

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540434

研究課題名（和文）太陽系外惑星系における地球型水惑星の気候モードとその物理条件の解明

研究課題名（英文）Study of physical conditions for climate mode of terrestrial water-rich planets in the extrasolar planetary systems

研究代表者

田近 英一 (TAJIKI, Eiichi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：70251410

研究成果の概要（和文）：

本研究課題は、太陽系外惑星系における地球型水惑星が取り得る気候モードとその物理条件を、惑星の質量、軌道要素、中心星の光度及び年齢等の条件に対して多数の数値計算を系統的に行うことによって明らかにしようとするものである。その結果、中心星と惑星が取り得る多様な物理条件に対してそれぞれどのような気候状態が実現し得るのかを明らかにした。また、惑星及び中心星の進化に対して惑星の気候がどのように進化するのかを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This research aims to reveal physical conditions for possible climate mode of terrestrial water-rich planets in the extrasolar planetary systems based on systematic numerical simulations with a coupled climate-carbon cycle-thermal evolution model. We show the relationship between several physical conditions and possible climate mode, and also the evolutionary tracks of climate for given conditions of the planet and the central star.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：地球惑星システム科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：太陽系外惑星系，地球型惑星，水惑星，惑星気候，ハビタブルゾーン

1. 研究開始当初の背景

1995年に主系列星の周囲に太陽系外惑星が初めて確認されて以来、多数の太陽系外惑星が発見されてきた。地球の数倍程度の質量を持つスーパーアースも発見されており、地球のように海を擁する地球型水惑星が発見

されることは時間の問題と考えられる。液体の水が存在すれば生命の存在も期待できる。

太陽系外地球型惑星を理解するためには、地球型惑星内部の活動と大気海洋系との相互作用や固体惑星進化に関する知見を統合する必要がある。

私はこれまで、比較惑星学的な視点から、地球環境の進化と変動に関する研究を行い、大気海洋系と固体地球との相互作用が地球環境の長期的な安定性と進化・変動を規定していることを明らかにしてきた。その結果、地球型惑星環境の理解には惑星内部進化に関する理解が本質的に重要であること、地球のような「水惑星」は、表面が海で覆われたモード以外に氷で覆われた全球凍結モードを含む複数の気候モードを取り得ること、全球凍結時には地殻熱流量によって氷の厚さが薄く（～1,000 m）保たれ、氷の下には生命の生存に不可欠な液体の水が存在し得ること等の理解に至った。このことは、太陽系外に存在するはずの地球型水惑星の存在形態として、多様な気候モードの検討が必要であることを強く示唆する。

水惑星がどのような気候モードを取り得るかを定める条件は、中心星の明るさ、軌道要素、大気組成等、惑星内部の活動と進化等が重要である。そこで、惑星内部進化を考慮した地球型水惑星環境モデルを新たに開発して、近い将来、発見されることが確実な地球型水惑星の気候モードとその存在条件を、軌道要素や惑星質量などの観測量と対応づけて明らかにすることは急務であり、これによって太陽系外惑星の観測的研究に大きな貢献ができるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題は、太陽系外惑星系における地球型水惑星が取り得る気候モードとその物理条件を、気候モデルと炭素循環モデル及び惑星内部熱進化モデルを結合させたモデルを開発し、惑星の質量、軌道要素、中心星の光度及び年齢等の物理条件に対して多数の数値計算を系統的に行うことによって理論的に明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

将来、太陽系外地球型水惑星の観測データが得られるようになった際に重要となるのは、観測された惑星の物理条件（惑星の軌道要素、質量、中心星の光度及び年齢など）のもとで、その惑星が取り得る気候モードの推定を行うための理論的知見である。

そこで、本研究では、観測される物理量に対応する地球型水惑星の気候状態を幅広いパラメータ空間のもとで系統的に調べることが目標とする。そのために、地球のような水惑星を想定した気候モデルと炭素循環モデルを結合させた「地球型水惑星環境モデル」を開発し、さらに「地球型惑星内部熱進化モデル」から二酸化炭素の脱ガス率変化を推定することによって、取り得る気候状態及びその進化を系統的かつ詳細に調べる。

具体的には、気候モデルとして惑星放射の大気二酸化炭素濃度及び水蒸気濃度依存性を考慮した南北1次元エネルギーバランス気候モデルに、大気海洋系・大陸地殻・堆積岩・内部システムから構成される炭素循環モデルを結合させる。地球型惑星内部熱進化モデルとしては、パラメータ化対流モデルに基づく熱進化モデルに部分熔融によるマグマ生成モデルを結合させる。その際、マグマ生成時の二酸化炭素の脱ガス過程についても考慮する。

このような地球型水惑星環境モデルを開発し、惑星の軌道要素、質量、中心星の光度等のパラメータの値を広範囲に変えて数値計算を行い、水惑星が取り得る安定な気候状態を系統的に調べて、その条件を明らかにする。気候状態には多重平衡解が存在する可能性があるため、さまざまな初期条件及び境界条件に対する安定状態についても調べる。

4. 研究成果

本研究を遂行するため、地球型水惑星環境モデル及び地球型惑星内部熱進化モデルの開発を行った。そして、軌道長半径、軌道離心率、自転軸傾斜角等の条件を系統的に変化させた場合に実現される気候モードを求めた。また、軌道要素のほかにも、大陸配置に対する依存性、火成活動による二酸化炭素供給率に対する依存性等などについても、系統のかつ詳細に調べた。

その結果、まず炭素循環を考慮しない場合について、気候モードの多重平衡解領域をパラメータ空間においてマッピングすることができた。しかしながら、炭素循環を考慮した場合には多重平衡解は得られず、解の分布が大きく変化するなどの結果を得た。

軌道離心率及び二酸化炭素供給率一定の条件においては、軌道長半径に従って、暴走温室状態、無凍結状態、季節的部分凍結状態、部分凍結状態、全球凍結状態という気候モード分布が実現されるが、軌道離心率が高いほど、その分布は中心星から遠方にまで広がる。これは、気候モードが年平均日射量に支配されるとして説明できる。

自転軸傾斜角は日射量の緯度分布を決定づける要因であり、54度を境に極と赤道が受け取る年間日射量が逆転するだけでなく、その季節変化も大きく変わる。その影響で、自転軸傾斜角が小さいと部分凍結状態のような気候モードが、大きいと無凍結状態のような気候モードが軌道長半径方向に安定領域として広がることを明らかにした。

また、現在の地球における二酸化炭素供給率条件下では、炭素循環が機能しているにもかかわらず、ハビタブル領域（無凍結及び部分凍結状態）は狭い軌道範囲に限られるが、二酸化炭素供給率が数倍程度増加すれば、ハビタブル領域はハビタブルゾーン外側限界

付近まで拡大しうることが示された。

次に、地球型惑星内部熱進化モデルと炭素循環モデルを結合して、気候進化における惑星質量や気道要素、中心星の質量等の依存性を系統的に調べ、その結果をダイアグラムにまとめた。その結果、以下のような地球型水惑星環境進化の概要を明らかにすることができた。

たとえば、惑星質量は惑星内部の熱進化及び二酸化炭素脱ガス率低下を規定する。すなわち、質量が大きいほど惑星内部の冷却速度が遅くなり、長期的な二酸化炭素の脱ガス率低下の影響が小さい結果、適当な恒星質量及び軌道要素のもとでは、温暖気候モードが長期間維持された後、最終的に暴走温室モードへと至る。惑星質量が小さい場合は、二酸化炭素の脱ガス率低下が急速に生じる結果、初期に温暖気候モードにあったとしてもその寿命は短く、条件によっては暴走温室モードへ至る前に、全球凍結モードに陥る。

一方、恒星質量は光度変化と寿命を規定し、恒星質量が小さければ寿命が長く光度変化もゆるやかなため、惑星の温暖気候モードを長期間維持できるが、恒星質量が大きいほど光度が急激に増大するため、惑星環境は早期に暴走温室モードに達する。

これらの結果は、気候ダイアグラム及び惑星気候進化トラックとして整理し、提示することができた。その他、大気中の酸素濃度の上昇過程に関する検討も行った。

こうした系統的な研究は、国内外を問わず、ほとんど行われていない。とりわけ、気候モデルに炭素循環を結合させた研究はほとんどなく、他の研究においては、惑星大気中の二酸化炭素濃度が自律的に調節されることを考慮せずに、ある一定値を仮定している場合がほとんどである。また、惑星内部熱進化モデルと地球型惑星表層環境モデルを結合

した研究もなく、本研究によって始めて、惑星内部と惑星表層環境のカップリングに基づいた惑星環境の進化の描像を提示することができた。

これらの結果は、太陽系外惑星観測に基づき、太陽系外地球型惑星の表層環境を推定するための基礎的な知見を提供するものであり、そのインパクトはきわめて大きいと考える。

今後は、それぞれのモデルをより現実的なものに改善していくとともに、海洋の役割についても検討することが重要と考える。太陽系外惑星系には、地球よりもはるかに海水量が多い「海洋惑星」が普遍的に存在している可能性が高いが、そうした陸地のない条件でどのような炭素循環が生じ、どのような気候状態が実現するのかまったく分かっていない。そのような惑星表層システムの挙動を明らかにすることが、今後の大きな課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

[1] Watanabe, Y., E. Tajika, and S. Kadoya (2013) Climate of extraterrestrial planets with oceans and carbonate-silicate geochemical cycle under various obliquities, In Proc. IAU Symp. 293, Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets (eds. N. Haghighipour and J.-L. Zhou), Cambridge, Cambridge Univ. Press (in press). 査読無

[2] Kadoya, S., E. Tajika, and Y. Watanabe (2013) Climate on eccentric planets with carbonate-silicate geochemical cycle, In Proc. IAU Symp. 293, Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets (eds. N. Haghighipour and J.-L. Zhou), Cambridge, Cambridge Univ. Press (in press). 査読無

[3] Fukushima, S., S. Kadoya, and E. Tajika (2013) A study on the water world regime around extrasolar planetary systems, In Proc. IAU Symp. 293, Formation, Detection,

and Characterization of Extrasolar Habitable Planets (eds. N. Haghighipour and J.-L. Zhou), Cambridge, Cambridge Univ. Press (in press). 査読無

[4] 門屋辰太郎, 渡邊吉康, 関根康人, 田近英一 (2012) 地球惑星環境進化論, 日本惑星科学会誌・遊星人, Vol. 21, No. 3, pp. 294-306. 査読有

[5] Watanabe, Y., E. Tajika, and S. Kadoya (2011) The effects of obliquity and semi-major axis on the climate of water-rich extraterrestrial planets with carbonate-silicate geochemical cycle, Proceedings of 44th ISAS Lunar and Planetary Science Symposium, 44-02, Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara. 査読無

[6] Kadoya, S., E. Tajika, and Y. Watanabe (2011) Climate and habitability of eccentric planets with carbonate-silicate geochemical cycle, Proceedings of 44th ISAS Lunar and Planetary Science Symposium, 44-03, Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara. 査読無

[7] 田近英一 (2011) 全球凍結～地球環境の大変動と生物進化～, 名古屋内科医会会誌, No. 137, pp. 3-10. 査読無

[学会発表] (計38件)

[1] 門屋辰太郎, 田近英一 (2013) 炭素循環の機能する系外地球型水惑星の表層環境と進化, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (2013 年 5 月 20 日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県).

[2] Tajika, E. (2013) Habitable Zone and Evolution of Planetary Environments, NINS Workshop on Astrobiology (2013 年 3 月 3 日, 学術総合センター, 東京都).

[3] 田近英一 (2012) 太陽系外に第二の地球は存在するか? 2012 年度第 7 回学融合セミナー (2012 年 12 月 26 日, 東京大学, 千葉県).

[4] 田近英一 (2012) 地球環境と生命の共進化, 第 1 回「惑星科学と生命科学の融合」研究会 (2012 年 12 月 8 日, 湘南国際村センター, 神奈川県).

[5] 門屋辰太郎, 田近英一 (2012) 地球型水

惑星表層における気候, 日本惑星科学会秋季講演会 (2012年10月24日, 神戸大学, 兵庫県).

[6] Fukushima, S., S. Kadoya, and E. Tajika (2012) A study on the water world regime around extrasolar planetary systems, International Astronomical Union XXVIII General Assembly (27 August, 2012, Beijing, China).

[7] Kadoya, S., E. Tajika, and Y. Watanabe (2012) Climate on eccentric planets with carbonate-silicate geochemical cycle, International Astronomical Union XXVIII General Assembly (27 August, 2012, Beijing, China).

[8] Watanabe, Y., E. Tajika, and S. Kadoya (2012) Climate of extraterrestrial planets with oceans and carbonate-silicate geochemical cycle under various obliquities, International Astronomical Union XXVIII General Assembly (27 August, 2012, Beijing, China).

[9] 田近英一 (2012) 地球型水惑星の多様性, 進化, ハビタビリティ, 第351回東工大地球惑星セミナー (2012年7月4日, 東京工業大学, 東京都).

[10] 田近英一 (2012) 地球型水惑星の多様性とハビタビリティ, 第8回「宇宙と生命」談話会 (2012年6月25日, 自然科学研究機構, 東京都).

[11] 福島俊, 門屋辰太郎, 田近英一 (2012) 太陽系外惑星系におけるウォーターワールドレジームの惑星環境, 日本地球惑星科学連合2012年大会 (2012年5月22日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県).

[12] 門屋辰太郎, 田近英一, 渡邊吉康 (2012) 炭酸塩-珪酸塩の地球化学的循環を考慮した系外惑星表層環境の長期進化, 日本地球惑星科学連合2012年大会 (2012年5月22日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県).

[13] 渡邊吉康, 田近英一, 門屋辰太郎 (2012) 自転軸傾斜角及び大陸配置が炭素循環の機能する系外地球型水惑星の表層環境に及ぼす影響, 日本地球惑星科学連合2012年大会 (2012年5月22日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県).

[14] 田近英一, 門屋辰太郎 (2012) ハビタブルゾーンとウォーターワールドレジーム,

日本地球惑星科学連合2012年大会 (2012年5月22日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県).

[15] Watanabe, Y., E. Tajika, and S. Kadoya (2012) Continental distribution and obliquity as factors to determine the climate of extraterrestrial planets with oceans and carbonate-silicate geochemical cycle, 第8回太陽系外惑星大研究会 (2012年4月20日, ニューフジヤホテル, 静岡県).

[16] Tajika, E. (2012) Habitability in the extrasolar system, 第8回太陽系外惑星大研究会 (2012年4月20日, ニューフジヤホテル, 静岡県).

[17] 田近英一 (2012) 「新しい海洋科学技術の展開」, 平成23年度海洋研究開発機構研究報告会 JAMSTEC 2012 「新しい海洋立国への道」 (2012年3月14日, 東京国際フォーラム, 東京都).

[18] 原田真理子, 田近英一, 関根康人 (2012) 数値モデルを用いた全球凍結イベントと大気中酸素濃度増大の関連性についての考察, 2011年度古海洋シンポジウム (2012年1月6日, 東京大学海洋研究所, 千葉県).

[19] 門屋辰太郎, 田近英一, 渡邊吉康 (2012) 炭素循環を考慮した系外惑星の表層環境, 系外惑星大気 WS2012 (2012年3月15日, ニチイ学館ポートアイランドセンター, 兵庫県).

[20] 渡邊吉康, 田近英一, 門屋辰太郎 (2012) 炭素循環の機能する系外地球型水惑星の表層環境: 自転軸傾斜角及び大陸配置に着目した検討, 系外惑星大気 WS2012 (2012年3月15日, ニチイ学館ポートアイランドセンター, 兵庫県).

[21] Watanabe, Y., E. Tajika, and S. Kadoya (2011) Surface environment of water-rich extraterrestrial planets with carbonate-silicate geochemical cycle under the condition of various obliquities and semi-major axes, America Geophysical Union Fall Meeting (9 December, 2011, San Francisco, USA).

[22] 田近英一 (2011) 元素の地球化学的循環と地球環境進化, 平成23年度日本化学会東北支部事業「いま伝えたい化学の新しい魅力」 (2011年11月25日, 東北大学, 宮城県).

[23] 門屋辰太郎, 田近英一, 渡邊吉康 (2011) 炭素循環を考慮した高軌道離心率惑

星の表層環境とハビタビリティ, 日本惑星科学会2011年秋季講演会(2011年10月25日, 相模女子大学, 神奈川県).

[24] 渡邊吉康, 田近英一, 門屋辰太郎(2011) 自転軸傾斜角が炭素循環の機能する系外地球型水惑星の気候に及ぼす影響の検討, 日本惑星科学会 2011 年秋季講演会(2011年10月25日, 相模女子大学, 神奈川県).

[25] 田近英一(2011) 物質循環と地球環境の進化・変動, 第3回 持続可能社会のためのマテリアルサイエンスイノベーション講演会「材料・プロセス研究によるサステナブル社会への貢献」(2011年10月22日, 東京大学, 千葉県).

[26] Genda, H., Y. Abe, R., Kimura, and E. Tajika (2011) Carbon cycle and long-term evolution of climate for a globally ocean-covered planet, Extreme Solar Systems II (17 September, 2011, Moran, Wyoming, USA).

[27] 門屋辰太郎, 田近英一, 渡邊吉康(2011) 炭素循環を考慮した高軌道離心率惑星の表層環境, 第44回月・惑星シンポジウム(2011年8月1日, 宇宙科学研究所, 神奈川県).

[28] 渡邊吉康, 田近英一, 門屋辰太郎(2011) 炭素循環の機能する外地球型水惑星の気候の自転軸傾斜角依存性, 第44回月・惑星シンポジウム(2011年8月1日, 宇宙科学研究所, 神奈川県).

[29] 田近英一(2011) 全球凍結と生命～ハビタブルプラネットとは～, 第11回自然科学研究機構シンポジウム「宇宙と生命—宇宙に仲間はあるのかII—」(2011年6月12日, 愛知県).

[30] 田近英一(2011) 原生代初期全球凍結の帰結, 国際高等研究所研究プロジェクト第5回研究会「宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略」(2011年6月16日, 東京大学, 東京都).

[31] 門屋辰太郎, 田近英一, 渡邊吉康(2011) 炭素循環を考慮した場合における軌道離心率のハビタビリティへの影響, 日本地球惑星科学連合2011年大会(2011年5月24日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県).

[32] 渡邊吉康, 田近英一, 門屋辰太郎(2011) 太陽系外地球型水惑星の気候状態に

対する自転軸傾斜角と炭素循環の影響, 日本地球惑星科学連合2011年大会(2011年5月24日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県).

[33] 田近英一(2011) 惑星科学の視点からみた掘削科学, ワークショップ「深海掘削による生命・地球科学の新しいパラダイムを求めて」(2011年5月21日, 海洋研究開発機構, 東京都).

[34] Watanabe, Y. and Tajika, E. (2011) The effects of obliquity and carbonate-silicate geochemical cycle on the climate of water-rich extraterrestrial planets, European Geosciences Union General Assembly 2011 (4 April, 2011, Vienna, Austria).

[35] 田近英一(2010) 酸素濃度の維持機構, 国際高等研究所研究プロジェクト第4回「宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略」(2010年12月22日, 国際高等研究所/けいはんなプラザホテル, 京都府).

[36] 渡邊吉康, 田近英一(2010) 系外水惑星の自転軸傾斜角が気候に及ぼす影響, 日本惑星科学会2010年秋季講演会(2010年10月7日, 名古屋大学, 愛知県).

[37] 木村亮, 阿部豊, 田近英一(2010) 全球海惑星の炭素循環と大気温度進化, 日本惑星科学会2010年秋季講演会(2010年10月6日, 名古屋大学, 愛知県).

[38] 田近英一(2010) 全地球凍結～地球環境の大変動と生物進化～, 第55回愛知県下内科医会合同例会学術講演会(2010年8月7日, ウェスティンナゴヤキャッスル, 愛知県).

〔図書〕(計2件)

[1] 田近英一(2013) 「アストロバイオロジー — 宇宙における生命の起源と進化」(山岸明彦編)(分担執筆), 化学同人, 344p.

[2] 田近英一(2011) 大気の進化 46億年 O_2 と CO_2 —酸素と二酸化炭素の不思議な関係, 技術評論社, 232p.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田近 英一 (TAJIKI, Eiichi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 70251410