

学 位 論 文 題 名

養殖ノリ色落ち原因珪藻 *Eucampia zodiacus* の
大量発生機構に関する生理生態学的研究

学位論文内容の要旨

瀬戸内海東部に位置する播磨灘ではノリ養殖が盛んに行われており、ノリ養殖は兵庫県瀬戸内海海域における漁業生産の約半分、生産金額で約 4 割を占める重要な漁業種類となっている。本海域では 1990 年代半ば以降、ノリ養殖漁期に珪藻の一種 *Eucampia zodiacus* がほぼ毎年のように大量発生するようになり、深刻な色落ち被害が頻発している。本研究は、播磨灘において *E. zodiacus* がなぜ近年になって毎年大量発生するようになったのか、また本種が大量発生した場合、なぜ甚大な色落ち被害が発生するのか、そのメカニズムを解明し、本種によるノリの色落ち被害軽減に向けた基礎資料を得ることを目的として実施した。その主な内容は次の通りである。

第 I 章は序論として、播磨灘におけるノリ養殖の歴史的経緯や生産の推移、珪藻による色落ち被害の発生状況について述べ、1990 年代半ば以降、深刻な色落ち被害が頻発していることを示した。

第 II 章では 1973～2007 年までの 35 か年間、兵庫県水産技術センターが播磨灘において毎月 1 回の頻度で実施してきた海洋観測調査の結果を用い、海域環境と植物プランクトンの長期変動の傾向を明らかにすると共に、当海域における *E. zodiacus* の経年的、季節的な出現特性と環境要因との関係について検討した。その結果、*E. zodiacus* の出現は毎年見られ、1990 年代半ば以降、1～4 月に出現細胞密度が増大する傾向が認められた。これに対して、植物プランクトン全体の細胞密度は 1970 年代～1980 年代前半に高く、1980 年代半ばにかけて減少し、以降はほぼ横ばいであった。植物プランクトンの大部分は珪藻で、1970 年代～1980 年代前半は、*Skeletonema* spp. が出現種の大部分を占めていたが、1980 年代半ば以降は *Chaetoceros* spp.をはじめ他種の占める割合が増大した。35 か年の間、海域環境では冬季の最低水温に有意な上昇と無機態窒素 (DIN) 濃度に有意な低下が検出され、植物プランクトンの長期変動はこのような海域環境の影響を受けており、近年の海域環境は *E. zodiacus* にとって有利に作用していることが考えられた。

第 III 章では、第 II 章で抽出した現場海域における *E. zodiacus* と海域環境との関係をより詳細に解析するため、室内培養実験を通して *E. zodiacus* の増殖に及ぼす光強度、温度、塩分および栄養塩の影響を検討した。培養実験から得られた光強度に対する各増殖パラメータ値を用い、現場海域における *E. zodiacus* の増殖可能水深 (D_l) および $0.5 \text{ divisions d}^{-1}$ の増殖速度を与える水深 ($D_{0.5}$) を算出した。これらの値は、本種がブルームを形成する 2～3 月にかけて上昇した。このことから、表層～底層にかけて分布する本種にとって、水柱内で増殖可能な水深が鉛直的に拡大することは、本種が大量発生するた

めに重要な要因の一つであることが示された。

本種は、温度 5℃ 下では増殖できなかった。本種の増殖は温度 7℃ 以上で見られ、広範な温度、塩分条件下で増殖が可能であった。最大増殖速度は、温度 25℃ と塩分 25 の条件下で 3.0 divisions d⁻¹ と計算され、珪藻の中でも高い増殖速度を有していることが明らかとなった。一方で本種は、現場海域においては、水温が 10℃ を下回る低水温期にブルームを形成することが多い。また、この時期の本種の最大増殖速度は、至適温度条件下 (20~25℃) の 1/3 程度であると推定された。本種の増殖速度は温度の上昇とともに急激に増大することから、近年の播磨灘における最低水温の上昇は、本種の大量発生にとって重要な環境変化であると考えられた。

E. zodiacus の増殖に及ぼす栄養塩 (窒素, リン, 珪素) 濃度と増殖速度の関係は、Monod の式で表すことができ、 K_s 値 (最大増殖速度の 1/2 を与える栄養塩濃度) は、周年を通して播磨灘の DIN と珪酸の月平均値を下回った。また、本種の最小細胞内栄養塩含量は、他の有害赤潮種と比較してかなり低いことが明らかとなった。さらに、*E. zodiacus* は実験に用いた 14 種類の有機態リンを、全て増殖に有効利用することができた。このような栄養塩に対する増殖生理学的特性から、本種は栄養塩レベルが低下傾向にある播磨灘において、他種との栄養塩を巡る競合に有利であることが示唆された。

窒素, リンの取り込みに関する動力学的解析から、*E. zodiacus* の栄養塩取り込み能を最大比取り込み速度 (V_{max}) および V_{max}/K_s 値 (最大比取り込み速度/半飽和定数) により他種と比較した。その結果、*E. zodiacus* は優れた窒素取り込みの能力を有し、それは低水温下においても維持されていることが明らかとなった。

第IV章では、播磨灘において *E. zodiacus* の周年を通じた生活環を明らかにするため、本種の細胞密度と細胞サイズ (頂軸長) の変動を詳細に調べた。4 年間の調査期間を通して、*E. zodiacus* の栄養細胞はほぼ周年観察することができた。また、細胞サイズは $10.8 \pm 0.69 \sim 81.2 \pm 1.4 \mu\text{m}$ の範囲で変動し、サイズの減少と回復には周期性と連続性が見られた。すなわち、本種の細胞サイズは毎年 1 回、秋季に最小サイズとなり、その直後に最大値まで回復した。このことから、本種は至適増殖環境条件下である秋季に二分分裂による活発な増殖を行うのではなく、増大胞子の形成を通じた細胞サイズの回復を図っていることが示唆された。また、本種は休眠期細胞を形成しない、または少なくとも播磨灘の海域環境下では休眠期細胞の形成期間が他種に比べて非常に短い種であることが明らかとなった。

秋季における *E. zodiacus* 特有の生態学的特性に注目し、本種が秋季に細胞サイズを回復した後、ブルームを形成するまでに要した積算日数と、秋季個体群の平均細胞密度の間に負の相関があることを見出した。この両者の関係から、秋季に細胞サイズを回復した個体群を、本種ブルームのシードポピュレーションと見なし、秋季の細胞サイズ回復時期と平均細胞密度をモニターすることによって、その年のノリ養殖漁期における色落ち発生時期の予測が可能であることを示した。

第V章では上記の成果を総括し、本研究から得られた *E. zodiacus* の生理生態学的特性が水温の上昇、DIN の低下といった近年の播磨灘の海域環境によく適応していることを示した。また、本種は海域の栄養塩が枯渇するまで増殖を繰り返し、栄養塩濃度が低下した海域においても栄養細胞のまま長期間生存することが可能であることから、本種が大量発生した海域では他の珪藻の大量発生時に比べて栄養塩濃度の低下が著しく、ほぼ枯渇した状態が長期間継続するために、甚大な色落ち被害が発生することを明らかにした。

以上、本研究では珪藻 *E. zodiacus* の大量発生機構に関わる生物学的特性を明らかにし、それらの知見を基に養殖ノリ色落ち発生時期予察の実用化に道を拓いた。これらの成果は、兵庫県にとって重要な漁業種類であるノリ養殖の色落ち被害軽減に貢献できるものと期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 今 井 一 郎

副 査 教 授 齊 藤 誠 一

副 査 博 士 板 倉 茂 (瀬戸内海区水産研究所

赤潮環境部長)

副 査 准教授 山 口 篤

学 位 論 文 題 名

養殖ノリ色落ち原因珪藻 *Eucampia zodiacus* の

大量発生機構に関する生理生態学的研究

ノリ養殖が盛んな瀬戸内海東部の播磨灘では、1990年代半ば以降、中心目珪藻 *Eucampia zodiacus* が大量発生し、深刻な色落ち被害が頻発するようになった。本研究は、播磨灘において近年なぜ *E. zodiacus* が大量発生するようになったのか、また本種が大量発生した場合なぜ甚大な色落ち被害が発生するのか、そのメカニズムを解明し、本種によるノリの色落ち被害軽減に向けた基礎知見を得ることを目的として実施された。その主な内容は次の通りである。

播磨灘において1973年4月～2007年12月まで、35年間の海域環境と植物プランクトンの長期変動がまず解析されている。植物プランクトン全体の細胞密度は、1970年代～1980年代前半に高く、1980年代前半に減少し、以降はほぼ横ばいであるのに対し、*E. zodiacus* は1990年代半ば以降、出現細胞密度が増大し、季節的には1～4月に細胞密度が高くなる傾向が認められた。この間、海域環境では冬季の最低水温に有意な上昇と無機態窒素 (DIN) 濃度に有意な低下が検出されたという。植物プランクトンの長期変動はこのような海域環境の影響を受けており、近年の海域環境は *E. zodiacus* にとって有利に作用している可能性が指摘されている。

現場海域における *E. zodiacus* と海域環境との関係をより詳細に解析するため、室内培養実験を通して *E. zodiacus* の増殖に及ぼす環境諸要因 (光強度、温度、塩分および栄養塩) の影響が検討されている。本種は、珪藻の中でも高い増殖速度を示し (最大増殖速度 $3.0 \text{ divisions d}^{-1}$)、増殖速度は温度の上昇とともに急激に増大することが明らかにされた。一方、本種は現場海域において低水温期にブルームを形成することから、近年の播磨灘における最低水温の上昇は、本種の大量発生にとって重要な環境変化であることを指摘している。

E. zodiacus の栄養塩濃度に対する増殖応答が検討され、本種の K_s 値 (最大増殖速度の1/2を与える栄養塩濃度) や最小細胞内栄養塩含量は他種に比べて低く、また実験に用いた14種類の有機態リンを全

て増殖に有効利用できることが見出された。また、窒素、リンの取り込みに関する動力学的解析から、*E. zodiacus* は優れた窒素取り込みの能力を有し、それは低水温下においても維持されていることも示された。これらのことから、本種は栄養塩レベルが低下傾向にある播磨灘において、他種との栄養塩を巡る競合に有利であることが示唆された。

播磨灘における *E. zodiacus* の周年を通じた生活環を把握するため、本種の細胞密度と細胞サイズの変動を詳細に調べている。4 年間の調査期間を通して、*E. zodiacus* の栄養細胞はほぼ周年観察することができ、サイズの減少と回復には周期性と連続性が見られたことから、本種の細胞サイズは毎年 1 回、秋季に最小サイズとなり、その直後に最大値まで回復するという興味深い事実が発見されている。以上から、本種は休眠期細胞を形成せず、至適増殖環境条件の秋季に、増大胞子の形成を通じた細胞サイズの回復を図っていることを示した。さらに、本種が秋季に細胞サイズを回復した後、ブルームを形成するまでに要した積算日数と、秋季個体群の平均細胞密度の間に負の相関があることを見出し、この両者の関係を利用して、ノリ養殖漁期における色落ち発生時期の予察手法を確立したことは、水産学上の貢献として高く評価できる。

本研究から、*E. zodiacus* は水温の上昇、DIN の低下といった近年の播磨灘の海域環境によく適応した増殖特性を有し、海域の栄養塩が枯渇するまで増殖を繰り返す種であることが示された。また本種は、栄養塩濃度が低下した海域においても栄養細胞のまま長期間生存することが可能であることから、本種が大量発生した海域では栄養塩の枯渇した状態が長期間継続し、その結果、他の珪藻の大量発生時に比べて甚大な色落ち被害が発生することを明らかにしている。

以上、本研究では *E. zodiacus* の大量発生機構に関わる生物学的特性を明らかにし、それらの知見を基に養殖ノリ色落ち発生予察の実用化に道を拓いた。これらの成果は、瀬戸内海東部海域において基幹漁業の一つであるノリ養殖の色落ち被害軽減に大きく貢献できるものと期待される。よって審査員一同は申請者が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。