

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¹、鎌田 俊一²、松本 晃治³、押上 祥子⁸、並木 則行³、倉本 圭²、佐々木 晶¹、塩谷 圭吾⁴、小林 正規⁵、小林 進悟⁶、荒木 博志³、野田 寛大³、石橋 高⁵、斎藤 義文⁴、Husmann Hauke⁷、Lingenauber Kay⁷

*Jun Kimura¹, Shunichi Kamata², Koji Matsumoto³, Shoko Oshigami⁸, Noriyuki Namiki³, Kiyoshi Kuramoto², Sho Sasaki¹, Keigo Enya⁴, Masanori Kobayashi⁵, Shingo Kobayashi⁶, Hiroshi Araki³, Hirotomo Noda³, Ko Ishibashi⁵, Yoshifumi Saito⁴, Hauke Husmann⁷, Kay Lingenauber⁷

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¹、藤 浩明²

*Takaaki Katsura¹, Hiroaki TOH²

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¹、中村 昭子¹、和田 浩二²

*Kinoshita Toshiki¹, Akiko Nakamura¹, Koji Wada²

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

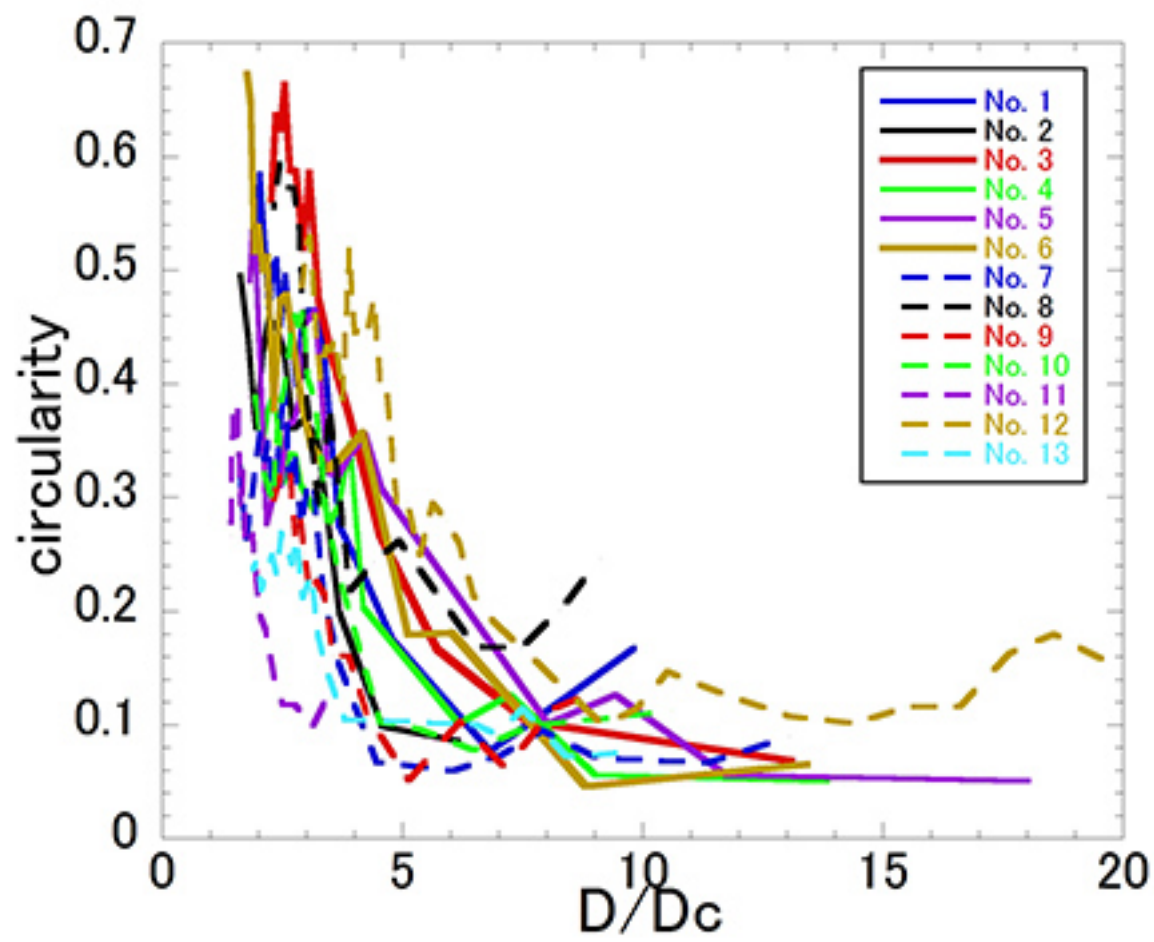
クレーターの直径から得られる衝突天体にかかわる情報は速度、密度、半径が一体となった結合変数Cという形以上に分解することができない(Holsapple and Schmidt, 1987)。当研究ではクレーター放出物（光条線エジェクタとcontinuous ejecta）の空間的広がりから衝突天体が持っていたと予測できるパラメーターを制限するのが可能であるかを検証するため、これらを定量化することを考える。

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¹、太田 直哉¹、尾川 順子²

*Junpei Ohyama¹, Naoya Ohta¹, Naoko Ogawa²

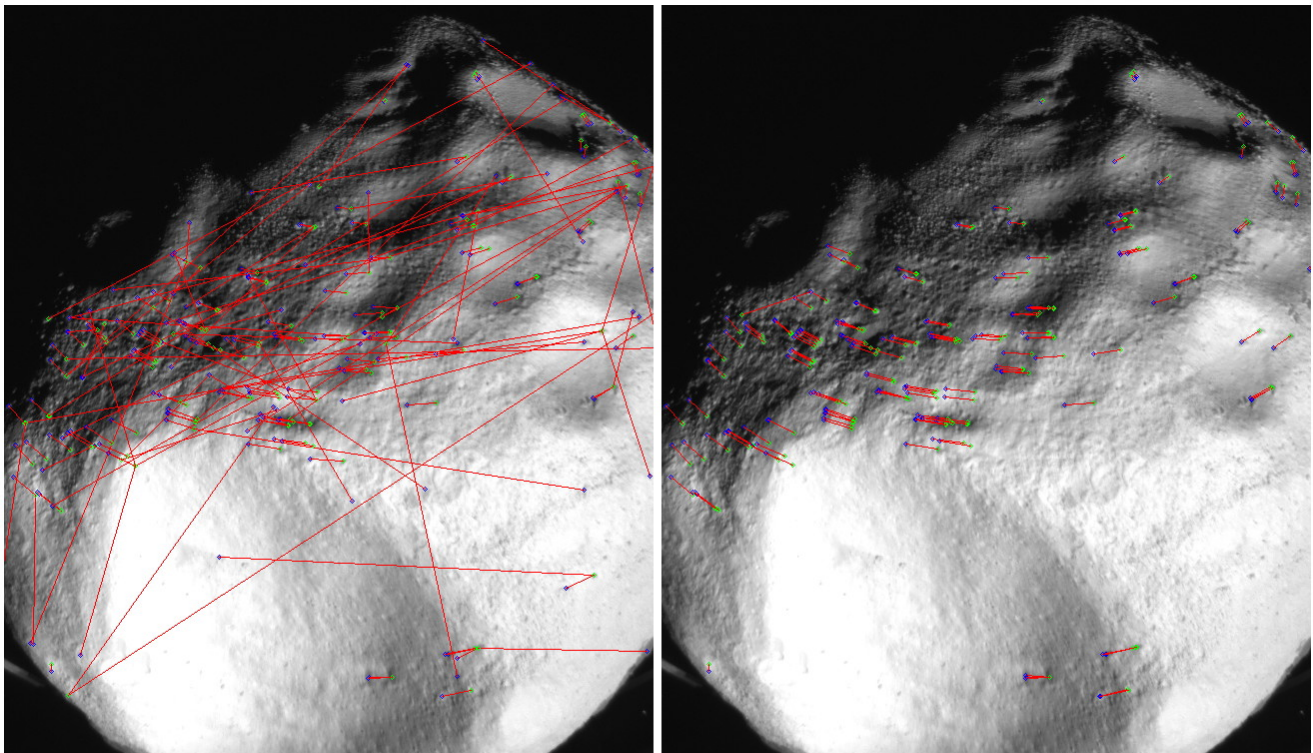
1. 群馬大学、2. 宇宙航空研究開発機構

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モデル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¹、太田 直哉¹、尾川 順子²

*Hiroki Yamaguchi¹, Naoya Ohta¹, Naoko Ogawa²

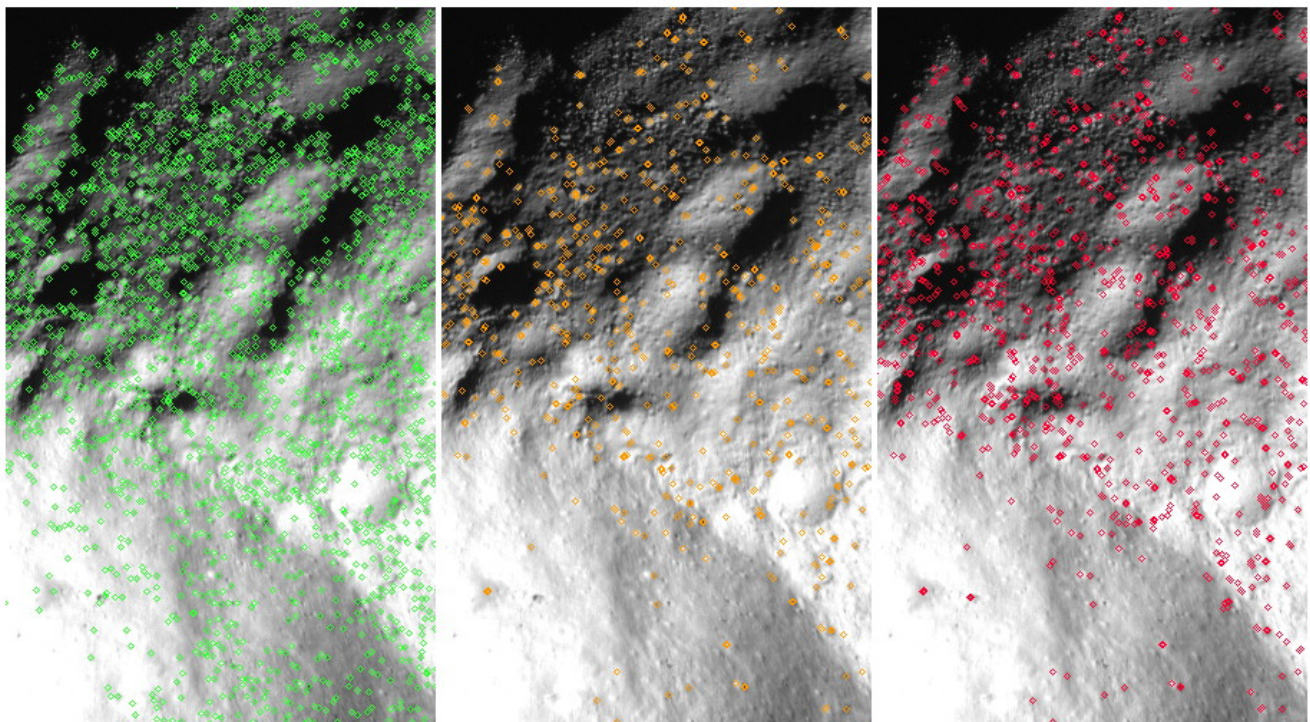
1. 群馬大学、2. 宇宙航空研究開発機構

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¹、浦川 聖太郎²、高橋 隼³、谷川 智康⁴、中村 小百合⁵、はしもと じょーじ¹

*Yuri Sakurai¹, Seitaro Urakawa², Jun TAKAHASHI³, Tomoyasu TANIGAWA⁴, Sayuri NAKAMURA⁵, George HASHIMOTO¹

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、分裂の可能性を検討することができる。

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¹、大塚 勝仁²、阿部 新助³、木下 大輔⁴、花山 秀和⁵、宮地 竹史⁵、奥村 真一郎¹、綾仁 一哉⁶、前野 将太⁶、黒田 大介⁵、福井 暁彦⁵、成田 憲保^{5,7,8}、はしもと じょーじ⁹、櫻井 友里⁹、中村 小百合⁹、高橋 隼¹⁰、谷川 智康¹¹、Otabek Burhonov¹²、Kamoliddin Ergashev¹²、伊藤 孝士⁵、吉田 二美⁵、渡辺 誠¹³、今井 正堯¹⁴、倉本 圭¹⁴、関口 朋彦¹⁵、石黒 正晃¹⁶

*Seitaro Urakawa¹, Katsutoshi Ohtsuka², Shinsuke Abe³, Daisuke Kinoshita⁴, Hidekazu Hanayama⁵, Takeshi Miyaji⁵, Shin-ichiro Okumura¹, Kazuya Ayani⁶, Syouta Maeno⁶, Daisuke Kuroda⁵, Akihiko Fukui⁵, Norio Narita^{5,7,8}, George HASHIMOTO⁹, Yuri SAKURAI⁹, Sayuri Nakamura⁹, Jun Takahashi¹⁰, Tomoyasu Tanigawa¹¹, Otabek Burhonov¹², Kamoliddin Ergashev¹², Takashi Ito⁵, Fumi Yoshida⁵, Makoto Watanabe¹³, Masataka Imai¹⁴, Kiyoshi Kuramoto¹⁴, Tomohiko Sekiguchi¹⁵, MASATERU ISHIGURO¹⁶

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 MK₆ (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 ± 0.027 mag and 0.397 ± 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¹、大槻 圭史²

*Ryo Suetsugu¹, Keiji Ohtsuki²

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

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 ~ 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¹、奥住 聡¹

*Shoji Mori¹, Satoshi Okuzumi¹

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²、細野 七月¹、山敷 庸亮¹

*keiya murashima², Natsuki Hosono¹, Yosuke Yamashiki¹

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^{1,2,3}、Charnoz Sebastien²、大槻 圭史³、玄田 英典¹

*Ryuki Hyodo^{1,2,3}, Sebastien Charnoz², Keiji Ohtsuki³, Hidenori Genda¹

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^{1,2}、小久保 英一郎³

*Natsuki Hosono^{1,2}, Eiichiro Kokubo³

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¹、犬塚 修一郎¹、小林 浩¹

*Keisuke Sugiura¹, Shu-ichiro Inutsuka¹, Hiroshi Kobayashi¹

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¹、荒川 政彦¹

*Takuya Ishiguro¹, Masahiko Arakawa¹

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 π 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 2.2gcm^{-3} (ρ) 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 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 ρ_{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¹、荒川 政彦¹、岡本 千里¹

*Fumiya Nagatomo¹, Masahiko Arakawa¹, Chisato Okamoto¹

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⁻¹, and was impacted on the target surface normally. The targets were a gypsum-glass beads mixture (GG) with the mean density of 1.9gcm⁻³ or a gypsum-bentonite mixture (GB) with the mean density of 0.77 gcm⁻³; 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^{*}) 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 (Φ) 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 σ 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 Jkg^{-1} , respectively, and we tried to make the relationship between P and Q^* according to eq.1 by substituting Q^* for σ , where Q^* was determined from each LMF using the typical relationship between LFM and Q, then Φ was obtained from the probability distribution of the impact strength: Φ 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¹、荒川 政彦¹、松榮 一真¹

*Taku Tazawa¹, Masahiko Arakawa¹, Kazuma Matsue¹

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 2×10^3 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¹、佐々木 晶¹、岡崎 瑞祈¹、廣井 孝弘²

*Hirokazu Tanaka¹, Sho Sasaki¹, Mizuki Okazaki¹, Takahiro Hiroi²

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¹、松本 徹²、安部 正真^{2,1}、土山 明³、瀧川 晶^{3,5}、渡部 直樹⁴、浅田 祐馬³

*Yusuke Nakauchi¹, Toru Matsumoto², Masanao Abe^{2,1}, Akira Tsuchiyama³, Aki Takigawa^{3,5}, Naoki Watanabe⁴, Yuma Asada³

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¹、土井 隆雄³、*佐々木 貴教²、山中 陽裕⁵、齋藤 優樹⁵、竝木 茂朗⁵、村嶋 慶哉⁵、細野 七月¹、野津 翔太²、野津 湧太²、黒木 龍介¹、佐藤 啓明⁴、高木 風香⁶
Yosuke Yamashiki¹, Takao Doi³, *Takanori Sasaki², Akihiro Yamanaka⁵, Yuuki Saito⁵, Shigeru Namiki⁵, Keiya Murashima⁵, Natsuki Hosono¹, Shota Notsu², Yuta Notsu², Kuroki Ryusuke¹, Hiroaki Sato⁴, Fuuka Takagi⁶

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_{earth})が最も多く(969個)、次にSuper-Earthサイズ(1.2-1.9 R_{earth})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¹、Xi Zhang²

*Kazumasa Ohno¹, Xi Zhang²

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¹、野村 英子²、Walsh Catherine³、Eistrup Christian⁴

*Shota Notsu¹, Hideko Nomura², Catherine Walsh³, Christian Eistrup⁴

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., H₂O, CO, HCN, CO₂)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H₂Oスノーラインの外側では、多くの酸素がH₂O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[~]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CH₄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CH₄, 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¹、黒田 剛史²、笠羽 康正¹、寺田 直樹¹

*Arihiro Kamada¹, Takeshi Kuroda², Yasumasa Kasaba¹, Naoki Terada¹

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 H₂O, 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 CO₂ 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^{-1/2} m⁻² K⁻¹, 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 CO₂ atmosphere as F13. We have implemented the radiative effects of CO₂ 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 CO₂ 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 H₂O melting point. The infrared optical depth of CO₂ 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 CO₂ condensation temperature and simulated annual-mean temperature against surface pressure which indicated the most favorable production of CO₂ ice clouds at ~1.5 bars. The radiative effects of CO₂ 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 CO₂ 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¹、倉本 圭¹

*Hiroaki Saito¹, Kiyoshi Kuramoto¹

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 ± 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¹

*Nobuo Komori¹

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¹

*Akira Taneko¹

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。

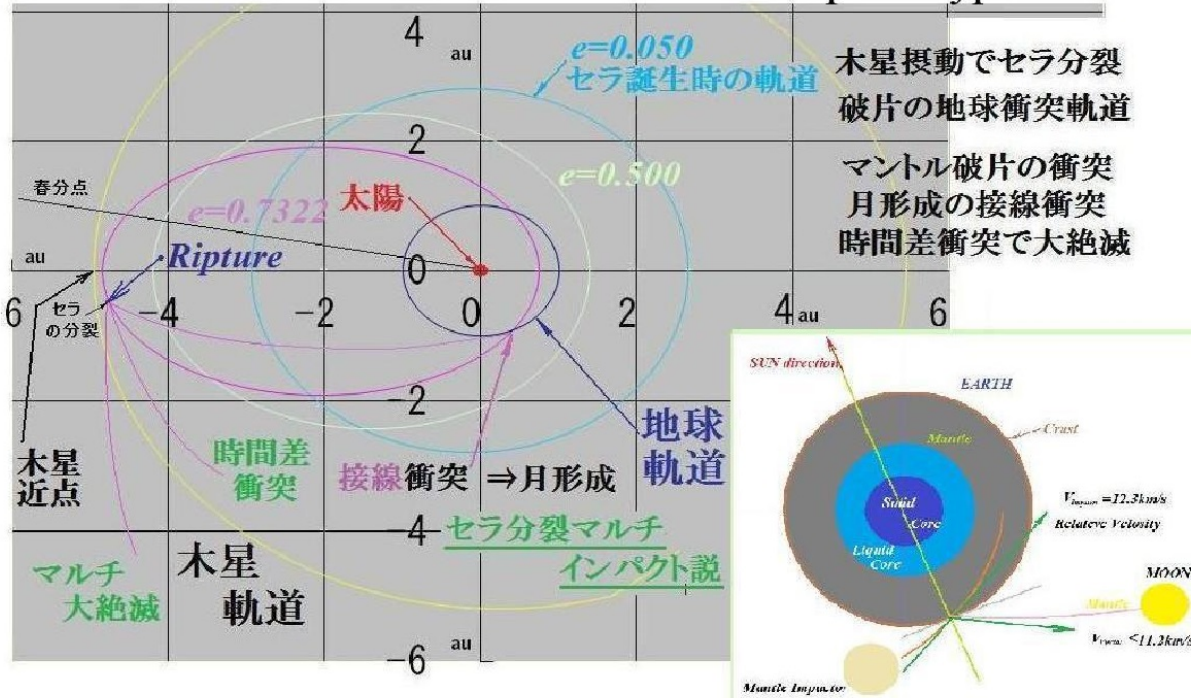
更に環太平洋弧状列島と背弧海盆の起源,平均深度5kmの起源は衝突によるマントル剥離とアイソスタシー,凹プレート海盆と凸プレートの押し合いは,プレート相互の潜り込みの起源となる。

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 α

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. β.
 更に深く和達・ベニオフ帯を形成して, 地震発生面に成る.

