

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23103003

研究課題名（和文）系外惑星大気の数値モデリングと形成進化理論

研究課題名（英文）Modelling and theoretical study for exoplanet atmospheres

研究代表者

倉本 圭（Kuramoto, Kiyoshi）

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：50311519

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 119,000,000円

研究成果の概要（和文）：地球類似惑星の巨大衝突後の水蒸気大気の進化を求め、海洋が速やかに形成される惑星とマグマオーシャンが長期間保持される惑星に大別されることを示し、それらの観測可能性を明らかにした。多様な境界条件を与えた大気大循環シミュレーションにより、同期回転惑星や表層H₂O保有量の少ない陸惑星ではハビタブルゾーンが拡大する可能性があることを示し、長期大気散逸によって表層水が減少すると、むしろ表層水が安定に存在できるようになる進化経路があることを見出した。巨大ガス惑星の雲対流シミュレーションと放射輸送モデリングを進め、ガス惑星大気の大気活動の間欠性の成因とガス惑星の熱放射に及ぼす雲層の役割について明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Evolution of steam atmospheres on earth-like planets after each final giant impact event is theoretically solved with an analysis of its observability. Two types of evolutionary tracks are found: one is the rapid formation of a water ocean and another is the long-term persistence of the magma ocean state. The secular loss of surface water due to atmospheric escape driven by stellar UV irradiation may rather stabilize surface liquid water than merely produce an arid surface environment. General circulation experiments provided with various boundary conditions reveal that a synchronously rotating planet and a land planet may have wider habitable zones than previously thought. Numerical models to solve cloud convection and radiative transfer in gas giant planets are also developed, revealing the mechanisms for the intermittencies observed for cloud convection in the solar system gas planets as well as roles of cloud layers on controlling the thermal emission from gas giant atmospheres.

研究分野：惑星科学

キーワード：系外惑星 大気循環シミュレーション 同期回転惑星 大気放射スペクトル 大気散逸 ハビタブルゾーン 大気進化

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、地球および太陽系惑星大気の形成と進化ならびに構造と循環について、理論および数値実験の手法を用いて明らかにする研究を得意とし、世界的に注目を集める先駆的な研究成果を生み出してきた。特に近年においては力学的・熱的過程だけでなく、物質科学的過程を本格的に取り入れた研究を進め、観測的な制約条件との比較検証をより密接に行うことが可能となってきた。また、我が国における潤沢な計算機資源を生かし、条件設定を自在に与えられる大気数値モデル群の開発と、それらを用いた大規模大気循環シミュレーションが可能になりつつある。

これらの研究と系外惑星の直接撮像を射程に入れた観測研究と有機的に融合させ、太陽系惑星をはるかに超えるサンプル数の系外惑星の大気・表層環境のキャラクタリゼーションを行うことにより、惑星大気環境の多様性ならびに進化過程について新たな解明を進めることが可能となる。また「水惑星」あるいは「ハビタブル惑星」と呼ばれる、地球のような表層環境を有する惑星の特殊性と普遍性について実証的に解明を進める、新たな魅力ある学術領域を開拓できると期待される。

2. 研究の目的

独自の設計思想に基づく大気数値モデル群を発展させ、先駆性の高い大気形成進化理論を拡張することによって、太陽系外惑星（以下、系外惑星）の大気の起源と進化ならびに構造と循環について理論モデルを構築する。そして、系外惑星の観測研究との共同によって、大気表層環境の推定・キャラクタリゼーションを行い、惑星の多様性の起源と、地球のような表層環境を有する惑星の特殊性と普遍性について解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 循環シミュレーション：系外惑星に適用する大気循環数値シミュレーションの基幹部となる力学計算コードを新開発する。多様な条件下にあり、独特の循環構造が発現すると考えられる系を扱うために必要な要件を洗い出しつつ、空間解像度・次元・独立変量等の異なるモデル群を漸進的に開発し、それらを用いて系外惑星の循環構造を調査する。惑星大気の循環および熱輸送についてシミュレートし惑星大気の取りうる気候状態のサーベイに取り組む。さらに、観測された惑星条件を与えた数値シミュレーションを行い、その大気循環構造について推定を行う。

(2) 大気進化理論：惑星表層の揮発性物質の存在量と分布をコントロールする素過程を洗い出し、惑星の質量とサイズ、軌道要素、中心星放射スペクトル等がどのように影響するか理論的に解析する。また上記の惑星へ

の揮発性物質の供給モデルから理論的に予想される代表的な初期大気組成を与え、光化学過程によるエアロゾル生成率ならびに光学特性を実験的に調べる。理論的解析と室内実験データを基に、惑星表層の揮発性物質の期待される存在量と分布の幅を、他の揮発性成分と共に惑星の年齢の関数として推定する。軌道要素、年齢、質量など、系外地球型惑星の観測推定量に基づく、大気構造と表層環境の予測に取り組む。

(3) 特徴推定：系外惑星に適用する大気放射スペクトルの数値モデル構築に必要な物理素過程の理論解析と、物性データのサーベイを行う。組成的に簡単な系から、段階的にモデル構築を進める。惑星大気放射モデルの改良・開発と、循環シミュレーションならびに大気進化理論の成果も取り入れた惑星大気放射スペクトル予測を進める。それらを観測データと対比し、大気の熱的構造と組成の推定を行う。

4. 研究成果

(1) 系外惑星の大気循環と熱収支の解明と予測：片方の半球に中心星放射が固定される同期回転地球型惑星について、雲放射過程を導入し高度化した大気大循環シミュレーションを実施し(図1)、雲による日射の反射により、暴走温室効果の発生に必要な日射量が抑制され、地球のような非同期回転惑星に比べハビタブルゾーンが拡大することを明らかにした。他方、より弱い日射を与えた場合、高温の恒星直下点での活発な降水により、化学風化による全球炭素固定率が著しく上昇し、大気二酸化炭素濃度が低く抑えられる傾向にあることを見出した。また世界初となる木星型惑星大気における複数の凝結成分を考慮した雲対流モデルの構築と拡張を進め、雲生成の间歇性の原因を明らかにし、大気中の物質分布を定量的に推定した。

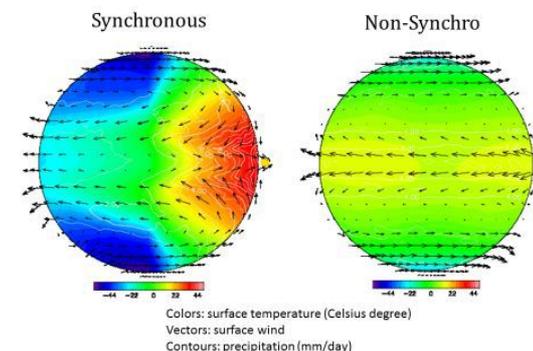


図1 大気大循環モデル計算から得られた同期回転惑星(左)と非同期回転(右)の気温分布。矢印は地表風速を表す。同期回転惑星では、日射が最も強い恒星直下点付近で対流雲が定常的に発生し、そのアルベド効果によって暴走温室効果の発生が抑制される。

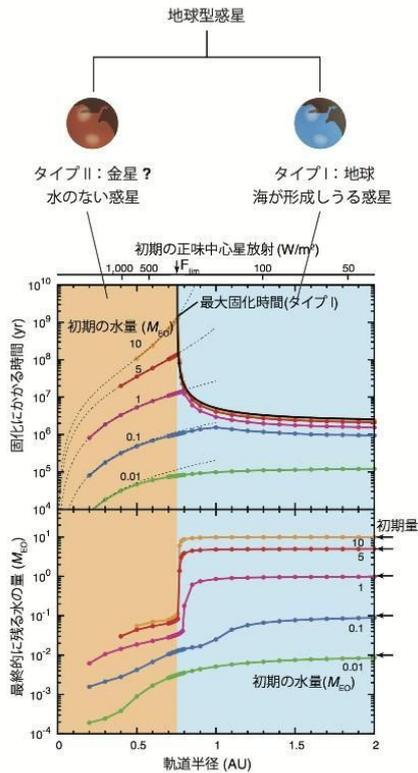


図 2 様々な初期水量を持った地球型惑星が巨大衝突による昇温を経たのちに冷却固化するまでの時間と最終的に残存する水量 (M_{EO} は現在の地球海洋質量)。

(2) 系外地球型惑星の大気進化の多様性の説明：巨大衝突による大規模融解後の地球型惑星の大気進化を説明し、中心星からの距離に応じ、マグマオーシャンが全球を覆う暴走温室状態が長期間持続する場合と、水蒸気が地表へ凝結し速やかに海洋が形成される場合に大分され、前者の継続時間が紫外線による水蒸気分解・散逸速度に支配されることを示した(図2)。これは長年謎となってきた金星大気が水蒸気にきわめて乏しい事実にはじめて合理的な説明を与えるものともなっている。海洋の安定性や大気組成を制御する重要な素過程である水素散逸過程について、散逸効率が先行研究の推定よりもきわめて高いこと、また大気散逸により表層水を大幅に失うことにより、両極域に液体の水が局在化し、液体の水を保持する惑星環境がむしろ長期的に維持されるようになる予想外の進化経路の存在を明らかにした。

(3) 系外惑星のキャラクタリゼーションと解釈：木星型惑星大気について、雲対流による物質分布の決定機構、可視・熱放射域それぞれの全球スペクトルを支配する因子を系統的に明らかにした。特に雲が赤外放射に及ぼす影響はよくわかっていなかったが、木星のような低温で放射冷却率の小さな惑星においては、雲粒よりも主成分の H_2 や放射活性な NH_3 、 CH_4 などのガス分子による吸収の効果が卓越する傾向にあることが明らかにな

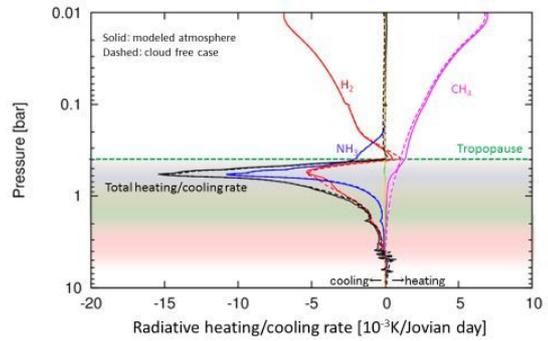


図 3 モデル木星大気における、各大気成分による放射熱収支。大気対流を駆動している放射冷却は、 NH_3 ガスと H_2 ガスによって主に担われている。他方、雲粒は熱放射の吸収が弱く、放射冷却にはほとんど寄与しない (NH_3 、 NH_4SH 、 H_2O の雲層の位置を灰、緑、赤色で示す)。

った(図3)。さらに地球型惑星の巨大衝突後の大気進化モデルに沿って、惑星年齢と中心星からの距離の関数として惑星放射スペクトルを予測し、マグマオーシャン保有惑星と水惑星の観測可能性を定量的に明らかにした(図4)。これらは惑星大気の長期進化や、生命が存在可能な表層環境を持つ系外惑星を実証的に見出そうとする、将来の系外惑星大気の観測研究に、強い動機を与えるものである。

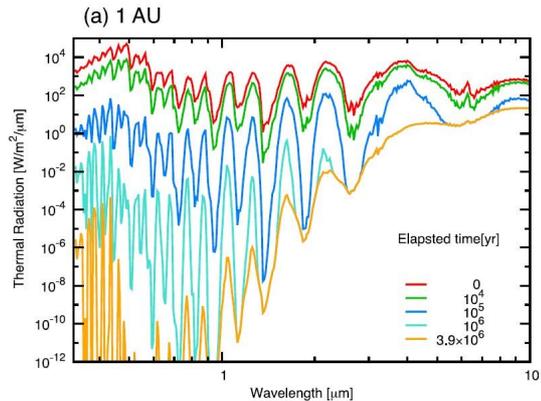


図 4 巨大衝突後に海洋形成をおこす惑星の熱放射スペクトルの進化。各線は、巨大衝突による昇温から、様々な経過時間を経た段階でのスペクトルを表す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計72件)

Noda, S., Ishiwatari, M., Nakajima, K., Takahashi, Y. O., Takehiro, S., Onishi, M., Hashimoto, G. L., Kuramoto, K., and Hayashi Y.-Y., 2017: The circulation pattern and day-night heat transport in the atmosphere of a synchronously rotating aquaplanet: Dependence on planetary rotation rate. *Icarus*, 282, 1-18,

DOI:10.1016/j.icarus.2016.09.004, 査読有.
Kodama, T., Genda, H., Abe, Y., and Zahnle, K. J., 2015, Rapid Water Loss Can Extend the Lifetime of Planetary Habitability, The Astrophysical Journal, 812, article id. 165, 11 pp. DOI:10.1088/0004-637X/812/2/165, 査読有.

Hamano, K., Kawahara, H., Abe, Y., Onishi, M., and Hashimoto, G. L., 2015, Lifetime and Spectral Evolution of a Magma Ocean with a Steam Atmosphere: Its Detectability by Future Direct Imaging, The Astrophysical Journal, 806, article id. 216, 17 pp. DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/216, 査読有.

Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., and Hayashi, Y.-Y. 2014, Numerical simulations of Jupiter's moist convection layer: Structure and dynamics in statistically steady states, Icarus, 229, p. 71-91. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.10.016, 査読有.

Hamano, K., Abe, Y., and Genda, H., 2013, Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean, Nature, 497, 607-610 DOI: 10.1038/nature12163, 査読有.

Kuramoto, K., Umemoto, T., and Ishiwatari, M., 2013, Effective hydrodynamic hydrogen escape from an early Earth atmosphere inferred from high-accuracy numerical simulation, Earth Planet. Sci. Lett., 375, 312-318, DOI: 10.1016/j.epsl.2013.05.050, 査読有.

〔学会発表〕(計 319 件)

林 祥介, 汎惑星気象・気候シミュレーションに向けて. 2016 年日本天文学会春季大会, 2016 年 3 月 15 日, 首都大学東京 (東京都・八王子市), レビュー講演

Abe, Y., Evolution of the steam atmosphere and ocean formation, ISSI Workshop on the delivery of water to proto-planets, planets and satellites, 2016 年 1 月 14 日, Bern (Switzerland), 招待講演

Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., and Hayashi, Y.-Y., Extreme intermittency of moist convection on the giant planets, Joint Juno/Cassini Jupiter-Saturn Atmospheric Dynamics Meeting, 2015 年 12 月 13 日, San Francisco (USA), 招待講演

〔図書〕(計 3 件)

阿部 豊, 文藝春秋社, 生命の星の条件を探る, 2015, 238 ページ

〔その他〕

大気数値モデルコード無償公開サイト
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmodel>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

倉本 圭 (KURAMOTO, Kiyoshi)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 50311519

(2) 研究分担者

はしもと じょーじ (HASHIMOTO, George)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 10372658

林 祥介 (HAYASHI, Yoshi-Yuki)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 20180979

関根 康人 (SEKINE, Yasuhito)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号:60431897

阿部 豊 (ABE, Yutaka)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号:90192468

(3) 連携研究者

石渡 正樹 (ISHIWATARI, Masaki)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 90271692

杉山 耕一郎 (SUGIYAMA, Koichiro)
松江工業高等専門学校・情報工学科・准教授
研究者番号: 90271692

玄田 英典 (GENDA, Hidenori)
東京工業大学・地球生命研究所・准教授
研究者番号: 90456260

竹広 真一 (TAKEHIRO, Shinichi)
京都大学・数理解析研究所・准教授
研究者番号: 30274426

佐々木 洋平 (SASAKI, Yohei)
京都大学・大学院理学研究科・研究員
研究者番号: 70583459

中島 健介 (NAKAJIMA, Kensuke)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 10192668

(4) 研究協力者

濱野 景子 (HAMANO, Keiko)
東京大学・理学系研究科・研究員
研究者番号: 40646171

大西 将徳 (ONISHI, Masanori)
神戸大学・理学研究科・研究員
研究者番号: 50644887