

# 論文審査の結果の要旨

氏名 窪田 薫

人間活動に伴う海洋酸性化が懸念されている。過去の海水の pH がどのように変動していたのかを復元することは、海洋環境の自然変動及び人間活動の影響を評価する上で重要である。本論文は、造礁サンゴのホウ素同位体比を用いて海水の pH を定量的に推定する手法を確立し、それを用いて過去の海洋炭酸系の復元を行ったものである。

本論文は5章から構成される。第1章は全体のイントロダクションであり、先行研究とそれらの問題点が述べられている。これまで様々な造礁サンゴが pH を制御した海水下で飼育され、骨格中のホウ素同位体比が pH に依存することが実証されているが、理論的な予測値とは有意な差異がみられることが分かってきた。この差異は、サンゴの石灰化母液の pH が海水の pH よりも高い値を示すこと (pH up-regulation) によって説明されるものの、ホウ素同位体比から海水の pH を復元することを困難にしている。そこで本論文では、野外に生息している長寿命の塊状ハマサンゴを用い、産業革命以降の pH 低下 (海洋酸性化) とハマサンゴのホウ素同位体記録の比較に基づいて、現場海域の経験的キャリブレーション式を作成し、それを現生サンゴと化石サンゴに適用して海洋環境復元を行う、ということなどが述べられている。

第2章では、1970年代以降に海洋表層において測定された多数の海水炭酸系の観測記録と氷床コアによる産業革命以降の大気の  $p\text{CO}_2$  の復元記録などから、海水の pH 低下の時系列推定を行っている。父島及びタヒチにおいて得られた塊状ハマサンゴのホウ素同位体分析結果と海水の pH 低下曲線から、現場の経験的キャリブレーション式を作成し、先行研究で報告されている他の海域の塊状ハマサンゴについても再評価し、飼育実験のキャリブレーション式を用いるよりも海水炭酸系の復元結果が改善されること、また野外のキャリブレーション式は海域ごとに異なること、などが明らかになった。世界最高精度のホウ素同位体比分析を行い、海水の pH が推定可能なキャリブレーション式を提示したことは、古海洋学分野に対する非常に重要な貢献であるといえる。

第3章では、父島のハマサンゴのホウ素同位体を石灰化母液の pH と解釈すること

で、過去 100 年間の海洋酸性化がサンゴの石灰化に与えた影響について議論されている。父島で得られた塊状ハマサンゴのホウ素同位体は、1960 年以降顕著に低下しつつあり、石灰化母液の pH が低下していることが示唆された。また、室内実験からは石灰化流体の pH が能動的に維持される機構（ホメオスタシス）が指摘されていたものの、野外に生息している塊状のハマサンゴはそうしたホメオスタシス作用が機能していないことも明らかになった。海洋酸性化にともない、石灰化母液の pH は低下し、石灰化を阻害して骨格の侵食が盛んになる、という結果は今後の海洋酸性化の影響を予測する上で重要な知見である。

第 4 章では、タヒチにおいて得られた化石サンゴに対し、第 2 章で作成したキャリブレーション式を適用することで、最終退氷期（約 2 万～1 万年前）における海水 pH の復元を行っている。最終退氷期には大気  $p\text{CO}_2$  が約  $80 \mu\text{atm}$  上昇したが、その原因は明らかになっていない。そこで、タヒチにおいて採取された化石サンゴのホウ素同位体から得られた pH を用いて海水炭酸系の平衡計算を行い、 $p\text{CO}_2$  を復元した。得られた  $p\text{CO}_2$  値は最終退氷期を通じて大気  $p\text{CO}_2$  よりも高い値を示し、赤道太平洋がこの時期に現在よりも多くの  $\text{CO}_2$  を放出していたことが明らかになった。また約 1 万 5 千年前に大きな  $\text{CO}_2$  放出イベントがあったことが初めて示唆された。海洋放射性炭素リザーバー年代の推定と併せた解釈から、その原因は垂表層水塊の炭酸系の変化である可能性を指摘している。これは古気候・古海洋学的に新しい知見であるといえる。

第 5 章では得られた結果をまとめ、将来展望が述べられている。

本委員会は、平成 27 年 2 月 3 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った。本研究によって、地球表層システムにおける炭素循環の復元をハマサンゴのホウ素同位体を用いて行えるようになり、新しい補正式を用いて大気海洋間の二酸化炭素の移動を定量的に推定可能になったことは重要な貢献である。また、現生サンゴおよび化石サンゴに適用することで、炭素循環の新しい描像を示した点も高く評価できる。

なお、本論文の第 4 章は横山祐典、石川剛、Stephen Obrochta、鈴木淳各氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析、数値計算、考察等を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

以上により、本論文は地球惑星科学、とくに地球惑星システム科学の発展に寄与するものと判断し、博士（理学）の学位を授与できると認める。