

「京」からポスト「京」へ  
From K computer to the post-K computer

\*牧野 淳一郎<sup>1</sup>

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

1.神戸大学理学研究科惑星学専攻

1.Department of Planetology, Graduate School of Science / Faculty of Science, Kobe University

本講演では、「京」、ポスト「京」について、その計画の概要、サイエンスを推進していく体制等の概要と、惑星科学研究との関係について述べる。

「京」は2011年度に完成、2012年度に共用開始した、理論ピーク性能10PF強と現時点で国内最高速、世界でも第4位のスーパーコンピューターである。「京」による科学技術研究については、5つの「戦略分野」が選ばれ、年間5億円程度の研究費で「京」向けのソフトウェア開発と「京」を使った研究を推進してきた。惑星科学・太陽圏科学については、分野5「物質と宇宙の起源と構造」において、MHDシミュレーションによる太陽対流圏の研究や、N体シミュレーションによる惑星形成研究等が行われている。これらは、従来の並列計算機での計算規模をはるかに超える数千から数万ノードでの高い実行効率での並列化に成功し、大きな成果をあげた。

2014年度から、アプリケーション性能で「京」の100倍を目指す、ポスト「京」システムの開発が始まっている。これは、2019-20年頃の完成を予定している。開発担当は「京」の開発も行った富士通であり、「京」と同様な汎用メニーコプロセッサをトラスネットワークで接続したものになる計画である。ポスト「京」については、「京」の5戦略分野に代わるものとして、9個の「重点課題」と4個の「萌芽的課題」が選定されている。惑星科学は、「萌芽的課題」の一つ、「太陽系外惑星（第二の地球）の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明」としてポスト「京」で実施するテーマとなっている。重点課題については既に実施体制が決まっているが、「萌芽的課題」については現時点(2016/1)ではまだ決まっていない。講演時点ではある程度進展があると期待できるので、その状況を報告する。

キーワード：大規模数値計算、計算科学

Keywords: large-scale simulation, computational science

## 星・惑星系形成領域の有機物進化

## Complex organic molecules in star- and planet-forming regions

\*相川 祐理<sup>1</sup>\*Yuri Aikawa<sup>1</sup>

## 1.筑波大学計算科学研究センター

1.Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

近年、太陽質量程度の原始星の周囲でギ酸やジメチルエーテル等の大型有機分子の輝線観測が盛んに行われている。ALMAの試験観測では原始星IRAS16293の周囲に最も簡単な糖であるグリコールアルデヒドも検出された (Jorgensen et al. 2012)。これらの分子は比較的昇華温度が高いこと、またその生成にはダスト表面反応が重要な役割を果たすと予想されることから、固相には輝線で見える気相よりもさらに多くの大型有機分子が存在すると期待される。星・惑星系形成領域での大型有機分子、特に固相での存在度は、固体集積で形成される地球型惑星さらには生命の材料物質としても重要である。しかし、固相の大型有機分子の詳細な組成と存在量を観測で直接調べることは困難である。よって輝線観測と理論を組み合わせることで気相・固相の物質進化を総合的に理解しなくてはならない。ここで必要となる理論は(i)星・惑星系形成のダイナミクス、(ii) 気相・固相での素反応を組み合わせた化学反応ネットワークモデル、(iii) 素反応の反応過程・反応係数と多岐にわたる。講演では、星形成前の冷たい分子雲コアから円盤形成に至る3次元輻射流体計算をもとに気相・固相の組成進化を追った数値シミュレーションなど最近の研究例を紹介し、上記(ii)(iii)の現状と課題を議論する。

キーワード：星間化学、星・惑星系形成

Keywords: astrochemistry, formation of star and planetary systems

FDPS(Framework for Developing Particle simulator)による計算惑星科学  
Computational planetary science using FDPS (Framework for Developing Particle simulator)

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

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

1.理化学研究所、2.東京大学、3.東京工業大学、4.神戸大学

1.RIKEN, 2.The University of Tokyo, 3.Tokyo Institute of Technology, 4.Kobe University

Particle-based simulations are widely used in the field of computational astronomy. Examples include the cosmological simulations or the planet-formation simulations with gravitational  $N$  body code, the simulations of star and galaxy formation with the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) code or other particle-based codes, and the simulations of planetesimals formation with the Discrete Element Method (DEM) code. To develop an efficient program for particle-based simulation for large-scale parallel machines computer is not easy, and to some extent the efforts of many researchers have been spent on the programming and tuning. However, the algorithms of particle-based simulations are largely similar. Thus we have developed a framework which helps the researchers to develop efficient programs for particle-based simulation on large parallel machines, which we call Framework for Developing of Particle Simulators, or FDPS.

In this presentation, we introduce concept and implemantaion of FDPS. We also show some applications for planetary science using FDPS.

キーワード：シミュレーション、惑星形成

Keywords: Simulations, Planet formation

大規模N体計算が切り拓く惑星形成：1億粒子、そしてその先へ

High-resolution N-body Simulations for Planet Formation: To 100 Million Particles, and Beyond

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

\*Yasunori Hori<sup>1,2</sup>, Shoichi Oshino<sup>3</sup>, Michiko Fujii<sup>4</sup>, Masaki Iwasawa<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、3.国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト、4.東京大学 理学系研究科天文学専攻、5.理化学研究所 計算科学研究機構

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

In a collisional system, close encounters play an important role in dynamical evolution. Gravitational interactions between particles undergoing a close encounter are big bottlenecks in N-body simulations because of high computational costs. In fact, a direct N-body simulation in the context of planet formation faces a wall of ten thousand particles. Toward high-resolution N-body simulations with 100 million particles and beyond, we have developed three tips to overcome this sort of big wall, implementing them into our N-body code for planet formation: (i) a tree-based hybrid N-body scheme which reduces numerical integrations of gravitational interactions among particles, PPPT method (Oshino et al. 2011), (ii) GPU clusters which allow us to handle a large number of particles, (iii) parallelization and optimization for accelerating numerical integrations, specifically, a multi-purpose platform for a parallelized particle-particle simulation, the so-called "Framework for Developing Particle Simulator" (FDPS: Iwasawa et al. 2015). In this talk, we introduce what our brand-new N-body code is like and its performance and capability. We also show our preliminary results of N-body simulations of terrestrial planet formation, using ~ 0.1-1 million planetesimals.

キーワード：惑星形成、N体計算、GPU

Keywords: Planet formation, N-body simulation, GPU

大規模惑星集積並列N体計算：ガス円盤内での微惑星による原始惑星の外側移動

Global High-resolution N-body Simulation of Planet Formation: Planetesimal Driven Migration with Type-I Migration

\*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.理研 AICS、4.宇宙航空研究開発機構

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

By means of fully self-consistent N-body simulations, we investigated whether outward Planetesimal Driven Migration (PDM) takes place or not when the self gravity of planetesimals is included. We performed N-body simulations of planetesimal disks with large width (0.7 - 4AU) which ranges over the ice line. The simulations consisted of two stages. The first stage simulations were carried out to see the runaway growth phase using the planetesimals of initially the same mass. The runaway growth took place both at the inner edge of the disk and at the region just outside the ice line. This result was utilized for the initial setup of the second stage simulations in which the runaway bodies just outside the ice line were replaced by the protoplanets with about the isolation mass. In the second stage simulations, the outward migration of the protoplanet was followed by the stopping of the migration due to the increase of the random velocity of the planetesimals. Due to this increase of random velocities, one of the PDM criteria derived in Minton and Levison (2014) was broken. In the current simulations, the effect of the gas disk is not considered. It is likely that the gas disk plays an important role in planetesimal driven migration. Hence, we also carried out N-body simulations of PDM including the gas drag and type-I migration. Type-I migration and gas drag are known as the effects that drag the planetesimals and protoplanets toward the central star. We showed that the random velocity of the planetesimals are subdued by the gas drag and enhances the outward migration. We found that in Minimum Mass Solar Nebula (MMSN), there were a period that outward PDM overcomes the type-I migration.

## 地球形成の「ABELモデル」から導かれる今後の太陽系惑星形成論の新展開

## New developments in planetary formation theory of solar system derived from ABEL model

\*丸山 茂徳<sup>1</sup>、戎崎 俊一<sup>2</sup>

\*Shigenori Maruyama<sup>1</sup>, Toshikazu Ebisuzaki<sup>2</sup>

1.東京工業大学地球生命研究所、2.理研

1.Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2.RIKEN

地球は、大気・海洋成分を全くもたないドライな状態で45.6億年前に誕生し、約44億年前に、大気・海洋成分が二次的に付加した。このようなプロセスで説明される地球形成モデルをABELモデル (Advent of Bio-Elements Landing Model) と呼ぶ。固体地球の起源がエンスタタイトコンドライトであることは、酸素同位体組成ほか7種類の元素の同位体分析によって明らかであるのと同時に、地球の水の起源が炭素質コンドライトであることは水素同位体比によって強く裏付けられている。これらを最もうまく説明するのがABELモデルであり、生命誕生に至る代謝のプレカーサーであったことが強く示唆される。

ABELモデルの提案に基づき改めて導かれる、「計算科学による惑星形成・進化・環境変動研究の新展開」の具体的描像を展望する。(1) 月形成論 (ジャイアントインパクト説) : ジャイアントインパクトの有無と時期 (地球のコアの温度が低すぎる、これを説明するには地球だけが寡占的に成長しその他の惑星が小さいまま進化するモデルが必要)。(2) 小惑星帯の化学組成累帯構造 : 観測の事実がGrand Tackモデルが预言するランダムな組成分布を支持しない。水平方向に物質循環を起こす新しいモデルを構築し小惑星帯領域に質量の欠損を持つ新しいモデルの構築が必要 (たとえば戎崎・今枝のタンデムモデル)。(3) 隕石の年代学の学際研究 : コア、マンツルの分離はアステロイドのステージに完了し、それらの衝突融合による層状構造の発達が大規模層状分化をまねいた。したがってコアの組成は低圧で完了していた。(4) H<sub>2</sub>ガス : 隕石の年代学に基づき、隕石薄天体が破壊され、内部の高温マンツルや核が丸例された年代をコンパイルすると最古の年代は円盤形成後300万年が経過する前に水素ガスは晴れていたことになる。今後年代測定の数が増加すればこの年代はさらに性格になる。小惑星の破壊が可能になった原因を水素ガスの晴れ渡りだとすれば小惑星帯の位置で水素ガスは3Maの頃にはすでに晴れていたことになる。

これらの知見をもとに新たな太陽系惑星形成論に期待される新展開を解説する。

キーワード : 惑星形成理論、ABELモデル

Keywords: Planetary formation theory, ABEL model

## 惑星内部進化のモデリング

## Modeling the evolving interiors of planets

\*小河 正基<sup>1</sup>\*Masaki Ogawa<sup>1</sup>

1. 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

1. Division of General Systems Studies, Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

地球型惑星内部の活動様式と惑星サイズとの間にはマントル対流を介して明瞭な相関が見られる。マントルのレイリー数が臨界値以下の月では明確に対流によると認められる活動は現在見られないが、レイリー数が臨界値近辺にいる火星では対流の一つの様式であるプルームによる火山活動がその歴史を通じて起こってきた。さらにレイリー数の大きな地球や金星では、プルーム火山やリソスフェアの運動など対流の痕跡が顕著に見られる。このような惑星内部の活動や進化を統一的に理解するためにはこの進化を支配する素過程を現実のマントルの置かれた状況下で数値的にシミュレートする必要がある。筆者はこれまでマントル対流と火成活動の2次元モデルを用いて、(1) 火星より大きな惑星で機能する火成活動マントル湧昇流フィードバック、(2) 金星や地球等下部マントルを有する惑星においてマントル構成鉱物の高圧相転移と火成活動の相互作用の結果起こるマントル対流の脈動（バースト）、(3) 地表面に海があることと密接に関連していると思われるプレートテクトニクスなどの素過程が惑星進化をどのように支配してきたかを研究してきた。本講演では、これらの素過程の3次元モデル化の必要性について論ずる。

キーワード：マントル進化、マントル対流、火成活動

Keywords: mantle evolution, mantle convection, magmatism

## 巨大スーパーアースのマントル対流シミュレーション

## Thermal convection in the mantle of massive super-Earths

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

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

1.海洋研究開発機構、2.愛媛大学、3.東京大学

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

Understanding thermal convection in the mantle of super-Earths is one of the most important key to clarifying their thermal history, surface environment, and habitability. The reason is that the plate motion, material circulation, the vigor of core convection and planetary dynamos are controlled by the thermal convection.

In contrast to the Earth's interior, the strong adiabatic compression effect is important in massive super-Earths. We have studied the thermal convection in massive super-Earths (about ten times the Earth's mass) with this effect by the ACuTEMAN method [Kameyama M., 2005]. We also take account for high Rayleigh number which is relevant for super-Earths, and temperature-dependent viscosity contrast and depth-dependent thermal expansion coefficient.

The summary of results is as follows. (a) The activity of ascending hot plumes is considerably lowered compared with that of descending cold plumes. (b) The efficiency of heat transport by thermal convection is lowered compared with the results of Boussinesq (no adiabatic compression) models. The thickness of plate at the surface is considerably thicker than that of the Earth. (c) From the convective regime diagram, the threshold value of viscosity contrast for transition to the stagnant-lid regime convection increases as Rayleigh number increases in contrast to the result of Boussinesq models (in which the threshold value is constant). The details of a-c are given in Miyagoshi et al. [2014, 2015].

We also found that the convection remains in the initial transient stage for a substantial portion of the thermal history of massive super-Earths. In the transient stage, the convection is layered. Cold plumes descend from the surface very slowly, and the convection remains inactive in the upper layer, until the cold plume heads descend to the layering boundary. The layering boundary is located at the depth where the actual temperature gradient coincide with the adiabatic temperature gradient. After the initial transient stage, cold plumes penetrate through the boundary, and the convective structure changes to the whole layer one.

キーワード：スーパーアース、マントル対流

Keywords: super-Earths, mantle convection



## 雲解像モデルに基づく積雲対流スキームの開発

## Development of cumulus parameterization based on cloud-resolving model

\*馬場 雄也<sup>1</sup>\*Yuya Baba<sup>1</sup>

1. 国立研究開発法人 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

A cumulus parameterization was developed using cloud-resolving model. Cloud-resolving model was used to estimate macrophysical cloud properties which were considered in the cumulus parameterization through modeling of entrainment and detrainment rates. Analysis on composite structure of updraft convective clouds simulated by cloud-resolving model indicated that there was similarity in the both structures of deep and shallow convection. The similar structures were possible to be modeled using updraft velocity of cloud mass flux in conjunction with in-cloud buoyancy and detrainment. Based on the composite analysis on data obtained from the cloud-resolving model, (organized) entrainment could be parameterized using in-cloud buoyancy and a recently proposed (organized) detrainment model. The developed cumulus parameterization diagnoses the updraft velocity when the model determines updraft convective cloud structure, considering lateral mass exchanges performed by entrainment and detrainment. The downdraft cloud structure was analogously parameterized by height-dependent entrainment using negative in-cloud buoyancy which was produced by evaporation (and sublimation) of precipitation. The diagnosed cloud structure was generalized in which shallow and deep convection was treated in a unified manner.

An atmospheric general circulation model (AGCM) was developed employing a composite grid system and recently presented parameterizations (land surface, non-orographic gravity wave and boundary layer schemes), and the developed cumulus parameterization was implemented into the AGCM, in order to examine sensitivity to the selected parameters and physical performance of the scheme. Evaluations of the scheme were performed using the AMIP-type low-resolution experiments against climatological reanalysis data. In the evaluations, difference of detrainment model was especially examined, and it was found that (organized) detrainment model had significant impact on the model's physical performance. This was because the present entrainment rate was modeled using detrainment rate, and thus these parameters were strictly connected each other. Although all employed detrainment models were based on the fact that detrainment was proportional to buoyancy loss in convective clouds, a detrainment model originally developed for shallow convection showed worse physical performance, and detrainment model which was based on cloud-resolving model and did not separate modeling procedure for different convection depths worked better.

キーワード：積雲対流スキーム、雲解像モデル、大気大循環モデル

Keywords: cumulus parameterization, cloud-resolving model, atmospheric general circulation model

## 汎惑星気象・気候シミュレーションに向けて

Toward simulations of weather and climate of planetaries in general

\*林 祥介<sup>1</sup>\*Yoshi-Yuki Hayashi<sup>1</sup>

1.神戸大学・大学院理学研究科 惑星学専攻/惑星科学研究センター (CPS)

1.Department of Planetology/CPS, Graduate School of Science, Kobe University

本講演では、大気を持つ地球以外の惑星（衛星）の気象・気候シミュレーションとそのためのソフトウェア開発の現状を概観し、今後を展望する。仮想的な惑星を数値的に設定し、その気象・気候を計算機上に表現しこれを考察すること

とによって、惑星表層環境の普遍性・特殊性に思いを馳せる、という行いは、20世紀の終わり頃までは欧米ではめったに予算のつかない趣味の領域の研究とされてきた。惑星表層環境に関する進化・多様性の考察は、放射伝達を解くエネルギー収支的な解析としては精力的に進められてきたが、大気循環による物質輸送の陽な表現を行うことは稀であった。しかるに今日、系外惑星観測の進展とにともない、系外惑星の表層環境を数値的に探求するという行いが急速に前景化し、また、太陽系形成の理解の進展は惑星とその表層初期環境の数値的考察を促すに至っている。しかしながら、惑星探査や宇宙望遠鏡あるいは地球上からの観測によって多少なりともデータの得られている太陽系の惑星気象・気候の理解は、その知見を持って系外や過去に自信をもって展開するにふさわしいレベルに到達しているとは言えない。火星表層の特徴である全球ダストストームの非周期的に出現は未だ理解されておらず、金星表層の特徴である4日循環(高速東西風)は、内在する擾乱や乱流構造が不明であり、流体力学的に整合的に組み上げられるには至っていない。木星の縞帯構造に関しては、相変わらず諸説乱立の状況から出られていない。地球の天気予報や気候予測を担保する観測の展開が、これらの惑星では容易ではなく、いわんや系外においてはほぼ不可能である中、その数値的探求の科学的正当性をどう確保していくかが、持続的な研究を行う上で重要な問題となるだろう。我々は「階層的モデル群」とこれを支えるライブラリ群の開発を進めている。

キーワード：数値シミュレーション、汎惑星環境、気象・気候

Keywords: numerical simulation, planetary environment in general, weather and climate