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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　　有馬　銀河

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

NH_3 は前生物的化学進化に必須な物質の一つであるだけでなく，その強力な温室効果が，若年期の暗い太陽の下にあった初期地球に温暖湿潤な環境をもたらした可能性がかねてから指摘されてきた．しかし NH_3 は光化学的に不安定であるため，晴天大気条件下では太陽紫外線による光分解を経て迅速に N_2 に転換され，温暖化に必要な濃度の大気 NH_3 は数年程度で大気から除去されてしまうことが示されている．酸素に乏しい原始地球大気における，CH_4 由来の有機質ヘイズによる紫外線の遮蔽効果を考慮しても，大気 NH_3 の寿命はせいぜい 5000 年程度にまでしか延びず，これは地質学的なタイムスケールと比較すると非常に短い．一方，NH_3 は水への溶解度が非常に大きいため，ひとたび原始地球大気に NH_3 が存在すれば，それに接する原始海洋が巨大な NH_3 貯蔵庫として振る舞うことが予想される．これは原始海洋における前生物的化学進化の促進だけでなく，原始地球表層の NH_3 の滞留時間の著しい長期化をもたらすかもしれない．しかし，原始大気と原始海洋間の NH_3 の分配については，これまで理論的検討がなされてこなかった．

本研究では原始地球における大気と海洋間の NH_3 分配を記述する数値モデルを構築し，原始海洋の NH_3 容量，H_2O の融点を超える温室効果および海洋中での前生物的化学進化をもたらすのに必要な総 NH_3 量，そして光化学的な損失に対する大気海洋系の NH_3 の寿命を明らかにする．数値モデルは，大気 NH_3 分圧と水温の関数として海水への NH_3 溶存量を求める溶解平衡モデルと，大気 NH_3 分圧及び背景大気組成を与えて地表面温度を求める鉛直一次元放射対流平衡モデルからなる．以下に本研究で得られた結果を示す．

N_2 0.78 bar の無酸素大気が，現在の 75%の光度を持つ太古の太陽の下で NH_3 を含まない場合に，273 K 以上の地表面温度を得るには，混合比 10^{-2} 以上の大気 CO_2 が必要であり，これは地質記録から推定される太古代初期の大気 CO_2 分圧の多くの推定値よりも高い．また，大気に CH_4 を加えると CH_4 由来ヘイズがアルベドを増大させ地表はむしろ冷える．これらは，前生物学的化学進化が，比較的還元的な組成の大気と表層水の存在下で進んだならば，原始地球に別の温室効果源が望まれることを示唆している．一例として CH_4 と CO_2 の混合比をいずれも 10^{-3} としたヘイズ含有大気においては，大気におよそ 10^{-6} bar の NH_3 を与えれば地表面温度が 273 K まで上昇し，このとき現海洋と同質量の海水には 6×10^{19} mol の NH_3 が分配される．これは大気中の NH_3 量のおよそ 2×10^5 倍で，NH_3 は大部分海洋に分配されることを示す．このときの大気海洋中の総 NH_3 量は現在の大気 N_2 量の 20%に相当する．つまり NH_3 は地球表層の窒素在庫量の一部を占めるだけでも，暗い太陽の下での地球表層での液体の水の生成に寄与しうる．

背景大気組成と大気海洋系の総 NH_3 量をパラメータに，放射対流平衡と溶解平衡を同時に満たす地表面温度と大気 NH_3 分圧の値の組み合わせ，すなわち同時平衡解を得ることができる．同時平衡解上の地表面温度と NH_3 分圧は，総 NH_3 量が多いほどともに高く，海洋への NH_3 分配比は溶解度の温度依存性により低下するが，海洋が支配的な NH_3 貯蔵庫となることは変わらない．大気 CO_2 の増加は，昇温と海水中の酸生成を通じて，NH_3 の海洋分配をそれぞれ減増させる．大気 CH_4 の増加は，降温を通じ NH_3 の海洋分配を強める．

先行研究による生命必須アミノ酸が原始海洋中で維持されるのに必要な NH_4^+ 濃度条件を当ては

めると，大気海洋系に 1×10^{18} mol 以上の NH_3 が存在すれば海洋中でアミノ酸が維持される．本研究で得た同時平衡解は，広いパラメータ範囲でこの条件を満たす．

NH_3 の消費過程として光分解を仮定すると，一例として CH_4 と CO_2 混合比をいずれも 10^{-3} としたヘイズ含有大気下で，273 K を上回る地表面温度をもたらす量の大気海洋 NH_3 の滞留時間は~10^9 年に達しうる．NH_3 の溶解度の温度依存性によって低温環境ほど NH_3 の溶解度が上昇し，海洋への NH_3 分配比が増すため，原始地球は NH_3 総量が比較的少なく（総 NH_3 量<10^{20} mol：現大気 N_2 の 30%相当未満），その結果地表面温度が 300 K 以下の比較的低温な環境ほど滞留時間が延びる．したがって，温暖化や化学進化に有意な NH_3 を長期間維持するために，現大気の N_2 量に匹敵するほどの多量の初期 NH_3 は必要ではない．またこれは，液体の表層水の生成やアミノ合成に必要な NH_3 が地質学的タイムスケールに渡って地球表層に維持された可能性を示す．

大気海洋 NH_3 は気候の安定性にも影響を与える可能性がある．NH_3 と CO_2 が共存する大気海洋系では，CO_2 の増加は温室効果を強める一方で，海洋 pH を低下させ海洋への NH_3 の吸収を促し，大気 NH_3 濃度を下げる．そのため，大気海洋 NH_3 量によっては大気 CO_2 量と地表面温度の間に負の相関が生じる場合があり，このとき大気 CO_2 量と地表面温度の間には正のフィードバックがかかる．これは原始地球大気海洋系の NH_3 がウォーカーフィードバックによる気候の安定化を阻害する可能性があることを示唆する．