

論文の内容の要旨

論文題目 Spatiotemporal variations in prokaryote community and their regulation by environmental factors in the ocean (海洋における原核微生物群集の時空間変動およびそれに関わる環境要因に関する研究)

氏 名 内宮 万里央

< 第1章 序論 >

1980年代における微生物ループの概念提唱が端緒となり、海洋環境における従属栄養性原核微生物(細菌・古細菌)に関する情報の集積が精力的に展開されてきた。この結果、基礎生産者由来の有機炭素のうち、約半分が海洋表層において原核微生物によって無機化されること、また表層から中深層(表層以深、海底以浅の水柱)へ輸送された有機炭素のうち大部分が原核微生物によって無機化されることが明らかとなり、海洋炭素循環の駆動における原核微生物群集の重要性が強く認識されてきた。またこの認識は同時に、原核微生物群集の「時空間的変動性」や「その制御に関わる環境要因」に関する知見の集積を新たな課題として提起した。しかしながら、その後集積された原核微生物群集の時空間変動性とその制御に関する知見は、主に低~中緯度海域の表層を中心とした極めて限定的なものであり、その他の海洋空間(極域および海洋中深層)において適応可能であるかは不明であった。特に、気候変動の影響を最も受けやすい海域の一つである北極海や、原核微生物群集によって多量の有機炭素の無機化が行われる中深層といった重要な海洋空間における情報が不足していた。これらの情報の不足は、気候変動が海洋生態系および炭素循環へ及ぼす影響予測の上でも大きな障壁となっていた。

本研究では、北極海および海洋中深層における原核微生物群集の時空間変動性およびその制御に関わる環境要因を明らかにすることを目指し、観測的・実験的研究に取り組んだ。具体的には、以下に設定した課題に対して結論を得ることを目的とした。(1)海洋表層における原核微生物生産速度は淡水流入の影響を受けるか、(2)中深層における原核微生物群集は、水塊移入の影響を受けるか、(3)中深層における原核微生物群集は時間変動をするか、また有機物供給や水温上昇に回答するか。本論文では、第2-4章において各課題の検討を行い、第5章において総論を行った。

< 第2章 北極海表層における原核微生物群集の空間変動 >

北極海表層は、近年の気候変動の影響により急激に淡水化が進行している海洋空間である。海洋表層における原核微生物生産速度は一般に、基礎生産者由来の有機炭素供給(基礎生産速度またはクロロフィルaが代替変数として使用される)および水温によってその変動が説明されると考えられて来た。しかしながら北極海における既往研究によると、原核微生物生産速度の変動のうち基礎生産者由来の有機炭素供給および水温で説明可能な割合は40%程度であり、その他の環境要因の寄与が大きい可能性が指摘されてきた。一方、北極海における淡水流入の主要な構成要素である融氷水・河川水は有機炭素に富み、その流入は北極海における有機炭素の主要供給経路の一つであると考えられてきた。し

かしながら現在までに、北極海表層において淡水流入を考慮した原核微生物群集の変動解析例は存在しなかった。この観測事実の欠損は、淡水化の進行に伴う微生物生態系への影響予測における大きな障壁となっていた。そこで本研究では、北極海表層における原核微生物生産速度に対する淡水流入の影響を明らかにすることを目的とし、研究を実施した。観測は西部北極海力ナダ海盆海域に設置した8観測点において実施し、環境変数および原核微生物変数に関わる試料を鉛直的に採取した。淡水流入の指標として塩分を用い、原核微生物生産速度とクロロフィルa、水温、および塩分との関係性を明らかにした。その結果、クロロフィルaおよび水温が高い空間、および淡水流入が顕著な空間において原核微生物生産速度が高い傾向が見られた。変数選択重回帰分析の結果、以下の式が得られた： $\log_{10}[\text{原核微生物生産速度}] = 1.77 + 0.11 \cdot [\text{水温}] - 0.07 \cdot [\text{塩分}] + 0.67 \cdot \log_{10}[\text{クロロフィルa}]$ ($n = 63, p < 0.01, r^2 = 0.74$)。原核微生物生産速度の変動はクロロフィルa、水温、および塩分によってその74%が説明されることが明らかになった。変動に対する塩分の寄与(=変動係数、14%)はクロロフィルa(54%)に次いで高く、水温(3%)よりも高かった。また、変動に対する塩分の潜在的影響(=標準回帰係数の絶対値、0.39)についてもクロロフィルa(0.53)に次ぎ高く、水温(0.27)よりも高いことが明らかになった。以上の結果により、北極海表層における原核微生物生産速度の変動要因として、基礎生産者由来の有機炭素供給および水温に加え、淡水起源の有機炭素が重要である可能性が初めて明らかとなった。

< 第3章 北極海中深層における原核微生物群集の空間変動 >

海洋中深層における原核微生物生産速度の鉛直分布は一般に、粒状態有機炭素の沈降による鉛直一次元的な供給を反映して、水深に対して両対数で直線的に減衰することが知られている(鉛直モデル)。北極海では、表層における基礎生産が著しく低い一方で、周辺海域由来の有機物に富む太平洋起源水が中層の上部(100-300 m)へ流入するという特徴が知られ、その情報が原核微生物生産速度へ反映されることが期待された。しかしながら現在まで、北極海中深層における原核微生物生産速度の空間分布に関する情報は極めて限定的であった。この観測事実の欠損は、環境変動が中深層の原核微生物群集へ及ぼす影響予測の上で大きな障壁となっていた。本研究では、北極海中深層における原核微生物生産速度の空間変動を明らかにすることを目的とし、研究を実施した。西部北極海力ナダ海盆に設置した6観測点において原核微生物変数に関わる試料を採取した。その結果、水深300-3,000 mにおいて原核微生物生産速度の鉛直分布が $-1.33(\pm 0.05)$ の傾きを持つ鉛直モデルで表現され、表層基礎生産に起因する粒状態有機炭素の沈降による供給を反映している可能性が初めて明らかになった。一方で、中層上部(100-300 m)においては顕著に鉛直モデルから外れ、鉛直一次元的な粒状態有機炭素供給以外の寄与が示唆された。この空間は、太平洋起源水の流入する水深帯に一致しており、周辺海域由来の有機炭素が水塊移入を介して北極海中層上部の原核微生物生産速度へ影響している可能性が初めて示された。

< 第4章 海洋中深層における原核微生物群集の時間変動およびその変動要因としての有機炭素供給・水温の役割 >

海洋中深層における環境要因は表層に比較して季節変動性が小さく、これを反映して原核微生物の季節変動も小さいと考えられてきた。しかしながら一方、表層基礎生産や中層における水塊の生成・移入の季節変動性に応答して、中深層の原核微生物が季節的に変動する可能性が指摘されていた。ま

た、海洋中層における原核微生物群集は一般に、乏しい有機物供給および低水温によってその成長が極めて強く制限されていると考えられてきた。しかしながら現在まで、有機物および水温による制限の実験的検証は表層海域で主に実施されており、中深層における研究例は存在しなかった。上記の観測事実・実験事実の欠損は、環境変動の影響がどのように海洋中層における原核微生物群集へ波及するか予測する上で大きな障壁となっていた。本研究では、(1)海洋中深層における原核微生物群集の季節変動性を明らかにすること、および(2)原核微生物群集に対する有機物供給・水温上昇の影響を評価することを目的として亜寒帯および亜熱帯海域に設置した時系列観測点において研究を実施した。その結果、原核微生物生産速度の鉛直分布は、亜寒帯海域に特徴的である中冷水の存在が認められる中層上部(100-150 m)において大きく季節変動する傾向が見られた(最大91%)。一方で亜熱帯海域においても、この海域に特徴的である亜熱帯モード水の移入が認められる水深帯(100-500 m)において極めて顕著な季節変動性を検出した(最大130%)。これらの結果は、中層における原核微生物が水塊の生成・移入に伴う有機物供給を反映して季節変動している可能性を示唆していた。培養実験の結果、原核微生物生産速度は有機物添加および水温上昇によって有意に増進され、中層における原核微生物群集が有機物および水温に影響されることが初めて実験的に明らかとなった。

<第5章 総論>

本研究では、新規の観測事実・実験事実の提供を通じて、序論で掲げた各課題に対して各章で回答を得た。その結果、従来から認識されてきた基礎生産者由来の直接的な有機炭素供給に加え、海洋表層では淡水流入を介した、中層においては水塊移入を介した有機炭素供給が原核微生物群集の変動要因として重要である可能性が初めて示唆された。また、海洋中深層における原核微生物群集が、表層に匹敵する季節変動性や有機炭素供給・水温上昇に対する応答を示すことが初めて明らかとなった。今後取り組むべき具体的な課題として、淡水や水塊移入に伴って供給される有機炭素の相対的寄与やその微生物利用性の検討が挙げられる。

本研究で得られた成果は、海洋環境変動の影響が従来認識されていたよりも「複合的」にまた極めて「動的」に原核微生物生態系へ影響する可能性を示唆している。さらに、この影響は有機炭素の無機化量やそのパターンの変化を介して、気候変動へフィードバックする可能性がある点においても重要である。今後さらに顕在化する気候変動が、原核微生物群集および炭素循環へ及ぼす影響を追跡評価することが重要である。