

## 論文の内容の要旨

水圏生物学専攻

平成 11 年度博士課程 進学

氏 名 吉川 尚

指導教官 古谷 研

論文題目 海洋における植物プランクトン群集の光合成光利用特性に関する研究

光エネルギーの固定は、光独立栄養生物である植物プランクトンの増殖を規定する最も重要な過程であり、その結果として生産される有機物は生態系全体の有機物循環の起点となり、海洋の物質循環の駆動エネルギーとなっている。このため一次生産を制御する生理的および環境要因の解明は海洋の生物生産における主要課題となっている。しかしながら、これまでの天然植物プランクトン群集についての一次生産の制御機構に関する研究は、有機物生産量と環境要因の関係を解析することに集中しており、一次生産過程を構成する諸要素、すなわち光エネルギーの固定について見ると、光合成色素による光エネルギーの吸収、励起転移、電子伝達、暗反応系での糖類の生産などの過程に対する環境要因の影響についてはほとんど知見が無い。このため環境変動に対する一次生産の応答を予測したり、海洋の生物生産過程をモデル解析するうえで障害となっている。また、リモートセンシングによる海色探査や水中測器によるクロロフィル蛍光からの一次生産の推定手法の開発が近年、急速に進められているが、このためにも上記の諸要素に関する知見が必須となっている。

本研究は、これまで知見の乏しかった海洋における植物プランクトン群集の光合成光利用特性、すなわち植物プランクトン群集の光吸収特性、光合成量子収率および光合成一光曲線の諸係数の時空間変動を明らかにすること、次いでそれらに対する環境

要因の影響を解明し、海洋の一次生産制御過程に新たな視座を与えることを目的とした。とくに北太平洋亜寒帯域の生物生産の制御要因であることが指摘されている鉄濃度の影響に重点を置いた。さらに、光合成の光利用特性に関して得られた知見を基に水中蛍光光度計の係留により一次生産を長期モニタリングするための手法を開発した。さらにこの手法をワカメ養殖海域に適用して栄養塩利用で競合する植物プランクトンと養殖ワカメの一次生産を評価した。得られた結果の概要を以下に整理する。

## 1. 外洋域における植物プランクトン群集の光合成光利用特性

観測は夏季の北太平洋亜寒帯域、三陸沖、日本海および東シナ海で行った。

北太平洋亜寒帯域は、表層水中の栄養塩濃度が高いにも関わらずクロロフィル  $a$  が低い、いわゆる HNLC 海域である。観測が行われたのは西部環流域に比べて東部環流域の表層水温が高くクロロフィル  $a$  が低かったエルニーニョ期と、東西で差異が認められなかったラニーニャ期であったが、光合成の光利用特性は両時期で大きく異なった。エルニーニョ期では西部環流域で東部環流域に対し表層水の光合成—光曲線の立ち上がり勾配が高く、最大量子収率も高い傾向が認められた。一方、最大光合成速度には東西差は見られなかった。一方、ラニーニャ期では、東西の環流域で立ち上がり勾配、最大量子収率および最大光合成速度とも違いは無かった。いずれの時期にも最大光合成速度は亜寒帯域での従来の報告値の範囲であったが、最大量子収率は硝酸塩や水温から期待される値に比べて著しく低かった。観測海域では表層水中の鉄濃度が  $0.22 \text{ nM}$  以下と低く、光合成の電子伝達系の効率が低下している可能性を認めた。

三陸沖では、暖水塊、暖水舌、冷水舌と水温、栄養塩条件の異なる水塊において観測を行った。最大光合成速度は暖水舌において冷水舌や暖水塊と比較し高い値を示す傾向があり、暗反応の温度依存性を反映したものと考えられた。一方、立ち上がり勾配は鉛直的に変化し、表層で下層より低い値を示す傾向にあり弱光環境への適応が示唆された。

日本海では、全域で表層に対馬暖流由来の高温、低塩分水が存在し、特に南側、沿岸側でその影響が強くなる傾向にあった。表層では海域による光合成光利用特性の違いは小さかったのに対して、 $30\text{-}40\text{m}$  に存在したクロロフィル極大層では、最大光合成速度、立ち上がり勾配および最大量子収率が水温に依存して海域毎に大きく変動し、鉛直的な変化が顕著であった。

東シナ海では東シナ海陸棚水と貧栄養な黒潮水で観測を行った。表層では両海域で光合成光利用特性に有意な差はみられなかった。一方、クロロフィル極大層では東シナ海陸棚水と黒潮水で立ち上がり勾配、光飽和定数、最大量子収率に有意な差が認められ両海域の一次生産力の違いに光利用特性が影響していることが分かった。

## 2. 沿岸域における植物プランクトン群集の光合成光利用特性の季節変動

岩手県大槌湾において冬-春季（1-4月）、晩春（5月）、夏季（7-8月）において週2回の頻度で観測を行い、光合成光利用特性の季節変動について調べた。冬-春季は、表層と亜表層で光合成光利用特性に差は見られず、水柱の上下混合を反映したものであった。光吸収係数および最大量子収率は顕著な経時変化を示し、植物プランクトンのブルームの消長にともなうクロロフィル *a* 濃度に対応して変化した。晩春および夏季では水温成層が発達し、最大光合成速度、光飽和定数は表層で亜表層より高かった。最大光合成速度、光飽和定数には水温依存性が認められ、水温の上昇にともない増大した。観測期間を通して最大量子収率と光吸収係数には季節による差異は無かった。

水柱の一次生産力すなわちクロロフィル *a* ベースの一次生産は各季節間および各季節内で大きく変動したが、光利用効率の経時変化よりはむしろ海面光量の変動を反映したものであった。

## 3. 植物プランクトン群集の光合成光利用特性に対する鉄濃度の影響

北太平洋亜寒帯域の観測により光合成活性が低い鉄濃度の影響により低下していた可能性が示唆された。そこで、ラニーニャ期の東西の両環流域およびベーリング海において表層水に塩化第二鉄を 1-2nM 添加して 2 日間培養を行い、鉄濃度が光合成光利用特性に与えている影響について調べた。鉄添加系ではコントロールに対してほとんどの測点で最大光合成速度、立ち上がり勾配および最大量子収率が増加し、鉄不足により光合成活性が低下していたことが明らかとなった。また光合成色素分析から、特に珪藻類の色素合成が鉄不足により制限されていたことが示唆された。水柱一次生産力は、鉄添加系でコントロールに対し 2 日間の培養で平均 1.2 倍増加した。鉄添加によりもたらされる生物量の増加を考慮すると、鉄濃度の上昇に伴う水柱一次生産力の増加はさらに大きいものと考えられる。

## 4. 自然蛍光法による一次生産力の連続モニタリング

植物プランクトンが吸収した太陽光エネルギーの一部は光合成に使われず自然蛍光として海水中に放出されることから、その裏返しとして吸収した光エネルギーと自然蛍光から光合成活性を見積もることが可能である。この方法では、光吸収係数、光合成および蛍光の量子収率、光飽和定数が見積りに必要であるが、環境変動の激しい沿岸域ではこれらの諸係数も大きく変動するためこれまでこの方法は沿岸水には適用できないとされてきた。そこで、岩手県大槌湾で得られた結果をもとに沿岸域での自然蛍光法を検討した。

まず、光吸収係数はクロロフィル  $a$  に伴い変化することを明らかにし、両者の関係を定式化した。次に、光合成と蛍光の量子収率の比の最大値は、冬-春季ではクロロフィル  $a$ 、晩春-夏季ではクロロフィル  $a$ 、水温に依存して変化していることを見いだした。さらに光飽和定数が冬-春季では変動は小さく一定と見なせ得ること、晩春-夏季では水温、光履歴に依存することを明らかにした。これらの結果をもとに自然蛍光法から一次生産を見積もるためのアルゴリズムを開発した。沿岸域では、植物プランクトン組成と現存量が大きく変動することが係数を決定する上で問題となっていたが、クロロフィル  $a$  を説明変数とした定式化によりその影響を組み込むことができた。この方法から得られた一次生産は $^{14}\text{C}$ 取り込みから求めた一次生産と良い相関を示した。

#### 5. 岩手県大槌湾における植物プランクトンおよび養殖ワカメの一次生産力

ワカメなどの海藻養殖では収量は海水中の栄養塩濃度に大きく依存する。このため天然の植物プランクトン群集と栄養塩消費において競合する。この観点から本研究で開発した自然蛍光法により求めた植物プランクトンの一次生産量と、養殖ワカメのそれと比較した。観測はワカメ養殖が行われる冬-春季にかけて行った。

養殖ワカメの一次生産は穿孔法によるワカメ葉体の成長速度から得た一次生産と漁協による湾内ワカメ収穫量の記録から見積もった。観測期間中の養殖ワカメの一次生産は、総計 49.5 tonne C であり、これは植物プランクトン一次生産の約 38 分の 1 と低いことが明らかとなった。一方、養殖ワカメの一次生産のうち 19%が未枯れとして湾内の粒子態有機物の供給源となっていることが明らかになり、溶存態として排出される有機物とともに湾内の食物網に重要な役割を果たしていることが明らかになった。

以上、本研究によりこれまで知見の乏しかった植物プランクトン群集の光合成光利用特性の時空間分布とその変動要因が明らかになり、北太平洋亜寒帯域では全体的に低い鉄濃度により光合成活性、一次生産力が低下していたことが示された。さらに、自然蛍光法により外洋域に加え沿岸域においても一次生産の連続モニタリングが可能になった。一次生産の光生物学的モニタリング手法として励起蛍光法の開発が進められているが、自然蛍光法では消費電力がより小さく、センサー部の劣化を受けにくいため長期係留手法として適しており、今後海洋における利用がすすむものと期待される。