

「京」からポスト「京」へ

From K computer to the post-K computer

*牧野 淳一郎¹

*Junichiro Makino¹

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¹*Yuri Aikawa¹

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¹、谷川 衝^{2,1}、細野 七月¹、村主 崇行¹、牧野 淳一郎^{4,1,3}

*Masaki Iwasawa¹, Ataru Tanikawa^{2,1}, Natsuki Hosono¹, Takayuki Muranushi¹, Junichiro Makino^{4,1,3}

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^{1,2}、押野 翔一³、藤井 通子⁴、岩澤 全規⁵

*Yasunori Hori^{1,2}, Shoichi Oshino³, Michiko Fujii⁴, Masaki Iwasawa⁵

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¹、台坂 博²、牧野 淳一郎³、藤本 正樹⁴

*Junko Kominami¹, Hiroshi Daisaka², Junichiro Makino³, Masaki Fujimoto⁴

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¹、戎崎 俊一²

*Shigenori Maruyama¹, Toshikazu Ebisuzaki²

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 : 観測の事実は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) H₂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¹*Masaki Ogawa¹

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¹、亀山 真典²、小河 正基³

*Takehiro Miyagoshi¹, Masanori Kameyama², Masaki Ogawa³

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¹*Yuya Baba¹

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¹*Yoshi-Yuki Hayashi¹

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

惑星形成 N 体計算の大粒子数化に向けて：FDPSを用いたParticle-Particle Particle-Tree法の並列計算

Toward N -Body calculations with a larger number of particles : parallel computation for Particle-Particle Particle-Tree scheme using FDPS

*山川 暁久¹、牧野 淳一郎²、斎藤 貴之³、小南 淳子³、竹山 浩介¹

*Akihisa Yamakawa¹, Junichiro Makino², Saitoh Takayuki³, Junko Kominami³, Kosuke Takeyama¹

1.東京工業大学理学院地球惑星科学系、2.理化学研究所計算科学開発機構、3.東京工業大学地球生命研究所
1.Tokyo Tech, 2.RIKEN, 3.ELSI

微惑星集積による地球型惑星の形成過程は N 体計算によって解明されつつあり、暴走成長や寡占成長(Kokubo & Ida 1996, 1998)といった形成過程が存在することが明らかとなっている。しかし、これまでの N 体計算は計算コストの問題から、完全合体を仮定したうえで狭い領域を少ない粒子数で計算するものがほとんどである。より現実的な惑星形成過程のシミュレーションには、衝突による破壊を考慮した上で、より多粒子による長時間積分を行う必要がある。

そこで我々は本研究において、大粒子数で惑星形成過程をシミュレートするために、計算効率の良いアルゴリズムである P^3T 法の並列化の実装を行った。本講演ではその性能を示す。

P^3T 法では、2粒子間の重力を滑らかなカットオフ関数によって近距離力と遠距離力とに分割する。近距離力は粒子間相互作用を高精度に直接計算した上で、エルミート法と独立時間刻みによって高精度に積分する。遠距離力はツリー法とリープフロッグ法によって効率良く積分する。 P^3T 法を用いることにより、低い計算コストで高精度に時間積分することができる。 P^3T 法を並列計算によって高速化するために、ツリー法の領域分割を高速に処理するライブラリであるFDPS(Framework for Developing Particle Simulator)を用いる。

P^3T 法とFDPSを用いて並列計算することにより、大粒子数での惑星形成 N 体計算が可能であることを示す。

キーワード： N 体計算、惑星形成、微惑星

Keywords: n -body simulations, planetary formation, planetesimals

メッシュフリー法における自由表面と接触不連続面への適応

A Mesh-free method for free surfaces and contact discontinuities

*山本 智子^{1,2}、牧野 淳一郎^{4,2,3}*satoko yamamoto^{1,2}, Junichiro Makino^{4,2,3}

1.東京工業大学理工学研究科、2.理化学研究所計算科学機構、3.東京工業大学ELSI、4.神戸大学理学研究科
1.Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2.Advanced Institute
for Computational Science, RIKEN, 3.ELSI, Tokyo Institute of Technology, 4.Graduate School of
Science, Kobe University

In Earth and Planetary Sciences, mesh-free methods for compressive fluids are widely used for fluid simulations in which large deformations occur. As a traditional mesh-free method, Smoothed Particle Hydrodynamics (Lucy 1977 and Gingold & Monaghan 1977; hereafter SPH) is generally used. However, SPH cannot accurately handle free surfaces and contact discontinuities, where the density distribution is not differentiable.

There are two causes for this limitation. First, in many of mesh-free methods, the density of a fluid element is derived directly from the distribution of fluid elements instead of using the equation of continuity. However, the approximation formula in which the density can be derived without implicit method, does not satisfy partition of unity, causing an error. Second, the physical quantities and derivatives are estimated by the SPH approximation formula. This formula is zeroth-order accurate in space and second-order accuracy with respect to the number of neighbor fluid particles which interact with a fluid particle. Therefore there are large errors at free surfaces and contact discontinuities.

To solve this problem, we developed a high-order mesh-free method for compressive fluid. As a solution for the first problem, we integrate the equation of continuity in the new method. In addition, for the second problem, we adapt a space high-order approximation formula to mesh-free methods for compressive fluids. The formula is based on Tamai et al. (2013), in which they formulate a high-order approximation for mesh-free methods for incompressible fluids. Then we express free surface with the boundary condition which the pressure is constant. In addition, for contact discontinuities, we introduce the appropriate boundary condition depending on what it is a contact discontinuity.

We also compare the results of numerical tests of our new method to the results of SPH. These results show that our method can handle free surfaces and contact discontinuities better than SPH. However, the new method cannot accurately handle contact discontinuities with indifferentiable pressure. Therefore, we need other prescriptions for these contact discontinuities, which we will address in future work.

キーワード：流体計算手法

Keywords: Fluid calculation method

SPH法における、人工粘性とそのスイッチ、微分演算子の離散化に関するテスト
Comprehensive tests of artificial viscosities, their switches and derivative operators
used in Smoothed Particle Hydrodynamics

*細野 七月¹、斎藤 貴之²、牧野 淳一郎^{1,2}

*Natsuki Hosono¹, Takayuki R Saitoh², Junichiro Makino^{1,2}

1.理化学研究所 計算科学研究機構、2.東京工業大学 地球生命研究所

1.RIKEN, Advanced Institute for Computational Science, 2.EARTH-LIFE SCIENCE INSTITUTE

天文学や惑星科学において、回転円盤の流体数値計算は非常に重要である。

これまでSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)と呼ばれる手法が広く使われてきたが、

一方このSPH法を用いてケプラー回転する円盤の数値計算を行うと、非物理的な角運動量輸送が円盤に働いてしまい、数回転のうちに円盤が崩壊してしまうという事が指摘されてきた。

この崩壊の原因は未だ明確になっておらず、圧力勾配が原因であるとする説と、人工粘性が原因であるとする説の2つが存在している。

そこで、本研究では、この円盤崩壊の原因を調査した。

その結果、この円盤崩壊は、際内の粒子にかかる人工粘性が引き起こしていた事を発見した。

また、本研究では同時に、人工粘性を古典的なvon-Neumann-Richtmyer-Landshoff型にし、 $\nabla \cdot \vec{v}$ の精度をあげる事で、

円盤が100回転以上計算する事の出来る事を発見した。

キーワード：流体数値計算

Keywords: numerical hydrodynamics

タンデム惑星形成理論

Tandem Planetary Formation Theory

*戎崎 俊一¹、今枝 佑輔¹*Toshikazu Ebisuzaki¹, Yusuke Imaeda¹

1.理化学研究所

1.RIKEN

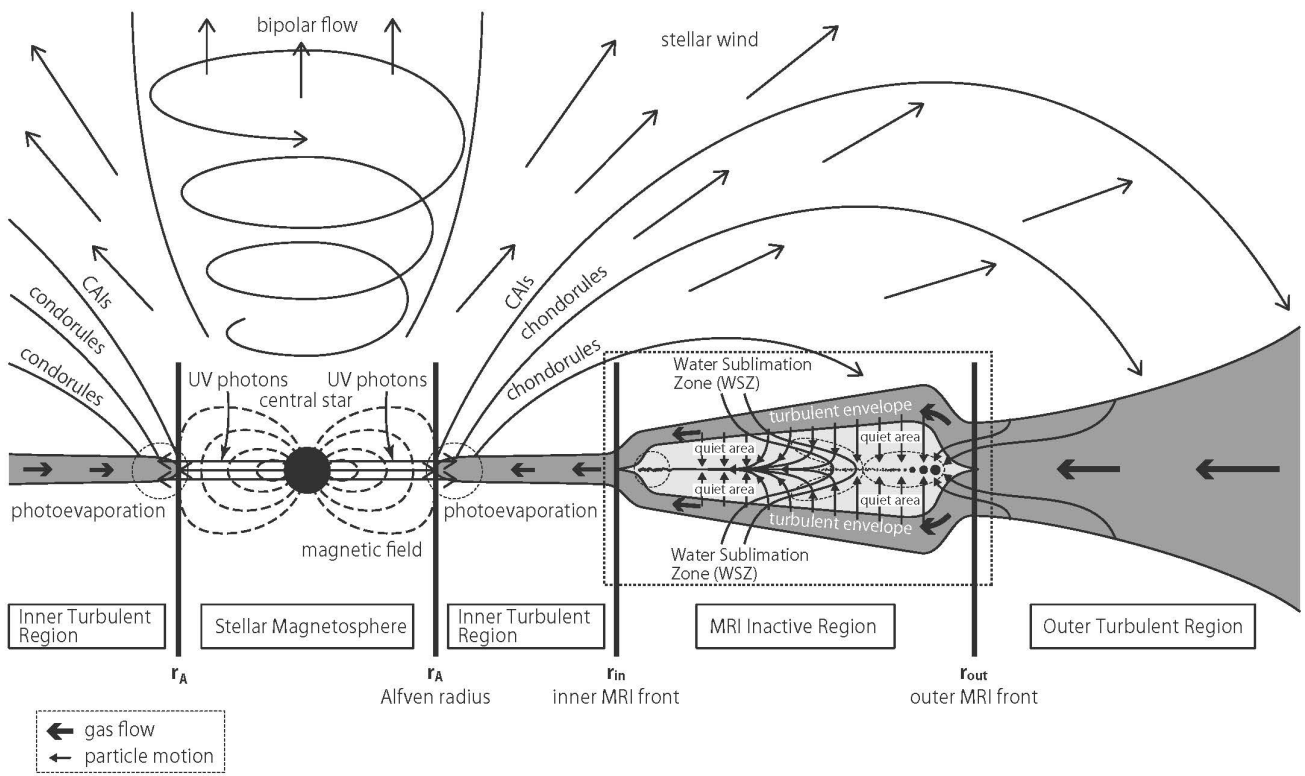
We have obtained a steady-state, 1-D model of the accretion disk of a protostar taking into account the magneto-rotational instability (MRI). We find that the disk is divided into an outer turbulent region (OTR), a MRI suppressed region (MSR), and an inner turbulent region (ITR). The outer turbulent region is fully turbulent because of MRI. However, in the range, r_{out} (= 8 - 60 AU) from the central star, MRI is suppressed around the midplane of the gas disk and a quiet area without turbulence appears, because the degree of ionization of gas becomes low enough. The disk becomes fully turbulent again in the range r_{in} (= 0.2 - 1 AU), which is called the inner turbulent region, because the midplane temperature become high enough (> 1000 K) due to gravitational energy release.

Planetesimals are formed through gravitational instability at the two distinct sites, outer and inner MRI fronts (the boundaries between the MRI suppressed region (MSR) and the outer and inner turbulent regions), because of the radial concentration of the solid particles. At the outer MRI front, icy particles grow through low-velocity collisions into porous aggregates with low densities. They eventually undergo gravitational instability to form icy planetesimals. On the other hand, rocky particles accumulate at the inner MRI front, since their drift velocities turn outward due to the local maximum in gas pressure. They undergo gravitational instability in a sub-disk of pebbles to form rocky planetesimals at the inner MRI front.

The tandem regime is consistent with the ABEL model, in which the Earth was initially formed as a completely volatile-free planet. The water and other volatile elements came later through the accretion of icy particles by the occasional scatterings in the outer regions.

キーワード：惑星形成、降着円盤、磁気回転不安定

Keywords: Planetary Formation, Accretion Disk, Magneto-Rotational Instability



高性能構造格子計算言語Formura

Formura: Programming Language for High-performance Structured Lattice Stencil Computation

*村主 崇行¹、牧野 淳一郎¹*Takayuki Muranushi¹, Junichiro Makino¹

1.国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究機構

1.RIKEN Advanced Institute for Computational Science

Recently, programming and performance optimization have become a big burden in simulation science. In studies of planetary formation and evolution, many applications can be reduced to explicitly solving some partial differential equations (PDEs). We have been developing Formura, a programming language for stencil computations, that can generate explicit solver codes for PDEs. In formura, we can describe discretized PDE-solving algorithms using convenient and familiar mathematical notations such as functions, discretized differentiation operators, rational lattice indices such as half-grid coordinates. We will report the current development status, sample codes, and performance measure of formura.

キーワード：シミュレーション地球科学、構造格子計算、高性能計算

Keywords: simulation geoscience, structured lattice simulation, High-performance computing

マントル対流シミュレーションの技術開発：地球型惑星内部の解明に向けて
Mantle convection simulations from technical viewpoints

*亀山 真典¹、宮腰 剛広²、柳澤 孝寿²、小河 正基³

*Masanori Kameyama¹, Takehiro Miyagoshi², Takatoshi Yanagisawa², Masaki Ogawa³

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.国立研究開発法人海洋研究開発機構地球深部ダイナミクス研究分野、3.国立大学法人東京大学大学院総合文化研究科

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

地球でいえば「マントル対流」とは、岩石からなるマントルが主に固体の状態を保ったまま、非常に長い時間（数百万年～数億年）をかけて、ゆっくりとした速度（数cm/年）で地球内部を流動している現象を指す。この流動は、我々が地球表面で観察できる地学現象（地震・火山・プレート運動など）のほとんど全てに関与している重要なものである一方で、地球深部で起こっている流動・変動現象の中でもとりわけ特異な性質をもつ流体の運動でもある。かくも特異なマントル対流の全貌を理解する上では、数値シミュレーションが不可欠なツールの1つである。また近年の惑星探査の進展、さらには太陽系外の巨大地球型惑星（スーパー地球）の相次ぐ発見により、マントル対流シミュレーション研究の守備範囲やその意義が大きく広がりつつある。

マントル対流シミュレーションが対象とする科学的課題の1つとして、地球型惑星内部の熱・化学状態とその進化過程の解明を挙げることができる。この自己無撞着な取り扱いには、固体マントル物質の（部分）融解やこれに伴う物質分化過程を含んだ火成活動のモデル化が決定的に重要である。しかしながら、こうした火成活動とマントル対流とを結合させた系のシミュレーションでは、時間刻みの制約や両者のフィードバックに伴う計算不安定が存在することもあり、これまでは主に2次元モデルによって基本的な性質を解明することに留まっているのが現状である。そのため、地球を含めた地球型惑星の内部を今後より深く理解するためにも、3次元あるいは球殻ジオメトリを用いたモデリングの実現が強く望まれている。本発表ではその実現に必要な技術的な課題とそれに対する我々の取り組みについて紹介したい。

キーワード：地球型惑星、マントル対流、数値シミュレーション

Keywords: terrestrial planets, mantle convection, numerical simulation

高解像度LESによる火星ダストデビルの統計的性質

Martian dust devil statistics from high-resolution large-eddy simulations

*西澤 誠也¹、小高 正嗣²、高橋 芳幸³、杉山 耕一郎⁴、中島 健介⁵、石渡 正樹²、竹広 真一⁶、八代 尚¹、佐藤 陽祐¹、富田 浩文¹、林 祥介³

*Seiya Nishizawa¹, Masatsugu Odaka², Yoshiyuki O. Takahashi³, Ko-ichiro SUGIYAMA⁴, Kensuke Nakajima⁵, Masaki Ishiwatari², Shin-ichi Takehiro⁶, Hisashi Yashiro¹, Yousuke Sato¹, Hirofumi Tomita¹, Yoshi-Yuki Hayashi³

1.理化学研究所計算科学研究機構、2.北海道大学、3.神戸大学、4.宇宙科学研究所、5.九州大学、6.京都大学
1.RIKEN AICS, 2.Hokkaido Univ., 3.Kobe Univ., 4.ISAS, 5.Kyushu Univ., 6.Kyoto Univ.

火星大気大循環においてダストデビルは重要な役割をもつと考えられている。そこでダストデビルの統計的性質を調べるため、高解像度広領域のLES実験を行った（解像度 5 m, 領域サイズ 約 20 x 20 km²）。用いたモデルは、理化学研究所計算科学研究機構で開発を行っている SCALE-LES (Nishizawa et al. 2015, Sato et al. 2015) である。境界層が最も発達する 14:30 および 15:00 における強い鉛直渦を抽出し、その統計的性質を調べた。本研究では、強い鉛直孤立渦をダストデビルと定義している。ランキン渦 (Rankine 1882) フィッティングやバーガースロット渦 (Burgers, 1948, Rott 1958) フィッティング、最大接線風速抽出の3通りの方法で渦を抽出し、ダストデビルのサイズや強さに関する頻度分布を明らかにした。鉛直渦度は指数分布を、サイズや循環は冪則分布をもつことを示した。

また、グリッドリファインメント実験をおこない、これらの性質の実験解像度依存性の考察をおこなった。これにより、結果のロバスト性を検証するとともに、ダストデビルを解像するために必要な解像度の議論を行った。

本研究は、地表から大気に供給されるダスト量のより正確な見積もりや、大循環モデルにおけるダストパラメタリゼーションの高度化に資するものである。

キーワード：火星、ダストデビル

Keywords: Mars, dust devil

地球型系外惑星の気候の数値的探索

Numerical explorations of climates of terrestrial exoplanets

*石渡 正樹¹、納多 哲史²、中島 健介³、高橋 芳幸⁴、竹広 真一⁵、林 祥介⁴

*Masaki Ishiwatari¹, Satoshi Noda², Kensuke Nakajima³, Yoshiyuki O. Takahashi⁴, Shin-ichi Takehiro⁵, Yoshi-Yuki Hayashi⁴

1.北海道大学大学院理学研究院、2.京都大学大学院 理学研究科、3.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、4.神戸大学大学院理学研究科、5.京都大学数理解析研究所

1.Faculty of Science, Hokkaido University, 2.Graduate School of Science, Kyoto University, 3. Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, 4.Graduate School of Science, Kobe University, 5.Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University

ケプラー宇宙望遠鏡による探査では1000個以上の系外惑星が発見されている。これらの中にはスーパーアースと呼ばれる地球の数倍程度の質量を持つ惑星も存在している。地球に似た惑星に関する考察は、地球外生命の存在可能性に関する議論へ発展する可能性を持つと同時に、地球のような温和な環境が実現されるための条件および地球環境の安定性に関する理解を深めるものでもある。このように気候研究の対象が急速に増えている状況を踏まえて、我々は様々な惑星の気候を数値的に探索することを目指している。

我々の目的は、惑星の気候状態の多様性を把握した上で惑星が海洋を持つための条件に関して理解を深めることである。海洋の存在条件を規定するものとして、全球凍結状態の発生と暴走温室状態の発生が挙げられる。全球凍結状態に関する考察として、気候レジーム図を作成した Budyko (1969) が知られている。彼の気候レジーム図は、太陽定数の変化に対して部分凍結解・全球凍結解・氷無し解のうちのいずれが存在するかを表すものである。一方、暴走温室状態とは、表面に海が存在する惑星の湿潤な大気において、入射フラックスが大気によって射出可能な赤外放射量上限値（射出限界）を上回り、熱収支が均衡しえなくなる状態である (Nakajima et al., 1992)。暴走温室状態が発生すると海洋は全て蒸発すると考えられる。これより、我々は、大気大循環モデルを用いて全球凍結状態・暴走温室状態を含めた多様な気候状態の探索の一環としていくつかの計算を行ってきた。

用いているモデルは大気大循環モデル DCPAM5 (<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>) である。サブグリッドスケールの物理素過程は気象学分野で標準的なパラメータ化の方法を用いて表現する。雲水量については、生成・移流・乱流拡散・消滅を考慮した時間発展方程式を解くことにより求めている。現在のところ、消滅に関しては消散時間を外部パラメータとして与えるという簡単な取り扱いに留まっている。我々の数値実験はパラメータスイープを中心とするものであるため、比較的小規模な実験を多数実施するというものである。南北 1 次元モデルを用いた Budyko (1969) の計算とは異なり、3 次元 GCM 計算による気候レジーム図の作成には大量の計算資源が必要となる。いくつかの実験について高解像度の大規模計算を行なうための計算資源に加えて、多数の小規模計算を行なうのに適した計算資源が特に必要である。

我々がこれまでにおこなってきたことは、同期回転惑星、陸惑星、水惑星などを対象とした暴走温室状態の発生条件に関する調査である。これまでの計算で、雲の有無・日射分布によらず太陽定数が増大した場合に赤外放射量最大値を全球平均日射吸収量が越えると暴走温室状態が発生するようだ、ということが見えてきた。これまでの我々の計算は、基本的に現在の地球に準拠した設定になっていた。放射過程は地球用の放射スキーム (Chou et al., 1996 および Chou et al., 2001) を用いている。雲の消滅時間については、放射収支が現在地球のものに似た結果になるようにパラメータチューニングしている。また、地表面についても簡単化しており、地表面は全て比熱が 0 の沼地であると仮定していた。現在、我々のモデルの計算能力を高めるべく、H₂O-CO₂ 大気用放射スキームの開発・海洋モデルの開発などを進めているところである。今後は、これらの開発を行ないながら、様々な系外惑星の設定において全球凍結状態と暴走温室状態を含めた気候レジーム図を作成することを行なっていく予定である。

キーワード：大気大循環モデル、系外惑星、生命存在可能性、暴走温室状態、全球凍結状態

Keywords: atmospheric general circulation model, exoplanet, habitability, runaway greenhouse state, snowball state

高速回転する薄い球殻内の熱対流により生成される表層縞状構造への力学的境界条件の影響
Effects of dynamical boundary condition on banded structure produced by convection in a rotating spherical shell

*佐々木 洋平¹、竹広 真一²、石岡 圭一³、中島 健介⁴、林 祥介⁵

*Youhei SASAKI¹, Shin-ichi Takehiro², Keiichi Ishioka³, Kensuke Nakajima⁴, Yoshi-Yuki Hayashi⁵

1.京都大学大学院理学研究科数学教室、2.京都大学数理解析研究所、3.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、4.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門、5.神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻

1.Department of Mathematics, Kyoto University, 2.Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, 4.Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, 5.Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University

木星と土星の表層の流れは、赤道周辺の幅の広い順行ジェットと中高緯度で交互に現われる互いに逆向きの幅の狭いジェットが特徴的である。この表層のジェットが深部領域の対流によって生成されているのか、表層の流体運動の結果なのかは未だに明らかになっていない。流体層の厚さが惑星半径に比して十分小さい「浅い」モデル、すなわち、鉛直方向の静水圧近似の仮定の下で深部からの熱流と太陽加熱によって大気の運動が駆動されるモデルでは、中高緯度の交互に表われる幅の狭いジェットは再現されるものの、赤道域のジェットは必ずしも順行方向とはならない。一方で、流体層の厚さが惑星半径に匹敵する「深いモデル」、すなわち高速回転する球殻中の熱対流モデルでは、赤道域の順行するジェットは容易に生成されるものの、中高緯度の交互に表われるジェットの生成が困難である。

このような問題に対して Heimpel and Aurnou (2007) は、これまでに考えられていた深いモデルよりも薄い球殻領域内の深部対流運動を考え、レイリー数が十分大きく内球接円筒での対流が活発な場合に、赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットが共存する状態を数値的に再現した。しかしながら、彼らの研究では経度方向に 8 回対称性を仮定しており、全球の 1/8 の領域の運動しか解いていない。このような領域の制限は流れ場全体の構造に影響を与えている可能性がある。例えば、2 次元乱流的なエネルギーの逆カスケードが十分に作用し、互い違いの縞状ジェットが生成されないかもしれない。また、生成される帯状流が不安定となって縞状ジェットが壊されてしまうかもしれない。

このような動機をもって、われわれはこれまでに薄い球殻対流の数値計算を全球で長時間行うことで、赤道域および中高緯度領域の帯状流が形成されるか否かを調べてきた。その結果、Heimpel and Aurnou (2007) の解は最終的な統計的平衡状態ではなく過渡的な状態であり、長時間積分後には縞状構造が消滅し南北中高緯度に幅広の帯状流がそれぞれ 1 本ずつ出現する状態を得た。

しかしながら、逆カスケードが十分に働いたこの解は、用いた内外境界球面における力学的境界条件がともに自由すべり条件であることに依存している可能性がある。そこで、本研究では下端境界条件を自由すべり条件から粘着条件へ変更して境界条件の影響を吟味してみた。下端で粘着条件を用いることは、実際の木星型惑星大気への応用としても現実的である。中性大気から電離大気への遷移層では速度場 MHD 抵抗が働き減速されると考えられているからである。

モデルは回転する球殻中のブシネスク流体の方程式系で構成されている。方程式系に現われる無次元数であるプラントル数を 0.1、エクマン数を 3×10^{-6} 、球殻の内径外径比を 0.85、修正レイリー数を 0.05 とした。熱境界条件は、温度固定である。力学的境界条件は上端で自由すべり、下端で粘着条件である。初期には回転系での静止状態にランダムな温度擾乱を加えた。80000 無次元時間(約 12000 回転)まで時間積分したところ、強い赤道ジェットと弱い中高緯度の縞状構造が出現した。この中高緯度の縞状構造は、両端が自由すべり条件の場合と異なり、消滅することなく 12000 無次元時間(約 19000 回転)まで維持されつづけている。このことは、下端が粘着条件のために大規模場に効率的に作用するエクマン摩擦が働き、2 次元流れの特徴であるエネルギー逆カスケードが阻害されているためであると考えられる。

謝辞：本研究の数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータ(ES3)を用いた。

参考文献

- Heimpel, M., & Aurnou, J., *Icarus*, 187, 540--557, April 2007.

キーワード：巨大ガス惑星大気、縞状構造、赤道加速ジェット流、ロスビー波、木星、土星

Keywords: atmospheres of the gas giant planets, banded structure, equatorial prograde jet, Rossby waves, Jupiter, Saturn

大気海洋海水結合モデルによる水惑星の気候の数値実験

A numerical experiment of aquaplanet climates with a coupled atmosphere-ocean-sea ice model

*河合 佑太^{1,2}、高橋 芳幸¹、石渡 正樹⁵、西澤 誠也²、竹広 真一⁴、中島 健介³、富田 浩文²、林 祥介¹

*Yuta Kawai^{1,2}, Yoshiyuki O. Takahashi¹, Masaki Ishiwatari⁵, Seiya Nishizawa², Shin-ichi Takehiro⁴, Kensuke Nakajima³, Hirofumi Tomita², Yoshi-Yuki Hayashi¹

1.神戸大学、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、5.北海道大学

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

系外惑星で実現される表層環境の多様性の理解に向けて、惑星大気科学者らは数値モデルによる系外惑星の気候の研究を進めている。私たちの研究グループもまた、惑星の気候状態決定に対する大気海洋大循環の役割の理解を深めるために、全球海洋で覆われた惑星(水惑星)における気候状態の数値的研究を行ってきた。例えば、Ishiwatari et al. (2007) では、太陽定数を増減させたときに得られる水惑星の気候状態の多様性や多重性を一次元南北エネルギー・バランスモデルと三次元大気大循環モデルの両方を用いて議論した。しかし、そこでは、海洋は熱容量ゼロの沼地(swamp ocean)として簡単に扱われたため、海洋大循環は全く考慮されなかった。実際には、もし惑星に海洋が存在するとすれば、惑星の気候状態の決定・維持において、海洋大循環による熱輸送もまた重要な役割を果たす。事実、現在地球の熱収支において、海洋大循環による南北熱輸送は重要な役割を担うことが知られている(Trenberth and Caron, 2001)。近年、Rose et al. (2009) は、海洋熱輸送の効果をとり入れた一次元南北エネルギー・バランスモデルを考案し、これまで知られていなかった新たな安定な気候状態の存在を示した。また、近年の計算技術の向上は、大気海洋海水結合モデルを用いた水惑星の気候状態の探索を可能にしつつあり、Smith et al. (2006) やMarshall et al. (2007) は、結合モデルによる水惑星の気候研究の先駆的研究である。その後も、水惑星の気候状態の太陽定数依存性や自転角速度依存性、自転傾斜角依存性が結合モデルを用いて調べられつつある。(例えば、Ferreira et al., 2011; Rose et al., 2012; Rose 2015)。

大気海洋大循環の両方を考慮した水惑星の気候状態の探索に向けて、私たちは大気大循環モデルの開発と並行して、海洋大循環モデル、海水熱力学モデルを開発し、これらのモデルの結合を進めている。筆者は、海洋大循環モデルと海水モデル、そしてこれらのモデルの結合に携わっている。海洋モデルは、流速、温位、塩分の大規模な分布を陽に計算し、いくつかのサブグリッド・スケールの過程(小スケールの渦や対流による混合など)の効果はパラメータ化される。海水モデルは一次元熱力学モデルであり、海水の厚さや温度を求める。これらのモデルと大気大循環モデル DCPAM (<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) は、カプラー・ライブラリ(Arakawa et al., 2011) により結合される。今後の高解像度実験や広範なパラメータ実験を念頭に、この結合モデルは幾つかの大規模計算機環境で実行可能な並列プログラムである。また、結合系の時間積分を加速させるために以下の方法で時間積分を行う。はじめに、結合モデルを数年間積分する。その後、その計算結果を時間平均して求めた海面フラックスを海面の境界条件として、海洋海水モデル単体を数百年間積分する。結合系が準平衡状態に達するまでこのサイクルを繰り返す。

次に、開発中の結合モデルの振る舞いを検証するために、現在地球の惑星パラメータを与えた水惑星の気候の数値実験を試みている。初期条件は、静止した280 Kの大気・海洋である。結合系は、年平均・日平均した現在地球の入射太陽放射フラックスによって駆動される。上述した時間積分法により、20~30サイクル(海洋4000年積分に相当)の結合系の時間積分を現実的な計算時間で行えるようになった。この長時間積分の後に、大気・海洋大循環や水蒸気、温度、塩分の子午面分布などの大まかなパターンは、先行研究(例えば、Marshall et al., 2007)の結果とよく似たものが得られることが分かった。その一方で、海水の厚さは依然として増加を続けており、それに伴い海洋の塩分濃度の増加が続いている。これらの原因は幾つか考えられるが、その一つとして海水モデルにおいて海水の南北輸送が考慮されていないことが挙げられる。また、結合系の熱収支や水収支の確認を現在行っており、海水の厚さが増加し続けている原因の究明を進めている。したがって、直近の課題は結合系の平衡状態を得ることである。将来的には、開発した結合モデルを用いて、Ishiwatari et al. (2007) の太陽定数増減実験の再試を行う予定である。そこで海洋大循環を考慮する場合と考慮しない場合の比

較を行い、水惑星で実現される多様な気候状態決定に対する大気海洋大循環の役割の理解を深めたいと考えている。

キーワード：水惑星、大気海洋海氷結合モデル

Keywords: aquaplanet , coupled atmosphere-ocean-sea ice model