

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13975

研究課題名（和文）次世代大気大循環モデルで解き明かす、系外惑星大気の大気循環と雲の影響

研究課題名（英文）Climate of exoplanets with next generation GCM

研究代表者

小玉 貴則（Kodama, Takanori）

東京工業大学・地球生命研究所・特任准教授

研究者番号：80806662

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：大気大循環モデルと全球雲解像モデルを用いて、ハビタブル惑星気候における雲の役割の定量化を行なった。結果として、高解像度かつ雲微物理を考慮した全球雲解像モデルを用いた様々な自転軸傾斜角を持つ惑星の気候は、従来の低解像度かつ雲形成パラメタリゼーションの気候モデル結果に比べ、温暖かつ異なる気候状態を示した。温暖な雲解像モデルの結果は、少ない雲被覆率を示し、低い惑星アルベドをもたらしたためであった。大気大循環モデルを用いて、惑星表面水分分布とハビタブル条件について検討した。ハビタブルゾーンは表面の水分分布面積が減少するに伴い、広くなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球型惑星が検出されている系外惑星科学において、本研究課題における気候数値実験はこの時点での最高解像度気候実験であり、将来のハビタブル惑星探査の重要なマイルストーンとなる。また、従来の大気大循環モデルに基づいた我々の理解が、全球雲解像モデルにより展開される本研究結果によって、どの程度信頼できるものであるかという疑問を問いかけた意義は大きい。加えて、地球と異なる環境である地球類似惑星を検討することで、比較惑星科学的に地球を位置付けることができるため、本研究によって開かれた研究展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Using an atmospheric general circulation model and a global cloud-resolving model, we quantify the role of clouds in habitable planetary climates. The results show that planets with various obliquities in high-resolution, a global cloud-resolving model with cloud microphysics have warmer and different climate conditions than those in conventional low-resolution climate models with cloud-forming parametrization. This was due to the cloud-resolving models estimating lower cloud coverage and lower planetary albedo. In addition, planetary surface water distribution and habitable conditions were examined using an atmospheric circulation model. Habitable zones were shown to become wider as the surface water distribution area decreases.

研究分野：系外惑星科学

キーワード：雲 大気循環 系外惑星

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまで多くの太陽系外惑星(以下、系外惑星)が検出され、その中にはホットジュピターと呼ばれる短周期巨大ガス惑星から地球のように海洋を保持する可能性のある地球型惑星まで、多様な惑星が報告されている。系外惑星科学は、検出の時代から特徴づけの時代になったといわれているが、その一方で、惑星大気への理解が大きく進んだとは言えない。その1つの問題が雲の存在である。系外惑星における雲の存在は、大きな不確定性を持ち、観測的な特徴を隠すため、3次元的な振る舞いを考慮した大気モデリングが必要不可欠となっていた。また、観測の難しさから、太陽のようなG型星ではなく、より低温で低質量なM型星を公転する惑星が注目されていた。それら惑星は、潮汐固定状態(自転周期と公転周期が同期している状態)にあると考えられ、恒久的な昼面と夜面を持つ。惑星の大気循環は昼面と夜面の温度差と自転周期に駆動されるため、3次元的に理解することが必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、系外惑星の大気循環と雲の気候形成への影響を定量化することである。具体的には、課題を2つ設定した。

- 1) 全球雲解像モデルによる地球とは異なる環境における雲の効果と役割の定量化
- 2) 地球型惑星の表面水分分布と雲の分布、その惑星のハビタブル条件

これら課題により、惑星の気候決定における雲の影響を明らかにして、系外惑星大気、そして系外惑星におけるハビタビリティを検討した。

### 3. 研究の方法

課題1において、全球雲解像モデルは、気象学において地球の気象を高解像度でシミュレーションするために開発されたモデルである。そのため、異なる地球の環境で正確な計算を行うために、モデルのアップデートを行なった。本課題では、非静力学全球雲解像モデルN I C A M (Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model)を用いた。第一歩として、現在の地球と異なる自転軸傾斜角を持つ惑星における気候シミュレーションを実施した。背景大気として、1barの地球大気を持った海惑星を仮定し、4パターンの自転軸傾斜角( $0^\circ$ ,  $23.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ )を考慮した。本課題では、2種類の気候数値実験を行なった。1) 低解像度+雲形成に関するパラメタリゼーション(水平解像度: 約220km 格子、大気大循環モデルの標準解像度)、2) 高解像度+雲微物理(水平解像度: 約14km 格子)。15年間の数値積分ののち、最後の5年間の結果を解析した。数値実験はスーパーコンピュータ『富岳』において実施した。

課題2において、2つの大気大循環モデルを導入した。まず、G型星周りの地球型惑星において、惑星表面水分分布と気候の関係を明らかにするために、大気大循環モデルA G C Mを用いて、さまざまな表面水分分布を考慮し、気候数値実験を行なった。表面水分分布は、Kodama et al. (2019)と同じ、3種類の水分分布を仮定した: 1) 東西一様、2) 南北一様、3) 地球・火星・金星の地形を考慮した水分分布。本課題では、自転軸傾斜角を $0^\circ$ で円軌道を仮定し、季節変化を除いた。加えて、潮汐固定状態にある地球型惑星に関しては、系外地球型惑星における気候数値実験で多くの実績のあるL M D G C Mを用いて、気候数値実験を行なった。主星として、TRAPPIST-1のスペクトルを用いて、Agoi et al. (2021)に基づいた惑星パラメタと1barのN<sub>2</sub>背景大気を仮定したTRAPPIST1-dとeを模し、恒星直下点を中心にさまざまな表面水分分布を仮定した。気候数値実験は、約20年間以上積分し、最後の1年間の結果を解析した。

### 4. 研究成果

#### 1) 地球と異なる自転軸傾斜角を持つ地球型惑星気候

図1に低解像度+雲形成パラメタリゼーションと高解像度+雲微物理のそれぞれ自転軸傾斜角 $45^\circ$ と $60^\circ$ の場合での東西平均した表面温度の時系列を示した。図1(a)と(c)は自転軸傾斜角 $45^\circ$ の場合、図1(b)と(d)は自転軸傾斜角 $60^\circ$ の場合であり、(a)と(b)が低解像度+雲形成パラメタリゼーションの大気大循環モデルの結果で、(c)と(d)が高解像度+雲微物理を考慮した全球雲解像モデルの結果である。自転軸傾斜角が大きくなると、季節変化が大きくなり、大きく傾いた自転軸傾斜角 $60^\circ$ の場合では、両実験ともに、極域での表面温度が赤道域より高く、南北の温度勾配が逆転している。全球雲解像モデルによる気候実験は、いずれの場合でも低解像度+雲形成パラメタリゼーションでの実験に比べ、高い表面温度を示している。また、自転軸傾斜角 $45^\circ$ については、南北温度勾配が逆転することがわかった。

図2は各気候数値実験における雲被覆率を示している。低解像度+雲形成パラメタリゼーションの結果を図2(a)と(c)に、全球雲解像モデルを用いた高解像度気候シミュレーションの結果を図2(b)と(d)に示した。両者を比べると、高解像度+雲微物理を考慮した数値計算結果における雲被覆率が低くなっていることがわかった。雲による放射強制力の解析を行ったところ、この低い雲被覆率により、低い惑星アルベドをとっており、結果として表面温度が上昇していることが明らかになった。雲解像モデルでは、大気カラム水量が飽和状態になるまで深い雲を形成しないため、より湿潤な大気状態を維持していることが原因だと考えられる。これら結果は、The Astrophysical Journal にて出版された[1]。

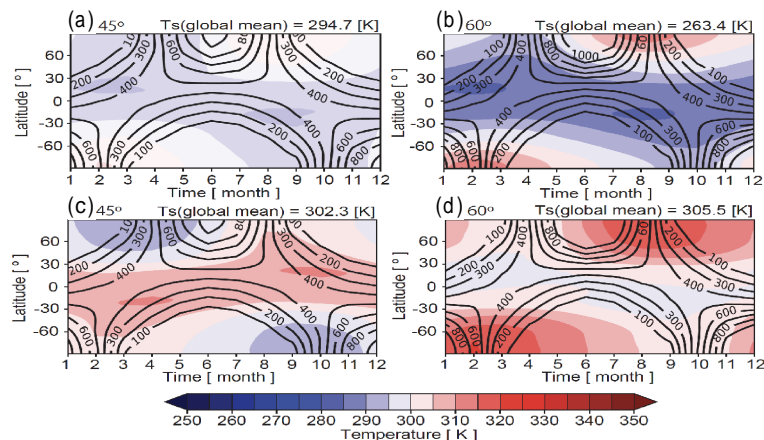


図1. 低解像度と高解像度モデルにおける東西平均した表面温度の季節変化。カラーは温度[K]、コンターは日射量[W/m<sup>2</sup>]を示す。

2) 水分布の異なるハビタブル条件  
3種類の異なる水分布に対して大気大循環モデルを用いて、ハビタブルゾーンの内側境界と外側境界について定量的に明らかにした。ハビタブルゾーンの外側境界に対応する完全凍結限界は、水分布の面積の減少に伴い、連続的に変化することが明らかになった: 約 90% $S_0$  (海惑星) から約 77% $S_0$  まで ( $S_0$  は現在の地球が受け取る太陽放射量)。

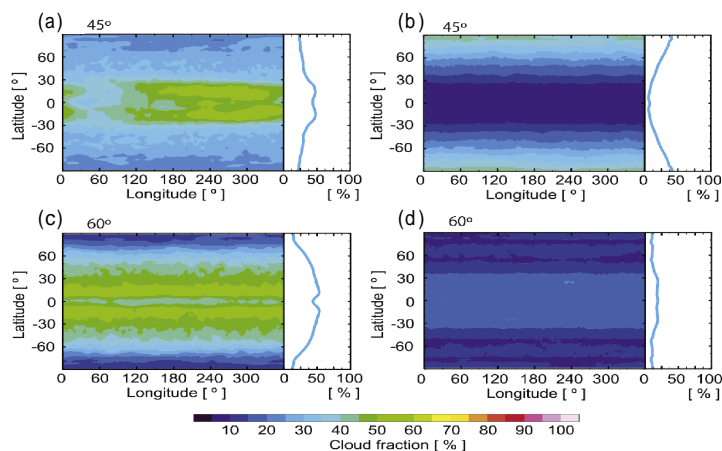


図2. 各気候数値実験における雲被覆率の緯度-経度分布。右図は東西平均した雲被覆率。

先行研究にて、ハビタブルゾーンの内側境界も、水分布面積の減少に伴い、130% $S_0$  から約 180% $S_0$  まで増大することがわかっている。ハビタブルゾーンの内側境界はハドレー循環による水蒸気の熱帯域への供給で決まっており、外側境界は雪と氷の低緯度への進出と雲の減少によるアルベド低下によって決まることがわかった。この結果は、JGR Planets にて出版された[2]。また、潮汐固定された地球型惑星の場合、Trappist1-e では昼面に海洋が存在できるが、Trappist1-d ではどの水分布においても安定に液体の水を表面に維持することはできず、暴走温室状態へと突入してしまうことがわかった。この結果は現在投稿準備中である。

[1] **Takanori Kodama**, D. Takasuka, S. Sherriff-Tadano, T. Kuroda, T. Miyakawa, A. Abe-Ouchi, and M. Satoh (2022), Climate of high obliquity exo-terrestrial planets with a three-dimensional cloud system resolving climate model, *The Astrophysical Journal*, 940, 87.

[2] **Takanori Kodama**, H. Genda, J. Leconte, and A. Abe-Ouchi (2021), The Onset of a Globally Ice-covered State for a Land Planet, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(12).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件/うち国際共著 11件/うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Kodama Takanori, Takasuka Daisuke, Sherriff-Tadano Sam, Kuroda Takeshi, Miyakawa Tomoki, Abe-Ouchi Ayako, Satoh Masaki	4. 巻 940
2. 論文標題 Climate of High-obliquity Exoterrestrial Planets with a Three-dimensional Cloud System Resolving Climate Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 87 ~ 87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac98ae	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Sherriff-Tadano Sam, Abe-Ouchi Ayako, Yoshimori Masakazu, Ohgaito Rumi, Vadsaria Tristan, Chan Wing-Le, Hotta Haruka, Kikuchi Maki, Kodama Takanori, Oka Akira, Suzuki Kentaroh	4. 巻 35
2. 論文標題 Southern Ocean surface temperatures and cloud biases in climate models connected to the representation of glacial deep ocean circulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 1 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JCLI-D-22-0221.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Kamada A., Kuroda T., Kodama T., Kasaba Y., Terada N.	4. 巻 385
2. 論文標題 Evolution of ice sheets on early Mars with subglacial river systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 115117 ~ 115117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2022.115117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Delrez L., ..., Kodama T.(46), and co-authors	4. 巻 667
2. 論文標題 Two temperate super-Earths transiting a nearby late-type M dwarf	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A59 ~ A59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chaturvedi P., ..., Kodama T.(39), and co-authors	4. 巻 666
2. 論文標題 T01-1468: A system of two transiting planets, a super-Earth and a mini-Neptune, on opposite sides of the radius valley	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A155 ~ A155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Esparza-Borges E., ..., Kodama T.(16) and co-authors	4. 巻 666
2. 論文標題 A hot sub-Neptune in the desert and a temperate super-Earth around faint M dwarfs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A10 ~ A10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243731	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawauchi K., Murgas F., Palte E., Narita N., Fukui A., Hirano T., Parviainen H., Ishikawa H. T., Watanabe N., Esparza-Borges E., Kuzuhara M., Orell-Miquel J., Krishnamurthy V., Mori M., Kagitani T., Zou Y., Isogai K., Livingston J. H., Howell S. B., Crouzet N., de Leon J. P., Kimura T., Kodama T., and co-authors	4. 巻 666
2. 論文標題 Validation and atmospheric exploration of the sub-Neptune T01-2136b around a nearby M3 dwarf	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A4 ~ A4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Cadieux Charles, ..., Kodama Takanor(42), and co-authors	4. 巻 164
2. 論文標題 T01-1452 b: SPIRou and TESS Reveal a Super-Earth in a Temperate Orbit Transiting an M4 Dwarf	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 96 ~ 96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac7cea	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kodama T., Genda H., Leconte J., Abe Ouchi A.	4. 巻 126
2. 論文標題 The Onset of a Globally Ice Covered State for a Land Planet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JE006975	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Luque R., ..., Kodama T.(89) and co-authours	4. 巻 623
2. 論文標題 A resonant sextuplet of sub-Neptunes transiting the bright star HD 110067	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 932 ~ 937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-023-06692-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Morello G., .. ..., Kodama T.(28) and co-authours	4. 巻 673
2. 論文標題 T01-1442 b and T01-2445 b: Two potentially rocky ultra-short period planets around M dwarfs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A32 ~ A32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202243592	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kagetani Taiki, ..., Kodama Takanori (9) and co-authours	4. 巻 75
2. 論文標題 The mass of T01-519 b: A close-in giant planet transiting a metal-rich mid-M dwarf	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 713 ~ 721
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 小玉貴則
2. 発表標題 2030年代の戦略的中型をどうするか？
3. 学会等名 光赤外天連シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takanori Kodama, Daisuke Takasuka, Sam Sheriff-Tadano, Takeshi Kuroda, Tomoki Miyakawa, Ayako Abe-Ouchi, Masaki Satoh
2. 発表標題 Climate of high obliquity terrestrial planets with 3D cloud resolving model
3. 学会等名 Forming and Exploring Habitable Worlds Meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takanori Kodama, Daisuke Takasuka, Sam Sheriff-Tadano, Takeshi Kuroda, Tomoki Miyakawa, Ayako Abe-Ouchi, Masaki Satoh
2. 発表標題 Climate of high obliquity exo-terrestrial planets with 3D cloud resolving climate model
3. 学会等名 JpGU 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小玉 貴則, 高須賀 大輔, シェリフ多田野 サム, 黒田 剛史, 宮川 知己, 阿部 彩子, 佐藤 正樹
2. 発表標題 全球雲解像モデルを用いた高自転軸傾斜角を持った系外地球型惑星の気候
3. 学会等名 日本惑星科学会 秋季講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小玉 貴則
2. 発表標題 潮汐固定された系外地球型惑星の気候と表面水分布の関係
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takanori Kodama
2. 発表標題 How do we understand habitable climates on exoplanets?
3. 学会等名 JpGU (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小玉貴則
2. 発表標題 系外惑星・生命探査
3. 学会等名 光赤外天連シンポジウム：2030年代の戦略的中型をどうするのか (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小玉貴則
2. 発表標題 ハビタブル惑星はどこまで理解されてきたか？
3. 学会等名 CPS/ABCワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 小玉貴則, 門屋辰太郎, 玄田英典, 石渡正樹
2. 発表標題 暴走温室限界の自転軸傾斜角, 軌道離心率, 自転角速度依存性
3. 学会等名 日本惑星科学会 秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanori Kodama, Daisuke Takasuka, Takeshi Kuroda, Tomoki Miyakawa, Masaki Satoh
2. 発表標題 Climate for exo-terrestrial planets with 3D high resolution cloud resolved model: Effect of obliquity
3. 学会等名 JpGU (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanori Kodama
2. 発表標題 Climate of rocky planets
3. 学会等名 ExoClimates VI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小玉 貴則
2. 発表標題 Atmosphere and Habitability for Exo-Terrestrial Planets
3. 学会等名 JASMINE Consortium 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------