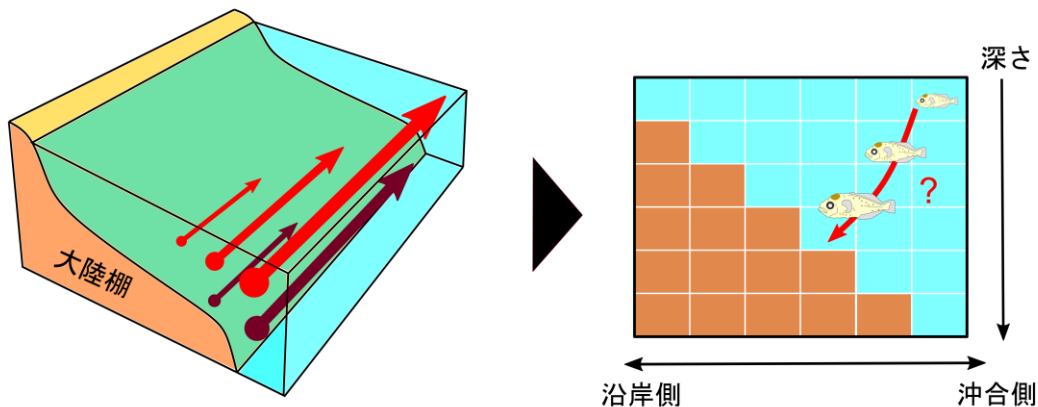


仔稚魚の動きを可視化する「階段チャート」

—東シナ海のマアジの分散過程を解明—

概要

京都大学白眉センター坂本達也特定助教、大学院人間・環境学研究科武藤大知修士課程学生（研究当時）、石村豊穂教授、水産研究・教育機構からなる研究グループは、生まれて間もない海水魚の大陸棚上での移動経路を、個体ごとに復元する手法を開発しました。小さな仔稚魚の分散は個体群の維持やつながりを左右する重要な過程ですが、その動きを野外で直接追跡することは困難です。本研究では、魚の内耳にある耳石の高度な化学分析、海洋環境モデルおよび確率的な解析手法を組み合わせ、大陸棚環境を圧縮して断面として表現し、その中での移動を推定する、「階段チャート解析」を構築しました。この手法を東シナ海のマアジに適用した結果、深さ方向と沖合・沿岸方向の移動を同時に推定することに成功しました。その結果、成長の速い個体は沿岸側に移動して滞留し、他の個体は黒潮流路内にとどまり北方へ輸送されるなど、複数の分散戦略の存在が明らかになりました。これらの結果は、魚が流されるだけでなく、自らの行動によって移動範囲を調整している可能性を示唆します。本手法は魚類の初期分散過程の理解を前進させ、水産資源変動の仕組みの解明に貢献することが期待されます。本研究成果は、2026年4月30日に日本の国際学術誌「*Fisheries Oceanography*」にオンライン掲載されました。



階段チャート解析の概要：大陸棚上の海洋環境を数枚の断面に圧縮し、その中での魚の動きを捉える

作成：坂本達也

1. 背景

海の魚は多くの浮遊性の卵を生み、孵化した仔稚魚は海流によって広く分散します。この分散は個体群同士のつながりや資源量の変動に大きく影響し、特に死亡率の高い仔稚魚期では、適した生息環境に到達できるかどうかは個体の生残を左右します。生物生産性の高い大陸棚は多くの魚にとって重要な生息場であり、仔稚魚がこの環境にとどまれるかどうかは資源への加入の成否を決定づけると考えられています。従来、仔稚魚の分散は主に海流による受動的な輸送で説明されてきましたが、近年では遊泳行動などの能動的な移動が分散に影響する可能性も指摘されています。しかし、野外環境において長期間にわたり個体レベルの移動を追跡することは極めて困難であり、その検証は進んでいません。

東シナ海に生息するマアジでは、黒潮の強い流れの影響により多くの仔魚が下流域へ輸送されてしまうと考えられています。同海域内で再生産を維持するためには、仔稚魚がそこに滞留する仕組みの存在が必要です。成長に伴って生息深度を深くしていく鉛直移動はその一つと考えられてきましたが、水平移動を含めた分散過程の全体像は明らかになっていません。近年、経験した水温を指標する耳石の酸素安定同位体比の分析の高度化に伴い、これをもとに魚の移動履歴を推定し、実際の分散の過程を復元できる可能性が出てきています。しかし現状は水平または鉛直のいずれかの方向に限定した推定に留まっており、三次元的な移動を捉えるために新たな枠組みの構築が求められていました。

2. 研究手法・成果

本研究では、耳石の酸素安定同位体の高解像度分析と海洋環境モデルを統合し、魚の移動を復元する新しい解析手法「階段チャート解析」を開発しました。本手法の特徴は、大陸棚の海洋環境を水深と海底地形に基づく格子状の断面（階段チャート）として表現し、その中で魚の位置を確率的に推定する点にあります。各格子では、水温と塩分の情報から理論的な同位体値を計算し、観測された耳石の同位体値と一致する度合いに基づいて、その場所に存在した可能性を評価します。さらに、魚の移動が時間的に連続するという性質を取り入れるため、確率的な状態遷移モデル（隠れマルコフモデル）を導入し、前後の時点の情報を統合して位置の推定精度を高めました。これにより、各時点で独立に位置を推定するのではなく、時間を通じて一貫した移動履歴を復元することが可能となりました。また、移動可能な距離や方向に現実的な制約を与えることで、実際の遊泳能力や海流場に整合した推定を実現しています。従来、耳石の同位体分析に基づく移動推定は、水平方向または鉛直方向のいずれかに限られることが多く、両者を同時に扱うことは困難でした。本手法は、環境情報を断面空間に集約することでこの制約を克服し、三次元的な移動を統合的に推定できる新しい枠組みです。

本手法を東シナ海のマアジの稚魚12個体に適用した結果、すべての個体が東シナ海南部の大陸棚外縁部にある産卵場付近の表層に由来することが示されました。その後の移動経路には明瞭な分岐が見られ、南部にとどまった個体は比較的早い段階で沿岸側および深い層へ移動していました。一方、北部で採集された個体は、大陸棚外縁の強い流れの中により長く留まり、そのまま北方へ輸送される経路をたどっていました。さらに、南部で採集された個体は初期成長速度が速い傾向にあったため、成長に伴う遊泳能力の向上によって、個体が水平方向の位置を選択し、結果として分散範囲を調整している可能性を示唆します。すなわち、マアジの初期分散は海流による受動的な輸送だけでなく、個体の行動によっても強く規定されている可能性が示唆されました。

これらの結果は、仔稚魚が成長に伴う遊泳能力の向上によって水平方向の位置を選択し、流れに対する相対的位置を変えることで輸送距離を調整していることを示しています。とくに、沿岸方向への移動は強い黒潮流軸からの離脱を可能にし、東シナ海内での滞留を促進することで、その後の資源への加入を支えていることを示唆します。これらの結果は、魚の初期分散が海流による受動的な輸送だけでなく、成長に伴う行動変化との

相互作用によって決定されることを、個体レベルで示した点に大きな意義があります。さらに、従来重視されてきた鉛直移動に加え、水平方向の移動が分散と加入の過程において重要な役割を果たすことを明らかにしました。本手法は、大陸棚域に生活圏を持つ魚の生活史初期における分散と加入の機構を統合的に理解するための新しい枠組みとして、水産資源の変動機構や個体群連結性の解明に貢献することが期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

本研究で開発した手法は、これまで捉えることが難しかった魚の初期分散と加入の過程を、個体ごとに可視化できる新しい解析基盤です。海の流れと魚の行動を同時に扱うことができるため、生態系の中での個体群のつながりや分散の仕組みをより現実的に捉える手法としての応用が見込まれます。大陸棚は多くの水産重要種にとって重要な生息場であるため、本手法を他の魚種や海域に適用することで、資源量の変動する仕組みの理解や、加入過程の解明に貢献することが期待されます。

一方で、本手法による推定は、海洋環境モデルの再現性や同位体分析の精度に依存しており、これらに由来する不確実性を含みます。特に、水温や塩分の空間分布の再現誤差や、同位体値と環境条件の関係式の選択は、推定される位置に影響を与える可能性があります。また、耳石分析の時間分解能や試料数の制約により、個体間のばらつきやより広い空間スケールでの一般化には限界があります。今後は、分析技術の高効率化やデータの蓄積に加え、異なる手法との比較や統合を通じて、不確実性の評価と低減を進めることが重要です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は JSPS 科研費（科研費番号(21K18653, 22H05028, 22H05029, 23H02288)および水産庁の委託費の助成を受けたものです。

<用語解説>

大陸棚：

大陸の周辺に広がる水深の浅い海域で、光や栄養が豊富なため多くの生物が生息する重要な生態系です。

耳石：

魚の内耳にある小さな石状の構造で、日々の成長に応じて層が形成され、環境の情報が化学組成として記録されます。

酸素安定同位体比：

酸素の質量（16 と 18）の異なる原子の割合のこと。耳石の酸素安定同位体比は水温や塩分などの環境条件に応じて変化するため、魚が経験した環境を推定する手がかりになります。

海洋環境モデル：

海の流れや水温、塩分などの分布をコンピュータ上で三次元的に再現したもので、海の状態やその変化を解析・予測するために用いられます。

隠れマルコフモデル：

直接観測できない状態（ここでは魚の位置）を、観測データと時間的な変化のつながりから確率的に推定する手法です。

加入：

生まれた魚が成長して資源として数えられる段階に加わることで、個体群の維持や増減に大きく関わる過程です。

<研究者のコメント>

この研究は、私の 5 年間の研究の集大成です。全くのゼロからスタートし、試行錯誤を重ね、多くの方々のご

協力のもと、論文として発表できたことを大変嬉しく思います。この研究を通し、プログラミングや海洋環境モデルといった未知の分野の知識を習得することができたことは非常に刺激的で面白い経験でした。本研究成果が、未だ謎の多い魚類の生態解明に貢献し、美味しいマアジの保全に繋がることを心より願っております。
(武藤大知)

魚の経験した水温履歴がわかる耳石の高解像度同位体分析は、世界でも石村研究室以外では実現が難しい高度な分析ですが、実はそのデータの解釈も工夫が要ります。今回の舞台である東シナ海では沖合を流れる黒潮に沿って同じ水温帯が形成されているので、経験水温がわかっても黒潮が流れる方向の分布位置を決めることができません。そこでその方向を諦め、黒潮を横切る断面方向にのみ注目したところ、逆にマアジの動きが綺麗に見えるようになりました。(坂本達也)

<論文タイトルと著者>

タイトル：The staircase chart: visualising vertical and cross-shelf movements and dispersal of early-life fish, applied to Japanese jack mackerel

著者：Tatsuya Sakamoto, Daichi Muto, Motomitsu Takahashi, Chiyuki Sassa, Toyoho Ishimura

掲載誌： *Fisheries Oceanography* DOI：10.1111/fog.70045

※本論文では、坂本達也および武藤大知は等しく貢献した。