

仙台湾におけるダイオキシン類の収支と生物濃縮に関する研究

(Mass balance and bioaccumulation of major dioxins in Sendai Bay)

奥村 裕 (東北区水産研究所)

ダイオキシン類は内分泌攪乱作用が疑われる有害化学物質であり、魚介類を通じた人体への蓄積が懸念されている。そのためゴミ焼却場などから排出されるダイオキシン類は、法律により排出量が規制された。しかし、現在も水田土壌から高濃度検出されており、河川などを通じた海洋環境への汚染、そして魚介類への生物濃縮が危惧されている。そこで、危機管理の観点から、陸上～沿岸海域におけるダイオキシン類の動態を明らかにすることが求められた。本研究では、仙台湾において海洋食物連鎖を通じたダイオキシン類の蓄積特性や、仙台湾に隣接する宮城県からの流入起源を明らかにし、ダイオキシン類の収支と生物濃縮に関する動態を解析した。本論文の内容は以下のようにまとめられる。

1. 仙台湾の環境試料や魚介類中のダイオキシン類濃度を調べ、主な流入起源が農薬(クロロニトロフェンとペンタクロロフェノール)の不純物であることを明らかにした。仙台湾で優占したダイオキシン・ジベンゾフラン異性体は無脊椎動物に対し食物連鎖を通じ生物濃縮しやすく、一方魚類に対し生物濃縮しにくいこと、またコプラナー PCB は生物種を問わず生物濃縮しやすいことを明らかにした。全長が11.7~36.6cmのヒラメは、ダイオキシン・ジベンゾフラン濃度と体長との関係が明確でないのに対し、コプラナー PCB 濃度と体長は正の相関があり、ヒラメの成長にともないコプラナー PCB が蓄積することを明らかにした。

2. 海底土の柱状試料からダイオキシン類の歴史変遷を調べ、穀倉地帯である宮城県では過去に多くの農薬が使用され、堆積年代に関わらず農薬起源のダイオキシン異性体が優占すること、堆積したコプラナー PCB は PCB 製品起源の割合が焼却灰起源に比べ高いことを明らかにした。ダイオキシン類の堆積量は分析を開始した1930年代から徐々に増加し1980年代後半に最大となり、その後減少したことを明らかにした。陸上では1970年代に、起源となる農薬や PCB 製品の使用量がピークとなったことから、陸上に投入されたダイオキシン類が仙台湾海底へ堆積するまでに、10年以上かかることがわかった。

3. 仙台湾に注ぐ一級河川水のダイオキシン類濃度を調べ、仙台湾の環境試料と同様に、主な起源が農薬の不純物であること、4つの一級河川の中で旧北上川

からの流入量が最も多いことを明らかにした。また河川水量との関係を調べ、増水時に多くのダイオキシン類が仙台湾へ輸送されることが明らかとなった。河川水量の増加に伴い懸濁粒子量も増加しており、増水時に川底や水田に堆積していたダイオキシン類が再懸濁して仙台湾へ流入するメカニズムが示唆された。

4. 宮城県内に投入された農薬起源のダイオキシン量を算出した。3種類の異性体(1,3,6,8-と1,3,7,9テトラクロロジベンゾ-p-ダイオキシン, オクタクロロジベンゾ-p-ダイオキシン)は農地へ計30.7t投入され、農薬の使用開始から40年以上経過した2000年代になっても、総投入量の約半分(17.4t)が分解されずに陸上に残存することを示した。一方、河川からの総流入量は約0.24tと計算され、仙台湾への流入量は農地への総投入量の1%弱とわずかであることを示した。仙台湾におけるダイオキシン類の年間収支を算出し、河川からの流入量のうち、約3kg/年(33%)が海底に堆積し、3.2g/年(0.04%)が有用魚介類に蓄積し、約6.2kg(68%)が湾外へ流出することを示した。

以上から、分解されずに陸上土壌に残存する農薬起源のダイオキシン類は今後も継続的に仙台湾へ流入するが、河川がボトルネックとなり流入量が制限されること、また流入量の多くは海底へ堆積するか湾外へ流出し、魚介類への蓄積は極めて少なく、将来的にもダイオキシン類が水産資源に及ぼす影響は低いと予測した。

亜熱帯海域における資源造成：シロクラベラにおける種苗放流技術の開発

佐藤 琢

(西海区水産研究所亜熱帯研究センター石垣庁舎)

河端雄毅(長崎大学 水産・環境科学総合研究科)

奥澤公一(増養殖研究所南勢庁舎)

浅見公雄

(瀬戸内海区水産研究所海産無脊椎動物研究センター)

小林真人

(西海区水産研究所亜熱帯研究センター八重山庁舎)

山田秀秋

(西海区水産研究所亜熱帯研究センター石垣庁舎)

福岡弘紀

(西海区水産研究所亜熱帯研究センター石垣庁舎)

與世田兼三(西海区水産研究所長崎庁舎)

武部孝行

(西海区水産研究所亜熱帯研究センター八重山庁舎)

平井慈恵(増養殖研究所志布志庁舎)

秋田雄一(沖縄県水産海洋研究センター石垣支所)

名波 敦

(西海区水産研究所 亜熱帯研究センター石垣庁舎)

太田 格 (沖縄県水産海洋研究センター)

鈴木伸明

(西海区水産研究所 亜熱帯研究センター石垣庁舎)

千村昌之 (北海道区水産研究所釧路庁舎)

青沼佳方

(西海区水産研究所 亜熱帯研究センター石垣庁舎)

加藤雅也 (水産総合研究センター本部)

澁野拓郎 (増養殖研究所 横須賀庁舎)

照屋和久

(西海区水産研究所 亜熱帯研究センター石垣庁舎)

資源状態を改善する有効な手段として、間接的に資源の増加を図る漁業管理や育成場の造成・保護とともに、直接的に資源の増大や安定化を目指す種苗放流を行う「栽培漁業」が挙げられる。しかし、これまで熱帯、亜熱帯域において種苗放流によって資源添加、資源造成に成功した事例はなく、熱帯、亜熱帯域における栽培漁業の効果は明らかにされていない。シロクラベラ *Choerodon schoenleinii* は沖縄県で経済価値の高い水産資源であるが、近年、資源量は減少傾向にあり、早急な回復が望まれている。そこで西海区水産研究所 亜熱帯研究センターでは、栽培漁業による本種資源の回復を目標に、熱帯・亜熱帯域における効果的な種苗放流技術の開発に取り組んできた。本稿では一連の研究によって得られた知見を整理し、本種をはじめとした、熱帯・亜熱帯域において低位水準にある沿岸資源の回復・維持管理方策について考察した。本研究では、まず体サイズの異なる種苗を放流することにより資源造成を試み、その中で本種の種苗放流による資源造成を阻む主要因として浮上してきた「被食」を如何にすれば軽減できるかについて、水槽実験やバイオテレメトリーを用いた放流実験によって調べた。その結果、1) 種苗サイズの大型化や2) 放流前の基質や巣穴への馴致、3) 放流前の捕食者の学習が被食の軽減に有効であることが明らかになった。次に、より簡便に低コストで種苗放流による資源造成を目指す手段として、小型種苗放流の有効性について放流実験によって調べた。その結果、1) 放流対象種の初期生態に基づき、適切と判断される体サイズや時期、場所(環境)での放流の重要性、2) 密度効果による放流後の種苗の成長や摂餌等への悪影響を避けるために、環境収容力を考慮した適切な密度での放流が重要であることがわかった。今後、栽培漁業が熱帯、亜熱帯域の沿岸資源の回復へ貢献するには、効果的な放流技術の開発だけでなく、環境収容力の維持・創出や漁業管理といった間接的ア

プローチが同時に並行して行われるべきだろう。

南西諸島海域における仔魚パッチを追跡する手法を用いたクロマグロの初期生態に関する研究

佐藤圭介 (国際水産資源研究所)

クロマグロの漁獲量の約7割を日本が占め、漁獲量の年変動が大きい。漁獲の多くは未成魚であるため、全体の漁獲量が本種の加入変動の影響を受けやすく、クロマグロの加入量は年によっておよそ6から10倍異なることが知られている。このため、本種の加入変動機構を研究することは、資源生態学的にも資源管理方策を検討する上でも重要である。多くの海産魚類において加入の年変動を決定づける時期は産卵されてから加入までの時期と考えられる。加入の年変動機構解明に関する研究は長い歴史を持ち、多くの仮説が提唱され、検証が繰り返されてきた。その過程で次第に解ってきたことは、加入変動は一つのメカニズムや要因で決まっておらず初期生活史を通じて、多くの要素がともに働くということである。その要因は、種によって異なり、同じ種でも年によって異なり、同じ年でも産卵イベントごとに異なるのかもしれない。クロマグロ仔魚の産卵から加入までの初期生活史における減耗、輸送および拡散についての知見は断片的であり、環境要因と関連させた加入量の変動メカニズムは、ほとんどわかっていない。個体が生物環境(食物環境、捕食環境)、物理環境(水温、流況)へ応答し、その結果、生残した個体数を足しあげたものが、その年級の加入量となる。本研究では、仔魚パッチを追跡する、パッチ研究と呼ばれる手法を採用した。連続的に目的生物を採集し、同時に生物的要因、物理的環境も測定することで、より明瞭な環境要因と仔魚の成長・生残との関係の把握が期待できるからである。

本論文は、クロマグロの加入変動機構の理解を深めるために、南西諸島海域において、クロマグロ仔魚パッチを追跡する手法を用いて、パッチの成長と生残と環境要因の関連を明らかにするものである。第2章ではパッチ研究の手法の妥当性、すなわち、クロマグロ仔魚パッチの発見と追跡が可能かについて論じた。第3章では、仔魚期の輸送と分布生態を把握し、適切な観測範囲および黒潮と中規模渦の加入過程における役割を議論した。第4章では、初期生活史において、成長の良否が加入変動に深く関わっていると考えられるので、成長と生残について詳しく述べた。

パッチ発見と追跡ブイのパッチ追跡能力

2004年から2008年の5月、6月において、南西諸島沖で7つのパッチを追跡ブイで標識し、最短28時間か

ら最長171時間、追跡した。これらのパッチには発見順に続き番号で呼称した。追跡した7つのパッチは発見までに平均52回（6から80回）のプランクトンネット曳網を要した。

追跡中のブイの流向、流速と、ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) で観測した流向、流速は、一部 (Patch 4でブイの流速分布がやや左に裾を引いている) を除いて、ほぼ同じ分布を示した。追跡ブイは表層の流れをとらえていたといえる。もし、仔魚が海の流れに受動的に従って輸送されていれば、ブイを追いかけてながらブイ周辺で連続的に採集することで、同じパッチから仔魚が採集できる。実際に、追跡中にクロマグロ仔魚の体長組成の体長モードは経日的に増加した ($0.2 \sim 0.9 \text{ mm day}^{-1}$)。別途、耳石輪紋解析から得られたクロマグロ仔魚期の成長速度は0.25から0.85 mm day^{-1} であり、体長モードから推定した成長速度とほぼ一致した。したがって、仔魚は受動的に輸送されており、一部 (仔魚の採集がとて少なかった Patch 8の追跡2日目) を除くと、全てのパッチの追跡に成功し、同じパッチから連続してクロマグロ仔魚を採集できたといえる。

輸送、分布生態

パッチ追跡中の適切な観測範囲、観測方法を把握する目的で、パッチの水平的な大きさを、小規模 (数百 m ~ 1 km) から中規模 (~ 20 km 四方) のスケールでとりまとめた。パッチは複数のコホート (同じ日に孵化した発生群) で構成されていた。バリオグラム (variogram) を用いて、仔魚分布の空間構造を把握した。バリオグラムのパラメータの一つであるレンジ (観測点間の仔魚密度の相関が無くなる距離で、本研究ではパッチの水平的な大きさの指標とした) は追跡中に有意に変化せず、DAHが進んでも有意に変化しなかった。典型的には15 km 四方程度の範囲にパッチは広がり、少なくとも数日から1週間程度は、輸送されている途中のパッチの空間構造は安定的であったと考えられた。安定的であったとは、詳細な水平分布はそのときの外的要因 (海況や捕食) により変容するものの、平均15 km 四方程度の範囲で全体としてまとまりを失わないことと考えられる。

クロマグロ仔魚の鉛直分布については、混合層 (水深50 m まで) のより上層にのみクロマグロ仔魚は分布し、明瞭な日周鉛直移動性は示さなかった。パッチを構成する仔魚個体は、産卵海域に分布する中規模渦 (半径100から500 km) の流れに従って、ともに輸送されると考えられた。この渦は産卵海域をゆっくりと西進 (1日あたり8 km 程度) し、そのうちのいくつかは黒潮に融合する特徴がある。産卵海域と1000 km 北方に

存在する加入域は黒潮によってリンクされている。以上から、パッチをとらえたとしたら、7.5 km おきにサンプリングするのが適当であろう。パッチ全体を観測する必要があるれば、30 km 四方程度を観測範囲とするべきである。また、本研究で用いた空間統計学的手法で仔魚密度の等密度線を描画し、観測海域の仔魚密度を推定するには、一日の観測点は少なくとも7点、もしくはそれ以上が望ましく、ラグを同一とするために観測点間距離は一定とするのが望ましい。

初期成長と生残

クロマグロ仔魚は昼夜で体長組成が明瞭に異なっていたので、ネット逃避が起きていたといえる。また、プランクトンネットの目合いによる体長組成も有意な違いを示したので、ネット逸出もおそらく起きていると考えられる。これらのことから、仔魚採集密度はネット逃避とネット逸出を考慮して補正する必要がある。

環境要因はパッチ間で大きくばらついた。水温は南西諸島沖のクロマグロの産卵期の表面水温の範囲をカバーしている。食物密度は既報と類似した値であった。従って、環境要因と仔魚の成長の関係を把握する目的に、得られた環境要因のデータは適切といえる。これらのデータを用いて行った GLM (一般線型モデル) 解析により、仔魚の成長 (耳石径 (OR), 耳石の成長速度 (GR)) と水温、成層強度指数 (水温と塩分の鉛直プロファイルから得られる。水柱を一様にするエネルギーで、大きいほど水柱の成層が強い)、食物密度との関係を把握した。水温と食物密度は OR , GR に対して正の有意な効果を持ち、STP は OR に対してのみ正の効果があった。この解析で得られた回帰式を用いたところ、SL 6.0 mm まで成長する日数に場合によって1日の違いが生じる可能性が示唆された。環境要因の違いによってもたらされた成長の1日の遅れは、捕食に弱い仔魚期が長くなることにつながるため、生残に負の影響があるといえる。

全てのパッチで大きな耳石径と速い成長速度を示す仔魚ほど生残率が高かったと考えられた。DHA7以降の早い時期から体サイズ選択減耗 (小さい個体がより減耗する傾向がある) と成長速度選択減耗 (成長の遅い個体がより減耗する傾向がある) がみられ、日齢が進むに従って、その傾向がより明瞭になってきた。クロマグロは仔魚期において、その早期から、高成長が高生残をもたらすと考えられる。

飼育したカレイ科魚類の変態期に発現する形態異常とその防除に関する研究

有瀧真人（西海区水産研究所）

異体類の多くは、有用な水産資源として沿岸漁業や養殖漁業に深く関わっており、栽培漁業の対象種としても取りあげられてきた。代表的なヒラメやマコガレイをはじめ、わが国において種苗生産が試みられた異体類は12種にもおよぶ。しかし、どの種類においても白化や両面有色に代表される体色異常ならびに眼位や頭部骨格などに現れる形態異常が多発し問題となっているのに加え、その要因や発現機構については、ヒラメなどごく一部の種を除いて十分な検討がなされていない。本研究は、特に形態異常が多発するカレイ科魚類について基礎的な知見を収集し、それらをもとに形態異常の発現の機序や防除方法を明らかにすることを目的とした。

第1章. 飼育したカレイ科魚類の変態に関わる形態異常

カレイ科魚類をふ化仔魚から人工環境下で飼育した場合、多くの種で変態期に形態異常魚が高い頻度で出現し、種苗生産の現場において大きな問題となっている。

本章では、マガレイやホシガレイを中心にカレイ科魚類8種について有眼側と無眼側の眼位、体色、上顎、胸鰭、両顎歯、鱗を測定・観察し、天然魚と比較することにより、形態異常魚にどのような変化が生じているかを検討した。その結果、全ての魚種において変態後の形態は、正常魚、白化魚（2タイプ）、両面有色魚の4タイプに区分することが可能であった。また、それらの両体側形質の比較から、正常魚は天然魚と同様の変態を完了しているのに対し、白化魚は両側が無眼側の形態に、両面有色魚は両側が有眼側の形態に変態していることが明らかとなった。このことから、本研究で取り上げた仔魚期の形態異常は変態に関連した異常、すなわち“変態異常”であると結論づけた。

第2章. 飼育したカレイ科魚類における変態異常発現の決定時期

変態異常を防除するには、その発現にどの発育期が最も深く関わっているかを解明することがきわめて重要である。異体類の中で、変態異常に関する試験・研究が先行して行われているヒラメでは、ブラジル産アルテミア（BA）を給餌することにより、ほぼ全ての個体が白化魚になることや、変態始動期の発育ステージにおいて最もその感受性の高いことが明らかにされている。

本章では、マガレイとホシガレイをモデル魚種とし

て、BAの給餌開始時期を変えて飼育を行い、白化魚の出現状況からカレイ科魚類における変態異常発現の決定時期を検討した。その結果、上記両種はBA給餌によって90～100%の個体が白化魚となった。また、BAを給餌した影響は、マガレイでは全長8mm、ホシガレイでは全長10mmまでであり、影響を受ける発育期は両種ともステージE（変態初期）までであると判断された。すなわち、両種ともにステージF以降の仔魚では変態異常の発現は決定しており、ステージE以前がカレイ科魚類の変態異常発現にとって重要であると考えられた。

第3章. 飼育したカレイ科魚類の変態異常と仔魚の成長および発育

異体類種苗生産のモデル種であるヒラメでは、変態異常に関して様々な研究が行われ、その発現の機序についても部分的に解明が進められている。しかし、カレイ科魚類では体系的な研究はこれまで全く行われていない。

本章では、カレイ科魚類における変態異常の出現機序の一端を明らかにすることを目的に、ふ化から変態までの時間が大きく異なるマガレイ、ホシガレイ、ババガレイの仔魚をそれぞれ6～24℃の水温下で飼育し、変態異常魚の出現状態と発育・成長の関係について検討した。上記3魚種ではともに、飼育水温の上昇に伴い発育・成長が促進された。その相対的な速度はマガレイ、ホシガレイ、ババガレイの順に早く、既存の知見に合致した。正常魚、白化魚、両面有色魚の出現率と飼育水温の関係は、種ごとに特有の傾向を有し、再現性もきわめて高かった。このうち正常魚の出現率が最も高くなる着底までの日数は、マガレイで最も早く、ホシガレイ、ババガレイの順に遅くなった。これら着底日は耳石微細輪紋より推定されている天然魚の値に近似した。このことから、変態異常の発現は、飼育環境では発育・成長過程が天然魚と大きくずれることに一因があると推察された。

第4章. 水温を変えて飼育したカレイ科魚類の甲状腺ホルモンの動態

ヒラメや summer flounder では、甲状腺ホルモンが変態を制御していることが解明されている。異体類における白化や両面有色等の外部形態的異常が変態時の左右不相称化の異常と考えられることを先に述べたが、変態そのものが甲状腺ホルモンによって制御されている以上、これらの現象にも同ホルモンが関与していると予想される。

本章では、異なる水温で飼育したカレイ科魚類の変態期における甲状腺ホルモンの動態を詳細に観察する目的で、マガレイとホシガレイの3, 5, 3⁻トリヨー

ドチロニン (T3) およびチロキシシン (T4) の体組織中濃度を測定した。その結果、各水温の T3 の動態は 2 魚種とも全体に低いレベルで推移し、水温との関係が明瞭でなかったが、T4 は両種とも高水温ほど最大値が低くなる傾向が認められた。また、組織中の T4 濃度は仔魚の発育進行に伴って有意に変動し、すべての水温区において変態期間中にピークを示した。さらにそれらは高水温ほど早期に認められた。甲状腺ホルモンが、飼育魚の変態後の形態の決定に関与しているとする、白化や両面有色の出現動態は、これら組織内の濃度もしくは、ピークの時期に大きく影響されている可能性が高い。

第 5 章. カレイ科魚類の変態異常の防除と発現の機序

本研究において、変態期に発現するカレイ科魚類の形態異常は変態の異常であり、その出現状況は飼育水温によって種ごとに異なることを明らかにした。また上記変態異常は、飼育魚の発育・成長が天然魚とは異なるために発現すると結論づけた。ヒラメでは変態が甲状腺ホルモンによって制御されていることが確認されており、他の異体類においても甲状腺ホルモンが変態

を制御する上で主要な役割を果たしていることはほぼ間違いないと考えられる。本研究でも異なった水温で飼育したマガレイとホシガレイでは、T4 の分泌ピークや時期が発育に連動して異なることを明らかにし、その動態と変態異常出現の関連が強く示唆された。著者は、ホシガレイとヌマガレイを用いて仔魚の T4 浸漬試験を行い、浸漬のタイミングによって変態異常の出現に一定の傾向が生ずることを明らかにしつつある。カレイ科魚類の変態後の形態は、おそらく種ごとに異なった発育速度と T4 分泌のタイミングによって決定されており、そのずれが変態異常を発現させるのではないかと推定される。

したがって、カレイ科魚類の変態異常を防除するためには、対象種の初期生態を精査し、その種の発育・成長特性に従って飼育することがきわめて重要であると考えられる。また、変態異常の防除技術を一層進展させるためにも、遺伝子レベルでの変態機構の解明など、今後はその機序をさらに多面的に詳しく検討していくことが求められる。