

学位論文題名

Ecological and geochemical characterizations of foraminifera in submarine methane seepage area.

(海底メタン湧出域における有孔虫の生態学および
地球化学的特性の解明)

学位論文内容の要旨

有孔虫と海底メタン湧出

深海調査の発展により、沈み込み帯メタン湧出域における嫌気性の化学合成生物が相次いで報告され、特異な環境における生態系や群集形成過程が注目されている。これら化学合成生物群集は化学合成細菌の共生により、太陽光には依存しない独立した生態系を維持し、地球規模の環境変動に影響を受けない特殊な生態系である。底生有孔虫は海洋底に広く分布し海底メタン湧出域にも産出することが知られており、その殻は軽い炭素同位体比をもつ海底メタン湧出の影響を受け、過去のメタン湧出による温暖化の指標として用いられつつある。

メタン湧出域有孔虫群集の特徴

これまでのメタン湧出域有孔虫では、湧出域にのみ特有のタクサは無いと考えられており、実際に湧水域で報告された底生有孔虫は、その海域や深度によりまちまちであった。一方で特定種がメタン湧水に耐性があることが報告されている。

本研究では北海道北部の上部白亜系のメタン湧出化石から保存良好の石灰質有孔虫が密集して多産することを明らかにした。それら白亜系有孔虫群集は、湧水化石付近では局所的に石灰質有孔虫が多産し大きな群集変化を示した。また、現世南海トラフ熊野灘の泥火山のメタン湧出中心部から周囲にかけて、バクテリアマット泥底・シロウリガイコロニー直下・湧水から数m離れた地点の泥底・シロウリガイコロニーの無い泥底、から試料を得た。メタン湧出中心部にむけ有孔虫の産出数は減少するものの、*Bulimina*属の産出割合が増加することがわかった。これらの結果、現生および白亜系のメタン湧出域を比較して産出種の共通種(*Bulimina* 属)を認識した。白亜系から現在まで、特定のタクサがメタン湧出環境に適応していた可能性があり、それらの産出傾向・化学的特性をもとに、海洋コア試料などからメタン湧出史の復元をすることができる。

微小炭酸塩安定同位体比の測定法開発

炭酸塩の殻をもつ底生・浮遊性有孔虫の群集解析や同位体組成は、海洋環境の指標として非常に有用である。しかし、同位体測定を実践するためには、古典的なもので40mg、最近の分析システムでも10 μ g~400 μ gの炭酸塩試料が必要であり、微小な有孔虫殻の安定同位体測定を実現するには数個体~数10個体の殻が必要であった。もし1個体で同位体測定が可能であれば、メタン湧出域などの有孔虫産出量が少ない場合や、小型種しか産出せず同位体分析が困難であった研究対象に対しての有益な手法となる。本研究では高感度安定同位体分析手法である連続フロー型質量分析を用い、メタン湧出域有孔虫の個別同位体比測定と、微小有孔虫殻の個体ごとの同位体測定による有孔虫生態解明を目指した。

開発した分析法を用いて100%CO₂標準ガスを真空ラインに直接導入して測定した場合、測定値の標準偏差は $\delta^{13}\text{C}$ で0.11‰、 $\delta^{18}\text{O}$ で0.09‰であった。標準炭酸塩試料を試料と同様に測定した場合、NBS18は $\delta^{13}\text{C}$ で0.05-0.08‰、 $\delta^{18}\text{O}$ で0.08-0.18‰であった。また、質量分析計へのCO₂導入量も2nmol~60nmolまで変化させて測定してみたところ測定精度

に変化はなく、ガスを全量導入することにより $0.2\mu\text{g}$ の炭酸塩でも同位体比を測定できる。

この分析法は従来法と比べて、導入量の調整が可能であるために反応に用いる炭酸塩試料を事前に調整する必要がない。また、反応に必要な炭酸塩量も従来法と比べて約 $1/100\sim 1/100000$ 程度の炭酸塩量での酸素・炭素安定同位体比測定が可能になった。これにより有孔虫研究で扱う石灰質殻のほとんどの種類を個別に測定することが可能である。この分析法により、これまで測定することのできなかった多くの有孔虫殻の測定が可能となり、古海洋学および有孔虫生態学的研究への応用が可能である。

微小有孔虫の個体別同位体比測定による生態情報の推定

有孔虫殻は種類によって厚さや密度など殻質が多様である。従来の同位体分析法では殻の厚めでサイズが大きな種類(重量にして数 $10\mu\text{g}\sim 100\mu\text{g}$ 以上)の個体のみ測定可能であった。本研究ではオホーツク海網走沖で得られた表層堆積物試料に含まれる生体および遺骸の *Globocassidulina* sp. (個体重量 $2.8\sim 5.7\mu\text{g}$) と *Brizalina pacifica* (個体重量 $0.7\sim 1.5\mu\text{g}$) を測定対象に用いた。これらは非常に薄く透明な殻を持つ小型の底生有孔虫である。

Globocassidulina sp. を個別に測定したところ $\delta^{13}\text{C}$ は $-1.66\pm 0.17\text{‰}$ (PDB), $\delta^{18}\text{O}$ は $+2.88\pm 0.31\text{‰}$ (PDB)であり、同位体比の個体差は小さいことがわかった。*Brizalina pacifica* を個別に測定した結果、 $\delta^{13}\text{C}$ は $-5.19\pm 0.78\text{‰}$ (PDB), $\delta^{18}\text{O}$ は $+1.37\pm 0.65\text{‰}$ (PDB)であり、炭素同位体比の平均値が *Globocassidulina* sp. より低く、個体ごとの同位体比の分散が大きいことがわかった。

有孔虫殻の同位体比は、有孔虫自身の vital effect や微小生息環境によって変化する。堆積物表層に生息しているならば海洋底層水の同位体比や温度に影響を受け、堆積物中を活動していたならば有機物の分解の影響で軽い炭素同位体比をもった不均質な間隙水の影響を受けると推測される。今回の測定結果から *Globocassidulina* sp. は堆積物の表層付近に生息し、*Brizalina pacifica* は堆積物表層から数 cm の深度まで生息し、ここで殻を作っていると理解することができる。

このように有孔虫殻の同位体比を個別に測定し同種内での個体差を明らかにすることが可能であれば、今後有孔虫の微小生息環境を推定することや、古環境変動解明のために有用な有孔虫種の認定が可能となる。また、殻の大きめの有孔虫であれば、殻の部位ごとの同位体比測定が可能であり、生態学的に不明な点が多い有孔虫のライフサイクルの解明への応用が期待できる。

メタン湧出域有孔虫殻の安定同位体組成と二次的自生炭酸塩沈着の有孔虫殻への影響

これまでのメタン湧出域有孔虫研究の多くは、底生有孔虫の炭素同位体比を測定し、その変化から過去の湧水噴出の可能性を考察している。しかし、自生炭酸塩による影響が示唆されながらも実際の影響の程度は未知であった。本研究で、南海トラフメタン湧出域表層試料から得られた生体・遺骸を含む底生有孔虫殻の酸素・炭素同位体比を測定したところ、軽い炭素同位体比のメタン湧出域であるにも関わらず、湧水中心部に向けて有孔虫殻同位体比に大きな変化はなかった。しかし堆積物中より得られた底生・浮遊性有孔虫は非常に低い炭素同位体比を示した。堆積物中から得られた浮遊性有孔虫を粉砕し酸処理して個別測定してみたところ、未処理の個体は同位体比分散が大きく非常に低い炭素同位体比を持つが、これらを弱酸で洗浄することにより、表層海水の炭素同位体比に近い値 (0‰ 付近) に収束した。この結果から有孔虫殻はメタン湧出によって生成された低い炭素同位体比を持つ自生炭酸塩の影響を強く受け、特に殻装飾が複雑な種ほどその影響を受けていることがわかった。

まとめ

以上の検討結果よりメタン湧出域において、有孔虫の群集変化と炭素同位体比の変化が確認できた。しかし、有孔虫殻は自生炭酸塩の沈着の影響を強く受け、埋積当時のメタン湧出を指標するとは限らないということがわかった。今後、底生有孔虫からメタン湧出を推測するには、湧出指標種の認定とその種毎の生態情報の推定、そして自生炭酸塩の二次的沈着の影響の総合的な検討が必要である。

学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 角 皆 潤

副 査 教 授 岡 田 尚 武

副 査 教 授 鈴 木 徳 行

副 査 教 授 長谷川 四 郎

(熊本大学大学院自然科学研究科)

副 査 教 授 蒲 生 俊 敬 (東京大学海洋研究所)

学 位 論 文 題 名

Ecological and geochemical characterizations of foraminifera in submarine methane seepage area.

(海底メタン湧出域における有孔虫の生態学のおよび
地球化学的特性の解明)

底生有孔虫は海洋底に広く分布し海底メタン湧出域にも産出することが知られており、その殻は軽い炭素同位体比をもつ海底メタン湧出の影響を受け、過去のメタン湧出による温暖化の指標として用いられつつある。本研究では、メタン湧出域における有孔虫群集の特性解明と、微小炭酸塩安定同位体比測定法の開発、そしてメタン湧出域における有孔虫殻の安定同位体組成を検討し、従来研究における問題点の解明と同研究に対する今後の指針を与えたものである。

まず、メタン湧出域における有孔虫群集の特徴についての検討を行った。これまでの有孔虫研究においては、メタン湧出域のみに特有のタクサは無いと考えられているが、特定種がメタン湧出環境に耐性があることも報告されている。本研究では北海道北部の上部白亜系のメタン湧出化石から石灰質有孔虫が多産することを明らかにした。それら白亜系有孔虫群集は、湧水化石付近では局所的に*Bulimina*属などの石灰質有孔虫が多産し大きな群集変化を示した。また、現世南海トラフ熊野灘の泥火山のメタン湧出中心部から周囲にかけて試料を採取し、メタン湧出中心部にむけ有孔虫の産出数は減少するものの、*Bulimina*属の産出割合がやはり増加することがわかった。これらの結果、現生および白亜系のメタン湧出域を比較して産出種の共通種を認識した。白亜系から現在まで、特定のタクサがメタン湧出環境に適応していた可能性があり、それらの産出傾向をもとに、海洋コア試料などからメタン湧出史の推定できる可能性があることがわかった。

続いて、微小炭酸塩安定同位体比の測定法の開発を行った。炭酸塩の殻をもつ底生・浮遊性有孔虫の群集解析や同位体組成は、海洋環境の指標として非常に有用である。しかし、同位体測定を実践するためには、数個体～数10個体の有孔虫殻が必要であった。

もし 1 個体で同位体測定が可能であれば、メタン湧出域などの有孔虫産出量が少ない場合や、小型種しか産出せず同位体分析が困難であった研究対象に対しての有益な手法となる。本研究では高感度安定同位体分析手法である連続フロー型質量分析を用い、メタン湧出域有孔虫の個別同位体比測定と、微小有孔虫殻の個体ごとの同位体測定による有孔虫生態解明を目指した。開発した分析法を用いて 100%CO₂ 標準ガスを測定した場合、測定値の標準偏差は $\delta^{13}\text{C}$ で 0.11‰、 $\delta^{18}\text{O}$ で 0.09‰であり、標準炭酸塩試料を測定した場合の測定値の標準偏差は $\delta^{13}\text{C}$ で 0.05–0.08‰、 $\delta^{18}\text{O}$ で 0.08–0.18‰であった。これは古海洋学研究に対して有効な測定精度である。また、反応に必要な炭酸塩量も従来法と比べて約 1/100~1/100000 程度の炭酸塩量での酸素炭素安定同位体比測定が可能になった。この分析法により、これまで測定することのできなかった多くの有孔虫殻の測定が可能となった。

続いて、メタン湧出域における有孔虫殻の安定同位体比組成と自生炭酸塩の二次的沈着の影響について検証を行った。これまでのメタン湧出域有孔虫研究の多くは、底生有孔虫の炭素同位体比を測定し、その変化から過去の湧水噴出の可能性を考察している。しかし、自生炭酸塩による影響が示唆されながらも実際の影響の程度は未知であった。本研究で、南海トラフメタン湧出域表層試料から得られた生体・遺骸を含む底生有孔虫殻の酸素・炭素同位体比を測定したところ、軽い炭素同位体比のメタン湧出域であるにも関わらず、湧水中心部に向けて有孔虫殻同位体比に大きな変化はなかった。しかし堆積物中より得られた底生・浮遊性有孔虫は非常に低い炭素同位体比を示した。堆積物中で得られた浮遊性有孔虫を粉砕し酸処理して個別測定してみたところ、未処理の個体は同位体比分散が大きく非常に低い炭素同位体比を持つが、これらを弱酸で洗浄することにより、表層海水の炭素同位体比に近い値 (0‰付近) に収束することを見出した。この結果から有孔虫殻はメタン湧出によって生成された低い炭素同位体比を持つ自生炭酸塩の影響を強く受け、特に殻装飾が複雑な種ほどその影響を受けていることを明らかにした。

以上の検討結果よりメタン湧出域において、有孔虫の群集変化と炭素同位体比の変化が確認できた。しかし、有孔虫殻は自生炭酸塩の沈着の影響を強く受け、埋積当時のメタン湧出を指標するとは限らないということがわかった。今後、底生有孔虫からメタン湧出を推測するには、メタン湧出指標種の認定とその種毎の生態情報の推定、そして自生炭酸塩の二次的沈着の影響の総合的な検討が必要であることが明らかになった。

以上を要するに、著者は、メタン湧出域有孔虫研究における従来研究の問題点の解明と今後の指針を提示したものであり、同時に、微量炭酸塩安定同位体比測定による有孔虫殻分析という古海洋学に対しての革新的な技術を開発したものである。

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有るものと認める。