

PPS020-01

会場:103

時間:5月24日 08:30-08:45

低金属下における原始惑星系円盤の寿命 The Lifetime of Protoplanetary Disks in Low-metallicity Environments

安井 千香子^{1*}, 小林 尚人², 齋藤 正雄¹, Alan T. Tokunaga³, 東谷 千比呂⁴
Chikako Yasui^{1*}, Naoto Kobayashi², Masao Saito¹, Alan T. Tokunaga³, Chihiro Tokoku⁴

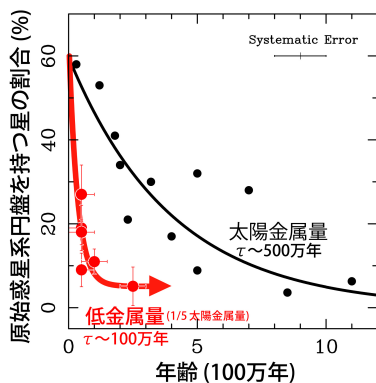
¹ 国立天文台, ² 東京大学, ³ ハワイ大学, ⁴ 東北大学

¹NAOJ, ²Institute of Astronomy, Univ. of Tokyo, ³IfA, Univ. of Hawaii, ⁴Univ. of Tohoku

近年、非常に多くの系外惑星が発見されつつあるが、発見された惑星は我々の予想に反して極めて多様な性質を持つことが分ってきた。現時点で知られている唯一の極めて明確な関係は、重元素量（金属量）が多い星ほど惑星が見つかる確率が急激に高くなる「惑星-金属量関係」である。これは、金属量こそが惑星形成を理解するキーパラメータの1つである可能性を示唆している。

そこでわれわれは、金属量が異なる環境下における原始惑星系円盤の進化について研究をすすめている。そのファーストステップとして、金属量が太陽近傍よりも1/10近くまで低いことで知られている銀河系の最外縁部に着目し、そこに存在する多数の星生成領域に対して「すばる」8.2m 光学赤外線遠鏡を用い高感度な近赤外 (1-2.5 μ m) 撮像サーベイ観測を行った。そして領域毎に、赤外超過を示す星の割合、すなわち原始惑星系円盤を持っている星の割合 (disk fraction) を導出し、領域の年齢との相関をとることで、円盤の散逸のタイムスケール (円盤の寿命) を見積もった。

その結果、低金属量下の星生成領域の disk fraction は、同年齢の太陽近傍の領域と比較して系統的に (極端に) 低いことが明らかになった (図)。金属量が低いことから通常考えうる物理過程では、今回の観測で感度のある円盤内側だけが空洞になることを説明できないため、低金属量下では“円盤全体”が太陽近傍 (約 5Myr) と比べて非常に早いタイムスケール (約 1Myr) で消失することが強く示唆された。円盤の寿命が短くなると惑星が作りにくくなることから、系外惑星で広く知られている「惑星-金属量関係」を説明しうる1つの初めての明確な観測的証拠を示した。



キーワード: 原始惑星系円盤, 金属量, 円盤散逸, 系外惑星

Keywords: protoplanetary disk, metallicity, disk dispersal, exoplanet

昇華・凝縮による氷ダストのサイズ進化 Evolution of the size of dust grains by evaporation and condensation

黒岩琢登¹, 城野 信一^{1*}

Takuto Kuroiwa¹, Sin-iti Sirono^{1*}

¹ 名古屋大学環境学研究科

¹Earth & Environmental Sci. Nagoya Univ.

1. 研究背景

惑星形成初期段階では原始惑星系円盤の外側の大部分でシリケートをコアとして氷マンテルで覆われているサブミクロンサイズのダストグレインから衝突合体によって高空隙率のダストアグリゲイトができたとされている。ダストグレインが初期の段階で衝突合体によってサイズ進化できるかどうかはその後の惑星形成に大きな影響を与えることが考えられる。

一方で、隕石に含まれているコンドリュールが急激な加熱と冷却によってできたと実験で示されており、円盤内ではそのような一時的な加熱イベントが起こっていたことが考えられる。コンドリュールのように千数 K まで上昇するようなイベントが存在するのならば氷が昇華するような数百 K の一時的な加熱イベントは円盤の至る所で頻繁に起こっていたとしても不思議ではない。そのような一時的な加熱イベントによってダストグレインが昇華と凝縮を経験することになる。

そこで、今回、一時的な加熱イベントの冷却過程で、昇華しなかったシリケートコアに H₂O ガス分子が凝縮するプロセスを考える。このプロセスではシリケートコアの周りを氷が覆い、そのマンテルの厚さが厚くなることでダストグレインのサイズが大きくなる。このときギブス・トムソンの式からサブミクロンサイズのダストグレインでは表面張力の効果が無視できずサイズが大きいほど飽和水蒸気圧が小さく、凝縮によってサイズが大きくなる。この効果でダストグレインのサイズ個数分布に変化が生じる。

ダストグレインのサイズ進化によって付着力や衝突速度に影響が生じ (Chokshi et al. 1993)、そのあとの形成されるダストアグリゲイトの力学的性質に大きな影響を与えることが考えられる。

2. 研究目的

一時的な加熱イベントによる昇華・凝縮を経験することでダストグレインのサイズ個数分布関数の時間進化がどう変化するか数値計算によって求める。

3. 結果

円盤は標準モデルとし、計算領域は中心星から 3AU の位置で行った。一時的な加熱イベント後、凝縮が始まる時間を 0 とする。ダストグレインの初期のサイズ個数分布関数をサイズの^{-3.5}乗に比例する (Mathis et al. 1977) とし、すべてシリケートコアとした。冷却速度が 10⁻⁶ から 10²Kh⁻¹ の場合についてそれぞれ数値計算を行った。計算結果からダストグレインの成長段階が二つに分かれ、ある時間でサイズ進化が止まった。サイズ進化が止まったときのサイズ個数分布関数は多数の小さいシリケートのみのダストグレインと少数の大きい氷で覆われたダストグレインに二極化した。

成長段階を初期成長と後期成長の二つに分けた。初期成長では温度低下によってダストグレインの飽和水蒸気圧が減少し、より大きいサイズのダストグレインからサイズが大きくなり始める。一方で凝縮によって周りの水蒸気圧が低下することで飽和水蒸気圧の低下に追いつくようになり、凝縮できるダストグレインの最小サイズが決まる。次の後期成長では周りの水蒸気圧の低下が飽和水蒸気圧の低下より大きく、一度大きくなった小さいダストグレインが昇華し、大きいダストグレインに凝縮されるというダストグレイン間の H₂O 分子のやり取りによるサイズ進化も起こるようになる。すると初期成長で成長した小さいダストグレインは場合によってはもとのサイズに戻ってしまう。最終的に H₂O ガス分子がなくなることと温度低下によってサイズ進化が止まる。

このようなダストグレインの進化によってサイズ個数分布が進化し、ダストグレインのサイズは二極化する。

4. 惑星形成への影響

一時的な加熱イベントによってダストグレインの分布が二極化すると、残された多数のシリケートコアの衝突付着によってダストグレインの表面がすべてシリケートで覆われている状態になることが考えられる。表面がシリケートのときにはダストグレインの衝突合体成長は氷の場合よりも成長しにくく、もし、加熱イベントが円盤全域で起こっているとすると外側でもダストアグリゲイトの形成が困難となる。

参考文献

Chokshi et al. 1993, ApJ, 407, 806

Mathis et al., 1977, ApJ, 217, 425

キーワード: ダストグレイン, 昇華, 凝縮
Keywords: dust grain, evaporation, condensation

PPS020-03

会場:103

時間:5月24日 09:00-09:15

弱い乱流下にあるダスト層でのダスト成長と衝突破壊 Dust particle growth and fragmentation in the dust layer with a weak turbulence

竹内 拓^{1*}, 武藤 恭之¹

Taku Takeuchi^{1*}, Takayuki Muto¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

惑星形成の初期段階における、ダストの沈殿と赤道面でのダスト層の形成過程を調べ、ダスト層内でのダストの成長を議論する。ガス円盤は初期に層流状態にあると仮定した。このような場合でも、ダストが沈殿し、赤道面にダスト層ができると、ダスト層とガス層の速度差によって、ダスト層は乱流状態になる。乱流の強さは、ダストの中心星への降着で解放される重力エネルギーより見積もることができる。ダストのサイズとしては1種類のみ考え、ガス抵抗による停止時間が、ケプラー時間0.1倍とすると、乱流の強さはパラメーターに換算して 10^{-6} - 10^{-5} 程度である。このような弱い乱流のもとでは、ダストはかなり沈殿することができ、赤道面でのダストの濃集が起こる。その結果、ガス抵抗の効果が弱まり、ダストの中心星への落下速度、ダスト粒子間の相対速度は小さくなる。円盤全体のダスト・ガス比が太陽組成程度のときは、ダスト層内のガス抵抗はそれほど小さくはない。しかし、ダスト・ガス比が太陽組成の数倍の円盤では、ダスト粒子間の相対速度は抑えられ、最大でも10m/s程度になる。この程度の衝突速度では、特に氷粒子の場合、ダストの破壊が起こらない可能性がある。衝突破壊を考慮した、ダスト合体成長の数値計算を行い、円盤のダスト・ガス比が十分大きければ、ダストの衝突破壊が抑制され、ダストはいわゆる「衝突バリアー」を超えて成長できることを示した。

キーワード: 原始惑星系円盤, ダスト, 惑星形成

Keywords: Protoplanetary disks, Dust, Planet formation

密度進化するダストの合体成長と中心星落下 Coagulation and radial drift of dust aggregates: the effect of porosity evolution

奥住 聡^{1*}

Satoshi Okuzumi^{1*}

¹ 名古屋大学大学院理学研究科, ² 北海道大学低温科学研究所

¹Department of Physics, Nagoya Univ., ²ILTS, Hokkaido Univ.

微惑星の形成は現在の惑星形成モデルの根幹をなす前提であるが、その可能な経路はいまだに明らかになっていない。微惑星形成の最も深刻な障害の1つが、巨視的サイズのダスト塊の中心星落下である。これは、ダストが円盤ガスに対してわずかに速く公転するために、ガス円盤から「向かい風」を受け、だんだんと角運動量を失って中心星の方向へ移動してしまうというものである。従来の理論計算 (e.g. Brauer et al. 2008) では、巨視的サイズのコンパクトなダスト粒子の中心星落下の時間スケールが成長の時間スケールを下回ってしまい、円盤内で成長し続けることができないという結果が得られている。

本研究では、中心星落下の従来の描像を変えうる素過程として、ダストの成長に伴う内部密度進化に注目した。近年の実験・N体数値計算によって、ダストは衝突合体を通じて内部密度の極めて低い(空隙率の極めて高い)構造へと進化することが明らかになってきている。内部密度の低いダストはコンパクトなダストに比べて大きな衝突断面積をもつため、より短い時間スケールで成長する。ところが、この点は従来のダストの中心星落下の理論研究では考慮されてこなかった。我々は、低速度衝突による内部構造のフラクタル進化 (Okuzumi et al. 2009) とより高速度の衝突による構造の圧縮 (Suyama et al. 2008) の両方を考慮し、ダストの合体成長・内部密度進化・中心星落下を同時に追跡する数値シミュレーションを世界に先駆けて行なった。その結果、ダストは衝突圧縮の効果を考慮してもなお非常に低い内部密度 (10^{-4} g/cc) を保持し、大規模な中心星方向の移動を起こしにくいことを明らかにした。本発表では、数値シミュレーションの結果を紹介し、我々の計算が示唆する微惑星形成の描像について議論する。

キーワード: ダスト, 微惑星形成, 空隙率進化, 中心星落下

Keywords: dust aggregate, planetesimal formation, porosity evolution, radial drift

PPS020-05

会場:103

時間:5月24日 09:30-09:45

惑星系ガス円盤の電離度計算法：ダストへの荷電粒子吸着の効果

The calculation of ionization degree in planetary gaseous disks: the effect of charged dust grains

藤井 悠里^{1*}, 奥住 聡¹, 犬塚 修一郎¹

Yuri Fujii^{1*}, Satoshi Okuzumi¹, Shu-ichiro Inutsuka¹

¹ 名古屋大学

¹ Nagoya University

原始惑星系円盤においては、その化学進化や磁気流体力学的進化を理解するために電離度が重要視されており、これまでに様々な研究がなされてきた。しかし、ダストを含めた周惑星円盤の電離度の研究はまだなされていない。周惑星円盤は衛星形成の場であり、また初期の段階では中心の惑星への質量供給源としても重要である。円盤は温度が低いいため、ほとんど電氣的に中性であるが、宇宙線などによって弱く電離していると考えられている。電離によって生じたイオンは様々な種類の2次イオンと分子の生成を促し、さらにそれらがダストと結合するといったように、複雑な反応網が形成される。そして、これらの反応で生成された荷電粒子は円盤ガスと磁場との結合を生み出す。従って、円盤の磁気流体力学的進化を理解する上ではその電離度の精密な値の決定が必要である。

電離度の計算をする上では、ダストの存在が必要不可欠である。というのも、電離で生成された電子やイオンがダストに吸着することによって、ダストが無いと仮定したときに比べ電離度は非常に小さくなるからである。また、周惑星円盤では、原始惑星系円盤に比べ力学的タイムスケールが短いため、短いタイムスケールの反応をより精度よく解く必要がある。しかし、様々な反応が絡み合った複雑な式を精度よく解くには時間がかかってしまう。そこで、Okuzumi(2009)で示されたように、ダストの帯電分布が正規分布で近似できるということを用いると、式の数を格段に減らすことができる。

本発表では、正規分布型のダストの帯電分布を用いて求めた周惑星円盤の電離度を示し、磁気回転不安定性 (MRI) の発展条件について議論する。

キーワード: 原始惑星系円盤, 周惑星円盤, 電離度, ダスト, 磁気回転不安定性, 数値シミュレーション

Keywords: protoplanetary disk, circumplanetary disk, ionization degree, dust grain, magnetorotational instability, numerical simulation

PPS020-06

会場:103

時間:5月24日 09:45-10:00

高離心率惑星と原始惑星系円盤の相互作用 On the Interaction between a Protoplanetary Disk and a Planet in an Eccentric Orbit

武藤 恭之^{1*}, 竹内 拓¹, 井田 茂¹
Takayuki Muto^{1*}, Taku Takeuchi¹, Shigeru Ida¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

The number of planets discovered so far has exceeded 500, and approximately 200 of them have eccentricity more than 0.2. If such planets are born in a disk environment, it is important to study how they interact with the disk and how the orbital parameters of such eccentric planets evolve. In this talk, we present a new analytic approach to the disk-planet interaction that is especially useful for planets with eccentricity larger than the disk aspect ratio. In the study of disk-planet interaction conducted so far, the eccentricity of the planet is assumed to be small, and the planet orbit is decomposed into the power series of eccentricity. In this work, we make use of the dynamical friction formula to calculate the force exerted on the planet by the disk, and the force is averaged over the period of the planet. The advantage of this approach is that it is possible to apply this formulation to arbitrary large eccentricity. The resulting migration and eccentricity damping timescale agrees very well with the previous works when eccentricity is of the order of 0.2-0.5. If the planet eccentricity is close to the order of the unity, the orbital evolution timescale behaves very differently. Moreover, we have found that the timescale of the orbital evolution depends largely on the adopted disk model in the case of highly eccentric planets. We discuss the possible implication of our results to the theory of planet formation. We also present fitting formulae for the timescale of the eccentricity and semimajor axis evolution. These formulae can be especially useful in the study of population synthesis models.

キーワード: 惑星形成理論, 円盤惑星相互作用, 原始惑星移動

Keywords: planet formation theory, disk-planet interaction, planetary migration

PPS020-07

会場:103

時間:5月24日 10:00-10:15

GPUを使った、tree-Godunov-SPH法による地球型惑星の高解像度ジャイアント・インパクト・シミュレーション High-resolution simulations of giant impacts of terrestrial planets using a tree-Godunov-SPH method on GPU

細野 七月^{1*}, 玄田 英典², 井田 茂¹
Natsuki Hosono^{1*}, Hidenori Genda², Shigeru Ida¹

¹ 東京工業大学, ² 東京大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²The University of Tokyo

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is a useful numerical tool in studying a number of astronomical and planetary science problems.

A wide variety of astrophysical and planetary science problems are studied by SPH method.

The giant impact hypothesis, one of the possible scenario of the Moon formation, is one of such a problem.

In order to examine the giant impact scenario for the Moon formation, numerical simulations of collisions between planetary embryo have been done by SPH method.

However, the problem that the current SPH method does not have resolution enough fine for debris disk is pointed out.

In the SPH method, the resolution is determined by the number of SPH particles.

To obtain high resolution, we must construct fast calculation code.

In this study, a procedure for construction of new fast SPH code is described.

We implement the following three improvements to the code.

First, we implement so-called Tree method to SPH.

While the direct search of neighbors and calculations of self-gravity among N particles require $\sim O(N^2)$ computations, the introduction of the tree method reduces the number of computations to $\sim O(N \log N)$.

Secondly, we implemented approximate Riemann solver to the SPH method, which is called the Godunov SPH.

The application of the Riemann solver enable us to simulate phenomena with strong shocks.

Furthermore, Godunov SPH method includes appropriate dissipation in solving shock flows.

The calculation time becomes 10 times faster than that of the standard SPH.

Finally, we write the SPH code to run the program on massively parallel Graphical Processing Units (GPU) supporting the NVIDIA CUDA architecture.

The calculation time of GPU is about $O(10)$ times faster than that of CPU.

In order to check the accuracy and performance of this code, we perform two types of benchmark tests.

One is the model of the adiabatic collapse of an initially isothermal spherical gas cloud to check the performance of GPU.

We perform this test by two methods, tree Godunov SPH on GPU and tree standard SPH on CPU.

Another is the collision between planet-size objects to check the correct treatment of non-ideal EOS.

From these tests, we obtain that our code is about 300 times faster than the prevailing SPH method.

By using this code, simulations with large number of particles, namely high resolution simulations, are feasible.

In future work, to obtain further improvement of the performance of GPU, we will implement memory rearrangement algorithm.

This allows us to obtain the most efficient memory bandwidth.

キーワード: ジャイアントインパクト, SPH, GPU

Keywords: giant impact, SPH, GPU

薄い周惑星円盤内で集積する巨大氷衛星の原始大気 Proto-atmosphere of a giant icy satellite accreted in a gas-starved circumplanetary disk

岡田 英誉^{1*}, 倉本 圭¹

Hidetaka Okada^{1*}, Kiyoshi Kuramoto¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

¹Hokkaido Univ.

ガニメデ、カリスト、タイタンの内部は分化しているが、いつ、どのようにして分化が起こったのかは未だにわかっていない。この問題に対し、分化が衛星集積期に起こったとする説と、衛星形成後に起こったとする説が存在する。

集積期における主な熱源は微衛星衝突による集積エネルギーである。集積エネルギーによって、微衛星から供給された氷成分が蒸発すると、それによって原始大気が形成される可能性がある。その場合、原始大気による保温効果によって集積中の衛星表面温度は原始大気を保有しない場合よりも高くなる。もし保温効果が十分強ければ、衛星の氷成分が融解し、分化を引き起こす可能性がある。

集積中の巨大氷衛星の原始大気に関する先駆的な研究には、Lunine and Stevenson (1982), Kuramoto and Matsui (1994) がある。衛星の集積する環境として、前者は濃い周惑星円盤内を仮定し、後者は真空中を仮定している。しかし、近年の有力な集積モデルでは、衛星が薄い周惑星円盤で集積することが示唆されている (Canup and Ward, 2002, 2006)。このモデルでは、衛星集積時間が従来の理解に比べて長く、集積中には分化が起こらない可能性が指摘されている。しかし、その診断には、真空中集積を仮定した原始水蒸気大気モデルの結果が用いられており、周囲に存在する円盤ガスの影響が考慮されていない。円盤ガスと氷の蒸発物が混合した原始大気の特徴は従来の大気モデルと異なる可能性がある。

本研究では、衛星ヒル半径において薄い周惑星円盤と静水力学的に接続している原始大気の放射対流平衡構造を求め、成長中の衛星サイズと集積エネルギーフラックスの関数として、衛星の地表面温度を推定する。そして、薄い周惑星円盤内で集積する巨大氷衛星の分化条件を明らかにすることを試みる。

予察的な計算として、衛星サイズとして現在のガニメデを想定し、星雲の温度、圧力が 180 K, 12 Pa の場合について、地表面において解放される熱エネルギーフラックスを様々に与え、それぞれ放射対流平衡構造を求めた。熱エネルギーフラックスが 300 W/m^2 を超えると、主に H_2O の吸収によって、赤外放射に対する大気的全光学的厚さが 1 を超える。この場合、強い保温効果が発生し、地表面温度は H_2O の融点を超える。この熱エネルギーフラックスの値はガニメデが 10^6 年弱で集積した場合の集積エネルギーフラックスの値に等しい。

熱エネルギーフラックスが約 600 W/m^2 を上回ると、対流圏界面の位置が衛星の重力圏半径を超える。この場合、水蒸気に富む原始大気が重力圏外へ流出することが考えられる。これと同様の結果は、真空中集積を仮定した Kuramoto and Matsui (1994) によっても示されているが、今回周囲に星雲ガスが存在していても、大気流出が起こる可能性があることがわかった。講演においては境界条件や衛星の質量により広いパラメータを与えた計算結果を示し、それに基づいて集積期の巨大氷衛星がどのような原始大気を獲得し、またどのような熱史と分化過程を経るのか議論する。

PPS020-09

会場:103

時間:5月24日 10:45-11:00

スーパー地球のマントル対流における断熱圧縮の効果 An effect of adiabatic compressibility on mantle convection within super-Earths

立浪 千尋^{1*}, 小河正基², 千秋博紀³, 井田茂¹
Chihiro Tachinami^{1*}, Masaki Ogawa², Hiroki Senshu³, Shigeru Ida¹

¹ 東京工業大学, ² 東京大学, ³ 千葉工業大学

¹Tokyo Institute of Technology, ²University of Tokyo, ³Chiba Institute of Technology

スーパー地球とは近年発見が相次いでいる地球の数倍程度の質量を持つ惑星のことである。理論的な予測や観測的な組成の推定からこのような質量範囲にある惑星は地球のように岩石や金属などの固体成分で出来ている可能性があるがわかってきた。一方で地球の岩石マントルは熱的、または組成的な浮力によって対流運動をしていることがわかっており、この対流現象が惑星の熱進化過程や表層環境の安定性を支配していることも地震波観測や理論的な研究により示されている。本研究では地球よりも大きなスーパー地球でのマントル対流について数値シミュレーションによって調べた。発表では特に断熱圧縮の効果について述べる。

地球と比べてスーパー地球が大きく異なるのは重力加速度とマントルの厚さである。これらはマントル深部の静水圧を増加させ、断熱的な温度上昇をより大きくする効果を持つ。一般に、熱対流は鉛直温度勾配が断熱勾配を超えたときにのみ起こるため、この大きな断熱的な温度上昇は、スーパー地球のマントルがより対流に対して安定なことを示唆する。シミュレーションでは、このようなより安定なマントルにおいて、地表面からの冷却とコアからの加熱に対し、どのような対流が起こるかを調べた。その結果、例えば地球質量の10倍の質量を持つ断熱圧縮の効果が非常に強いスーパー地球のマントルでは、対流は地表面近くとコア・マントル境界近くに限定され、その間に対流に対して安定な領域が広がる傾向の強いことがわかった。講演では、断熱圧縮の効果の強さやレイリー数をいろいろに変えて、どのような対流様式が得られるかを報告する。

キーワード: マントル対流, スーパー地球

PPS020-10

会場:103

時間:5月24日 11:00-11:15

水蒸気大気でのマグマオーシャン冷却タイムスケールと水の散逸 Magma ocean cooling and hydrodynamic escape under steam atmosphere

濱野 景子^{1*}, 阿部 豊¹, 玄田 英典¹

Keiko Hamano^{1*}, Yutaka Abe¹, Hidenori Genda¹

¹ 東京大学大学院地球惑星科学専攻

¹The University of Tokyo

The current planet formation theory suggests that giant impacts would have marked the final stage of terrestrial planet formation. The large amount of energy released in the giant impact event would have melted a significant part of the terrestrial planet, forming a deep magma ocean. The magma ocean would begin to cool and solidify just after the impact and its cooling time affects the differentiation of the mantle and the timing of subsequent water ocean formation.

The magma ocean cooling rate especially in the early stage should have been controlled by the radiation from the top of the atmosphere into space. It is expected that the cooling rate of the magma ocean strongly depends on the amount of the potent greenhouse gases such as water vapor and carbon dioxide. On the other hand, the amount of the gases could be controlled through the exchange between the atmosphere and the magma ocean because of their high solubility in magma. Since the melt fraction in the magma ocean decreases with its cooling, more water and carbon dioxide would be degassed into the atmosphere, which in turn leads to reduce the cooling rate. This means that the evolution of the magma ocean should have been coupled with the atmospheric growth through the volatile exchange between both reservoirs.

Elkins-Tanton (2008) calculated the time scale of the magma ocean on Earth and Mars considering the water and carbon dioxide exchange. The results suggest that the magma ocean cooling time would be at most 5 Myr even in the case of the high-volatile contents. Although the atmospheric blanketing effect was considered in terms of the heat balance on the surface, the atmospheric structure was not calculated for the cooling rate of the magma ocean in her model. Moreover, the effect of condensation of water was not included. Since the water vapor is condensable, the atmosphere would start to be saturated from its top with the cooling. In general, the outgoing radiation decreases with the cooling of the planetary surface. In the optically thick and water-saturated atmosphere, however, the outgoing radiation has a lower limit. This is because the temperature structure at the optical depth of unity is independent on the surface temperature in such an atmosphere. It is expected that whether or not the solar insolation exceeds the radiation limit would make a significant difference in the thermal history of the magma ocean.

If the insolation exceeds the radiation limit, the outgoing radiation could balance with the insolation. In this case, the hot steam atmosphere may persist for a long time so that the significant amount of water could be lost by hydrodynamic escape of hydrogen. The solar UV radiation dissociates water vapor into hydrogen and oxygen atoms in the upper atmosphere. Some previous studies suggest that the strong EUV from the young Sun could drive hydrodynamic loss of hydrogen, while that oxygen could be left behind because of its heavier atomic weight. If the oxygen accumulates into the atmosphere, this would cause the slowdown in the hydrogen escape. During the magma ocean stage, however, such an accumulation would not happen because the oxygen left in the atmosphere behind would be absorbed to oxidize the magma at the surface. This significant water loss also would affect the magma ocean cooling.

We developed a simple coupled atmosphere-magma-ocean model to calculate the magma ocean cooling time under steam atmosphere and the amount of water at the end of solidification, taking into account the water loss by hydrodynamic escape. We used a 1D radiative-convective equilibrium model of condensable gray gas atmosphere. The temperature structure was assumed to be adiabatic in the convective magma ocean. Hydrogen loss rate was given by the energy-limited escape rate. We will present the results of a parametric study on the cooling timescale and the amount of the steam atmosphere varying the orbit radius and the initial amount of water on the Earth-sized planet.

キーワード: マグマオーシャン, ハイドロダイナミックエスケープ, ジャイアントインパクト, 水, 射出限界

Keywords: Magma ocean, Hydrodynamic escape, Giant impact, Water, Radiation limit

PPS020-11

会場:103

時間:5月24日 11:15-11:30

陸惑星と海惑星を分ける水量の条件： 局所的な降水を模擬した場合について The amounts of liquid water when the oceans occupy half of the planet, under the local precipitation

脇田 美幸^{1*}, 阿部 豊¹, 玄田 英典¹
Miyuki Wakida^{1*}, Yutaka Abe¹, Hidenori Genda¹

¹ 東京大学

¹The 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500個を超えた。現在見ついている系外惑星の多くは木星型惑星と考えられているが、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。

地球型の生命が存在しうる惑星の条件として、惑星表面に水が液体として存在することが重要であると考えられている。しかし、液体の水が存在するといっても、すべての地球型惑星が、地球のように大きな海をもつ惑星であるとは限らない。湖のような形で、液体の水が局在しているような惑星も考えられる。

Abe et al. (2005) は、地形に凹凸がなく、惑星表面上で水の輸送が起こらないという仮想的な惑星を考え、水量が非常に少ない場合（全球平均で1m以下の水量）について、3次元大気大循環モデル（GCM）を用いた数値実験を行った。その結果、このような仮想的な惑星（以降、陸惑星と呼ぶ）においては、降水と蒸発が局所的にバランスすることによって、液体の水が高緯度に局在化して、低緯度は乾燥することがわかった。そして、陸惑星では、水の局在化によって、水の持つ気候を不安定にする効果が弱まることで、液体の水が惑星表面に存在できる領域（ハビタブルゾーン）が、地球のような全球的につながった海を持つ惑星（以降、海惑星と呼ぶ）よりも3倍ほど広がることわかった。

地形と水量を与えたときに、そのような惑星が、陸惑星的にふるまうのか、地球のように海惑星的にふるまうのかは、蒸発が降水より多い地域が、地表での効率良い水輸送によって湿潤に保たれるか否かに依存するだろう。陸惑星と海惑星を分ける条件を抽出するためには、地形の凹凸と地表での水輸送を考慮し、系統的に地形・水量のパラメータを変えた、多数のGCMの数値実験が必要である。

しかしながら、GCMの計算は、非常に時間がかかるため、すべてのパラメータで計算することは非常に困難である。そこで、本研究では、GCMを用いた計算を行う前準備として、陸惑星と海惑星が分かると予想される水量に見当をつける。地表の水輸送の効率が大変良い惑星の条件として、全球的につながった海が存在を考慮することができる。安福修論(2009)では、2次元ランダムポテンシャル空間で、ポテンシャルが小さいところから海を作っていくとき、海が全球的につながる条件が、惑星表面での水の占める面積が全体のおよそ半分になることであると、パーコレーション理論を用いて数学的に示した。しかし、GCMを用いたAbe et al. (2005)によると、降水は局在化するため、ポテンシャルが小さいところがすべて海になるわけではない。陸惑星的にふるまう惑星では、降水は高緯度で起こる。そこで、現実の惑星の地形データを参考にして乱数を用いてランダムに地形を作り、両極から水を流した。こうして、海の面積が惑星の表面積の半分になるときの水量を、陸惑星と海惑星を分ける目安となる水量であると考え、さまざまな地形のもとで、その水量を求めた。

太陽系外地球型水惑星の気候状態に対する自転軸傾斜角と炭素循環の影響 Effects of obliquity and carbon cycle on the multistable solutions of climate of water-rich extraterrestrial planets

渡邊 吉康^{1*}, 田近 英一², 門屋 辰太郎¹
Yoshiyasu Watanabe^{1*}, Eiichi Tajika², Shintaro Kadoya¹

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

系外惑星の発見数はこの数年で飛躍的に伸び、その軌道要素（軌道離心率、軌道長半径）は多種多様であることが分かってきた。惑星の自転軸傾斜角は、一般に様々な値を取りうるばかりか、大きく時間変動することが知られている。自転軸傾斜角の大きさは、惑星が受け取る日射量の緯度分布及び季節変化を変えることで、惑星の気候に大きな影響を及ぼす。一方、地球の気候が長期的に安定な理由は炭素循環のはたらきであると考えられており、系外惑星においても大気中の二酸化炭素分圧の調節機構の存在が重要であると考えられる。そこで本研究では、水惑星の気候システムが自転軸傾斜角の大きさと炭素循環のはたらきによってどのような状態を取り得るのかを理解する目的で、炭素循環と惑星放射の二酸化炭素分圧依存性を考慮した南北一次元エネルギー平衡モデル（EBM）を用いて、多重安定平衡解の構造変化にも着目しながら、系統的な検討を行った。その結果、以下のことが分かった。

(1) 炭素循環を考慮しない場合：自転軸傾斜角が小さい条件では、氷が全く存在しない“無凍結解”，季節的に氷に覆われる“季節的部分凍結解”，一年を通して惑星表面の一部が氷に覆われる（“永久”部分凍結解），年間を通して全球が氷に覆われる“全球凍結解”などの安定解が存在する。しかし、自転軸傾斜角の増大とともに季節的部分凍結解及び部分凍結解の存在条件の範囲は縮小し、自転軸傾斜角が54度付近で消失する。自転軸傾斜角が大きい条件（>54度）で安定な気候状態は、無凍結解か全球凍結解のどちらかとなる。これは、自転軸傾斜角増大に伴う南北温度勾配の減少のため、雪氷地域への南北熱輸送が減少するためである。

(2) 炭素循環を考慮した場合：水惑星の気候は大気中の二酸化炭素濃度が一定条件の場合と比べて、軌道長半径がより広い範囲において温暖な環境を維持できる。これは、大気中の二酸化炭素分圧が炭素循環によって調節される結果である。一方、二酸化炭素分圧の平衡レベルは、同じ軌道長半径の条件では、自転軸傾斜角によらずほぼ一定となることが分かった。これは、自転軸傾斜角の増大にともなって極域の温度が上昇する効果が赤道域における温度低下の効果を相殺し、二酸化炭素を消費する全球的な地表面の風化率がほぼ一定になるためである。

(3) 水惑星の自転軸傾斜角が小さい場合（たとえば現在の地球の場合 = 23.4°）：二酸化炭素脱ガス率は現在の地球の約0.6倍以上なければ温暖な環境を維持できない。これに対し、自転軸傾斜角の大きな惑星の場合（たとえば自転軸傾斜角が90°），二酸化炭素脱ガス率が現在の地球の約0.3倍で温暖な環境を維持できる。これは、年平均日射量の南北差が小さくなることにより全球で等温状態に近くなり、氷が発達しにくくなることによるものである。

キーワード: 系外地球型惑星, 惑星気候, 自転軸傾斜角, 炭素循環, 脱ガス, EBM

Keywords: extraterrestrial planet, planetary climate, obliquity, carbonate-silicate geochemical cycle, degassing, EBM

PPS020-13

会場:103

時間:5月24日 11:45-12:00

炭素循環を考慮した場合における軌道離心率のハビタビリティへの影響 Effects of Orbital Eccentricity on Habitability of Earth-like Extra-solar Planets with Carbon Cycle

門屋 辰太郎^{1*}, 田近 英一², 渡邊 吉康¹
Shintaro Kadoya^{1*}, Eiichi Tajika², Yoshiyasu Watanabe¹

¹ 東大理 地球惑星科学, ² 東大 新領域 複雑理工

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

In this study, we systematically investigate the climate of the planets with varying orbital eccentricity and semi-major axis, and with carbonate-silicate geochemical cycle. We adopt a one-dimensional energy balance climate model and weathering model by Walker et al. (1981). We try to find conditions for the Habitable zone (HZ) of eccentric planets, and clarify the factors to determine the Habitable zone of eccentric planets. The results shows that there are three possible climate phases, namely Ice-free, Ice-cap, and Snowball phase, and nine climate modes, namely Runaway Greenhouse (RG), Ice-Free (IF), Seasonally Ice-cap (SIC), Ice-cap (IC), Seasonally Snowball/Ice-free (IF), Seasonally Snowball (SSB), Snowball (SB), Cyclic Snowball (CSB), and CO₂ Condensation (CO₂C) modes. The term 'phase' is defined here as a transient state of climate, and the term 'mode' as an annual or long-term state of climate. The HZ is consist of the regions where a planet has liquid water on its surface, i.e. IF, SIC, IC, SSI, and SSB mode. The inner boundary of IC mode and the lower boundary of SSB, which are both the limits of the HZ, are found to be determined by annual mean insolation and perihelion distance, respectively.

If the heat capacity was very large, surface temperature would be averaged over a long period. It means that the climate of the planet would be affected by the annual mean insolation. This is why the inner boundary of IC is determined by annual mean insolation because of large heat capacity of IC mode planets.

On the other hand, if the heat capacity was very small, the temperature would follow the variation of insolation instantly. It means that the variation of the distance between from the central star, i.e. the perihelion and aphelion distance, would determine the climate of the planet. This is why the lower boundary of SSB is determined by perihelion distance because of the small heat capacity of SSB mode planets.

It appears that carbonate-silicate geochemical cycle also affects on the width of the HZ due to negative feedback effect which stabilizes the climate. When carbon cycle is considered, the width of the HZ becomes broader than when it is not considered.

The eccentric planets with large semi-major axis are habitable even in the early stage of stellar evolution. On the other hand, planets with small semi-major axis withdraw from the HZ in earlier stage of stellar evolution.

We, therefore, conclude that planets with large semi-major axis and high eccentricity should to be in the HZ for a long time.

キーワード: ハビタビリティ, 軌道離心率, 炭素循環, EBM

Keywords: habitability, orbital eccentricity, carbonate-silicate geochemical cycle, EBM

PPS020-14

会場:103

時間:5月24日 12:00-12:15

マクロ・スピンモデルによる磁場反転の物理～地磁気、太陽・惑星磁場～ Coupled macro-spin models for polarity reversals — earth, sun, and planets —

中道 晶香^{1*}, 森 希², 森川 雅博², 毛利 英明³, D. Schmitt⁴, A. Ferriz-Mas⁵, J. Wicht⁴

Akika Nakamichi^{1*}, Nozomi MORI², Masahiro MORIKAWA², Hideaki MOURI³, D. Schmitt⁴, A. Ferriz-Mas⁵, J. Wicht⁴

¹ 京都産業大学 神山天文台, ² お茶の水女子大学, ³ 気象研究所, ⁴ マックス・プランク研究所, ⁵ ヴィーゴ大学

¹Koyama Astr. Obs., Kyoto Sangyo Univ., ²Ochanomizu Univ., ³Meteorological Research Institute, ⁴Max-Planck-Institut, ⁵Dept. de Fisica Aplicada, Univ. de Vigo

地球、太陽、幾つかの惑星の磁気反転ダイナミクスを記述する現象論モデルとして、マクロ・スピンモデルを提案する。このモデルは、磁場を生成・維持するダイナモ機構は複数の小さなダイナモ要素から成り、それらの磁場・電流を介した大域的相互作用によって全体の複雑なダイナミクスが構成される、という考えに基づく。本来は磁気流体力学で記述される複雑な地磁気反転の力学から、その本質を抽出したミニマル・モデルである。

実際このモデルは、時間発展、パワースペクトル、定常極性期間分布、短期変動など、ほとんどの地磁気反転や変動の主要観測事実を再現する。地球の場合、ダイナモ要素はコリオリ力に支えられたセル(シート)であると考えられる。

このモデルは、コアハロー2相共存、つまり局在化し束縛されたスピンのコア相と、全体に広がったハロー相との共存を特徴とする。大局的な双極子磁場を決める前者を、速く変動する後者が小さな揺動を与え続けることによって間欠的に地磁気反転が起こるのである。それぞれの相は、地磁気の定常成分、変動成分に相当する。このように、逆磁束斑の存在とその速い時間変動は、ハロー相のスピンのよると考えられる。

さらにこのモデルは、引き込み現象も記述する。同じモデルでスピン数を増やすと引き込み現象が発現し、準周期的な太陽磁場変動の特徴を良く再現する。さらにこの準周期性とともに、低振動数領域で $1/f$ 揺らぎが存在することも見出される。これは太陽黒点変動に見出される $1/f$ 揺らぎに相当するだろう。太陽の場合のダイナモ要素は、超粒状斑と水平磁場の存在から示唆されるように、対流層の乱流が作る階層的な巻き込み渦であると考えられる。

このモデルを元に、MHD 基礎方程式の重要項の解析から、惑星・衛星・太陽・星にわたる、磁気モーメントの大きさに対するスケーリング則が得られる。そしてこのスケーリング則

は実際の観測結果においても成立している。このように、結合したダイナモ要素のネットワークとして、一般のダイナモ機構を捉えることは的を得ていると考えられる。背景には、ダイナモ機構の普遍性が存在するようだ。

キーワード: 地磁気, ダイナモ, スケーリング, 結合スピン, 太陽磁場

Keywords: geomagnetism, dynamo, scaling, coupled-spin, solar magnetism

衛星衝突がチクシュループ・クレーターを形成した A satellite impact created Chicxulub crater

間遠 伸一郎^{1*}

Shinichiro Mado^{1*}

¹ 間遠総合学術研究所

¹MAROSA

1. はじめに

ユカタン半島のチクシュループ・クレーターを誕生させた小惑星の衝突が恐竜を絶滅させたとする仮説はよく知られている。しかしながら、この仮説で恐竜絶滅を説明するのは無理がある。重力増大説が最も説得的である。そのような大規模な地球の重力の増大を説明できる出来事は、やはり大規模な天体衝突しかあり得ないにもかかわらず、ユカタン半島の小惑星では地球の質量の十分な増大は見込めないで、遥かに巨大な規模の天体衝突を想定しなければならない。実は、そのような地球の重力の大幅な増大をもたらす程の大規模な天体衝突とチクシュループ・クレーターが整合的に説明できるのである。

2. 恐竜絶滅の小惑星衝突原因説の問題点

地球に直径 10km ほどの小惑星が衝突したという大規模天体衝突説が恐竜絶滅を説明する仮説としてよく知られている。その大規模天体衝突の結果、ユカタン半島のチクシュループ・クレーターが誕生したとされている。しかしながら、この仮説で恐竜絶滅を説明するのは無理がある。恐竜が絶滅したことを説明するには、生き残った爬虫類が二度と恐竜に進化しなかったことが説明されなければならないにもかかわらず、この仮説ではその点は説明不可能だからである。最も説得的な説は重力増大説である。

3. 重力増大説

恐竜の絶滅は、恐竜の最大の特徴がその大きさであることから推察されるように、地球の重力の大幅な増大が原因だと考えるのが最も説得的である。そのような大規模な地球の重力の増大を説明できる出来事は、やはり大規模な天体衝突による地球の質量の増大しかあり得ない。しかも、ユカタン半島の小惑星では地球の質量の十分な増大は見込めないで、遥かに巨大な規模の天体衝突を想定しなければならない。最も大きな恐竜は 10メートル以上の背丈であったのに対して、現在のヘビを除く陸上動物の最大サイズはキリンの 5メートルであり、最も大きな恐竜の背丈は現在の最も大きな陸上動物の 2倍以上である。このような規模の重力増大を伴う大規模な天体衝突は太陽系の惑星どうしの衝突だと考えるのが適切だと思われる。

4. チクシュループ・クレーターと火星の衛星

火星の衛星はフォボスとデイモスの 2つである。それぞれ、直径は 26.8km と 15km である。チクシュループ・クレーターの小惑星の大きさ約 10km に近い。つまり、チクシュループ・クレーターの小惑星は、大きさで見ると、太陽系の地球型惑星の衛星の大きさだと考えられる。

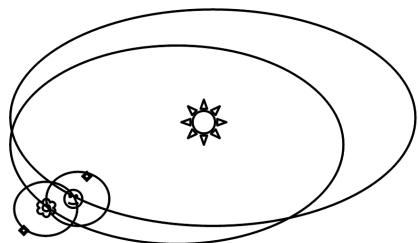
5. 結 論

チクシュループ・クレーターは、大衝突前の古い地球に、もう一つの惑星の衛星が、本体の惑星の衝突に先立って衝突したのと考えれば合理的な説明が可能である。したがって、チクシュループ・クレーターは、古い地球ともう一つの惑星による、惑星どうしの大衝突の証拠の一つだと考えることができるのである。

【参考文献】

1. Thompson & Turk, (2005), "Earth Science and the Environment", Third Edition, Thomson, Brooks/Cole.
2. Faure & Mensing, (2007), "Introduction to Planetary Science: The Geological Perspective", Springer.
3. Barlow, N. G., (2008), "Mars : An Introduction to its Interior, Surface and Atmosphere", Cambridge Planetary Science, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
4. Schulte, P., et al., (2010), 'The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary', "SCIENCE", Vol. 327, 5 March 2010.
5. Mado, S., (2010), 'On the Cause of the Continental Drift', "ABSTRACT Japan Geoscience Union Meeting 2010", Japan

Geoscience Union.



キーワード: 恐竜絶滅, 天体衝突, 惑星, 衛星, 重力, チクシュループ・クレーター

Keywords: extinction of dinosaurs, celestial impact, planet, satellite, gravity, Chicxulub crater

PPS020-16

会場:103

時間:5月24日 14:30-14:45

粉体への衝突実験で見られるクレーター周辺地形の形成過程 Formation process of ejecta morphology around the crater formed on glass beads in laboratory

鈴木 絢子^{1*}, 門野 敏彦², 中村 昭子³, 荒川 政彦³, 和田 浩二⁴, 山本 聡⁵
Ayako Suzuki^{1*}, Toshihiko Kadono², Akiko Nakamura³, Masahiko Arakawa³, Koji Wada⁴, Satoru Yamamoto⁵

¹ 惑星科学研究センター, ² 大阪大学・レーザーエネルギー学研究所, ³ 神戸大学大学院理学研究科, ⁴ 千葉工業大学・惑星探査研究センター, ⁵ 国立環境研究所・地球環境研究センター

¹Center for Planetary Science, ²Inst. of Laser Engineering, Osaka Univ., ³Grad. School of Sci., Kobe Univ., ⁴PERC, Chitech, ⁵Center for Global Environ. Res., NIES

衝突クレーターのエジェクタ堆積地形は、太陽系内の固体天体を見渡してみても非常に多様性に富んでおり、堆積時のエジェクタ自身や地表・地下の状態、大気圧などの周囲の環境を反映していると考えられている。エジェクタ地形と形成環境の関係を明らかにすることは、過去の固体天体表層環境の制約につながる。

鈴木他 (2010, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会) では、大気圧、衝突速度、標的のパッキング状態を変化させ、調査したパラメータ内で様々なエジェクタ地形が形成されることを示した。本発表では、これらの形成されたエジェクタ地形のうち、花びら状又は同心円のリッジを持つタイプに着目している。このタイプは、火星の衝突クレーターに見られる、ランパートと呼ばれるエジェクタ地形と非常に外観が似通っており、形成条件や形成過程を明らかにする意義が見込まれる。

実験には神戸大学の二段式軽ガス銃を用いた。弾丸はアルミニウム製の円柱で、直径 10 mm, 高さ 10 mm である。標的には一様粒径のガラスビーズを用い、直径 28 cm のたらいに入れて準備した。バルク密度は 1.7 g/cm³ であった。

以下の 3 つのパラメータを変化させた: 1) ターゲット粉体の粒径 (50, 100, 420 μ m), 2) チェンバー内大気圧 (500 Pa - 大気圧), 3) プロジェクトイルの衝突速度 (数 - 90 m/s)。このうち、リッジが形成された条件は、ターゲット粉体の粒径は 50, 100 μ m, チェンバー内大気圧は 2×10^4 Pa 以上、衝突速度は 16 m/s 以上であった。また、リッジが形成される瞬間を、高速度カメラを用いて撮影することに成功した。リッジはエジェクタカーテンの根元のすぐ外側で形成されている。また堆積する表面が粉体であることがリッジ形成に不可欠であることもわかった。

キーワード: 衝突実験, クレーター, エジェクタ

Keywords: Impact Experiments, Cratering, Ejecta

PPS020-17

会場:103

時間:5月24日 14:45-15:00

火星の衝突クレーターに見られる流動化イジェクタの堆積過程の粉体シミュレーション Trial to make ramparts: Granular flow model of fluidized ejecta on Mars

和田 浩二^{1*}, バーナイン, オリビエ²

Koji Wada^{1*}, Olivier S. Barnouin²

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² ジョンズホプキンス大学応用物理研究所

¹PERC/Chitech, ²JHU/APL

Ejecta deposits of Martian craters show evidence for extensive surface flow not typically seen at other craters on the Moon and Mercury. The exact mechanism for why such surface flow occurs remains unclear, but it must be indicating some unique surface environmental condition. Typically fluidizing agents such as water or an atmosphere have been proposed to be responsible for the formation of these deposits.

Simple granular flows can explain a wide range of flow features at landslides including their long run-out distance and lineaments, without necessarily invoking any volatiles. They might also explain fluidized deposits, with their long run-out, circumferential lineaments, thin deposit layers, and ramparts, also without necessarily invoking any volatiles or an atmosphere. In order to investigate simple granular flow models for such ejecta deposition, we use the three dimensional distinct element method (DEM). This method calculates the motion of each individual ejecta grain, taking into account mechanical interactions between grains. Our initial study showed that the surface condition is important: smooth plains with a low coefficient of friction, or readily erodible plains can produce long run-out ejecta flow (Wada & Barnouin-Jha 2006, MAPS 41, 1551). Such smooth or readily erodible Martian surfaces could be the result of sedimentary processes associated with large amounts of water that existed on Mars.

While our initial model showed that ejecta surface flow was fairly easy to achieve, it possessed too many simplifications that did not permit the formation of ramparts at the distal end of the ejecta deposits. One of the obvious simplification was that all the grains in our model were true spheres without any rolling resistance. As a consequence, grains kept rolling on flat surfaces even if the surface had a finite friction. A necessary condition to make a rampart is that the distal ejecta must stop advancing. In the DEM, this implies giving the ejecta grains rolling resistance that reflects their natural angularity. This study, thus, investigates how giving ejecta grains rolling resistance in the DEM might generate ramparts, and impact the overall emplacement and flow of granular ejecta.

In our DEM model, the mechanical interaction forces and torques between spherical grains in contact (and the floor) are expressed by the Voigt-model, which consists of a spring and dash-pot pair, in both normal and tangential directions. The spring gives elastic forces based on the Hertzian elastic contact theory. The dash-pot expresses energy dissipation during contact to realize energy dissipation with a given coefficient of restitution. For the tangential direction, a friction slider is introduced to express Coulomb's friction law with a given coefficient of friction. In this study, we introduce a rolling resistance between grains (and also the floor), which models the difficulty of rolling due to the grain angularity, expressed by a critical rolling displacement.

As an initial condition of our DEM calculations, we consider a 5-degree wedge of an ejecta curtain composed of 2958 grains with a radius of 35 m, each traveling on ballistic paths prior to deposition. This initial condition was obtained by using the ejecta scaling relationship, assuming a transient crater with a radius of ~5 km.

By introducing rolling resistance in our granular flow model, we have succeeded in stopping ejecta motion effectively. However, we have not yet succeeded in making an obvious rampart. This may be due to other simplification of our model such as the small number of grains considered, and their fairly large size. Secondary cratering of the surface material and their subsequent flow might also play a role. Further studies will explore all these factors.

キーワード: ランパート, クレーター, 火星, 粉体流, シミュレーション, 離散要素法

Keywords: rampart, crater, Mars, granular flow, simulation, DEM

衛星ハイパースペクトルリモートセンシングによる地球衝突クレータ全球搜索 Global Survey of Impact Craters on the Earth by Satellite Hyperspectral Remote Sensing

山本 聡^{1*}, 松永 恒雄¹, 中村 良介², 関根 康人³, 平田 成⁴

Satoru Yamamoto^{1*}, Tsuneo Matsunaga¹, Ryosuke Nakamura², Yasuhito Sekine³, Naru Hirata⁴

¹ 国立環境研究所, ² 産総研, ³ 東大新領域, ⁴ 会津大学

¹NIES, ²AIST, ³Univ. of Tokyo, ⁴Univ. of Aizu

Although more than 140 terrestrial impact craters are currently known [1], it is not clear how frequently impacts occurred in ancient Earth history. This is mainly because most of the old impact craters on the Earth are too degraded (owing to weathering and/or tectonic modification) to be identified, although intensive global survey to find impact crater structures using satellite remote sensing has not been conducted.

In this study, we try to find the traces of old impact structures on the Earth based on the visible and near infrared spectra data obtained by satellite remote sensing. Recently, the global survey using hyperspectral data by Spectral Profiler (SP) onboard SELENE/Kaguya revealed the global distribution of olivine-rich exposures on the Moon [2]. Although this global survey did not use any terrain information for the lunar surface, the location map of the detected olivine-rich spectra shows concentric distribution pattern associated with large impact structures (impact basins) on the Moon. This finding suggests that we may also find the traces of ancient impacts for even degraded impact craters on the Earth, if we focus on the distribution pattern of specific spectral features in visible and near infrared wavelength. (Here the specific spectral features do not mean the shock indicators such as Coesite and Stishovite.) If so, we can reveal the global distribution of terrestrial impact craters by satellite hyperspectral remote sensing.

To this end, it is important to understand how the terrestrial impact craters are observed in the visible and infrared spectral data by satellite remote sensing. Therefore, we examined some terrestrial impact craters, which have been identified as impact origins, using the spectral data obtained by ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), which is an imaging instrument with 14 bands, from the visible to the thermal infrared wavelengths, onboard NASA Terra satellite. Based on the results, we will discuss the feasibility of global survey of terrestrial impact craters by future satellite hyperspectral remote sensing.

[1] R.A.F. Grieve & E.M. Shoemaker, in Hazards due to Comets & Asteroids (T.Gehrels eds), 417-462 (Univ. of Arizona Press), 1994.

[2] S. Yamamoto, et al., Nature Geoscience, 3, No. 8, 533-536 (NGEO897) 2010.

焼結した雪球同士の衝突貫入と付着に関する実験的研究 Experimental study on penetration and sticking of snow projectiles on sintered snowball

嶋生 有理^{1*}, 荒川 政彦²

Yu-ri Shimaki^{1*}, Masahiko Arakawa²

¹名古屋大学 大学院環境学研究科, ²神戸大学 大学院理学研究科

¹Grad. School Env. Studies, Nagoya Univ., ²Grad. School Sci. Studies, Kobe Univ.

【はじめに】 氷ダストアグリゲイトの付着成長によって形成された初期氷微惑星は90%以上の空隙率を持つ可能性が示唆されている [e.g., 1,2]。高い空隙率を持つ氷微惑星は自己重力が非常に小さいため、相互衝突によって破壊した破片の再集積が起こりにくい。一方、高い空隙率を持つ天体は衝突時に圧密などによって衝突エネルギーが散逸するため、衝突合体しやすくなる。衝突する2天体のサイズが大きく異なる場合、一方が他方に貫入するためさらに合体が起こりやすくなる [3]。そのため、初期の氷微惑星は衝突合体によって成長したと考えられる。そこで本研究では、異なるサイズを持つ氷微惑星同士の衝突によって付着合体と破壊の条件が空隙率にどのように依存するかを調べた。

【方法】 実験は北大低温研の大型低温室内(室温-15°C)で行った。雪試料は液体窒素中に微細な水を噴霧して凍結させた数10 μmの氷微粒子を用いて作成した。この氷微粒子を体積一定の鋳型に入れ、最大1MPaの荷重をかけて作成し、プラスチック袋に入れて-15°Cで焼結させた。作成した雪試料は、直径60mm、空隙率40-70%(質量62.4-31.1g)、焼結時間1時間-1ヶ月とした雪玉である。弾丸には空隙率30%、直径10mmの雪円柱(質量0.35g)を用いた。弾丸の加速には自由落下(衝突速度2-3m/s)、バネ銃(10-20m/s)、Heガス銃(30-200m/s)を用い、正面衝突させた。衝突の様子は高速度デジタルビデオカメラを用い、撮影速度1,000-5,000fps、露出時間20 μsで撮影した。衝突後、回収された破片の質量分布を測定し、衝突映像から破片速度分布を調べた。また、貫入付着が起きた試料のクレーター孔のプロファイルをレーザー変位計で測定した。

【結果】 初期標的質量で規格化した最大破片質量 ml/Mt と反対点速度 Va から衝突様式の分類を行った。衝突様式はそれぞれ弾丸反発 (ml/Mt<1)、弾丸付着合体 (ml/Mt>1)、クレータリング (1>ml/Mt>0.5)、カタストロフィック破壊 (ml/Mt<0.5)、弾丸貫通破壊 (ml/Mt<0.5 かつ Va>>Vg) である。その結果、付着合体は空隙率60%以上で起こり、その速度は空隙率60%で40-90m/s、空隙率70%で15-70m/sであることがわかった。次に、貫入付着した標的から貫入深さを測定した。その結果、貫入深さは衝突速度にほぼ比例し、同じ衝突速度ならば空隙率70%は空隙率60%のときより5倍深く貫入することがわかった。また、ml/Mt<0.5となる貫入深さは、空隙率60%では標的直径の約1/6、空隙率70%では1/2となることがわかった。

[1] Wurm and Blum (1998), Icarus 132, 125-136. [2] Wada et al. (2009) APJ 702, 1490-1501. [3] 和田ら (2010) 天体の衝突物理の解明 (VI)

キーワード: 衝突実験, 氷微惑星, 空隙率, 付着合体, 貫入

Keywords: impact experiment, icy planetesimal, porosity, sticking, penetration

ラブルパイル天体の衝突破壊に対する間隙物質の影響 Effects of medium filling pores on impact disruption of rubble-pile bodies

藤田 幸浩^{1*}, 荒川 政彦², 長谷川 直³
Yukihiro Fujita^{1*}, Masahiko Arakawa², Sunao Hasegawa³

¹名古屋大学大学院環境学研究科, ²神戸大学大学院理学研究科, ³宇宙航空研究開発機構

¹Nagoya University, ²Graduate School of Science, Kobe Univ., ³Japan Aerospace Exploration Agency

要旨

ラブルパイル天体は複数の岩塊が相互の重力によって集積することで形成された天体である。天体を構成する岩塊はランダムな配置をしているため、内部には大きな空隙が複数存在していると考えられる。ラブルパイル試料を用いて行った衝突破壊実験では、衝突点で発生した衝撃波が試料内部に存在するマクロな空隙の存在によって全体に伝播しにくくなり、衝突エネルギーが衝突点付近に集中することで結果的に試料を構成する岩塊の破壊が起こりにくくなるということが分かった。しかしながら、ラブルパイル天体の特徴である内部の大きな空隙は、時間が経つとともに空隙サイズよりも小さな岩石やダストなどによって埋められてしまうと推測される。ラブルパイル試料の衝突破壊の特徴は岩塊間の隙間が重要な役割を果たしているため、ラブルパイル天体であっても隙間が媒質により満たされる場合には、また異なった衝突破壊現象が起こると予想される。そこで本研究では、隙間を異なる性質の媒質で満たしたラブルパイル試料を用いて衝突破壊実験を行うことで、この問題について調べてみた。

実験方法

本研究では、二段式軽ガス銃を用いてラブルパイル構造を持つ試料に対する高速度衝突破壊実験を行った。用いたラブルパイル試料は7 mm のガラスビーズを構成要素として作成し、隙間を石膏と氷それぞれの物質で満たした。ガラスビーズと媒質の体積比は約6 : 4であり、試料の形状は円筒で、直径30mm、高さ30mmである。また比較実験のために空隙を残したターゲットも用意した。それらの試料に対して、1/4 インチのナイロン球の弾丸を2.7km/s の速度で衝突させた。衝突の様子を高速度ビデオカメラで撮影し、映像記録から破片速度の解析を行った。また、衝突破壊後にそれぞれの破片を回収してターゲットを構成するビーズの破壊がどれだけ起こっているのかを調べた。

実験結果と考察

本研究では、ラブルパイル試料において破壊の程度を表す指標として総小破片質量 M_{fsum} を用いる。この量は衝突破壊で各構成ビーズから生じたビーズ破片のうち質量が元のビーズの半分以下であるビーズ破片について、それらの質量を足し合わせたものとして定義する。この量を用いて隙間を石膏や氷で満たしたターゲットと空隙をそのまま残した試料で破壊の程度を比較した。その結果、前者の方が後者に比べて M_{fsum} が2倍以上大きくなるという結果が得られた。反対点速度も同様に、隙間をそのまま残したものに比べて、石膏の場合でおよそ2倍、氷の場合ではおよそ4倍に大きくなるということが分かった。これらの結果から、ラブルパイル構造では、隙間が物質で満たされている場合には試料の破壊と破片の散逸が起こりやすくなると言える。さらに、破壊が起こりやすくなる程度は隙間を満たしている物質に依存していることが推測できる。そこで本研究の考察として、ラブルパイルターゲットの破壊と隙間を満たしている物質との関係を衝撃波の伝播という観点から議論する。

キーワード: ラブルパイル天体, 衝突破壊, 小惑星, マクロポア, 再集積, 衝突圧力減衰

Keywords: rubble-pile bodies, impact disruption, minor body, planetesimals, re-accumulation, attenuation of impact pressure

高速度衝突閃光：多孔質衝突体の場合 Highvelocity impact flashes by porous impactors II

柳澤 正久^{1*}, 海老名 良祐¹, 高橋 悠太¹, 長谷川 直²

Masahisa Yanagisawa^{1*}, Ryosuke Ebina¹, Yuta Takahashi¹, Sunao Hasegawa²

¹ 電気通信大学, ² 宇宙航空研究開発機構

¹Univ. Electro-Communications, ²Japan Aerospace Exploration Agency

弾丸が数 km/s という高速度で衝突すると閃光を発生する(衝突閃光)。衝突エネルギー、すなわち弾丸の運動エネルギーの何%が閃光の放射エネルギーになるかは、一般的に発光効率あるいは閃光効率と呼ばれている。ここでは赤外線を含む全波長域での放射エネルギーに関するものを全放射効率、肉眼やビデオカメラなどで観測できる波長域のエネルギーに関するものを可視放射効率と定義する。

流星体などの小天体・微小小天体が月面に衝突する際の閃光が、近年観測されるようになってきた(月面衝突閃光)[1, 2 参照]。観測はビデオカメラを用いて可視光波長域で行われている。可視放射効率が分かれば、明るさの観測から衝突エネルギーを知ることができる。どの位のエネルギーの衝突がどの位の頻度で起きているかは、月面活動の安全性にとって重要な情報であり、この情報を得るための月面衝突閃光の観測プロジェクトも行われている [3]。

1999年に観測されたしし座流星体による月面衝突閃光の数と、地上から観測されたしし座流星の数の比較からは可視放射効率が、一桁ほどの誤差はあるものの0.2%と見積もられた [4]。一方、室内実験では、様々な材質の弾丸と標的の組み合わせに対して、様々な波長帯に対する放射効率が求められている [5 参照]。しかし、閃光発生メカニズムや効率についてはよく分かっていないことが多い。

流星体を含む太陽系小天体の多くは空隙率が大きいと考えられている。そのため、弾丸空隙率の放射効率への影響を調べることは非常に重要である。しかし、多孔質物質を弾丸とした実験は難しく、これまで行われたことがない。実験用の銃での100万G近い加速度に耐えられず破壊してしまうからである。我々は少々変わった方法で、多孔質弾丸の緻密標的への衝突と等価な実験を行い、閃光発生メカニズムや、様々な衝突条件に対しての全放射効率や可視放射効率の推定法を研究している。実験には、ISAS/JAXAの二段式軽ガス銃を用いる。この銃で使われる直径7mmの球形弾丸(ナイロン66)に比べて十分小さい多孔質微小標的(直径約1mm、高さ約1mmの円柱、空隙率0-75%、材質ナイロン66)を作成し、これに弾丸を秒速6kmで衝突させる。弾丸と共に動く座標系で見れば、微小標的が(大きな)7mm球に衝突するのと等価である。

空隙率を変えた約20回の実験結果をまとめると、多孔質微小標的の方が緻密標的の場合よりも可視放射効率が大きいようである。しかし、衝突角度や実験チャンバー内の真空度も影響しているようである。

なお、本研究は、科研費(19540443)ならびに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。

参考文献

[1] Yanagisawa, M. and N. Kisaichi, Lightcurves of 1999 Leonid impact flashes on the moon, *Icarus*, 159, 31-38, 2002.

[2] Yanagisawa, M., K. Ohnishi, Y. Takamura, H. Masuda, Y. Sakai, M. Ida, M. Adachi and M. Ishida, The first confirmed Perseid lunar impact flash, *ICARUS*, 182, 489-495, 2006.

[3] Suggs, R. M., W. J. Cooke, R. J. Suggs, W. R. Swift, and N. Hollon, The NASA Lunar Impact Monitoring Program, *Earth Moon Planets*, DOI 10.1007/s11038-007-9184-0.

[4] Bellot Rubio, L. R., J. L. Ortiz, and P. V. Sada, Observation and interpretation of meteoroid impact flashes on the moon, *Earth, Moon and Planets*, 82-83, 575-598, 2000.

[5] Eichhorn, G., Analysis of the hypervelocity impact process from impact flash measurements, *Planet. Space Sci.*, 24, 771-781, 1976.

キーワード: 高速度衝突, 衝突閃光, 月面衝突閃光

Keywords: high velocity impact, impact flash, Lunar impact flash

氷天体大気圏突入を模擬した極超音速風洞実験でのスポレーション観察 Observation of Spallation Phenomena in Hypersonic Wind Tunnel Experiment Simulating Atmospheric Entry of Icy Object

鈴木 宏二郎^{1*}, 今村 宰², 奥抜 竹雄²
Kojiro Suzuki^{1*}, Osamu Imamura², Takeo Okunuki²

¹ 東大新領域 先端エネルギー工学専攻, ² 東大工学系 航空宇宙工学専攻

¹Dept. Advanced Energy, GSFS, Univ. Tokyo, ²Dept. Aero and Astronautics, Univ. Tokyo

航空宇宙工学でロケットや高速航空機の研究開発に用いられている極超音速風洞は、隕石などの大気圏突入天体まわりの気流を模擬し、それによる現象を観察する装置としても有用である(鈴木他, JpGU Meeting 2010, PPS004-10, Imamura et al., AIAA Paper 2010-4512)。ここでは、氷球を用いた実験で観察されたスポレーションについて報告する。実験は東京大学大学院新領域創成科学研究科が所有する極超音速高エンタルピー風洞 (http://daedalus.k.u-tokyo.ac.jp/wt/wt_index.htm) で行われた。本風洞では、マッハ数 7.0?7.1 の一様流が直径約 120mm の範囲で最大 60 秒間持続される。供試体は大気圏に突入する氷天体を想定して、直径 15mm のアクリル球または発泡アルミ材製の球を核として作られた初期直径 40mm の氷とした。氷球は断熱材(ベークライト棒)を介して測定部に固定される。供試体は気流スタート前に流路の外へ退避しており、気流が安定した後に射出投入される。

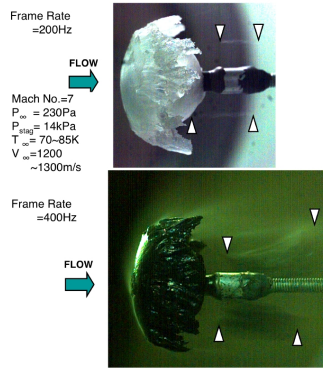
図は上下ともに投入後、約 25 秒間気流に氷をさらした時のスナップショットである。撮影には高速ビデオを用い、上が 200Hz、下が 400Hz のコマスピードである。気流条件は上下ともほぼ等しく、最高気流温度は 800?920K、氷前方のよどみ点における圧力は約 14kPa、加熱率は約 100kW/m² 程度と推算されている。下の場合では、画像を見やすくするために墨汁を質量分率で約 5% 混ぜて着色した氷を使用している。よどみ点領域では空力加熱が厳しいため、氷が溶融および昇華を起こして表面が後退している。このようにして、風洞実験においても溶融殻の形成が模擬されることになる。よどみ点領域で生成された液体の水および水蒸気は下流に流れ、肩の部分での気流急膨張に伴う冷却によって再凝結を起こす。再凝結による霜柱状の氷は重なり合いながら半径方向に生長し、帽子のつばのような形状を作っている。上の画像では、霜柱状突起の先端から氷が微小片となって飛び出していくスポレーションが捉えられている。図の三角印は、1 フレームの露光時間(5ms)中のスポレーション粒子の軌跡の始点と終点を示している。この場合、軌跡の長さから射出直後の粒子速度は数 m/s のオーダーであることがわかる。

ビデオ映像から、ここで見られたようなスポレーションは肩部にできる氷柱層が十分発達してから頻繁に発生していることがわかる。このことは、大気圏突入氷天体の飛行中における質量損失原因として、空力加熱による表面での蒸発だけでなく、融解や蒸発した水が肩部で再凝結した氷柱が部分的に破砕して飛散するプロセスも重要であることを示している。粒子軌跡には長さだけでなく、カーブを描くものなど、形状にも多くのバリエーションが観察され、スポレーション粒子の放出速度や氷天体本体の後流への巻き込まれ方は一様ではない。画像観察によると、肩部の氷柱は樹氷状の詳細形状をしており、スポレーション粒子の大きさは、この詳細パターンのスケールとなっている。従って、飛散粒子の直径は、氷塊本体に比べて非常に小さなものとなる。隕石の場合においても、同様なメカニズムで微小スポレーション粒子が後流に放出され、飛散しているものと予想される。

気流中での時間が経過するに従い、肩部の氷柱は成長とスポレーションによる損失を繰り返すが、やがて大規模崩壊を起こす。下の画像は氷柱全体が破壊され飛散した直後のスナップショットである。その際に大量の霧が発生しており、それによる散乱光が見えている。なお、別途撮影した赤外線カメラによる映像から、気流投入から崩壊まで氷表面の温度は相変化の潜熱により、常に約 0 付近に保たれていることがわかった。

以上のような極超音速風洞を用いた模擬実験は、隕石などの大気圏突入天体まわりの高温高速流れとそれに起因する現象を理解する上で有用な情報を与えるものと期待される。

本研究は、科学研究費補助金(基盤研究(B) No. 21360413)の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。



キーワード: 大気圏突入, 氷, アブレーション, スポレーション, 極超音速流, 風洞実験

Keywords: atmospheric entry, ice, ablation, spallation, hypersonic flow, wind tunnel experiment

斜め衝突蒸気雲の内部状態観測 Observations of Internal State in Oblique-Impact-Induced Vapor Clouds

羽村 太雅^{1*}, 黒澤 耕介¹, 長谷川 直², 松井 孝典³, 杉田 精司¹

Taiga Hamura^{1*}, Kosuke Kurosawa¹, Sunao Hasegawa², Takafumi Matsui³, Seiji Sugita¹

¹ 東京大学大学院 新領域創成科学研究科, ² 宇宙科学研究所, ³ 千葉工業大学 惑星探査研究センター

¹Dept. of Complexity Sci. and Eng., Univ., ²ISAS/JAXA, ³PERC, Chiba. Inst. of Tech.

原始地球環境下における有機物供給過程は、地球大気中での化学合成、惑星間塵や隕石・彗星衝突を通じての宇宙からの持ち込み、そして天体衝突による合成などの寄与が大きかったと推測されている (Chyba and Sagan, 1992)。しかし、その中でも天体衝突による有機物合成過程では、有機物を時間的・空間的に濃集させることができ、その後の化学反応を効果的に進めていくことが可能である点で特に重要である。小惑星や彗星が初期地球に衝突した場合、垂直に近い衝突の場合、衝突天体に元々含まれていた有機物は強い衝撃加熱によって分解される (Mukhin et al., 1989)。一方、低角度斜め衝突の場合、衝突時に破碎された衝突天体は空気中を下流方向へ飛行し、周辺大気から強力な空力加熱を受けて蒸発し、衝突天体に含まれる有機物のほとんどは分解すると推測されている (Sugita and Schultz, 2003a)。しかし、ポリカーボネイト弾丸を用いて窒素雰囲気下で行った高速衝突実験の結果によると、弾丸破片表面から蒸発・分解した炭素成分は周辺大気と効率良く化学反応し、生命前駆物質の材料としても重要な、CN ラジカル分子を生成することが、先行研究によって明らかになっている (Sugita and Schultz, 2009)。しかし、蒸気雲内部の熱化学状態を時間的・空間的に解像して詳細に観測した研究はまだなされていない。そのため、蒸気雲内における物理・化学反応の詳細、および蒸気雲を構成する弾丸破片やガスの分布ならびに、破片から蒸発したガスと周辺大気の相互作用する場所の広がりはまだ明らかになっていない。{cr/}

そこで我々は宇宙科学研究所の 2 段式軽ガス銃を使用し、ポリカーボネイト弾丸を用いた高速斜め衝突実験を 30 hPa 窒素雰囲気下で行い、衝突蒸気雲内の熱化学状態の計測を光学的手法を用いて行った。衝突速度、衝突角はそれぞれ 4.8 ~ 6.9 km/s, 水平から 30 °である。衝突蒸気雲は、バンドパスフィルタを装着した 2 台の高速度カメラと 1 台の時間分解型ストリーク分光計を用いて観測し、高速度カメラでは蒸気雲内でのガスや弾丸破片の分布・運動を、時間分解型ストリーク分光器では弾丸破片の表面温度を表す蒸気雲の黒体温度の時間変化を計測した。使用したバンドパスフィルタの透過波長域は 373 ~ 387 nm (CN)、400 ~ 410 nm (黒体)、505 ~ 515 nm ($C_{sub}2_{sub}$)、時間分解能は撮像・分光ともに 1~2 us (FWHM) である。{cr/}

その結果、蒸気雲内における、破碎された弾丸破片、破片表面から蒸発して生成した $C_{sub}2_{sub}$ ガス、破片蒸気と周辺大気の反応によって生成された CN ガスの空間分布の違いが明らかになった。三者は蒸気雲内で前方から弾丸破片、 $C_{sub}2_{sub}$ ガス、CN ガスの順に分布しており、弾丸破片が蒸気雲前方で熱分解して生成されたガスが航跡流に乗って流され、蒸気雲後方で周辺大気と化学反応して CN 分子に変化していく、という描像を示唆している。加えて、水平方向に一体となって飛行する蒸気雲の先端速度を計測した。その結果は、蒸気雲が弾丸速度の 1.9 倍まで一気に加速された後、その後空気抵抗を受けて減速し、速度は衝突から約 25 us で衝突速度程度まで低下することを示していた。そこで、蒸気雲の運動方程式を解いて、運動の様子を解析した。その結果、質量・断面積を一定とした場合に、計測された蒸気雲速度をよく説明できることから、蒸気雲内で質量が局所的に集中している可能性があることも示された。{cr/}

また、計測して得られた蒸気雲の温度は、衝突の 10 us 後に分光器の視野に入った時には 5000 K に達し、衝突から 45 us 後には 2500 K まで低下した。この温度と、計測した速度をもとに、蒸気雲中の微細破片表面での熱収支を解くと、蒸発率は Sugita and Schultz (2003b) で予測されていたよりかなり大きな値をとることが明らかになった。この違いは、先行研究が弾丸破片の飛行速度を衝突速度と同じかそれより遅いと仮定していたのに対し、本研究では今回明らかになった衝突速度以上の速度での衝突蒸気雲の並進運動速度をモデル計算で仮定したことに起因している。

キーワード: 天体衝突, 有機物再合成, 衝突蒸気雲, 空力加熱

Keywords: impact, organic resynthesis, impact vapor cloud, aerodynamic heating

PPS020-24

会場:103

時間:5月24日 16:45-17:00

2 段式軽ガス銃を用いた開放系気相化学分析: 小規模天体衝突による HCN 合成 Gas-phase chemical analysis in an open system using a 2-stage light gas gun: HCN production due to small-scale impacts

黒澤 耕介^{1*}, 長谷川 直², 三重野 哲³, 大野 宗祐⁴, 松井 孝典⁴, 杉田 精司¹
Kosuke Kurosawa^{1*}, Sunao Hasegawa², Tetsu Mieno³, Sohsuke Ohno⁴, Takafumi Matsui⁴, Seiji Sugita¹

¹ 東大 新領域 複雑理工, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 静岡大学 理学部, ⁴ 千葉工業大学惑星探査研究センター
¹The Univ. of Tokyo, ²ISAS/JAXA, ³Shizuoka University, ⁴Chiba Institute of Technology

シアン化水素 (HCN) は原始地球における生命起源に重要な役割を果たしたとされる分子化合物である。海あるいは湖に濃集した (HCN) は化学変化を経てアミノ酸や核酸塩基を合成することが知られている。我々は原始地球上での天体衝突による HCN 生成過程に注目している。天体衝突は時間的、空間的に局所的ではあるが、HCN を濃集させることが可能であるからである。

アポロ計画によって回収された月試料の年代分析の結果から 38 億年以前の原始地球には少なくとも現在の 1000 倍以上の頻度で天体衝突が起きていたことがわかっている。この時期は地球史を通じて質量、エネルギーの流入率が最大であった時期であり、天体衝突によって駆動される物理、化学過程によって原始地球表層環境進化が支配されていた可能性が高い。我々の最終目標は隕石重爆撃期の天体衝突によって生成される HCN 量を実験的に決定し、天体衝突が生命起源に果たした役割を明らかにすることである。

我々は宇宙研に設置された 2 段式軽ガス銃を用いて、原始地球大気中での天体衝突現象を再現し、最終生成物を化学分析する実験を開始している。まず第一歩として、開放系で気体分析を行う分析手法を確立した。従来行われていたような閉鎖系化学分析は天然衝突と対応づけることはできない。実験チェンバーよりも上流側にガスを拡散させるガスだめ、空気駆動式自動ゲートバルブ、AI 隔壁を配置し、汚染の元となる加速ガスが実験チェンバー内へ侵入するのを最小限に抑えた。今回は弾丸、標的にそれぞれポリカーボネイト、ポリスチレンを用い、1 気圧の N₂ 中で衝突させた。衝突速度は 6.5 km/s である。実験後にゲートバルブにより閉じ込められた生成気体を HCN ガス検知管を用いて分析した。その結果 ~50 ppm 程度の HCN を検出することに成功した。大雑把な見積もりによれば、蒸発した炭素の 0.1% 程度が HCN へ変換されたことになる。今後は実際の隕石、原始地球環境を想定した気体を用いた実験を計画している。今回開発した開放系気相化学分析技術は、衝突脱ガス現象全般へ適用可能である。

キーワード: 天体衝突, 開放系気相化学分析, 2 段式軽ガス銃, HCN, 生命起源, 衝突脱ガス

Keywords: Hypervelocity impacts, Chemical gas-phase analysis in an open system, 2-stage light gas gun, Hydrogen cyanide, The origin of life, Impact degassing

PPS020-25

会場:103

時間:5月24日 17:00-17:15

高強度レーザーを使ったオリビンの衝撃圧縮回収実験と惑星科学への応用 Recovery experiment of high-power laser shock compressed olivine and Application to Planetary Science

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

Keita Nagaki^{1*}, Tatsuhiko Sakaiya¹, Tadashi Kondo¹, Toshihiko Kadono², Yoichiro Hironaka², Keisuke Shigemori²

¹ 大阪大学大学院理学研究科, ² 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

¹ Graduate School of Science, Osaka Univ, ² Institute of Laser Engineering, Osaka

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 conducted by using explosive or gas guns. In fact, although high-pressure phase in meteorites is recovered by the impact experiments (the impact velocity is 1.5km/s and the impact 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]. In previous experiments on the laser-shocked compression, the samples were recovered on the pressure below 100GPa (the olivine which is samples in this experiment is molten at the pressure of 150GPa).

We developed the recovery technique of the laser-shocked materials at higher pressure (at 200-300GPa in this experiments) by high-power laser system and analyzed the pressure range of the production conditions from the structure of shock metamorphism. We used the single crystal olivine (from San Carlos, USA) which is a major mineral of meteorites and the mantle of the Earth. We used GXII/HIPER laser system at Institute of Laser Engineering, Osaka University [3]. The deformation, fracture and phase identification of the recovered olivine were observed comprehensively by optical microscopy, field emission-scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction and micro-Raman spectroscopy.

We designed the new recovery cell. In this cell, Ti plate was put in front of olivine to prevent the sample from blowing off. We could recover 100wt% of the sample by using this cell. In the recovered sample, there are the region of some distinctive structures. We will report the detail of the recovery technique and the results of the observation of the recovered samples.

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.

PPS020-26

会場:103

時間:5月24日 17:15-17:30

惑星着陸探査のためのレーザー蒸発方式による K-Ar アイソクロン年代計測法の開発 Development of a laser ablation isochron K-Ar dating method for landing planetary missions

長 勇一郎^{1*}, 三浦 弥生¹, 杉田 精司²
Yuichiro Cho^{1*}, Yayoi N. Miura¹, Seiji Sugita²

¹ 東京大学・理・地球惑星科学専攻, ² 東京大学・新領域・複雑理工学専攻

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

Absolute age measurements of planetary surfaces are extremely important for understanding the evolution of planets. However, no chronological measurements of planetary materials with known geological contexts have been made except for the lunar samples. Although the absolute age estimates for Martian surfaces have been proposed on the basis of the lunar chronology and the orbital calculations of asteroids, there still remain uncertainties as large as 1 billion years. If the absolute ages of rock samples from a geologic unit, where crater number density is known, are determined down to around 10% accuracy, it will make a significant contribution to understandings of the evolution of Mars.

In this study, we developed a new in-situ dating method based on the Potassium-Argon (K-Ar) dating technique toward future landing planetary missions. We propose a simpler and more accurate in-situ K-Ar dating method than those employed in previous mission plans, using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and a quadrupole mass spectrometer (QMS). We conducted the following experiments to evaluate the feasibility of the K-Ar dating with the LIBS-QMS method.

In the first part of this study, we measured K abundance using LIBS. First, we irradiated laser pulses on 13 samples with 100 ppm to 5 wt% of K₂O and observed the emission lines of K from these samples. We obtained two calibration curves from K emission lines at 766.49 nm and 769.89 nm. Our results show that K concentration can be quantified within the relative accuracy of 10% for 2000 ppm to 5 wt% range. The detection limit was 1000 ppm.

Second, the volumes of laser-ablated craters on rock samples are measured with a microscope. The observations indicate that the crater volumes of basaltic rocks are within the uncertainty of 11% except for some minerals such as olivine. When these results are combined, the absolute abundance of K inside a crater is estimated within the accuracy of 15%.

In the second part of this study, we built a new Ar experimental system optimized for K-Ar dating, based on experimental results from a previously established system. As a first step, we used the previously established gas analytical system to estimate the detection limits and the pulse numbers required to the K-Ar dating. We estimated $40\text{Ar}=10^{-12}$ cc/pulse and $36\text{Ar}=10^{-15}$ cc/pulse are released from desirable Martian rocks. The blank levels for the system were 5×10^{-10} cc and 1×10^{-10} cc at m/Z = 40 and 36, respectively, and the electric noise level was 1×10^{-11} cc. These blank levels should be 10-100 times lower in order to detect Ar from the rocks within 1000 laser pulses.

A measurement of the blank using the new gas analysis system indicates that the detection limit of 40 and 36 and electrical noise of the detector are on the order of 10^{-11} cc, less than 10^{-11} cc and less than 10^{-11} cc, respectively. This is an improvement by one order of magnitude compared with our former experimental system. These results indicate that a sufficient amount of 36Ar can be evaporated by 1000 laser pulses on the Martian rocks.

These experimental results using our breadboard model strongly suggests that an experimental system that can simultaneously measure K and Ar released from the same laser-vaporized mass of a sample can be built with currently commercially available parts. Thus, the new K-Ar measurement method proposed in this study using a pulse laser, a spectrometer and quadrupole mass spectrometer is a viable candidate for an on-board instrument for a future Mars landing mission.

キーワード: 年代計測, レーザー, 質量分析, 惑星探査

Keywords: Chronology, LIBS, QMS, Planetary exploration

PPS020-27

会場:103

時間:5月24日 17:30-17:45

はやぶさ2のリモートセンシング観測：小惑星の望遠鏡観測と物質サンプル分析をつなぐ

Remote sensing observations of Hayabusa2: Linking ground-based observations and the returned sample analysis

中村 良介^{1*}, 平田 成²

Ryosuke Nakamura^{1*}, Naru Hirata²

¹産業技術総合研究所, ²会津大学

¹AIST, ²University of Aizu

主に小惑星の外側に存在し、多量の揮発性物質を持つC型小惑星は太陽系初期進化の鍵を握る天体である。「はやぶさ2」は、このC型小惑星からのサンプルリターンおよび現地での衝突実験によって、以下の2つの疑問の答えに迫ることを目指している。

1 我々はどこから来たか? = 水惑星地球および生命の起原と始原的小惑星の関わり

2 小惑星はどうして惑星にならなかったのか? = 小惑星の衝突破壊史を探る

地上の望遠鏡観測は小惑星帯全体の構造の概観を与え、取得されたサンプルはある特定の小惑星のある特定の地点の年代や組成に関する詳細な情報を与える。この2つのまったく異なる情報をリンクするのが、探査機搭載装置によるリモートセンシングである。上述の大目的に対応するリモートセンシングの科学目標を以下のように設定した。

1 隕石 (= 転石) とは異なる、素性のしれた新鮮なサンプルの取得支援

=> 宇宙風化・鉱物分布・粒系 (熱慣性) の表面マップを作成し、もっとも科学的価値の高いサンプリング地点を選ぶための基礎情報を提供する

=> 可視および赤外域のスペクトル情報から、熱変成・水質変成の空間的な非一様性を捉え、1999JU3の母天体のサイズや進化に制約を与える。

2 内部構造と再集積過程の探査

=> 詳細な地形観測および重力測定から JU3 がイトカワ同様にラブルパイルかどうかを明らかにし、詳しい内部構造について制約を与える

=> 衝突によって形成されるクレーターおよび放出物の観測から、小惑星内部の構造 / 組成と再集積過程を調べる

これらの目的を達成するため、探査機にどのような観測装置を搭載すべきか検討した結果、可視カメラ (AMICA) / レーザー測距装置 (LIDAR) / 赤外線分光計 (NIRS3) / 中間赤外カメラ (TIR) の4つがノミナル装置として選定された。本講演では、この4つの観測装置の仕様および小惑星到着後の運用計画を述べる。

キーワード: リモートセンシング, 小惑星, はやぶさ2, サンプルリターン, カメラ

Keywords: remote sensing, asteroid, Hayabusa2, sample return, camera

大規模波動の鉛直構造にもとづく木星下層大気の安定度推定の試み An attempt to estimate the stability of Jupiter's atmosphere based on the vertical structure of large-scale disturbances

川下 彰志^{1*}, 中島 健介²

Shoji Kawashita^{1*}, Kensuke Nakajima²

¹ 九大院理, ² 九大院理

¹Graduate School of Sciences, Kyushu Univ, ²Faculty of Sciences, Kyushu Univ

1. はじめに

木星の直接観測は1995年のガリレオ探査機のプローブによる1度だけである。そのため今日でもその鉛直構造、特に深部の大気組成は未解決のままである。Sugiyama et al.(2006)などは、木星の対流圏に3成分の雲が存在することを示唆しているが、それらは深部大気組成を仮定することで推定される結果であり、観測に基づく検証が必要である。

その手掛かりとなりそうな現象として北赤道縞 (NEB) で観測される大規模波動が挙げられる。Lindal et al.(1981) はボイジャー1号の電波掩蔽観測で得られた成層圏の温度の鉛直構造より、鉛直伝播する波を見出した。Allison(1990) は、その波が共鳴的に励起されている赤道ロスビー波であると仮定し、1層の雲層を含む単純な4層構造大気モデルについて解析的に求めた鉛直固有モードとの比較を行い、雲層の厚さと安定度を推定した。本研究では、Allison(1990) の推定手法をより複雑な大気鉛直構造に適用できるように一般化し、その手法を Sugiyama et al.(2006) の安定度の鉛直分布に対して用いることで木星の大気構造の推定を行った。

2. 研究方法

現実的な大気構造を想定した鉛直構造方程式を様々な等価深度を仮定して熱源応答問題として数値的に解き、成層圏での応答が共鳴的に強くなるときの等価深度を求める。それを Lindal et al.(1981) から示唆される等価深度と比較することで、木星の鉛直構造の推定を試みる。推定に用いる安定度の鉛直構造は、Sugiyama et al.(2006) の3種類 (凝結気体成分の存在度が太陽組成の1倍・5倍・10倍) の場合の鉛直構造である。加熱は、雲層の高度にデルタ関数的に与える。

3. 結果

それぞれの鉛直構造の場合で、共鳴的応答を示す等価深度が離散的に存在することが分かった。そのような等価深度の値は加熱を与える高度によらず、1st mode の等価深度の値は、凝結気体成分の存在度が太陽組成の1倍・5倍・10倍の場合、それぞれ0.4km, 1.9km, 3.9kmであった。

Lindal et al (1981) に見られる波動の鉛直波長は等価深度2.2kmを示唆するが、これが本研究で得られた1st modeに対応すると考えると、凝結気体成分の存在度が5倍の場合が最もよく説明することになる。この5倍という値は、他の観測から推定される値の範囲にも入っている。今後、凝結気体成分存在度についてきめ細かく刻んだ場合を含めて追加計算を行い、観測をもっとよく説明できる組成があるか否か検討する予定である。

キーワード: 木星大気

Keywords: Jupiter's Atmosphere

同期回転惑星における太陽定数増大実験

Numerical experiments of synchronously rotating planets with increasing solar constant

納多 哲史^{1*}, 石渡 正樹², 中島 健介³, 高橋 芳幸⁴, 森川 靖大⁵, 西澤 誠也⁴, 林 祥介¹

Satoshi Noda^{1*}, Masaki Ishiwatari², Kensuke Nakajima³, Yoshiyuki O. Takahashi⁴, Yasuhiro MORIKAWA⁵, Seiya Nishizawa⁴, Yoshi-Yuki Hayashi¹

¹ 神戸大学, ² 北海道大学, ³ 九州大学, ⁴ 惑星科学研究センター, ⁵ 情報通信研究機構

¹Kobe University, ²Hokkaido University, ³Kyushu University, ⁴Center for Planetary Science, ⁵NICT

これまでに発見された系外惑星の多くは中心星の近傍に存在し、中心星の潮汐力により同期回転している、すなわち昼半球と夜半球が固定されていると予想されている。M型星のように低質量であり輝度が小さい中心星の周囲には、惑星表面に液体の水を有する、同期回転する地球型惑星が存在する可能性がある。

これまでに我々は同期回転惑星の気候を探ることを目的として、地球の太陽定数の値において、公転角速度を変更したパラメータ実験を行ってきた。その結果、公転角速度の値に応じ、昼半球から夜半球への直接循環が卓越する平衡状態、降水を伴う擾乱や赤道波等が卓越する平衡状態が得られることがわかった。

しかし、太陽定数が増加した場合には平衡状態に達することができずに暴走温室状態が発生し、惑星表面に液体の水が存在できなくなると考えられる。ここでは、暴走温室状態が発生する太陽定数の値(以降、暴走限界と呼ぶ)が公転角速度の値によって異なるかどうかを調べるため、公転角速度と太陽定数を変化させた数値実験を行った。

実験に使用した大気大循環モデルは地球流体電脳倶楽部 大気大循環モデル dcpam5

(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) である。大気は乾燥大気(非凝結性成分)と水蒸気(凝結性成分)とから成る。

短波放射に対しては乾燥大気、水蒸気ともに透明であり、惑星放射に対しては水蒸気のみが灰色吸収を行う。大気や雲による放射の散乱の効果は考慮していない。積雲パラメタリゼーションには対流調節(Manabe et al. 1965)を用いた。地表面は、全て熱容量ゼロの海面に覆われており、アルベドはゼロとした。惑星半径、平均地表面気圧は現在の地球の値を用いた。

入射放射分布として2種類のものを用いた。ひとつは赤道上の一点を恒星直下点として固定した同期回転日射分布(SR)、もうひとつは地球の日平均年平均日射分布(nonSR)である。公転角速度()はゼロもしくは地球の自転角速度の値を用いた。これら2種類の に対して、地球の太陽定数の値を与えて同期回転日射分布を用いた場合には、それぞれ異なる平衡状態が得られている(納多他, 2010)

太陽定数は地球の値およびそれ以上の5種類を用いた。実験数は全部で18である(表を参照)。

水平解像度については、格子点の数は経度方向に64、緯度方向に32である。鉛直層数は48である。等温静止大気から2000地球日間の積分を行った。

結果として、太陽定数1600 W/m²では全ての場合で平衡状態が得られなかった(表)。平衡状態が得られない場合では時間経過とともに全球平均地表面温度が単調増加し、全球平均惑星放射フラックスが単調減少している。暴走温室状態が発生していると考えられる。

暴走限界の値は、SR, nonSRのどちらの日射分布を用いた場合でも、 をゼロとした場合の方が大きくなる傾向を示した。また、 が等しい場合には、nonSRに比べてSRの方が暴走限界が小さくなる結果となった。

各日射分布 ('Pattern', 'SR' は同期回転条件, 'nonSR' は地球の日平均年平均日射条件を示す), 自転角速度 (Ω , 地球の値で規格化), 太陽定数 (S , W/m^2) における結果一覧. 平衡に達した場合は丸印, そうでない場合はバツ印で示している. 空白の箇所の実験は行っていない.

Pattern	SR		nonSR	
$S \setminus \Omega$	0	1	0	1
1600	×	×	×	×
1550	×	×	○	×
1500	○	×	○	○
1450	○	○		
1380	○	○	○	○

キーワード: 同期回転惑星, 大気大循環モデル, 系外惑星, 暴走温室状態, 太陽定数

Keywords: synchronously rotating planet, general circulation model, exoplanet, runaway greenhouse state, solar constant

PPS020-30

会場:103

時間:5月24日 18:15-18:30

SPICA コロナグラフ装置による系外惑星の研究 SPICA Coronagraph Instrument (SCI) and study of exoplanets

塩谷 圭吾^{1*}, SCI チーム¹

Keigo Enya^{1*}, the SCI team¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹Japan Aerospace Exploration Agency

次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics) に搭載するコロナグラフ観測装置 SCI (SPICA Coronagraph Instrument) およびそれによる太陽系外惑星の観測について発表する。SPICA は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が主導し、欧州宇宙機構 (ESA) も大きな寄与をする国際ミッションであり、2018 年度に打ち上げが予定されている。SPICA では、6K に冷却した口径 3m 級の大型望遠鏡により、中間～遠赤外波長域において超高感度、高分解能の観測を行う。SPICA の観測対象は多岐にわたるが、系外惑星系は最も重要なターゲットのひとつである。SPICA 搭載用コロナグラフは、木星型系外惑星の直接観測を最大の目的とする系外惑星観測に特化された装置であり、実現すれば系外惑星の検出のみならず大気分光において他に類を見ない成果 (スペクトルカタログ) が期待される。また SPICA の高感度・高安定性を活かしたトランジット惑星のモニター観測、惑星形成の環境・材料となる星周円盤の観測などとあわせて、系外惑星系の多様性・普遍性、形成史の理解を進める。様々な進化段階にある系外惑星を SPICA で観測することは、現在の太陽系の詳しい探査と相補的である。更に日本が主導する SPICA を通じて蓄積する科学的知見および技術は、地球型の系惑星を狙う将来のミッションにおいても、重要な役割を果たすと考えられる。

キーワード: SPICA, コロナグラフ, SCI, 系外惑星, 赤外線, トランジット

Keywords: SPICA, coronagraph, SCI, exoplanet, infrared, transit