

海惑星と陸惑星を分ける条件：水量が気候に及ぼす影響について The Condition Dividing Aqua Planets and Land Planets: Effects of Water Amount on Planetary Climate

脇田 美幸¹, 高尾 雄也¹, 玄田 英典^{1*}, 阿部 豊¹, 大石 龍太², 阿部 彩子³

WAKIDA, Miyuki¹, TAKAO, Yuya¹, GENDA, Hidenori^{1*}, ABE, Yutaka¹, O'ISHI, Ryouta², ABE-OUCHI, Ayako³

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 大気海洋研究所, ³ 東京大学 気候システム研究センター
¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ³Center for Climate System Research, The University of Tokyo

初の系外惑星の検出から15年以上が経ち、系外惑星の発見数は700個を超えた。近年では観測技術の向上にともなって地球型惑星と考えられる惑星も見つかってきており、生命を宿す可能性のある惑星の存在が期待される。生命が存在しうる惑星の条件として、惑星の表面に液体の水を持つことは非常に重要である。惑星表面の水分布は、地形の起伏による地表での水輸送プロセスと、大気循環による水輸送プロセスの競合で決まる。前者が卓越する惑星は、海惑星と呼ばれ、地球のように、降水や蒸発によらず惑星表面が海洋によって常に湿っている (Kasting et al. 1993)。後者が卓越する惑星は、陸惑星と呼ばれ、惑星表面の水分布が大気中の循環で支配されるため、低地でも海がない場所が存在しうる (Abe et al. 2005, 2011)。

大気循環が水輸送を支配すると考えられる、水が非常に少ない惑星の気候状態は、Abe et al. (2005)において、大気大循環モデルを用いた数値実験で調べられた。これによると、このような惑星では水が高緯度に局在化して低緯度が乾燥し、海惑星の気候とは様相が異なる。また、そのために、陸惑星のハビタブルゾーンが海惑星のハビタブルゾーンよりかなり広いことが、Abe et al. (2011)でわかっている。そのため、陸惑星と海惑星をわける条件を探ることが重要である。

安福 (2009) では、全球的につながった海を持つことが、地表での水輸送プロセスが卓越し海惑星になるための条件だと仮定した。そして、パーコレーション理論を用い、全球的につながった海を持つ条件が、惑星上を占める海の割合が全球の半分以上になることであると求め、これを、陸惑星と海惑星をわける条件であると結論づけた。

しかし、海が全球的につながることが、陸惑星と海惑星をわける条件であるのかは、本当のところはわからない。また、パーコレーション理論では、低いところから海ができると考えられているが、大気大循環モデルを用いた Abe et al. (2005)によると、降水は局在化するため、低いところがすべて海になるわけではない。そのため、大気大循環モデルを用いた数値実験を行い、安福 (2009)での仮定が正しいのかどうかを確かめる必要がある。

そこで、本研究では、地表での水輸送を考慮した上で、地球など現実の惑星を参考にして作ったランダムな4つの地形に対し、水量をパラメータにした系統的な実験を、大気大循環モデルを用いて行った。

その結果、惑星の気候状態は、陸惑星・海惑星と、その中間の状態の3領域にわけられ、陸惑星から海惑星への遷移は水量の変化とともに徐々に起こることがわかった。この結果は、安福 (2009)で得られた陸惑星と海惑星をわける条件が海の割合でシャープに変わるという結果とは異なったものであった。また、その境界は、水量よりも、惑星を占める海の割合によって決まることがわかった。海の占める割合が3~4割以下だと陸惑星的な気候状態、5割以上だと海惑星的な気候状態になり、その間は中間的な状態をとることがわかった。

引用文献

安福一快, 海惑星と陸惑星を分ける条件, 修士論文 (東京大学), 2009.

Abe, Y., Numaguti, A., Komatsu, G., and Kobayashi, Y., Four climate regimes on a land planet with wet surface: Effects of obliquity change and implications for ancient Mars, *Icarus* 178, 27-39, 2005.

Abe, Y., Abe-Ouchi, A., Sleep, N. H., and Zahnle, K. J., Habitable Zone Limits for Dry Planets, *Astrobiology* 11, 443-460, 2011.

Kasting, J. F., Whitmire, D. P., and Reynolds, R. T., Habitable Zones around Main Sequence Stars, *Icarus* 101, 108-128, 1993.

キーワード: ハビタブルゾーン, 陸惑星, 海惑星, GCM

Keywords: habitable zone, land planet, aqua planet, GCM

内部海を持つ地球型惑星の生命居住可能性

The habitability of terrestrial planet that is covered with ice but has an internal ocean

上田 翔士^{1*}, 佐々木 貴教¹

UETA, Shoji^{1*}, SASAKI, Takanori¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

系外地球型惑星と思われる天体や宇宙空間を漂う浮遊惑星が発見され始めている昨今、生命居住可能な系外地球型惑星や浮遊地球型惑星が存在するのかどうかということは非常に重要なテーマである。そういった状況の中で、表面が全球凍結しているが氷の内部が地熱によって溶けて、表面が氷に覆われた海(内部海)が出来ることが分かっており、内部海の生命居住可能性について数多くの研究がなされている。本研究では惑星内部からの熱フラックスによって、惑星進化のタイムスケールで内部海を保持する系外地球型惑星・浮遊地球型惑星について、惑星質量・中心星からの距離・惑星表面の水の量・放射性熱源の量をパラメータとしてふり、議論した。地球と同質量で温室効果がない系外地球型惑星は1AUにおいて地球の0.5-8倍の水を表面に持つ場合、または地球の0.4倍以上の放射性熱源を持つ場合に内部海をもつことが出来る。8倍以上の水を表面に持つ場合は、内部海の底に高圧氷が生じてしまい、ハビタブルでなくなる。内部海をもつ条件というのは質量依存性が高く、質量が地球の数倍の場合、内部海を保持する可能性が大きくなる。地球と同質量で温室効果がない浮遊地球型惑星は地球の2-8倍の水を表面に持つ場合、または地球の2倍以上の放射性熱源を持つ場合、内部海をもつことが出来ることが分かった。8倍以上の水を表面に持つ場合は、上と同様にハビタブルでなくなる。海惑星よりも内部海をもつ地球型惑星のほうが系外惑星や浮遊惑星において一般的であることが示唆されたため、研究や探査の際に海惑星以上に内部海を持つ地球型惑星にも留意しなくてはならない。

キーワード: 系外惑星, 地球型惑星, 生命居住可能性, 内部海, 放射性熱源, 浮遊惑星

Keywords: exoplanets, terrestrial planets, habitability, internal ocean, radiogenic heat, free-floating planets

太陽系外惑星系におけるウォーターワールドレジームの惑星環境 A Study on the Water World Regime around Extrasolar Planetary Systems and Planetary Environments

福島 俊^{1*}, 門屋 辰太郎¹, 田近 英一²
FUKUSHIMA, Satoshi^{1*}, KADOYA, Shintaro¹, TAJIKA, Eiichi²

¹ 東京大学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

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

Habitable zone (HZ) is defined as an orbital range around a main sequence star where planets could have liquid water on the surface (e.g., Kasting et al., 1993). It is, however, noted that, liquid water cannot exist on the surface of a planet without sufficient greenhouse effects of the atmosphere due to some greenhouse gasses, such as CO₂ and CH₄, even if the planet is orbiting within HZ (Tajika, 2008). In this sense, HZ is not a sufficient condition but just a necessary condition for the planets with liquid water.

There should be, however, an orbital condition for the planets which are close enough to their central stars to warm the climate to have liquid water without any other greenhouse gasses except water vapor in the atmospheres (Tajika, 2008). Such a condition is named here 'Water World Regime' (WWR).

In this study, the condition for WWR is estimated using a one dimensional (1-D) energy balance climate model with a radiation model for steam atmosphere. The 1-D radiative-convective equilibrium model of Nakajima et al. (1992) is adopted for outgoing infrared flux from the planet.

The orbital range of WWR is found to be approximated by an annual mean insolation from 243.4 to 293.9 W/m². When the central star is the sun and orbital eccentricity is 0, the inner and outer boundaries correspond to 0.84 AU and to 0.94 AU, respectively. This range is very narrow compared with the traditional HZ (0.84 to >1.37 AU). This is because WWR is defined here as the condition for the planets without greenhouse gas in the atmosphere except for water vapor in contrast to the traditional HZ which implicitly assumes strong greenhouse effects of the atmosphere. Among the extrasolar planets discovered so far, there are 12 candidates for the planets which satisfy the WWR condition.

キーワード: 太陽系外惑星

Keywords: extrasolar planet

水の散逸を伴う地球型惑星の進化 Evolution of terrestrial planets with water loss

小玉 貴則^{1*}, 玄田 英典¹, 阿部 豊¹, ザンレ ケビン²

KODAMA, Takanori^{1*}, GENDA, Hidenori¹, ABE, Yutaka¹, Zahnle, Kevin²

¹ 東京大学大学院地球惑星科学専攻, ² NASA エイムズ研究所

¹The University of Tokyo, ²NASA Ames Research Center

生命の誕生と進化を考える上で、液体の水の存在は重要であると考えられている。液体の水が惑星表面に存在できる中心星からの距離の範囲をハビタブルゾーン (HZ) と呼ぶ。Kasting ら [1] は、全球が海でつながった地球のような惑星 (海惑星と呼ぶ) の HZ を見積もり、その範囲を現在の地球軌道での太陽放射の約 90% から約 110% の範囲と見積もった。

一方、阿部ら [2] は、惑星の保持する水量がごく少量の仮想的な惑星 (陸惑星と呼ぶ) の気候について議論した。陸惑星は、惑星表面の水分布が大気中の水蒸気の循環にのみ支配される惑星であり、その重要な特徴は、降雨と蒸発が局所的にバランスし、水の局在化が起こることである。彼らは、大気大循環モデルを用いて、1 気圧の空気からなる大気をもつ陸惑星の HZ を現在の地球軌道の太陽放射の約 77% から約 170% の範囲と見積もった。その結果、陸惑星は、海惑星より広い HZ を持つ可能性が示唆された。また、彼らは、海惑星のような水を多く保持している惑星が、水の散逸を経験することによって、陸惑星へ進化するだろうと考え、新しい地球型惑星の進化の経路を提案した。

両研究により、惑星表面の水量は HZ を議論する上で重要であることが示唆された。そこで我々は、まだ詳細に検討されていない海惑星から陸惑星への進化のメカニズムを明らかにするため、惑星表面に保持する水量変化をモデル計算し、海惑星から陸惑星への進化の詳細を検討した。

我々は、大規模に水を散逸させる水の流体的散逸 [3,4] と恒星進化 [5,6,7] を考慮し、初期に様々な水量を保持している仮想的な惑星に対して、様々な距離における惑星の保持する水量の変化を計算し、その時の惑星の状態を調べた。そして、系外地球型惑星の観測に示唆を与えるために、「初期海洋質量」「恒星からの距離」の他、「恒星の質量」「惑星の質量」についてもパラメーターとして扱うことにより、海惑星から陸惑星への進化に対する影響を検討した。

海惑星から陸惑星への進化には、2つの重要なタイムスケールが存在する。1つは、中心星から受ける放射が増大するタイムスケール、もう1つは、水の散逸するタイムスケールである。前者は、恒星の質量と惑星から中心星までの距離に依存し、後者は、水の散逸によって惑星が保持する水量が陸惑星的な気候をとる水量になるまでに要する時間であるため、初期海洋質量に依存する。後者が、前者に比べ長い場合、海惑星は陸惑星へ進化することはできず、前者に比べ短い場合、海惑星は陸惑星へ進化することができる。太陽型の恒星周りの地球サイズで軌道半径 0.75[AU] の海惑星の場合、海惑星から陸惑星へ進化する境界の初期水量は、0.15 海洋質量 (現在の地球の海洋質量の 0.15 倍) と見積もれ、惑星の保持する水量がこれ以下の場合には陸惑星へ進化する可能性がある。

これまで発見された系外惑星は、様々なスペクトル型の恒星を回っており、その質量も様々である。一般に、太陽よりも軽い恒星は、暗く進化が遅い。また、地球よりも質量の大きな惑星は、重力が大きいため、水蒸気の拡散速度が遅い。そのため、軽い恒星周りの数倍の地球質量をもつスーパーアースなどは、海惑星から陸惑星へ進化しにくいと考えられる。しかしながら、海惑星から陸惑星へ進化した惑星のハビタブルな期間は、陸惑星へと進化しない惑星と比べ長い場合、惑星の水量変化を考慮したハビタブルゾーンの内側境界を適応することにより、観測によるハビタブルプラネットの検出サンプル数が増大すると考えられる。

Reference

- [1] Kasting, J. F., Whitmire D. P., and Reynolds, R. T. (1993). *Icarus*, 101, 108-128.
[2] Abe, Y., Abe-Ouchi, A., Sleep, N. H., and Zahnle, K. J., (2011). *Astrobiology*, 11, 443-460. [3] Guinan, E.F., Ribas, I., 2002. Vol. 269. *Astron.Soc. Pacific, San Francisco*, pp.85-106. [4] Walker (1977) [5] Gough, D. O (1981) *Solar Physics*, vol. 74, Nov. 1981, p. 21-34 [6] Iben, I. (1967) [7] Lammer et al. (2009). *A&A*, 506, 399-410.

キーワード: 地球型惑星, ハビタブルゾーン, 系外惑星

Keywords: terrestrial planet, habitable zone, extrasolar planet

系外地球型惑星における大気組成と海水量の関係

Variety in atmospheric compositions of terrestrial exoplanets: effects of surface H₂O mass

洪 鵬^{1*}, 関根 康人¹, 杉田 精司¹

HONG, Peng^{1*}, SEKINE, Yasuhito¹, SUGITA, Seiji¹

¹ 東京大学 複雑理工学専攻

¹Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

惑星形成の際、炭素質隕石や彗星等の H₂O に富む材料物質の集積によって、地球型系外惑星の多くは非常に深い海を保持することが予想されている。マントルからの脱ガス気体の酸化還元度は海の深さに強く依存するため、それら "海惑星" の大気の酸化還元状態も海の深さに応じた多様性を持つ可能性がある。実際、地球では陸上火山が放出する火山ガスが酸化されたのに対して、海底火山は還元的なガスを噴出していることが知られている (Holland, 2002)。これは、陸上火山と海底火山では、マグマの温度と圧力が大きく異なることを反映しているためである (Kump & Barley, 2007)。そこで本研究では海の深さに着目して、地球型系外惑星の大気組成の多様性を調べ、深い海が存在によって大気が還元されるかどうかを議論する。

海の深さを変化させた時の、マントルからの脱ガス気体中の CH₄/CO₂ 比の変化を調べるため、熱水系では CH₄ と CO₂ が平衡になっていると仮定し、岩石と水の反応によって緩衝された水素分圧によって平衡条件が規定されているとした。地球の陸上火山の火山ガスは一般的に、ファイヤライト-磁鉄鉱-石英緩衝系 (FMQ) と平衡になっていると考えられており (Holland, 2002)、一方で海底熱水系のガスは磁硫鉄鉱-黄鉄鉱-磁鉄鉱緩衝系 (PPM) の平衡組成に近い (McCullom & Seewald, 2007)。そこで我々は地球型系外惑星の岩石組成が地球と似ていると仮定して、FMQ と PPM によって水素分圧が緩衝されているとして、平衡計算を行った。

また、様々な量・組成の脱ガスフラックスを注入した時の大気組成の変化を調べるため、原始地球のモデル (Pavlov et al., 2001) に基づいた、1 次元光化学モデルを構築した。モデルは H,C,N,O,S で構成される気体分子を含み、337 の反応式、69 の分子種が含まれる。計算は全て地表面気圧を 1 bar、温度 275 K の条件で行った。またモデルには、実験で得られた、大気中の C/O 比と有機物エアロゾル生成量の関係式 (Trainer et al., 2006) を用いて、有機物エアロゾル層による紫外線遮蔽効果も取り入れた。二酸化炭素分圧 $p\text{CO}_2$ は、炭素循環における化学風化率によって決まると考えられるが、海惑星における風化率には大きな不定性があるため、 $p\text{CO}_2$ は現在の値の 0.1 から 1000 倍の間で振った。

熱水系での平衡計算の結果、FMQ 緩衝系より酸化的な PPM 緩衝系であっても、7000 bar を超えるような高圧下では脱ガス組成は極めて還元的になることがわかった。したがってもし系外惑星の岩石組成が現在の地球のような比較的酸化的な組成であっても、海の深さが 70 km を超えればマントルから脱ガスする気体中の炭素はほとんど CH₄ として出ることがわかった。

次に、大気中での光化学計算によって、脱ガスフラックスが現在の地球の脱ガスフラックスの数倍になると、大気組成が還元的 (CH₄/CO₂ > 1) になることがわかった。そのような場合、大気中での CH₄ の重合反応によって有機物のエアロゾル層が形成される可能性がある。過去の地球の脱ガス率の変化を考慮すると (Tajika & Matsui, 1993)、深い海を持つ系外惑星ではタイタンのようなヘイズに覆われた大気が形成され、それらが今後の観測で検出される可能性がある。また、現在の地球に匹敵する脱ガスフラックスがあれば、大気中の CH₄ の混合比は著しく高くなることがわかった (10 - 1000 ppm)。このことは深い海を持つ系外惑星の地表温度やハビタビリティを考える際に、CH₄ が気候に与える放射効果を考慮しなければならないことを示唆している。

キーワード: 系外惑星, 熱水系, 光化学, 大気組成

Keywords: exoplanets, hydrothermal system, photochemistry, atmospheric composition

自転軸傾斜角及び大陸配置が炭素循環の機能する系外地球型水惑星の表層環境に及ぼす影響

Surface environment of water-rich extraterrestrial planets with carbon cycle under various obliquities and geographies

渡邊 吉康^{1*}, 田近 英一², 門屋 辰太郎¹

WATANABE, Yoshiyasu^{1*}, TAJIKA, Eiichi², KADOYA, Shintaro¹

¹ 東大・理・地惑, ² 東大・新領域・複雑理工

¹Earth and Planet. Sci., Univ. of Tokyo, ²Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

Water-rich terrestrial planets like the Earth are expected to be found in the extrasolar planetary systems in the near future. To discuss habitability of planets, we have to investigate characteristic features of climate system of the water-rich terrestrial planets. One of the key factors which controls climate is "obliquity", that is, the inclination of planet's axis. Considering a large influence of obliquity on the solar energy distribution on the planetary surface, obliquity variations could induce large climate change on the planets. The climate of the Earth has been stabilized on long timescales by a negative feedback mechanism involving removal of CO₂ from the atmosphere by weathering of silicate minerals on land followed by carbonate precipitation in oceans, and continuous supply of CO₂ from the planetary interiors to the atmosphere via volcanism. This mechanism should be required for water-rich extraterrestrial planets to maintain warm climate stably. Without this mechanism, the climate of planets cannot be stabilized against changes in the various climate forcings. Considering that the amount of weathering is strongly influenced by surface temperature and the area of continent available for weathering, and that temperature of continent responds to the insolation more rapidly than that of oceans, long-term climate mode would be different under different obliquity or geography.

While the climate of extraterrestrial planets with high obliquities was investigated by Williams and Kasting (1997), there are few studies which systematically investigate the effects of obliquity change on the climate of the planets with carbonate-silicate geochemical cycle. In this study, we therefore investigate systematically the climate of the water-rich terrestrial planets with a negative feedback mechanism of carbonate-silicate geochemical cycle under various obliquities, semi-major axes and different geographies.

We tested with 3 different geographies; "Slice" (continent is distributed at the same fraction for each latitude.), "Equatorial" (supercontinent is centered around the equator.) and "Bipolar" (supercontinent is centered around both poles.). We found that, while the "permanent ice-cap mode" (partially ice-covered throughout the year) and the "seasonal ice-cap mode" (partially ice-covered seasonally) exist stably at low obliquities, the ranges of semi-major axis for these climate modes shrink and finally disappear with an increase of obliquity. This is because latitudinal gradient of annual mean insolation becomes smaller with an increase of obliquity, resulting in meridional heat transport to be insufficient. When carbonate-silicate geochemical cycle is taken into account, the ranges of semi-major axis for all the climate modes expand at any obliquities, compared with the cases without carbon cycle, indicating that the carbon cycle strongly stabilizes the climate for the planets with any obliquities inside the habitable zone. These features are found at any geographies. Dependence of obliquity on climate modes is quite different among different geographies. The climate is cold for lower obliquities at Equatorial geographies, whereas the climate is cold for higher obliquities at Bipolar geographies. This characteristic of climate modes at Slice geography is intermediate, but is closer to those of Equatorial characteristic. The results derive from a negative feedback of carbonate-silicate geochemical cycle. If continent is centered on the equator, at the same semi-major axis, pCO₂ decrease with the decrease of obliquity, because weathering occurs effectively throughout 1 year at lower latitude where annual mean insolation and land fraction are large. In contrast, if continent is centered on poles, pCO₂ decreases with the increase of obliquity at the same semi-major axis, because weathering occurs effectively throughout 1 year at higher latitude where seasonal insolation largely changes and land is the largest.

キーワード: 自転軸傾斜角, 炭素循環, 大陸配置, 系外惑星, ハビタビリティ, 惑星気候

Keywords: obliquity, carbonate-silicate geochemical cycle, continental distribution, exoplanet, habitability, planetary climate

炭酸塩-珪酸塩の地球化学的循環を考慮した、系外惑星表層環境の長期進化 Long-term Evolution of Surface Environment on Extrasolar Planets with Carbonate-Silicate Geochemical Cycle

門屋 辰太郎^{1*}, 田近 英一², 渡邊 吉康¹

KADOYA, Shintaro^{1*}, TAJIKA, Eiichi², WATANABE, Yoshiyasu¹

¹ 東大 理 地球惑星科学専攻, ² 東大 新領域 複雑理工

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

Surface environment of extrasolar terrestrial planets has been discussed in terms of presence of liquid water. Kasting et al. (1993), for example, estimated habitable zone (HZ) in which the planets are able to have liquid water on its surface. They found that the inner and outer limits of HZ are 0.95 and 1.37 AU, respectively. They also considered the change of HZ due to stellar evolution, and suggested that HZ moves outward and diminishes with time. In their study, sufficient amount of greenhouse gas is assumed, but it has not been verified quantitatively.

We investigate the conditions where planets hold liquid water, considering their surface temperature and the amount of greenhouse gas. Surface temperature is estimated with one-dimensional energy balance model (North et al. 1981; Williams & Kasting, 1997; etc.). The greenhouse gas is assumed to be CO₂, and its amount in the atmosphere is controlled by carbonate-silicate geochemical cycle, in which degassing rate is given and chemical weathering rate depends on surface temperature and partial pressure of CO₂.

The results show that, with the degassing rate as much as that at present Earth's value, planets can avoid snowball mode until 1.05 AU from the central star. This limit may be much narrower than the one estimated from previous studies. However, if the degassing rate of CO₂ is higher, the outer limit moves outward farther from the central star. Under such condition, a planet has higher partial pressure of CO₂, which makes meridional temperature distribution much uniform, resulting in shrink of partial ice cap.

The degassing rate of CO₂ becomes lower with time. In order to examine such effect, we consider thermal evolution of the planet (Tajika & Matsui, 1992) and consider on the long-term stability of surface climate.

キーワード: 系外惑星, 炭素循環, EBM

Keywords: extrasolar planet, carbonate-silicate geochemical cycle, EBM

陸惑星の完全蒸発限界：1次元EBMを用いた検討 The Complete Evaporation Limit for Land Planets: A Study with 1D EBM

高尾 雄也^{1*}, 玄田英典¹, 小玉貴則¹, 阿部豊¹

TAKAO, Yuya^{1*}, Hideori Genda¹, Takanori Kodama¹, Yutaka Abe¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo

地球型生命の存在や進化を考える上で、液体の水の存在は重要だと考えられる。中島ら(1992)は、液体の水が豊富にあり全球的に分布している惑星(海惑星と呼ぶ)について、1次元放射対流平衡灰色大気モデルを用いて、大気構造を解くことによって地表面温度と惑星放射の関係性を求め、射出限界の存在について議論した。海惑星では、射出限界を上回る太陽放射を受けると、それに釣り合うエネルギーを射出することができず、地面の水が全て蒸発するまで表面温度が上がり続ける。彼らの結果では、射出限界の値は、アルベドを0.3に固定した場合、1AUでの現在の太陽放射の123%相当であると見積もられた。

一方、阿部ら(2005)は、3次元大気大循環モデルを用いて、惑星表面の水量がごく少量の仮想的な惑星の気候について検討した。その結果、降雨と蒸発が局所的にバランスし、低緯度が乾燥し高緯度に水が集中する水の局在化が起こることがわかった。水の分布が大気の水蒸気輸送によって支配され、乾燥した低緯度地域と、液体の水を保持する高緯度地域がある惑星を陸惑星と呼ぶ。陸惑星の表面に存在する液体の水が全て蒸発する太陽放射(完全蒸発限界)を計算すると、陸惑星の完全蒸発限界は、惑星が持つ初期水量に依存せず、1AUでの現在の太陽放射の170%程度になると見積もられ、海惑星の射出限界を大きく上回ることがわかった(阿部ら2011)。

完全蒸発限界を考える上で、水の分布と局在化は重要である。しかし、阿部らが用いたモデルでは惑星表面での水輸送は考慮されていない。そこで我々は、完全蒸発限界のメカニズムを定性的に理解する為の第一歩として、水量が少ない惑星表面での水輸送を考慮した場合の惑星気候への影響を簡単なモデルを用いて検討した。

我々は、中島らの大気モデルを拡張し、地表面温度、水蒸気量、惑星放射の関係を調べ、水がごく少量含まれる大気についての温室効果を考慮したモデルを作成した。そしてNorth(1981)が用いた南北1次元EBM(Energy Balance model)に水の潜熱の効果を加え、地表での水輸送の効率をパラメータとして与えた実験を行った。

その結果、水が低緯度まで張り出す場合、完全蒸発限界は海惑星の射出限界と一致した。また水が高緯度に局在化するにつれて、完全蒸発限界は連続的に大きくなっていくことがわかった。したがって、完全蒸発限界は、水がどこまで張り出すかで決まっている。水が張り出す範囲は、大気中の水蒸気輸送の効率と地表の水輸送の効率とのバランスから決まっており、水量が多く水輸送の効率が良い場合、低緯度まで水が張り出し、海惑星的な気候状態になる。

また、完全蒸発限界のメカニズムを検討するために、地面が乾燥している領域と水のある領域で分けて、二つの領域間をエネルギーが輸送されるという簡単なモデルでの地表面温度の定常解について解析を行った。その結果、完全蒸発限界の付近では、地面が濡れている領域の惑星放射が射出限界より少し小さい時点で、安定な定常解が存在できなくなることがわかった。

気球搭載望遠鏡による惑星大気観測 A balloon borne telescope for planetary observations

山元 夢摘^{1*}, 田口 真¹, 吉田 和哉², 坂本 祐二², 中野 壽彦², 莊司 泰弘³, 高橋 幸弘⁴

YAMAMOTO, Mutsumi^{1*}, TAGUCHI, Makoto¹, Kazuya Yoshida², SAKAMOTO, Yuji², Toshihiko Nakano², Yasuhiro Syoji³, TAKAHASHI, Yukihiko⁴

¹ 立教大学理学部, ² 東北大学工学部, ³ 宇宙航空研究開発機構, ⁴ 北海道大学理学部

¹Department of Science, Rikkyo University, ²Department of engineering, Tohoku University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Department of Science, Hokkaido University

惑星の大気圏やプラズマ圏で起こる現象を研究するためには長時間の連続観測が重要である。しかし、国内外の大型望遠鏡はマシンタイムが限られる上に、シーイングや天候不良のため十分な観測ができない状況である。そこで、極域成層圏での特徴を生かして惑星を連続観測することを目的として気球搭載望遠鏡を開発している。

気球搭載望遠鏡開発の主要な技術課題の1つが、フライト中のゴンドラ姿勢を制御し、観測機器を目標に指向させ維持するポインティング制御である。本研究では制御を第3段階に分けて徐々に精度を上げる3段階指向制御系の開発を行った。第1段階制御ではサンセンサーを用い、デカップリング機構とコントロールモーメントジャイロを用いてゴンドラを太陽方向に指向させる。第2段階制御ではスターセンサーを用いて、望遠鏡の経緯台で望遠鏡方向を制御し、目標天体を望遠鏡視野内に導入・追尾する。最後に、第3段階制御では目標天体位置を視野の中央に維持するために光電子増倍管とティップティルトミラーを用いて制御する。

光学系としては、有効口径304.8mm、焦点距離3048mmのMEADE社製シュミットカセグレン望遠鏡を使用する。第2回気球実験のメインターゲットは木星である。2つのCCDカメラを用いて、それぞれ紫外(380nm~420nm)および近赤外(880nm~920nm)で撮像する。

金星をターゲットとして2009年6月3日に北海道大樹町において第1回気球実験が行われた。しかし、搭載コンピューターの不具合により、気球搭載望遠鏡システムの性能確認ができなかった。この結果を踏まえて気球搭載望遠鏡システムの性能確認と金星観測を目的として、2012年8月に再び大樹町において気球実験を行う予定である。

キーワード: 気球, 望遠鏡, 大気, 惑星, 金星, 成層圏

Keywords: Balloon, Telescope, Atmosphere, Planet, Venus, Stratosphere

惑星科学研究センター (CPS) における知見アーカイブ

A repository for knowledge of planetary science serving by Center for Planetary Science (CPS)

杉山 耕一郎^{1*}, 鈴木 絢子¹, 中村 友昭², 真鍋 翔², 堺 正太郎³, 鶴巻 亮一³, 辰巳 信平², 中岡 礼奈², 加藤 則行², 谷 伊織², 梅本 隆史³, 押川 智美³, 惑星科学研究センター¹

SUGIYAMA, Ko-ichiro^{1*}, SUZUKI, Ayako¹, Tomoaki Nakamura², Sho MANABE², SAKAI, Shotaro³, Ryoichi Tsurumaki³, Shimpei Tatsumi², NAKAOKA, Reina², Noriyuki Katoh², Iori Tani², UMEMOTO, Takafumi³, OSHIKAWA, Tomomi³, Center for Planetary Science¹

¹ 惑星科学研究センター, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

¹Center for Planetary Science, ²Graduate school of Science, Kobe University, ³Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

惑星科学研究センター (CPS) ではサービスの1つとして知見アーカイブ, すなわち情報基盤の活用による図書館, の提供を行っている。セミナーや研究会について講義をビデオ収録し, それを講義資料と合わせてインターネット上に公開する。これを受講者の復習や未受講者の学習に供することにより, 大学の枠を超えた教育研究資源を提供し全国の大学院教育全体のレベルアップに資する。こうした知見情報の集積と整合化を通して, 惑星系の起源・進化・多様性の全体を俯瞰する活動の促進を目指している。

上記を推進するために, セミナーや研究会の収録するための機器整備と作業手順の整理, および公開システム的设计・開発を行ってきた。作業手順や公開システムが整理されたことにより, 毎週一回行われる CPS セミナーの講義ビデオと講義資料がその日のうちに公開されるようになり, それ以外の CPS 主催・共催のセミナーや研究会も基本的に全てコンテンツ化されている。2001年から11年間におよび1100本以上の講義が資料と共に閲覧することができるようになっており, 講演者やタイトル等で検索可能である。

本講演では CPS における知見アーカイブ事業を紹介し, その特徴を解説する。

参考: <https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/>

キーワード: 知見アーカイブ

Keywords: A repository for knowledge of planetary science

原始惑星系円盤におけるダストの成長・内部密度進化：円盤オパシティに対する影響

Growth and porosity evolution of dust aggregates in protoplanetary disks: Effects on the disk opacity

奥住 聡^{1*}, 田中 秀和²

OKUZUMI, Satoshi^{1*}, TANAKA, Hidekazu²

¹名古屋大学, ²北海道大学

¹Nagoya University, ²Hokkaido University

ダストは原始惑星系円盤のオパシティを決定づける存在である。オパシティはダストの成長・円盤内移動によって大きく変化するため、ダストの進化を理論的におさえることは惑星形成過程の解明のみならず円盤観測データの解釈においても重要である。逆に、ダスト成長モデルの違いがオパシティにどのように反映されるかがわかれば、円盤観測からダスト成長/微惑星形成シナリオの検証・制限を行うことも可能になる。特に、ALMAの本格運用を通じてダストのミリ波・サブミリ波連続放射の空間構造が詳細に明らかになることが期待されており、これに備えてダストの進化と円盤ミリ波放射スペクトルの進化の対応関係を理論的に明らかにしておくことが非常に重要である。

本研究では、ダスト成長モデルの観測による検証を視野に、ダストの成長・内部構造進化が円盤オパシティに与える影響を調べた。空隙率進化を考慮したダスト成長シミュレーション (Okuzumi, Tanaka, Kobayashi, & Wada, 2012) から得られるダストのサイズ・空隙率・空間分布に対して、空隙を含むダストに対する有効散乱理論である Maxwell-Garnett 理論を適用し、ミリ波帯オパシティの空間分布を計算した。その結果、従来の空隙率ゼロのダストモデルはオパシティ冪指数のピークが中心星から数十 AU から 100AU 程度の領域に出現することを予言する一方、我々の新モデルはピークの不出現を予言することを明らかにした。この値は光学的に薄い円盤の観測から直測定可能であるため、この空間分布を ALMA によって測定すれば、ダスト成長モデルの検証が実現できる可能性がある。

キーワード: ダスト, 成長, 空隙率, オパシティ, 原始惑星系円盤

Keywords: dust, coagulation, porosity, opacity, protoplanetary disk

微惑星円盤内での微惑星連星形成 Binary formation in Planetesimal Disks

台坂 淳子^{1*}, 小久保 英一郎¹
DAISAKA, Junko^{1*}, KOKUBO, Eiichiro¹

¹ 国立天文台

¹National Observatory of Japan

太陽系の外側、カイパーベルトの領域では数十個の微惑星連星が発見されている。この連星は現在まで発見されている海王星以遠天体の1割弱を占めている。しかし、広く認められている惑星集積理論では連星形成は考慮されていない。微惑星連星形成を説明するモデルとしては、3体遭遇や exchange モデル、また、CAC(Chaos Assisted Capture、準安定な2体に複数回3体目が遭遇し安定化する)モデルなどが提唱されている。

円盤の外側での計算のため長い積分時間を要することと、粒子数を多く必要としていることにより、通常の計算機では計算時間がかかりすぎるため、過去の計算では大規模なN体計算は行われていない。

本研究では、GRAPE-DRを用い、N体計算を行った。軌道長半径を固定し、物理半径を変化させた計算、同じく軌道長半径を固定し、面密度を変化させた計算、そして面密度を林モデルに合わせ軌道長半径を変化させた計算の3種類の計算を行った。それぞれ4-6の計算を走らせ、連星の形成率、その集積に与える影響を調べた。その結果、円盤の外側ほど連星は形成しやすいことが確認でき、微惑星連星形成を考慮すると、集積率が従来の値の数倍になる可能性があることがわかった。

微惑星円盤内の微惑星には質量分布をもたせ、パラメータサーチを行った。連星形成の、面盤面密度や微惑星の質量、ランダム速度などの依存性を検証した。また、形成された微惑星連星の離心率や軌道傾斜角の観測値との比較も行った。

キーワード: 微惑星連星, 海王星以遠天体, 微惑星集積

Keywords: planetesimal binary, TNO, accretion

微惑星弧状衝撃波における H₂ の解離・再結合の効果 Effects of H₂ Dissociation and Recombination on Planetesimal Bow Shocks

山崎 布美香^{1*}, 中本 泰史¹

YAMAZAKI, Fumika^{1*}, NAKAMOTO, Taishi¹

¹ 東京工業大学 地球惑星科学専攻

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

コンドリュールは、多くの隕石に含まれている mm サイズの珪酸塩粒子で、加熱、溶融を経験したことが観察から分かっているが、加熱メカニズムについての詳細は未だ明らかになっていない。この加熱メカニズムの一説として、衝撃波加熱モデルがある。これは、コンドリュールの前駆体であるダスト粒子が衝撃波面に飛び込んでくると、ガスとの摩擦により加熱を受け、融点に達するというモデルである。このアイデアに基づいて、Ciesla et al. (2004)、Nakajima et al. (2012, in preparation) では、微惑星まわりの弧状衝撃波の流体シミュレーションを行い、弧状衝撃波によるコンドリュール形成の可能性を検証した。

彼らは、ガスは断熱であり水素分子で構成されていると仮定したため、水素分子の解離・再結合は考慮していなかった。しかし、Nakajima et al. (2012, in preparation) の計算結果では衝撃波後面で温度が 4000 K 以上にも達しており、実際には水素分子の解離が起こることが想定される。解離が起こればガスの温度も変わるはずであるので、微惑星まわりの弧状衝撃波を理解するには、水素分子の解離・再結合を考慮した計算が必要になってくる。

本研究では、H₂ の解離平衡計算コードを開発して ZEUS-2D コードに加え、微惑星のまわりで H₂ の解離・再結合が入った流体計算を行った。その結果、微惑星の前面で、断熱の計算結果よりも温度は低く、密度は高くなった。これは解離が起きたためであると理解できる。さらに再結合が起きる領域では、断熱の結果よりも温度が高くなることが分かった。また、衝撃波面の形もわずかに変化していた。

これらの結果から、H₂ の解離・再結合はコンドリュールの前駆体であるダスト粒子の加熱にも影響してくることが予想される。これは、ガス摩擦加熱がガス密度に大きく依存しているためである。したがって将来的に、H₂ の解離・再結合を考えた上でのダストの軌跡、熱履歴を調べる必要がある。

キーワード: 弧状衝撃波, 数値流体計算, H₂ の解離, コンドリュール

Keywords: bowshock, numerical hydrodynamics simulation, H₂ dissociation, chondrule

巨大惑星による微惑星一時捕獲過程 Temporary capture of planetesimals by a giant planet

末次 竜^{1*}, 大槻 圭史²

SUETSUGU, Ryo^{1*}, OHTSUKI, Keiji²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学大学院理学研究科

¹Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ., ²Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ./CPS

惑星近傍を微惑星が通過すると、微惑星は惑星と重力相互作用し、近接散乱されて遠方へとばされる。しかし稀に惑星の重力に微惑星が捕獲され、惑星を中心にしばらく公転して近傍にとどまった後、遠方へ飛ばされてゆくことがある。この現象を一時捕獲という。近年、この一時捕獲が短周期彗星の力学進化、不規則衛星の形成といった惑星系形成の重要な役割を担っている可能性が示唆されている。

我々はすでに微惑星が初期に離心率をもつ場合の、微惑星の一時捕獲軌道や、一時捕獲の頻度などを詳細に調べた (Suetsugu et al. 2011)。その結果、一時捕獲軌道は離心率とエネルギーによって四つの型に分類でき、これらの軌道の形や公転方向は微惑星の離心率とエネルギーに依存することがわかった。初期の離心率が小さいと惑星の重力圏付近を逆行で公転するが、離心率が大きいと重力圏の外で逆行に公転する一時捕獲軌道になる。一方、順行の長時間の一時捕獲は特定の離心率でエネルギーが非常に低い場合にしか起こらないことがわかった。一時捕獲が起こる頻度は離心率の増加とともに増加し続けることが示され、特にランダム速度卓越領域での増加はシア卓越領域と比べると、急激に増加する。これは上述の一時捕獲の軌道の型が離心率が大きい場合と小さい場合で異なるからである。順行の一時捕獲の頻度は長時間の一時捕獲が起こる離心率でピークをもつことがわかった。

Suetsugu et al. (2011) では微惑星と惑星の質量が中心星に比べ十分小さいと仮定したヒル近似下で三体問題軌道計算を行った。惑星の質量が小さい場合はこの近似で求めた結果が良く合うが、質量が木星程度ある大きい惑星の場合には曲率の効果があるため結果が異なる可能性がある。

そこで今回、円制限三体問題下で三体問題軌道計算を行い、微惑星の一時捕獲が惑星の質量にどのように依存するのかを調べた。これらの結果と、Suetsugu et al. (2011) で行った局所座標系での計算結果の比較について報告する予定である。

キーワード: 惑星, 衛星

Keywords: planets, satellites

周惑星円盤による微惑星捕獲 Capture of planetesimals by circumplanetary disks

藤田 哲也^{1*}, 大槻 圭史², 谷川 享行³

FUJITA, Tetsuya^{1*}, OHTSUKI, Keiji², TANIGAWA, Takayuki³

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 北海道大学低温科学研究所

¹Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ., ²Dept. Earth Planet. Sci., Kobe Univ./CPS, ³Low Temp. Sci. Inst., Hokkaido Univ./CPS

惑星の形成過程において、惑星はその重力により原始惑星系円盤からガスや固体微粒子を得て、周惑星円盤を形成する。ガリレオ衛星のような巨大惑星の規則衛星は、順行の円に近い軌道を持っているため、周惑星円盤の中で固体粒子が衝突合体して形成したと考えられている。大量のガスと固体粒子が周惑星円盤を通して成長途中の巨大惑星に供給されるため、周惑星円盤中の固体粒子の量は、衛星だけでなく、巨大惑星の形成や構成する重元素の起源に対しても重要な役割を果たす。円盤に供給される固体微粒子がメートルサイズ以下であると仮定すると、ガス抵抗力を強く受けるためにガスとともにやってくると考えられる。一方、大きい微惑星はそのランダム速度に依存した軌道で接近し、ガス抵抗を受けることで周惑星円盤に捕獲されることが考えられる。我々は巨大惑星に接近する微惑星の軌道進化を計算し、周惑星円盤への降着確率を調べた。

惑星が球対称な大気を持つ場合については、Tanigawa & Ohtsuki(2010) で研究されている。我々はそれと同様の手法で、円盤の場合について研究を行った。中心星、惑星、微惑星の3体を考え、惑星の周りには周惑星円盤を仮定する。円盤は、惑星を原点とする局所直行座標系において円運動しているとする。円盤の赤道面に対する円筒座標系において、ガス密度は動径方向に距離のあるべきで減少し、赤道面に垂直な方向には指数関数的に減少する。この構造により、円盤はケプラー速度よりもわずかに遅い速度で回転する。微惑星は Hill 圏内でのみガス抵抗を受けると仮定する。ガス抵抗を含んだ Hill 方程式を8次のルンゲクッタ法で解き、様々な軌道要素の微惑星について軌道進化を調べた。降着として、(i) エネルギーの減少に関係なく、惑星に衝突する場合、(ii) 円盤を通過することでガス抵抗を受け、エネルギーが十分減少し捕獲される場合の2種類を考える。衝突については、ランダム速度が大きい場合の衝突確率と衝突頻度が解析的に得られている。また数値計算もすでに行われているので、我々は主に(ii)の場合について計算を行った。

初めに、2次元の場合について解析を行った。円盤を通過する微惑星はガス抵抗を受けるため、エネルギーが散逸する。ガスは円運動しているために、ガスに対して順行か逆行かによりエネルギー散逸の値が違ってくるのが分かった。逆行の場合は、順行に比べてガスに対する相対速度が大きいため、強くガス抵抗を受ける。したがって、エネルギー散逸は逆行の方が大きい。また、ガス抵抗によってエネルギーが大きく散逸されるのは、ガス密度が大きい円盤内側の領域を通過したときであるため、微惑星の惑星に対する最近距離を考えることで、エネルギー散逸を見積もることができる。ランダム速度が小さい場合と大きい場合の2つの極限について、順行と逆行それぞれの解析解を得て、数値計算はそれに概ね一致することが分かった。

これを用いて、捕獲について考える。Hill 圏内で微惑星の力学的エネルギーが0以下となれば、微惑星は周惑星円盤によって捕獲されたとみなせる。エネルギー散逸量が無限遠での微惑星のエネルギーの値と等しくなる時の惑星からの距離を、捕獲半径とおく。これについても、2次元の場合はエネルギー散逸から解析解を得ることができる。さらに、ランダム速度が大きい場合については、捕獲半径と衝突確率から捕獲確率も解析的に得られる。実際に、捕獲確率の計算結果は解析解に一致することが分かった。捕獲頻度については、捕獲確率を解析的に積分することが困難であるため、数値積分と解析解との比較を行った。

3次元の場合は、微惑星が円盤をどのように通過するかは軌道傾斜角や近点経度によるため、エネルギー散逸の見積もりはさらに複雑になる。したがって、この場合は解析解を得ることが困難であるため、主に数値計算の結果に対して議論を行う予定である。

キーワード: 周惑星円盤, ガス抵抗, 衛星

Keywords: circumplanetary disk, gas drag, satellite

周惑星円盤の形成と進化における磁気乱流の効果 The Effect of Magnetic Turbulence on the Formation and Evolution of Circumplanetary Disks

藤井 悠里^{1*}, 奥住 聡¹, 谷川 享行², 犬塚 修一郎¹

FUJII, Yuri^{1*}, OKUZUMI, Satoshi¹, TANIGAWA, Takayuki², Inutsuka Shu-ichiro¹

¹名古屋大学, ²惑星科学研究センター

¹Nagoya University, ²Center for Planetary Science

本研究では周惑星円盤の降着進化を理解することを目指し、周惑星円盤において磁気乱流が円盤のガス降着に重要であるかどうかを調べた。

母惑星の赤道面に公転軌道面をもち、ほぼ円軌道で回転する衛星は規則衛星と呼ばれる。周惑星円盤はこの規則衛星の形成現場であると考えられており、衛星形成を理解するためには、周惑星円盤進化の理解が不可欠である。しかし、周惑星円盤の降着メカニズムは詳しく分かっていないため、円盤ガスの降着率や面密度もよく分かっていないのが現状である。円盤ガスの降着メカニズムとしては、磁気回転不安定性 (Magnetorotational Instability: MRI) が最も有力であると考えられている。しかし、MRI が起こる領域の大きさは仮定しているモデルに依存すると考えられる。

モデルによる不定性をなくすためには、原始惑星系円盤から周惑星円盤への流入質量フラックスを調べ、これを用いて周惑星円盤の面密度分布を求めることが望ましい。周惑星円盤への流入質量フラックスは Tanigawa et al.(2012) によって詳細な解析が行われた。本研究ではこの質量フラックスを用いて円盤の拡散方程式を解き、周惑星円盤の面密度分布を求めた。そして、Fujii et al.(2011) で開発した計算法を用いて円盤の電離度を調べ、MRI が起こるかどうかを見積もった。その結果、周惑星円盤の降着初期には MRI 起源の乱流は発生しないことが分かった。

キーワード: 周惑星円盤, 磁気乱流, 衛星形成

Keywords: circumplanetary disks, magnetic turbulence, satellite formation

原始惑星の合体条件 :組成とサイズの依存性について MERGING CRITERIA FOR GIANT IMPACTS OF PROTOPLANETS : Dependence of Their Composition and Size

藤田 智明^{1*}, 玄田 英典¹, 阿部 豊¹

FUJITA, Tomoaki^{1*}, GENDA, Hidenori¹, ABE, Yutaka¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

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

地球型惑星形成の最終段階では、火星サイズの原始惑星同士の衝突(巨大天体衝突)が頻繁に起こったと考えられている。巨大天体衝突は、惑星系の最終的な惑星の個数やそれぞれの大きさ、更には月の形成や水星の巨大金属コアの形成などに影響を与えることがわかっている(例えば Kokubo and Genda 2010)。したがって原始惑星同士の衝突現象の物理を詳細に知ることは、太陽系の地球型惑星の初期進化や惑星の特徴を知る上で重要である。また、近年、太陽系外の惑星が多数発見されるようになり、地球の数倍の質量を持つ惑星(super-Earths)や、大部分がH₂Oでできているような惑星が、恒星の近くで多数発見されている。このような惑星の形成の最終段階においても惑星サイズ同士の衝突が頻繁に起こったと考えられている(Ogihara and Ida 2009)。

Genda et al. (2012)では、太陽系の地球型惑星形成の最終段階で起こる巨大天体衝突に注目し、鉄と岩石からなる火星サイズから地球サイズの原始惑星同士の衝突シミュレーションを様々な衝突パラメータで行い、原始惑星の合体条件を詳細に調べた。その結果、太陽系で起こったとされる巨大天体衝突の約半数は、実は、合体しない衝突であることが明らかになった。

しかしながら、Genda et al. (2012)で求めた合体条件は、系外惑星として発見されているsuper-EarthsやH₂Oを主成分とする惑星の形成には適用できない。そこで、本研究では、H₂Oを主成分とする原始惑星やサイズが地球よりも大きいsuper-Earths同士の天体衝突を様々な衝突パラメータでシミュレーションを行い、合体条件を求め、Genda et al. (2012)の結果と比較する。

計算手法は粒子法的一种であるSmoothed Particle Hydrodynamic法を用いており、惑星の質量、惑星の組成、衝突速度、衝突角度、等のパラメータを変化させ、衝突計算を行った。具体的には、惑星の質量は火星のサイズから地球質量の10倍サイズまで、惑星の組成は氷、岩石、鉄の3種、衝突角度は正面衝突に近い角度からぎりぎりかすめる程度の角度までをそれぞれ扱い、衝突後の2惑星が最終的に合体する場合とそのまま離れていく場合の境界となる「境界衝突速度」を決定することで、合体条件を求めた。

その結果、火星質量サイズで、コアが岩石かつマントルが氷の惑星同士を衝突させたとき、その合体条件はGenda et al. (2012)の結果と一致した。同様に、岩石のみでできた火星質量サイズの惑星同士、氷のみでできた火星質量サイズの惑星同士の衝突も、それぞれGenda et al. (2012)の結果と一致した。このことから、原始惑星の合体条件は、そのサイズが地球サイズ以下であれば、惑星の組成には依存しない、ということがわかった。

一方、組成の異なる2つの原始惑星(例えば、氷惑星と岩石惑星)を衝突させた計算も行ったが、この場合は、Genda et al. (2012)の結果とは大きく異なり、より遅い速度でしか合体しないという結果が得られた。衝突シミュレーションの結果を見ると、密度の高い原始惑星が密度の低い原始惑星の内部を突き抜けるようなことが起こっており、このことが、原始惑星同士を合体させにくくしている可能性がある。

また、地球質量の10倍の惑星(鉄と岩石からなる)同士を衝突させたところ、合体条件は、先行研究と大部分は一致したが、正面衝突に近い高速での衝突では合体しにくかった。このことから、サイズの大きな惑星が高速で衝突する際は、合体条件が厳しくなることがわかった。結果が異なった理由として、岩石の蒸発があげられる。火星サイズや地球サイズの天体衝突では大規模に岩石の蒸発は起こらないが、地球の10倍程度の天体衝突では、大規模に岩石が蒸発することがシミュレーションからわかった。このような大規模な岩石の蒸発によって天体同士の合体が阻害された可能性がある。

引用文献

Genda, H., Kokubo, E., and Ida, S., Merging Criteria for Giant Impacts of Protoplanets, *ApJ* 744, 137, 2012.

Kokubo, E., and Genda, H., Formation of Terrestrial Planets from Protoplanets Under a Realistic Accretion Condition, *ApJ* 714, L21-L25, 2010.

Ogihara, M., Ida, S., N-Body Simulations of Planetary Accretion Around M Dwarf Stars, *ApJ* 699, 824-838, 2009.

キーワード: 巨大天体衝突, 系外惑星, 合体条件, 原始惑星

Keywords: giant impacts, extrasolar planets, merging criteria, protoplanets

降着円盤内の惑星移動と地球型惑星の形成について Planetary migration in accretion disks and formation of Earth-sized planets

山田 耕^{1*}, 稲葉知士²

YAMADA, Kou^{1*}, Satoshi Inaba²

¹ 神戸大学惑星科学研究センター, ² 早稲田大学国際教養学部

¹Center for Protoplanetary Science, Kobe University, ²School of International Liberal Studies, Waseda University

Protoplanets form in a disk surrounding a young star. A low-mass protoplanet interacts with a gas disk gravitationally, which leads to a decrease in its semi-major axis. This is called the Type I migration of a planet. It is believed that the Type I migration is one of the most important physical processes in planetary formation. It is caused by the torques acting on a protoplanet by a disk. Recently, it was shown that a protoplanet is possibly trapped in a disk. Hasegawa & Pudritz(2011, MNRAS) comprehensively examined various mechanisms to halt the planet migration in a disk. They showed that a protoplanet might be trapped at the ice line, inside of which all the ice is evaporated and solid particles are composed of rocks and metals. The different opacity laws are used inside and outside of the ice line, resulting in a steep and shallow temperature distributions in the inner and outer regions, respectively. The large corotation torque acting on a protoplanet due to the steep temperature distribution suppresses the negative Lindblad torque in an inner region. On the other hand, the corotation torque on a protoplanet is too weak to cancel the negative Lindblad torque in an outer region. A protoplanet inside and outside of the ice line moves toward the ice line and is expected to accumulate at the ice line. However, it was shown that density waves can be altered by a thermal structure of a disk (e.g., Yamada & Inaba, 2011, MNRAS). It is not clear if protoplanets accumulate at the ice line even when we include dissipation processes in a disk. We make global two-dimensional hydrodynamic simulations and systematically examine the total torque acting on a protoplanet by an optically thick accretion disk, taking dissipation processes in a disk into account.

We study the type I migration of a protoplanet in disks with various opacities. We find that the total torque acting on a protoplanet by a disk strongly depends on opacity of the disk. We adopt a realistic opacity model and find that the sign of the total torque could change around the ice line of a disk. It is found that the total torque becomes zero in the region inside of the ice line if the timescale for the viscosity is nearly equivalent to the turnover time in the horseshoe orbit. This means that the accretion rate of the disk needs to be smaller than 2×10^{-8} solar mass/yr for the protoplanet to move outward in the optically thick accretion disk. Furthermore, using the N-body simulations, we investigate whether the accumulation of protoplanets around the ice line can accelerate further growth of protoplanets or not.

キーワード: 惑星系, 惑星移動, 地球型惑星, タイプ I 移動, 密度波

Keywords: planetary system, planetary migration, terrestrial planet, type I migration, density wave

紫外線と水による鉄カンラン石の変化 Change in fayalites with ultraviolet rays and water

小森 信男^{1*}
KOMORI, Nobuo^{1*}

¹ 大田区立南六郷中学校

¹Minamirokugo junior high school

筆者は、紫外線と水による岩石の風化変質を実験的に調べる継続研究を中学校科学部の生徒研究として行っている。火星上に酸化鉄が多い原因の一つを明らかにするという目的のためである。

今回は、精製水に浸した八丈島産鉄カンラン石に紫外線を照射しその変化を調べた。火星上には、玄武岩が多く、この中には鉄カンラン石がおそらく存在する。また過去の火星上には水が存在していたと推定されている。そのため過去の火星においては、紫外線と水が、岩石を変質させる要因の一つになったと考える。

この研究では、精製水を満たした石英試験管に10g程の鉄カンラン石を入れた。鉄カンラン石は、3～5mm程度の粒状であり、暗緑色を呈している。そして254nmをピークとする紫外線を照射した。

対照実験として、同じ条件で紫外線を照射しない実験も行った。紫外線は3ヶ月照射した。なお、照射開始時の照度は40W/m²程である。

紫外線を照射したのものにも照射しないのものにも、薄褐色の0.1mm以下の微粒子が多数生じた。この微粒子の数は、紫外線を照射したものの方がずっと多い。この微粒子は、EPMAによる分析から、主に非晶質の水酸化鉄と考えられる。

以上のことから、紫外線は、水に浸した鉄カンラン石の酸化を促進すると考えられる。火星表面には、過去において水が存在していたことが、明らかになりつつある。火星表面においても紫外線と水によって、岩石中の鉄カンラン石の酸化が促進された可能性はあると考える。

キーワード: 紫外線, 水, 鉄カンラン石, 水酸化鉄, 火星

Keywords: ultraviolet rays, water, fayalite, iron(III) oxide hydroxide., Mars



変形実験から考えられる金星と地球のレオロジー層構造とテクトニクスの相違 Difference on tectonics and rheological structure of Venus and Earth inferred from deformation experiments

東 真太郎^{1*}, 片山 郁夫¹, 中久喜 伴益¹

AZUMA, Shintaro^{1*}, KATAYAMA, Ikuo¹, NAKAKUKI, Tomoeki¹

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Earth and Planetary Sciences System, Hiroshima university

これまで金星は密度、質量、体積、太陽の距離などから地球とよく似た地球型惑星だと考えられていた (Taylor and McLennan, 2008)。しかし現在では、Magellan mission によって、金星は温度、水、大気、地形、そして生命において地球とはかなり異なり、さらにプレートテクトニクスが働いていないことが明らかにされ、同じ地球型惑星でも金星は全く違う進化を辿ってきたと考えられている (e.g., Turcotte et al., 1999)。プレートテクトニクスは地球において最も重要な物質循環の1つである。そのため、このプレートテクトニクスの欠如が地球と金星の違いを生み出した1つの要因であると推察される。プレートテクトニクスを考える上で重要なものとして、惑星内部の強度や変形を考察するレオロジーが挙げられる。なぜなら岩石のレオロジーが惑星内部の強度や変形メカニズムを支配し、テクトニクスに大きな影響を与えるからである。先行研究では、金星のレオロジー層構造やテクトニクスは地殻を構成していると考えられるダイアベースの流動則を室内実験から求め、金星内部の温度・圧力に外挿することによって考察されてきた (e.g., Mackwell et al., 1998)。彼らによると金星の下部地殻と上部マントルには大きい強度コントラストが期待され、デカップリングを起こしている可能性が示唆されている。本研究では流動則からの外挿ではなく、改良型 Griggs で斜長石 (下部地殻の主要構成鉱物) とオリビン (上部地殻の主要構成鉱物) を用いて2相系で変形実験を行い、直接強度比を決定しようと試みた。実験条件は $T=400-1000$, $P=1\text{GPa}$ である。また金星の表面温度 $T=470$ であることから、かなりドライな惑星であると考えられ (e.g., Kaula 1990)、地球との違いも評価するために wet と dry 両方の条件で実験は行った。wet 条件の場合、オリビンと斜長石の相対強度が温度に敏感で、600 を境界に逆転することが明らかになった (Azuma et al., 2010)。これは転位クリーブの外挿からでは起こりえないこと、さらに実験中におけるオリビンの温度と応力をプロットすると、power-law タイプの流動則から明らかに外れることから、オリビンの変形メカニズムが低温では Peierls メカニズムが支配的になっていることが示唆される。一方 dry 条件では、全ての温度条件でオリビンが斜長石よりもかなり強度が大きいことが確認された。この dry 実験より得られた強度比から金星内部のレオロジー構造を推察し、さらにプレートテクトニクスにより沈み込んでいる地球の海洋リソスフェアとの違いも考察した。まず地球の場合、海洋リソスフェアのレオロジー層構造は Byerlee 's law と power-law creep によってよく制約されている (e.g., Kohlstedt et al., 1995)。それによると、海洋リソスフェアのモホ面はまだ脆性破壊領域であり、地殻と上部マントルの間に強度のコントラストは無いと考えられる。そのため、地殻と上部マントルはよくカップリングし、一緒に地球深部へと沈み込むことができる。一方、金星のリソスフェアのレオロジー層構造を推察するとき、地殻の厚さを考えなければならないが、現在正確な金星の地殻の厚さは分かっていない。今回、地殻の厚さを 7 km と仮定した。本研究の実験結果から金星のレオロジー層構造を考えると、下部地殻と上部マントルの間に大きい強度コントラストが期待できる結果となった。下部地殻と上部マントルの強度コントラストが大きいとデカップリングを起こす可能性が考えられる。この弱い下部地殻によって起こるデカップリングが強い上部マントルの変形から上部地殻を切り離し、地殻の水平移動を妨げていることが期待される。さらに強度の小さい物質は強度の大きい物質に沈み込むことは困難であることが予想されるため、リソスフェアの地殻の部分はマントル中に沈み込むことができない。以上のことから、この地殻とマントルのデカップリングが金星のプレートテクトニクスを阻止した1つの要因ではないのかと考察される。現在、この実験結果と金星のレオロジー層構造のモデルを用いて数値シミュレーションを行い、どのようなテクトニクスが起こるか検証している。その結果も併せて報告する予定である。

キーワード: 斜長石, オリビン, 強度比, 金星, レオロジー, プレートテクトニクス

Keywords: plagioclase, olivine, strength contrast, venus, rheology, plate tectonics

ユゴニオ曲線に沿った高精度な半解析的状态方程式 An highly accurate semi-analytical EOS along Hugoniot curves

杉田 精司^{1*}, 黒澤 耕介², 門野 敏彦³, 佐野 孝好³

SUGITA, Seiji^{1*}, KUROSAWA, Kosuke², KADONO, Toshihiko³, SANO, Takayoshi³

¹ 東京大学, ² 宇宙科学研究所, ³ 大阪大学

¹University of Tokyo, ²JAXA/ISAS, ³Osaka University

Recent rapid development of shock compression technology has revealed many exciting properties of geologic materials under highly shock-compressed states. A number of very sophisticated thermodynamics-based equations of state (EOS), such as SESAME and M-ANEOS, have been developed. These numerical EOS codes, however, use many model parameters to reproduce experimental data. Thus, it is difficult to find the optimum model parameters uniquely, requiring extensive experiments covering a wide range of thermodynamic conditions.

Such complex EOS's have widely been considered necessary because physics behind the EOS of highly shock-compressed geologic materials is very complicated. In fact, recent experimental result using high-power laser have revealed further intricate properties of silicates under high compression conditions, such as large departure of isochoric specific heat C_v from Dulong-Petit limit due to molecular dissociation and ionization. In order to incorporate such complex properties into a thermodynamics-based EOS properly, physics behind these materials needs to model well.

Such thorough understanding of material properties is essential for building a versatile EOS for hydro-code calculations. However, many planetary applications requires only thermodynamic properties along Hugoniot compression curve. For example, estimation of the fractions impact melt/vapor and the final molecular composition of impact vapor plume requires only the entropy gain due to initial impact shock. In this study, we propose a semi-analytical formula of on-Hugoniot EOS derived from the differential form of Rankine-Hugoniot equation and compare it with conventional EOS's and experimental data.

Most condensed matter under shock compression is known to follow the linear velocity relation between particle velocity U_p and shock velocity U_s :

$$U_s = C_0 + s U_p, (1)$$

where C_0 , and s are bulk sound velocity and a constant, respectively. This relation is known to hold for a variety of materials over a wide range of impact velocity. Despite the wide applicability of this relation, most EOS's do not take advantage of this relation. Besides the U_p - U_s relation (1), we use only general thermodynamic relations, the differential form of Rankine-Hugoniot relations, and Gruneisen EOS. From these relations, we obtain ordinary differential equations for temperature T and entropy S .

For extremely high-pressure shocks, C_v is not approximated by a constant value well; it may become well above Dulong-Petit limit. The effect of specific heats can be calculated easily with our new EOS. Although there is good agreement among different EOS's at relatively low shock pressures (~ 150 GPa), different EOS's yield significantly different results at higher shock pressures (several hundred GPa). This scatter results from the fact that there are not many experimental data available in the higher shock pressure range. Under such conditions, our EOS is useful because it does not require many data points to make accurate predictions along a Hugoniot curve. It can also be used as an anchor for the more sophisticated EOS for Hugoniot conditions.

Furthermore, because C_v is a very important property to characterize condensed matter, the capability to derive C_v from temperature data is very useful. A couple of examples of comparisons between our recent experimental data and our EOS predictions are obtained. The quartz data at 150 GPa requires C_v significantly larger than $3R$, but the shock temperatures of diopside at ~ 300 GPa is consistent with the Dulong-Petit value. Such difference in C_v among different silicates is of great importance in planetary science.

キーワード: 天体衝突, 高圧状態方程式, ユゴニオ, 高速度衝突

Keywords: shock compression, High pressure EOS, hypervelocity impact

衝突閃光の岩小天体と氷小天体による違い How impact flashes differ between rocky impactors and icy impactors

柳澤 正久^{1*}
YANAGISAWA, Masahisa^{1*}

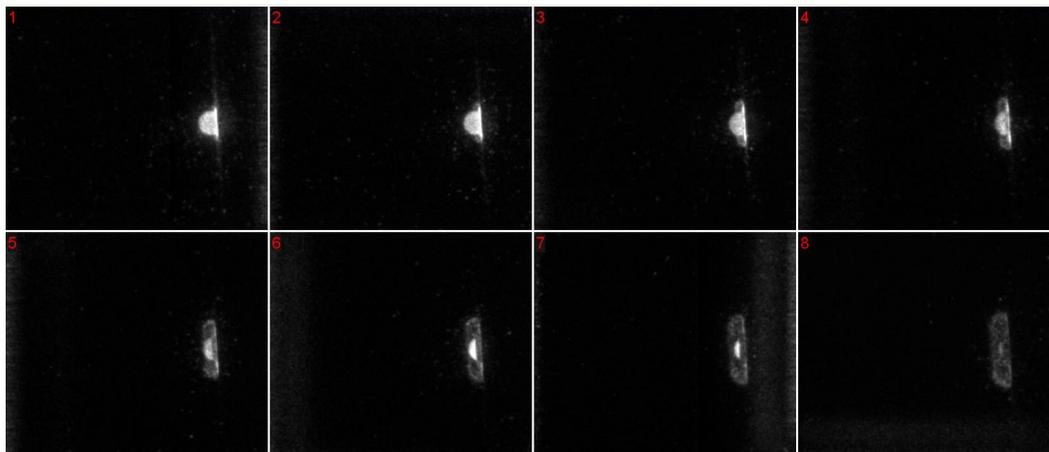
¹ 電気通信大学
¹ Univ. Electro-Communications

弾丸が数 km/s という高速度で衝突すると閃光を発する(衝突閃光)。我々は ISAS/JAXA の二段式軽ガス銃を用いて、ナイロン 66 の球形弾丸(直径 7mm) をナイロン 66 のブロックに秒速 7km で衝突させ、現象を超高速度カメラ(nac ULTRA Neo)で撮影するとともに、衝突閃光をフォトダイオードで計測した。フォトダイオードから求めた光度曲線には、弾丸が貫入する時間幅、すなわち、弾丸直径を速度で割った時間幅(約 1 マイクロ秒)のパルスが存在する。この間、超高速度カメラは、ブロックに陥入しつつある弾丸が明るく光っている様子を捉えている(図を参照、shot1545)。図の左から右、そして上段から下段への 8 枚の画像は、50ns 毎に撮影されたものである(露光時間も 50ns)。球形弾丸は左から 7km/s で飛来し衝突した。弾丸と標的の衝突点付近が光り、その後、光が弱っていく様子が捉えられている。衝撃波圧縮による高温高圧部からの光が半透明のナイロン弾丸および標的を通して放射されていると考えられる。

実験結果を太陽系内での衝突現象に適用すると以下のことが言える。このパルス光は、衝突体である小天体も標的となる惑星表面も共に不透明な岩石質の場合には観測されないだろう。一方、小天体が氷でできており半透明な場合には観測される。惑星表面が氷の場合にも観測されるだろう。将来、自然界の衝突現象の超高速度撮影が可能になれば、パルス光の有無から衝突する小天体が岩石質か氷かの判別が付けられよう(惑星表面が岩石質か氷かは分かっているとして)。小惑星や木星の衛星に衝突する小天体が岩石質と氷とでどのような数割合になっているかという問題への一つの観測的研究手段となることも期待できる。

なお、本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部スペースプラズマ共同研究設備の支援を得て行われた。また、超高速度カメラ nac ULTRA Neo による撮影は株式会社ナックの支援を得て行われた。

キーワード: 高速度衝突, 衝突閃光, 太陽系小天体
Keywords: high velocity impact, impact flash, small solar system objects



空隙の高い小天体に捕獲される高速ダスト粒子の貫入物理過程 Physical Process on Penetration of High Velocity Dusts Captured by Very Porous Small Bodies

岡本 尚也^{1*}, 中村 昭子¹, 黒澤 耕介², 長谷川 直², 池崎 克俊³, 土山 明³

OKAMOTO, Takaya^{1*}, NAKAMURA, Akiko¹, KUROSAWA, Kosuke², HASEGAWA, Sunao², IKEZAKI, Katsutoshi³, TSUCHIYAMA, Akira³

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙科学研究所, ³ 大阪大学大学院理学研究科

¹Department of Planetary Science, Graduate School of Science, Kobe University, ²Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ³Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

太陽系の小天体は始原的な天体だと考えられている。それらはガスとダストの円盤の中で合体・衝突を通して成長し、ガス円盤が晴れ上がった後はデブリ円盤内を運行したことが考えられる。このとき天体が運行することでダストを掃き集めることができる。特に空隙が大きく強度の小さな小天体では、ダスト捕獲の可能性が考えられる。そのようなダストは小天体のオリジナル物質ではなく、その天体の形成場所とは別の場所からやってきたダストである可能性が考えられる。そして、たくさんのダストの衝突は天体の表層構造や表面組成に影響を及ぼすであろう。

本研究の目的はそのような空隙の大きな小天体にダストが衝突したときにどのような物理過程を引き起こすのかを理解することである。これを解決するために高空隙な天体を模擬したターゲットを作成し、衝突実験を行った。

我々は高空隙率を持つターゲットを3種類作成した。ソーダライムガラスホウケイ酸を組成とする中空ガラスビーズを用いて焼結条件を変えることで空隙率94%と87%の焼結体を得た。また、低アルカリガラスを組成とする中空ではないビーズを焼結させて空隙率80%の焼結体を得た。

実験は宇宙科学研究所にある二段式軽ガス銃で衝突速度1.7-7.2km/sの範囲で行った。弾丸にはチタン、アルミニウム、玄武岩、ステンレスを用いている。弾丸の減速過程を調べるためにフラッシュX線を使用した。これによりターゲット内部を通過中の弾丸が撮影できる。この画像から、弾丸が抵抗係数、ターゲット密度、弾丸の断面積、弾丸速度の2乗に比例する抵抗を受けるとして解析を行った。

解析においてこれらは全てターゲット通過中に時間変化しないものとした。抵抗係数は初期動圧が増すとともに増加する結果を得た。

また、大阪大学にあるCT撮像装置を用いて弾丸が貫入して作った衝突トラックの形状を調べ、トラック体積・弾丸潜り込み深さを測定した。トラックの形状は衝突速度が遅いとき細長いニンジン型、衝突速度が速いときには太短いカブ型が観察された。これらはエアロジェルへのダスト貫入によってできるトラック形状と似ている(Horz et al.2006)。終端に残った粒子を調べると元の形を残しているものから、サイズが確認できないほどばらばらになったものもあった。

画像からトラック形状のプロファイルをとり、トラック体積を算出した。トラックの体積は弾丸の運動エネルギーとともに増加する。このような傾向はポリスチレンやポリウレタンなどの低密度物質に密度の大きな弾丸を衝突させたときに見られる(Kadono 1999)。終端粒子が元の形状をいくらか残しているとき、弾丸の運動エネルギーはトラックの質量に比例している。

本発表ではこれらの結果を元に、弾丸の潜り込み深さを予測するモデルを立てる。エアロジェルに弾丸が貫入しニンジン型のトラックを形成したときのモデルはNiimi et al.2011にある。これは速度の速いところでは上記の速度の2乗に比例した抵抗を受けるが、速度が遅くなってきたところでは、ターゲットの強度に比例した抵抗を受けるモデルである。Niimiモデルに必要な修正を行い、本実験の潜り込み深さとモデルの潜り込み深さとを比較し、議論する。

キーワード: 空隙率, 太陽系小天体, フラッシュX線, 抵抗則

Keywords: Porosity, Small bodies, Flash X-ray, Deceleration

衝突による高空隙率天体の運動量変化：弾丸衝突実験 Experimental Study on Momentum Change of Porous Small Bodies by Collisions

青木 隆修^{1*}, 中村 昭子¹, 岡本 尚也¹, 長谷川 直²

AOKI, Takanobu^{1*}, NAKAMURA, Akiko¹, OKAMOTO, Takaya¹, HASEGAWA, Sunao²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Japan Aerospace Exploration Agency

小天体の運動に影響を与える重力以外の作用にはヤルコフスキー効果等の電磁波の放射によるもののほかに、小天体同士の衝突が考えられる。また、地球に接近する小惑星に宇宙機を衝突させて軌道を変更させる構想もある。これらのことを研究する上で小天体とその天体に比べて小さな物体の衝突による運動量変化を知ることがとても重要であると考えられる。ターゲット質量に比べて無視できる質量の小弾丸がターゲットにめりこむ衝突においてその前後で運動量は総量が一致するはずだが、ターゲット質量を一定と考えると衝突の反対方向に放出されるエジェクタの影響でターゲットの運動量は見かけ上増えることがわかっている。衝突後のターゲットの運動量の衝突前の弾丸の運動量に対する比を運動量移行効率と言う。運動量移行効率を測定するための室内衝突実験は今まで数多く行われてきており、モルタルの球体ターゲットにナイロン球を衝突させる実験において、弾丸の速度が大きくなるほど線形に移行効率が大きくなることがわかっている (Sirono et al. 1993)。しかし先行研究の多くはターゲットが低空隙率で強度が大きいものであった。近年の研究で、253Mathilde や 283Emma のような非常に空隙率が高いメインベルト小惑星が存在することがわかった (Baer et al. 2011)。これらの天体の空隙率はともに 50 % を超える。さらに空隙率が 40% ほどであるイトカワの表面は岩塊で覆われており、母天体が破壊され破片が再集積してできたラブルパイル天体で、再集積後何度も衝突を経験していることがハヤブサの観測でわかった。これらの衝突によってイトカワの軌道が再集積後からどれほど変化するかは様々な速度で衝突する小質量物体からの運動量移行効率を考慮することによって、理解をより深められるだろう。

そこで今回の実験では高空隙率のターゲットへの高速衝突実験を行ない、運動量の移行効率をもとめた。まず円柱ターゲットを 2 本の糸で吊り、それに二段式軽ガス銃によって 7.5km/s 以下で弾丸を衝突させ、弾丸からターゲットへの運動量移行効率を解析した。弾丸はアルミニウムとチタンで、ターゲットとしてはソーダライムホウケイ酸ガラス焼結体、低アルカリガラス焼結体、海砂の 3 種類の高空隙率ターゲットを用いた。それぞれの空隙率は 40~93 % である。解析には 3 台のハイスピードカメラをつかった。

ハイスピードカメラ画像を解析した結果、低空隙率物体に対する衝突実験と同様にエジェクタが弾丸運動量の数 10 % の運動量を担う場合があることがわかった。

キーワード: 空隙率, 小惑星, 衝突, 軌道

Keywords: porosity, asteroid, impact, orbit

同サイズ微惑星の低速度衝突に関する実験的研究：衝突破壊強度と破片速度の角度依存性

Low-velocity impact experiments on equal-sized planetesimal collisions

河本 泰成^{1*}, 保井 みなみ², 篤生 有理³, 荒川 政彦¹

KOMOTO, Yasunari^{1*}, YASUI, Minami², SHIMAKI, Yuri³, ARAKAWA, Masahiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環, ³ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ³Graduate School of Environmental Studies

太陽系の惑星は多孔質の微惑星同士が衝突破壊、再集積を繰り返すことで成長した。特に衝突成長の初期においては、同サイズの微惑星同士が脱出速度（数 10m/s）程度で衝突し、正面衝突に限らず様々な角度で衝突したと考えられている。先行研究 Arakawa (1999) では、弾丸・標的質量比 0.13、衝突速度 150-700m/s、衝突角度 0°-50° の氷球の斜め衝突実験を行い、破片の最小飛翔速度 (v_{min}) と衝突角度 (θ) との間に $v_{min}=A(\cos\theta)^{3.2}$ の関係があることを見つけた。本研究では、岩石微惑星と氷微惑星を模擬した試料を用いて、100m/s 以下の低速度における斜め衝突実験を行い、先行研究との比較から、斜め衝突破壊に対する弾丸・標的質量比の影響を調べた。実験では、衝突破壊強度と破片の飛翔速度を測定し、構成物質・衝突角度の依存性を調べた。

実験は一段式軽ガス銃を用いて行った。試料は氷と空隙率 55% の石膏を用い、岩石微惑星と氷微惑星をそれぞれ模擬した。試料は全て直径 30mm の球であり、これを弾丸と標的に用いた。石膏試料を用いた実験は神戸大学で行い、氷試料を用いた実験は北海道大学・低温科学研究所の大型低温室 (-10 °C) で行った。衝突速度 (v_i) は正面衝突では 12.5-83.3m/s と変化させた。一方、斜め衝突では 65-75m/s で一定とした。斜め衝突の衝突角度は 0-75 ° で、15 ° 刻みとした。衝突破片は回収箱を用いて回収し、個々の破片の質量を計測した。衝突の様子は高速度ビデオカメラを用いて毎秒 3000-8000 コマの速度で撮影した。

破片速度を解析した結果、正面衝突では反対点速度 (v_a : 試料の中心に対して衝突点と対称な点での速度) と重心速度とほぼ一致し、完全非弾性衝突として説明できるとわかった。しかし氷の場合、カタストロフィック破壊が起こると、氷球同士がつぶれ、重心速度より 10~15m/s ほど遅くなった。同時に、衝突方向と垂直に細粒破片の飛び出しが観測され、その速度は最高で衝突速度と同程度になった。斜め衝突では、衝突角度が大きくなると反対点速度は小さくなった。一方、衝突点から氷球の接面上に広がるエジェクタの速度は、下流方向ではジェッティングにより衝突速度からその 1.5 倍程度まで加速されることがわかった。氷の場合、衝突角度が 0-45 ° では $v_a=20(\cos\theta)^{3.6}$ 、45-75 ° では $v_a=7.7(\cos\theta)^{0.95}$ が得られた。一方、石膏の場合、 $v_a=31(\cos\theta)^{1.3}$ が得られた。45-75 ° 衝突での氷試料や石膏試料の場合は、規格化最大破片質量が 0.5-1 の結果が多い。

衝突破壊強度 Q^* は、規格化最大破片質量が 0.5 になる時のエネルギー密度 Q で定義される。なお、 Q は弾丸の運動エネルギーを弾丸と標的の質量を合わせたもので割った値である。正面衝突の場合、氷試料では、Arakawa et al. (1995b) と Arakawa (1999) より、弾丸・標的質量比 0.003-0.13 で $Q^*=89\text{J/kg}$ が得られている。石膏の場合、Yasui and Arakawa (2011) より、弾丸・標的質量比 0.027-0.56 で $Q^*=446\text{J/kg}$ が得られている。今回の実験の結果、同サイズ球の衝突でも、氷・石膏共にこれらの先行研究と同じような衝突破壊強度を示した。斜め衝突の場合、氷・石膏共に衝突角度に比例して最大破片も大きくなり、氷の場合 $m_f/M=0.044(\cos\theta)^{-1.4}$ 、石膏の場合 $m_f/M=0.44(\cos\theta)^{-0.62}$ が実験結果から得られた。また、斜め衝突の場合、弾丸速度の、衝突点の接面に垂直な成分が標的破壊に重要であると考え、 $Q_{ob} = Q(\cos\theta)^2$ をパラメータとして斜め衝突のデータを整理した。その結果、正面衝突と斜め衝突でデータの差異はほとんど見られなくなった。斜め衝突での破壊では、衝突速度の衝突点の接面に垂直な成分 $v_i \cos\theta$ が支配的であるということがわかった。

キーワード: 斜め衝突, 微惑星, 多孔質天体, 氷天体

Keywords: Oblique impact, Planetesimals, Porous body, Icy body

二段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析: 炭酸塩岩の衝突脱ガス Shock-induced devolatilization from calcite in an open system using a two-stage light gas gun

黒澤 耕介^{1*}, 大野 宗祐², 杉田 精司³, 三重野 哲⁴, 松井 孝典², 長谷川 直¹

KUROSAWA, Kosuke^{1*}, OHNO, Sohuke², SUGITA, Seiji³, Tetsu Mieno⁴, MATSUI, Takafumi², HASEGAWA, Sunao¹

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 千葉工大 惑星探査研究センター, ³ 東大 新領域 複雑理工, ⁴ 静岡大 理 物理
¹ISAS, JAXA, ²PERC, Chiba Institute of Technology, ³Graduate School of Frontier Science, The Univ. of Tokyo, ⁴Faculty of Science, Shizuoka Univ.

We investigated shock-induced decarbonation of non-porous calcite in an open system at a wide range of peak shock pressures using a two-stage light gas gun and a quadrupole mass spectrometer. A new experimental technique that avoids chemical contamination from the acceleration gas from the gun was developed. We also conducted high-speed imaging and spectroscopic observations simultaneously to investigate the validity of our experimental procedure. We newly found that the decarbonation efficiency along the Hugoniot curve changes around 50 GPa, which is close to the predicted pressure for incipient decarbonation by ANEOS. Although shock-induced decarbonation was detected at the pressure lower than 50 GPa as well as the previous experimental studies, decarbonation may be caused by local energy concentration due to shear banding, resulting in low decarbonation efficiency. We constructed a simple theoretical model for shock-induced decarbonation during isentropic release based on the entropy method and the lever rule under our experimental condition. The predicted CO₂ amount as a function of peak shock pressure agrees well the experimental results at >50 GPa, strongly suggesting that the shock-induced CO₂ amount is determined only by the entropy for the peak shock state, incipient and complete decarbonation at the ambient pressure. We can use the new method for the quantitative measurements of the chemical composition of impact-induced gases from solid materials without any modification. The new technique is very useful to investigate the required peak shock pressure for vaporization/devolatilization of geologic materials and the final chemical composition in impact-induced vapor clouds.

キーワード: 衝突脱ガス, 気相化学分析, 開放系, 二段式軽ガス銃, 質量分析器, 炭酸塩岩

Keywords: Impact-induced devolatilization, Gas-phase chemical analysis, Open system, Two-stage light gas gun, Mass spectrometry, Carbonate

K-Pg 境界衝突起源衝撃変成石英の平面変形構造 (PDFs) 分析によるイジェクタ飛散過程の解明

Analyses of Planar Deformation Features (PDFs) of Shocked Quartz Grains Derived from K-Pg Boundary Deposits within and o

常 ユイ^{1*}, 田近 英一², 後藤 和久³, 関根 康人²

CHANG, Yu^{1*}, TAJIKA, Eiichi², GOTO, Kazuhisa³, SEKINE, Yasuhito²

¹ 東大 理 地球惑星科学, ² 東大 新領域 複雑理工, ³ 千葉工業大学

¹Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo, ²Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, ³Chiba Institute of Technology

天体衝突現象は太陽系において普遍的な現象であり、惑星の起源と進化に大きな役割を果たしてきた。とりわけ、地球における天体衝突は表層環境を大きく変化させ、生命の絶滅と進化にも重大な影響を与えた可能性がある。衝突現象は、月をはじめとする様々な天体表面の衝突クレーターの画像解析や室内実験によって研究されてきた。しかし、地球のような大気を持つ天体における巨大衝突クレーター形成過程については、必ずしもよく分かっているわけではない。衝突起源物質であるイジェクタの放出過程についても不明な点が多い。地球上の巨大衝突クレーターの代表的なものとしてメキシコ湾ユカタン半島北部に位置するチチュルブクレーターがある。チチュルブクレーターは白亜紀-古第三紀 (K-Pg) 境界の大量絶滅をもたらした小天体衝突跡として広く知られている。その規模は地球史上最大級であり、全球的に衝突飛散物が分布している。しかし、その形成過程に関しては不明な点が多い。

地球上における天体衝突で発生する飛散物 (イジェクタ) の放出過程を明らかにする手がかりとして衝突起源物質である衝撃変成石英の平面変形構造 (PDFs) がある。PDFs は高压条件 (5~30GPa) を経験した石英粒子に形成される微細な面構造で、経験した圧力によって面方位が異なることから、最大圧力の指標として利用されている。

そこで本研究では、チチュルブ衝突クレーター内の掘削試料及び衝突地点近傍のキューバにみられる K-Pg 境界堆積物中の衝撃変成石英の PDFs を解析することによって、衝突クレーター内外に堆積した衝撃変成石英の鉛直分布及び PDFs の特徴を明らかにするとともに、チチュルブクレーター近傍におけるイジェクタの堆積過程を明らかにする。

キーワード: 衝撃変成石英, K-Pg 境界, 平面変形構造 (PDFs), 衝突クレーター, 飛散物 (イジェクタ)

Keywords: shocked quartz, K-Pg boundary, planar deformation features (PDFs), impact crater, ejecta

小惑星衝突における Impactor の破壊の程度 Fragmentation Degree of Impactor in Collision between Asteroids

長岡 宏樹^{1*}, 中村 昭子¹, 三軒 一義¹
NAGAOKA, Hiroki^{1*}, NAKAMURA, Akiko¹, SANGEN, Kazuyoshi¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹ Graduate School of Science, Kobe University

はじめに: 多くの隕石は小惑星のかげらであり、コンドライト母天体は太陽系形成のごく初期に熱的活動を停止したと考えられるため、太陽系初期の情報を得られると考えられている。また、隕石は母天体ごとに、さらに化学組成ごとに分類される。しかし、様々な母天体由来と思われる岩石が混じっている隕石がある。これらの隕石は異なった天体由来の物質が破片として集まってできた角礫岩化したものであり、普通コンドライトの20%程度が角礫岩化しているという報告もある。これらは小惑星表面に存在するボルダーもしくはレゴリスに他天体の隕石が衝突し、破片が捕獲されて形成されたと考えられている (e.g. Rubin et al. 1983)。

実際の角礫岩化した隕石中の他天体由来物質の破片サイズと衝突実験で得られる隕石模擬弾丸の破片サイズを照らし合わせ関係性をみつけることができれば、隕石母天体の過去の衝突歴史を知ることができると考えられる。本研究では隕石がレゴリスに衝突し、衝突破片がレゴリスに捕獲されたことを模擬して実験を行い、弾丸の破壊の程度を明らかにすることを目的にする。

実験方法: 岩石を隕石模擬弾丸として小惑星のレゴリスを模擬した砂状の物質に撃ち込む。弾丸の加速には主に神戸大学の火薬銃を使用し、神戸大学の小型ガス銃も使用した。これまで、衝突速度167-429m/sでパイロフィライトを弾丸物質として用いた実験を行い、破片を500 μmサイズのふるいをういて回収した。

結果: 衝突エネルギー密度(本研究では弾丸の単位質量当たりの弾丸の運動エネルギーと定義した)と初期発生圧力に対する最大破片質量の関係を調べた。壊れ始めの値はパイロフィライトでは、エネルギー密度 $\sim 10^4$ J/kgとなり、これはターゲットの大きな場合の実験(Takagi et al. 1984)の値と比べると2桁大きい。また、初期発生圧力 ~ 300 MPaで壊れはじめ、パイロフィライトの圧縮強度より大きい値であることがわかった。

今後は標的となる砂の粒径・弾丸の岩石の違いの影響についても実験を行い、結果を議論する。

キーワード: 小惑星, 隕石, 衝突

Keywords: asteroid, meteorite, impact

天体表層レゴリスの熱伝導率に関するパラメータ依存性調査実験 Experimental investigation of parameter dependence for thermal conductivity of regolith

坂谷 尚哉^{1*}, 小川 和律¹, 飯島 祐一¹, 本田 理恵², 田中 智¹

SAKATANI, Naoya^{1*}, OGAWA, Kazunori¹, Yu-ichi Iijima¹, HONDA, Rie², TANAKA, Satoshi¹

¹ 宇宙科学研究所, ² 高知大学

¹Institute of Space and Astronautical Science, ²Kochi University

月や水星、小惑星表層はレゴリスで覆われている。レゴリスのような粉体の熱伝導率は真空下において、粒径、空隙率、温度、応力など様々なパラメータに依存する。月において、アポロ計画によって熱流量観測が行われ、レゴリス層の熱伝導率と温度勾配がその場測定された。しかし、レゴリス層の掘削により本来の熱伝導率とは異なる値が観測されたと考えられている (Langseth et al., 1976)。アポロ熱流量観測の補正、更に今後の天体表層でのその場熱流量観測のためには、レゴリス状態の変化による熱伝導率変化を定量化する必要がある。また、レゴリスのような粉体は真空下において、0.001 W/mK オーダーの非常に低い熱伝導率を持つ。したがって、微惑星のような小天体において強い断熱効果を持ち、その熱史に影響を与える (Akridge et al., 1998)。一方で、微小重力を持つ小天体表層のレゴリスの状態は不明確であるため、熱伝導率をモデル化しその範囲を制約する必要がある。本研は真空下において粉体の熱伝導率測定実験を行い、パラメータ依存性を調査することにより、熱輸送メカニズムを理解することを目指す。

真空環境での粉体の熱伝導率は粒子接触部を通った熱伝導の寄与 (固体伝導率) と粒子表面間の熱輻射の寄与 (輻射伝導率) の和で表される。したがって、測定された熱伝導率の意味を考えるためにはそれぞれの寄与への分離が必要である。その方法の1つが温度依存性を調査する方法であり、輻射伝導率の温度依存性を仮定することにより2つの寄与への分離を行うことができる (Watson, 1964)。Merrill (1969) はいくつかの粒径のガラスビーズを用い、この方法により固体伝導率と輻射伝導率の粒径依存性を調査した。その結果、固体伝導率は粒径の減少関数で、熱抵抗となる接触点の単位体積当たりの個数で説明できると主張された。また、輻射伝導率は粒径の増加関数であり、粒子間距離の増加によるものと解釈された。しかしながら、彼が用いたガラスビーズは粒径によって空隙率が38?50%と大きく異なっており、粒径の影響のみを反映した結果では無い可能性がある。熱輸送メカニズムを明らかにするためには、この空隙率コントロールの問題を解決し、粒径の影響のみを抽出できる実験系が必要である。そこで本発表では、粒径ごとにほぼ同じ空隙率を持つ粒径の揃ったガラスビーズを用いて、固体・輻射伝導率の粒径依存性を再調査した。

ガラスビーズは粒径53-63, 90-106, 355-425, 425-500, 710-1000 μm の5種類であり、空隙率は40?42%で、ほぼ同じ空隙率を持つ。熱伝導率は線熱法で測定した。サンプル容器の入った真空槽は恒温槽中に入れられており、系の温度を-25?50 degCまでコントロールした。先行研究と同様の方法によって、測定した熱伝導率を固体伝導率と輻射伝導率に分離し、それぞれの粒径依存性を調べた。

その結果、輻射伝導率は粒径が大きいほど高く、直線的に増加していた。これは粒子間距離の増加によるもので、接触した2つの粒子表面間を2つの平行板で近似したモデルによって説明できる。一方、固体伝導率は先行研究の傾向とは異なり、粒径の増加関数であった。先行研究との違いは空隙率コントロール精度の違いを反映しているのであろう。本研究の結果は(1)単位体積当たりの接触点数の影響のみでは説明できず、(2)1個当たりの接触面における熱コンダクタンスの影響を取り入れる必要があると考えられる。すなわち、粒径が大きいほど粒子間の接触半径は大きくなるため、接触熱コンダクタンスは増加し、(1)の影響はキャンセルされる。この2つのメカニズムを取り入れた理論モデル (Halajian and Reichman, 1969) では、固体伝導率は粒径に依存せず一定値を取ることもわかっており、理論推定値は本研究で得られた固体伝導率と同程度の値が得られた。

キーワード: レゴリス, 熱伝導率

Keywords: regolith, thermal conductivity

月惑星熱流量観測のための伸展式プローブの開発 Development of the extending probe for lunar and planetary heat flow measurement

堀川 大和^{1*}, 田中 智², 小川 和律², 小林 泰三³, 藤村 彰夫²

HORIKAWA, Yamato^{1*}, Satoshi Tanaka², Kazunori Ogawa², Taizo Kobayashi³, Akio Fujimura²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 福井大学

¹Tokyo University, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Fukui University

月惑星における熱流量観測は、その惑星の内部活動状況や形成初期の熱的状态、材料物質に制約を与える手法として重要である。特に月の地殻熱流量は、内部に含まれる U や Th などの放射性発熱元素量に大きく寄与していると考えられており、また放射性発熱元素は難揮発性元素、液相濃集元素であるので、熱流量観測によって放射性元素の量や分布に制約を与えられれば、巨大衝突説やマグマオーシャン説の検証に関して不可欠な情報が得られる。これまで地球以外で熱流量観測が直接実施されたのはアポロ 15、17 号の観測のみであるが、熱流量プローブの一部が地表に達しており、この部分を介して計測機まで表面昼夜間温度差の影響を受けると考えられるため、正確な熱流量値を測定できなかった可能性がある。またペネトレータなどの貫入プローブにおいては、地表には露出していないが、貫入プローブ表面にある温度計やヒーターが周りのレゴリスに対して露出していること、貫入による周りのレゴリスの圧密や貫入プローブの熱伝導による周りの温度分布の変化を考慮すると、惑星本来の熱流量値を精密に決定することは困難である。

そこで本研究では、温度計やヒーターを入れた細い伸展プローブを貫入プローブの側面から伸ばし、貫入プローブから離れた位置で温度勾配や熱伝導率を計測することを提案する。この新方式を用いれば貫入プローブによるレゴリスの物理的状态変化から熱流量観測値を補正する必要がなくなる。さらにニードルプローブ法による熱伝導率の絶対値計測を可能にし、熱流量決定精度を大きく向上させることができる。また、惑星本来の熱流量を求められるだけでなく、貫入プローブからグラスファイバーを伸展し、先端を開けてスペクトル分析を行うことで、表層下での地質・生命探査も可能となる。

伸展プローブを開発するにあたって、特に伸展プローブの長さ・直径・材料について検討していく。

貫入プローブの熱数学モデルに基づくシミュレーション解析によって、貫入後のレゴリスの温度変化を推定し、貫入プローブ表面から熱屈折が働かない位置までの最短距離を伸展プローブの長さとする。もちろん観測前は伸展プローブを貫入プローブに収納させておくので、伸展プローブの長さによっては、収納・伸展が困難になる可能性がある。伸展プローブの長さだけでなく貫入プローブでの収納・伸展方法の検討も行う。

伸展プローブの直径は、できるだけ細い方がよい。それはラインヒートソース法を用いて熱伝導率を測るとき、伸展プローブ自体の熱伝導による誤差を極力低減させるためである。またレゴリスに伸展させるとき、その伸展にかける力をより小さくするためである。しかし伸展プローブを細くしすぎると、レゴリスの力学物性によっては座屈してしまう可能性もある。月惑星表層での力学特性に近づけた圧密模擬レゴリスと伸展プローブの試作機による貫入試験を行うことで、座屈しない細さを目指す。

伸展プローブの材料はステンレスが一般的である。しかし貫入プローブに収納できないときは、伸展プローブの材料として超弾性材料や形状記憶合金などを使用し、変形させて収納することができる。また材料の質量や熱伝導率などは計測しておく必要があり、できるだけ軽質量・低熱伝導率のものを選ぶ。

今回の発表では、伸展プローブに関わる解析・実験・開発などの進捗状況を報告する。

キーワード: 熱流量, 月, 惑星, レゴリス

Keywords: heat flow, moon, planet, regolith

1.6m 北大名寄ピリカ望遠鏡搭載の北教大可視光低分散分光器による天体スペクトルカタログの作成 Spectral Atlas with Hokkyodai Spectrograph on 1.6 m Pirca Telescope at Nayoro Observatory.

関口 朋彦^{1*}, 河北秀世², 渡辺誠³

SEKIGUCHI, Tomohiko^{1*}, KAWAKITA Hideyo², WATANABE Makoto³

¹北海道教育大学, ²京都産業大学, ³北海道大学

¹Hokkaido University of Education, ²Kyoto Sangyo University, ³Hokkaido University

現在、北海道教育大学では教育学部理科教育専攻での卒業研究課題など大学教育での活用を視野にいたした天体分光データ一覧である「天体スペクトルカタログ」の作成を行っている。

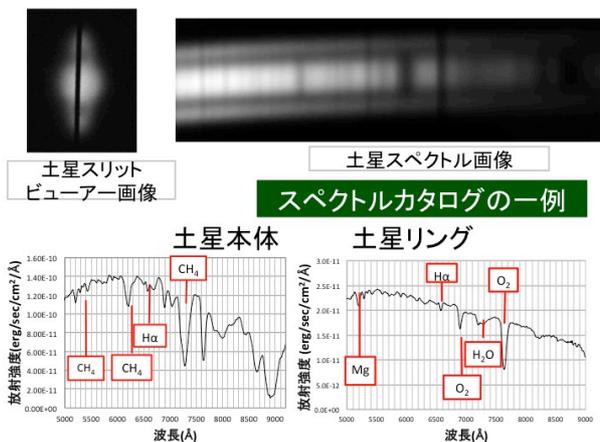
なよろ市立天文台設置の北海道大学附属 1.6m ピリカ望遠鏡は、太陽系天体特に惑星観測を目的として建設され、昨年度より本格運用に入っている。北海道教育大学ではこの望遠鏡に新規開発の可視光分光器を搭載し、2011年度より観測を開始した。この分光器は観測波長：500-900nm で、反射型回折格子を用いた波長分散：R > 300 の低分散可視光用である。

今年度は各スペクトル型を代表する恒星や輝線星雲などの基本分光データに加え、太陽系天体では惑星：水星、金星、火星、木星、土星、海王星、彗星：C/2001 P1 Garrad、小惑星：15 Eunomia のデータを取得した。これらの分光データを視覚化し、大学教育を意識した分光カタログ・アーカイブの作成を目指している。

本講演では初期年度である 2011 年の観測結果のまとめを報告する。

キーワード: 観測, スペクトル, 分光器, 可視光

Keywords: observations, spectroscopy, spectrograph, visible wavelength



ダークマターハローおよび巨大分子雲による太陽系天体の軌道進化 Orbital evolution of solar system bodies due to dark matter haloes and giant molecular clouds

鈴木 貴之¹, 樋口 有理可^{1*}, 井田 茂¹
SUZUKI, Takayuki¹, HIGUCHI, Arika^{1*}, IDA, Shigeru¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

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

本研究では、オールト雲彗星に対するダークマターハローの重力摂動の効果を調べた。オールト雲とは、太陽から数万 AU の距離に存在するとされている天体群の構造であり、長周期彗星の起源と考えられている。その天体群は直接観測する事は現在では不可能で、地球近辺で見られる長周期彗星の軌道要素からその存在が推定されている。また、それらの天体は太陽系天体の中で最も弱く太陽に束縛されており、銀河円盤、恒星、巨大分子雲などの太陽系外天体からの摂動をもっとも強く受けていると考えられる。一方、最近の N 体シミュレーションにより、ダークマター粒子は、ダークマターハローと呼ばれる球状の構造を作っている事が明らかになってきた、巨大分子雲と同様に、ダークマターハローもオールト雲天体に摂動を与えると考えられる。しかし、ダークマターハローは、銀河サイズのハローから太陽系サイズのハローまで幅広いサイズのハローが存在し、それらが総質量に等しく寄与している。これは、最も大きな物が総質量の大部分を占めている巨大分子雲や、質点と見なすことができる恒星とは全く異なった性質である。本研究では、任意のサイズ、構造を持つ太陽系外天体の影響を定式化した、この定式化は、恒星、分子雲、ダークマターハローのいずれに対しても適用できる。その結果、基本的には恒星による効果が最も大きい事が分かった、しかしながら、ダークマターハローについてはその質量-個数分布や構造に大きな不定性を持っているため、ダークマターハローが最も大きな効果を与えるようなパラメーター領域についても調べた。

キーワード: 彗星, オールト雲, 太陽系外縁天体, 巨大分子雲, ダークマターハロー

Keywords: Comet, Oort cloud, Trans-Neptunian objects, Giant molecular cloud, Dark matter halo

惑星リングに形成される自己重力ウェイクの形状 Self-gravity wakes in dense planetary rings

藤井 顕彦^{1*}

FUJII, Akihiko^{1*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹University of Tokyo

惑星環は非弾性衝突をする無数の氷粒子の集合である。粒子の間には重力がはたらくため、重力による集積と差動回転による塊の破壊の競合によって環には自己重力ウェイクとよばれる網目状の構造が形成される。これらの構造は銀河円盤などをはじめとする無衝突の重力多体系にもみられ、ウェイク構造は自己重力相互作用をする円盤に共通して存在すると考えられている。

このように普遍的に存在する自己重力ウェイクの形状には、考えている円盤の物理的特徴（質量、衝突によるエネルギー散逸の強さ、重力・潮汐力比など）が反映される。しかし、これまでに行われた惑星リングに関する研究では、円盤の性質とウェイクの形状の関係性に注目した定量的な研究は理論、数値実験ともに行われていない。我々はこのような問題意識に基づき、惑星環の局所多体数値計算を十分高速かつ高解像度で遂行することが可能なシミュレーションコードを開発した。我々はこのコードを使い、自己重力ウェイクの形状が、円盤の特徴を表す数種類のパラメータにどのように依存しているかということを系統的に調べた。なお、重力計算部分の高速化には重力多体問題専用計算機である GRAPE-DR を使用した。

今回円盤のパラメータとして採用したのは（力学的な）光学的厚さ、非弾性衝突の跳ね返り係数、重力と惑星潮汐力の比を特徴づける物理半径・Hill 半径比の3つである。また自己重力ウェイクの解析については二体相関関数を通して軌道方向との間になす角度を計算した。これらの計算を行った結果、ウェイク角度が光学的厚みおよび物理半径・Hill 半径比と正の相関がある一方で、跳ね返り係数とは目立った相関がみられないことがわかった。発表ではこれらの物理的解釈についても述べる。

キーワード: 惑星リング, 自己重力, 局所 N 体シミュレーション

Keywords: planetary rings, self-gravity, Local N-body simulation

Distribution of element abundances within achondrites Distribution of element abundances within achondrites

Peter Ness^{1*}, Hideaki Miyamoto¹
NESS, Peter^{1*}, Hideaki Miyamoto¹

¹The University of Tokyo

¹The University of Tokyo

Our understanding of the history of the solar system relies heavily on the analysis of meteorites. Many meteorites that fall to earth are achondrites, which are derived from the moon, mars (shergottites, nakhlites, chassignites) or from asteroid parent bodies (eucrites, howardites, diogenites, ureilites, iron meteorites etc). The chemistry and petrology of the different chemical groups of achondrites is known to differ substantially, which raises the question as to whether there are also major chemical differences within each/any of the various achondrite chemical groups.

To help answer this question we utilized a database that we compiled from meteorite element abundances and terrestrial from peer-reviewed papers, building on existing published databases [1-4]: we then used element abundances from these databases to analyze the major, minor and trace elements chemistry of achondrites. The meteorite database comprises 28,742 bulk chemical abundances from 2,112 meteorites compiled from 121 peer-reviewed papers published between 1953 and 2010: representing 78 atomic elements, 20 major chemistry analyses and a wide range of petrologic and chemical types. The terrestrial database comprises 71,245 bulk chemical abundances compiled from 2,848 rocks, from 66 peer-reviewed papers published between 1982 and 2011.

The results of our analysis suggest that there is no significant difference in major chemistry of most meteorites within the majority of achondrite groups. However, there can be significant differences in major chemistry for aubrites and iron meteorites. We also find that lodranites, aubrites and some meteorites from the moon and mars can also contain anomalous metal and trace elements. These anomalous element abundances often differ by many times the mean of their particular achondrite group, which might suggest that metals and other atomic elements have been injected/ depleted by hydrothermal/alteration or by other processes.

We found it difficult to analyze the major chemistry of iron meteorites due to a lack (absence) of major chemical abundances. Given that most iron mines on Earth use major chemistry for rock/material type interpretation we recommend a concerted effort to obtain better coverage of the major chemistry of iron meteorites.

The implication of this research is that a potential might exist for finding metal and trace element resources on the moon, mars, or even on some asteroid parent bodies.

キーワード: meteorites, achondrites, element abundances, distribution, major chemistry

Keywords: meteorites, achondrites, element abundances, distribution, major chemistry

レーザー衝撃圧縮された鉱物の変成と衝撃波減衰 Shock-wave decay and shock metamorphism of laser-shocked minerals

永木 恵太¹, 境家 達弘^{1*}, 近藤 忠¹, 門野 敏彦², 弘中 陽一郎², 重森 啓介²

NAGAKI, Keita¹, SAKAIYA, Tatsuhiko^{1*}, KONDO, Tadashi¹, KADONO, Toshihiko², Youichirou Hironaka², SHIGEMORI, Keisuke²

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

¹Graduate School of Science, Osaka Univ., ²ILE, Osaka Univ.

It is important to recover the shock-compressed samples for understanding the synthetic mechanism of high-pressure phase, shock metamorphism and shock-melt vein in meteorites. In the past, many impact experiments have been conducted by using explosive or gas guns. In fact, although high-pressure phase in meteorites is recovered by the impact experiments (impact velocity is 1.5km/s and shock pressure is 26GPa) [1], the impact velocity in these methods is limited below 10km/s less than second escape velocity on the Earth. Recently, impact experiments at the velocity over 10km/s were conducted by using projectiles which were accelerated by high-power laser [2].

We developed the recovery technique of the laser-shocked materials at higher pressures (130-460GPa) in high-power laser system and estimated the pressure range of the production conditions from analyzing the structure of the shock metamorphism. We used the single crystal olivine (from San Carlos, USA) which is a major mineral of meteorites and of the Earth. We used the aluminum recovery cell. On this cell, titanium plate was located in the front of olivine to prevent the sample from being blow off. We used GXII/HIPER laser system at Institute of Laser Engineering (ILE), Osaka University [3]. The deformation, fracture and phase identification of the recovered olivine were observed comprehensively by optical microscopy, field emission-scanning electron microscopy (FE-SEM), electron backscatter diffraction (EBSD) and micro-Raman spectroscopy.

We recovered about 100 wt.% of the sample. There were some distinctive structures in the recovered sample. We estimated the shock wave attenuation rate from the distribution of these structures. The attenuation rates were 2.2-2.9 in our experiments. These attenuation rates were larger than that in previous experiment [4] and simulations [5, 6].

Part of this work was performed under the Joint Research of Institute of Laser Engineering, Osaka University.

References

- [1] Tschauer, O. et al., Proceedings of the National Academy of Sciences, 106, 13691-13695, 2009.
- [2] Kadono, T. et al., Journal of Geophysical Research, 115, E04003, 2010.
- [3] Yamanaka, C. et al., Nucl. Fusion, 27, 19-30, 1987.
- [4] Nakazawa, S., et al., Icarus, 156, 539-550, 2002.
- [5] Ahrens, T. J., and J. D. O'Keefe, Int. J. Impact Eng., 5, 13-32, 1987.
- [6] Pierazzo, E., et al., Icarus, 127, 408-423, 1997.

キーワード: 衝撃波, 変成, オリビン, レーザー, 回収, 実験

Keywords: Shock wave, Metamorphism, Olivine, Laser, Recovery, Experiment

レーザー衝撃を受けたマーチソン隕石由来の揮発性成分と回収試料の分析 Analysis of volatile components and recovery samples of laser-shocked Murchison meteorite

中林 誠^{1*}, 薮田 ひかる¹, 境家 達弘¹, 近藤 忠¹, 大野 宗祐², 門野 敏彦³, 重森 啓介³, 弘中 陽一郎³, 山中 高光⁴
NAKABAYASHI, Makoto^{1*}, YABUTA, Hikaru¹, SAKAIYA, Tatsuhiko¹, KONDO, Tadashi¹, OHNO, Sohsuke², KADONO, Toshihiko³, SHIGEMORI, Keisuke³, HIRONAKA Yoichiro³, YAMANAKA, Takamitsu⁴

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 千葉工業大学惑星探査研究センター, ³ 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ⁴ カーネギー地球物理学研究所

¹Earth and Space Sci., Osaka Univ., ²PERC, Chiba Institute of Technology, ³Inst. of Laser Engineering, Osaka Univ., ⁴Geophysical Laboratory, Carnegie Inst.

It has been suggested that organics in meteorites and comets has delivered building blocks of life to the early Earth during the late heavy bombardment [1]. However, there has remained a missing link in the subsequent chemical evolution of these small bodies via their interaction with the early Earth. Although the shock experiments have been reported by using gas gun (e.g. [2]), which is an efficient method for consideration about impacts of meteorites and comets, these are performed under a closed system at lower impact velocities due to the experimental restrictions. Recently, the shock experiments using high-power laser have been available [3] under an open system at higher impact velocities (> 10 km/s). In this study, we have conducted a laser-shock experiment for Murchison meteorite under more realistic condition of impact events in order to identify the produced volatile components that might have been contributed to abiotic synthesis of organics and chemical composition of atmosphere in the early Earth.

Finely ground Murchison meteorite, CM2 chondrite, was used as starting material. Silica powder, which did not contain organics, was also used as a standard sample. Both samples were pressed into pellets in a diamond anvil cell. The thickness and diameter of pellets were about 100 μm and about 300~850 μm respectively. The aluminum foil of 50 μm thickness was located in front of the sample as the ablator for the laser and for preventing the sample from blowing out. The laser-shock experiments were conducted using GEKKO XII/HIPER laser at Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan [4]. The laser wavelength, pulse duration, and spot diameter were 1053 nm, 20 ns, and 0.4 mm, respectively. The experimental shock pressures were about 400 GPa and 200 GPa. The shocked sample was recovered by aluminum box or double glass vial. The ejected volatile components were analyzed on site by quadrupole mass spectrometry (QMS). The recovered material inside of the cell was extracted in solvent, and it was analyzed by gas chromatograph mass spectrometry (GC-MS).

The produced volatiles were the components with mass numbers of 16 and 26 at 400 GPa, and of 34 at 200 GPa, which could be identified as CH₄, C₂H₂, and H₂S, respectively. Although small amounts of tiny solid particles have been recovered in the cell, some of them were possibly derived from aluminum foil, and it is not sure whether they are indigenous from the meteorite. No compounds were identified by GC-MS analysis of the solvent extracts of the cell. The product, CH₄, in this study is partly consistent with the discussions by [5] that an atmosphere generated by impact degassing would tend to CO- or CH₄- rich composition derived from the impacting bodies. These impact-induced volatiles were reducing species and might have worked effectively for abiotic synthesis of organics in the early Earth.

References

- [1] Chyba, C., and C. Sagan (1992), *Nature* 355, 125-132.
- [2] Furukawa, Y. et al. (2009), *Nature Geoscience* 2, 62-66.
- [3] Ohno, S. et al. (2011), 42nd Lunar and Planetary Science Conference 1608, p. 1752.
- [4] Yamanaka, C. et al. (1987), *Nuclear Fusion* 27, 19-30.
- [5] K. Zahnle et al. (2010), *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* doi: 10.1101/cshperspect.a004895

はやぶさりエンリーのインフラサウンド・地震観測 Infrasound and Seismic Observations of the Hayabusa Reentry

石原 吉明^{1*}, 平松 良浩², 山本 真行³, 古本 宗充⁴, 藤田 和央⁵

ISHIHARA, Yoshiaki^{1*}, HIRAMATSU, Yoshihiro², YAMAMOTO, Masa-yuki³, FURUMOTO, Muneyoshi⁴, Kazuhisa Fujita⁵

¹ 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, ² 金沢大学, ³ 高知工科大学, ⁴ 名古屋大学, ⁵ 宇宙航空研究開発機構

¹RISE Project, NAOJ, ²Kanazawa Univ., ³Kochi Univ. of Tech., ⁴Nagoya Univ., ⁵JAXA

The Hayabusa, the world first sample-return minor body explorer, came back to the Earth, and reentered into the Earth's atmosphere on June 13, 2010. The Hayabusa Sample Return Capsule (H-SRC) was the third direct reentry event from the inter-planetary transfer orbit to the Earth at a velocity of over 11.2 km/s. The H-SRC and the H-S/C reentries are very good analogue for studying bolide size meteors and meteorite falls. We, therefore, conducted a ground observation campaign for aspects of meteor sciences. We carried out multi-site ground observations of the Hayabusa reentry in the Woomera Prohibited Area (WPA), Australia. The observations were configured with optical imaging with still and video recordings, spectroscopies, and shockwave detection with infrasound and seismic sensors. In this study, we report details of the infrasound/seismic observations and those results.

To detect shockwaves from the H-SRC and the H-S/C, we installed three small aperture infrasound/seismic arrays as the main stations. In addition, we also installed three single component seismic sub-stations and an audible sound recorder. The infrasound and seismic sensors clearly recorded sonic boom type shockwaves from the H-SRC and disrupted fragments of the H-S/C. The audible recording also detected those shockwave sounds in the human audible band. Positive overpressure values of shockwaves (corresponding to the H-SRC) recorded at three main stations are 1.3 Pa, 1.0 Pa, and 0.7 Pa with the slant distance of 36.9 km, 54.9 km, and 67.8 km (i.e., the source altitude of 36.5 km, 38.9km, and 40.6 km), respectively. These amplitudes of shockwave overpressures are systematically smaller than those of theoretical predictions. The incident vectors of the shockwave from the H-SRC at all the three arrays are estimated by F-K spectrum and agree well with predicted ones. Particle motions of ground motions excited by the shockwave from the H-SRC show characteristics of typical Rayleigh wave.

We examine the relation between amplitudes of overpressures and ground motions, and consider the transfer function. We define the transfer function as, $Z(w) = rV_S v_z(w)/p(w)$, where, w is the angular frequency, p the pressure perturbation, r the density of elastic media, V_S the shear wave velocity of elastic media, and v_z the vertical ground velocity. Here the numerator represents the pressure in the elastic media. The obtained value of transfer function is ~ 2 at frequency of around 8 Hz. We try to search elastic properties of each site (r : 1300 - 1700 kg/m³, V_P : 1200 - 1700 m/s, V_S : 100 - 300 m/s) to explain the observation. The optimum values are around r of 1500 kg/m³, V_P of 1400 m/s and V_S of 150 m/s. The effective depth of air-to-ground coupling of this frequency range is very shallow and observation sites are covered with fine soil. Therefore the estimated values are fully suitable.

キーワード: はやぶさ, 衝撃波, インフラサウンド, 地震波, 大気固体地球カップリング

Keywords: Hayabusa, shockwave, infrasound, seismic wave, air-to-ground coupling

金星山岳波の鉛直伝播特性に関する線形解析

Linear analysis of the vertical propagation characteristic of the Venus mountain wave

安藤 紘基^{1*}, 前島 康光², 今村 剛³, 高木 征弘¹, 杉本 憲彦⁴

ANDO, Hiroki^{1*}, Yasumitsu Maezima², IMAMURA, Takeshi³, TAKAGI, Masahiro¹, Norihiko Sugimoto⁴

¹ 東大・理, ² 名大, ³ ISAS/JAXA, ⁴ 慶大

¹ University of Tokyo, ² Nagoya University, ³ ISAS/JAXA, ⁴ Keio University

過去に行われた VEGA の Balloon 観測で、赤道上空高度 55 km 付近にて強い上下動が観測された。Young et al. (1987) は、それが赤道に存在する大規模な地形により引き起こされた山岳波に起因している可能性を指摘した。さらに Young et al. (1994) は、山岳波が金星の雲層の上まで非線形過程を通じて伝搬できることを示唆した。また最近では、欧州宇宙機関が打ち上げた Venus Express に搭載された VMC による紫外光画像の解析結果から、Picciali et al. (2011) は北半球高緯度において山岳波が雲層上端高度まで伝搬している可能性があることを主張している。

金星の山岳波については、理論的・観測的研究はまだ少ない。そして、緯度によって雲層内の対流層の厚みや背景風の構造が大きく異なるので、山岳波の鉛直伝播の様相は緯度によって異なると思われる。特に高緯度の対流層 (45-60 km) は他の緯度帯に比べて厚いために、実際に山岳波が対流層の上まで伝搬するかどうか疑問である。また、雲層の対流が山岳波の伝播に及ぼす影響を考慮した研究も存在しない。そこで手始めとして、我々は大きな拡散係数を雲層中の対流層の部分に与える事によって対流の影響を模擬的に表現した上で、山岳波の線形計算を行った。モデルは東西-高度方向の2次元で、鉛直座標は $\log p$ 座標系、高度領域は 0-100 km である。また境界条件は上下端は固定端で、東西方向は周期境界を仮定し、山岳を模擬した適当な正弦波を下端から入れた。本研究では、WKB 近似の下で山岳波に伴う鉛直流についての線形解を求めた。その結果、背景場の東西風の風速が小さいほど、また拡散係数 (= 対流の強さ) が大きいほど山岳波は伝播しにくいことが分かった。また、その振幅は励起源の水平波長にも依存することを見出した。本発表では線形解析の結果を具体的に示すと共に、非静力学モデル CReSS を用いて行っている非線形数値実験の結果についても述べたい。

キーワード: 金星, 山岳波

Keywords: Venus, Mountain wave

金星の雲層における対流の数値実験 Numerical modeling of cloud-level convection on Venus

樋口 武人^{1*}, 今村 剛², 高木 征弘¹, 前島 康光³, 杉本 憲彦⁴, 安藤 紘基¹

HIGUCHI, Takehito^{1*}, IMAMURA Takeshi², TAKAGI Masahiro¹, MAEJIMA Yasumitsu³, SUGIMOTO Norihiko⁴, ANDO Hiroki¹

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 名古屋大学, ⁴ 慶應義塾大学

¹The University of Tokyo, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Nagoya University, ⁴Keio University

金星は高度約 45-70km に存在する硫酸の雲に覆われている。過去に行われた VEGA の Balloon 観測で、赤道上空高度 55 km 付近にて対流に伴うと考えられる鉛直風が観測された。また、伝播掩蔽観測により得られた気温分布から雲層下部 50-55km 付近に中立成層があることが知られており、対流活動の存在を示唆している。この対流は下層大気からの上向き熱放射が雲底で吸収されることで生じていると考えられる。Venus Express 探査機搭載 Venus Monitoring Camera の雲頂付近でみられる水平スケールが数 100km にも及ぶセル状の構造も雲層下部の対流を反映するという説があるが、対流層と雲頂は高度が隔たっているため、関連は明確でない。

Baker et al.[1998] は、雲層高度での背景密度・温度分布や正味熱流束を仮定して、安定層へ貫入する対流の 2 次元の数値実験を行った。しかし、本来は放射輸送によって雲層を出入りする熱流速を拡散によって表現していることが問題点として挙げられる。また、再現されたセルの水平スケールが雲頂のセル状構造と比較してかなり小さく、十分に理解されたとは言い難い。金星の雲層における対流の基本構造を決める要因を理解するためには、より現実的な放射加熱をもとにした対流計算を行う必要がある。

本研究では、メソスケールの数値気象モデル CReSS[Tsuboki and Sakakibara, 2007] を使って金星の雲層における対流を計算する。短波放射は Baker et al.[1998] のものと同じであるが、長波放射は先行研究よりも現実に近い形で与える。そして加熱強制の大きさなどを変化させることで対流の性質がどのように変化するのか、計算結果をもとに議論を行う。

キーワード: 金星, 対流, 放射

Keywords: Venus, convection, radiation