹⁰, Kay Lingenauber¹⁰, Hauke Husmann¹⁰

1.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、2.千葉工大、3.国立天文台、4.MRJ、5.プラネット、6.ファムサイエンス、7.アストロオプト、8.オプトクラフト、9.東京工業大学 地球生命研究所、10.ドイツ航空宇宙センター

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.CIT, 3.NAOJ, 4.MRJ, 5.PLANET, 6.FAM Science, 7.Astro-Opt, 8.OptCraft, 9.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 10.DLR

We present Optical/Structural/thermal design for the receiver part of the Ganymede Laser Altimeter (GALA) for the Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE) mission. JUICE is a mission of ESA to be launched in 2022, and GALA is one of the payloads of JUICE. For the laser altimetry, GALA emits and receives laser pulses at about 500 km altitude above Ganymede. Wavelength, energy, and repetition frequency of the laser plus are 1064 nm, 17 mJ, and 30 Hz, respectively. Reflected beam from the Ganymede surface is received by the receiver telescope with 25 cm diameter aperture, re-focused by the BEO including a narrow band-pass filter, and then detected by the APD detector. In the international collaboration, GALA-Japan will develop the Backend Optics (BEO), the Focal Plane assembly (FPA) including an avalanche photo-diode (APD) detector, and the Analog Electronics module (AEM) in the receiver chain.

Thermal environment of GALA is unique: The Receiver telescope and some parts are cooled to intermediately cryogenic temperature by radiation to the cold surface of Ganymede and deep space while the APD detector has to be kept at 25 degree in its operation time. Many parts of GALA are warmed by self-heating. Furthermore, GALA repeats observation time of 16 hours and data downlink time of 8 (power of observation part is off) hours. So the thermal environment is dynamic. On the other hand, GALA have to keep stability of optical performance, especially absolute agreement of the optical axis of the emitter and the receiver and to the spacecraft coordinate system. Radiation shield also has to be mandatory. Considering these conditions, we are carrying out design of optics, structure and thermal design for the BEO, FPA, and AEM. The current baseline design, the BEO is simply consisting of a collimator lens, a narrow band-pass filter, a focusing lens supported without adhesive. The material used for the structural material of both BEO and FPA must have small thermal expansion and good radiation shielding. Iterative studies of thermal analysis of whole GALA and the optical/thermal/structural design is ongoing.

キーワード：JUICE、GALA、光学/熱/構造設計

Keywords: JUICE, GALA, optical/thermal/structural design

磁場勾配によって誘導される並進運動を用いた太陽系物質粒子の非破壊同定

Non-destructive material identification of volatile particles using translational motions induced by magnetic field gradient

*久好 圭治^{1,2}、山口 若菜¹、植田 千秋¹

*Keiji Hisayoshi^{1,2}, Wakana Yamaguchi¹, Chiaki Uyeda¹

1.大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻、2.大阪府立春日丘高等学校

1.Dept. of Earth and Space Science, School of Science, Osaka University, 2.Kasugaoka High School

近年、私たちは磁場勾配力による並進運動を利用した新しい磁化測定法を確立し、これに基づく物質同定法を提案した。すなわち重力の無視できる希薄な空間に開放した固体粒子は、誘導される磁気的エネルギーのため、永久磁石レベルの低磁場で並進や回転を引き起こす。この運動は体積力に由来するため、同一の磁場分布の中では、粒子の質量に依存せず物質固有の磁化率のみに依存する。物質はそれぞれ固有の磁化率を持つので、この方法で得た磁化率を文献値と対応することで、単一粒子の物質識別ができる。これまでに私たちはmm ~ sub-mmサイズの反磁性粒子について、微小重力環境下の磁場勾配中に試料を解放し、試料の並進運動で得た磁化率が文献値と一致することを確認した。この原理に基づき、私たちは、常磁性粒子に、この方法を拡張した。鉄の含有量が異なるサンカルロス産オリビン粒子とマンマー産オリビンの粒子で分離実験を行った。さらに今回、揮発性固体である水(H₂O)とドライアイス(CO₂)についても並進運動から磁化率を得ることができた。

微小重力は室内型の小型落下ボックスを用いて発生させた。落下距離は1.8m、有効な微小重力継続時間は約0.5秒である。30x30x20cmに小型化した直方体の落下ボックス内に観測装置を配置した。装置は、小型のNdFeB磁石製の磁気回路(B < 0.8T)、電動アクチュエーターを装備した真空チャンバー、試料ホルダー解放信号受信装置、試料ホルダーコントローラー、電池およびハイスピードカメラで構成される。小型の磁気回路を導入することにより、試料の磁気並進運動の距離を約2cmに、さらに、粒子が終端速度に到達するまでの所要時間を0.5秒以下に短縮し、落下装置の微小重力継続時間内に測定が可能になった。

磁場による粒子の抽出・識別はこれまで自発磁化を有する一部物質に限られていたが、私たちが提案する方法は、一般の固体に拡張される展望が得られた。上記のように、この方法では原理上、(試料の運動が観測可能な限り)無制限に小さい試料の磁化率を測定することができる。有機・生化学の分野では精密分析に先立ち、有機分子の混合物をクロマトグラフィにより分子量ごとに分離する方法が確立している。無機物質でも、有機物と同様の分析過程が望まれるが、上記の磁気運動を取り入れることで、ほぼ全ての固体物質で、それが実現すると期待される。

無機物質でもこれに相当する過程が確立すれば、始原的隕石の分析のみならず、惑星・衛星探査機に搭載するためのダスト分析装置への応用が考えられる。このような探査では、従来のサンプルリターンと並行して、探査現場での物質の存在頻度を効率的にサーベイすることが重要になる。即ち、粒子を物質毎の存在頻度とサイズ分布を効率的にデータ化することが求められる。探査機に搭載する分析装置は、小型で、測定原理が単純でしかも科学的根拠が明確であり、可能であれば非破壊分析であることが求められるが、提案する計測原理は、現時点でこれらの条件を満たす有力な解の一つと考えられる。

Reference

- [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.

キーワード：非破壊同定、並進運動、磁場勾配力、微小重力、揮発性粒子

Keywords: non-destruction distinction, translational motion, magnetic field gradient force, microgravity, volatile particle

氷ガリレオ衛星内部の電磁誘導

Electromagnetic induction in icy moons of Jupiter - A review and its future perspective

*藤 浩明¹、桂 貴暉²*Hiroaki TOH¹, Taka'aki Katsura²

1.京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、2.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1.Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

Internal oceans of icy moons of gas giants of our solar system are among recent hot topics in planetary sciences. Newly discovered evidence for hydrothermal vents in the liquid ocean of Enceladus (Hsu et al., 2015) is still fresh in our memory. Presence of the internal oceans is one of the necessary conditions for extra terrestrial life, although interaction of liquid water with the lithosphere of the icy moon in concern via, say, the hydrothermal activity, is also indispensable. It, therefore, worth revisiting the problem of internal oceans of Jupiter's Galilean satellites with icy surfaces at this time of coming successive Jovian probe missions such as Juno (Bagenal et al., 2014), JUICE (ESA, 2014) and so on.

The latter three of the four Galilean satellites, Io, Europa, Ganymede and Callisto, are covered with ice, while intense volcanic activity is ongoing on the Io's surface due to the immense tidal force of Jupiter. Those volcanic ejecta become a dense source of plasmas of Io origin, which results in Io's footprints of Jupiter's auroras (e.g., Bonfond et al., 2013). It is noteworthy that the former three of the Galilean satellites have those footprints, while Callisto alone lacks in them implying a very thin plasma environment around that moon as it is the farthest to Jupiter without any significant source of plasmas from Callisto itself. This means that Callisto is least subject to the plasma effect in terms of electromagnetic induction.

Another feature of Callisto that is worth noting is its orbital state. While the former three revolutions are in the state of Laplace Orbital Resonance (Murray and Dermott, 1999), Callisto alone is out of it. This may cause a significant difference in tidal force which each moon feels. Tidal dissipation is one of the important factors (Chen et al., 2014) when we consider the heat source that maintains the internal oceans of the icy moons, if any.

In this study, we reanalyzed the vector magnetic field data at the time of Galileo Probe flybys around Callisto. Assuming a time-varying uniform external magnetic field (Khurana, 1997; Khurana and Schwarzl, 2005) with a direction almost parallel to the direction of Jupiter looking from Callisto, we calculated the induced dipole field generated by concentric spherical shells. As a result, a conductive shell with a similar conductivity of seawater on the Earth was found when the depth to it was constrained by an assumed phase diagram of water inside Callisto, which coincides with previous studies (Khurana et al., 1998; Zimmer et al., 2000).

However, if the internal structure of Callisto is significantly different from those of Europa and Ganymede in the sense that Callisto has experienced immature differentiation unlike rest of the two, Callisto may provide a better platform for extra terrestrial life by an increased chance for liquid water-lithosphere interaction. In this presentation, the obtained electrical structure will be further examined comparatively with that of Europa known to date. Comparison with that of Ganymede may be subject to another research because of the moon's peculiar intrinsic core field.

キーワード：氷衛星、木星、電磁誘導

Keywords: Icy moons, Jupiter, Electromagnetic induction

タイタン表面における液体メタンの安定性

Stability of liquid methane on Titan's surface

*丹 秀也¹、佐々木 晶²*Shuya Tan¹, Sho Sasaki²

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 大阪大学大学院理学系研究科宇宙地球科学専攻

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

2. Department of Earth and Space science, Graduate School of Science, Osaka University

土星の衛星タイタンは、表面に液体メタンが確認されている唯一の天体である。この表面環境は、タイタンが保持する厚い大気の温度分布のために形成されている。本研究では、太陽光フラックスや重力加速度など、大気に関係するパラメータと表面液体メタンの存在範囲の関係を推定することで、タイタン表面環境の安定性評価を試みた。

こうしたパラメータ変更や他の天体との比較は、天体の状態は形成時からの進化に依存し、潮汐加熱などの外的要因も影響するため、一般には時間変化を含んだものとなる。しかしタイタンや他の氷天体の場合、大気や内部の形成過程について複数の説が存在し、評価が容易ではない。タイタン大気については、アルゴンの同位体比などから主成分である窒素はアンモニアの光分解に由来するとされているものの、その生成過程・時期・生成量については定説が得られていない状況である。そこで、現在のタイタンの状態を基準として定常状態でのパラメータ変更を考えた。

本研究ではモデルとして、放射と対流を用いた一次元平行平板灰色大気モデル (Robinson et al., 2012) を用いた。ただし対流についてはメタンの凝結を考慮した。

タイタンの大気では、メタンなど気体分子の赤外吸収と、成層圏に多く分布する、メタンの光分解で生成される有機物エアロゾルの可視光吸収が放射に影響する。この可視光吸収による表面温度低下は逆温室効果 (Antigreenhouse effect) とも呼ばれる。赤外吸収はメタン濃度による吸収係数の変化を考慮し、暴走温室効果を定常状態での閾値として表現できるようにした (Nakajima et al., 1992を参考)。可視光吸収については、入射可視光の量や成層圏でのメタン濃度、エアロゾルの光学特性などで吸収される割合が変化する可能性が考えられるが、一次元の近似では正確な表現は困難である。そこで今回は、吸収される割合が現在の値から変化しない場合などを単純に仮定した。

このモデルにおいて、表面の温度と窒素・メタンの分圧および重力加速度を設定し、対応する太陽光フラックスを算出してパラメータ変更を行った。

太陽光フラックスが小さい領域では、表面温度が低くメタンの凝結が起きるため、表面液体が存在するための下限値が得られた。一方で太陽光フラックスが大きい領域において、逆温室効果に対して温室効果の寄与が大きすぎる場合には、暴走温室効果により上限値が得られた。こうした液体の存在範囲を規定する太陽光フラックスの値に関して、表面窒素分圧は下限値のみに影響し、重力加速度は上限値と下限値の両方に影響した。

可視光のうち、吸収される割合が変化しない場合を仮定したところ、表面窒素分圧・重力加速度の大きさによらず上限値が存在した。また、現在の太陽光フラックスが下限値となる表面窒素分圧と重力加速度は、それぞれ 1.06×10^6 Pa, 0.15 m/s^2 という値となった。

熱慣性推定のための小惑星の熱モデルにおける表面ラフネスに関する研究

A study on surface roughness in thermo-physical modeling of asteroid for the estimation of thermal inertia

*滝田 隼¹、千秋 博紀²、田中 智³

*Jun Takita¹, Hiroki Senshu², Satoshi Tanaka³

1.東京大学大学院理学系研究科、2.千葉工業大学惑星探査研究センター、3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1.Graduate School of Science, Tokyo University, 2.Chiba Institute of Technology/PERC, 3.JAXA/ISAS

This study reports preliminary results of our study about the effect of rough surface on thermal inertia from thermal phase delay using thermo physical model (TPM). In the thermal modeling of asteroid, information on the surface topography and surface roughness is indispensable for thermophysical estimation, which is especially important to deduce thermal inertia of an asteroid. This is one of the preparations for the thermo-physical observations of asteroid Ryugu using the thermal infrared imager in Hayabusa2 mission.

For numerical approach using TPM, we produced rough surface models by deforming a spherical surface mesh. We considered the effect of surface roughness on surface temperature as a function that changes only the effective emissivity of the planetary surface, following the works of Davidsson et al. (2009) and Leyrat et al. (2011).

We fitted the surface temperatures that were generated by the rough surface models to determine whether the thermal phase delay can still be retrieved under rough surface topographies. We picked only the surface temperatures on the equatorial zone. Quadratic least-square fitting is applied to the data to deduce thermal phase delay.

We evaluated uncertainties in the estimation of the phase delay based on a series of data generated in the diurnal motion. As a result, we found that the feasibility of thermal inertia from the diurnal phase delay depended greatly on the observational geometry in terms of solar illumination over the asteroid surfaces. The thermal phase delay could be determined without being strongly affected by local topography under low solar phase angles. Considering the errors of phase shift, the uncertainty of thermal inertia will be greater than 50% if the rough scale is greater than 9.6° (RMS surface slope angle) from the case of low solar phase angle.

キーワード：小惑星、熱慣性、表面ラフネス

Keywords: asteroid, thermal inertia, surface roughness

月面クレータの地形緩和と形成年代の関係

Relationship between formation age and the degree of degradation of the lunar craters

武藤 史樹¹、*諸田 智克¹、春山 純一²Fumiki Muto¹, *Tomokatsu Morota¹, Junichi Haruyama²

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.宇宙航空研究開発機構

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Japan Aerospace Exploration Agency

月面の地形は形成以後、微小天体の衝突とレゴリスの攪乱によって崩壊し、緩和していくとされる。地形緩和のタイムスケールを知ることは、表層レゴリスの移動の素過程の理解や天体衝突頻度の推定、クレータの緩和状態を用いた年代決定法の構築のために重要である。

Fassett and Thomson [JGR, 119, 2255-2271, 2014] は地形拡散モデルと実際の地形の平均プロファイルとの比較によってクレータの緩和度を評価した。さらに、表面年代とその領域に存在するクレータの緩和度の中央値の比較から月面地形の拡散速度を評価している。しかし、先行研究では表面年代と複数のクレータの緩和度の中央値との関係を見ているため、個々のクレータの形成年代と緩和度の関係は明らかになっておらず、拡散速度の見積もりも正確ではない。また、クレータの初期形状をすべてのクレータで同一と仮定しているが月面では層構造が卓越しており、形成されるクレータの形状はその層構造に強く影響されるため、個々のクレータの崩壊度を正しく評価できていない可能性がある。それらの問題をふまえ、本研究ではクレータ初期形状の多様性を評価し、個々のクレータの緩和度と年代の関係を明らかにすることを目的とし、クレータの緩和状態とクレータ噴出物の宇宙風化度を指標としたクレータ形成年代との関係を調査した。

本研究では、「かぐや」で得られた地形モデルと反射スペクトルのデータを使用した。これらを用いて、各クレータの平均地形プロファイルと宇宙風化度の指標となるOMATを算出した。クレータ緩和度を評価するために拡散プロセスに従う緩和モデルを用いて、緩和時間とクレータ形状の関係を調べ、実際の地形とのプロファイルの比較によって各クレータの緩和度を評価した。

まずクレータ初期形状を評価するために、クレータ放出物のOMAT値が0.25を超える直径1.5 km~5 kmのクレータを月の3つの海から選び出し、平均地形プロファイルを比較した。その結果、フロア高さにはクレータ間で多様性がある一方で、内壁の傾斜についてはほぼ一定であることがわかった。このことから、クレータ緩和度の指標として、クレータの深さ/直径比よりも内壁傾斜が適していることがわかった。

次に、クレータ形成年代と緩和度の関係を調べるために、Mare Serenitatisの直径1 km~2 kmの25個のクレータに対して緩和度とクレータの周りの地表のOMATの比較を行い、緩和度と形成年代をそれぞれ評価した。緩和度と放出物のOMAT値を比較したところ、両者には負の相関があり、OMAT値が高く新鮮なクレータであるほど、緩和の程度も小さいことがわかった。

試料分析やクレーターカウンティングによっていくつかの大クレータについては形成年代が調べられている。これらのクレータ放出物のOMATと形成年代の間の関係を用いて、本研究で得られた地形緩和度とOMATの関係から、月面地形拡散係数は $13\text{--}31 \text{ m}^2/\text{Myr}$ と見積もられる。

キーワード：クレータ、地形緩和、天体衝突、月

Keywords: crater, crater degradation, impact, Moon

Statistical analyses of bright ray craters on Ganymede: implications from Galileo and Voyager images

Statistical analyses of bright ray craters on Ganymede: implications from Galileo and Voyager images

*Xu Luyuan¹、宮本 英昭¹、平田 直之²

*Luyuan Xu¹, Hideaki Miyamoto¹, Naoyuki Hirata²

1. 東京大学総合研究博物館、2.神戸大学

1.The University Museum, The University of Tokyo, 2.Kobe University

Ray craters are impact craters surrounded by radial rays or ejecta patterns (both bright and dark) and prominent on Ganymede, the biggest satellite of Jupiter. Bright ray craters are recognized to be the youngest features on Ganymede [1], and represent the most recent impact cratering [2]. Also, being susceptible to destruction by various processes [1-3], bright ray craters may inform on the most recent geologic processes on Ganymede.

Passey and Shoemaker [4] identified 84 bright ray craters $D > 30$ km and obtained several preliminary results and conclusions using the image data of Voyager. However, since Voyager 1 and 2 only have sufficient resolution (better than 2 km/pixel) images limiting to the sub jovian and antijovian surroundings [4, 5], the analysis of Galileo images could fill in this gap. Also, the revised global geologic map [5] and advanced cratering impact model [2] make a more accurate distribution and a more comprehensive understanding of bright ray craters of Ganymede possible.

In this study, we used the raw images of both Voyager and Galileo images (825 Voyager images and 314 Galileo images) to identify ray craters. Since the crater rays are sensitive to solar illuminations [2] and the coverage limitation of images, we only measured the ray craters at high sun conditions and in the latitudinal range 70°N - 70°S [5]. Also considering the identifiable sizes of ray craters are highly dependent on spatial resolution of images, we initially examined the influence of image resolution on the density distribution of ray craters.

Ultimately, our work resulted in a revised density distribution of bright ray craters corresponding to spatial resolution, latitude, angular apex distance, and different terrain types, finding that the crater density of bright ray craters on Bright Terrain of Ganymede is at least $\sim 4\times$ from apex (the center of the leading hemisphere) to antapex (the center of the trailing hemisphere), and the bright rays are likely to be erased at a higher rate with increasing latitudes. Based on our results, we reconsidered the possible reasons for cratering asymmetry on Ganymede [2], and confirmed the influence of latitude-related factors, which might include thermal-driven sublimation [6] and plasma-induced sputtering [7].

References

- [1] Shoemaker E. M. et al. (1982) *Satellites of Jupiter*: 435-520.
- [2] Zahnle K. et al. (2001) *Icarus*, 153, 111-129.
- [3] Schenk P. M. and McKinnon W. B. (1991) *Icarus*, 89, 318-346.
- [4] Passey Q. R. and Shoemaker E. M. (1982) *Satellites of Jupiter*: 379-434.
- [5] Patterson G. W. et al. (2010) *Icarus*, 207, 845-867.
- [6] Squyres S. W. (1980) *Icarus*, 44, 502-510.
- [7] Khurana K. K. (2007) *Icarus*, 191, 193-202.

キーワード : Ganymede、bright ray craters、Galileo images

Keywords: Ganymede, bright ray craters, Galileo images

火星衛星探査計画のためのLIBSを用いた隕石判別実験

The discrimination experiment of meteorites using LIBS for the Martian Moons Explorer mission

*堀内 美沙¹、芝崎 和夫¹、長 勇一郎¹、亀田 真吾¹、石橋 高²、和田 浩二²、三河内 岳³、中村 智樹⁴、杉田 精司³

*Misa Horiuchi¹, Kazuo Shibasaki¹, Yuichiro Cho¹, Shingo Kameda¹, Ko Ishibashi², Koji Wada², Takashi Mikouchi³, Tomoki Nakamura⁴, Seiji Sugita³

1.立教大学、2.千葉工業大学惑星探査研究センター、3.東京大学、4.東北大学

1.Rikkyo University, 2.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 3.The University of Tokyo, 4.Tohoku University

火星にはフォボスとダイモスという2つの衛星がある。両衛星の起源は、小惑星が火星の重力によって捕獲されたという小惑星捕獲説と、初期火星に天体が衝突して、その時に飛散した火星初期物質が集積したという巨大衝突説の2つの説が存在している[1]。JAXAでは2022年に打ち上げを目標にしている火星衛星探査計画が検討されている。この計画はフォボスからサンプルリターンを行いフォボスの起源を判別することを大目標の1つとしている。起源がわかれば太陽系形成論に制約を与えることができる。起源を判別するためには、回収試料が衛星固有物質である必要があるため、フォボス全体の反射スペクトルを取得して試料採取地点を決定する。しかしフォボス表面は宇宙風化によって変成していると考えられており、粒子表面の状態を反映する反射スペクトルだけでは衛星固有物質の情報が隠されている可能性がある。また、今回の探査計画では着陸地点の粒子スケールでの地表の組成が不明であることと、回収試料を地球に持ち帰って分析するまで組成が分からないという問題がある。そこで反射スペクトルを変化させる宇宙風化の影響をほぼ受けない元素組成に着目する。私たちのグループでは元素組成を調べることでできるLIBS装置の搭載を提案し、フォボス表面で元素のその場測定を行うことで、これらの問題を解決することを試みている。

LIBS計測の実現可能性を実証するために一連の実験を行った。本実験では組成が報告されている炭素質コンドライトと火星隕石をLIBSで計測し、得られた元素組成から双方の判別可能性を検討した。これが可能であれば、フォボスの表面が小惑星に似た物質か火星に似た物質かを識別できることになる。実験系はこの計画でフォボスに着陸した時に使用される、実際の配置を想定して製作した。レーザーは出力が約12 mJで波長が1534 nmの小型のレーザーを使用し、分光器は波長範囲が約195 nmから1128 nmのものを使用した。レーザー光を集光するレンズと試料との間の距離と、分光器用の集光レンズと試料との間の距離は共に約1.5 m、集光光学系の有効径は約20 mm、試料は真空容器内に設置した。このような探査の現実的な条件の下で、S/Nの成立性なども含めて検証した。計測した試料は、Allende(炭素質コンドライト)、NWA1068(火星隕石)、Zagami(火星隕石)である。レーザーの繰り返し周波数を10 Hz、分光器の露光時間を1 sに設定し、1試料に対して16箇所測定を行い、1箇所に対してレーザーを150回照射した。隕石の平均組成を求めるために16箇所の発光スペクトルを平均した。その平均スペクトルからはFe, Ca, Al, Mg, Si, Tiなどの主要元素の輝線が検出された。さらにAllendeの発光スペクトルから他2つの試料の発光スペクトルをそれぞれ差し引くと、Allendeに多く含まれるFe, Mgの輝線波長のところはプラスの値になり、NWA1068とZagamiに多く含まれるAl, Caの輝線波長のところはマイナスの値になった。これよりLIBS計測で得られた発光スペクトルの差は、測定試料の元素組成の差を定性的に表していることがわかり、LIBS計測で小惑星に似た物質と火星に似た物質が判別できる可能性が高いことが示せた。

実際の探査でLIBSが運用できる時間は約1時間であるとされており、短時間で計測を完了することが求められる。そこで、この時間内で本実験結果の実現可能性を検討した。1測定点あたりの焦点調整や撮像に10秒、測定点の移動に20秒かかると仮定する。また、レーザーの繰り返し周波数は電力の制約上2Hzとし、本実験の条件であった1測定点あたりのレーザー照射回数を150回、測定点を16点で計算すると、本実験と同様の測定にかかる時間は約28分となった。これより実際の探査でLIBSを運用できる時間内で本実験と同様の測定を行えることがわかった。以上の結果は、フォボス上でLIBSを用いることでフォボスの表面が小惑星に似た物質か火星に似た物質かを識別できる可能性が高いことを示している。

参考文献

[1] Fraeman, A. A., et al. (2012), J. Geophys. Res., 117, E00J15.

キーワード：火星衛星探査計画、LIBS、その場計測

Keywords: the Martian Moons exploration project, LIBS, in-situ measurement

「月と地球のミッシングリンク」を解決する新パラダイム, 「月形成と地球のプレートテクトニクス」の起源を共に説明する「マルチインパクト仮説」と水星の形成

A new paradigm to solve "the missing link of "Moon and Earth"" is "Multi-Impact Hypothesis", it explains both Origin of the "Moon formation and the Earth's plate tectonics" and Formation of Mercury

*種子 彰¹

*Akira Taneko¹

1.SEED SCIENCE Lab.

1.SEED SCIENCE Lab.

人類に最も身近な太陽系には地球を含む9個の惑星がある。惑星科学では、この太陽系の起源と進化と現状を探究することを目的とする。人類を含む生命が発生する以前の太陽系の起源を探究する科学的方法では、演繹法、帰納法以外に創造的仮定法が挙げられる。帰納法で真理を発見する手段は、地球進化の観測か実験である。しかし実験結果が得られるのに数億年かかるという問題がある。実験するには費用も材料も足りなく、実際には実験が不可能です。

手段として今まで地球観測以外に何も無かった。仮説を立てて、その結論が現状を説明できる事が多ければ多いほどその仮説は信じられる。今、Abduction創造的推論では、逆に云えば正しさが増すという考え方です。それは起源や謎を探求するには最適な方法であるが、しかし画期的な仮説を考えつかないと、まったく意味がありません。「マルチインパクト仮説」では、(A)と(B)の仮説と以下の「月と地球のミッシングリンクを繋ぐ」統一的な推論を得た。(A)太陽系の小惑星帯位置に形成された火星サイズの分化した原始惑星CERRAが、その直近の木星(巨大質量)の摂動により、軌道が木星近点側に偏平化する。(B)そのCERRAが木星衝突する直前に、木星と太陽の張力で断裂し、そのマントル片が地球軌道と交差しており衝突する。

アブダクションによる<結論>

(1)月の起源：マントル片が地球に衝突(12.4km/s, 36.5度)し、軌道半径60・Re位置に形成

* (2)環太平洋弧状列島縁海起源：月形成時の太平洋位置衝突では、全方向へ凹縁海形成

* (3)月形成衝突で大量のマントル欠損により、コア偏芯(約10%)のブラジルのバンアレン帯が低下。

* (4)CERRAが木星摂動で軌道偏平し断裂するまで約5~6億年掛かり、既に分化冷却していた。

* (5)地球へ複数のマントル片が衝突して、マントル剥離しアイソスタシーで-5kmの地球表面の70%海が形成した。

* (6)プレートテクトニクスPTの起源、駆動力は衝突による偏芯と慣性モーメントの最小化である

* (7)プレート境界の起源：マントル片衝突による地殻剥離と亀裂形成

* (8)弧状列島と縁海盆凹プレートの起源：衝突によるマントル欠損とアイソスタシーでプレート凹形成

* (9)凸プレート沈み込み開始の起源：その駆動力で凹プレートと凸プレートが押し合うと凹の下に凸が潜り込む原因となる。

(10)CERRAの断裂時の破片は小惑星帯の起源である。長半径(運動エネルギー)の分布で理解

(11)隕石には、分化した石質・石鉄・鉄隕石が混在しているがそれはCERRAの破片と理解できる。

(12)CERRAの破片は複数あり、順次衝突して度重なる生物絶滅が起きた。

(13)セラのコアとマントルの一部は質量が大きい為に速度が低下し、エネルギー等分配の法則により軌道エネルギーの低い水星(多くの割合をコアが占める)となった。

(14)CERRAの破片が木星へ衝突した事が、大赤斑の起源となった。

cf. シューメーカーレヴィ9号彗星が1997年7月に木星に衝突し、衝突痕は小赤斑として約半年間残った。

彗星より大きいセラの破片なら、数億年前から消えることなく大赤斑を維持できる。これで実証実験が済んだのか?

(15)何故冥王星は石質であるのか? 木星や土星はガス惑星である! 私は提案した。「木星でスイングバイしたセラ破片が冥王星になった」

(16)地軸の傾き23.5度は 高緯度への衝突で実現された! アフリカのプレミア鉱山のキンバーライトパイプはマ

ントル下部からの炭素が超高压のまま急冷し噴出してきたダイヤモンドを含む、鉬山の形状は知られていたが、何故できたのかは不明であった。地球の反対側へのマントル片の衝突で、そのエネルギーが地球の反対側に集中して、その圧力で噴出してパイプができた。ハワイの衝突とアフリカのパイプは互いに反対位置であり、アフリカは既に移動している。ロシアのミルーヌィ鉬山位置へのキンバーライトパイプ形成は、Drake Passage(高緯度)への衝突により、地軸の傾斜が変わるモーメントを与えた。

(17)自転軸の傾きは駆動力の方向も変えて、天皇海山列の急な曲がりも説明できる。(熱対流駆動説では急変の説明が不可能と思われる)

この様に「月と地球のミッシングリンク」をアブダクションで解明できた。

キーワード：月と地球のミッシングリンク、月形成起源、プレートテクトニクスの起源、アブダクション、水星の形成、ティティウス・ボーデの法則

Keywords: the missing link of "Moon and Earth", Origin of the "Moon formation", Origin of the "Platet ectonics", Abduction, Formation of Mercury, Titius Bode law

8. チチウス・ボーデの法則の

チチウス・ボーデの法則を再検討 (1) 2015 10-14

問題点,

8-1. 本仮説での証明方法

種子彰 2015

◆ 水星 $n = -\infty$ この理由が説明できない. $\Rightarrow$ 禁制帯とマルチインパクト仮説.

◆ 小惑星帯 $n = 3$ の欠番理由が説明できない. $\Rightarrow$ CERRAの潮汐関断裂.

◆ 海王星 $n = 7$ で

の不一致と、冥王星の一致の理由が説明できない. $\Rightarrow$ CERRA断裂片のフライバイと海王星衝突

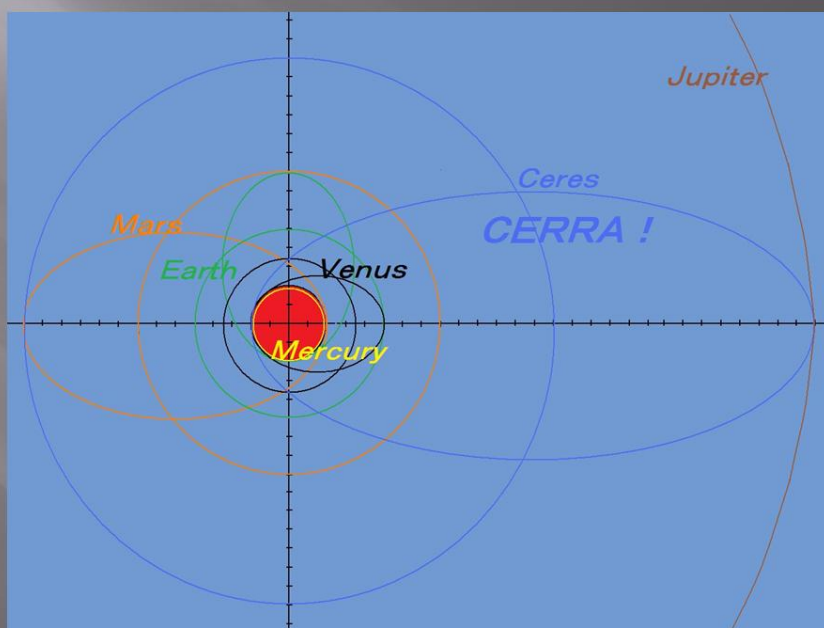
8-1. <証明>

● 禁制帯、フィードバックゾーンでの合体

● 微惑星楕円軌道近点での衝突合体による軌道縮退

● CERRAの潮汐断裂片 $\Rightarrow$ 水星に.

● 断裂片木星スイングバイ $\Rightarrow$ 冥王星



空隙のある天体表面の衝突脱水模擬実験

Experimental simulations on impact-induced dehydration of porous surfaces

*崔 仁士¹、小川 諒²、中村 昭子²、瀬戸 雄介²、小川 和律²*Jinshi Sai¹, Ryo Ogawa², Akiko Nakamura², Yusuke Seto², Kazunori Ogawa²

1.東京大学大学院理学系研究科、2.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate school of science, Tokyo University, 2.Graduate school of science, Kobe University

惑星の形成と成長は、微惑星同士や小天体の衝突、集積によって起こる。このような、微惑星や小天体の衝突とそれに伴う脱水は惑星の初期大気構成や惑星への水の供給に大きな影響を与える。このことから、天体の衝突脱水を理解することは水惑星の起源を考えるうえで重要である。また、近年、太陽系や惑星の起源を探るために小天体に関する研究が盛んに行われており、サンプルリターンを目的とする小惑星探査計画も進められている。小惑星探査機はやぶさ2は、水鉱物を含む可能性があると考えられているC型小惑星、リュウグウからのサンプルリターンを行う。持ち帰ったサンプルにおける衝突脱水の影響を議論するためにも、天体の衝突脱水についての理解は重要であるといえる。

衝突脱水に関する実験的研究は多く行われており、そのうち主な手法は固体回収実験である。この方法は、サンプルに直接弾丸を撃ち込まず、サンプルを金属密閉容器に入れその容器に弾丸をぶつけるというものである。この方法により衝突圧力に対するサンプルの脱水率が求められているが、固体回収実験ではサンプルを容器に入れて実験を行うため自然な天体表面での衝突過程をよく模擬しているとはいいがたい。また、脱水率とサンプルの空隙率の関係に焦点を置いた実験もなされているが、その関係の詳細は明らかではない。小惑星は様々な空隙率をもつので、小惑星の衝突脱水を考えるうえで、空隙率と脱水率の関係を明らかにすることが必要である。

本研究では、より自然に近い状態を模擬するために開放系での衝突脱水実験を行い、また、標的サンプルに空隙率の異なるいくつかの二水石膏を用いて実験を行うことで、脱水率と空隙率の関係について調査した。

蓋がないステンレス円筒容器にサンプルを入れ弾丸が直接標的サンプルに衝突するようにし、また、標的を設置したチャンバー内は0.1気圧程度まで減圧して衝突実験を行った。実験の際には、ハイスピードカメラで弾丸軌道を撮影し、その画像から衝突速度を求め、求めた衝突速度を用いてインピーダンスマッチング法により衝突圧力を求めた。弾丸にはポリカーボネートの先端に金属を取り付けた円柱弾丸を用いた。弾丸の金属部分には厚さが2.3mmのSUSと5.0mmの銅の二種類を用いた。その後、衝突により圧縮され弾丸の先端に付着したサンプルを回収し分析を行った。回収したサンプルの分析として、まずXRDによる成分測定を行い、脱水と脱水以外の組成の変化が起きているかを確認した。次に、熱重量分析を行い回収したサンプルの含水率を求め、衝突実験前の二水石膏の含水率との比較から衝突による脱水率を求めた。その後、成分測定の結果と求めた脱水率の比較、考察を行った。また、サンプルの空隙率や弾丸の厚さの違いにより、衝突圧力に対する脱水率に何か傾向や違いが見られるか考察を行った。

XRDによる成分測定の結果、実験後回収したサンプルに二水石膏の脱水反応により生成される半水石膏と無水石膏の存在が確認されたので、衝突により脱水が起こったことが確かめられた。ただし、無水石膏はほとんどの場合でわずかにしか生成されていなかった。また、脱水以外の組成の変化は見られなかった。全てのサンプルにおいて成分測定と熱重量分析の結果のよい一致が見られ、衝突による確かな脱水率が求められた。SUS弾丸で実験を行ったときよりも、同じ直径で厚さがより大きい銅弾丸で実験を行ったときの方が、脱水率が高い傾向が見られた。これは弾丸の厚さの違いからくる圧力継続時間による影響と考えられ、圧力継続時間が脱水率に関係していることが示唆された。脱水率に対する空隙率の影響は見られなかった。本研究では、より天体表面の状態に近い、開放系での衝突脱水実験でデータを得たとともにサンプルの回収方法の問題点や回収できるサンプルの量などの基礎データが得られた。

キーワード：衝突脱水、空隙率

Keywords: impact-induced dehydration, porosity

2次破壊とターゲットの組織が衝突破片の3次元形状に及ぼす影響

Effect of secondary collision and target texture on three-dimensional shape distribution

*門川 隆進¹、土山 明¹、道上 達広²、長谷川 直³、中野 司⁴、上杉 健太郎⁵*Tokiyuki Kadokawa¹, Akira Tsuchiyama¹, Tatsuhiro Michikami², Sunao Hasegawa³, Tsukasa Nakano⁴, Kentaro Uesugi⁵

1.京都大学大学院 理学研究科、2.近畿大学 工学部、3.JAXA、4.産業総合研究所、5.JASRI/SPRing-8

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Kinki University, 3.ISAS/JAXA, 4.AIST, 5.JASRI/SPRing-8

はやぶさ計画やアポロ計画・ルナ計画によって持ち帰られた小惑星イトカワや月のレゴリス粒子の3次元形状（3軸比）の分布[1,2]は、レゴリス粒子の生成条件を反映していると考えられ、イトカワや月がどのような衝突過程を経てきたのかを推測するために、室内高速衝突実験で生成する破片粒子との比較が重要である。これまでの室内実験において、衝突破壊における破片の3次元形状分布は、破片の長軸 a :中間軸 b :短軸 c の比が、分布に広がりはあるものの平均として $2:\sqrt{2}:1$ となるという、特徴的な分布をもつ可能性が指摘されている[3]。しかしながら、これは激しいカタストロフィック破壊によって得られたものであり、より広い条件での検証が必要である。このため、Michikami et al. [4]は、クレータリングからカタストロフィック破壊までの幅広い衝突エネルギー条件での衝突実験を行い、衝突エネルギー密度が低い場合には平均3軸比は必ずしも $2:\sqrt{2}:1$ とはならないことを見出した。しかしながら、このとき3軸比が測定された破片サイズ(>4 mm)はイトカワや月レゴリス粒子のサイズ(20-300 μ m)と比べて大きかった。そこで、我々は同じ実験で得られたレゴリス粒子サイズに対応する破片の3軸比測定を行い、(1)破片の3軸比はサイズ依存性を持ち、(2)レゴリス粒子サイズ破片の平均3軸比は衝突エネルギー密度によらずほぼ $2:\sqrt{2}:1$ となり、イトカワ粒子の3次元分布と区別できないことを示した[5]。しかしながら、この研究では衝突破片に対する2次破壊やターゲットの岩石組織の破片形状に対する影響が評価されておらず、レゴリス粒子との比較に至っていない。

本研究では、これらの影響を明らかにし、室内での高速衝突実験が宇宙空間での衝突を模擬できているか検証するために追加の衝突実験を行なった。衝突実験は、JAXA宇宙科学研究所の2段式水素ガス銃を用いた。ターゲットは玄武岩、かんらん岩、普通コンドライト隕石(L4/5)、鉛ガラス(所謂クリスタルガラス)を採用し、弾丸はナイロン球(直径7.14mm)とアルミナ球(1mm)の2種類を約1.6-7.0km/s の速度範囲で衝突させた。回収した破片のうち、①エアロゲルで捕獲した2次破壊を防いでいると思われる破片、②衝撃吸収材の表面に軽く乗っていた破片の2種類で微小なもの(約30 μ m-600 μ m)について、SPRing-8のマイクロX線CTを用いてその3軸長を測定し、それらの3次元形状分布についてK-S(Kolmogorov-Smirnov test)検定を用いて比較をした。破片粒子の3次元形状分布の測定結果からは、以下のことが明らかになった。(1)同じ衝突条件の実験において、エアロゲルで捕獲した破片の形状分布や平均3軸比は衝撃吸収材の表面に軽く乗っていた破片と有意に区別できない。よって、門川ら[5]で測定された粒子は2次破壊の影響を受けていない、もしくは2次破壊がレゴリス粒子サイズでの破片の形状に及ぼす影響は小さい。(2)玄武岩の破片形状分布は鉱物の集合体(岩石)であるかんらん岩・コンドライト隕石の破片形状分布とは有意に区別できないが、均質な物質であるガラスとは有意に区別できた。よって、玄武岩での室内衝突実験は宇宙空間での衝突を模擬していると考えられる。これらは、門川ら[5]の測定結果がイトカワや月のレゴリス粒子に適応できるということを意味している。彼らの結果を用いてイトカワ粒子と比較すると、イトカワ粒子は衝突破壊によってできたと考えて矛盾はないが、その3次元形状からその衝突条件は推定できないことがわかった。また月粒子については単純な衝突破片に比べて平均3軸比がやや1に近く、レゴリスでのガーデニングの影響を受けていると推測できることがいえる。

[1] Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333, 1125-1128. [2] 櫻間ら(2015) 日本地球惑星科学連合大会予稿集 PPS23-P10. [3] Fujiwara et al. (1978) Nature, 272, 602-603. [4] Michikami et al. (2015) Icarus, 264, 316-330. [5] 門川ら(2015) 日本惑星科学秋季講演会予稿集 04-05.

岩石天体の衝突破壊に対する斜め衝突の効果

Effects of oblique impacts on catastrophic disruption of rocky bodies simulated by quartz glass

吉田 優作¹、*荒川 政彦¹、保井 みなみ¹、小川 和律¹、岡本 千里¹

Yuu-saku Yoshida¹, *Masahiko Arakawa¹, Minami Yasui¹, Kazunori Ogawa¹, Chisato Okamoto¹

1.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kobe University

Planetary collisional process is one of the most important physical processes in the solar system, especially for the planetary formation process in the solar nebulae. Because of the importance of the physical process and the implications for the origin of asteroids and other small bodies, impact disruption experiments have been conducted for several decades, and rocky materials such as basalt and glass etc. were used for these impact experiments. Then, the impact strength defined by the specific energy (Q) necessary for the catastrophic disruption was obtained for these rocky materials, and most of the impact experiments were conducted by head-on collisions, so that the impact strength was usually applicable only for the head-on collision. However, collisions among planetary bodies are well known to be not only head-on collision but also oblique collision, and actually the impact angle of 45 degrees is the most probable impact angle in the solar system. Therefore, it is necessary to study the impact strength for the oblique impact and to clarify the effect of oblique impact on the collisional disruption of rocky bodies.

In this study, we conducted the impact experiments of quartz glass at the impact angle from 90 (head-on collision) to 0 (glancing impact) degrees, and studied the effect of oblique impacts on the degree of disruption and the ejection velocity of the ejecta fragments. We used quartz glass spheres with the size of 5cm and 8cm for the target, and a polycarbonate spherical projectile with the size of 4.75mm was launched at the impact velocity from 2 to 6km/s. The oblique impact was made at 15 to 90 degrees at 4.3km/s under the vacuum condition of 20Pa. After the impact, all the impact fragments were recovered to measure each weight in order to construct the size distribution of these fragments.

We found that the largest fragment mass was almost constant at the impact angle from 90 to 60 degrees, and it suddenly decreased from 60 to 45 degrees for the 5cm target, and then gradually increased up to 15 degrees: the largest fragment mass at 45 degrees was one order of magnitude larger than that obtained from the impact between 90 and 60 degrees. Although the impact strength could be strongly affected by the impact angle at the high obliquity smaller than 45 degrees, the modified specific energy (Q_c) defined by the normal component of the impact velocity on the impact surface was an appropriate parameter to scale the impact angle on the degree of the impact disruption, then the impact strength (Q^*) could be refined by using this modified specific energy, Q_c : The obtained impact strength defined by Q_c including the oblique impacts is 1110 J/kg for the quartz glass. We also found a very unique feature on the quartz glass during the disruption, that is, the severe disruption and high velocity ejecta was discovered at the antipodal region. The mass of disrupted fragments originated from the antipodal region was almost same as that was originated from the cratered region near the impact site. This might be caused by the severe concentration of the shock wave at the antipodal region and it would be reflected on the free surface with the perfectly spherical shape of the quartz glass. But, further research would be necessary to understand this unique features discovered at the antipode.

キーワード：カタストロフィック破壊、斜め衝突、衝突破壊強度

Keywords: catastrophic disruption, oblique impact, impact strength

石英の衝撃誘起ガラス化とカソードルミネッセンスの系統的变化：新しい衝撃圧力計としての可能性 Shock induced vitrification, defect generation, and change in cathodoluminescence of quartz: possibility as a new shock barometer

*常 ユイ¹、鹿山 雅裕²、田近 英一³、関根 康人¹、関根 利守⁴、西戸 裕嗣⁵、小林 敬道⁶

*Yu Chang¹, Masahiro KAYAMA², Eiichi Tajika³, Yasuhito Sekine¹, Toshimori Sekine⁴, Hirotsugu Nishido⁵, Takamichi Kobayashi⁶

1.東大 理 地惑、2.神戸大 理 惑星学、3.東大 新領域 複雑理工、4.広島大 理 地惑、5.岡山理科大 自然科学研究所、6.物質材料研究機構

1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2.Planetology, Kobe Univ., 3.Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, 4.Earth & Planetary Sci., Hiroshima Univ., 5.Research Institute of Natural Science, Okayama Univ. of Science., 6.National Institute for Material Science (NIMS)

Impact cratering is a ubiquitous process on both terrestrial planets and small bodies in the solar system. Researches for impact craters on the Earth provide a valuable opportunity to constrain planetary-scale impact event. In particular, reconstruction of shock pressure recorded in the shock-metamorphosed minerals leads to a clue to understand a partition of the impact energy and cratering mechanism on Earth.

Quartz, which is one of the most abundant and widely distributed rock-forming mineral on the Earth's crust, has been widely used to evaluate shock pressure on the impactite. However, the conventional shock estimations based on the mineralogical features of quartz, such as PDFs, are no more than a qualitative approach, hence it is required for more detailed evaluation of shock pressure to develop new advanced method using quartz.

Recently, we found the drastic change in cathodoluminescence (CL) features of quartz due to shock metamorphism [1]. The blue emission intensity (450-460 nm) of shocked quartz increases drastically with the experimentally induced pressure and reaches up to 100 times as large as that of the starting materials. On the other hand, CL intensity around 630 nm changes less than 3 times in spite of the pressure increase. Therefore, the relationship between shock pressure and blue CL intensity could be used as a new shock barometer. The mechanism for the increase in the blue CL intensity, however, still remains unclear because of a lack of information on structural defect in shocked quartz. In this study, Raman spectroscopy and EBSD analysis were conducted for the experimentally shock-induced quartz to clarify the structural change and generation of misorientations with the pressure. Consequently, we elucidated the CL mechanism of shocked quartz by comparison with the obtained Raman and EBSD data.

Raman spectra of the shocked quartz show a weakening of the main peak at $\sim 464\text{ cm}^{-1}$ with pressure increase. At 30 GPa, the new peak at $\sim 495\text{ cm}^{-1}$ appears, indicating the generation of shock-densified silica glass [2]. EBSD mapping revealed that shocked quartz undergo high pressure ($\sim 20\text{ GPa}$) has high-density domains with boundary misorientation dominated by 60° , suggesting the development of Dauphiné twinning. However, for the quartz undergo pressure over 30 GPa, EBSD diffraction pattern was unrecognized because of low crystallinity. Therefore, the blue CL emission is closely related to Dauphiné twin, but this phenomenon is limited to the pressure lower than 30 GPa. On the other hand, the destruction of crystal structure and generation of high-density silica glass are consistent with the continuous increase in CL intensity of blue emission with pressure increase. These facts indicate a spectral change depending on the extent of vitrification. The relationship between CL intensity and the possibility as a new shock barometer will be also discussed.

- [1] Chang et al., (2015) JpGU Meeting, PPS22-19.
- [2] Okuno et al., (1999) PCM, 26, 304-311.

キーワード：衝撃変成作用、衝撃変成石英、カソードルミネッセンス、顕微ラマン分光、電子後方散乱回折

Keywords: shock metamorphism, shocked quartz, cathodoluminescence, micro-Raman spectroscopy, EBSD

チェリャビンスク大火球の発光メカニズム

Radiation mechanism of the Chelyabinsk superbolide

*柳澤 正久¹*Masahisa Yanagisawa¹

1.電気通信大学情報理工学研究科

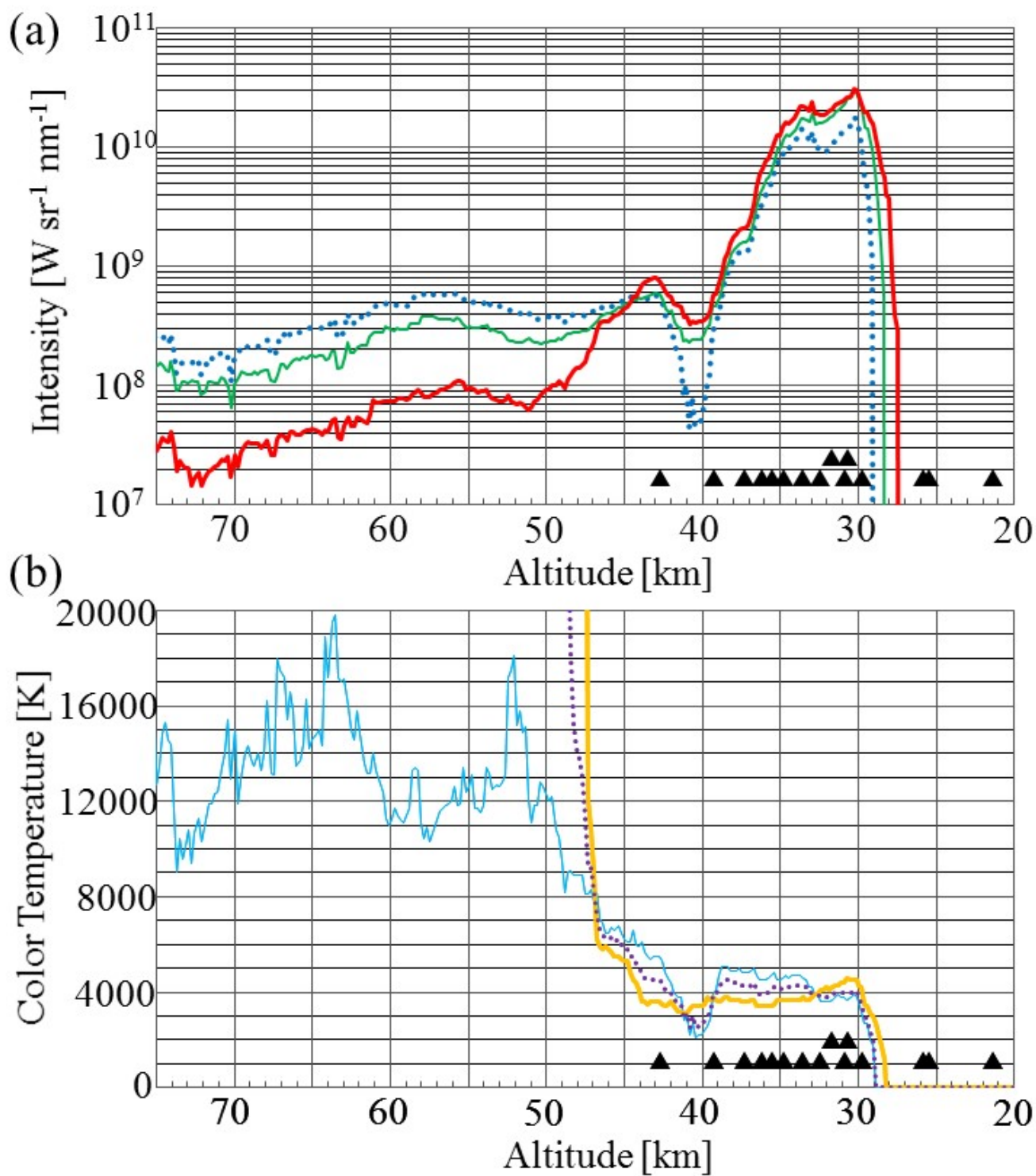
1.The University of Electro-Communications

2013 年2 月15 日3 時20 分(世界時) にロシア南西部の都市チェリャビンスク(Chelyabinsk) 近郊で観測されたチェリャビンスク火球の爆発規模はTNT 爆薬500 kton 相当で($1 \text{ kton} = 4.2 \times 10^{12} \text{ J}$)、同じく天体衝突が原因と考えられている1908 年のツングースカ爆発(約2000 kton) に次ぐ大きさだった。アポロ型小惑星の軌道を持つLL5 コンドライト組成のメテオロイドの地球大気との衝突が原因だった。我々は、車載カメラによって撮影された動画を解析し、火球のRGB(赤、緑、青) の各バンドでの明るさの時間変化を調べた(Fig. 1)。そしてバンド間での明るさの比が黒体放射で説明できるかどうかを検討した。なお、このカメラでは、非常に強い光が入射した場合に、像が真白に飽和するのではなく、逆に黒くなるというCMOS イメージセンサ特有の性質が十分補正されていない。そのため、火球の最も明るい部分が暗い像として浮かび上がっており、その形状を知ることができた。結果は次のようにまとめることができる：(a) 光エネルギーの90%は、高度47 km で始まったメテオロイドの分裂に伴う1-2 秒間のフレア(光度が急激に増大する現象) で放出された；(b) 高度47 km 以上での放射は、黒体放射ではなかった；(c) フレア時のスペクトルは約4000 K の黒体放射と矛盾しない；(d) 放射領域は、最も明るい時には直径1 km、長さ7 km に及んだ。結果(c)(d) は高度80 km 以上での流星の発光とは異なる。流星では線スペクトルが卓越しており、また、主な発光領域の長さは直径に比べて2 倍程度である。低高度(47 km 以下) でのメテオロイドの分裂がその発光特性に大きな影響を与えたようである。なお、以上の結果の詳細については以下を参照されたい。M. Yanagisawa, Radiative characteristics of the Chelyabinsk superbolide, Planetary and Space Science., 118C, 79-89, 2015.

Figure 1. (a) Bandpass photometric intensities for the Chelyabinsk bolide plotted as functions of the bolide altitude. The thick, thin, and dotted lines respectively show the intensities in the R, G, and B bands. The black triangles indicate the altitudes at which meteor fragmentation occurred, with the upper two triangles corresponding to severe fragmentation events. (b) Color temperatures for the bolide as functions of altitude. The thick, thin, and dotted lines show the temperatures based on the R/G, G/B, and R/B intensity ratios, respectively. The error is expected to be about $\pm 400 \text{ K}$.

キーワード：チェリャビンスク、大火球、火球、流星、メテオロイド、自然災害

Keywords: Chelyabinsk, bolide, fireball, meteor, meteoroid, hazard



巨大惑星による小天体の捕獲

Capture of small bodies by a giant planet

*樋口 有理可¹、井田 茂²*Arika Higuchi¹, Shigeru Ida²

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, Tokyo Institute of Technology

We have investigated the dependence of the prograde/retrograde temporary capture of asteroids by a planet on their original heliocentric semimajor axes through analytical arguments and numerical orbital integrations in order to discuss the origins of irregular satellites of giant planets. We found that capture is mostly retrograde for the asteroids near the planetary orbit and is prograde for those from further orbits. An analytical investigation reveals the intrinsic dynamics of these dependences and gives boundary semimajor axes for the change in prograde/retrograde capture. The numerical calculations support the idea of deriving the analytical formulae and confirm their dependence. Our numerical results show that the capture probability is much higher for bodies from the inner region than for outer ones. These results imply that retrograde irregular satellites of Jupiter are most likely to be captured bodies from the nearby orbits of Jupiter that may have the same origin as Trojan asteroids, while prograde irregular satellites originate from far inner regions such as the main-belt asteroid region.

キーワード：不規則衛星、小天体

Keywords: irregular satellites, small bodies

ガス抵抗による微惑星捕獲

Capture of planetesimals by gas drag

*末次 竜¹、大槻 圭史¹*Ryo Suetsugu¹, Keiji Ohtsuki¹

1.神戸大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Kobe University

巨大惑星の周りには数多くの衛星があり、これらは規則衛星と不規則衛星に分類できる。規則衛星は惑星近傍でほぼ円軌道で公転していることから、周惑星円盤内で固体が集積することで形成されたと考えられている。一方、不規則衛星の軌道は楕円で、逆行方向に公転しているものもあるため、捕獲された微惑星が起源だと考えられている。

近年、周惑星円盤への固体物質の供給過程が詳しく調べられた。その結果、従来の規則衛星の形成モデルでは考慮されていなかった微惑星も、周惑星円盤通過時のガス抵抗によって捕獲され、円盤に衛星の材料物質として供給されることが明らかになった(Fujita et al. 2013, Tanigawa et al. 2014)。先行研究では周惑星円盤の散逸過程は考慮していなかったが、実際には原始惑星系円盤の散逸やギャップ形成によるガス供給の減少によって散逸したと考えられる。こうした惑星形成終了直前でのガス密度の低い周惑星円盤によって捕獲された微惑星が不規則衛星になった可能性がある(Cuk & Burns 2004)。しかしながら、弱いガス抵抗による微惑星捕獲過程は不明な点が多い。そこで本研究では、軌道計算を用いて周惑星円盤の散逸過程を考慮した微惑星の捕獲について調べた。

ガス抵抗が弱い場合、微惑星は一回の近接遭遇で大きくエネルギーを失い捕獲されるのではなく、惑星周りを一時的に公転している間に次第にエネルギーを失い、捕獲されることが明らかとなった。こうした捕獲は微惑星の惑星周りの公転方向が順行でも逆行の場合でも起こる。また周惑星円盤の散逸の効果を考慮した場合、円盤の散逸時間が長いほどガス抵抗を受けている時間が長いため、離心率や軌道傾斜角が小さくなる傾向があることがわかった。不規則衛星の軌道要素と比較した場合、順行の不規則衛星の軌道長半径の分布と数値計算結果は合ったが、逆行の場合は観測値よりも小さな軌道長半径をもつものが大半であった。そのため、三体相互作用といった他の捕獲過程が必要だと考えられる。

一方、火星の規則衛星の起源についても火星の原始大気からのガス抵抗による微惑星捕獲が寄与した可能性がある。そこで球対称のガスによる微惑星の捕獲及び軌道進化についても調べた。その結果、球対称の大気からのガス抵抗による捕獲の場合でも、周惑星円盤の場合と同様の一時捕獲を経由した捕獲過程によって、微惑星が捕獲されうることが明らかにした。

キーワード：惑星、衛星、微惑星

Keywords: Planet, Satellite, Planetesimal

円盤形成段階における微惑星形成の可能性

Possibility of Planetesimal Formation in Disk Formation Stage

*本間 謙二¹、中本 泰史¹*Kenji Homma¹, Taishi Nakamoto¹

1. 東京工業大学地球惑星科学専攻

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

微惑星は惑星の元となる天体であり、微惑星が形成される条件を考えることは、現在の太陽系の成り立ちや系外の惑星系の理解のためにも非常に重要な事である。微惑星は、原始惑星円盤内の μm サイズの固体微粒子（ダスト）が合体成長し km サイズまで成長し形成されると考えられるが、その過程には様々な困難がある。中でもメートルサイズのダストがガス円盤中でガスによる抵抗力を受け、角運動量を失って中心星へ落下してしまう中心星落下問題は深刻な問題である。

一方、空隙率の大きいダストアグリゲイトは中心星への落下を回避しうることが示唆されている。高空隙率な氷ダストアグリゲイトは、最小質量円盤モデルでは10AUよりも内側の領域で、直接合体成長により微惑星サイズへ成長可能であることが示されている(Okuzumi et al. 2012)が、このような円盤モデルではガス円盤の時間進化は考慮されていない。ダストの合体成長がどのようなタイミングで開始するのかは円盤の状態に依存するので、実際の微惑星形成を考える場合は、円盤の時間進化とダストの合体成長を同時に考える必要がある。本研究では、円盤の形成とダストの合体成長が同時に起きているという状況を考え、分子雲コアの崩壊から円盤の粘性進化を含めた一次元の円盤モデルを用いて計算を行った。その際、内部密度進化を考慮した氷ダストの合体成長計算を行い、微惑星サイズへと合体成長可能な条件を調べた。その結果、微惑星サイズへと合体成長可能なのは、比較的大きな角速度を持つ分子雲から形成され、なおかつ粘性の小さい円盤の場合であることがわかった。この場合は、氷ダストが中心星へ落下するようなサイズになる前に、十分な空間密度の氷ダストがスノーライン外側に供給されるからである。またこの結果は、そのような円盤であれば、微惑星は分子雲コアの崩壊から数十万年で形成される可能性を示唆している。

周惑星ガス円盤中での微惑星軌道進化

Orbital evolution of planetesimals in circumplanetary gas disks

*川村 浩司¹、大槻 圭史¹、末次 竜¹*Hiroshi Kawamura¹, Keiji Ohtsuki¹, Ryo Suetsugu¹

1.神戸大学

1.Kobe University

質量の十分大きなガス惑星はその形成過程の後期において、原始惑星円盤からガスと固体を重力により捕獲することで周惑星円盤を形成する。巨大惑星の周りには規則衛星が確認されているが、それら規則衛星の公転軌道はほぼ順行の円軌道に近く、中心惑星の赤道面にそろっているため、周惑星円盤の中で固体粒子が衝突合体を繰り返すことにより集積して形成されたと考えられている。太陽系内の衛星の全質量のうち殆どは規則衛星が占めているため、衛星系を理解する上で規則衛星の形成過程を理解することは重要となってくる。従来の研究(Shimizu & Ohtsuki、投稿準備中)では微惑星をテスト粒子とした三体計算により原始衛星を含んだ周惑星円盤中の微惑星の速度進化を調べていたが、微惑星の質量が大きい場合、原始衛星の平均運動共鳴に捕まるため微惑星同士の相互重力や衝突の効果が重要となる可能性がある。例えば、微惑星同士の衝突合体により微惑星の質量が変化し、共鳴捕獲から逃れうる。本研究では微惑星間の相互重力を考慮したN 体シミュレーションを用いて原始衛星が存在する周惑星円盤内での微惑星の軌道進化を調べ、その結果について議論する。

キーワード：衛星形成

Keywords: Satellite formation

原始惑星系円盤のダスト沈殿層におけるストリーミング不安定性

Streaming instability in the dust layer of a protoplanetary disk

*長谷川 稜¹*ryo hasegawa¹

1. 東京大学大学院理学系研究科

1. graduate school of science the university of tokyo

原始惑星系円盤において、固体微粒子のダストから成る微惑星の形成過程は、相反する2つのモデルが存在する。

その内の一つは、円盤中心面へのダスト沈殿が進むと、ダスト層が自己重力不安定を起こして、キロメートル・サイズの微惑星が形成されるというものである。重力不安定が生じるためには、ダストの密度が重力不安定の臨界密度を超える必要がある。

本研究では、動径方向のガスとダストの速度差から生じるダスト沈殿層でのストリーミング不安定性(Johansen & Youdin 2007)に注目し、ダストガス比が ~ 1 の薄いダスト層において、密度擾乱により実現される最大ダスト密度を調べた。

原始惑星系円盤での鉛直方向拡散によるダストアグリゲイトの焼結

Sintering of icy dust aggregates by vertical diffusion in a protoplanetary disk

*児玉 季里子¹、城野 信一¹*Kiriko Kodama¹, Sin-iti Sirono¹

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。本研究では氷ダスト微粒子に注目する。氷ダストアグリゲイトは加熱されると焼結する。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る。氷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焼結により成長する。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)では赤道面の温度分布から焼結に必要なタイムスケールが示されている。しかし、氷ダストアグリゲイトが鉛直方向に運動している場合での焼結タイムスケールはまだ研究されていない。そこで本研究では、数値シミュレーションによりダストアグリゲイトの鉛直方向の運動を算出し、焼結に必要な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。この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。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の領域に行くと、付着成長に影響するまで焼結する。数値シミュレーションで高温になる高さ以上を経験した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。

一定時間が経つと、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で決まる。分布が定常状態でも、各ダストアグリゲイトは円盤内の鉛直方向を上下に動き、高温になる高さまでいくと焼結する。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。この結果をフィッティングすると、 $1 - \exp(-t/b)$ でよく近似できることがわかった。ここで t は時間で b は焼結タイムスケールである。焼結タイムスケールは高温になる高さが減少するにつれ短くなる。また、焼結タイムスケールは拡散タイムスケールで決まり、ダストアグリゲイトのサイズには依存せず、乱流の強さのみに依存することがわかった。一方で、円盤表面の高温領域までの距離はダストアグリゲイトのサイズに依存している。成長によりダストアグリゲイトが沈殿すると、高温領域までの距離は短くなる。そのため、ダストアグリゲイトがあるサイズまで成長すると、鉛直方向拡散による焼結が起こる。ここから焼結によってダストアグリゲイトの成長が阻害されることが期待される。

キーワード：原始惑星系円盤、ダストアグリゲイト、焼結、乱流、拡散

Keywords: protoplanetary disk, dust aggregates, sintering, turbulence, diffusion

ペブル集積による地球型惑星への水供給

Water Delivery to Terrestrial Planets by Pebble Accretion

*山村 武¹、井田 茂¹*Takeru Yamamura¹, Shigeru Ida¹

1.東京工業大学地球理工学研究科惑星科学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

The Earth would contain water of 0.023wt%-1wt% on the surface(ocean) and in the interior. It is observationally suggested that early Mars and early Venus had water. In particular, the water fraction of the early Mars may be comparable to that of the current Earth. Based on this information, we have investigated the water fraction of the Earth, Mars, Venus, and Mercury delivered by pebble accretion which is actively discussed today, numerically calculating the growth and inward migration of icy pebbles.

It is suggested that the snow line once migrated down to ~0.7AU. Then, the terrestrial embryo gained water components from capturing migrating icy pebbles from outer parts of the protoplanetary disk. Because icy components have been subtracted in the outer disk, the gas in the terrestrial planet region should have been 'dry'.

Using this model, Sato et al. (2016) calculated the amount of water delivered to the Earth by icy pebble accretion and showed that a relatively small disk, strong turbulence, late passage of the snow line at 1AU are required to be consistent with the inferred water content of the current Earth. We have generalized their simulation to a system of multiple planets (Earth, Mars, Venus and Mercury). While we used the same model of migration and formation of dust grains as Sato et al. (2016), we included decrease in pebble mass flux due to accretion by each planet. We found that the final water fraction of individual planets is directly determined by total amount of solid materials remaining in the disk. As long as the snow line passage timing at the individual planetary orbits is the same for all the planets, the final water fraction of individual planets should be similar to one another, while the amount of the water fraction depends on disk size, strength of turbulence, the timing of the snow line passage.

キーワード：ペブル、水、惑星

Keywords: pebble, water, planet

全球大循環モデルを用いた濃厚二酸化炭素大気における火星古気候シミュレーション Simulation of the early Martian climate with denser CO₂ atmosphere using a general circulation model

*鎌田 有紘¹、黒田 剛史¹、笠羽 康正¹、寺田 直樹¹

*Arihiro Kamada¹, Takeshi Kuroda¹, Yasumasa Kasaba¹, Naoki Terada¹

1.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohoku University

現在の火星表面には、液体が流れた跡と考えられる地形が数多く発見されている。これが液体の水によるという前提のもと、太古の火星は温暖環境であったと考えられてきた。しかし、38億年程度前、すなわち太陽日射量を現在の75%としたより高圧の二酸化炭素大気を想定した火星大気大循環モデル[Forget et al., 2013]では、地表面気圧を7気圧程度まで上げてても地表温度は最高250K程度に留まり、水の融点に達しない。

我々は、太古の火星大気環境の再現を狙い、火星大気大循環モデルDRAMATIC MGCM [e.g., Kuroda et al., 2005]を援用した同様のシミュレーションを試みた。初期試行として、まず純粋CO₂大気を想定し、全球平均地表面気圧を0.1~5.1気圧の間で設定したシミュレーションを行った。Forget et al. [2013]と同様に火星の自転軸傾斜・離心率は現在と同じとし、またForget et al. [2013]では考慮していない非常に弱い(光学的厚さ0.01)ダストの放射効果を取り入れた。日射量は約38億年前の火星環境を想定して現在の75%とした。Forget et al. [2013]で導入されたCO₂氷雲の放射効果は、まだ導入していない。

CO₂平均大気圧が1気圧未満の場合、全球平均地表面温度は放射平衡温度である192Kにほぼ等しくなった。これは、太陽光強度がより弱い環境下では現在よりも寒冷化し、15μm帯CO₂赤外吸収帯による温室効果が働きにくくなることを意味する。また、CO₂平均大気圧が1気圧以上の場合、全球平均地表面温度は気圧とともに上昇して昇華温度に近くなり、全球的な温度分布でも昇華点近傍(200-210K)の緯度領域が広がった。これは、昇華・凝結によって生じる潜熱が温度の安定化をもたらしているためと考えられる。ただしForget et al.

[2013]では、平均地表面温度が我々の今回結果に比べてCO₂平均大気圧が2-3気圧の時に約30K高くなり、その後は気圧とともに差は縮まっていき、5気圧でほぼ一致した。この相違の理由は2つ考えられる。1つ目は、我々のモデルに含まれないCO₂氷雲の影響である。我々のモデル結果ではCO₂平均大気圧3気圧以下においてCO₂氷雲量が気圧とともに増大しており(3気圧以上ではほぼ一定)、光学的に厚くなることで極域赤外放射の吸収によるより大きな温室効果が生じることが考えられる。2つ目は、地表面アルベドの影響である。Forget et al. [2013]と我々のGCMではCO₂積雪がある場所のアルベドの値が異なり(Forget et al. [2013]では0.5なのに対し我々のGCMでは0.65)、この影響により積雪域の面積が拡大した2-3気圧において、我々の結果では地表面温度が低温となったことが考えられる。

キーワード：火星、古気候、大気大循環モデル

Keywords: Mars, Paleoclimate, General circulation model

隕石重爆撃による大気・海洋量の進化

Erosion and Replenishment of Atmosphere and Ocean on Earth during Heavy Bombardment

*小佐々 唯¹、玄田 英典²、黒川 宏之²、井田 茂^{1,2}*Yui Kozasa¹, Hidenori Genda², Hiroyuki Kurokawa², Shigeru Ida^{1,2}

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

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

地球は、巨大衝突が完了した後にも、小惑星や彗星のような小天体の衝突を多く経験したと考えられている。この小天体の衝突は、大気が宇宙空間に散逸する大気はぎ取りや、逆に小天体内の揮発性成分が地球にもたらされる供給を引き起こす。小天体の衝突は地球形成直後の時期に集中していることが想定され、さらに初期の地球で既に海が存在している可能性(Wilde et al., 2001)がある。そこで、本研究ではこの隕石重爆撃による地球の大気量・海水量への影響を明らかにすることを目的として研究を行った。さらに、この過程が地球の高いH/C(Hirschmann & Dasgupta, 2009)や、ハロゲンの枯渇(Sharp & Draper, 2013)に寄与した可能性についても考察を行った。

天体の衝突による大気のはぎ取りに関する理論的・数値的な研究はいくつか行われており(Svetsov, 2000; 2007, Shuvalov 2009; 2014)、これらの先行研究では天体が惑星に衝突するときに、はぎ取られる惑星大気や地面の質量を解析的な計算や数値計算で求め、衝突天体サイズ、衝突速度、大気圧などのパラメータへの依存性を示している。また、de Niem et al. (2012)では、Svetsov (2000)の大気はぎ取りモデルを用いて、38億年前頃に起きたとされる後期重爆撃での大気のはぎ取りと供給の計算をMonte Carlo法を用いて計算している。地球質量のおよそ0.01%までの隕石を降らせ、結果として、大気はぎ取りよりも揮発性元素の供給が上回り大気圧が上昇することを示している。しかし、大気はぎ取りモデルに対する結果の依存性や、海水量の進化については調べられていない。

そこで本研究では、先行研究で示された1回の衝突による大気はぎ取りモデル(Svetsov 2000, 2007; Shuvalov 2009, 2014)と衝突天体のサイズ分布・速度分布に関するMonte Carlo計算を用いて、隕石重爆撃による大気と海の進化を同時に計算した。地球に降ってくる天体の総量として隕石重爆撃期の衝突天体の総量である地球質量の1%を仮定した。海のはぎ取りに関しては、Shuvalov (2009)の地面はぎ取りのモデルを用いた。衝突天体のサイズ分布としては、現在観測されている小惑星帯の小惑星のサイズ分布を用い、衝突速度に関しては、小惑星が地球に衝突する際の衝突速度を計算したモデル速度分布を用いた。揮発性成分については、3通りの値で別々に計算を行った。

結果として、Svetsov (2000, 2007)のモデルでは大気は多くはぎ取られ、初期大気圧に関わらず、大気圧は一定値に収束する傾向が見られた。収束する値は衝突天体内の揮発性成分の量に依存した。しかしShuvalov (2014)では大気のはぎ取りはあまり起きず、大気量の進化は大気はぎ取りモデルに大きく依存することが明らかとなった。また、海のはぎ取りに用いたShuvalov (2009)の地面はぎ取りモデルは大気圧に依存するが、今回の計算では結果として海水量の進化に対する大気圧の影響は小さかった。大気のはぎ取りと比較して海のはぎ取りの効率は低いことから、最終的な海水量は初期海水量と衝突天体の含水率に依存するという結果が得られた。

本研究のSvetsov (2000, 2007)モデルを用いた結果では、海よりも大気のはぎ取りが効率よく起こっているのので、隕石衝突によって地球のH/Cが増加する可能性が示された。また、原始大気が多くはぎ取られることから、H-Heの円盤ガスを原始大気として地球が獲得していた(Ikoma & Genda 2006)としても、隕石重爆撃によるはぎ取りで0.0001~10%しか残らない可能性がある。さらに、今回のモデルでは初期海洋のうちはぎ取られた割合は20%程度であったことから、隕石重爆が少なくとも部分的には地球のハロゲンの枯渇に寄与している可能性がある。

キーワード：隕石重爆撃、大気散逸、海散逸

Keywords: heavy bombardment, atmospheric erosion, oceanic erosion

異なる中心星及び軌道条件における仮想地球の気候進化トラック

The evolutionary climatic track of the hypothetical Earth with different conditions of central star and semi-major axis

*門屋 辰太郎¹、田近 英一²

*Shintaro Kadoya¹, Eiichi Tajika²

1.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2.東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻

1.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2.Department of Complexity Science and Engineering, The University of Tokyo

The climate of the Earth is affected strongly by the insolation from the Sun and also by the amount of greenhouse gasses, especially CO₂, in the atmosphere. The former depends on the mass and age of the central star, and the semi-major axis of the planet, while the latter depends on the degassing rate of CO₂, which, in turn, depends on the thermal evolution of the planetary interiors. Thus, the climate of the Earth may be controlled both by the evolution of the planetary interior and the evolution of the host star. It is however unknown how the climate of planet could evolve if the central star and semi-major axes are different from those of the Earth today. In this study, we examine the climatic evolution of the Earth with different conditions of host stars and orbital semi-major axes.

We use a one-dimensional energy balance model coupled with a carbon cycle model to estimate the climate, a parameterized convection model coupled with a mantle degassing model to estimate the evolution of the CO₂ degassing rate, and a standard evolution model of the Sun with a relationship between mass and lifetime of main sequence stars to estimate the evolution of luminosity of the central star.

We found that, while the climate of the Earth orbiting at the inner region of the habitable zone (HZ) becomes hot owing to the increase in the luminosity of the central star, the climate of the Earth orbiting at the outer region of the HZ becomes cold because the CO₂ degassing rate of the Earth decreases with time. In particular, the Earth orbiting at the outer region of the HZ becomes the snowball climate mode after 3 Gyr, irrespective of the mass of the central star. This timescale depends mainly on the planetary parameters, such as the land fraction and land distribution. Thus, the lifetime of the habitability of the planets orbiting at the outer region of HZ is controlled largely by the evolution of the planetary interiors rather than the stellar evolution. This is essentially because the greenhouse effect of CO₂ is necessary for the planets orbiting even in the HZ to have a warm and wet climate.

キーワード：炭素循環

Keywords: Carbonate-silicate geochemical cycle