

# 学位論文審査結果の報告書

氏 名 伊 奈 佳 晃

---

生 年 月 日 (昭和)・平成 62年 9 月 7 日

本 籍 (国籍) 兵 庫 県

---

学位の種類 博 士 ( 農 学 )

学位記番号 農 第 197号

学位授与の条件 学位規程第5条該当  
(博士の学位)

論 文 題 目 クロマグロ仔魚の沈降死発生メカニズムに  
関する研究 (Mechanism of sinking death in Pacific  
bluefin tuna larvae)

---

## 審 査 委 員

(主 査) 滝井健二



(副主査) 塚正泰之



(副主査) 高木 力



(副 査) 光永 靖



(副 査) 鳥澤眞介



## 論文内容の要旨

近畿大学はクロマグロの完全養殖技術の開発に既に成功したが、仔稚魚および幼魚期における初期減耗を如何に低減させるかが技術開発当初からの課題となっている。なかでも、ふ化後10日齢までにみられる、本種の仔魚期に多発する沈降死は初期減耗の主要因の一つとされており、それが原因とされる死亡率は90%に達するとの報告もあり、完全養殖クロマグロの種苗生産を不安定にしている。沈降死とは仔魚が水槽底部で夜間に大量斃死する現象の総称であるが、沈降死が夜間暗所で発生することや対象となる個体が仔魚期のため3-6mmと小さく現象観察が極めて困難であることからその発生メカニズムはいまだに明らかとなっていない。そこで、本論文「クロマグロの仔魚の沈降死発生メカニズムに関する研究」は、種苗生産過程で問題視されていながらも、その発生過程や原因が明らかとなっていない沈降死について、夜間暗所でも観察可能な撮影システムを用いた水槽実験によりその発生過程を把握し、仔魚の遊泳時に必要となる力学的なエネルギーからその発生メカニズムを解明しようとしたものである。

本論文では、まず、沈降死の発生状況を定量化するため深さ3mの直方体水槽を用いて、孵化後2~9日目の個体を対象に夜間鉛直分布の測定と仔魚の形態的特徴の計測が行なわれた。直方体水槽は上層（深度0~100 cm）中層（100~200 cm）下層（200~300 cm）および、水槽底（水槽底に接触した個体）の4つの層に区分され、水槽内に投入された各層の仔魚の鉛直分布状況が測定された。その結果、孵化後4日目以降ではクロマグロ仔魚の夜間鉛直分布は、上層と水槽底に2極化する傾向が確認されている。そして、上層の個体には孵化後3日目以降鰾が膨張した個体が確認されたが、水槽底の個体は観察期間中に鰾が膨張した個体は全く確認されなかった。また上層と水槽底に分布した個体の形態的特徴を計測したところ、上層に分布していた鰾膨張個体と鰾収縮個体の全長および遊泳能力の指標となる尾鰭のアスペクト比は底部に分布していた鰾収縮個体よりも大きくなっており、鰾が収縮して遊泳器官の発達が遅れている個体が水槽底部に沈降しやすい傾向となっていることを著者は明らかにしている。

沈降死の発生に仔魚の遊泳能力が影響を与えている可能性があることから、論文では次に本種仔魚の遊泳能力と沈降死の発生過程との関係を調べるため、水槽内の遊泳行動をステレオカメラにより3次元的に解析している。この解析では、夜間に発生する沈降死を観察可能とするため、暗所下でも撮影可能となる暗視カメラを2器用意し、DLT法により水槽内を自由遊泳する仔魚の3次元遊泳行動を解析し、遊泳速度および遊泳角度（遊泳ベクトルが水平面となす角度）のデータを用いて、沈降死に至った個体の行動の特徴を定量化している。その結果、日中には鰾が収縮して活発に水平方向に遊泳し表層に分布する個体のみが確認された一方で（昼間収縮遊泳）、夜間の撮影では鰾が膨張し遅い速度で遊泳しながら表層に分布する個体と（夜間膨張遊泳）、鰾が収縮し鉛直方向の遊泳行動を頻繁に行うことで一定深度以上を維持する個体（夜間収縮遊泳）と、鰾が収縮し水槽底部へ沈降する個体（夜間収縮沈降）の3つの行動ケースに分類できることを示している。これらの行動を示す個体の行動データから鉛直および水平方向の遊泳速度を解析した結果、昼間収縮遊泳個体は、夜間の個体と比較して遊泳速度が速くなり、

特に水平方向の遊泳速度が速くなっていることを明らかにしている。一方、夜間では、夜間膨張遊泳個体が表層で遅い速度で遊泳して分布していたが、夜間収縮遊泳個体は夜間膨張遊泳個体よりも鉛直方向への遊泳が頻繁であることが解析結果からも確認され、水平方向の遊泳速度については夜間膨張遊泳個体のおよそ2倍大きいことが明らかとなった。この結果は、夜間収縮遊泳個体が夜間膨張遊泳個体よりも深度維持に必要なエネルギーを多く必要としていることを意味しており、鰮の膨張の有無が夜間の遊泳時エネルギーの消費量に大きな差を与え、延いては沈降死の発生リスクに影響を与えている可能性があることを示唆するものとなっている。

仔魚の3次元遊泳行動解析は、個体ごとに細かい時間分解能でその遊泳移動軌跡を取得することを可能としている。これにより、論文ではクロマグロ仔魚が移動に必要な力学的なエネルギーが推定されている。深度維持に必要な遊泳時エネルギーは個体の持つ位置エネルギーと運動エネルギーの和として算定できることから、全長5.0 mmの個体が1分間あたりに必要な遊泳時エネルギーを見積もったところ、日中収縮遊泳個体では $5.62 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ 、夜間収縮遊泳個体では $6.12 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ および夜間膨張遊泳個体では $0.70 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ となり、夜間膨張個体は日中収縮個体に比べて8分の1少なくすむことを明らかにした。このことは、夜間では鰮を膨張させることにより、能動的な遊泳行動行わなくとも仔魚は深度維持を可能とし、摂餌が困難となる夜間に遊泳時エネルギーの消費を低く抑えることを可能とした行動であることを示唆している。また、夜間収縮遊泳個体と夜間膨張遊泳個体を比較すると、前者は後者に比べ8.7倍も遊泳時エネルギーが必要であることを明らかにした。この結果は、エネルギーが補給できない夜間に極めて大きな遊泳時エネルギーを必要としていることを意味しており、暗所下での遊泳実験で夜間鰮収縮個体は深度維持を行うように鉛直移動を頻繁に行っていたという実験観察結果からも予想できる結果である。日中の照度環境と同様にした実験水槽に、飼育水槽から仔魚を移し、無給餌状態でどの程度持続遊泳可能かどうか調べたところ、すべての個体が12時間以内に水槽底部に接触し再び遊泳することはないという実験結果となった。これは摂餌によるエネルギー補給が達成できなかったことにより持続的な遊泳が不可能となったためと考えられたが、この持続遊泳から導き出した個体が持つ遊泳時エネルギー容量は最大で $8.1 \times 10^{-3} \text{ J}$ と見積もられた。既に算出されていた夜間収縮遊泳個体 ( $6.12 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ ) と夜間膨張遊泳個体 ( $0.70 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ ) の単位時間当たりの遊泳時エネルギーから、遊泳時エネルギー容量を用いて夜間収縮遊泳個体と夜間膨張遊泳個体の持続遊泳可能時間を推定した結果、夜間膨張遊泳個体が96時間であるのに対し、夜間収縮遊泳個体では11時間となることを示した。クロマグロ養殖では屋内の種苗生産現場では、夜間に照明を点灯させない時間をおよそ12時間としているため、夜間に鰮が収縮した個体は摂餌が可能な状態となる十分な照度環境が得られないことが考えられ、遊泳により個体が持つエネルギーを使い果たし、遊泳することができずに水槽底に着底してしまう可能性があることを示しており、著者は、この状態のまま斃死に至った過程を種苗生産現場では沈降死としている可能性が高いと推察している。

仔魚が沈降するとき、仔魚水中重量と流体抵抗が釣り合うことによって一定の速度で沈降する。この速度を理論的に算出し、この流速を水槽内に鉛直上方に発生させれば仔魚は沈降することはない。したがって、個体の深度維持に必要な遊泳時エネルギーを低減させることができ、沈降死を防除できることが期待できる。そこで、論文では、これによって導き出された仔魚の沈下速度と同じ大きさの鉛直上向きの一様流れを発生させる実験水槽を用意し、孵化後4, 6, 8日目の鰾収縮個体を水槽内に入れ、流れが仔魚の沈降に与える影響を評価した。仔魚の沈降速度はどの日齢でもおよそ $1.0 \text{ TL s}^{-1}$ であった。この流速以上の流れを与えたところ鰾収縮個体は沈降することなく一定の深度以上を維持することが可能であった。この流速のオーダーは $0.5 \text{ cm s}^{-1}$ であり、これまで報告されていた流速よりも4分の1程度の弱い流れであることがわかった。クロマグロ仔魚の深度維持を支持するには今まで、エアレーションなどによる循環流が種苗生産水槽では与えられていたが、これらの実験から、こうした流れよりも鉛直上向きの弱い速度で一様流を発生させることが重要であることが示された。論文では、このような流れを発生させる種苗生産用水槽が開発されれば沈降死が防除され生残率を向上させることが可能であり、クロマグロの種苗量産化の前進につながるとしている。

## 論文審査結果の要旨

クロマグロ完全養殖の種苗生産では、仔魚期の沈降死による大量斃死は大きな隘路となっており、この問題を克服することが、本種の種苗を安定生産させるための一つの鍵とされていた。沈降死とは仔魚が水槽底部で夜間に大量斃死する現象の総称であるが、対象となる個体がふ化後10日齢までの仔魚期で発生するため、その個体サイズは3-6mmととても小さく、さらに沈降死が夜間暗所で発生することにより、現象観察が極めて困難であることから、その発生メカニズムはいまだに明らかとなっていないというのが現状である。本論文はこの沈降死の発生過程を明らかにしたうえでそのメカニズムを解明しようとしたもので、完全養殖クロマグロの種苗生産に大きく貢献することが期待される。

本論文では、まずクロマグロ仔魚の発生動態を調べるため、300cmの鉛直水柱を用い、ここに孵化後2~9日目の個体を投入して、その鉛直分布状態を計測した。水槽を上層(深度0~100 cm)中層(100~200 cm)下層(200~300 cm)および、水槽底(水槽底に接触した個体)の4層に区分して、一定時間経過後の各層における仔魚の鉛直分布状況が測定された。その結果、孵化後4日目以降ではクロマグロ仔魚の夜間鉛直分布は、上層と水槽底に2極化する傾向が確認され、上層の個体には孵化後3日目以降鰾が膨張した個体が確認されたが、水槽底の個体では観察期間中は全て鰾が収縮した個体しか観察されないという興味深い実験結果が得られている。このことから著者は沈降死には仔魚の鰾の膨張の有無が主要なキーフクターであることを導いている。また、沈降した個体と上層に留まることができた個体の形態的特徴を計測したところ、上層に分布していた鰾膨張個体および鰾収縮個体の全長と尾鰭のアスペクト比は、底部に分布していた鰾収縮個体よりも有意に大きくなっていったことがわかり、鰾が収縮して遊泳器官の発達が遅れている個体が水槽底部に沈降しやすい傾向となっていることを示唆した。これらのことは、体密度の大きい本種仔魚の生存戦略において遊泳の機能性を司る器官が仔魚期においても重要であることを示している。

これらの実験結果から沈降死の発生には仔魚の遊泳能力が影響を与えている可能性が高いことが示されたことから、著者は次に本種仔魚の遊泳能力と沈降死の発生過程との関係を調べるため、水槽内の遊泳行動をステレオカメラにより3次元的に解析している。この解析では、夜間に発生する沈降死を観察可能とするため、暗所下でも撮影可能となる暗視カメラを2器使用し、自由遊泳する仔魚の遊泳速度や遊泳軌跡を3次元的に解析することに成功し、遊泳速度および遊泳角度のデータを用いて、沈降死に至った個体行動の特徴を定量化している点は高く評価できる。解析の結果、仔魚は日中には鰾が収縮して活発に水平方向に遊泳し、表層に分布する個体のみが確認された一方で(昼間収縮遊泳)、夜間の撮影では鰾が膨張し遅い速度で遊泳しながら表層に分布する個体と(夜間膨張遊泳)、鰾が収縮し鉛直方向の遊泳行動を頻繁に行うことで一定深度以上を維持する個体(夜間収縮遊泳)、さらに鰾が収縮し水槽底部へ沈降する個体(夜間収縮沈降)の3つの行動ケースに分類できることが示されている。これらの個体の行動データから鉛直および水平方向の遊泳速度を評価した結果、昼間収縮遊泳個体は、夜間の個体と比較して遊泳速度が速くなり、特に水平方向の遊泳速度が速いことが示されている。また夜間では、夜間膨張遊泳個体が表層で遅い速度で遊泳していたが、夜間収縮遊泳個体は夜間膨張遊泳個体よりも鉛直方向への遊泳が頻繁であるほか、水平方向の遊泳速度については夜間膨張遊泳個体のおよそ2倍大きくなっている。この結果は、夜間収縮遊泳個体が夜間膨張遊泳個体よりも深度維持に必要なエネルギーを多く必要としていることを意味しており、鰾の膨張の有無が夜間の遊泳時エネルギーの消費量に大きな差を与え、これが原因となり沈降死の発生リスクに影響を与えている可能性があることを示しめすという興味深い結果を著者は示している。

著者は、沈降死に至りやすい個体と生残しやすい個体との間で確認された遊泳行動の違いから、遊泳時に必要となる力学的エネルギーの差に着目し、3次元遊泳行動解析の結果からそれぞれの力学的なエネルギーを推定し、行動の差を定量化している。その結果、全長5.0 mmの個体が1分間あたりに必要な遊泳時エネルギーは、日中収縮遊泳個体では $5.62 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ 、夜間収縮遊泳個体では $6.12 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ および夜間膨張遊泳個体では $0.70 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ となり、夜間膨張個体は日中収縮個体に比べてそのエネルギーは1/8ですむという興味深い結果を得ている。このことは、夜間鰾膨張個体は、鰾を膨張させることにより能動的な遊泳行動を行わなくとも深度維持を可能とし、摂餌が困難となる夜間に遊泳時エネルギーの消費を低く抑えていることを示唆しているとして

また、著者は前述の遊泳時エネルギーの算定結果から、夜間に鰾が収縮している遊泳個体は夜間膨張遊泳個体に比べ8.7倍も遊泳時エネルギーが必要であることを示し、夜間に鰾が収縮した個体では、摂餌できない夜間に、相対的に大きなエネルギーを消費している可能性があるとする興味深い結果を示した点は高く評価できるものといえる。

さらに、著者は個体がどの程度持続して遊泳可能であるかを調べることにより、遊泳に必要な個体が有する最大エネルギー容量を無給餌の状態で推定する実験を行ったところ、すべての個体が12時間以内に水槽底部に接触し再び遊泳することがないという実験結果を得た。これにより、導き出された個体が持つ遊泳時エネルギー容量は最大で $8.1 \times 10^{-3} \text{ J}$ と見積もられた。著者はこの結果を利用して、既に算出されていた夜間収縮遊泳個体 ( $6.12 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ ) と夜間膨張遊泳個体

( $0.70 \times 10^{-7} \text{ J min}^{-1}$ ) の単位時間当たりの遊泳時エネルギーから、夜間収縮遊泳個体と夜間膨張遊泳個体の持続遊泳可能時間を推定した結果、夜間膨張遊泳個体が96時間であるのに対し、夜間収縮遊泳個体では11時間と極端に短くなることを示した。これは、屋内の種苗生産現場で電照させない時間である12時間よりも短くなっており、摂餌が可能な状態となる十分な照度環境が得られる前に、遊泳によって個体が持つエネルギーを使い果たしてしまう可能性があることを示すもので、著者は、この状態のまま斃死に至った過程を種苗生産現場では沈降死としている可能性が高いと推察している。これらの結果は、今まで特定できなかった沈降死による斃死の原因を説明するのに合理的な理由を科学的に与えているものと判断でき、その学術的な意義は高いものと考えられる。

また、著者はこの一連の結果から、仔魚が沈降するときの沈下速度を理論的に推定し、この大きさと同様の一樣鉛直上昇流を発生させることにより、仔魚を沈下させずに表層に留まらすことができる沈降死防除法を提案している。この速度はどの日齢においてもおおむね $1 \text{ TLs}^{-1}$ でありこれはほぼ $0.5 \text{ cms}^{-1}$ の速度を水槽内で発生させれば仔魚は沈下することがないことが水槽実験からも確認されている。今まで、沈降死の防除法としては経験的にエアレーションなどの循環流を発生させていたが、その流れの大きさは $2 \text{ cms}^{-1}$ 以上であり、今回求められた流速よりも4倍も大きいものである。また、循環流であるため下向きの流れも発生することになり、滞在深度が深くなると自発的に遊泳する仔魚の特徴からすると、遊泳エネルギーの消費を低減させるという観点からは、必ずしも循環流による対応だけでは十分でないことが本研究の結果からも推察される。著者による今回の結果は沈降死の発生メカニズムを仔魚が遊泳に必要とするエネルギーという側面から新しい切り口でアプローチされて得られたものであり、また沈降死の発生過程も特殊な撮影システムを用いることによって明らかにされている。クロマグロの種苗の安定生産を目指す上では本研究の成果の果たす役割は極めて大きいものと判断できる。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。なお、審査にあたっては、論文に関する専攻内審査および公聴会など所定の手続きを経たうえ、平成27年2月7日、農学研究科教授会において、論文の価値ならびに博士の学位を授与される学力が十分であると認められた。