

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03638

研究課題名（和文）還元的原始地球大気の進化

研究課題名（英文）Evolution of early-Earth atmosphere with reduced chemical compositions

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：地球材料物質の中で最も酸化的な炭素質隕石様組成の物質からも水素が高収率で熱放出されることを、炭素質小惑星リュウグウ試料の元素組成を用いた熱力学計算から明らかにした。水素に富む原始地球大気の形成は不可避だったと考えられる。太陽放射に駆動される水素の流体力学的散逸と大気光化学過程を丹念に数値シミュレートした。その結果、CH₄やH₂Oおよびそれらの光分解生成物の放射冷却によって、上空の昇温を要する水素流失が緩慢になること、CH₄を起点に光化学生成される有機分子が、紫外線を遮蔽しH₂Oの光分解を抑制して酸化剤となるO原子やOHラジカルの生産を妨げ、有機分子の高分子量化を自己促進することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、長期持続する還元的原始大気において、大量の水溶性有機物と不溶性有機物凝縮相の生産が起き、生命誕生に至る化学進化の場を地球表層に全球規模でもたらした可能性を示唆している。これまでは、還元的な原始大気からは速やかに水素が流失してしまい、原始大気における有機分子の生成は起きても限定的とする考えが主流だった。本研究は、地球上での生命の起源という、一般市民の関心も惹きつける重要な未解決問題に対し、理論的裏付けをもった斬新な化学進化の場の描像を提供した。

研究成果の概要（英文）：Thermodynamic calculations using the elemental composition of carbonaceous asteroid Ryugu samples reveal that hydrogen is thermally released at high yields even from carbonaceous meteorite-like compositions, which are the most oxidizing among Earth material materials. The formation of a hydrogen-rich proto-atmosphere is considered to have been inevitable on Earth. Hydrodynamic escape of hydrogen and atmospheric photochemical processes driven by the short-wavelength component of solar radiation were carefully simulated numerically. The results revealed that radiative cooling of CH₄, H₂O, and their photolysis products slows down the hydrogen loss that requires atmospheric heating and that organic molecules photochemically generated from CH₄ shield solar UV light and inhibit the photolysis of H₂O, preventing the production of O atoms and OH radicals that serve as oxidants, thereby self-promoting organic polymerization.

研究分野：惑星科学

キーワード：原始地球大気 水素 メタン 水 流体力学的散逸 大気光化学 有機物 大気進化

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多種の原始的隕石の同位体組成との比較から強く示唆される還元的な化学組成の地球材料物質からは、 H_2 と CH_4 に富む衝突脱ガス大気の形成が期待される。最近、我々は、集積初期段階の原始太陽系星雲ガスの重力捕獲も加味しつつ、 H_2 と CH_4 に富む還元的な組成を持つ原始地球大気の形成と散逸過程の研究を進めた。その結果、赤外活性分子である H_3^+ 、 CH_4 、およびその光化学生成物の放射冷却が、若い太陽からの強い極紫外光による大気上層の加熱を大幅に打ち消し、宇宙空間への水素流出率を著しく低下させることが明らかになってきた。従来の放射冷却を無視した理論推定では、海洋質量の数倍相当の水素大気が、高々1千万年程度で流失する。しかし、より厳密な我々の散逸計算では、水素大気の残存期間は数億年間にも達しうることが判明した。これは H_2O と CO_2 を主成分とする酸化的な組成の大気への急速な移行を前提とした、地球大気の形成と初期進化の従来の理解に、根本的な見直しを迫るものである。

還元的な組成の大気は、光化学過程等による生命前駆有機物の無生物的合成に適した場であることが指摘されてきた。実際タイタンの N_2 - CH_4 大気においては、水素散逸を伴いつつ CH_3 ラジカル等の生成・重合反応が起き、たんぱく質や核酸などの基本構成要素となる分子構造を内包した高分子有機物の生成が不可逆的に進行している。これは初期地球においても起こり得る過程であり、長寿命の還元的原始大気は、冥王代末期から太古代初期に遡るとされる地球生命の起源に重要な役割を果たした可能性がある。

特有の放射活性種を含む還元的原始大気は、低 CO_2 分圧・低太陽光度下にもかかわらず、湿润温暖な表層環境が地球初期に成立していたことを示す地質学的証拠に、合理的な説明を与える。他方、後に酸化的な地球大気組成に至るには、 H_2 の宇宙空間への選択的散逸と炭素化合物の酸化が進むことが重要である。この過程には、 H_2O の光分解による OH と O の生成が関与し、大気中の水蒸気濃度は、飽和蒸気圧に支配され気温に敏感なため、その評価には還元的大気の熱構造の推定が重要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通りである。

- 還元的な化学組成の地球材料物質を出発点にした原始大気モデルを構築し、原始地球大気の組成、質量、熱構造と揮発性物質の表層-内部間分配を推定する。
- 多成分大気の高精度流体力学的大気散逸モデル計算を進め、大気散逸を定量的に推定するとともに、後期隕石重爆撃による物質補充を組み入れ、現在の地球表層の水、二酸化炭素、窒素等の揮発性物質量を説明する原始大気の初期条件と進化経路を明らかにする。
- 大気組成進化に伴う光化学生成物として期待される、高分子有機物生成を定量的に見積もり、生命前駆物質の生成場としての原始大気の役割を解明する。
- 将来の実証に向け、還元的原始大気の進化・構造のモデリングを元に、類似境界条件下にある系外惑星大気の特徴付け観測に理論予測を与える。

本研究の独自性は以下のようにまとめられる。

- 還元的な組成を持つ惑星材料物質を出発点とする原始大気モデリングを行い、新しい原始地球大気の描像の確立を目指す。
- 還元的な化学組成の脱ガス大気の進化過程を再現すべく、先駆的に構築を進めてきた独自の多成分大気散逸モデル、揮発性元素分配モデルを応用する。
- 大気放射過程・光化学反応・軽分子散逸過程を正確に追いながら多成分大気の進化過程をシミュレートし、還元的な大気から酸化的な大気への組成進化を追う。

- 還元的組成から出発する原始大気を、原始地球上における前生命的有機物生成の主要場と捉え、その役割を定量的に解明する。

3. 研究の方法

高温下における揮発性物質と固体惑星物質間の熱化学平衡モデルをベースに、集積天体のサイズ分布や各時点での大気圧を考慮しつつ、集積物質からの衝突脱ガス成分の組成と供給率ならびに、揮発性物質の大気-内部間分配を数値的に求める。また、月地質学のおよび地球化学的に制約される後期重爆撃期の質量供給率から、集積物質と H₂O 等との化学反応による H₂, CH₄ 等の還元的化学種の生成率を推定する。

多成分大気の光化学・散逸モデル(図2)を H-C-O-N 系へ拡張する。光解離・化学反応・放射吸収・射出を厳密に解き、流体力学的散逸による各大気成分の散逸率を、太陽 EUV フラックスと大気組成の関数として推定する。

揮発性元素分配モデリングから絞り込んだ集積最終段階の原始大気の質量と組成から出発し、最新の EUV 光度進化を与え、大気質量と組成の進化を推定する。衝突脱ガスとマントルからの脱ガスを加味し、現在の地球表層の揮発性物質存在量および同位体組成を説明可能な進化経路を求める。同時に、モデルの構成モジュールの一つとして得られる大気光化学モデルから、酸化的大気組成へと遷移する一連の段階での高分子有機物の生成率を推定する。太古地殻物質に見いだされる有機物についての知見を参照しつつ、還元的原始大気が全生命的化学進化に果たす役割を明らかにする。

H₂・CH₄・NH₃ 等、還元的大気に独特な温室効果気体を考慮した放射対流平衡モデルを構築する。大気成長モデリングと光化学・大気散逸のモデルを結合して得られる、各進化段階の大気組成と質量に対して、地表面気温と熱構造を求める。大気の永年の酸化をもたらす鍵物質である水蒸気の混合比を、光化学・散逸モデルにフィードバックする。得られた大気構造に基づき、類似境界条件下にある系外惑星大気の特徴付け観測に予測を与える。

4. 研究成果

(1) 地球材料物質からの衝突脱ガス

研究期間中にはやぶさ 2 が持ち帰った小惑星リュウグウ試料の分析結果が公表され、地球上での汚染のない炭素質隕石の真の組成は、従来信じられていた化学組成よりも、著しく酸素に乏しかった。そこで我々は、熱力学計算により、炭素質隕石様の地球材料物質からの衝突脱ガス組成を新たに推定した。その結果、CI コンドライトの従来組成を想定した微惑星からの脱ガス成分の H₂ 混合比は約 10%となるのに対し、リュウグウ様炭素質微惑星からのそれは 20-30% に上昇した。これは、地球材料物質として最も酸化的と考えられる炭素質微惑星の衝突脱ガスのみを仮定しても、H₂ に富む原始大気が形成されることを示唆する。また脱ガス成分中の水蒸気濃度は約 20%にとどまった。そのため、マントル中の強親鉄性元素濃度から炭素質微惑星付加量を求めた場合、海水量や地球内部の含水量を説明するには、炭素質微惑星の後

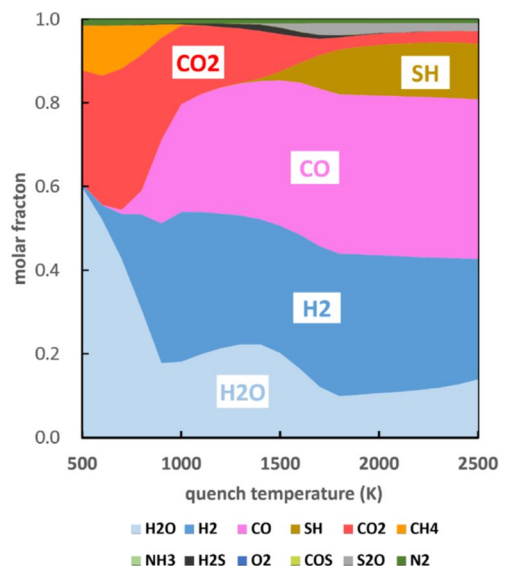


図 1 リュウグウ様組成微惑星からの脱ガス成分の化学平衡組成(古暮、2024 修士論文、倉本指導)。衝突蒸気雲中での化学反応が凍結するクエンチ温度はおよそ 1000 K 以上と推定される。この計算例は 1 気圧を仮定した。高圧の蒸気雲を想定すると、CH₄ の割合が増大する。

期集積以外の過程によっても、地球への水の供給が起きた必要がある。別の供給過程の有望な候補は、原始太陽系星雲ガスの重力束縛や金属鉄に富む非炭素質隕石の集積であり、いずれも、水だけでなく大量の水素を地球原始大気にもたらす。つまり、水素に富む還元的原始地球大気の形成は蓋然性が高い。

(2) 還元的地球原始大気の光化学・水素流失過程および熱構造

原始大気成分の放射過程、大気光化学過程を数値的に解くことによって、還元的地球原始大気の進化を駆動する諸過程について以下のように明らかになった。

- 混合大気からの水素の流体力学的流失率は、放射活性分子である CH_4 、 CO 、 CO_2 、 H_2O およびこれらの光分解生成物の放射冷却効果によって著しく抑制され、純粋水素大気の場合と比較し、けた違いに小さくなりうる。このときの水素流失率は、これら放射活性分子を上層大気に持ち上げることのできる限界流出率で制限される。これによって、原始地球大気が大量の水素を保持できる期間は、数億年間ないしそれ以上に達する可能性がある。
- 放射冷却による水素流失率の制限によって、炭素化合物、窒素化合物、酸素化合物の流体力学的散逸は初期地球の EUV フラックス条件下では、ほとんど生じない。
- CH_4 を出発点に光化学合成される炭素原子を 3 つ含む有機化合物群の UV 吸収は、 H_2O の光分解を阻害し、 OH や O の産生を抑制する。しかしこれは、 CH_4 の光分解には大きく影響しない。その結果、炭素原子を 3 つ含む有機分子は、 OH や O との化合による酸化分解を自己抑制し、自身の正味光化学合成率を増大させるだけでなく、有機化合物のさらなる高分子化を促進する。
- 炭素原子を 3 つ含む有機分子は、赤外域でも高い吸収能を持ち、原始大気の温室効果を著しく強める可能性がある。これらの分子が豊富な進化段階で、原始大気中で液体の水が凝結可能かどうかは、同時に産生される有機質ヘイズの反温室効果の強さに依存する。

(3) 還元的原始大気の進化

C 、 N 、 H_2O の地球表層における現存量をもとに、還元的原始地球大気の初期組成を与え、光化学・大気流失による進化経路を推算した。その結果、初期地球表層では以下のような大気進化が起こりうることが分かった。

- 還元的地球原始大気は初期水素付与量によって数億年に達する長い寿命を持ち、そこでは CH_4 を出発点として、炭素化合物の高分子化が効率的に進行する。初期メタンの約 50% が、高分子有機ヘイズ粒子化し、地球表層に不溶性有機物堆積層を形成する。
- HCN 、 HCHO 、 NH_3 など、アミノ酸や糖の材料となる水溶性化合物の総生産量は、これらが現海洋質量の原始海洋に溶解蓄積した場合、自発的に重合を起こしうるレベルに達する。
- 水素がほぼすべて流失するまで、大気光化学過程による CO や CO_2 の生産は限定的であり、炭素化合物の光化学過程による酸化は、緩やかに進行する。
- 水素に富む大気の推定寿命が長いことから、様々な年齢を持つ系外地球型惑星のなかの少なくない割合が、水素に富む大気を現有していると予想される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yoshida Tatsuya, Terada Naoki, Ikoma Masahiro, Kuramoto Kiyoshi	4. 巻 934
2. 論文標題 Less Effective Hydrodynamic Escape of H ₂ -H ₂ O Atmospheres on Terrestrial Planets Orbiting Pre-main-sequence M Dwarfs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 137 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7be7	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 TAKAHASHI Yoshiyuki O., HAYASHI Yoshi-Yuki, HASHIMOTO George L., KURAMOTO Kiyoshi, ISHIWATARI Masaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Development of a Line-by-Line and a Correlated k-Distribution Radiation Models for Planetary Atmospheres	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 39 ~ 66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2023-003	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 Yoshida Tatsuya, Kuramoto Kiyoshi	4. 巻 505
2. 論文標題 Hydrodynamic escape of an impact-generated reduced proto-atmosphere on Earth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2941 ~ 2953
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1471	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 Kuramoto Kiyoshi, Kawakatsu Yasuhiro, Fujimoto Masaki, 他	4. 巻 74
2. 論文標題 Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 12-1--12-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01545-7	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 Kuramoto Kiyoshi	4. 巻 52
2. 論文標題 Origin of Phobos and Deimos Awaiting Direct Exploration	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Annual Review of Earth and Planetary Sciences	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) 10.1146/annurev-earth-040522-110615	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 -

1. 著者名 TAKAHASHI Yoshiyuki O., HAYASHI Yoshi-Yuki, HASHIMOTO George L., KURAMOTO Kiyoshi, ISHIWATARI Masaki, KASHIMURA Hiroki	4. 巻 102
2. 論文標題 Dependence of the Radiative-Convective Equilibrium Structure of the Lower Atmosphere of Venus on the Thermodynamic Model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II	6. 最初と最後の頁 5~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2024-001	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 -

[学会発表] 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 吉田 辰哉、小山 俊吾、中村 勇貴、寺田 直樹、倉本 圭
2. 発表標題 UV shielding by hydrocarbons in an early reduced Earth's atmosphere
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2023(国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田 辰哉、小山 俊吾、中村 勇貴、寺田 直樹、倉本 圭
2. 発表標題 還元的初期地球大気の光化学的進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2023年秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田 辰哉、寺田 直樹、生駒 大洋、倉本 圭
2. 発表標題 Hydrodynamic escape of H ₂ -H ₂ O atmospheres on terrestrial planets orbiting pre-main sequence M dwarfs
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有馬 銀河、倉本 圭
2. 発表標題 原始地球大気海洋系での NH ₃ の持続時間
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 齋藤 大晶、倉本 圭
2. 発表標題 原始火星マントル・コアに分配される揮発性成分
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 長野 剛流、倉本 圭
2. 発表標題 M 型矮星ハビタブルゾーン内に存在する GJ832c は水素大気を持つか
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 吉田 辰哉、倉本 圭
2. 発表標題 Hydrodynamic escape of reduced proto-atmospheres: different consequences for surface volatile inventories between Mars and Earth
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有馬 銀河、倉本 圭
2. 発表標題 原始地球におけるアンモニアの海洋への貯蔵と大気海洋系の熱的安定性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤 大晶、倉本 圭
2. 発表標題 火星サイズの原始惑星内部に分配される揮発性成分量
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 有馬 銀河、倉本 圭
2. 発表標題 原始地球における NH ₃ の海洋への貯蔵と大気海洋系での熱的安定性
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〕

-

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
研究協力者	齊藤 大晶 (Saito Hiroaki)		
研究協力者	吉田 辰哉 (Yoshida Tatsuya)		
研究協力者	有馬 銀河 (Arima Kirara)		
研究協力者	島田 匡志 (Shimada Masashi)		

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