

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13976

研究課題名（和文）大気化学・元素循環計算による地球型惑星の表層環境進化の解明

研究課題名（英文）Elucidating the evolution of the surface environments of terrestrial planets by modeling atmospheric chemistry and elemental cycling

研究代表者

黒川 宏之（Kurokawa, Hiroyuki）

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：80713643

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）：本研究では、地球型惑星の気候計算・大気化学計算・物質循環計算を組み合わせた惑星大気・表層水量進化の理論モデルを構築した。主星スペクトル型・主星と惑星との距離（軌道半径）、大気中の窒素・二酸化炭素・一酸化炭素・メタン分圧というパラメータの幅広い範囲について、表層温度と大気酸化率のデータベースを作成した。地球や系外地球型惑星の大気進化・表層水量進化のパラメータ依存性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽系外惑星観測の発展にともない、地球のように海を湛え生命を育む惑星の発見・特徴づけへの期待が高まっている。惑星の表層環境は温室効果や水の保持といった効果を通じてその大気に左右される。本研究は、地球史にもとづき惑星の表層環境進化を決定する要因を決定し、その知見を太陽系外惑星へと応用するのに役立つものである。本研究の成果を適用することで、現在実現しつつある太陽系外地球型惑星の大気観測をもとに、それらの惑星の表層環境や内部、進化史の情報を読み出すことができる。

研究成果の概要（英文）：We developed a theoretical model to simulate the evolution of planetary atmospheres and surface water budgets on terrestrial planets, by combining calculations of the planetary climate, photochemistry, and material cycling. We obtained a database of the surface temperature and the atmospheric oxidation rate for wide parameter space of the host-star spectral type, the orbital distance of the planet, and atmospheric nitrogen, carbon dioxide, carbon monoxide, and methane. Using the database, we revealed the parameter dependence of the evolution of atmospheres and surface water budgets of Earth and other terrestrial planets.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：地球 系外惑星 気候 大気化学 物質循環

1. 研究開始当初の背景

地球型惑星の研究は新たな局面を迎えようとしている。地球科学においては、太古代の地球化学記録による大気組成の制約や地質記録による大気圧の推定から、地球大気組成と表層環境が大変動を遂げてきた姿が描き出されつつある。さらに、我々の知る海を湛え生命を育む環境を備えた惑星(以下、海を持つ地球型惑星をハビタブル惑星と呼称)はこれまで地球のみであったが、近い将来、天文学においては TMT など次世代望遠鏡による系外ハビタブル惑星の大気・表層環境の観測研究が花開くであろう。天文観測で得られる系外惑星大気透過光・反射光スペクトルから大気・表層環境進化を解読するためには、ハビタブル惑星進化の統一的モデルが必須である。これは同時に、地球“史”を超えて地球表層環境進化の普遍性・特殊性を理解することでもある。

このような背景を踏まえ、地質記録が伝える地球大気と表層環境進化の駆動要因は何か? 地球とは主星のスペクトル型・軌道半径などが異なる系外ハビタブル惑星がどのような進化を辿るか? という問いを本研究課題の核心とする。生命活動に加え、地球の表層環境変動には太陽紫外線による光化学反応やマントルとの元素循環が影響してきたと考えられるが、両者の相対的な寄与の大きさ・相互作用は明らかとなっていない。また、これらの要因が系外ハビタブル惑星においてどのような多様性を生み出すのかについては、要素ごとの研究に留まっている。

2. 研究の目的

本申請課題の目的はまず第一に大気化学と元素循環による地球大気・表層水量進化を解明することである。硫黄同位体記録から、約 25 億年前の大酸化イベント以前の地球大気は CO に富んでいた可能性が指摘されている。そのような還元的な大気の形成・維持は大気化学によって決定される。太陽紫外線が CO₂、H₂O をはじめとする大気分子を解離し、OH などのラジカルを生成することで、複雑な反応ネットワークを形成する。解離した H₂O から生成する H₂ が上層大気を通じて宇宙空間へ流出(大気散逸)することで、海水は失われ大気は酸化されていく。一方で、紫外線を遮蔽する分子(OCS など)が生成されると、H₂O 解離が抑制されるというフィードバックが働く。さらに、地質記録が示す低い大気圧は、表層-マントル間での元素循環の結果と考えられる。大気的主要元素である H, C, N, S はマントルから脱ガスによって供給されるとともに、含水鉱物や沈殿物として大気から除去され、沈み込み帯からマントルへと還流していく。

第二の目的は系外ハビタブル惑星の大気・表層水量進化の多様性を理論予想することである。主星(恒星)との距離は紫外線フラックスの変化に加えて、惑星の表層気温を通じて大気中の H₂O 量を変化させ、大気化学や元素循環に影響を及ぼす。また、主星はスペクトル型に応じて異なる紫外線強度を持ち、異なる時間進化をすることが知られている。これらの外因的な違いによって、仮に脱ガスフラックスなど内因的な要因が全て地球と同じであると仮定しても、系外ハビタブル惑星は異なる進化パスを辿るはずである。観測に先立ち本研究課題で理論予想を行うことで、将来の観測計画に指針を与え、究極的には地球との内因的な違いの判別にも繋げたい。

3. 研究の方法

鉛直方向 1 次元の気候モデルおよび大気化学モデルと物質循環モデルを結合する。大気化学モデルでは多数の分子種の化学反応ネットワークを組み込む。過去の実験との比較から構築された反応ネットワークを用いる。化学種の雨滴への溶解と降雨も考慮する。均質圏界面を計算領域上端とし、拡散律速・エネルギー律速の大小から見積もった水素散逸フラックスを境界条件とする。下部境界条件として脱ガスフラックスを元素循環モデルから与える。各時間ステップに対し、大気化学モデルの予想する大気組成・気温をもとに、元素循環モデルで表層-マントル間のフラックスを時間積分する。境界条件として表層での沈殿物生成フラックスが大気化学モデルから与えられる。

大気化学・元素循環モデルには脱ガスフラックス・沈み込み帯でのリターン効率(元素ごと)・マントル酸化還元度進化というパラメータが存在する。これらのパラメータは惑星の熱進化・沈み込み帯の物理によって決定されるが、いずれも十分にわかっていない。本研究では、太古代(25 億年以上前)の大気酸化還元度・大気圧の制約、研究代表者が行ってきた H, N 同位体による大気散逸・元素循環フラックスの制約を満たすパラメータ範囲を決定する。なお、25 億年以降は生命活動が表層環境に支配的な影響を及ぼしてきたため、本研究ではそれ以前の時代のみ着目する。

異なる天文学的環境(主星スペクトル型・軌道半径)に位置するハビタブル惑星の大気・表層水量の進化を解明する。幅広い主星スペクトル型を考慮するが、系外地球型惑星の観測的特徴づけに有利な小さい恒星(M 型星)まわりの惑星については重点的に調べる。2 年目に制約した地球のマントル脱ガス・沈み込みパラメータを中心にしたパラメータ・サーベイを行うことで、外因的・内因的要因それぞれが作り出す表層環境の多様性を突き止める。

4. 研究成果

気候モデル・大気化学モデル・物質循環モデルを結合した惑星大気・表層水量進化モデルを構築した。気候モデルのアウトプットである表層温度、大気化学モデルのアウトプットである大気酸化率(水素散逸率)については、幅広いパラメータについてデータベースを作成しておくことで、進化モデル計算を高速化した。

理論モデルを地球に適用することで、地質学的制約を満たすパラメータ範囲を明らかにした。モデルに含まれない生物活動の影響が無視できる範囲内で、初期の大気とマンツルの炭素分配、太古代マンツルの酸化還元度についての制約が得られた。

理論モデルを主星スペクトル型等の異なる仮想的な太陽系外地球型惑星に適用することで、大気組成・表層水量進化の理論予想をまとめた。特に主星スペクトル型が異なる場合、紫外線フラックスの影響による大気化学への影響に加え、可視・赤外放射のスペクトルが異なることによる表層温度の違いが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Li Yamei, Kitadai Norio, Sekine Yasuhito, Kurokawa Hiroyuki, Nakano Yuko, Johnson-Finn Kristin	4. 巻 13
2. 論文標題 Geoelectrochemistry-driven alteration of amino acids to derivative organics in carbonaceous chondrite parent bodies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4893
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-32596-3	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 Kuwahara Ayumu, Kurokawa Hiroyuki, Tanigawa Takayuki, Ida Shigeru	4. 巻 665
2. 論文標題 Dust ring and gap formation by gas flow induced by low-mass planets embedded in protoplanetary disks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/202243849	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 Kurokawa H., Laneuville M., Li Y., Zhang N., Fujii Y., Sakuraba H., Houser C., Cleaves H. J.	4. 巻 23
2. 論文標題 The Origin of Earth's Mantle Nitrogen: Primordial or Early Biogeochemical Cycling?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 e2021GC010295
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GC010295	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 Kurokawa H., Shibuya T., Sekine Y., Ehlmann B. L., Usui F., Kikuchi S., Yoda M.	4. 巻 3
2. 論文標題 Distant Formation and Differentiation of Outer Main Belt Asteroids and Carbonaceous Chondrite Parent Bodies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AGU Advances	6. 最初と最後の頁 1~23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021AV000568	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 Kurokawa Hiroyuki, Kuroda Takeshi, Aoki Shohei, Nakagawa Hiromu	4. 巻 371
2. 論文標題 Can we constrain the origin of Mars' recurring slope lineae using atmospheric observations?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114688	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 Sakuraba Haruka, Kurokawa Hiroyuki, Genda Hidenori, Ohta Kenji	4. 巻 11
2. 論文標題 Numerous chondritic impactors and oxidized magma ocean set Earth's volatile depletion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-99240-w	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 Kurokawa Hiroyuki, Miura Yayoi N., Sugita Seiji, Cho Yuichiro, Leblanc Francois, Terada Naoki, Nakagawa Hiromu	4. 巻 370
2. 論文標題 Mars' atmospheric neon suggests volatile-rich primitive mantle	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2021.114685	査読の有無 無
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 Kurokawa Hiroyuki	4. 巻 372
2. 論文標題 Hydrated crust stores Mars' missing water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 27~28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abh4469	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 黒川宏之
2. 発表標題 次世代小天体サンプルリターン探査: 彗星から太陽系の起源に迫る
3. 学会等名 第24回惑星圏研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kurokawa,H.
2. 発表標題 The 3 micron m NH-features on asteroids and their implications for the MMX mission
3. 学会等名 MMX Science Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kurokawa,H.
2. 発表標題 The Next Generation Sample Return: A journey to the origins of the solar system
3. 学会等名 The 1st H#JST meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川宏之
2. 発表標題 地球マントルの窒素の起源: 惑星形成と地球-生命共進化への示唆
3. 学会等名 日本惑星科学会 2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kurokawa, H.
2. 発表標題 Planet formation and volatile delivery
3. 学会等名 Diversity of Rocky Planets 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 揮発性元素同位体組成から探る火星の形成と表層環境進化
3. 学会等名 CPS & ABC ワークショップ『火星から諸惑星：表層環境の多様性』(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 GREX-PLUSで期待される惑星サイエンス：理論・太陽系探査とのシナジー
3. 学会等名 GREX-PLUS サイエンス検討会 FY2021 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kurokawa, H.
2. 発表標題 Distant formation and water-rock differentiation of large C-complex asteroids
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kurokawa, H.
2. 発表標題 Mars atmospheric neon probes mantle volatile content and early surface environment
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 C型小惑星の起源・進化と水惑星形成
3. 学会等名 第5回水惑星学全体会議
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 The origin of Earth's mantle N: The implications for planetary accretion and Earth-life co-evolution
3. 学会等名 惑星圏研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 Mars Ice Mapper EDL による火星大気ネオンその場測定：科学検討と機器開発状況
3. 学会等名 第22回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kurokawa, H.
2. 発表標題 Earth-Life co-evolution: A perspective from volatile accretion and cycling
3. 学会等名 10th ELSI International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kurokawa, H.
2. 発表標題 Future in situ measurements of atmospheric neon to unveil the origin and early surface environment of Mars
3. 学会等名 ISAS Planetary Exploration Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒川 宏之
2. 発表標題 火星大気ネオンの示唆する揮発性元素に富んだマントルとその起源
3. 学会等名 日本惑星科学会 2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 紘介
2. 発表標題 一酸化炭素の放射吸収・散乱特性を考慮した地球型惑星の大気構造
3. 学会等名 日本惑星科学会 2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

生命の材料をもたらした小惑星の9億kmにも及ぶ長旅
<https://www.titech.ac.jp/news/2022/062838>
たくさんの小惑星の衝突が地球の大気と海水の量を決定づけた
<https://www.titech.ac.jp/news/2021/062411>
火星のネオンサイン：大気中の希ガスから火星の深部を探る
http://www.elsi.jp/ja-JP/news_events/highlights/2021/mars_neon_sign

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
---------	---------