

論文の内容の要旨

水圏生物科学専攻

平成 16 年度博士課程 入学

氏 名 橋濱史典

指導教員名 古谷 研

論文題目 貧栄養海域における栄養塩環境の変動と植物プランクトン群集動態に関する研究

全海洋面積の約 6 割を占める亜熱帯海域では、湧昇域や沿岸域に比べて植物プランクトン現存量が極めて低い。年間のほとんどを通じて成層が発達して下層から有光層への栄養塩供給が抑えられているためである。このような貧栄養海域では新生産が小さく、一次生産の大半が再生生産と考えられ、植物プランクトン群集は、安定した現存量と組成で特徴づけられる極相にあると見なされてきた。しかしながら、近年、この極相概念を見直す必要が生じている。これまで亜熱帯域表層の栄養塩濃度は「ゼロ」とされてきたが、高感度分析技術の開発によってナノモルレベルの栄養塩濃度が測定可能となり、その結果、栄養塩は極めて低い濃度でも時空間的に変化し、それに応答して植物プランクトン群集が変動することが報告されている。知見はハワイ沖やバミューダ周辺など一部の海域に限られているが、この現象は他海域でも起こっている可能性があり、従来「海の砂漠」とされてきた貧栄養海域のプランクトン動態に関するパラダイムの再検討が求められている。このためには、海盆スケールなど既往研究にない広範な海域を対象とした研究が必要である。

本研究は、太平洋亜熱帯・熱帯域の表層におけるナノモルレベルの栄養塩濃度と植物プランクトン群集動態を明らかにし、両者の関係の解析と変動要因の理解を基に、上記の極相概念を検証することを目的とした。観測は、東京海洋大学の海鷹丸、青鷹丸、海洋研究開発機構の白鳳丸、淡青丸による研究航海において、中西部太平洋の亜熱帯域、赤道域西部、西部北太平洋縁辺海を含む 42°N~40°S および 128°E~158°W の範囲で水柱が成層している時期に行った。航走中、表層の硝酸塩+亜硝酸塩 (N+N)、溶存反応性リン (SRP) およびアンモニアを高感度比色分析法により連続測定した。検出限界は各々 3 nM、3 nM、6 nM であった。同時に、水温、塩分、クロロフィル蛍光、有色溶存有機物 (CDOM) を連続測定した。また、海水試料を随時採取し、フローサイトメータ、HPLC、倒立顕微鏡を用いて植物プランクトン群集を解析した。170°W と 160°W 線上の 29 定点では、CTD ロゼットニスキン採水による表層混合層の鉛直観測を行った。

1. 海盆スケールにおける栄養塩濃度変動と植物プランクトン群集動態

1.1. 栄養塩

N+N および SRP には海盆スケールでの水平変動が認められた。N+N 濃度は極めて低く、大部分の海域で 35 nM 以下であったが、南北方向にわずかな勾配が認められた。すなわち、15°N~42°N (A 海域) では検出限界の 3 nM 付近と低かったのに対して、15°S~40°S (B 海域) では 3~10 nM と検出限界をわずかに上回った。一方、15°N~15°S (C 海域) においては 10 nM を上回った。この N+N 濃度の地理的分布は水塊特性と対応しており、A、B、C 海域の順に表層混合層の深度は増加し、水柱安定度が減少した。従って、上記の南北勾配は鉛直混合による下層から表層への硝酸塩の供給程度の違いを反映したものと考えられる。アンモニアは大部分の海域で 6 nM 以下であり、海域による変動傾向は認められなかった。

SRP は N+N に比べて海域による濃度の違いがより顕著であり、N+N と同様に南北方向の勾配を示した。A 海域では検出限界の 3 nM 付近から 100 nM の範囲、B 海域では A 海域より高く 20~200 nM、C 海域では 200 nM を上回って変動し、海域による違いは N+N と同様に下層からの供給が異なることを反映したものと考えられる。さらに、A 海域では東西方向にも勾配が認められ、165°E を境界に西側 (AW 海域) ではほとんどが検出限界付近であったが、東側 (AE 海域) では大部分で 20 nM を上回った。

N:P 比は全海域を通してほぼ 0 であり、窒素の供給が一次生産の律速要因となっていたが、これは下層からの栄養塩供給の N:P 比が約 15 であるのに対して、植物プランクトンによる利用では Redfield 比であることを反映したものと考えられる。

1.2. 植物プランクトン群集

TChl a (クロロフィル a + ディビニルクロロフィル a) 濃度は 12~239 ng l⁻¹ の範囲で変動し、その分布は N+N 濃度のそれとよく対応し、植物プランクトン現存量が窒素供給に依存していることを示した。すなわち、A 海域ではほとんどの海域で 30 ng l⁻¹ 以下と極めて低く、B 海域では大部分で 30~50 ng l⁻¹、C 海域においては 50 ng l⁻¹ 以上であった。両者は良い相関を示し、N+N 10 nM の増加は TChl a 21 ng l⁻¹ の増加に相当した。

植物プランクトン群集についてみると、Prochlorococcus、Synechococcus および真核藻類の細胞密度は N+N 濃度の分布とよく対応した。Prochlorococcus では、A 海域で密度が最も低くほとんどが 2×10^4 cells ml⁻¹ 以下であったのに対して、B 海域では $2\sim6 \times 10^4$ cells ml⁻¹ の範囲で変動し、C 海域では最も高くほとんどが 6×10^4 cells ml⁻¹ 以上であった。Synechococcus では、A、B 海域ではほとんどが 5×10^3 cells ml⁻¹ 以下と低かったが、C 海域においては 5×10^3 cells ml⁻¹ を上回る密度が認められた。このような傾向は真核藻類についても認められ、A、B 海域で低く 2×10^3 cells ml⁻¹ 以下だったのに対して、C 海域ではほとんどが 3×10^3 cells ml⁻¹ 以上であった。このように 3 群では N+N 濃度に対して有意な正の依存性を示したが、その依存性には違いが認められ、Prochlorococcus は 20 nM 以下で明瞭な濃度依存性を示し、最も依存性が小さかったのは真核藻類であった。

一方、細胞サイズ 2~10 μm のナノシアノバクテリアは上記とは異なる分布を示し、SRP の分布とよく対応した。すなわち、AE、B 海域で顕著に出現し、最大 800 cells ml⁻¹ の密度

であったが、AW、C 海域においてはほとんど出現しなかった。ナノシアノバクテリアは窒素の枯渇した海域に卓越して窒素固定することが近年報告されており、SRP 濃度の高い AE、B 海域は窒素固定者に有利な栄養塩環境であったと考えられる。一方、SRP が枯渇していた AW 海域では、ナノシアノバクテリアの増殖はリン律速を受け、また、N+N が 10 nM 以上と高かった C 海域では、窒素固定者に有利な環境ではなかったと考えられる。AW 海域ではアジア大陸からのダスト由来の鉄供給の影響と考えられる高い窒素固定活性が認められており、リンが活発に消費された結果 SRP が枯渇状態まで低下したものと解釈される。このように本研究海域の植物プランクトン群集は全体的に強い窒素制限を受けており、それにリン供給の違いに影響された窒素固定者の地理的分布が加わるボトムアップ制御を受けていると結論される。

2. メソスケールにおける栄養塩濃度変動と植物プランクトン群集動態

ナノモルレベルの栄養塩濃度は、100 km 以下のメソスケールにおいても水平的に変動した。黒潮が北上する本州南方沖の神津島の東方では、N+N が 300 nM および SRP が 20 nM の増加が認められ、これは、1.5 °C の水温低下と 0.1 の塩分増加を伴う島陰に生じた湧昇であった。同様に、ソロモン諸島のブーゲンビル島の北方、3°S 170°W、10°S 161°W でも湧昇はとらえられ、下層水の持ち上りを示す CDOM の増加を伴った。

一方、東部東シナ海では、N+N のみが最大濃度 20 nM で 10 km 程度のスケールで、もしくは SRP のみが最大 50 nM で 50 km 程度のスケールで局所的に増加する事例が観測された。これらは塩分低下を伴っており、大気降水物の影響も否定できないが、主に沿岸水の影響と考えられる。すなわち、沿岸系水の沖合への移流の過程で窒素あるいはリンが選択的に消費された結果、N+N パッチあるいは SRP パッチとして検出されたと考えられる。さらに、18°N 167°E ではアンモニアのみが水平スケール 20 km 程度で 50 nM 増加するパッチがとらえられた。この成因は不明であるが従属栄養者による局所的な再生と考えられた。このような局所的栄養塩パッチの多くは TChl a の増加を伴ったが、そうでない場合もあり、栄養塩供給と植物プランクトンの増殖の相対的な時間差に応じた現象をとらえていると考えられる。

一方、局所的な濃度減少も観測された。B 海域のフィジー周辺では約 10 km のスケールで SRP のみが検出限界付近まで低下した。これは窒素固定者 *Trichodesmium* の増加によるものであった。最大 1600 藻糸 l-1 の *Trichodesmium* によりリンが効率よく利用されていたためである。フィジー周辺では高い溶存鉄濃度と *Trichodesmium* ブルームの出現が報告されており、本研究でとらえられた SRP の局所的な減少は島周辺の鉄供給による消費の結果と考えられる。

以上、本研究により、太平洋亜熱帯・熱帯における海盆スケールでの表層栄養塩の分布様態が初めて明らかになった。従来、安定していると考えられてきた亜熱帯・熱帯域表層の栄養塩環境は、海盆スケールでの変動にメソスケールでの変動が重なって時空間的に安定せず、ボトムアップ制御を通して植物プランクトン群集に影響を及ぼしていることが示された。今後、栄養塩動態を軸に、亜熱帯・熱帯海域が全海洋の物質循環に占める場としての重要性を

解明する上で、本研究で得られた成果は貢献すると期待される。