

摂餌後のクロマグロ腹腔温と筋肉温の変化

坂本 亘・久保敏彦

(環境グループ)

近畿大学水産研究所

sakamoto@kindaisuiken.jp

クロマグロの体温は水温より高く保たれている。温度を高く保つことにより、持続的高速遊泳を可能にし、脳の活性化を図り速やかな行動の判断を行い^{1,2)}、動体視力を増して索餌能力を高め³⁾、摂餌後の消化を促進させている⁴⁻⁷⁾。この水温より高い体温は、孵化直後の仔魚が最初から持っているのではなく、成長に伴い尾叉長・体重が増加した後の特定の大きさ以降で示される。熱力学的には体内での代謝産熱が、体外に奪われる熱拡散より大きくなると現れる現象であり、サメ、マグロ類など内温性魚類の特徴とされている。体温変化は熱拡散過程を伴うため、熱拡散係数の導入が可能である。同時に、水温低下に伴う体温変化は、水温と一定の関係で低下することはよく知られている。Kuboら⁸⁾は、クロマグロでは尾叉長が16 cmを超えた後、水温より高い体温が定量化できることを明らかにした。体温を高い状態に保持するためには、2つの要因が必要とされている。その1は代謝による熱源の確保であり、その2は水中への拡散熱を少なくして、効率よく体内に熱保持する機構である。一般に高い体温は、遊泳に伴う筋肉の代謝熱からもたらされるとされ、中でも遊泳運動時に効果的に機能する血合筋肉(赤色筋)が最も高い温度を示すことから、最大の熱源であるとみなされている。しかし、筋肉以外にも高い温度を示す脳、眼球周辺、腹腔などの温度変化や、組織相互間の温度変化の関係は明らかに

されていない。これらの組織は、体温保持機構と関係するようで、効率よい熱交換機構の存在が確認されている。

効率のよい熱交換機構として奇網が知られている。奇網は、鰓から酸素を取り込み海水と同じ温度になった冷たい動脈血と、体内を循環して温められた静脈血が、対向流となりシート状構造を形成し、熱交換を行うための組織である。奇網を通った動脈血は暖められて組織に戻るため、高い体温を保つことができる。奇網存在部位としては、赤色筋周辺が古くから知られているが⁹⁾、脳周辺、眼球周辺、腹腔にも存在し、熱保持に役立っている^{2,3)}。拡散熱と代謝産熱がほぼ等しい仔稚魚期の天然クロマグロは、比較的温暖な水域を回遊して、活性が低下しないように滞泳する必要がある。産卵海域でのクロマグロ仔魚分布調査によると、水温25℃以上に高密度分布域があったため、その妥当性が報告されている¹⁰⁾。上記の機構により、成長とともに体温保持能力が向上した結果、比較的低温だが高密度で餌生物が分布する水域への索餌移動が可能になり、行動範囲を拡大させてゆく。

養殖環境にもこの水温環境はあてはまり、尾叉長16 cmまでの飼育環境では、飼育に適した限界水温が存在すると思われる。実際に養殖事業の行われている水温環境についてみると、水温は成長速度に密接に関係している。冬季最低水温

が 19°C 以下にならない奄美大島と、19°C 以下になる和歌山県串本では、成長速度に顕著な差が示される¹¹⁾。原因の一つとして水温が、餌の消化時間と摂餌量に密接に関係していることが近年の研究でわかった¹²⁾。摂餌量は水温低下とともに減少し、12°C 以下になると尾叉長 30 cm (体重 1 kg) 以下の個体では摂餌を行わなくなり、死亡する。おそらく水温 12°C は、クロマグロ稚魚養殖環境における限界水温と思われる。その摂餌を行わない原因の一つとして、餌消化に要する時間が水温により異なり、水温低下に伴い消化時間が長くなることが挙げられる。現在のところ、養殖中のクロマグロ遊泳速度には水温低下の影響は見られない。しかし、餌の摂取量は減少し、消化時間も長くなる。このことは、遊泳速度を増して代謝熱を増加させ、その代謝熱を利用して消化速度を速めるといった機構は存在しないことを示唆する。つまり高い筋肉温は腹腔には伝わらないか、影響が少ないことを示している。

一般に個体の熱拡散については、全熱拡散係数 k (Whole-body heat transfer coefficient) により評価される¹³⁾。この係数が大きいほど、速やかに体内の熱が奪われることになる。経験的にクロマグロでは体重と係数の関係として、体重の -0.695 乗に比例することが報告されている^{7, 14)}。赤色筋、普通筋、腹腔の各組織での係数はほぼ同じとみなされている。組織間では全熱拡散係数は同じ値を示すが、組織間での代謝産熱量が異なるため、絶食時の温度は異なった値を示す。持続的高速遊泳により高い代謝活性を持つ赤色筋が最も高い温度を示し、次いで普通筋、腹腔の順になる。

しかし摂餌後の腹腔温と赤色筋温は、大きく異なる。摂餌後の腹腔温は、隣接した消化器官の消

化に伴う特異動的作用 (SDA) や消化酵素による化学反応、物理的な蠕動運動などにより独特の温度変化を示すためである⁶⁾。Carey ら⁶⁾は摂餌後に体重 300 kg 以上のクロマグロの胃内温度を、挿入した小型超音波発信機により測定した。それによると、摂餌後急激に低下した胃内温度は、次第に上昇し 12 時間ないし 20 時間後には摂餌前よりおよそ 10°C 高い最高温に達する。その後温度は次第に低下する。最高温に達した直後、胃の蠕動運動が活発に始まるため、最高温以後から消化物が腸に押し送られ始める時と判断された。

現在クロマグロをはじめとする大規模回遊魚の生態研究には、小型記録計が用いられている。それらは、ほとんど消化器官に隣接した腹腔に挿入される。回収された記録計の温度変化には、遊泳による代謝熱と水温の影響以外に、摂餌による温度変化も含まれているであろう。しかし、どの組織による温度変化が代表されて腹腔内の小型記録計に記録されるか十分に解明されていない。現状では記録計のデータから、摂餌による腹腔温の影響を分離することは困難である。基礎情報として、腹腔温と筋肉温を同時に測定し、両者の変動様式から相互の関係を明らかにする必要がある。

本研究では筋肉温変化と、絶食条件下ならびに摂餌に伴う腹腔変化とを同時測定して比較し、相互の関係について養殖クロマグロを用いて解析を試みた。これらの結果は、クロマグロの生態研究のみならず、養殖事業にも貢献するものと思われる。

材料と方法

筋肉温、腹腔温、水温測定にはサーミスタ温度計 (ALEC 電子・神戸・日本、Tuna Therm) は高分

解能を有する球形センサー(直径 1.17 mm、時定数 0.1 秒、分解能 $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$)を有し、小型個体の測定に適す。

養殖クロマグロについては、異なる尾叉長の個体を実験に供した。その一つは 2007 年に近畿大学水産研究所奄美実験場で得られた、Tu-1 (尾叉長 81.0 cm、体重 11350 g)である。実験は 2008 年 7 月 11 日に行った。実験前 1 時間に 150 g のサバ 1 尾を与えたのち、10:00 時に生簀(32 m 径、20 m 深)から釣りあげ、ウレタンマットに固定した。固定後口からビニールチューブで注水しつつ、赤色筋、腹腔、普通筋に挿入したサーミスタ温度計により温度を 2 時間測定した。同時に水温もチューブ内に挿入したサーミスタ温度計により測定した(Fig. -1a, b)。尾叉長の異なる個体を用いたため、挿入部位の表示は相対的に統一した。挿入部位は吻端から尾柄方向に計測し、尾叉長に対する割合 52 %の部位の上部(筋肉)、下部(腹腔)に挿入した。また鉛直断面で、センサー挿入位置を示した(Fig. -1a)。

別の個体による実験は、2008 年 8 月と 10 月に行った。これには、2008 年 6 月 2 日に奄美実験場で採卵し、白浜実験場に搬送し飼育した供試魚 3 個体(Tu-2, Tu-3, Tu-4)を用いた。供試魚 Tu-2 は尾叉長 16.4 cm、体重 66.8 g、Tu-3 は尾叉長 16.5 cm、体重 87.7 g、Tu-4 は尾叉長 15.2 cm、体重 53.7 g と全て小型であった。これらは異なる飼育水槽で飼育され、Tu-2 と Tu-3 はキビナゴ切り身を給餌した後、ランダムに飼育水槽から釣り上げた。一方 Tu-4 は別の飼育水槽から網により取り上げた。この水槽の個体には実験 2 日前から給餌をせず、絶食状態を保った。取り出した個体は、ウレタンマットに寝かせ法でサーミスタセンサーを普通筋、腹腔、換水チューブ内に挿入し、温度を測

定した(Fig. -1a, c)。

結果

Tu-1 の筋肉温、腹腔温、水温の時間的変化を Fig. -2 に、Tu-2, 3, 4 の結果を Fig. -3 示した。いずれの場合も、黒い実線が筋肉温で、薄い色付き線が腹腔温を示している。筋肉温は挿入直後に急激に上昇した。これは釣りあげてサーミスタセンサーを挿入するときにみられる、急激な運動による昇温現象である。いわゆる、ハンドリングによる筋肉温上昇である。挿入後、筋肉温は指数関数的に温度を低下させてゆく。この温度低下勾配が、全熱拡散係数(k)で評価することができる。Tu-1 では、 k は $4.2 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C sec}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1})$ であり、Tu-2, Tu-3, Tu-4 ではそれぞれ、 6.1×10^{-3} 、 9.7×10^{-3} 、 6.2×10^{-3} の値となった。この値は絶食時の同程度の尾叉長を有する個体とほぼ等しく、摂餌前後で変化がみられなかった。つまり筋肉温の熱拡散は摂餌の有無に無関係であることを示している。

一方、腹腔温についてみると、どの個体にも共通して、測定開始後 300 秒ほどで温度の上昇が顕著になる(Figs. -2, 3)。温度の上昇過程は大型の Tu-1 で 1200 秒後まで続いた後、最高温に達する。また、小型個体の Tu-2, Tu-3 では、800 から 900 秒後まで上昇が続いて、最高温に達する。その後、どの個体の腹腔温も下降している。さらに、ハンドリングにより上昇した筋肉温と、摂餌により上昇を続ける腹腔温とは、どの場合にも温度が逆転する時間帯がみられる。つまり腹腔温が筋肉温より高くなる時が現れる。その時間帯は実験開始から Tu-1 で 700 秒後、Tu-2 と Tu-3 では 500 秒前後である。一方、絶食個体の Tu-4 には、この

現象は現れないため、筋肉温は絶えず腹腔温より高く保たれている (Fig. 3c)。腹腔温と筋肉温変化の時系列について、相互相関係数を計算したところ無相関であった。つまり静止状態にした個体については、筋肉温とは独立して腹腔温は変化していることを示した。

考察

クロマグロの摂餌後の腹腔温上昇には、消化酵素の加水分解による化学反応、特異動体作用 (SDA)、物理的な胃の蠕動運動が知られている^{6, 15)}。摂餌後の温度変化には共通していくつかの現象がみられる。最初に急激な温度低下が起こり、その後上昇が始まる。温度上昇勾配とその持続時間は、摂取した餌の量と種により異なる⁴⁾。また、上昇から最高温に達するまでの時間は、水温、マグロの大きさによっても異なる。最高温に達した後、次第に下降し、体重300 kg以上のクロマグロで36から48時間後に絶食状態の温度に戻る。胃の蠕動運動は最高温に達した時から始まる。このことから、消化の終了は最高温を目安にすることができる。

一方、筋肉温は遊泳に伴い発生するが、好氣的運動を続ける間は、遊泳速度が変化しても温度の変化は現れない。ほぼ体長の3倍程度の遊泳速度 (cm/sec) が、好氣的運動持続可能な範囲とみなせる^{8, 16, 17)}。これ以上の遊泳速度になると、個体は嫌氣的運動を見せるようになり、それに伴い筋肉温は上昇する。

実験は、遊泳状態ではなく個体を静止させ、口から給水して行った。そのため、遊泳運動に伴う産熱の過程は無視された。このため、腹腔温に及ぼす遊泳運動による産熱の影響は、調べることは

できなかった。しかし、少なくとも静止状態では、摂餌に伴う腹腔内温度変化は、筋肉温の変化に影響を与えないことが分かった。これは時系列データの相互相関係数が無相関を示したことからも認められた。

今後は養殖生簀内を遊泳している状態で、クロマグロの筋肉温と腹腔温を同時に測定し、相互の関係を明らかにする必要がある。また、餌の種と摂取量が消化時間に与える影響を、腹腔温変化から推定し、効率よい給餌条件を見出すことも試みる必要がある。

参考文献

- 1) Stevens ED. and FE. Fry. Brain and muscle temperatures in ocean caught and captive skipjack tuna. J. Exp. Biol. 1974; 61: 145-153.
- 2) Block BA. Thermogenesis in muscle. Annu.Rev.Physiol. 1994, 56; 535-577.
- 3) Fritsches KA, Brill RW, Warrant EJ. Warm eyes provide superior vision in swordfish. Curr. Biol. 2005; 15: 55-58.
- 4) Gunn J., Hartog J., and Rough K. The relationship between food intake and visceral warming in southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*). In Sibert JR. and Nielsen JL. (eds). Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries. Kluwer Academic. Publisher, Netherlands, 2001; 109-130.
- 5) Stevens ED and Mcleese JM. Why bluefin tuna have warm tummies: temperature effect on trypsin and chymotripsin. Amer. Physiol. Soc. 1984; 246: 487-494.
- 6) Carey FG, Kanwisher JW, Stevens ED. Bluefin tuna warm their viscera during

- digestion. J. Exp. Biol. 1984; 109:1-20.
- 7) Carey FG, Teal JM. Heat conservation in tuna fish muscle. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S. 1966; 56:1461-1469.
- 8) Kubo T, Sakamoto W. Murata O. and Kumai H. Whole-body heat transfer coefficient and body temperature change of juvenill Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* according to growth. Fish Sci. 2008; 74:995-1004.
- 9) Kishinoue K. Contributions to the comparative study of the so-called Scombroid fishes. J. Coll. Agric. Tokyo Imp. Univ. 1923; 8:293-475.
- 10) Itoh T, Tsuji S, Nitta A. Swimming depth, ambient water temperature preference and feeding frequency of young Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) determined with archival tag. Fish. Bull. 2003; 101:535-544.
- 11) Miyashita S. Studies on the seedling production of the Pacific bluefin tuna, *Thunnus thynnus orientalis*. Bull. Fish. Lab. Kinki Univ. 2002; 8:1-171.
- 12) 久保敏彦。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。平成 21 年度近畿大学博士課程論文 2009;1-110。
- 13) Kitagawa T, Kimura S. An alternative heat-budget model relevant to heat transfer in fishes and its practical use for detecting their physiological thermoregulation. Zool. Sci. 2006; 23: 1065-1071.
- 14) Kitagawa T. Kimura S. Nakata H. Yamada H. Diving behavior of immature, feeding Pacific bluefin tuna (*Thunnus thynnus orientalis*) in relation to season and area: the East China Sea and Kuroshio-Oyashio transition region. Fish. Oceanogr. 2004; 13:161-180.
- 15) Fitzgibbon QP, Seymour RS, Ellis D, Buchanan. The energetic consequence of specific dynamic action in southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii*. J. Exp. Biol. 2007; 210:290-298.
- 16) Dewar H. Graham JB. Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel I. Energetics. J. Exp. Biol. 1994; 192:13-31.
- 17) Dewar H. Graham JB, Brill RW. Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel. II. Thermoreguration. J. Exp. Biol. 1994; 192:33-44.

図表

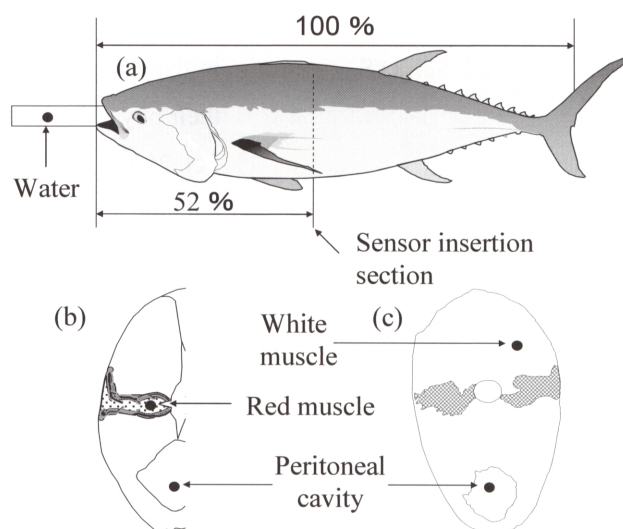


Fig.-1. 温度センサー挿入位置. a) 吻端から尾叉長までの 52%の部位の上部(筋肉)、下部(腹腔)に挿入し、口から換水するためのホースに温度センサーを挿入, b) Tu-1 の温度センサー挿入位置(赤色筋と腹腔), Tu-2、Tu-3、Tu-4 の温度センサー挿入位置(普通筋と腹腔).

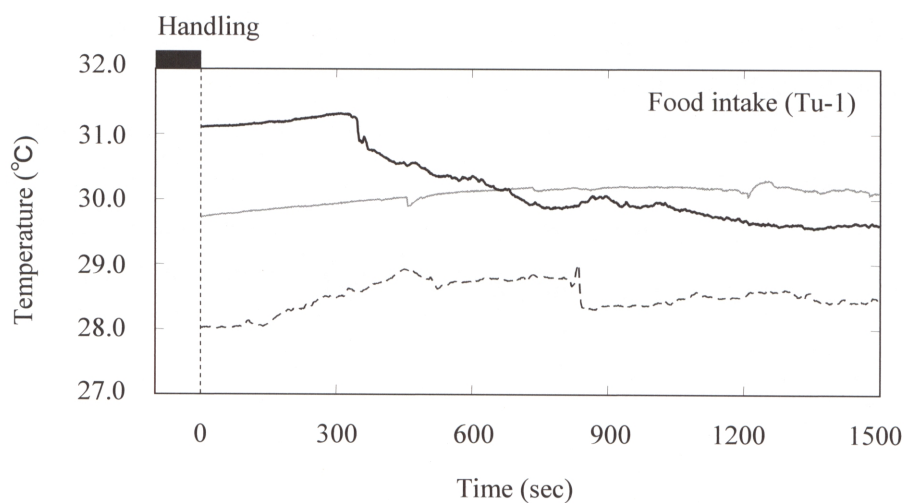


Fig.-2. Tu-1(尾叉長 76.0 cm、体重 11350 g)から得られた赤色筋温(黒線)、腹腔温(薄い色付き線)、水温(破線)を示し、飽食給餌から 1 時間後に得られた。垂直方向の破線は実験開始点となり、グラフ上部の黒帯で示した部分は釣り上げ、口からの換水、温度センサー挿入までの期間となる。

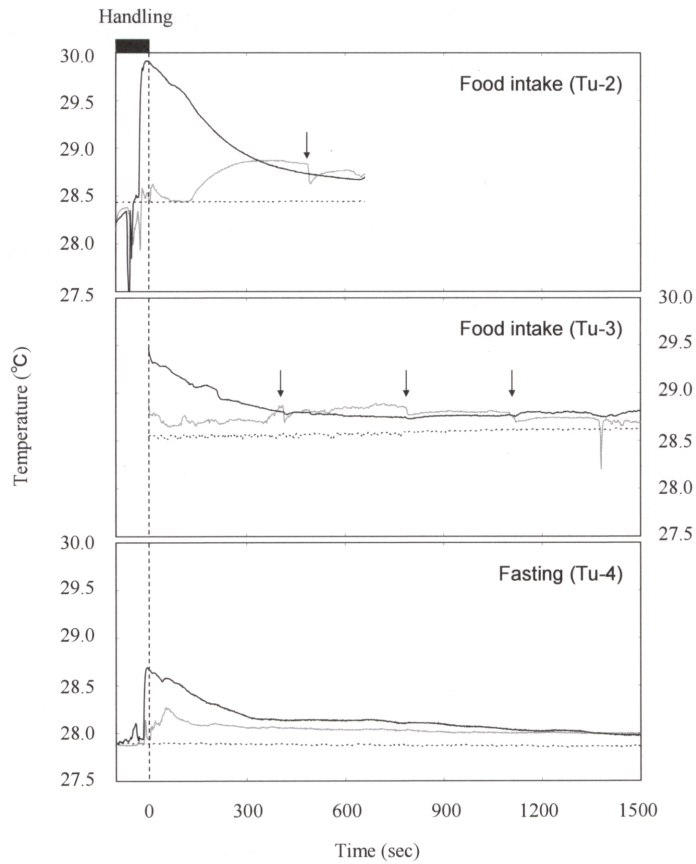


Fig. 3. 普通筋温(黒線)、腹腔温(薄い色付き線)、水温(破線)の時間変化、a)はTu-2、b)はTu-3、c)はTu-4に対応する。Tu-2、Tu-3の温度変化は飽食給餌から30分後に得られ、Tu-4の温度変化は絶食状態で測定された。垂直方向の破線は実験開始点、グラフ上部の黒帯はハンドリング期間を示し、下向きの矢印は餌を吐き戻した時間と表す。