

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P³T法の並列化の実装を行った。本講演ではその性能を示す。

P³T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。P³T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。P³T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。

P³T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

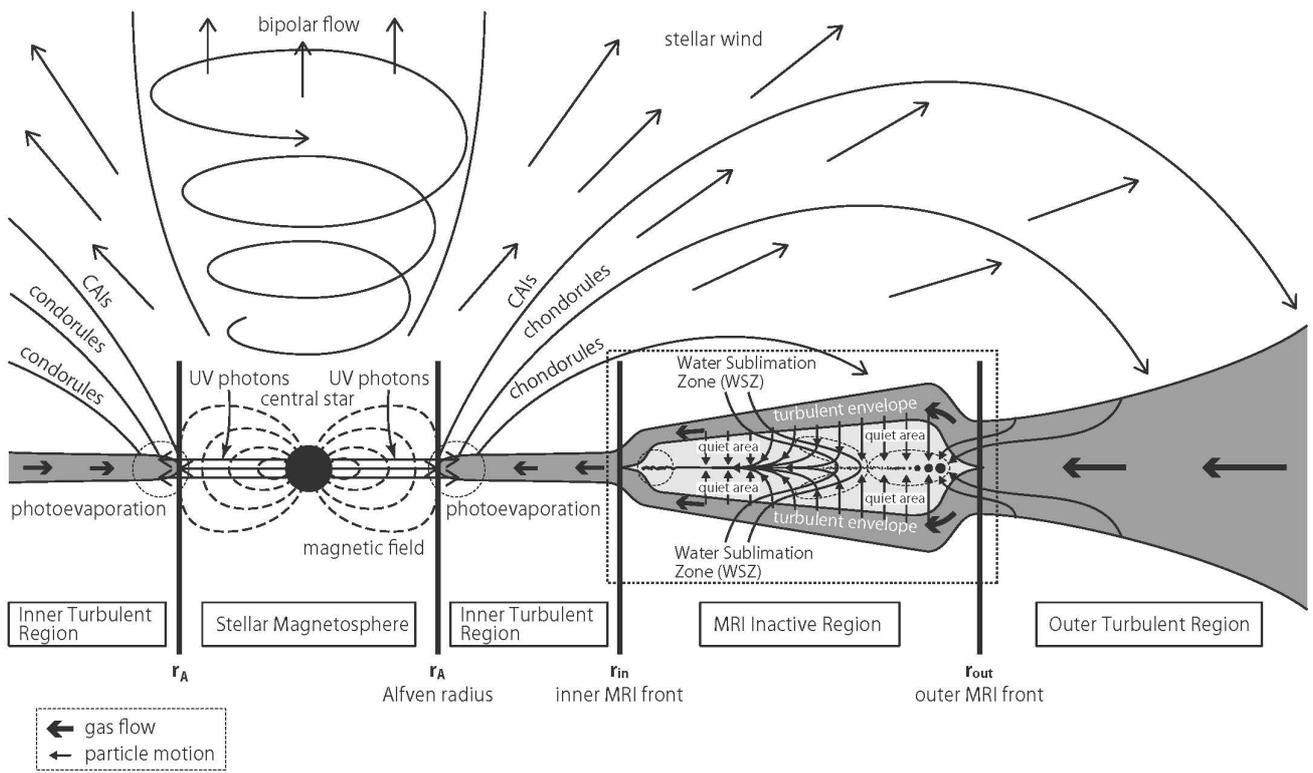
We have obtained a steady-state, 1-D model of the accretion disk of a protostar taking into account the magneto-rotational instability (MRI). We find that the disk is divided into an outer turbulent region (OTR), a MRI suppressed region (MSR), and an inner turbulent region (ITR). The outer turbulent 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、地球のような温か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