

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03719

研究課題名(和文)地球創成期における還元型原始大気の形成と進化

研究課題名(英文)Formation and evolution of a reduced-type proto-atmosphere on early Earth

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)：地球原始大気の形成と初期進化について、地球材料物質組成に対する最新の宇宙化学的制約を組み込んだ理論的推定を行った。金属鉄を含む地球材料物質からは、水素とメタン富む還元的な化学組成の分子が衝突脱ガスし、形成初期には原始太陽系円盤ガスも混じりながら大気に蓄積する。放射冷却等による熱損失を厳密に組み込んだ数値計算から、原始大気から宇宙空間への水素流出は、従来の推定よりも極めて遅いことが分かった。地球表層および始原的隕石物質の揮発性元素の同位体比の制約と併せ、還元的な組成の原始大気が、生命誕生期を含む初期数億年間持続する可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1980年代後半から、地球の原始大気は水蒸気と二酸化炭素を主成分とするものと考えられてきた。これに対し、本研究では地球材料物質組成に関する最新の宇宙化学的知見を取り入れ、原始地球大気の形成と進化について理論的な再考を行った。その結果、原始地球には水素やメタンに富む大気が形成され、しかも生命誕生のタイミングを含む数億年間、このような還元的な化学組成の大気が持続する可能性が高いことが分かった。還元的な原始大気は、生命に至る化学進化の場として有望であることが知られており、本成果は、地球上における生命の起源論に弾みをもたらすものである。

研究成果の概要(英文)：Taking into account updated constraints for the composition of Earth's building blocks, a new theoretical study has been conducted to clarify the formation and evolution of the primordial atmosphere on Earth. The new model shows that impact degassing from iron-containing building blocks releases chemically reduced molecules rich in hydrogen and methane. In the early stages of Earth's accretion, gas from the solar nebula may have also been mixed into the primordial atmosphere. Our numerical simulations of atmospheric escape to space accurately include the processes of heat loss, indicating that hydrogen is leaking into space much more slowly than previously expected. This, together with the isotopic constraints on volatile elements in the Earth and primitive meteorites, suggests that a reducing atmosphere, known to be an effective site for prebiotic chemical evolution, was maintained for millions of years, including the time of the emergence of life.

研究分野：惑星科学

キーワード：還元的原始大気 初期地球 流体力学的散逸 衝突脱ガス 放射冷却

1. 研究開始当初の背景

最近、地球の主要な材料物質は、後期重爆撃期の集積物も含め、エンスタタイトコンドライト的であったことが、地球物質と各種隕石との多元素に跨る同位体組成の比較から明らかになってきた (e.g., Dauphas, 2017)。エンスタタイトコンドライトは、始原的な隕石の中で最も酸化鉄成分に乏しい、還元的な化学組成を持つ。このような物質が地球の主材料物質なら、同時に集積する揮発性物質は原始地球上で化学的還元を受け、 H_2 や CH_4 に富む原始大気を形成すると予想される。これは H_2O と CO_2 を主成分とする従来地球原始大気の想定に、根本的な見直しを迫るものである。

一般に原始大気の形成は、その保温効果を通じて集積期の地球型惑星の熱進化に影響するとともに、マグマオーシャンへの大気成分の溶解を通じて、惑星分化にともなう表層・内部間の揮発性物質分配に重要な役割を果たす。これらの過程の解明は、大気・海洋の起源や長期進化を考察する上で極めて重要である。しかし、放射吸収特性やマグマ溶解性が H_2O - CO_2 大気と異なる還元型原始大気に対しては、その形成過程も含めてほとんど研究は進んでいない。

特有の放射活性種を含む還元型原始大気の形成は、低 CO_2 分圧・低太陽光度下にも拘わらず、湿潤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可能性がある。他方、現在の地球大気組成に至るには、水素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。その主たる機構には、若年期の太陽の強力な EUV 照射に駆動される、光化学過程を伴った流体力学的大気散逸が有望視される。ただし従来の大気散逸のモデリング研究には、単成分大気の近似や自由パラメータとしての放射加熱効率の導入などのため、散逸率の定量推定に根本的な曖昧さが残されていることに注意が必要である。

還元的組成から酸化的組成へ進化を経る原始大気は、前生命的化学進化の場として機能した可能性がある。実際タイタンの N_2 - CH_4 大気においては、水素散逸と同時に 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、地球生命の起源に重要な役割を果たした可能性がある。

2. 研究の目的

以上に加え、数年以内に、初期地球と類似の条件下にある系外惑星大気の特徴づけ観測が可能となる見込みであることも鑑み、本研究の目的を次のように設定する。

- 還元的な地球材料物質を出発点にした原始大気形成モデルを構築し、原始大気がとりうる組成、質量、熱構造、揮発性物質の表層-内部間分配を推定する。
- 多成分大気に対する高精度流体力学的大気散逸モデルを構築し、大気散逸を定量的に推定する。後期隕石重爆撃による還元物質補充も加味しつつ、現在の地球表層の水、二酸化炭素量を説明する原始大気の形成・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。

本研究の独自性と創造性について、要点を以下に示す。

- 還元的な惑星材料物質を出発点とする地球原始大気形成のモデリングを行い、新しい地球大気起源論の構築を目指す。
- 還元的脱ガス大気の形成過程を再現すべく、先駆的に構築を進めてきた独自の原始大気形成モデルを応用する。
- 大気放射過程・化学反応を正確に追いつながら多成分大気の流体力学的散逸をシミュレートし、還元型大気から酸化型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

研究項目 1 : 還元的原始大気の形成モデリング

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と、原始火星に対して構築

した混成型原始大気形成モデルを応用し、脱ガス成分の組成とフラックスを与えた大気成長、集積エネルギー解放を主熱源とする原始大気、惑星内部の熱構造進化、揮発性物質の大気-内部間分配を数値的にシミュレートする。短時間で莫大な集積エネルギーが解放される巨大衝突現象に対しては、衝撃加速による大気損失 (Genda & Abe, 2005) を評価し、衝突直後の高温状態から急冷する段階も含めて大気質量、組成、熱構造、揮発性物質分配の発展をシミュレートする。集積末期における原始大気質量、組成、熱構造、内部への揮発性物質分配のとりうる範囲を、材料物質中の揮発性元素濃度、集積率、巨大衝突の回数、規模、タイミングをパラメータに推定する。

研究項目 2：原始大気の組成進化モデリング

現在開発中の H-O 系大気の流体力学的散逸モデル (図 2) を、H-C-O 系に拡張して多成分大気散逸モデリングを行う。光解離・化学反応・放射吸収・射出を厳密に解くことによって、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。また、地球化学的、月地質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還元型分子種生成率を推定する。

大気形成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 フラックス進化曲線推定に沿った各成分の散逸フラックスに基づいて、大気質量と組成の進化を推定する。そしてマントルからの脱ガスも加味しつつ、現在の地球表層の揮発性物質存在量を説明可能な進化経路を推定する。

同時に、大気散逸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、還元型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。

研究項目 3：類似境界条件下にある系外惑星大気の特徴付け観測への予測

原始大気の構造・進化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予測を与える。2020 年前後には、複数の大型の赤外・紫外宇宙望遠鏡の打ち上げが計画されており、系外惑星の多波長トランジット観測から、系外惑星大気の子・原子の高度分布に制約を得ることが期待されている。散逸モデルを用いて原始大気の上層構造を推定することにより、中心星からの放射量や年齢が初期地球に近い地球型系外惑星に対して、多波長トランジット観測の予測計算を行う。

4. 研究成果

集積期の惑星における揮発性元素のガス・シリケートメルト・金属鉄間の分配の熱力学モデルの構築を進め、水素・炭素に加えて、窒素と硫黄の取り込みを行った。数百気圧以上の圧力下では、窒素が金属相へ選択的に分配され、初期地球の温室効果源ならびに生命前駆物質として着目されるアンモニアが一定量生成されること、また、2000 K 超の高温下では、硫黄化合物の気相分配が顕著になることが示された。

脱ガス大気成分と原始太陽系星雲ガス成分からなる混成型原始大気の惑星集積に伴う進化過程を数値シミュレートし、その地球化学的な帰結の検討を進めた。概ね、火星質量を上回る原始惑星では、両成分の混合が起き、マグマオーシャンを介して惑星深部に原始太陽系星雲ガス成分が取り込まれることが明らかになった。地球深部起源のマントル物質が太陽組成に近い水素同位体比、希ガス同位体比を示すことから、原始地球は星雲ガスの散逸前に火星質量以上に成長したことが示唆された。

太陽極端紫外線の照射によって駆動される、水素に富む初期大気の流体力学的散逸モデルの構築を進め、光学活性分子種による放射冷却と、大気成分の光解離の効果を厳密に取り込んだ。その結果、メタンとその光解離生成分子種は、顕著な放射冷却効果を持ち、1 vol%未満のメタン濃度でも、大気散逸率は

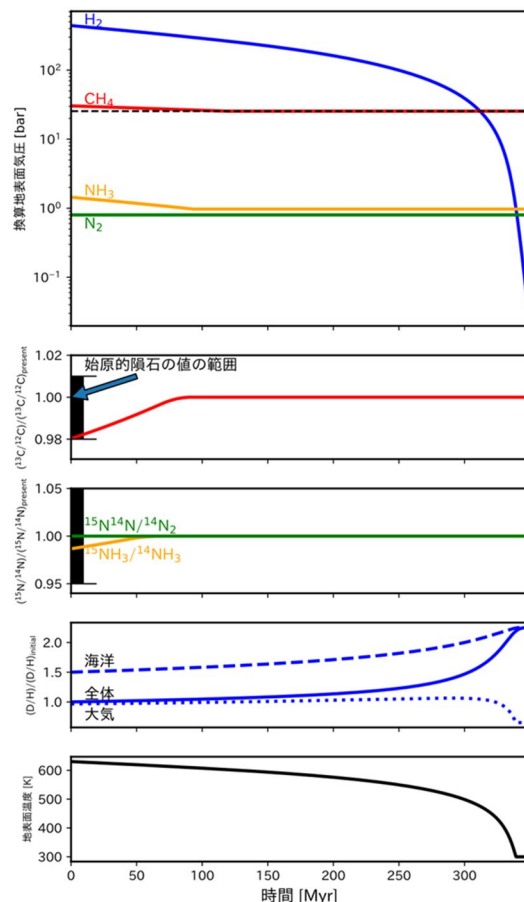


図 散逸計算から示唆される地球初期大気の進化

著しく抑制され、重元素の散逸がほぼ停止する可能性があることが判明した。初期太陽に推定される紫外線強度を当てはめると、億年単位の時間スケールに渡って水素分子やメタンが地球原始大気に高濃度で残存したと推定される。これは、地球表層の炭素および窒素の同位体組成が、材料物質の生きのこりと考えられる始原的隕石の同位体組成からほとんど変化していないことと調和的である。また、生命前駆有機物の生成に適する還元的な大気化学組成が、地球上に生命が誕生したとされる約 40 億年前まで持続していたことを示唆する (図)。還元型大気がごく短期間のうちに失われずむしろ比較的長期間持続することは、還元的な大気を持つ系外地球型惑星の割合が小さくなく、将来の天文観測によって同定可能であることを示唆する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Saito Hiroaki, Kuramoto Kiyoshi	4. 巻 889
2. 論文標題 D/H Ratio in the Interiors of Rocky Protoplanets Accreting in the Solar Nebula	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 40～40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab5f11	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 Yoshida Tatsuya, Kuramoto Kiyoshi	4. 巻 345
2. 論文標題 Sluggish hydrodynamic escape of early Martian atmosphere with reduced chemical compositions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 113740～113740
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.icarus.2020.113740	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 Ito Yuichi, Hashimoto George L., Takahashi Yoshiyuki O., Ishiwatari Masaki, Kuramoto Kiyoshi	4. 巻 893
2. 論文標題 H2O ₂ -induced Greenhouse Warming on Oxidized Early Mars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 168～168
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab7db4	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 齊藤 大晶、倉本 圭	4. 巻 27
2. 論文標題 原始惑星内部のD/H比	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本惑星科学会誌遊星人	6. 最初と最後の頁 229～234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14909/yuseijin.27.3_229	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Tatsuya Yoshida, Kiyoshi Kuramoto
2. 発表標題 Sluggish hydrodynamic escape of early Martian atmosphere with reduced chemical compositions
3. 学会等名 EGU General Assembly 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田辰哉、倉本 圭
2. 発表標題 還元型原始地球大気の流体力学的散逸
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年度秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤大晶、馬上謙一、山本 順司、倉本 圭
2. 発表標題 星雲ガス中で集積する岩石惑星の希ガス同位体比
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年度秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤大晶、倉本 圭
2. 発表標題 D/H ratio and water partitioning into the protoplanetary interior
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村瀬祐太郎、齊藤大晶、倉本 圭
2. 発表標題 Partitioning of H, C, N and S on a growing Earth estimated by empirical thermodynamic modelling
3. 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田辰哉、倉本 圭
2. 発表標題 還元型原始火星大気の流体力学的散逸
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡 亮、倉本 圭
2. 発表標題 低角運動量の回転原始火星大気による衛星軌道進化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 祥介、はしもと じょーじ、倉本 圭、石渡 正樹、高橋 芳幸
2. 発表標題 惑星大気の放射伝達計算: 大気大循環モデルへの適用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Yoshida, Kiyoshi Kuramoto
2. 発表標題 Hydrodynamic escape of a reduced photo-atmosphere on early Mars
3. 学会等名 EPSC-DPS Joint Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡 亮、倉本 圭
2. 発表標題 原始火星大気に包まれた火星衛星系の進化：微惑星の捕獲と衛星の衝突・軌道進化
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年度秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田辰哉、倉本 圭
2. 発表標題 光化学反応と放射冷却を考慮した地球・火星における還元型原始大気の流体力学的散逸
3. 学会等名 日本惑星科学会2019年度秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡 亮、倉本 圭
2. 発表標題 回転原始大気による微惑星捕獲と衛星軌道進化
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田辰哉、倉本 圭
2. 発表標題 還元型原始火星大気の流れ力学的散逸
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村瀬 祐太郎、倉本 圭
2. 発表標題 集積末期の地球マントルの酸化還元状態：深いマグマオーシャンにおける第二鉄生
3. 学会等名 日本惑星科学会秋季講演会
4. 発表年 2018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	松岡 亮 (Matsuoka Ryo)		

6. 研究組織（つづき）

	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	村瀬 祐太郎 (Murase Yutaro)		

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