



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Hydrodynamic escape of reduced proto-atmospheres on Mars and Earth [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	吉田, 辰哉
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第14361号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81940
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Tatsuya_Yoshida_review.pdf, 審査の要旨



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 吉 田 辰 哉

審査担当者	主査	教 授	倉 本 圭
	副査	教 授	石 渡 正 樹
	副査	教 授	佐 藤 光 輝
	副査	准教授	鎌 田 俊 一

学 位 論 文 題 名

Hydrodynamic escape of reduced proto-atmospheres on Mars and Earth
(火星・地球における還元型原始大気の流体力学的散逸)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

火星と地球は、集積期に H_2 や CH_4 を主体とする還元的な化学組成の原始大気を獲得した可能性が高い。大気光化学過程を経て複雑な有機物の生成が期待される還元型原始大気は、生命誕生に至る化学進化の場の一つとして着目される。しかしながら、従来の研究では、水素に富む原始大気は、初期太陽が放出する高フラックスの極端紫外線の照射によって強い加熱を受け、それにより効率的に流体力学的散逸を起こし、初期の地球や火星から高々1 千万年程度で速やかに失われたと考えられてきた。これは、最古の地球生命の痕跡が見いだされている年代よりもはるか前に、還元型原始大気が失われてしまったことを意味する。だが、その根拠となっている大気散逸率の推定には、大きな不確定性が存在する。特に、還元型原始大気には CH_4 をはじめ赤外活性を有する分子種が豊富であり、それらの放射冷却によって散逸が抑制された可能性がある。しかし、従来の流体力学的散逸の数値モデリングでは、赤外活性分子種によるエネルギー損失が実質的に自由パラメータとして扱われてきた。また、赤外活性分子の分布を決める流出大気中の光化学過程についても、分子が完全に単原子に解離していることを仮定するなど、大幅な簡略化がなされることが多かった。火星と地球における還元型原始大気の進化を正確に推定するためには、放射エネルギー収支や光化学過程を考慮した数値モデルが必要となる。そこで、著者は、放射過程と光化学過程を詳細に組み込んだ多成分系における流体力学的散逸モデルを世界に先駆けて構築し、これを火星と地球の還元型原始大気に適用した。

大気の大規模流に加え、放射過程、光化学過程、大気成分間の運動量交換という、時定数がそれぞれ大きく異なる過程を含む系のダイナミクスを、精度よく安定的に数値シミュレートすることは容易ではない。これに対し、著者は各過程を丹念に吟味して、それぞれ適切に定式化した。さらに、複数の数値解法を的確に組み合わせたアルゴリズムを開発し、この難度の高い数値モデリングを成功させた。その結果、以下のことが明らかになった。

まず、火星における流出大気中の分子は、先行研究の想定と反して大部分が光分解を免れ生き残る。原始火星大気の散逸率は、 CH_4 や CO の混合比が増加するにつれて、それらの放射冷却によるエネルギー損失により大気散逸率が減少し、 CH_4 と CO の総混合比が約 10 %に達した時点で純粋な水素大気と比べて散逸率が一桁程度減少する。また、混合比が増加するにつれて H_2 と炭素種分子間の分別が顕著になる。 H_2 が完全に散逸した時点で 1 bar の CO_2 と等価な炭素種分子が残留すると仮定し大気進化経路を推定したところ、初期 H_2 量が 10 bar 以上の場合、炭素種分子の散逸量も 10 bar 相当質量を上回ると推定された。また、 H_2 - CH_4 - CO 大気からの水素散逸時間は、

純粋な水素大気の散逸時間と比べて一桁以上長期化し、初期 H_2 量が 100 bar 以上の場合には、水素散逸に要する期間が 1 億年以上に達する。この結果は、初期火星において還元的な組成の大気が長期間持続しえたことを意味し、近年、火星探査機の土壌調査や火星隕石の分析から相次いで報告されている初期火星由来の有機物の検出と整合的である。

次に、火星と比べて重力が大きい地球の還元型原始大気では、大気の鉛直移流のタイムスケールが光分解のそれを上回り、特に CH_4 は光分解やイオンとの化学反応によって低高度で効率的に分解される。一方で、分子の分解に伴い H_3^+ 、 CH 、 CH_3 などの赤外活性を有する光化学生成物が生成され、それらの放射冷却により大気散逸が著しく抑制される。 CH_4 混合比が 0.5 % の段階で加熱効率はおよそ 5 % にまで下がり、 CH_4 混合比が約 1 % 以上の場合には H_2 のみが散逸する状態になる。現在の地球表層揮発性物質と同位体組成の制約条件を満たす水素散逸時間は、約 4 億年に達しうる。この結果は、富水素環境が初期地球において長期に渡って保たれ、低太陽光度下における温暖湿潤な表層環境の実現や、生命誕生につながる有機物生成において重要な役割を果たしたことを示唆する。

火星と地球の流体力学的散逸の効率の違いは、主に惑星質量と重力の違いに起因する。火星では流出速度が大きいために断熱膨張による大気冷却が効きやすく、気温と赤外放射率が低く保たれ、比較的効率良く大気散逸が進む傾向がある。重力が強く大気流出が緩やかに起こる地球では、大気温度が上昇し、少量の赤外活性大気種が含まただけで、それらの赤外放射によって大気散逸が著しく抑制される。このような流体力学的散逸の効率の違いは、火星の表層揮発性物質量が地球に比べ著しく乏しいことと調和的である。また、火星大気散逸の計算結果から、火星サイズの原始惑星は巨大衝突期に入った後も原始大気を保持し続け、地球や金星への大気供給源として原始惑星が寄与した可能性があることが示唆された。

以上の成果は、地球および火星において、還元的原始大気が、生命に至る化学進化の場として長期に渡り有効に働いた可能性が高いことを示すとともに、両惑星の表層揮発性物質量の違いに合理的な説明を与え、地球と火星の表層進化研究に強いインパクトをもたらすものとなっている。よって、著者は北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。