HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	原始大気海洋間のNH3分配と前生物的地球表層環境［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	有馬, 銀河
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16244号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95302
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kirara_Arima_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　　有　馬　銀　河

審査担当者
主査　教　授　倉　本　　圭
副査　教　授　石　渡　正　樹
副査　准教授　鎌　田　俊　一
副査　教　授　はしもとじょーじ（岡山大学・環境生命自然科学学域）

学 位 論 文 題 名

原始大気海洋間の NH_3 分配と前生物的地球表層環境

博士学位論文審査等の結果について（報告）

著者は、約 45～35 億年前の生命誕生前の原始地球に、当時の大気と海洋に分配された NH_3 が温暖湿潤気候や化学進化場をもたらした可能性について探る理論的数値的研究を行った。堅固な恒星進化理論から当時の太陽光度は現在の約 75％と求められており、現在と同じ大気組成を仮定すると、太古の地球は、ほぼ全球が結氷していたと推定される。しかし、当時の氷床活動を示す地質記録はなく、むしろ、温暖湿潤環境であったことを示す複数の地質学的証拠があり、この気候の理論推定と地質記録の矛盾は、暗い太陽のパラドックスとして知られてきた。太古代の地球の CO_2 分圧の鉱物学的推定値はそれほど高くなく、また、CH_4 に富む大気では、光化学反応起源の有機質ヘイズが生じ、それによるアルベド増大がむしろ反温室効果を引き起こすため、原始地球大気にも含まれていたであろう CO_2 と CH_4 だけでは、このパラドックスの解決は難しい。これに対し、NH_3 は低濃度でも、強い温室効果を発揮することが知られてきた。しかしながら、大気 NH_3 は太陽紫外線によって光分解し、数千年で速やかに N_2 に転換されてしまうため、地質学的時間スケールに渡り温暖環境をもたらすのは困難視されてきた。一方で、NH_3 は生命前駆物質の原材料として不可欠とされ、NH_3 の持続期間が本当にこれほど短いとすると、原始地球表層において生命に至る化学進化が可能だったのか疑問が生じる。

そこで著者は、これまで無視されてきた海洋への NH_3 分配に着目した。NH_3 は水溶性が極めて高く、地球表層に NH_3 が存在すれば、海洋が主な貯蔵庫になると予想され、これは原始地球表層への NH_3 の蓄積を容易にしつつ、大気海洋系の NH_3 の滞留時間を飛躍的に伸ばすことが期待される。これに加え、溶解した NH_3 は、化学進化に有利な物理化学環境を海洋にもたらす可能性がある。他方、水温に依存した海洋の NH_3 放出や吸収は、大気中の NH_3 濃度を変え、地表面温度の変動にフィードバックをもたらすことも想定される。著者は、これらの解明を目的に理論的探求を行った。

著者は、大気海洋間の気体成分の溶解平衡モデルと NH_3 等の放射特性を含む放射対流平衡大気モデルを独自に構築し、両者を結合した系統的な理論解析を進めた。まず、大気成分の溶解、溶媒（水）および溶存化学種のイオン解離平衡、炭酸塩鉱物の飽和、古海水の非飽和塩濃度、大量の低温深層水の存在を考慮した溶解平衡モデルから、海洋には大気のおよそ 10^5 倍にも及ぶ大量の NH_3 が溶解しうることを明らかにした。そして、地表面温度が高いほど NH_3 の大気分配量が顕著に増加し、CO_2 分圧が高いほど海洋酸性化の効果によって NH_3 の大気分配が減少することを示した。著者が構築した放射対流平衡モデルは、N_2, H_2O, CO_2, CH_4, NH_3 ならびに有機質ヘイズからなる無酸素大気を想定し、湿潤対流による気温・水蒸気濃度鉛直分布と太陽放射と惑星放射の波長毎の放射伝達を数値的に解いて、エネルギー平衡にある気候状態を求めるものである。このモデルを用いて、地質学的制約と矛盾のない組成範囲を持つ背景大気に、混合比 10^{-6}–10^{-5} の大気 NH_3 を与えれば、過去の小さな太陽光度の下で地表面温度が氷点を上回る温室効果が生じ、また、放射対流平衡状態における地表面気温は、大気 NH_3 混合比とともに上昇することを示した。

著者はさらに、溶解平衡と放射対流平衡の双方を同時に満たす同時平衡状態を、背景大気組成と大気海洋系の総 NH_3 量の関数として網羅的に求めた。同時平衡状態の多くは、それぞれの状態に地表面温度の摂動を与えると、摂動が減衰するよう大気 NH_3 分配と温室効果が調整される安定解であった。そして、現在の大気 N_2 の 20%弱相当の NH_3 が大気海洋系に存在すれば、当時の低い太陽光度のもとで温暖湿潤環境がもたらされることを明らかにした。このとき、NH_3 の大部分が海洋に分配されるため、大気海洋系の NH_3 の光化学損失に対する滞留時間は、数億年以上に伸びる。さらに NH_3 の温室効果が氷点を超える温室効果をもたらしている条件下では、海水温と海水中の NH_4^+ 濃度が、アミノ酸や核酸塩基の無機的な合成に適する条件を満たしていることを明らかにした。大気海洋系からの NH_3 光化学損失率は、大気海洋系の総 NH_3 量によって決まり、基本的には NH_3 総量が小さく、大気 NH_3 濃度が低下するほど減少する。この結果と、隕石様物質の後期集積による NH_3 の生成率および総量を照らし合わせることにより、地表面温度が氷点を十分超えるのに必要な量の NH_3 が大気海洋系に蓄積しうることも示した。

著者が明らかにした以上の結果は、限定的とみられていた NH_3 の原始地球表層環境における役割についての描像を一新し、NH_3 が原始地球の温暖湿潤気候の形成と維持、そして古海洋における前生命的な化学進化に長期にわたって重要な役割を果たした可能性を初めて示したものである。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。