

# 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>

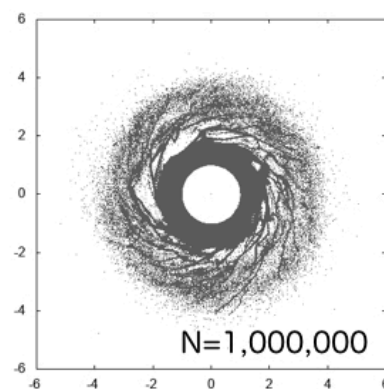
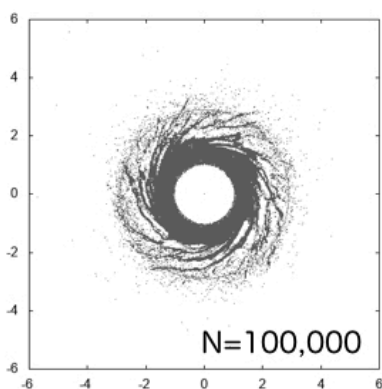
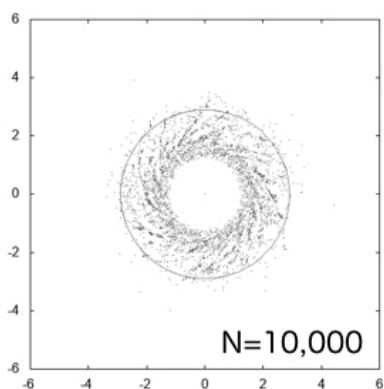
1. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室、2. 京都大学 大学院総合生存学館

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。

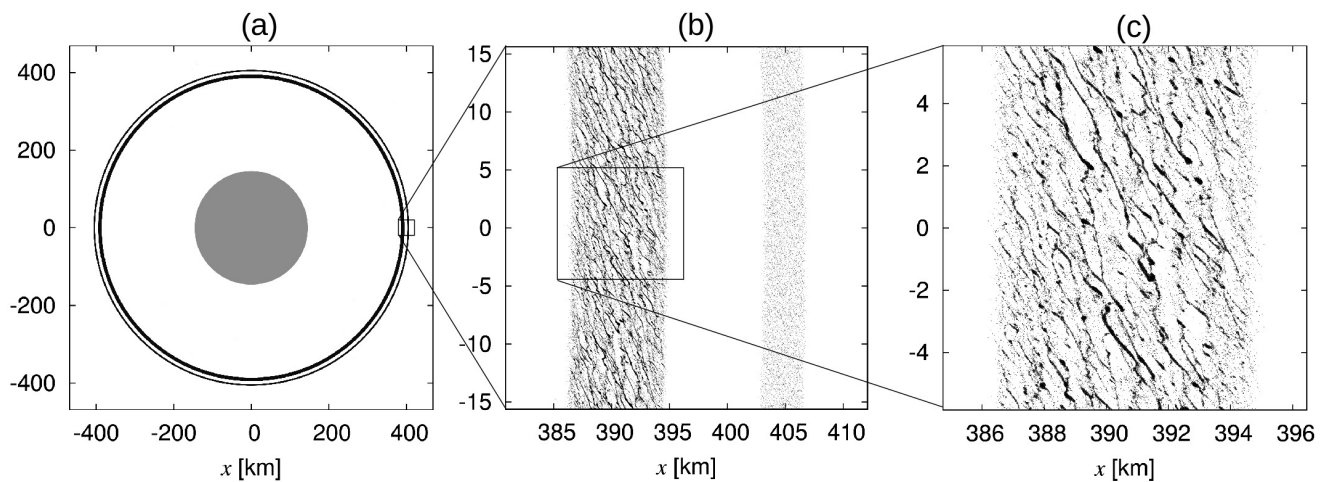
次に粒子サイズや密度を変化させてシミュレーションを行った。粒子サイズは2.5 mから10 m、粒子密度は0.05 g/ccから1.0 g/ccまでの値を用いてシミュレーションを行った。粒子数は、2000万個から3億4000万個である。その結果、粒子密度が環の構造を決定する重要なパラメータであることがわかった。まず、粒子密度が0.1 g/cc以下の場合、自己重力ウェイク構造ができず一様な環となる。これはエネルギー散逸が弱くランダム速度の低下が十分ではないため、重力不安定が発生しないためである。次に、粒子密度が0.1 g/ccから0.5 g/ccの場合、標準モデルと同様に自己重力ウェイク構造が発生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