

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K04066

研究課題名(和文) 全球酸化還元収支モデルを用いた富酸素地球大気の持続期間の推定

研究課題名(英文) The future life span of Earth's oxygenated atmosphere

研究代表者

尾崎 和海 (OZAKI, Kazumi)

東邦大学・理学部・講師

研究者番号：10644411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では地球大気組成(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)の将来進化を制約し、その支配要因や背後にある生物地球化学的物質循環を明らかにするための理論的研究を行った。生元素(C, N, P, O, S)の物質循環過程を組み込んだ新規の理論モデルの開発は当初の想定以上に順調に進展し、億年スケールで生じる大気組成及び気候変化がシミュレート可能となった。将来の大気進化予測を行った結果、億年スケールで生じる太陽光度の増大に起因した大気中CO<sub>2</sub>濃度減少と温暖化により一次生産が抑制され、大気の貧酸素化が進行するという結果が得られた。アストロバイオロジー分野へ波及効果を持つ知見も多く得られ、本研究計画の目的は達成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって酸素に富む地球環境が永続的に続くものではないことが初めて定量的に示されたことは、系外惑星生命探査に重要な示唆を与える研究成果である。酸素は生命存在指標(バイオシグネチャー)として注目されてきたが、地球史の大半は貧・無酸素環境であり、そのような惑星大気についてどのように生命存否を判断するのか、今後の研究の発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A theoretical study has been conducted to constrain the future evolution of Earth's atmospheric composition (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) and to understand its controlling factors and biogeochemical cycles. The development of a numerical model has progressed more smoothly than expected. By incorporating the biogeochemical cycles of C, N, P, O, and S, it is able to simulate the evolution of atmospheric chemistry and climate on geologic timescales. Using a stochastic approach, we found that the mean future lifespan of Earth's atmosphere is about 1 billion years. Earth's oxygen-rich atmosphere represents an important sign of life that can be remotely detectable. However, this study suggests that the oxygen-rich atmosphere might only be possible for 20-30% of the Earth's entire history as an inhabited planet. If we can generalize this insight to Earth-like exoplanets, then we need to consider additional biosignatures applicable to weakly-oxygenated/anoxic worlds in the search for life in the universe.

研究分野：地球システム科学

キーワード：酸素 物質循環 数値モデリング 生物地球化学 地球史 アストロバイオロジー

1. 研究開始当初の背景

これまでの地質学的・地球化学的データの蓄積により、地球史を通じた大気組成の変遷について大局的描像が得られつつある。しかしながら、地球大気の将来進化、とくに酸化的な地球大気の持続期間についてはよくわかっていない。

従来、地球生命圏の存続期間は恒星進化理論に基づく太陽輝度の増大と地球表層圏での炭素循環に関する理論的枠組みに基づいて議論されてきた(例えば Lovelock and Whitfield, 1982; Caldeira and Kasting, 1992)。炭素循環に基づく気候安定化機構(いわゆるウォーカーフィードバック機構; Walker et al., 1981)では、太陽輝度の増大に伴う気候温暖化への影響は大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の低下によってバッファーされる。これは地質学的時間スケールで作用する CO<sub>2</sub> の除去過程であるケイ酸塩風化作用の気候依存性に基づくものである。この結果として、地球史を通じて大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が低下することによって太陽輝度の増大の効果が相殺され温暖気候が維持されてきたと考えられている。しかしながら、ウォーカーフィードバック機構には限界があることも指摘されてきた。すなわち、将来の太陽輝度の増大で大気 CO<sub>2</sub> レベルが 100 ppmv 程度以下まで低下すると、温室効果が弱化することでウォーカーフィードバックのバッファー効果が作用しにくくなり、その結果として太陽輝度の増大を反映した気候温暖化が顕著になると推測されている。炭素循環に関する理論モデルを用いた先行研究によると、約 15-20 億年後には湿潤/暴走温室状態へ移行し、生命生存が不可能になると見積もられている(Caldeira and Kasting, 1992)。

この理論的枠組みのもう一つの重要な帰結は、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の低下が陸上植物の光合成活性が著しく抑制されるレベルにまで低下すると予想している点である。陸上植物は風化作用を促進することによって岩石圏から水圏への栄養素(特にリン)の流入率を増加させており、これが生命圏全体の O<sub>2</sub> 生成を下支えしている。そのため、CO<sub>2</sub> 枯渇による生態系活動レベルの低下は大気海洋の貧酸素化を招くと予想される。しかしながら、これまでに酸化的な地球大気の持続期間については研究が行われていない。大気の貧酸素化が進行すれば、強力な温室効果気体であるメタン(CH<sub>4</sub>)の大気中存在量も上昇することが予想され、これは気候へと影響するはずである(図1)。このように、大気の酸化還元状態の進化は炭素循環や生命圏存続期間と密接に関連している。

加えて、O<sub>2</sub> は太陽系外惑星での生命存在指標(バイオシグネチャー)として最も注目されているものであり、地球の酸化的大気の持続期間を明らかにすることは太陽系外の生命惑星探査にも関わる基礎科学的課題である。

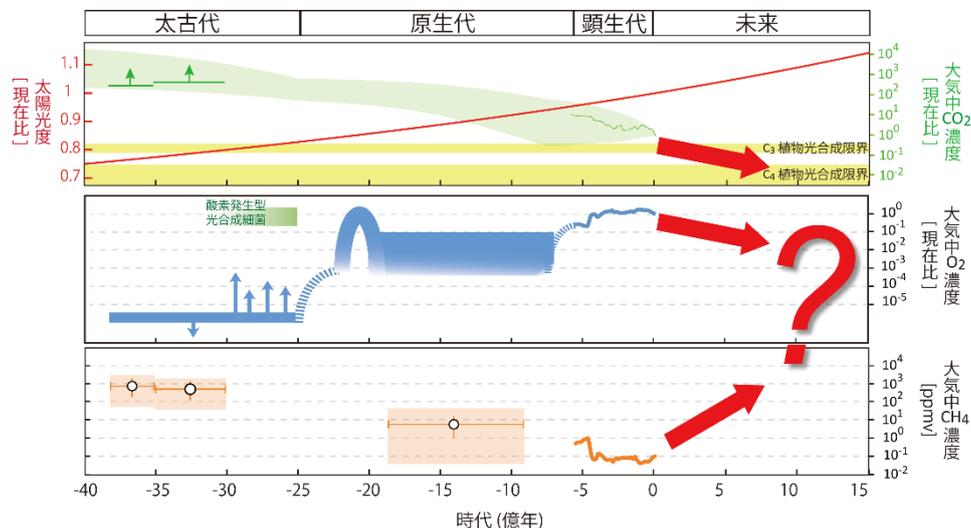


図1. 地球大気組成(CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)の変遷史

2. 研究の目的

本研究計画では、地球大気組成(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)の将来進化を制約し、その支配要因や背後にある生物地球化学的物質循環についての理解を得るための基礎的研究を行う。地質学的時間スケールでの大気組成は、化学反応を伴う物質循環によって規定されている。CO<sub>2</sub>やO<sub>2</sub>の量的な問題を超越して維持機構や動態にまで迫るためには、それらを規定する化学反応や物質循環を含めた定量的アプローチが本質的に重要となる。本研究では大気組成を規定する生物地球化学的物質循環過程と気候状態を扱うことが可能な理論モデルを開発し、多数の数値実験を行うことで酸化的大気の大気の持続期間を統計的に明らかにすることを目指す。具体的な達成目標は、

- 1) 大気-海洋-地殻-マントル間の生元素循環を考慮した理論モデルの新規構築
- 2) 顕生代の大気組成の復元
- 3) 大気進化の将来予測とその支配要因および物質循環解明

である。これにより、地球大気の将来進化を物質循環に基づく理論的見地から総合的に解明する。

### 3. 研究の方法

(1) 概要：現在の地球上では、 $O_2$  は主に藻類や陸上植物による光合成によって生成されている。しかしながら、地質学的な時間スケールでの大気海洋中の  $O_2$  量は光合成以外のさまざまな生物地球化学的作用（たとえば水中や土壌中での有機物分解や硫化鉄の沈殿、岩石の風化作用や火山性還元ガスの流入など）によっても影響される。そのため、 $O_2$  量を規定している地球表層圏の物質循環過程を包括的に考慮する必要がある。本研究ではそのような理論モデルを新規に構築し、 $O_2$  に富んだ地球環境の持続期間を明らかにするための数値実験を行う。

(2) 理論モデルの開発：理論モデルには、現在のような酸化的な地球表層環境で生じる生物地球化学のプロセスだけでなく、貧・無酸素な環境中で卓越する種々の生物地球化学過程（たとえばメタン生成や硫酸還元）を考慮した。また、億年スケールで作用する大気-海洋-地殻間の生元素(C, N, P, O, S)循環過程（風化作用や脱ガス作用）や地球表層圏とマントル間での酸化還元収支を評価可能とした。開発された理論モデルの計算コストは多数の数値実験（モンテカルロシミュレーション）が可能にまで低く抑えられており、モデルのもつ不確定性を統計的に評価することが可能となった。

(3) 大気進化制約：開発された理論モデルに対し、6億年前を想定した初期値を与えて時間発展計算を行った。理論モデルには地球外要因（恒星進化の理論から予測される太陽光度変化）と地球内要因（火成活動の変化や生態系の応答など）が考慮されており、モデルへのフォーシングとして与える。モデルの初期状態やパラメータには不確定性が伴うため、それらを変化させた多数の実験（40万回以上）を行い、現在の地球環境を再現可能なパラメータの組み合わせを抽出した ( $n=4,787$ )。それらについて将来の大気組成進化と物質循環動態を推定した。

また、太陽輝度が一定の場合や陸上植物が不在の場合など、計算条件を変えたモンテカルロシミュレーションも実施した。これにより、太陽進化や陸上植物が大気進化にどの程度の影響を与えているのかを評価した。

### 4. 研究成果

(1) 大気進化：数値実験の結果得られた大気組成の時代変化を図2に示す。顕生代の大気進化については、これまでに得られている地質記録や理論モデルを用いた先行研究結果と調和的な結果が得られた。将来進化については、大気中  $O_2$  濃度は億年スケールで徐々に低下することが明らかになった（図2a）。大気貧酸素化の予測には不確定性があるものの、貧酸素化が進行することはすべてのシナリオで示された。また、大気貧酸素化に伴って海洋の貧酸素化も進行する結果、海洋内部でのメタン生成が促進される。これにより大気中の  $CH_4$  濃度は増大することも明らかとなった（図2b）。大気中  $CO_2$  濃度は太陽光度の増大に起因したウォーカーフィードバックの応答の結果として億年スケールで低下を続け、5億年程度で 100 ppmv を下回るほどまで低下することが予測された（図2c）。これは先行研究の結果（Caldeira and Kasting, 1992）と調和的な結果である。また、大気中  $CH_4/CO_2$  濃度比は増加する傾向にあることが明らかになった。

計算結果の解析の結果、大気貧酸素化は、大気中  $CO_2$  濃度の低下（図2c）と温暖化（図3a）の二つの要因によって生態系の一次生産が低下（図3b）することで進行することが示された。現在の10%以上の大気中  $O_2$  濃度が維持される期間は残り  $10.5 \pm 1.6$  億年 ( $1\sigma$ )、パストール点と呼ばれる好気性生物が息絶可能な酸素濃度（現在の1%以上の  $O_2$  濃度）の持続期間は  $10.8 \pm 1.4$  億年と推定された（図4b）。

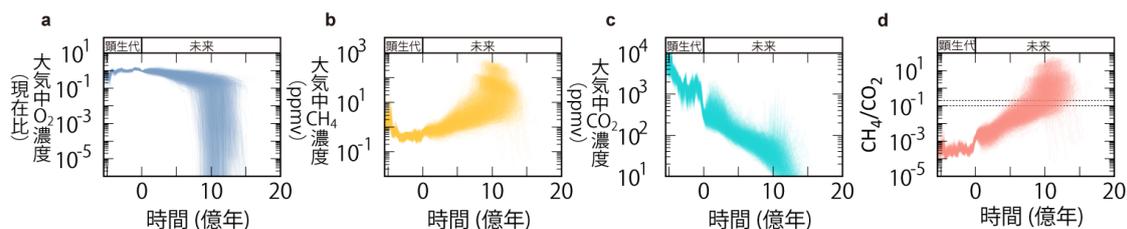


図2. 顕生代以降の地球大気組成の時代変化についてのシミュレーション結果。(a)  $O_2$ , (b)  $CH_4$ , (c)  $CO_2$ , (d)  $CH_4/CO_2$ .

興味深いことに、大気 O<sub>2</sub> 濃度がパストール点程度まで低下すると、その後は急速に無酸素条件へ遷移することが予測された。これに伴い、オゾン層の消失、大気中 CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> 濃度の急増、気温の急増が生じ、生態系の一次生産が激減することも分かった (図 3)。大気海洋系は還元的状態に陥るため、これ以降は好気性の多細胞生物の生存は困難と考えられる。解析の結果、この大気の急速な無酸素化は、CH<sub>4</sub> による温暖化や CO<sub>2</sub> 枯渇による一次生産の抑制及び大気光化学反応系に内在する強い非線形効果 (Goldblatt et al., 2006; Claire et al., 2006) などの複数の正のフィードバック作用が作用することで引き起こされていることが分かった。

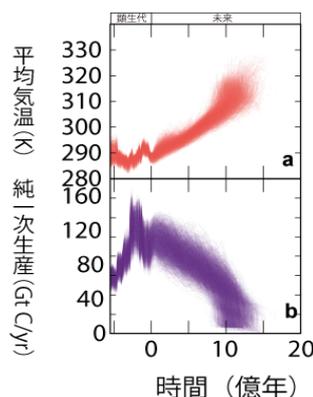


図 3.(a)地表面平均気温と (b)純一次生産の時代変化。

(2) 酸化的大気の持続期間の支配要因：大気貧酸素化の究極的なドライバーを明らかにするための感度実験を行った。まず、太陽輝度を現在値に固定した数値実験を行った結果、大気の貧酸素化が生じないことが分かった (図 4a 灰色線)。このことから、貧酸素化の究極の原因は太陽進化であることが明らかとなった。すなわち、太陽進化に対する炭素循環の応答の結果として大気 CO<sub>2</sub> 濃度が低下しウォーカーフィードバックが機能しにくくなると、CO<sub>2</sub> 枯渇と温暖化の進行によって一次生産が抑制され貧酸素化が生じることが分かった。地球大気の貧酸素化が主系列星としての太陽進化によって駆動されているという知見は本研究で初めて示された成果である。

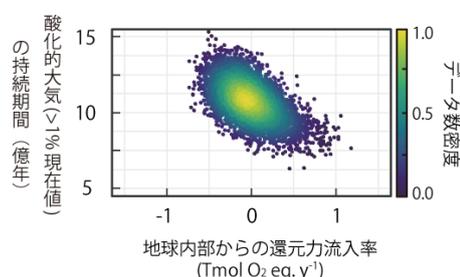


図 4.(a)大気中 O<sub>2</sub> 濃度の進化と (b)酸化的大気 (現在の 1%以上の O<sub>2</sub> 濃度) の持続期間。太陽光度が一定の場合 (灰色線) は、貧酸素化が生じない。

次に、地球表層圏とマントル間での酸化還元収支を解析した結果、急激な O<sub>2</sub> 濃度の低下が起きるタイミングは地球表層 (大気-海洋-地殻) と地球内部 (マントル) 間での物質循環を介した相互作用 (酸化還元収支) によって左右されることが明らかとなった (図 5)。地球内部からの還元力の供給率が大きい場合 (マントルからの還元物質の流入や沈み込み帯での酸化物質の沈み込みが大きい場合) ほど、酸化的大気環境の持続期間は短くなる。すなわち、地球内部と表層間の物質循環を介した相互作用も酸化的大気の持続期間を考える上で重要である。

図 5.酸化的大気の持続期間と地球内部からの還元力フラックスの関係。

本研究結果で得られた酸素に富む地球環境の持続期間の推定値には、1 億年以上の不確実性が残っている。これを小さくするためには生態系の応答特性や進化、地球内部との物質循環の素過程などについてさらなる理解が必要である。しかしながら、現在のような酸化的大気環境が永続的に続くものではないことが初めて定量的に示されたことは重要な研究成果である。

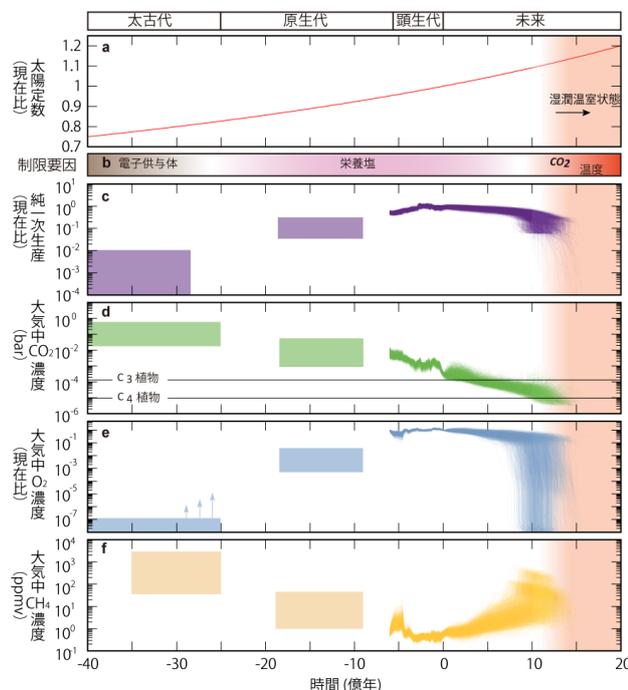


図 6. 地球史を通じた環境変遷. (a)太陽定数、(b)生物生産の制限要因、(c)全球の純一次生産、(d)大気中 CO<sub>2</sub> 濃度、(e)大気中 O<sub>2</sub> 濃度、(f)大気中 CH<sub>4</sub> 濃度. 地球における生命生存可能期間のうち約 20%だけが好気性の多細胞生物の生存可能な状態にあると考えられる。

(3) バイオシグネチャー探査への示唆：

本研究結果に基づく、現在の 10%以上の大気中 O<sub>2</sub> 濃度が維持される全期間は約 15 億年間 (約 5 億年前から 10 億年後

まで)と見積もられる。地球環境がハビタブルな(生命生存に適した)状態にある期間は最大でおよそ74億年間(およそ44億年前から30億年後)と考えられることから、酸化的な地球環境は全ハビタブル期間の約20%を占めるに過ぎない(図6)。これは系外惑星における生命探査にも関わる重要な知見である。すなわち、たとえ酸素発生型光合成生物が存在する惑星であっても、惑星表層環境が酸化状態に維持されるのは全ハビタブル期間のごく限られた時間だけの可能性がある。貧・無酸素大気についてどのようにして生命存否を判断するのかを考えることが重要である。

(4) 研究成果の意義: 地球大気進化に関する研究は、地質学的・地球化学的分析データに基づいて進んできた。本研究は「地球大気組成の将来進化及びそれを規定する物質循環過程」という未解明問題に数値モデルを用いて取り組み、地球表層環境の酸化還元状態について初めて予測を行った。研究成果は *Nature Geoscience* に掲載され(Ozaki and Reinhard, 2021)、日本語と英語でのプレスリリースを通して広く研究成果を公表した。本研究によって構築された理論モデルは地球史の多くの時代に適用可能であり、より詳細な古環境復元に用いることができる。また、系外惑星への適用を目指した改良などさらなる発展が期待できる。

#### <引用文献>

- ① Caldeira, K. and Kasting, J. F.: The life span of the biosphere revisited, *Nature*, 360, 721-723, 1992.
- ② Claire, M. W., Catling, D. C., and Zahnle, K. J.: Biogeochemical modelling of the rise in atmospheric oxygen, *Geobiology*, 4, 239-269, 2006.
- ③ Goldblatt, C., Lenton, T. M., and Watson, A. J.: Bistability of atmospheric oxygen and the Great Oxidation, *Nature*, 443, 683-686, 2006.
- ④ Lovelock, J. E. and Whitfield, M.: Life span of the biosphere, *Nature*, 296, 561-563, 1982.
- ⑤ Ozaki, K. and Reinhard, C. T.: The future lifespan of Earth's oxygenated atmosphere, *Nat. Geosci.*, doi: 10.1038/s41561-021-00693-5, 2021.
- ⑥ Walker, J. C. G., Hays, P. B., and Kasting, J. F.: A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature, *J. Geophys. Res.*, 86, 9776-9782, 1981.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazumi Ozaki, Christopher T. Reinhard	4. 巻 14
2. 論文標題 The future lifespan of Earth's oxygenated atmosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Geoscience	6. 最初と最後の頁 138-142
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41561-021-00693-5	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 Cole Devon B., Ozaki Kazumi, Reinhard Christopher T.	4. 巻 36
2. 論文標題 Atmospheric Oxygen Abundance, Marine Nutrient Availability, and Organic Carbon Fluxes to the Seafloor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Global Biogeochemical Cycles	6. 最初と最後の頁 e2021GB007052
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GB007052	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 尾崎和海	4. 巻 54
2. 論文標題 物質循環モデルで探る地球大気と生命の共進化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 153-172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14934/chikyukagaku.54.153	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 6件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kazumi Ozaki, Christopher T. Reinhard
2. 発表標題 The future life span of Earth's oxygenated biosphere and its controlling factors
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 地質記録と理論モデルから読み解く光合成と地球環境の共進化
3. 学会等名 第12回日本光合成学会年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 How has the primitive biosphere affected the atmosphere?
3. 学会等名 10th ELSI International Symposium（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 吸気酸素分圧に基づく富酸素大気の持続期間についての再検討
3. 学会等名 第7回地球環境史学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 Conditions required for oceanic anoxia/euxinia revisited
3. 学会等名 Goldschmidt 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 The coupled evolution of life and the atmosphere during the early Archean
3. 学会等名 JpGU 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 尾崎和海
2. 発表標題 全球酸化還元収支モデルを用いた原生代-顕生代の海洋リン濃度と大気酸素濃度の制約
3. 学会等名 日本地質学会第128年学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumi Ozaki
2. 発表標題 The history of Earth's biospheric productivity: a biogeochemical modeling perspective
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>酸素に富む地球環境の持続期間は約10億年  <a href="https://www.toho-u.ac.jp/press/2020_index/20210302-1122.html">https://www.toho-u.ac.jp/press/2020_index/20210302-1122.html</a>          富酸素な地球大気の持続期間はどのくらいか？  <a href="https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-03/tu-hml030221.php">https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-03/tu-hml030221.php</a></p>
--

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			
米国	ジョージア工科大学			