

論文の内容の要旨

水圏生物科学専攻
平成 26 年度博士課程入学
氏名 青木良徳
指導教員名 北川貴士

論文題目 北西太平洋におけるカツオの北上回遊機構に関する研究

第 1 章 緒言

カツオ (*Katsuwonus pelamis*) は日本の重要な水産資源であるが、日本周辺での漁獲量は減少傾向にある。本種の北西太平洋集団は、熱帯・亜熱帯海域で孵化後、その海域に留まる滞留群と日本近海へ回遊する北上 (回遊) 群に大別されるため、日本周辺での漁獲量の減少要因の解明と高精度の資源評価には、その基礎として回遊生態、特に北上群の回遊機構を明らかにすることが重要である。回遊など魚類の行動のプロセスは、環境に対する個体の内的な生理状態を介した応答として理解される。そのため、野外での本種の回遊機構を明らかにするためには、個体の経験環境・生物状態・遊泳行動を同時的に計測することが重要である。

本研究では、遊泳深度、水温、腹腔内温度 (体温)、照度を連続的に計測できる小型電子記録計を本種に装着し、回収された記録計より得られた情報を用いて、本種の北上回遊機構をエネルギー収支の観点から明らかにすることを目的とした。まず第 2 章では記録計を装着した本種の放流調査を行い、北西太平洋における北上回遊・鉛直遊泳行動の実態を明らかにした。第 3 章では飼育実験を行い、餌の消化に伴う体温上昇より摂取エネルギーを定量化することを試みた。実験により得られた体温上昇と摂餌量との関係から、野外で計測した体温データより本種の北上回遊に伴うエネルギー獲得量を推定した。さらに第 4 章では記録計に記録された本種の経験水温と第 3 章で推定した獲得エネルギー量を数理モデルに組み込み、北上回遊により獲

得できる産卵エネルギー量を見積もることで、滞留群と比較しながら北上回遊の適応的意義について考察した。第5章ではこれらを総合し、本種の北西太平洋域における回遊の機構について考察した。

第2章 海洋環境がカツオの北上回遊・鉛直遊泳行動に与える影響

北西太平洋におけるカツオの回遊の実態を把握するために、2012～2015年2～3月に亜熱帯海域、2013～2015年5～7月に房総半島沖から、腹腔に電子記録計を装着した合計1251個体（尾叉長：38～49 cm）を放流した。再捕された76個体（再捕率6.1%）のうち、放流日に再捕された個体、記録計が不具合であった個体を除く41個体から得られたデータの解析を行った。照度の記録から放流個体が遊泳していた経緯度を推定したところ、2月～9月に20°N付近の亜熱帯海域から40°N付近の三陸沖まで移動していた。その間、3～4月に表面水温は最低値（18.6°C）を示したものの、放流個体は全期間を通じて18°C以下の水域に進入することはなかった。水温の鉛直プロファイルをもとに、放流個体が経験した水温環境をクラスタ分類したところ、遊泳海域の水温構造の特徴と地理的關係から、亜熱帯域、四国東海沖、黒潮内側域、黒潮系暖水域、親潮系冷水域、これらの海域の境界付近に出現した海域の合計6海域に分けられた。低緯度海域（亜熱帯域・四国東海沖・境界海域）では表層混合層の発達が認められ、放流個体も混合層内を幅広く遊泳していた。一方、高緯度海域（黒潮内側域、黒潮系暖水域、親潮系冷水域）では表層水温は亜熱帯域と同程度であったが、表層付近より水温躍層が発達し、致死水温と考えられる18°Cの水深は低緯度海域に比べ浅い深度に分布していた。それに伴い放流個体の遊泳水深も一日の大半が表層に限定されていた。

平均体温は、表層から一時的に水温18°C以下の水深へ潜行した場合でも、水温より高く保たれていた。数理（熱収支）モデルを用いて魚体の全熱交換係数を推定し得られた値を潜行・浮上時と比較したところ、高緯度海域では、浮上時のほうが潜行時に比べて約2～3倍高い値を示し、高緯度海域（約1.5倍）よりも大きくなった。このことから本種は、低水温環境下への潜行時には体温の低下を抑制し、浮上時には表層水温の熱を素早く体内に取り込むことで体温を回復させる体温調節機能を有しており、とくに高緯度海域の低水温環境下では、その能力を発揮しながら質の高い餌の獲得を可能にしていると考えられた。

第3章 カツオの北上回遊に伴う獲得エネルギーの変化

回遊中のエネルギー収支を見積もるために飼育実験を行い、摂餌に伴う体温上昇より摂餌量の定量化を試みた。2012年11月に鹿児島県奄美大島久慈湾に設置された生け簀で、記録計を装着した22個体（尾叉長：38～46 cm）を10日間飼育した。回収された記録計から体温変化を調べたところ、摂餌後、急激に上昇し、その後数時間かけて徐々に給餌前のレベルまで減少

する一連の消化に伴う体温変化が認められた。摂餌による体温上昇量を定量化するために、絶食時の体温を熱収支モデルにより推定し、実測値と推定値との差を積算することで、摂取エネルギー量を算出した。これを用いて野外で放流した個体の摂取エネルギーを海域ごとに比較したところ、北上回遊に伴い摂餌量は増加し、亜熱帯域では一日当たりの平均摂取エネルギーが 134 kcal であったのに対し、親潮系冷水域では 213 kcal となった。水平・鉛直的な移動距離、海域における経験水温をもとに、移動に要したコストを推定し、回遊中の余剰エネルギー（摂取エネルギーと消費コストの差）を算出したところ、余剰エネルギーは亜熱帯域（平均水温 24°C）において、一日当たり 1 kcal であったのに対し、四国東海沖（平均水温 19°C）では 39 kcal、親潮系冷水域（平均水温 22°C）では 108 kcal とさらに増大した。四国東海沖では低水温下で代謝速度が抑制されたこと、親潮系冷水域では摂取エネルギーの増加に加え、鉛直移動にかかるコストが低下したことが主な要因であると考えられた。とくに黒潮域以北での高エネルギーの獲得は、成長や体内へのエネルギーの蓄積を促進すると考えられた。

第 4 章 北上回遊群・滞留群の獲得生殖エネルギーの算出

カツオの北上回遊の生態学的意義について、北上群の産卵に要するエネルギーを Dynamic Energy Budget モデルと呼ばれる数理モデルを用いて検討した。このモデルでは、一度体内に蓄積された摂取エネルギーが体成長と発達に一定の割合で配分され、各部に配分されたエネルギーは生命維持に優先的に消費されて、余剰が体成長の増加、発達の促進に使われるように設計されている。計算に必要な各種パラメータを、既往研究で報告されている孵化時間・成長曲線・体長体重関係・バッチ産卵数などの情報をもとに計算値と実測値との差が最小になるよう Nelder-Mead 法により推定した。計算条件として北上群と滞留群で孵化後 360 日間は同一の水温・餌環境とし、その後北上群のみ野外放流調査の結果から得られた水温・摂餌量の情報を与え、620 日後からは再び同一環境とした。計算の結果、北上群の成長は、回遊の開始当初は低水温環境のために滞留群より低かったが、黒潮域以北まで北上を続けることでその海域での高水温と豊富に存在する餌料により、550 日以後に滞留群を上回った。産卵数についても、680 日以後に滞留群よりもわずかではあるが高くなった。以上から、本種は北上回遊を行うことで熱帯・亜熱帯海域に滞留するよりも高い生殖エネルギーを得ていることが示唆された。

第 5 章 総合考察

本研究では、カツオに装着した電子記録計に記録された情報を解析することにより、北西太平洋における本種の水平・鉛直的な空間分布の変化を水温・餌環境に対する内的状態を介した応答行動として捉えることができた。また、得られた情報をもとに生活史全体を網羅したエネルギー収支モデルを構築することで、本種の北上回遊の適応的意義を検討した。いずれの成果

も、本種の適正な資源管理に向けての生態学的基礎をなすものと考えられる。

本研究の結果から北西太平洋における本種の北上回遊の生態的な意義は以下のように想定される。熱帯・亜熱帯海域は貧栄養で餌生物のバイオマスが低いため、本種の餌遭遇率は低くなる。そのためこの海域で高成長を可能にするのは餌獲得能力が高い、体サイズの大きな一部の個体と考えられる。餌獲得能力の低い小型個体は、熱帯の高水温下では飢餓や高い代謝などにより生残率が低下すると考えられるため、生息場を移動せざるを得なくなる。北上回遊の初期は成長速度が低く、移動による利益は小さいように考えられるが、低水温下で代謝速度が抑制されることで余剰エネルギーが増加し、死亡率も低下する。さらに北上回遊した先の黒潮系暖水域、親潮系冷水域のフロント域では、水温躍層が表層付近から発達しているため、本種のみならず餌生物の鉛直分布も表層に制限される。そのため本種の餌遭遇率は上昇し、低い移動コストで高い摂取エネルギーの獲得が可能になる。とくに黒潮域以北まで北上した個体は、表層での高水温・餌環境を経験するため、熱帯・亜熱帯海域へ南下後は体サイズ・産卵数が増加する。回遊群が再び熱帯・亜熱帯域に戻って産卵を行うことで、この海域での本種の生息密度は高まり餌密度が低下する。その結果、個体の餌遭遇率は低下し、餌を獲得できない小型個体は他海域へ移動することになる。この一連の機構が継続することで、種全体で見ると北上回遊が経年的に繰り返されると推察される。