

クロマグロの遊泳と餌の消化・吸収による腹腔温変化

坂本 亘

(環境保全・資源動態グループ)

近畿大学水産研究所

sakamoto@coral.cypress.ne.jp

クロマグロの体温は環境温度より数度高く保たれている。この体温は急激に変化することがあり、特に摂餌や環境水温が変化する時顕著に現れる。腹腔内温度は摂餌後の消化・加水分解過程時の熱産生と代謝率によって増加し、発生した熱は鰾、分厚い腹壁と奇網によって高く保たれる。消化時の主要な熱源は胃と幽門錘で、胃が空となると同時に温度は最大値に達する。腹腔だけでなく体温上昇にはそれ以外の要因もある。Careyら¹⁾の研究によると、体温の上昇・下降はいくつかの異なった器官が関与している。外的には鰹からもたらされる環境水温変化、体内では遊泳時に見られる筋肉の発熱²⁾、そして前に述べた消化器官によるものである。体温と消化の関係では、腸内のトリプシン、盲腸内でのキモトリプシンは体温上昇に伴って活性が高まることも重要な要因とされてお

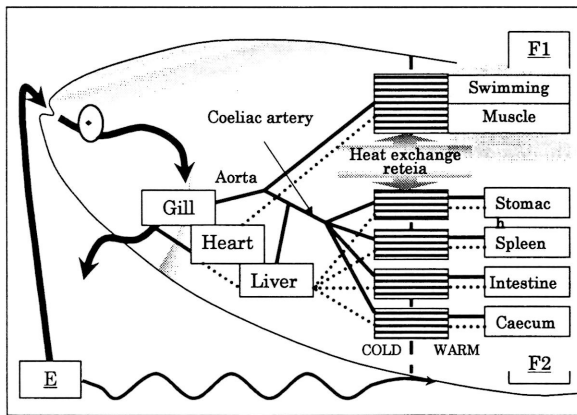


Fig. 1. The thermoregulation system of a bluefin tuna, rewrite from Carey et al, (1984). The temperature fluctuation induced by swimming and muscle is $F1(t)$, stomach, spleen, intestine and caecum are in $F2(t)$, the ambient water temperature is $E(t)$.

り、模式的に示すと Fig.1 のようになる。³⁾ 養殖生簀におけるミナミマグロ腹腔内温度と摂餌量、

ならびに成長との関係は、Gunnら⁴⁾によって研究されているが、クロマグロについての知見は無い。本研究は養殖生簀内クロマグロの遊泳、環境水温、餌の消化・吸収が腹腔内温度変化に現れる状態を記録し、生簀規模が遊泳に及ぼす影響、環境水温変化がクロマグロの行動と成長に及ぼす影響、餌の種類による消化・吸収過程の相違などを解明する目的で行われた。そしてこれらの研究成果は、クロマグロについての最適規模の養殖生簀設計、環境変化が成長と成熟に及ぼす影響、人工飼料と天然餌料の消化効率差の見積もりなど、実際の養殖業に関する基礎的知見となる。

測定と解析方法

測定方法 実験魚は近畿大学奄美実験場に飼育されている平成 15 年産クロマグロ 3 尾を用いて行った。腹腔内に外科手術によって遊泳深度と温度の測定可能なデータロガ (Star-oddi, DST-mill) を挿入し、20 分間隔で測定した。挿入開始は 2004 年 7 月 7 日、データロガの回収は 9 月 8 日で 66 日間のデータが得られた。このほかに、生簀の縁に水温計を設置して表層(1m), 5m,

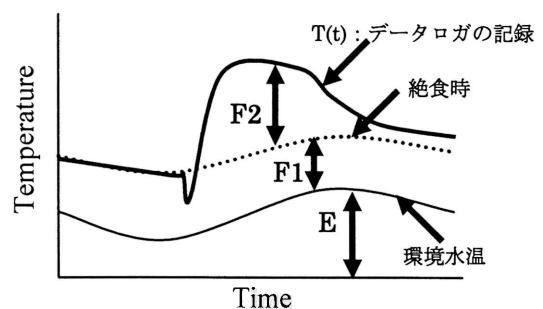


Fig. 2. Schematic abdominal cavity temperature variation and 3 factors (E, F1 and F2).

10m 層の水温を、データロガ記録と時間軸を合わせて測定した。水温の鉛直分布は、各時間における 3 層のデータを鉛直的に結び、クロマグロの

遊泳深度に基づく水深を内挿して推測した。給餌は1日2回でサバを午前(9時頃)と午後(3時頃)に与えたが、日曜日と荒天の日には給餌は行われなかった。

解析方法 解析は Fig.2 に示すように、得られた時系列データ $T(t)$ を 3 つの変動要因 $F1(t)$, $F2(t)$, $E(t)$ に分解し、それぞれの要因が変動に寄与する大きさを解析した。ここで、 $F1(t)$ は遊泳に伴う腹腔温上昇成分を、 $F2(t)$ は摂餌に伴う消化・吸収過程での温度変化、さらに $E(t)$ は環境水温が体内に及ぼす影響分をそれぞれ示す。まとめると

$$T(t) = F1(t) + F2(t) + E(t) \quad \dots \dots \dots 1)$$

から、 $F2(t) = 0$ とみなして $F1(t)$ を見積もることができる。またこの間の $F1(t)$ と $E(t)$ との関係を見ることによって、環境が腹腔温変化に及ぼす影響についても知ることができる。つまり、絶食期間から

$$F1(t) = T(t) - E(t) \quad (F2(t) = 0) \quad \dots \dots 2)$$

$F1(t)$ と $E(t)$ の関係については、それぞれの時間について相関から推測できる。

結果

全期間のデータに関する結果 全期間を通じての結果例を Fig.3 に示す。全体を通してみると腹腔温は環境水温より 4°C から 7°C 絶えず高く保たれている。ログを挿入した 7 月 7 日から 7 月 21

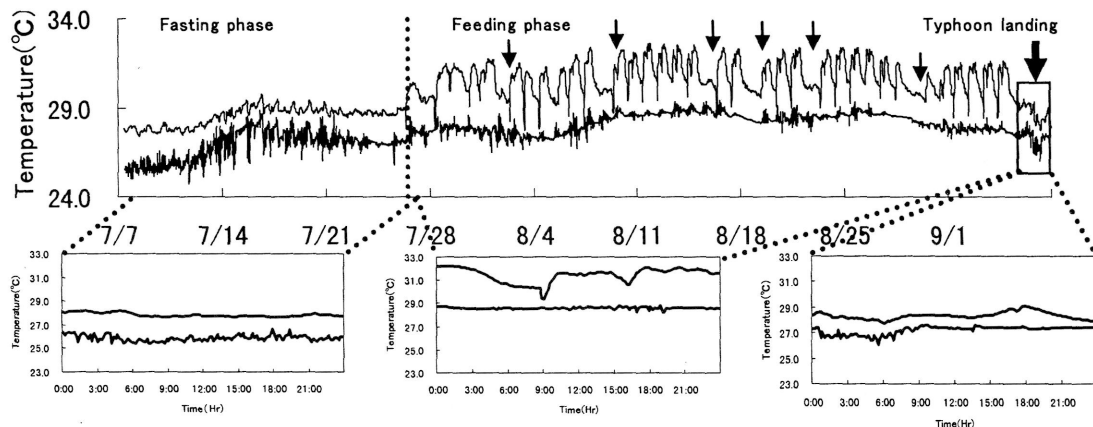


Fig. 3. Upper: Abdominal temperature of bluefin tuna. Allow fasting period
Lower: Enlarged typical temperature fluctuation periods $T(t)$ in fasting, feeding, and typhoon landing.

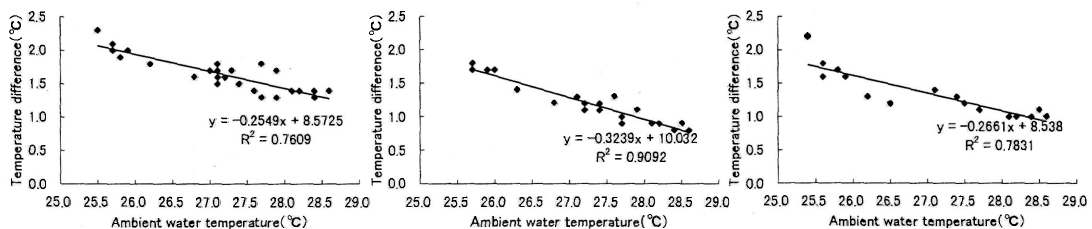


Fig. 4. Correlation between ambient water temperature and $F1(t) - E(t)$ in three different bluefin tuna.

である。小文字の t は時間を示す。

時間軸を合わせて環境水温 $E(t)$ を、 $T(t)$ からまず差し引くことができる。さらに無給餌間の腹腔温または、絶食を余儀なくされていた期間の $T(t)$

日までは腹腔温が一定の値を保っているが、これはログ挿入によるショックのために摂餌をしなかったことを示している。この期間、 $F2(t)$ は 0 とみなすことができる。7 月 22 日以降は摂餌を開始し

たため、1日2回、 $T(t)$ は周期的な温度変化を示す。この周期的変化は、給餌のない日曜日や、台風接近に伴う荒天のため給餌を行わなかった日には現れない。矢印はその時期を示している。9月初旬にこの個体は温度変化を見せなくなり、最終的には環境水温と同じとなる。これは2004年9月初旬台風18号の奄美大島接近に伴い表層に河川起源の低塩分濁水が大量に流入し、それに伴い中層に多くの個体が逃避したために酸素不足となり死亡してゆく過程を示している。低層を遊泳していないことの原因としては、乱流による生簀網の底部変形と吹かれ、海底からの懸濁物の巻き上げなどにより、底部まで逃げて行けなかった可能性が高い。

絶食時の温度変化から見た環境温度の影響
絶食期の環境水温の変化と $F1(t)$ との関係は2)式によって計算した。腹腔温と環境水温の差を縦軸に、水温を横軸にとった結果はFig.4に示すことができる。それぞれの個体によって相関係数は異なるが、すべて0.75以上の相関を示し、ほぼ直線回帰が可能であった。個体ごとに見ると、
 $F1(t) = -0.255E(t) + 8.573$ ($R^2=0.7609$)
 $F1(t) = -0.324E(t) + 10.032$ ($R^2=0.9092$)
 $F1(t) = -0.266E(t) + 8.538$ ($R^2=0.7831$)
であった。絶食期間を通じて同じような行動をとっていたとすれば、この関係を用いて絶食時の基礎腹腔内温度 $T(t)$ を $F1(t) + E(t)$ から見積もることができる。3尾のクロマグロについては $F1(t)$ のかわりにそれぞれ式3), 4), 5), から

$$T(t) = 0.745E(t) + 8.573,$$

$$T(t) = 0.676E(t) + 10.032,$$

$$T(t) = 0.734E(t) + 8.538$$

となるので、これから見積もることが可能である。この結果を基にして絶食期の基礎腹腔温について見積もると、実測値と非常に一致した結果を得た。またFig.4の関係は、環境水温にかかわらず、遊泳時の筋肉による発熱量は一定であることを示している。なぜなら遊泳による発熱量が一定の場合には、環境水温が低くなれば両者の差は増し、水温が高くなれば差は小さくなるからである。反比例関係の勾配がx-軸と交わる温度を見ると、

31°Cないし32°Cであり、この水温は熱帯水域でもほとんど見られないことから、クロマグロの生息限界水温はこの温度周辺にあることが予想される。

摂餌期の腹腔温についてみると、一日2つの給餌の消化・吸収の重なり合った変化が現れるため、解析には工夫を要する。そこで土曜日(翌日無給餌)の午後の給餌後の変化を選んで、温度変化の上昇から最大温度に達する期間について解析した。その結果急激な上昇時間は1ないし4時間であり、摂餌量や餌種によって変化するように思われた。

考察

養殖業では一般に、給餌は一日2回行われる。この条件下では体温変化から餌の消化・吸収に至る過程を解析するには、2つの峰を分離するなどの工夫が必要である。消化には餌の脂肪含有量とタンパク質含有量が大きく影響していることが知られている^{5,6)}。正確な消化・吸収過程を見積もるには、二日に1回の給餌を行う期間を設定する必要がある。今回の実験で、絶食をはさんだ時期を取り出して消化時間を見積もると約40時間となった。これはGunnら⁴⁾がミナミマグロで得た消化時間の結果とほぼ等しかった。消化・吸収時間は餌の種類によっても変わる可能性があり、成長や肉質にも関係する。特に人工飼料の消化吸收効果を知る上では、給餌後の腹腔温の上昇から下降にいたる時間変化を知ることが重要であり、そのためには腹腔温変化モニターは効果的な方法である。

謝辞

実験に用いたクロマグロは近畿大学水産研究所奄美実験場の協力により提供を受けました。また長期間の飼育に関しては同実験場向井良夫、八木洋樹技術員のご協力をいただいたことに感謝いたします。

文献

- 1) Carey, F. G., J. W. Kanwisher, and E. D. Stevens: Bluefin tuna warm their viscera during digestion. *J. exp. Biol.*, 1984, 109, 1-20.
- 2) Marcinek, D. J., S. B. Blackwell, H. Dewar, E. V. Freund, C. Farwell, D. Dau, A. C. Seitz, B. A.

- Block: Depth and muscle temperature of Pacific bluefin tuna examined with acoustic and pop-up satellite archival tags. *Mar. Biol.*, 2001, 138, 869-885.
- 3) Hochachka P. W. and J. K. Lewis: Interacting effects of pH and temperature on the K_m values for fish tissue lactate dehydrogenases. *Comp. Biochem. Physiol.* 1971, 39B, 925-933.
 - 4) Gunn J., J. Hartog and K. Rough: The relationship between food intake and visceral warming in southern bluefin tuna. "Electronic tagging and tracking in marine fisheries (eds. J. R. Sibert and J. L. Nielsen)". Kluwer Academic Pub., 2001, 109-130.
 - 5) Landeira-Fernandez A. M., J. M. Morrissette, J. M. Blank and B. A. Block: Temperature dependence of the Ca^{2+} -ATPase (SERCA2) in the ventricles of tuna and mackerel. *Am J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 2004, 286, R398-R404.
 - 6) Stevens E. D. and J. M. McLeese: Why bluefin tuna have warm tummies: temperature effect on trypsin and chymotrypsin. *Am. Physiol. Soc.*, 1984, R487-R493.