

論文審査の結果の要旨

氏名 伊左治雄太

塩分は生物の生息限界を規定する重要な環境因子の一つである。そのため現代の高塩環境では、特異な生態系・生物地球化学循環が形成されている。また、地球史を通じて繰り返し起こった大規模高塩化イベントは、生物プロセスへの作用を通じて生物地球化学循環だけでなく全球的な物質循環にも影響を与えた可能性がある。このように、地球表層環境や生物が繰り返し高塩環境を経験してきたという重要性に反して、高塩環境の生物地球化学循環に関する知見は限られている。

本研究で伊左治氏は、現代の塩田と地中海塩分危機を対象にして、生物地球化学循環の根幹を成す炭素循環、窒素循環に関する研究を行っている。このうち、現世の塩田は本研究を進める格好のモデルサイトと考えられる。一方、地中海塩分危機は、597-533 万年前にかけて地中海規模で多様なセッティングのもとで高塩化が進行した、顕生代で最大級の地質イベントであり、塩田で得られた知見を過去の地球に適用するにふさわしい研究材料である。伊左治氏は、こうした理想的な研究材料に対して、最先端の有機地球化学的手法を適用し、博士論文にふさわしい成果を挙げている。

以下に全6章からなる本論文の概要をまとめる。

第1章は全体のイントロダクションであり、地球上の高塩環境の概説や、高塩環境研究の地球史における重要性が紹介されると共に、本論文で扱った地球化学的手法の紹介などがまとめられている。

第2章は、第3章と共に塩田での物質循環を扱った章であり、特に炭素循環についての研究成果が述べられている。塩田では、広い塩分範囲(塩分 70-300)で底生微生物マットが発達し、シアノバクテリアや紅色硫黄細菌による一次生産に支えられた多様な微生物が生息している。本章で伊左治氏は、炭酸系パラメーター（溶存無機炭素濃度とその $\delta^{13}\text{C}$ 、アルカリ度、pH）および光合成生物を起源とする色素（クロロフィル色素、 β -カロテン）の化合物レベルの $\delta^{13}\text{C}$ に基づき、塩田の炭素循環の特徴を述べている。溶存無機炭素と色素の $\delta^{13}\text{C}$ に基づく炭素同位体分別は塩分の増加と共に大きくなり、高塩化に伴い一次生産が抑制されることが示された。このような生物プロセスへの影響に加え、高塩化は二酸化炭素の脱ガスや pH の低下などの物理・化学因子の変化も伴うため、大気-水間の二酸化炭素収支に影響を与えることが明らかになった。

第3章で扱った窒素循環の研究では、硝酸、アンモニア態窒素の濃度および $\delta^{15}\text{N}$ 、クロロフィル色素の $\delta^{15}\text{N}$ に基づき、塩田の窒素循環の議論がなされている。先端的で、従来法よりも著しく高感度化した有機地球化学分析の結果、バイオマット間隙水中にアンモニア態窒素が高濃度で含まれており、光合成生物の主要な窒素源となることが明らかになった。エネルギーコストの高い高塩環境ではエネルギー効率の悪い硝化が抑制されるため、有機物分解により生成したアンモニウムが蓄積したと考えられる。また、特にこのアンモニアが様々な微生物に利用された結果、塩田表層水中のアンモニア態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ が 30‰以上という極めて高い値を示すことが明らかになった点は、本研究の重要な成果である。

第4章と第5章では、地中海塩分危機時の生物相や生物地球化学循環についての研究がなされている。このうち第4章では、塩分危機ステージ1（597-560 万年前）の光合成生物組成および炭素・窒素循環が主題となっている。このステージ1では、16 サイクルにわたる2 万年周期の石膏-頁岩互層が地中海沿岸各地で堆積し、この有機物に富んだ頁岩は、石膏を析出する高塩海水（海水の5-10 倍濃縮）に大量の陸水が流入し、密度成層が発達したことで堆積したと考えられている。第4章では、この頁岩層からクロロフィル色素の分解生成物であるポルフィリンを単離・精製し、構造決定および $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ を測定することで、当時の光合成生物組成、炭素・窒素循環が明らかにされている。イタリア北部のアペニン山脈で採取された黒色頁岩中には、クロロフィルcを起源とするポルフィリンが多く含まれ、これは当時の主要な光合成生物として珪藻・渦鞭毛藻などの藻類が存在したことを示している。さらに、このポルフィリンの $\delta^{15}\text{N}$ が原核生物に特有のプロセスである窒素固定を示唆する値を示したことから、当時の主要一次生産者が珪藻-シアノバクテリアの共生体であった可能性が示された。密度成層により底層の栄養塩の供給量が減少したことや、貧酸素水塊の存在により脱窒が盛んに行われたことが原因で有光層の窒素が枯渇した結果、窒素固定生物が卓越したと考えられた。

第5章は、地中海塩分危機最盛期（560-555 万年前）の窒素循環を扱っている。蒸発岩堆積物から成るシチリア島レアルモンテ岩塩鉱山には、年周期で堆積した岩塩-頁岩互層し、この互層は、塩分危機ステージ1の石膏-頁岩層よりも水深が浅い環境で堆積したと考えられている。頁岩中から単離・精製したポルフィリンの $\delta^{15}\text{N}$ は、17.2‰と非常に高い値を示した。これは、岩塩析出時（年周期における乾期）に硝化の抑制、溶存アンモニアの蒸発が起こった結果蓄積した高い $\delta^{15}\text{N}$ を持つアンモニア態窒素が、頁岩の堆積する雨期に光合成生物によって同化されたことを示唆する。同位体比が特徴的な高い $\delta^{15}\text{N}$ を持つアンモニア態窒素は、高塩環境の窒素循環を明らかにする上での重要な指標となることが示唆された。

第6章では、塩分危機時における生物地球化学的な物質循環モデルが提示されると共に、本論文全体の成果と将来展望がまとめられている。

本博士論文審査委員会は、2018年1月12日に学位論文の内容および関連事項について口頭試験を行なった。その結果、本博士論文は、高塩環境での生物地球化学について、現在の塩田を調べ、その知見を600-550 万年前の地中海塩分危機に応用するアプローチをとる一方、高感度な化学種別の窒素同位体比分析法などを確立・応用しており、特徴のある研究フィールドを対象に、先端的な手法を適用し、科学的に高いレベルの成果を挙げていると高く評価された。これらの成果は、生物地球化学の新しい分野を切り拓く重要な業績であると判断されたため、審査員全員一致で本論文は博士論文として合格であると判定した。

なお、本論文には共同研究による成果も含まれているが、論文提出者が主体となって研究を行っており、本人の寄与は十二分にあると判断された。

以上の理由により、本論文は地球惑星科学の発展に寄与するものと認め、博士(理学)の学位に値するものと認める。