

# ポスト「京」萌芽的課題「生命を育む惑星の起源・進化と環境変動の解明」の現況

## Current status of post-K Exploratory Challenge, computational planetary science

\*牧野 淳一郎<sup>1</sup>

\*Junichiro Makino<sup>1</sup>

1. 神戸大学

1. Kobe University

昨年度から4年間(2年の準備研究+2年の本格研究)のプロジェクトとして、ポスト「京」萌芽的課題「生命を育む惑星の起源・進化と環境変動の解明」(以下計算惑星)がスタートした。本講演では、計算惑星プロジェクトの概要と進捗状況について報告する。

ポスト「京」は2011年度に完成したスーパーコンピューター「京」の後継プロジェクトであり、2020年頃の完成、アプリケーションで「京」の最大100倍の性能を目指している。ポスト「京」で推進する科学的課題として、重点9課題と萌芽的4課題が選定されているが、萌芽的課題の1つに惑星科学があり、その実施は神戸大学を代表機関とし、9研究機関からなる体制で進めることとなった。これが計算惑星プロジェクトである。

計算惑星プロジェクトは、4つのサブ課題からなり、それぞれ主に惑星形成、惑星内部・表層のダイナミクスと進化、太陽活動による地球環境変動、原始太陽系における物質進化と生命起源をテーマとする。本講演では各サブ課題の概要、計算科学的なチャレンジ、期待される成果等をまとめる。

キーワード：大規模数値計算、計算科学

Keywords: High Performance Computing, Computational Science

# 衝突破壊プロセスを入れたN体計算における原始惑星の動径方向移動

## N-body Simulation of Planet Formation with the Effect of Fragmentation

\*小南 淳子<sup>1</sup>、台坂 博<sup>2</sup>、牧野 淳一郎<sup>3</sup>、藤本 正樹<sup>4</sup>

\*Junko Kominami<sup>1</sup>, Hiroshi Daisaka<sup>2</sup>, Junichiro Makino<sup>3</sup>, Masaki Fujimoto<sup>4</sup>

1. 東京工業大学、2. 一橋大学、3. 神戸大学、4. 宇宙航空研究開発機構

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Hitotsubashi University, 3. Kobe University, 4. JAXA

従来のN体計算による惑星集積過程の研究では、衝突した微惑星は破片等をださずに合体して一つの新しい微惑星になると仮定されていた（完全合体の仮定）。これは、破壊や破片の生成を取り入れると、粒子数が増大し、計算時間が膨大になるためである。完全合体だと微惑星の成長と共に粒子数が減少するので、初期の粒子数を大きくとれる。しかし、破壊によって生成された破片は力学的摩擦によって原始惑星及び微惑星の速度分散を引き下げるため、惑星形成過程に大きな影響を持つ。このため、N体計算には破壊過程を正しく取り入れることが必須である。

衝突破壊を入れると、質量の小さな微惑星が大量に生成され、ガス抵抗の効果でその速度分散が小さくなる。その速度分散の小さい大量の微惑星が原始惑星の周りに存在することで原始惑星のplanetesimal driven migration (PDM) が促進される可能性がある。このPDMは外側に原始惑星を運ぶこともあるので、その場合、タイプ1 惑星移動による惑星落下をある程度防ぐ可能性がある。

本研究では、ガス円盤の効果（ガス抵抗、タイプ1 惑星移動）と破壊モデルを入れた大規模なN体計算をおこない、惑星移動がどうなるかを調べた。その結果、衝突破壊を入れると原始惑星の周りに質量が小さく速度分散の小さい微惑星が生成された。これらの小さい微惑星があることで、質量の大きい微惑星のみだった場合より、原始惑星の外側へのPDMがより連続的に起こりやすくなった。衝突破壊により生成された小さい微惑星は、PDMによる原始惑星の外側移動を促進させることにより、タイプ1 惑星移動による中心星落下を防ぐことができるという結果になった。

キーワード：N体計算、衝突破壊、タイプ1 惑星移動

Keywords: N-body simulation, fragmentation, type-I migration

## GPU-accelerated High-resolution N-body Simulations for Planet Formation Toward 100 Million Particles

\*堀 安範<sup>1,2</sup>、押野 翔一<sup>3</sup>、岩澤 全規<sup>4</sup>、藤井 通子<sup>5</sup>

\*Yasunori Hori<sup>1,2</sup>, Shoichi Oshino<sup>3</sup>, Masaki Iwasawa<sup>4</sup>, Michiko Fujii<sup>5</sup>

1. 自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター、2. 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室、3. 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト、4. 理化学研究所 計算科学研究機構、5. 東京大学 理学系研究科天文学専攻

1. Astrobiology Center, National Institutes of Natural Sciences, 2. Exoplanet Detection Project, National Astronomical Observatory of Japan, 3. Center for Computational Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 4. Advanced Institute for Computational Science, RIKEN, 5. Department of Astronomy, University of Tokyo

We developed a fully-parallelized hybrid N-body code for planet formation (**PENTACLE**: Iwasawa et al., *submitted*), implementing the P<sup>3</sup>T method (Oshino et al., 2011) and a multi-purpose platform for a parallelized particle-particle simulation (FDPS: Iwasawa et al., 2016) into it. PENTACLE enables us to handle up to ten million particles for N-body simulations in a collisional system, using a present-day supercomputer. Toward a high-resolution N-body simulation with 100 million particles and beyond, we are now developing a parallelized hybrid N-body code optimized for a NVIDIA-based GPU cluster. In this talk, we show the performance and capability of PENTACLE and results of terrestrial planet formation in a narrow ring containing one (and ten) million planetesimals. Then, we introduce the current status of our GPU-accelerated N-body code (**PENTAGLE**) and our future plans, for example, a global simulation of the delivery of water to the Earth in the protosolar nebula.

キーワード：惑星形成、N体計算、GPU

Keywords: Planet formation, N-body simulation, GPU

## Pezy-SC プロセッサを用いた大規模 $N$ 体計算 High-resolution $N$ -body simulations using Pezy-SC processor

\*佐々木 貴教<sup>1</sup>、細野 七月<sup>2</sup>

\*Takanori Sasaki<sup>1</sup>, Natsuki Hosono<sup>2</sup>

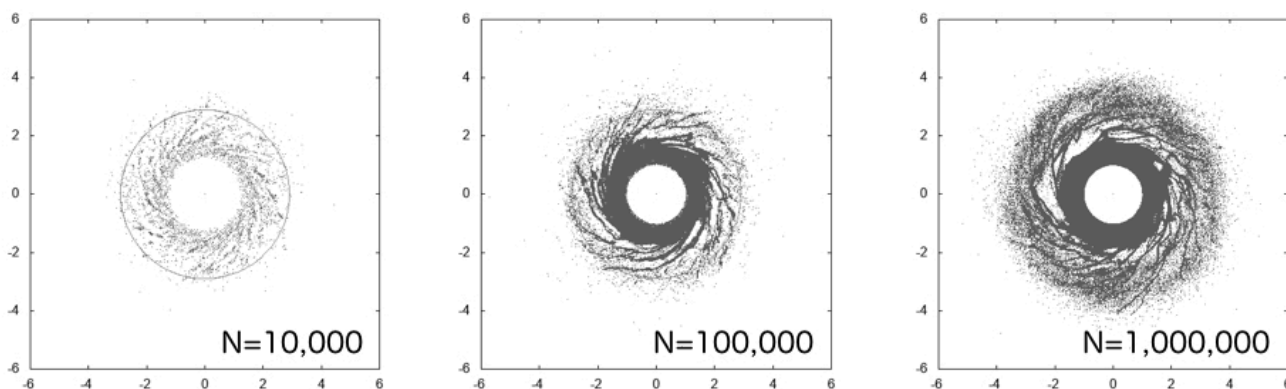
1. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室、2. 京都大学 大学院総合生存学館

1. Department of Astronomy, Kyoto University, 2. Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability

We developed an  $N$ -body simulation code on multiple Pezy-SC processors—Pezy-SC processor is a novel new architecture developed by Pezy Computing K. K. that has achieved large computational power with low electric power consumption. We adopt the rubble pile model for physical collisions, in which no mergers are allowed, and use FDPS (Framework for Developing Particle Simulator) to solve the self-gravity. We performed several sets of high- and extra-high-resolution  $N$  body simulations of the lunar accretion from a circumterrestrial disk of debris generated by a giant impact on Earth. The number of particles is up to 1 million, in which 1 particle corresponds to a 30 km-size satellitesimal. We show the performance and capability of our numerical code for high-resolution  $N$ -body simulations of planet/moon/ring formation.

キーワード： $N$ 体計算、月形成、Pezy-SC

Keywords:  $N$  body simulation, moon formation, Pezy-SC



# ケンタウルス族Charikloの環の大規模多体シミュレーション

## N-Body Simulation of Chariklo Rings

\*道越 秀吾<sup>1</sup>、小久保 英一郎<sup>2</sup>

\*Shugo Michikoshi<sup>1</sup>, Eiichiro Kokubo<sup>2</sup>

1. 筑波大学、2. 国立天文台

1. University of Tsukuba, 2. NAOJ

掩蔽観測により、ケンタウルス族Charikloの周囲に2重環が発見された(Braga-Ribas et al. 2014). Charikloの中心から391 kmと405 kmの位置に間隙に隔てられた2本の環があり、特に内側の環の光学的厚さは土星のA環や天王星の $\delta$ 環に匹敵するほど高い。幅はどちらも6 kmから7 km程度である。また、同様にケンタウルス族Chironにおいても、環が存在する可能性が指摘されている(Ruprecht et al. 2015). 小天体周りの環は従来考えられていたよりも、稀な存在ではない可能性がある。

Charikloの環の起源としてはいくつかのモデルが提案されている。衝突破壊された破片による環形成、衛星の破壊、潮汐破壊などである(Pan and Wu 2016, Hyodo et al. 2016). しかし、これまでのところ、これらのモデルについての十分な制限は得られていない。そのため、環の構造、安定性などを詳細に調べ起源や形成モデルとの整合性を調べる必要がある。そこで、N体シミュレーションを用いて、環の構造と安定性について調べた。

土星の環の研究では、環全体を計算対象とすると計算規模が極めて大きくなるため、環の一部を抜き出して周期境界条件を課すシミュレーション手法が用いられてきた。本研究では環全体を計算対象とする大域シミュレーションを環の研究としては初めて行った。

環は一様なサイズの粒子で構成されると仮定した。粒子間の相互作用としては粒子間の相互重力と非弾性衝突を考慮した。粒子間の非弾性衝突は減衰振動として扱うモデルを採用した(e.g., Salo 1995). また、重力はツリー法により計算した(Barnes and Hut 1986). 計算領域の中心には半径125 kmで密度が1 g/ccのCharikloにおいて、その重力を考慮した。シミュレーションの実装にはN体ライブラリFDPSを用いた(Iwasawa et al. 2016)

シミュレーションパラメータは、粒子サイズと密度である。環の離心率を維持するメカニズムの理論的解析より粒子サイズはおおよそ数メートル程度であると予想されている(Pan and Wu 2016). そのため、標準モデルでは粒子サイズを5 mとした。また密度は土星の環などを参考に氷粒子として0.5 g/ccとした。

標準モデルにおいて10回転周期ほど計算したところ、環全体には特徴的な構造は現れなかった。一方で、環の内部には複雑な微細構造が存在する。この構造は、土星の環などでは自己重力ウェイク構造として知られている(Salo 1992). 粒子間の非弾性衝突によってランダム速度が低下し、自己重力不安定が発生し、環は分裂し自己重力でアグリゲートを形成しようとする。しかし、Charikloの近傍では、強い潮汐力が働くため、アグリゲート形成を妨げようとする。この2つの競合過程によりこのような複雑な構造が形成されるのである。

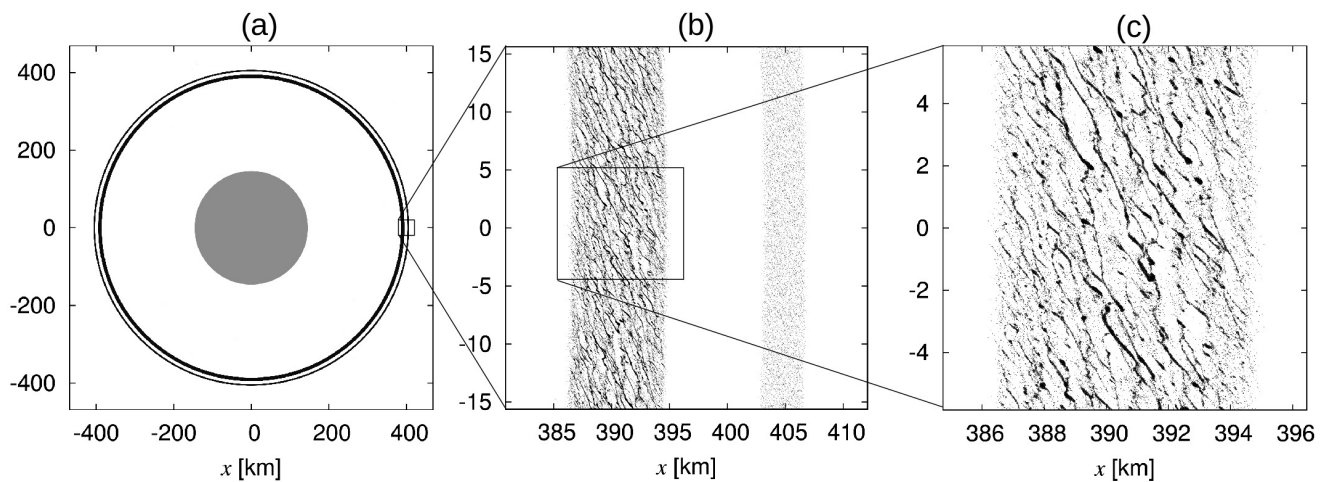
次に粒子サイズや密度を変化させてシミュレーションを行った。粒子サイズは2.5 mから10 m、粒子密度は0.05 g/ccから1.0 g/ccまでの値を用いてシミュレーションを行った。粒子数は、2000万個から3億4000万個である。その結果、粒子密度が環の構造を決定する重要なパラメータであることがわかった。まず、粒子密度が0.1 g/cc以下の場合、自己重力ウェイク構造ができず一様な環となる。これはエネルギー散逸が弱くランダム速度の低下が十分ではないため、重力不安定が発生しないためである。次に、粒子密度が0.1 g/ccから0.5 g/ccの場合、標準モデルと同様に自己重力ウェイク構造が発生する。粒子密度が0.5 g/cc以上の場合、環

は分裂して速やかに衛星が形成される。したがって、環が分裂しないためには粒子密度が0.5 g以下である必要があることがわかった。つまり、環の粒子密度はCharikloの粒子密度の半分以下である。

環が分裂しない場合でも、自己重力ウェイク構造によるトルクのため環の拡散が促進される。自己重力ウェイク構造を考慮して、環の拡散時間を見積もったところ1年から100年程度と見積もられた。これは従来に見積もりである10万年と比べて極めて早い。拡散時間は粒子サイズに強く依存するため、現在考えられているメートル程度の粒子よりも十分に小さければ、拡散時間は長くなる。また、まだ発見されていない衛星が存在している場合でも拡散を抑えられる可能性がある。

キーワード：N体シミュレーション、リング、衛星

Keywords: N body simulation, ring, satellite



## FDPSとPEZY-SCデバイスを用いた、SPHコードの開発と巨大衝突への応用計算

### Development of an SPH code which works on the PEZY-SC devices and application to the giant impact

\*細野 七月<sup>1,2</sup>、岩澤 全規<sup>2</sup>、行方 大輔<sup>2</sup>、谷川 衝<sup>3,2</sup>、似鳥 啓吾<sup>2</sup>、村主 崇行<sup>2</sup>、牧野 淳一郎<sup>4,2,5</sup>

\*Natsuki Hosono<sup>1,2</sup>, Masaki Iwasawa<sup>2</sup>, Daisuke Namekata<sup>2</sup>, Ataru Tanikawa<sup>3,2</sup>, Keigo Nitadori<sup>2</sup>, Takayuki Muranushi<sup>2</sup>, Junichiro Makino<sup>4,2,5</sup>

1. 京都大学大学院総合生存学館、2. 理化学研究所計算科学研究機構、3. 東京大学大学院総合文化研究科、4. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻、5. 東京工業大学地球研究所

1. Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University, 2. AICS, RIKEN, 3. College of Arts and Sciences, Graduate School of Arts and Sciences,, The University of Tokyo, 4. Department of Planetology, Graduate School of Science / Faculty of Science, Kobe University, 5. Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

近年、計算機クラスターの構成は、CPUのみのものではなく、GPUなどと言った「加速器」が付与されている物が一般的になりつつある。

しかしながら、これらの加速器を用いるには、複雑なコードを書かなければならない事が多い。

そこで我々は、Framework for Developing Particle Simulator (FDPS)と呼ばれる、粒子法向けの自動並列化ソフトウェアを開発した。

また、FDPSは、バージョン2.0以降、マルチウオークモードと呼ばれるモードを実装し、加速器にも対応した。

本講演では、粒子的流体数値計算手法である、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法と、重力相互作用を解くコードを、

FDPSのマルチウオークモードを用いて開発し、それをPEZY-SCと呼ばれる加速器の上で動作させた。

PEZY-SCは近年開発された加速器の一種であり、他の例えばGPUなどに比べ、電力あたりでの効率に優れている。

また、SPHにはいくつかの派生手法があるが、今回は標準SPHと、Density Independent SPHを実装した。

その結果、我々の開発したコードは、通常のCPU版に比べて、流体・重力共に単精度で30倍程度の速度効率が出る事が確認された。

本講演では、実際に本コードを、惑星科学における重要な現象である、巨大衝突に適用した例について、紹介する。

## 火成活動を伴うマントル対流シミュレーションの試み: モデル形状の効果はいかほどか

### Numerical simulations of the coupled magmatism-mantle convection system in 2-D and 3-D geometries

\*亀山 真典<sup>1</sup>、小河 正基<sup>2</sup>

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

1. 国立大学法人愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター、2. 東京大学大学院総合文化研究科

1. Geodynamics Research Center, Ehime University, 2. University of Tokyo at Komaba

It is generally considered that a magmatism occurred very actively in the hot mantle in the early Earth. Ogawa (2014) proposed that a positive feedback can operate between the magmatism and the upwelling flows of solid-state mantle convection, by numerical experiments of a coupled magmatism-mantle convection system in two-dimensional Cartesian domains. In this study, we newly developed numerical models of the coupled magmatism-mantle convection in three-dimensional Cartesian box as well as in two-dimensional spherical annuli with various shapes, in order to investigate how the geometries of the convecting vessel affects the feedback between the magmatism and mantle upwelling (or "MMU feedback" in short).

We employed both three-dimensional rectangular box and two-dimensional spherical annuli with various ratios of their inner to outer radii. The solid-state convection of the mantle is assumed to be that of an isoviscous fluid with a very high viscosity. Mantle magmatism is modeled by the generation of liquid phase (magma) owing to the pressure-release melting induced by upwelling flows of solid-state convection and the motion of the generated magma as a permeable flow through the solid matrix. The permeable flow of magma was assumed to be driven by a buoyancy due to the density difference between the solid and the liquid phases.

We carried out preliminary experiments using two-dimensional spherical annuli by systematically varying the ratio of inner to outer radii and the Rayleigh number of solid-state convection of the mantle. Our results showed that the MMU feedback can operate in a qualitatively very similar manner when the Rayleigh number is sufficiently large. The threshold values of the Rayleigh number for the MMU feedback lie between  $O(10^6)$  and  $O(10^7)$ , regardless of the shape of the spherical annuli. We also found that, despite the cooling due to solid-state convection and magmatism, the temperature in the mantle remains slightly higher for thinner spherical annuli with larger ratio of inner to outer radii. Our findings suggest that the curvature of the mantle can affect the operation of MMU feedback only in an indirect manner, by modulating the thermal state and the magma generation in the convecting mantle.

キーワード：マントル対流、火成活動、数値シミュレーション

Keywords: mantle convection, magmatism, numerical experiment



## 対流する固体マントル中での軽い液相の分離様式 Separation styles of liquid phase in a convecting solid mantle

\*柳澤 孝寿<sup>1</sup>、亀山 真典<sup>2</sup>、小河 正基<sup>3</sup>

\*Takatoshi Yanagisawa<sup>1</sup>, Masanori Kameyama<sup>2</sup>, Masaki Ogawa<sup>3</sup>

1. 海洋研究開発機構 地球深部ダイナミクス研究分野、2. 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター、3. 東京大学大学院 総合文化研究科

1. Department of Deep Earth Structure and Dynamics Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Geodynamics Research Center, Ehime University, 3. Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

In studying evolution of planetary interiors, separation of liquid phase in mantle is one of the essential processes. In rocky mantle of terrestrial planets, this process is related to magma migrations in crust and mantle, and water rising at subduction zones. It is important to know how the separation of liquid phase proceeds, and how the background solid convection is affected by the flow of liquid phase.

Here we treat a simple setting for liquid phase separation in a convecting solid mantle. We do not include melting and solidification of the liquid phase as a first step. In this model, migration of liquid phase is modeled as a permeable flow. Density of the liquid phase is set to be slightly lighter than the surrounding solid phase. When the relative motion between the liquid and solid phases occurs, the porosity changes and the permeability at that volume is reduced or increased. There are two parameters controlling the flow in this system, those are, Rayleigh number ( $Ra$ ) for the convection of solid phase, and the initial non-dimensional permeability ( $M$ ) for the permeable flow of the liquid phase. We compared the timescale of separation at wide ranges of  $Ra$  and  $M$ . The geometry is a 3D rectangular cell or a quasi-2D box.

We identified that the styles of separation can be categorized into four cases; (a) rapid separation, (b) gradual separation, (c) slight separation, and (d) no separation. When the  $M$  is very large, the liquid phase rises with a high velocity. Consequently separation proceeds within a very short time independent on the convective flow of the solid phase (a: rapid separation). When the  $M$  is very small, separation does not occur and the convection of the solid phase proceeds including liquid phase in it (d: no separation). Two styles are recognized between these two extremes. In (b: gradual separation), the liquid phase gradually separates at upwelling regions of the solid phase convection. If the background solid convection is time dependent, the liquid phase of the entire system is efficiently removed to the surface. In (c: slight separation), the distribution of liquid phase is slightly evolved from the initial uniform state, but a balance between separation and entrainment of liquid phase is achieved and no further separation proceeds. We established a regime diagram of the styles of separation on the space of  $Ra$  and  $M$ . Convection of solid phase delays separations of liquid phase. The differences among styles are understood well by a competition between two velocities, permeable flow velocity and convection velocity of solid phase.

キーワード：マントル対流、液相の分離、浸透流

Keywords: mantle convection, separation of liquid phase, porous flow

## 粘性率の応力履歴依存性を持つ流体の熱対流によるプレートテクトニクスの3次元シミュレーション

### Three-dimensional numerical simulation of tectonic plates in thermal convection of a fluid with stress-history dependent rheology

宮腰 剛広<sup>1</sup>、\*小河 正基<sup>2</sup>、亀山 真典<sup>3</sup>

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

1. 海洋研究開発機構、2. 東京大学、3. 愛媛大学

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. University of Tokyo, 3. Ehime University

Rigid tectonic plates separated by sharp plate margins rather steadily move on the Earth. New plate margins develop, only when such tectonic processes as continental collision and vigorous magmatism known as Large Igneous Provinces induce unusually high stress in the lithosphere; once formed, plate margins remain there even after the stress level is reduced to the usual level in the lithosphere. Our earlier two-dimensional numerical studies of thermal convection of a Newtonian temperature-dependent viscosity fluid show that it is crucial to assume a stress-history dependent viscosity to reproduce these features of tectonic plates of the Earth: In our models, the viscosity takes a high value for plate interior, when the stress  $\sigma$  is sufficiently low; the viscosity drops to a low value typical for plate margins, when  $\sigma$  exceeds the rupture strength of plates  $\sigma_p$ ; the viscosity remains low even after  $\sigma$  is reduced below  $\sigma_p$ , as long as it remains higher than another threshold  $\sigma_m$ , the coupling strength at plate margins. The viscosity is a two-valued function of stress in the range from  $\sigma_m$  to  $\sigma_p$ . We found that the basic features of tectonic plates arise, only when the typical stress in the lithosphere is within this range. We also found that the stress-history dependent viscosity is crucial for reproducing a thermo-chemical pile like the Large Low Shear Velocity Provinces, and to realize the asthenosphere that moves faster than the overlying plates around ridges. In this presentation, we extend this two-dimensional model of mantle convection to three-dimensional space by the use of the ACuTEMAN code we developed earlier. We calculated convection in a rectangular box with  $\sigma_p$  lower than the typical stress in the lithosphere to start a plate motion, and succeeded in reproducing sharp plate boundaries. We will raise  $\sigma_p$  and explore how the plates thus started behave, when the stress-history dependent viscosity plays a crucial role in their dynamics.

## 惑星大気シミュレーションの高解像度化に向けて：理想化実験におけるQBO的周期振動のモデル依存性

### Toward high-resolution simulation of planetary atmospheres—Model dependencies of a QBO-like oscillation.

\*榎村 博基<sup>1</sup>、八代 尚<sup>2</sup>、西澤 誠也<sup>2</sup>、富田 浩文<sup>2</sup>、中島 健介<sup>3</sup>、石渡 正樹<sup>4</sup>、高橋 芳幸<sup>1</sup>、林 祥介<sup>1</sup>

\*Hiroki Kashimura<sup>1</sup>, Hisashi Yashiro<sup>2</sup>, Seiya Nishizawa<sup>2</sup>, Hirofumi Tomita<sup>2</sup>, Kensuke Nakajima<sup>3</sup>, Masaki Ishiwatari<sup>4</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>1</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>1</sup>

1. 神戸大学/惑星科学研究センター、2. 理化学研究所計算科学研究機構、3. 九州大学、4. 北海道大学

1. Kobe Univ./CPS, 2. RIKEN AICS, 3. Kyushu Univ., 4. Hokkaido Univ.

地球大気の運動は数メートル規模から惑星規模に至るまで幅広く、様々な規模の現象が相互作用している。このことが、より高解像度の気象シミュレーションが求められる理由の1つである。こうした状況は、火星や金星などの他の惑星でも同様なはずである。ゆえに、惑星大気より深い理解のために、より高い解像度が求められる。しかし我々は、とりわけ小規模な現象の観測がほとんどない惑星大気に関しては、高解像度化の道を慎重に歩むべきである。

大気シミュレーションを高解像度化していくにあたって、支配方程式系と計算手法の両者にそれぞれギャップが存在している。

大規模な運動において大気は静力学平衡を保っており、それは大気モデルの支配方程式系の中で仮定されてきた。一方、小規模(数十キロメートル以下)の運動では、静力学平衡の仮定は妥当でなく、鉛直運動量の予報方程式を解く必要がある。それゆえ、解像度を高くしていく場合、非静力学の支配方程式系に変更する必要がある。

大規模並列計算機の高い計算性能を活用するには、計算手法もまた、変更する必要がある。全球大気モデルの数値計算には、スペクトル法が広く使われてきた。なぜならば、スペクトル法は、計算精度の高さと球面上での格子間隔の不均一を避けられるという利点を持っているからである。しかし、この手法はスペクトル変換を利用するため、並列計算には適していない。そこで、大規模並列計算機を活用するために、正二十面体準一様格子による計算手法が開発された(Tomita et al. 2001, 2002)。本来望ましくないことだが、計算手法の違いが数値解に無視できない規模で影響するかもしれない。

上述のギャップを乗り越える、つまり方程式系や計算手法に対する数値解の依存性を理解し、それらに依らないロバストな結果・知見を得るためには、比較研究が重要である。本研究では、DCPAMとSCALE-GMという2つの数値モデルを用いる。DCPAMは静力学平衡を仮定しており、スペクトル法で計算を行っている。一方、SCALE-GMは非静力学モデルであり、正二十面体準一様格子上で有限体積法で計算をしている。また、SCALE-GMは静力学平衡を仮定した計算も実施できる。

我々は、地球大気大循環の理想化実験(Held and Suarez 1994)をモデル大気上端を約50 kmまで延ばした実験を、両モデルで実施した。その結果、約15 km以下の下層大気の循環は両モデルで似ていたが、上層大気では東西風速の振る舞いが顕著に違った。SCALE-GMではQBO(成層圏準二年周期振動; 赤道上空の東西平均東西風の向きが約2年周期で振動する現象)に似た東西風振動が現れたが、DCPAMではそのような振動は現れなかった。このような、QBO的振動とそのモデル依存性は、Yao and Jablonowski (2013, 2015)で報告されているが、その詳細や原因は未解明である。

本研究では、この QBO 的振動のモデル依存性を探究するため、様々な水平渦拡散やモデル解像度で数値実験を実施した。その結果、DCPAMでも水平渦拡散を弱くすると、QBO 的振動が現れた。また、両モデルとも水平渦拡散が弱いほど、振動周期が短くなった。さらに水平渦拡散の強さが同じでも、水平解像度が高いほど、振動周期が短かった。擾乱(東西平均からのずれ)による東西運動量の鉛直輸送を解析したところ、鉛直輸送が大きいほど振動周期が短いという結果が得られた。擾乱による運動量の鉛直輸送の担い手は主に大気重力波である。つまり、モデルの水平渦拡散や解像度が、重力波の励起・伝播・砕波に影響し、それが QBO 的振動の有無または振動周期に影響している可能性が高い。

キーワード：大気大循環モデル、Held and Suarez (1994) 実験、成層圏準二年周期振動

Keywords: atmospheric general circulation model, Held and Suarez (1994) experiment, quasi-biennial oscillation

## Computational science of dust coagulation process in protoplanetary disk turbulence

\*石原 卓<sup>1</sup>、Kobayashi Naoki<sup>1</sup>、Enohata Kei<sup>1</sup>、Shiraishi Kenji<sup>1</sup>、Umemura Masayuki<sup>2</sup>

\*Takashi Ishihara<sup>1</sup>, Naoki Kobayashi<sup>1</sup>, Kei Enohata<sup>1</sup>, Kenji Shiraishi<sup>1</sup>, Masayuki Umemura<sup>2</sup>

1. 名古屋大学、2. 筑波大学

1. Nagoya University, 2. Tsukuba University

By using recent supercomputers, it is becoming possible to use larger-scale direct numerical simulation (DNS) of high-Reynolds-number (Re) turbulence for understanding complex turbulent flow phenomena. Coagulation process of silicate dusts in protoplanetary disk is one of the most challenging problems in planetary science. By tracking huge number (more than one billion) of inertial particles in high Re turbulence, we could simulate turbulent clustering of particles directly and quantitatively. Our DNS of turbulence showed that dust coagulation is expedited by turbulence clustering of particles. The next step is to realize dust growth simulations to quantitatively estimate the growth rate of dust particles and the size-distribution in high Re turbulence. In the presentation, what we have obtained so far and what we are trying will be discussed.

# 高解像度 LES によって得られた火星大気境界層における循環構造

## The circulation structure in the Martian atmospheric boundary layer obtained by high resolution LES

\*村橋 究理基<sup>1</sup>、西澤 誠也<sup>2</sup>、石渡 正樹<sup>1</sup>、小高 正嗣<sup>1</sup>、中島 健介<sup>3</sup>、竹広 真一<sup>4</sup>、杉山 耕一郎<sup>5</sup>、高橋 芳幸<sup>6</sup>、林 祥介<sup>6</sup>

\*Kuriki Murahashi<sup>1</sup>, Seiya Nishizawa<sup>2</sup>, Masaki Ishiwatari<sup>1</sup>, Masatsugu Odaka<sup>1</sup>, Kensuke Nakajima<sup>3</sup>, Shin-ichi Takehiro<sup>4</sup>, Ko-ichiro Sugiyama<sup>5</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>6</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>6</sup>

1. 北海道大学、2. 理化学研究所 計算科学研究機構、3. 九州大学、4. 京都大学 数理解析研究所、5. 松江工業高等専門学校、6. 神戸大学 / 惑星科学研究センター

1. Hokkaido University, 2. RIKEN Advanced Institute for Computational Science, 3. Kyushu University, 4. Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 5. National Institute of Technology, Matsue College, 6. Kobe University / CPS

### 1. はじめに

火星大気には大気境界層中の風により地面から巻き上げられたダストが存在し、大気の大気温度構造などに大きな影響を与えている (Montabone et al., 2005). 多くの大気大循環モデル (GCM) を用いた研究においては、火星大気境界層内のサブグリッドスケールの風によるダスト巻き上げが重要であると考えられており、その過程をパラメータ化して表現している。パラメータ化の妥当性の検証は、計算で得られるダストの光学的深さや温度分布が観測結果と整合的であるか否かで検討されている。

ダスト巻き上げ過程のパラメータ化に関して、大気境界層における循環場の微細構造と直接比較することにより検証することが望ましいが、そのような検討はこれまでされてこなかった。そのためラージエディーション (LES) を用いた調査が行われている。Fenton and Michaels (2010) はモデルの水平解像度を 100 m として、初期に与える水平風の分布を変えた LES 実験を行った。地表面摩擦速度を求めた結果、初期の水平風分布によってはダストの巻き上げが十分起こることが示された。しかし彼らの計算解像度は粗く、ダストデビルのような数十 m スケールの現象が与える影響は考慮できていない。これに対して Nishizawa et al. (2016) は計算解像度を等方 100 m から 5 m まで変えた LES 実験を行うことで、計算解像度依存性について調べた。初期に水平に一樣な静止大気を設定した。等方格子による解像度 5 m の計算は、これまで行われた火星 LES 計算の中で格段に解像度の高いものである。彼らはモデル高度 62.5 m における渦度と鉛直風について調べた。その結果、鉛直風の空間分布について、細く強い上昇流を境界に持つセル状構造の存在が示された。またモデル内で生じる渦の強度や半径の計算解像度依存性について調べ、高解像度計算の方がより強く、小スケールの渦まで表現されることを示した。以上の先行研究においては、ダスト巻き上げに関わる地表面付近の様子については調べられていない。

本研究では、ダスト巻き上げを決定づける地表面応力が循環場の構造とどのような対応を持つか理解することを目指し、地表面付近の循環場及び地表面応力場について調査を行う。本発表では地表面付近であるモデル最下層に注目して調べた結果を示す。

### 2. 使用データ

解析に使用するのは、Nishizawa et al. (2016) で計算されたデータである。これは、RIKEN/AICS で開発された SCALE-LES ver.3 を使用して得られたものである。計算で用いた各パラメータ値は、火星を想定して設定されている。計算領域のサイズは 19.2 km × 19.2 km × 21 km、解像度は 100 m から 5 m の間で数種類用いられている。加熱・冷却率及び地表温度については、Odaka et al. (2001) による一次元モデルで得られた結果を外部から与える。水平境界条件は周期境界である。初期条件は、Odaka et al. (2001) の 0:00 (地方時) における鉛直温度

分布に微少な温位擾乱を加えた静止大気である。上記データの内、解像度 5 m のものは、解像度 10 m で 14:00 (地方時) まで計算した結果を初期値として、1 時間分計算して得られたものである。本研究では計算解像度 5 m の 14:30 におけるデータを用いた。Nishizawa et al. (2016) と同様、モデルに組み込まれている同一のスキームを用いて、地表面応力を求めた。

### 3. 結果

地表面応力の強度頻度分布に調べた結果、頻度は 0.03 Pa 付近に向けて急激に減少し、0.046 Pa までは緩やかに減少する。Greeley and Iversen (1985) の風洞実験で得られたダストを巻き上げる閾値である 0.03 Pa 以上の応力を持つ領域が、計算格子 1500 万点中、数十点程度存在している。

応力の空間分布と循環構造の対応関係について調べるため、モデル最下層 (高度 2.5 m) における風速分布を調べた。その結果、水平スケール十数 m の細い上昇流領域が束になって網目状の構造が見られた。この上昇流領域は Nishizawa et al. (2016) で示されたようなセル状構造の境界に対応していると考えられる。またセル状構造は地表面に近づくほど水平スケールが小さいことがわかった。これらの上昇流領域は水平風収束域と一致している。また上昇流領域に沿って、数十から数百 m の水平スケールを持つ渦度が大きい領域が存在している。強い応力を示す場所の分布は水平風の絶対値の空間分布によく対応していることがわかった。

現在、14:30 以外の他の時刻や解像度についても解析中である。その結果から地表面応力の強い場所における循環場の構造を調べることによって、応力場と循環場の対応関係に関する理解を得る予定である。

キーワード：火星、大気境界層、高解像度ラージエディシミュレーション、乾燥対流、地表面応力、ダスト巻き上げ

Keywords: Mars, Atmospheric Boundary Layer, High Resolution Large Eddy Simulation, Dry Convection, Surface Stress, Dust Lifting

# 大気海洋海氷結合モデルを用いた水惑星の気候に対する海洋大循環の影響の数値的研究

## A numerical study on the impact of ocean general circulation on aquaplanet climate with a coupled atmosphere-ocean-sea ice model

\*河合 佑太<sup>1,2</sup>、高橋 芳幸<sup>1,6</sup>、石渡 正樹<sup>5</sup>、西澤 誠也<sup>2</sup>、竹広 真一<sup>4</sup>、中島 健介<sup>3</sup>、富田 浩史<sup>2</sup>、林 祥介<sup>1,6</sup>

\*Yuta Kawai<sup>1,2</sup>, Yoshiyuki O. Takahashi<sup>1,6</sup>, Masaki Ishiwatari<sup>5</sup>, Seiya Nishizawa<sup>2</sup>, Shin-ichi Takehiro<sup>4</sup>, Kensuke Nakajima<sup>3</sup>, Hirofumi Tomita<sup>2</sup>, Yoshi-Yuki Hayashi<sup>1,6</sup>

1. 神戸大学理学研究科、2. 理化学研究所計算科学研究機構、3. 九州大学、4. 京都大学、5. 北海道大学、6. 惑星科学研究センター

1. Kobe Univ., 2. RIKEN AICS., 3. Kyusyu Univ., 4. Kyoto Univ., 5. Hokkaido Univ., 6. CPS

### 1. はじめに

近年次々と発見される系外惑星では多様な気候が実現されていると考えられ、その構造の理解のために惑星気候の数値シミュレーションが盛んに行われている。我々の研究グループでも、系外惑星の気候決定に対する大気大循環の役割の理解を深めるために、大気大循環モデルを用いて、惑星表面が水で覆われた惑星(水惑星)の気候探索を進めてきた(Ishiwatari et al., 1998; Ishiwatari et al., 2007; 以後 INTH98, INTH07 と書く)。そこでは、大気大循環の役割に焦点を当てたため、海洋大循環は全く考慮されなかった。しかし、海洋大循環による熱輸送もまた惑星の気候決定に対して重要な影響を与えるであろう。近年の計算科学の発展は大気海洋海氷結合モデルの長時間積分を可能にし、水惑星の気候研究においても海洋大循環を陽に考慮した研究がなされ始めている(例: Marshall et al., 2007; Rose et al., 2015)。彼らの先駆的研究により、水惑星結合系の気候の太陽定数依存性、自転角速度依存性などが明らかになりつつある。しかし、水惑星結合系の太陽定数依存性の探索一つとっても、暴走温室までを含めた気候レジーム図の作成、海洋塩分や鉛直渦拡散係数等が現在地球と大きく異なる場合での振る舞いの掌握などは依然としてなされていない。

本研究では、開発した結合モデルを用いて、INTH07 で調べられた水惑星の気候の太陽定数依存性の問題に海洋大循環の効果を導入し、水惑星の気候決定に対する海洋大循環の影響を考察することに焦点を当てる。また、先行研究ではなされなかった暴走温室までを含めた結合モデルによる気候レジーム図の作成を目指す。本発表では、INTH98 や INTH07 と同様の大气設定をした結合モデルによりここまで計算できるようになった、太陽定数増減実験の標準実験(太陽定数は現在地球の値)の結果を報告する。

### 2. 数値モデル

大気モデルは惑星大気大循環モデル DCPAM (<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>)である。力学過程では三次元プリミティブ方程式系と水蒸気輸送がスペクトル法によって解かれる。また、INTH98 の水惑星灰色大気大循環の実験を再現するために、放射過程には Nakajima et al. (1992) の灰色大気放射スキーム、凝結過程には Manabe et al. (1965) の湿潤対流調節スキームと大規模凝結スキームを用いる。これらにより、大気モデルによって、風、温度、表面圧力、比湿の時間発展が計算される。大気モデルの解像度は水平格子間隔約 5 度・鉛直 26 層にとる。一方、海洋海氷モデルは東西平均二次元モデルである。海洋の力学過程では静力学ブジネスク方程式系がスペクトル法によって解かれる。モデルが解像できない中規模渦や対流による混合を表現するために、Gent and McWilliams (1990) や Marotzke (1991) のパラメタリゼーションを用いる。これらにより、

海洋モデルは流速・温度・塩分の時間発展を計算する。海氷モデルは Winton (2000) に基づく鉛直 3 層熱力学モデルであり、海氷の厚さと温度が計算される。以下の実験では、海洋モデルの解像度は南北格子間隔約 2.5 度・鉛直 60 層、海氷モデルの解像度は南北格子間隔約 2.5 度に設定する。最後に、三つのモデルはカップラー・ライブラリ(Arakawa et al., 2011) により結合されている。



### 3. 結果

初めに INTH98 に習って表面アルベドがゼロの場合の結果を記述する。初期に 280 K の等温大気・海洋を設定すると、結合系は数万年積分後に統計的平衡状態に達し、氷線緯度 50 度の部分凍結解を得る。我々の結果は、水惑星結合計算の先行研究である Marshall et al. (2007) が得た大気海洋大循環のパターンとよく似ているが、循環強度が弱いことが特徴である。次に、海洋の大きな熱慣性や海洋大循環の効果を検証するために、海の取り扱いを swamp ocean(熱容量ゼロ)や slab ocean(熱容量が有限)に変えた実験を行った。これらの実験結果の比較により、海洋大循環を考慮した場合には、中低緯度間の南北温度差は約 5 度減少し、赤道の海面温度が約 4 度低下することが分かった。一方で、氷線緯度や全球平均惑星表面温度は、海洋の取り扱いによらず、それぞれ約 50 度と約 283 K であった。次に、氷アルベドフィードバック存在下での海洋大循環の効果を検証するために、INTH07 と同様の氷アルベドフィードバック(263 K 以下の所で表面アルベドを 0.5, それ以外はゼロに設定)を導入した場合の結果を記述する。今回の太陽定数の設定では、swamp ocean 実験と比べて、slab ocean 実験や結合系を用いた実験では氷線緯度は約 10 度後退し、それと対応して全球平均惑星表面温度は約 5 度高くなった。このことは、Rose et al. (2015) が主張するように、氷アルベドフィードバックが存在するときに、海洋の熱慣性や海洋熱輸送が水惑星の気候決定に対してより重要な影響を与えることを示唆する。水惑星の気候決定に対する海洋大循環の役割の理解をさらに深めるために、今後は太陽定数を様々に変えたパラメータ実験を進める。

キーワード：大気海洋海水結合モデル、水惑星の気候、大気海洋熱輸送、氷アルベドフィードバック

Keywords: coupled atmosphere-ocean-sea ice model, aquaplanet climate, atmosphere and ocean heat transport, ice-albedo feedback

## 回転球殻内の非弾性熱対流の臨界モードに対する熱拡散係数の動径分布の影響

### Effects of radial distribution of thermal diffusivity on critical modes of anelastic thermal convection in rotating spherical shells

\*佐々木 洋平<sup>1</sup>、竹広 真一<sup>3</sup>、石渡 正樹<sup>2</sup>、山田 道夫<sup>3</sup>

\*Youhei SASAKI<sup>1</sup>, Shin-ichi Takehiro<sup>3</sup>, Masaki Ishiwatari<sup>2</sup>, Michio Yamada<sup>3</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科数学教室、2. 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻、3. 京都大学数理解析研究所  
1. Department of Mathematics, Kyoto University, 2. Department of Cosmo sciences, Graduate school of Science, Hokkaido University, 3. Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

Linear stability analysis of anelastic thermal convection in a rotating spherical shell with thermal diffusivities varying in the radial direction is performed. The structures of critical convection are obtained in the cases of four different radial distributions of thermal diffusivity; (1)  $\kappa$  is constant, (2)  $\kappa T_0$  is constant, (3)  $\kappa \rho_0$  is constant, and (4)  $\kappa \rho_0 T_0$  is constant, where  $\kappa$  is the thermal diffusivity,  $T_0$  is the temperature of basic state, and  $\rho_0$  is the density of basic state, respectively. The ratio of inner and outer radii, the Prandtl number, the polytrope index, and the density ratio are 0.35, 1, 2, and 5, respectively. The value of the Ekman number is  $10^{-3}$  or  $10^{-5}$ . In the case of (1), where the setup is same as that of the anelastic dynamo benchmark (Jones et al., 2011), the structure of critical convection is concentrated near the outer boundary of the spherical shell around the equator. However, in the cases of (2), (3) and (4), the convection columns attach the inner boundary of the spherical shell.

A rapidly rotating annulus model for anelastic systems is developed by assuming that convection structure is uniform in the axial direction taking into account the strong effect of Coriolis force. The annulus model well explains the characteristics of critical convection obtained numerically, such as critical azimuthal wavenumber, frequency, Rayleigh number, and the cylindrically radial location of convection columns.

The radial distribution of thermal diffusivity is important for convection structure, because it determines the distribution of radial basic entropy gradient which is crucial for location of convection columns.

キーワード：臨界対流、非弾性流体、木星型惑星

Keywords: Critical convection, Anelastic fluid, Jovian planets

# Numerical simulation of circumplanetary disk formation for estimating the disk size and surface density

\*波々伯部 広隆<sup>1</sup>、町田 正博<sup>2</sup>

\*Hiroataka Hohokabe<sup>1</sup>, Masahiro Machida<sup>2</sup>

1. 九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻、2. 九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University

Circumplanetary disks are possible targets for future observations and include some information on planet formation. Numerical simulation is useful to predict such observations.

To investigate the structure of circumplanetary disk and its environment, extremely high resolution is required. Hence we parallelize a three-dimensional hydrodynamic simulation code of static mesh refinement method. The parallelized code enables us to compute 10 times higher spatial resolution than previous studies. When 15 times Hill radius is adopted as the computational domain in the radial direction, the finest spatial resolution is  $10^{-3}$  of the Hill radius which is comparable to the present Jovian radius. The resolution is sufficient to investigate circumplanetary disk structure.

We perform a numerical simulation of circumplanetary disk formation around a planet embedded in protoplanetary disk. We consider a local rotating Cartesian coordinate. The coordinate is rotating around a star with Keplerian angular velocity and curvature is neglected. Basic equations of inviscid fluid hydrodynamic without self-gravity are solved. Some symmetric boundary conditions are imposed to accelerate the calculation, in which rotational, periodic, and mirror symmetries are imposed as radial, azimuthal and vertical directions respectively. The other side boundaries in the radial direction and in the vertical direction of computational domain are connected to unperturbed flow.

In this resolution, the angular momentum of the initial condition can not be neglected. Then a artificial retrograde circumplanetary disk forms potentially and the disk is not dissipative even in long time integration. To avoid the problem, we introduce sink cells around protoplanet. Finally, a prograde disk is formed.

Acknowledgement: The computation was carried out using the computer facilities at Research Institute for Information Technology, Kyushu University.

キーワード：周惑星円盤、流体力学、数値シミュレーション

Keywords: circumplanetary disk, hydrodynamics, numerical simulation