

論文内容の要旨

氏名	久保敏彦			
学位の種類	博士(農学)			
学位記番号	農第132号			
学位授与の日付	平成21年3月21日			
学位授与の要件	学位規程第4条第1項該当			
学位論文題目	体温情報による養殖クロマグロの遊泳・消化に関する研究			
論文審査委員(主査)	教授	滝	井	健二
(副主査)	教授	太	田	博巳
(副主査)	教授	宮	下	盛

クロマグロ *Thunnus orientalis* はサバ科に属するマグロ類7種の1種であり、世界全体の約80%をわが国が消費してきた。しかし近年、世界的な需要急増のため、資源の枯渇が懸念されている。特に資源量が減少している大西洋では、ICCAT(大西洋マグロ類保存国際委員会)が、2010年以後の漁獲割当量を2.2万トンに削減した。太平洋でも漁獲規制が検討されている。天然資源への負担を軽減させるためには、完全養殖クロマグロ資源に頼ることが考えられる。それには本学が開発した、「クロマグロ完全養殖種苗」の量産化が重要な鍵となるとが、技術的に未解決の問題が多く残されている。未解決問題としては、種苗生産初期の大量減耗、幼魚期における斃死防止、消化性の良い配合飼料の開発、飼育環境管理技術の確立などがあげられ、すべて早急に解決しなければならない問題である。

飼育環境管理には多くの課題が含まれている。天然マグロ類は、冬季には高水温域に回遊することも可能だが、養殖魚では不可能である。水温低下に伴い摂餌量の減少や消化性の減退があらわれ、成長抑制がみられる。しかし養殖漁場の水温変化が養殖クロマグロに及ぼす影響についてはいまだ説明されていない。本研究ではマグロ類の体温が水温より高く保たれることに着目し、水温・体温を媒介変数として、養殖クロマグロの体温保持能力の変化、遊泳・摂餌・消化性ならびに成長の関係を解明した。応用課題として餌の消化性に注目し、開発が急がれている配合飼料と生餌との消化性比較も可能にした。

第1章 成長に伴うクロマグロ (*Thunnus orientalis*) 稚魚の全熱交換

第1節 成長に伴う体温変化

クロマグロは体温が水温より高く保たれる、いわゆる Endothermy 魚である。しかしこの高い体温保持能力は、孵化直後には無いものと思われる。天然では生きたままの稚魚採集が困難なこともあり、いつから高体温が示されるのか未解明であった。体温保持能力機構として知られているのは、体内を循環し代謝により温められた静脈血(暖)と、鰓を通じて水中から酸素を吸収することにより冷やされた動脈血(冷)が、奇網により効率的な対向流熱交換を行うことによる。クロマグロ卵を孵化させ、成長段階ごとに1ヶ月間隔で1年半にわたり3から5尾ずつの個体を生簀から取り上げた。生きた個体の組織中に1.7mm径の微細温度センサーを挿入し、時系列的に温度変化(熱移動)を測定し解析した。熱移動には血管を通じた熱伝導と、筋肉、胃、脳などの高温組織から低温組織へと移動する熱拡散とがある。それら2つを一括して全熱交換係数( $k$ )と定義した。指数関数的に変化する係数が大きいときは体内から熱が奪われやすく、係数が小さくなると熱が高く保たれる指標になる。係数( $k$ )は体重( $W$ )に関係し  $k = W^{-0.659}$  ( $p < 0.005$ )で近似出来た。その結果、体温は孵化直後には水温と同じ変化を示し、尾叉長15cm以後になると水温より高い体温が保たれ

るようになる。この時期以後  $k$  は指数関数的に小さくなり、体温保持能力は飛躍的に高まることが分かった。また遊泳に必要な赤色筋の体内含有比率もこの時期から増加し、高速遊泳も可能となることが示された。

## 第2節 遊泳に伴う体温変化

クロマグロの高体温は、主に遊泳運動に伴う血合筋の代謝産熱による考えられている。しかし、体温と遊泳速度との関係は解明されていない。第1節と同様の方法で、尾叉長16cm以上、2日前から絶食させた養殖クロマグロ5個体の赤色筋、普通筋、腹腔の温度(熱変化)を測定した。遊泳速度を変えた流水中で各組織の温度変化を測定し、組織内温度と遊泳速度との関係を解析した。測定には流速が連続的に変換できるトレッドミル型回流水槽を用い、流速は尾叉長の倍数で表示した。同時に、行動変化を記録するため、撮影機を水槽上部と側面に設置した。マグロ類は開口高速遊泳しつつ酸素を鰓から取り込む、いわゆるram gill ventilationを行っている。尾叉長の3倍/sec以下の流速では、個体の運動による組織内産熱と、鰓や体表面から奪われる拡散熱とが熱平衡状態を保つため、すべての組織の温度は一定していた。つまり口を開いた状態の巡航遊泳速度以下では、体温変化がないことが分かった。一方、流速が尾叉長の3倍/sec以上になると、体温は急激に上昇した。上昇の割合は赤色筋、普通筋、腹腔の順に高く、腹腔部の温度上昇は赤色筋の1/8であった。撮影画像を解析した結果、尾叉長の3倍以上の流速になると、口を閉じたままの無酸素遊泳が観察された。限界流速以上では、鰓を通じての体外熱拡散がなくなり、体内では激しい運動を必要とする赤色筋で代謝熱が増加し、熱的平衡状態が崩れ体温が上昇することが明らかにされた。好氣的運動から嫌氣的運動に切り替わる、いわゆる限界流速は、尾叉長の3倍/secであることが分かった。

## 第2章 摂餌に伴う腹腔温と筋肉温変化の関係

### 第1節 摂餌に伴う腹腔温と筋肉温変化の関係

前章の結果では、嫌氣的運動に伴う代謝熱により赤色筋並びに普通筋の温度は上昇したが、腹腔温は顕著な上昇を示さなかった。また各組織温度変化の時系列資料を用いて、相互相関係数を計算したところ、組織間に時間のずれは見られず組織内温度変化は同時発生していた。腹腔内消化器官の産熱は摂餌後に見られ、餌の消化に伴う化学変化と物理的運動(蠕動運動など)によることがわかっている。遊泳による筋肉の産熱・伝導過程と摂餌・消化過程での消化器官の産熱・伝導過程とは異なる可能性があり、それが腹腔温と筋肉温の差になったことが示唆された。摂餌・消化に伴い上昇した腹腔温の、他組織中への伝達過程は明らかではない。本章では摂餌後の組織内温度変化について解析した。尾叉長16cm以上の養殖クロマグロ5個体に飽食給餌し、2時間後から腹腔、普通筋、赤色筋の温度変化を第1章と同様の方法により測定した。その結果、個

体を取り上げる際の嫌氣的運動(handling)により急激に上昇した筋肉温は、安静状態になると絶食時と同様指数関数的に下降し、その全熱交換係数は絶食時と一致した。一方腹腔温は摂餌後急速に上昇し、480秒後には逆転して筋肉温より0.3℃高く保たれた。腹腔内全熱交換係数は絶食時とは異なり、指数関数では近似できずに独自の変化過程を示した。また筋肉温変化と腹腔温変化の相互相関は無相関となった。摂取された餌の胃内消化が終わり、腸に送られるにつれて腹腔温は低下した。腹腔温が最高値に達したときが胃内での消化完了を意味しているため、最高温に達するまでの時間から餌の消化性が推定可能となる。

## 第3章 腹腔温によるクロマグロ摂餌情報の解析

### 第1節 絶食時の体重を基にした水温変化が腹腔温に及ぼす影響

水温環境の異なる3箇所のクロマグロ養殖生簀を用いて、同一ロットから得られた個体の腹腔内に遊泳深度と腹腔温が記録できる小型記録計を挿入し、400日以上長期にわたり記録した。水域は年間を通じて19℃以上を保つ奄美実験場、冬季には13℃になる白浜、黒潮の小蛇行により水温が急変する串本を選んだ。腹腔温は絶食時を基準とした。腹腔内温度と生簀周辺の水温を同時に測定し、個体が経験する水温と腹腔温を比較して、飼育条件が成長に及ぼす影響を解析した。その結果、飼育後120日から140日後に成長に差が生じ、体重・体長とも奄美実験場生簀個体のほうが有意に大きくなった( $p < 0.001$ )。つまり水温が高いときには腹腔温も高く保たれ、消化・吸収も促進される。この理由を温度に依存する腹腔内の消化性と、動脈流の関係から考察した。クロマグロ腹腔内への熱伝達は、中央部背大動脈から分岐する、腹腔動脈(Coelic artery)のみによって行われている。そのため、絶食時には、中枢神経系による熱交換率と産熱速度の調節により腹腔温は規定される。消化にかかわる熱源が腹腔内臓器の運動産熱、消化液の分泌とその化学産熱によることから、この熱は外部には伝達されにくい。そのため腹腔温は筋肉温の影響はほとんど受けないし、温度が高いほど消化酵素活性が高まるため消化性は高まると結論付けた。

### 第2節 水温の季節変化からみた摂餌と腹腔温変化

前述の結果に基づいて、記録計を挿入して生簀に放流された個体について、体重増加が水温・腹腔温に及ぼす影響を解析した。記録期間は最高450日におよび、その間体重は44kgになった。放流から再捕までの絶食時腹腔温( $T_f$ )と水温( $T_w$ )との相関を比較した。関係を示すために直線回帰式  $T_f = a T_w + const$  を導入し、勾配  $a$  により評価した。体重7.4kg以下では両者の関係は  $a = 1.0$  を示したが、体重増加に伴って水温・体温の相関は少なくなり、 $a$  は減少した。しかし、体重7.5kg以上では係数の減少が顕著になる。そして20kg以上では  $a = 0.7$  となり、以後は体重が増加しても係数  $a$  は一定であった。係数( $a$ )と体重( $W$ )の関係は  $a = 0.33 \cdot \exp(-0.14 W) + 0.67$  で近似された。この体重以上では、腹腔下部

## 論文審査結果の要旨

に蓄積される脂肪層と、腹腔背部にある鰾の発達ともなる断熱効果の増加により、次第に固有の体温保持を行うことが可能で、低水温でも効率よい断熱効果を示すことになる。さらに、体重 ( $W$ ) に対する最小摂餌率 ( $Y$ ) の関係は  $Y=0.32W^{-0.38}$  ( $R^2=0.937$ ) となり、養殖魚の摂餌可能限界水温は  $12^{\circ}\text{C}$  と見込まれた。

## 第3節 腹腔温情報を用いた配合飼料と生餌の消化性の比較

腹腔部の摂餌による温度変化は、他組織に影響しないことが明らかとなった。このことは、腹腔温を用いて摂餌量と消化性を見積もることが可能なことを意味しているため、クロマグロ養殖の喫緊の課題である配合飼料開発に応用した。摂取した同量のイカナゴ (生餌) と配合飼料を与えたクロマグロの、腹腔温が最高値に達するまでの時間をそれぞれの消化終了時間とし、両者の比較を行った。生餌では 200 分、配合飼料では 320 分であることが示された。現在開発されている配合飼料の消化時間は生餌の 1.6 倍長いことがわかった。消化時間は短いことが望ましく、今後は腹腔温をモニターしつつさまざまな成分の配合比を組み合わせ、消化されやすい最適飼料開発に応用可能と思われる。

## 第4章 結論

- ・クロマグロの内温性は尾叉長 15.0cm 以上であられた
- ・腹腔温は筋肉温とは独立した温度状態を持つ
- ・体重 7.4kg 以下のクロマグロの腹腔温は水温と体重の両方の影響を受ける。このことは体重 7.4kg 以下のクロマグロが水温変化、特に低水温の影響を受けやすいことを意味した。
- ・体重 7.5kg 以上のクロマグロの腹腔温は水温変化の身の影響を受ける。体重 7.5kg 以上の個体は絶食状態でその腹腔温を正確に調節できると考えられた。
- ・体重 7.5 から 44.1kg までのクロマグロは、低水温環境下で胃内容消化時間が長くなる。
- ・低水温環境に伴う胃内容消化時間の延長は摂餌量に影響して、 $12^{\circ}\text{C}$  以下の水温環境でほとんど餌を食べなくなると考えられた。

クロマグロ *Thunnus orientalis* はサバ科に属するマグロ類 7 種の 1 種であり、世界全体の約 80% をわが国が消費してきた。しかし近年、世界的な需要急増のため、資源の枯渇が懸念されている。特に資源量が減少している大西洋では、ICCAT (大西洋マグロ類保存国際委員会) が、2010 年以後の漁獲割当量を 2.2 万トンに削減した。太平洋でも漁獲規制が検討されている。天然資源への負担を軽減させるためには、完全養殖クロマグロ資源に頼ることが考えられる。それには本学が開発した、「クロマグロ完全養殖種苗」の量産化が重要な鍵となることが、技術的に未解決の問題が多く残されている。未解決問題としては、種苗生産初期の大量減耗、幼魚期における斃死防止、消化性の良い配合飼料の開発、飼育環境管理技術の確立などがあげられ、すべて早急に解決しなければならない問題である。

飼育環境管理には多くの課題が含まれている。天然マグロ類は、冬季には高水温域に回避することも可能だが、養殖魚では不可能なため、水温低下に伴い摂餌量の減少や消化性の減退があらわれ、成長抑制がみられる。しかし養殖漁場の水温変化が養殖クロマグロに及ぼす影響についてはいまだ説明されていない。本研究ではマグロ類の体温が水温より高く保たれることに着目し、水温・体温を媒介変数として、養殖クロマグロの体温保持能力の変化、遊泳・摂餌・消化性ならびに成長の関係を解明した。また、応用課題として餌の消化性に注目し、開発が急がれている配合飼料と生餌との消化性比較も可能にした。

第1章 成長に伴うクロマグロ (*Thunnus orientalis*) 稚魚の全熱交換係数

## 第1節 成長に伴う体温変化

クロマグロは体温が水温より高く保たれる、いわゆる Endothermy 魚である。しかしこの高い体温保持能力は、孵化直後には無いものと思われる。天然では生きたままの稚魚採集が困難なこともあり、何時から高体温が示されるのか未解明であった。体温保持能力機構として知られているのは、体内を循環し代謝により温められた静脈血 (暖) と、鰓を通じて水中から酸素を吸収することにより冷やされた動脈血 (冷) が、奇網により効率的な対向流熱交換を行うことによる。クロマグロ卵を孵化させ、成長段階ごとに 1 ヶ月間隔で 1 年半にわたり 3~5 尾ずつの個体を生簀から取り上げた。生きた個体の組織中に 1.7mm 径の微細温度センサーを挿入し、時系列的に温度変化 (熱移動) を測定し解析した。熱移動には血管を通じた熱伝導と、筋肉、胃、脳などの高温組織から低温組織へと移動する熱拡散とがある。それら 2 つを一括して全熱交換係数 ( $k$ ) と定義した。指数関数的に変化する係数が大きいときは体内から熱が奪われやすく、係数が小さくなると熱が高く保たれる指標になる。係数 ( $k$ ) は体重 ( $W$ ) に関係し  $k = W^{-0.659}$  ( $p < 0.005$ ) で近似出来た。その結果、体温は孵化直後には水温と同じ変化を示し、尾叉長 15cm 以後になると水温より高い体温が保たれるようになる。この時期以後  $k$  は指数関数的に小さくなり、体温保持能力は飛躍的に高まることが分かった。また遊泳に必要な赤色筋の体内含有比率もこの時期から増加し、高速遊泳も可能となることが示された。

## 第2節 遊泳に伴う体温変化

クロマグロの高体温は、主に遊泳運動に伴う血合筋の代謝産熱による考えられている。しかし、体温と遊泳速度との関係は解明されていない。第1節と同様の方法で、尾叉長 16cm

以上、2日前から絶食させた養殖クロマグロ5個体の赤色筋、普通筋、腹腔の温度（熱変化）を測定した。遊泳速度を変えた流水中で各組織の温度変化を測定し、組織内温度と遊泳速度との関係を解析した。測定には流速が連続的に変換できるトレッドミル型回流水槽を用い、流速は尾叉長の倍数で表示した。同時に、行動変化を記録するため、撮影機を水槽上部と側面に設置した。マグロ類は開口高速遊泳しつつ酸素を鰓から取り込む、いわゆる ram gill ventilation を行っている。尾叉長の3倍/sec以下の流速では、個体の運動による組織内産熱と、鰓や体表面から奪われる拡散熱とが熱平衡状態を保つため、すべての組織の温度は一定していた。つまり口を開いた状態の巡航遊泳速度以下では、体温変化がないことが分かった。一方、流速が尾叉長の3倍/sec以上になると、体温は急激に上昇した。上昇の割合は赤色筋、普通筋、腹腔の順に高く、腹腔部の温度上昇は赤色筋の1/8であった。撮影画像を解析した結果、尾叉長の3倍以上の流速になると、口を閉じたままの無酸素遊泳が観察された。限界流速以上では、鰓を通じての体外熱拡散がなくなり、体内では激しい運動を必要とする赤色筋で代謝熱が増加し、熱的平衡状態が崩れ体温が上昇することが明らかにされた。好氣的運動から嫌氣的運動に切り替わる、いわゆる限界流速は、尾叉長の3倍/secであることが分かった。

## 第2章 摂餌に伴う腹腔温と筋肉温変化の関係

### 第1節 摂餌に伴う腹腔温と筋肉温変化の関係

前章の結果では、嫌氣的運動に伴う代謝熱により赤色筋並びに普通筋の温度は上昇したが、腹腔温は顕著な上昇を示さなかった。また各組織温度変化の時系列資料を用いて、相互相関係数を計算したところ、組織間に時間のずれは見られず組織内温度変化は同時発生していた。腹腔内消化器官の産熱は摂餌後に見られ、餌の消化に伴う化学変化と物理的運動（蠕動運動など）によることがわかっている。遊泳による筋肉の産熱・伝導過程と摂餌・消化過程での消化器官の産熱・伝導過程とは異なる可能性があり、それが腹腔温と筋肉温の差になったことが示唆された。摂餌・消化に伴い上昇した腹腔温の、他組織中への伝達過程は明らかではない。本章では摂餌後の組織内温度変化について解析した。尾叉長16cm以上の養殖クロマグロ5個体に飽食給餌し、2時間後から腹腔、普通筋、赤色筋の温度変化を第1章と同様の方法により測定した。その結果、個体を取り上げる際の嫌氣的運動（handling）により急激に上昇した筋肉温は、安静状態になると絶食時と同様指数関数的に下降し、その全熱交換係数は絶食時と一致した。一方腹腔温は摂餌後急速に上昇し、480秒後には逆転して筋肉温より0.3℃高く保たれた。腹腔内全熱交換係数は絶食時とは異なり、指数関数では近似できずに独自の変化過程を示した。また筋肉温変化と腹腔温変化の相互相関は無相関となった。摂取された餌の胃内消化が終わり、腸に送られるにつれて腹腔温は低下した。腹腔温が最高値に達したときが胃内での消化完了を意味しているの、最高温に達するまでの時間から餌の消化性が推定可能となる。

### 第3章 腹腔温によるクロマグロ摂餌情報の解析

#### 第1節 絶食時の体重を基にした水温変化が成長に及ぼす影響

水温環境の異なる3箇所のクロマグロ養殖生簀を用いて、同一ロットから得られた個体

の腹腔内に遊泳深度と腹腔温が記録できる小型記録計を挿入し、400日以上長期にわたり記録した。水域は年間を通じて19℃以上を保つ奄美実験場、冬季には13℃になる白浜、黒潮の小蛇行により水温が急変する串本を選んだ。腹腔温は絶食時を基準とした。腹腔内温度と生簀周辺の水温を同時に測定し、個体が経験する水温と腹腔温を比較して、飼育条件が成長に及ぼす影響を解析した。その結果、飼育後120日から140日後に成長に差が生じ、体重・体長とも奄美実験場生簀個体のほうが有意に大きくなった（ $p < 0.001$ ）。つまり水温が高いときには腹腔温も高く保たれ、消化・吸収も促進される。この理由を温度に依存する腹腔内の消化性と、動脈流の関係から考察した。クロマグロ腹腔内への熱伝達は、中央部背大動脈から分岐する、腹腔動脈(Coelic artery)のみによって行われている。そのため、絶食時には、中枢神経系による熱交換率と産熱速度の調節により腹腔温は規定される。消化にかかわる熱源が腹腔内臓器の運動産熱、消化液の分泌とその化学産熱によることから、この熱は外部には伝達されにくい。そのため腹腔温は筋肉温の影響はほとんど受けないし、温度が高いほど消化酵素活性が高まるため消化性は高まると結論付けた。

#### 第2節 水温の季節変化からみた摂餌と腹腔温変化

前述の結果に基づいて、記録計を内挿して生簀に放流された個体について、体重増加が水温・腹腔温に及ぼす影響を解析した。記録期間は最高450日におよび、その間体重は44kgになった。放流から再捕までの絶食時腹腔温（ $T_f$ ）と水温（ $T_w$ ）との相関を比較した。関係を示すために直線回帰式  $T_f = a T_w + \text{const}$  を導入し、勾配  $a$  により評価した。体重7.4kg以下では両者の関係は  $a = 1.0$  を示したが、体重増加に伴って水温・体温の相関は少なくなり、 $a$  は減少した。しかし、体重7.5kg以上では係数の減少が顕著になる。そして20kg以上では  $a = 0.7$  となり、以後は体重が増加しても係数  $a$  は一定であった。係数( $a$ )と体重( $W$ )の関係は  $a = 0.33 \cdot \exp(-0.14W) + 0.67$  で近似された。この体重以上では、腹腔下部に蓄積される脂肪層と、腹腔背後部にある鰹の発達にもなう断熱効果の増加により、次第に固有の体温保持を行うことが可能で、低水温でも効率よい断熱効果を示すことになる。さらに、体重( $W$ )に対する最小摂餌率( $Y$ )の関係は  $Y = 0.32W - 0.38$  ( $R^2 = 0.937$ ) となり、養殖魚の摂餌可能限界水温は12℃と見込まれた。

#### 第3節 腹腔温情報を用いた配合飼料と生餌の消化性の比較

腹腔部の摂餌による温度変化は、他組織に影響しないことが明らかとなった。このことは、腹腔温を用いて摂餌量と消化性を見積もることが可能なことを意味しているため、クロマグロ養殖の喫緊の課題である配合飼料開発に応用した。摂取した同量のイカナゴ（生餌）と配合飼料を与えたクロマグロの、腹腔温が最高値に達するまでの時間をそれぞれの消化終了時間とし、両者の比較を行った。生餌では150分、配合飼料では400分であることが示された。現在開発されている配合飼料の消化時間は生餌の2.7倍長いことがわかった。消化時間は短いことが望ましく、今後は腹腔温をモニターしつつさまざまな成分の配合比を組み合わせ、消化されやすい最適飼料開発に応用可能と思われる。

クロマグロは成長が早く、高価で取引されることから、世界的にも多くの水域で重要養殖産業魚種として注目されている。しかし量産化には多くの難問を解決する必要がある。たとえば、種苗の安定的供給・確保はもとより海洋環境からみた最適養殖可能環境の設定、価格や魚病防止の面からみて安全な配合飼料の開発などは、早急に解明しなければならない問題である。申請者はこの中でも環境に注目し、体温保持機構の解明と餌の消化性に関する最適飼育環境について解明を試みた。クロマグロ幼稚魚は天然では捕獲が困難で、系時的な成長と体温保持機構との関係は未解明であった。申請者は卵から孵化させたクロマグロを用いて成長段階ごとに解析することにより、体内温度保持機構を明らかにした。同時に水温と各組織により異なる温度の変化を解析し、筋肉温と腹腔温変化との関係を明らかにした。さらに、その関係を利用して海洋の水温環境変化が、成長と餌の消化性に及ぼす影響を考察し、養殖に関する重要な基礎知見を得ている。

マグロ類は体温が水温より高く保たれていることは、1920年代すでに明らかにされた(endothermy)。体温が高く保たれているため、亜熱帯水域から亜寒帯水域、鉛直的には、表層から水深600mの深海へと広域に回遊することが可能となっている。しかし海洋では仔稚魚など若齢期の個体は、生きたまま捕獲することは困難なため、マグロ類全般にわたって、いつから高体温保持が可能になるのか明らかにされていない。申請者はクロマグロ卵から孵化させた個体を用いて、成長に伴う組織内の体温変化を測定し、体温が水温より高く保持されるのは、尾叉長15cm以後であることを明らかにした。この成果は成長に伴い北上する、クロマグロの海域分布密度と水温の関係とも一致している。なかでも本種の産卵水域が水温28~25°Cで、すべての仔稚魚が24°C以上の高温水域で採集される生態的特長と一致していた。同時に、この知見は養殖クロマグロの水温耐性の特徴を知るのに有効であり、稚魚を飼育水槽から海面生簀へ移す、いわゆる“沖だし”時期の決定にも役立つものである。同じ手法により、高速遊泳する本種の体温と遊泳速度との関係を解析した。巡航遊泳中は鰓と体表面からの熱拡散と、運動代謝産熱とが熱的平衡状態にあるため、体温は一定に保たれることを見出した。すなわち、好氣的運動中は熱的平衡が保たれ、嫌氣的運動状態になると体温は急激に上昇し、その限界遊泳速度は尾叉長の3倍/secであることを明らかにした。このことは、養殖クロマグロを釣り上げる際の、急激な嫌氣的運動に伴う体温上昇による組織変化、いわゆる“身焼(みやけ)”を解明する基礎情報として役立つものである。

次に、摂餌に伴う腹腔温と筋肉温の変化が無相関であることに着目し、摂餌後の腹腔温が独自に変化する可能性について言及している。その結果、個体を取り上げる際の嫌氣的運動(handling)により上昇した筋肉温は、安静時には絶食時と同様な下降過程となり、その全熱交換係数は絶食時と同様の値を示した。一方、腹腔温の係数は絶食時とはまったく異なったため、筋肉温変化との相関はなかった。また、腹腔温が最高値を示す時が、胃内消化の完了時を示すことが知られているため、これを応用して摂餌種による消化性を評価することが可能となる。

上記の結果を基にして、同一産卵群を水温環境の異なる3箇所の実験場で飼育し、水温環境が成長に及ぼす影響を解析した。年間を通じて水温19°C以上を保つ奄美実験場での成

長が最も早く、その結果飼育後120日から140日後には、体重・体長とも他の2実験水域の個体より優位な差が見出せた( $p < 0.001$ )。このことは水温が高く保たれると、消化と腸への消化物の移動が促進されることによると考え、その理由について考察している。その結果、腹腔内への熱伝達は中央部背大動脈から分岐する、腹腔動脈のみにより行われるため、絶食時には中枢神経系による熱交換率と産熱速度の調整により腹腔温は規定される。一方消化にかかわる熱源が蠕動運動など物理的な腹腔内運動産熱、消化液の分泌とその化学産熱によることから、摂餌後は外部への熱伝導がされにくいことになる。また、腹腔部下層は脂肪層が発達し、腹腔上部背側には鰓がある。両者とも断熱効果を持ち、組織を通じての熱拡散がされにくい。そのため、摂餌にともなう産熱は筋肉温にはほとんど影響を与えない。さらに、消化酵素活性は温度に比例して高まるため、消化性も高まり成長速度も速まることになる。これらの結果を具体的に証明するため、400日を越える腹腔温・水温変化が得られた個体を中心として、多くの個体について水温( $T_w$ )と腹腔温( $T_r$ )の関係を直線回帰式  $T_r = a T_w + \text{const.}$  で近似させ、勾配  $a$  で評価した。その結果、体重( $W$ )が7.4kg以下ではすべての個体で  $a = 1.0$  となり、水温と腹腔温は同じ変化をすることがわかった。さらに20.0kg以上では  $a = 0.7$  となり、以後勾配に変化はなかった。係数( $a$ )と体重( $W$ )の関係は  $a = 0.33 \exp(-0.14W) + 0.67$  で、体重7.5kg以後勾配変化が現れた。また体重あたりの摂餌率( $y\%$ )と水温( $T_w$ )との関係を解析したところ、 $y = 0.32T_w - 3.83$  ( $R^2 = 0.937$ )を示し、最小摂餌可能水温は12°Cと見込まれた。以上のことから、年間の水温変動、特に冬季の表面水温19°C以下の低水温環境は、本種の稚魚期の養殖に重要な要因であることを生理・生態的に証明しており、クロマグロ養殖漁場を選定する上での貴重な知見である。

次に、摂餌後の腹腔温が最高値を示す時が、胃内での消化が終わり、消化物が腸に移動すると考えて、生餌と配合飼料の消化性について比較した。その結果現在開発されている配合飼料は、生餌の2.7倍の消化時間を要することがわかった。しかし詳細な摂餌量ならびに種間の消化性相違を生きたままの状態を知るためには、新しい技術の導入が必要である。本研究で用いられた、小型機器をクロマグロ腹腔内に挿入することにより、摂餌後の消化過程をモニターすることが可能となる。またこの方法を用いると配合割合を試行錯誤で変えながら、最適飼料を開発することも可能であり、本研究で試みられた遠隔生物行動・生理情報測定は養殖産業にも有効な方法と思われる。

以上のように、本研究はクロマグロ養殖技術の開発に資する多くの知見を得ている。得られた知見は、本種の健全な種苗を生産するための抜本的な技術改良を導くとともに、本種の産業的大量養殖基盤構築を行ったものであり、高い評価を与える業績と考えられる。よって本論文は博士(農学)論文として価値あるものと認める。

なお、審査に当たっては、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21年2月9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。