

高精度音響測位によるクロマグロ当歳魚の移動速度の日周変動解析

松永 康佑

徳島市立高等学校

要旨

近年、資源量が急激に減少しているクロマグロは資源保護の観点から基礎的な生態調査が重要である。クロマグロは群れを形成することが知られている。その目的は、索餌効率、生存率ならびに生殖効率の向上のためなどと言われている。本研究では、クロマグロの群れ機能を解明するために、移動速度を高精度音響測位システムによって計測し、周期的な変化について検証した。2016年7月29日～31日、8月8日～10日の期間、高知県高岡郡中土佐町上ノ加江沖に設置された角型生簀にて、腹腔内に深度センサー付き超音波発信機を装着したクロマグロ（合計11個体）の放流実験を行った。信号の受信には高精度音響測位システムを用いた。本システムの2つのハイドロフォン間への信号の到達時間差と発信間隔から双曲線航法によってクロマグロ幼魚を3次元追跡し、平均移動速度を求めたところ 0.84 ± 0.06 m/s であった。移動速度は日周変動し、特に夜間に遅くなること、また、経過日数および群れの個体数によって変化することが明らかになった。

重要語句：クロマグロ、高精度音響測位システム、移動速度、日周変動、群れ機能

序論

本研究の対象種であるクロマグロ *Thunnus orientalis* は商業的価値が高い水産重要魚種であるが、近年資源量の減少により厳しい漁獲規制が実施されている。資源量減少の要因の一つとして当歳魚の初期減耗が挙げられる。クロマグロは群れを形成する。群れで行動することによって、他個体への情報伝達が容易となることが考えられる。そして、その利点は索餌効率や生存率、生殖効率などの向上、また遊泳エネルギーの削減などである。そこで本研究ではクロマグロ当歳魚の群れ行動に着目し、当歳魚の生残戦略を知ることにより適切な資源管理に資することを目的とした。

クロマグロ当歳魚の群れ行動については、先行研究によって照度が行動に影響していること⁽¹⁾、昼夜で群れの疎密が変わること⁽²⁾などが分かっている。しかしこれらの先行研究は小規模な水槽実験や断片的な観察結果を解析した内容であり、実海域での長期間にわたる移動速度の最大、最小、平均、標準偏差といった基礎的な情報や、それらの日周的な変動などはほとんど不明である。本研究ではクロマグロ当歳魚の群れ行動の一端を解明するために、遊泳の特徴を最もよく表す移動速度の基礎的な情報と日周的な変動を検証した。

試料と方法

① 実験方法

実験は2016年7月29日～31日、8月8日～10日に、高知県高岡郡中土佐町上ノ加江沖（33°17'N, 133°15'E, 図1）に設置された角型生簀（長さ×幅×深さ：25.0 m × 25.0 m × 6.0 m）にて行った。供試個体には上ノ加江沖にて曳縄で漁獲されたクロマグロ当歳魚を用い、腹腔内に外科手術によって超音波発信機（V9P-2H, Vemco/Amirix System 社製, Canada, 図2）を装着し、直ぐに角型生簀へ放流した。発信機の送波音圧は151 dB re 1 μ Pa である。発信機装着個体の平均尾叉長は 22.5 ± 1.20 cm だった。7月29日～31日は発信機装着個体6個体のみ、8月8日～10日は発信機装着個体5個体に加えて発信機を装着していない120尾（発信機非装着個体）と混泳させた。ただし、7月29日～31日と8月8日～10日における1個体の発信機個体数の差は、超音波発信機の不具合によるものである。

調査期間中に各個体へ装着した発信機の発信周波数はそれぞれ63, 69, 72, 75, 78, 81, 84 kHzで、周波数の違いによって装着個体の識別を行った（表1）。発信間隔は水圧によって750～1050 m/sの範囲で変化する。信号の受信は高精度音響測位システム（AUSOMS ver. 3.0 アクアサウンド社、以降AUSOMS, 図3）を用いた。AUSOMSは角型生簀の中央と縁



図1. 調査地 高知県高岡郡中土佐町上ノ加江沖（33°17'N, 133°15'E）

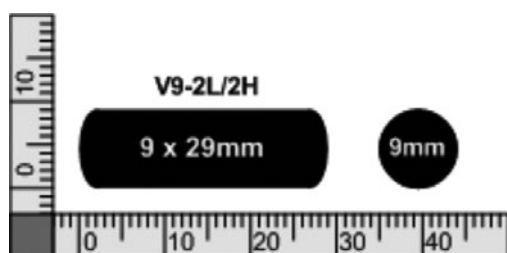


図2. 超音波発信機の寸法⁽⁶⁾

内容に関する連絡先：

荒井 修亮（京都大学フィールド科学教育研究センター）

arai.nobuaki.8c@kyoto-u.ac.jp

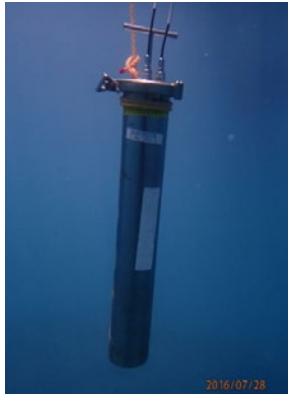


図3. 高精度音響測位システム (AUSOMS)

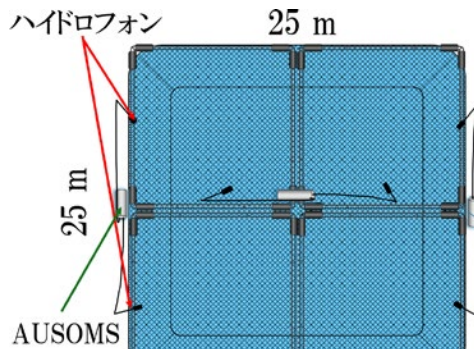


図4. 角型生簀の模式図
角型生簀の中心と縁部の計3箇所に AUSOMS を設置し、外枠に沿ってハイドロフォンを固定した。

部に3台配置し(図4)、それぞれ2つのハイドロフォンを16 m 間隔で設置した。また、超音波信号はサンプリング周波数 192 kHz で記録した。

② 解析方法

3台の AUSOMS から得られた音響データから2つのハイドロフォン間への信号の到達時間差、信号の発信間隔を求めた。到達時間差からそれぞれ双曲線を導き出し、その交点を算出する双曲線航法によって、角型生簀内のクロマグロ当歳魚の位置を特定した。また角型生簀内の位置と受信間隔から、移動距離を割り出し、その間の経過時間で除することで移動速度を求めた。この作業を個体ごとに行い、移動速度の平均、標準偏差、最大、最小 (m/s) を求めた。更に15分毎の移動速度を算出し、経時変化を検証した。

それぞれの個体の昼夜の移動速度をマン・ホイットニーのU検定を用いて検定した。実験期間中の日の出(5時)から日の入り(19時)を日中と定義した。更に、発信機装着個体6個体のみで実験を行った、7月29日～31日に得られた移動速度のデータと、発信機非装着個体120尾と混泳させて実験を行った8月8日～10日に得られた移動速度のデータをウィルコクソンの符号付順位検定を用いて検定した。この際、6個体の内、全期間移動速度のデータが得られた63, 69, 72, 84 kHzの周波数を出す個体のみの結果を検証した。この際、残りの2個体については発信機の不具合等で全期間のデータは得られていない。

結果

クロマグロ当歳魚の移動速度はどの個体も7月29日～31日(平均0.83 m/s)よりも8月8日～10日(平均0.86 m/s)の方が速くなった(表1)。移動速度は日周変動していた(図5, 6)。ここで、図5, 6は日周変動が顕著に表れた72 kHzの個体のグラフを示している。特に夜間は日中よりも移動速度が、およそ0.1 m/s 遅くなっていた(マン・ホイットニーのU検定, $p < 0.001$, 図7)。また、群れ内の個体数が6個体だった7月29

表1. 各個体の移動速度 (m/s) の基礎情報 (平均, 標準偏差, 最大, 最小)。

	63 kHz	69 kHz	72 kHz	75 kHz	78 kHz	81 kHz	84 kHz
7月平均	0.85	0.80	0.83	n.d	0.83	0.83	0.86
最大	1.03	1.03	1.13	n.d	1.68	1.02	1.01
最小	0.75	0.69	0.69	n.d	0.69	0.65	0.77
標準偏差	0.07	0.07	0.09	n.d	0.14	0.08	0.06
8月平均	0.86	0.85	0.85	0.83	n.d	n.d	0.90
最大	1.00	1.04	1.03	1.02	n.d	n.d	1.05
最小	0.71	0.69	0.70	0.73	n.d	n.d	0.76
標準偏差	0.08	0.09	0.09	0.06	n.d	n.d	0.08

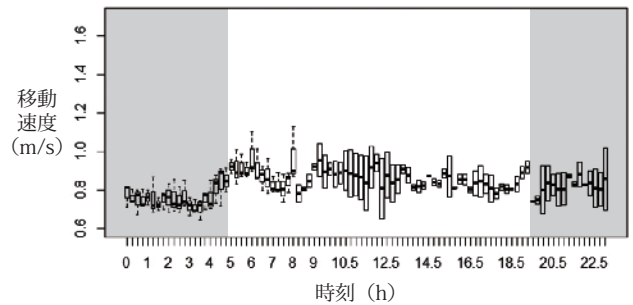


図5. クロマグロ当歳魚(72 kHz)の移動速度の日周変動の様子
7月29日～31日の期間のグラフを示している。グレーの部分は夜間を示している。

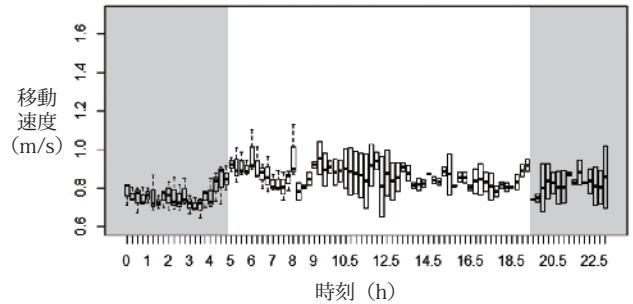


図6. クロマグロ当歳魚(72 kHz)の移動速度の日周変動の様子
8月8日～10日の期間のグラフを示している。グレーの部分は夜間を示している。

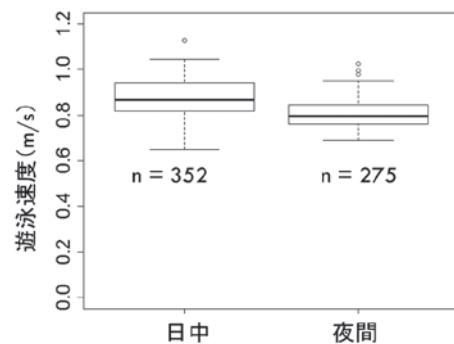


図7. 日中と夜間の全個体における速度比較
調査期間中の日の出(5時)と日の入り(19時)から日中と夜間を定義した ($p < 0.001$)。ここでの夜間は、19時～5時を示している。

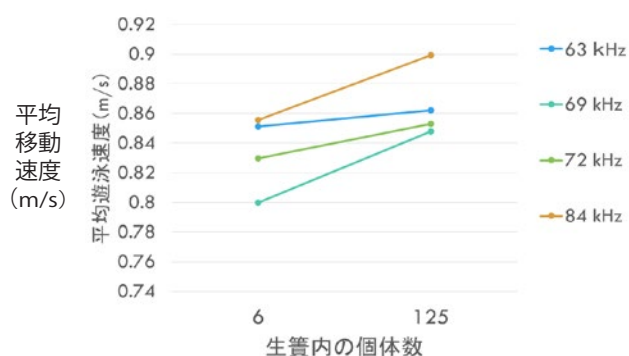


図 8. 角型生簀内個体数の変化に伴う、クロマグロ当歳魚の移動速度の変化。生簀内個体数が 6 個体であった 7 月中よりも 125 個体に増加した 8 月中の方がどの個体も移動速度が速くなっている ($p < 0.001$)。

日～31 日より 125 個体だった 8 月 8 日～10 日の方が移動速度は最大 0.05 m/s 速かった (ウィルコクソンの符号付順位検定, $p < 0.001$, 図 8)。

考察

先行研究から夜間に密な群れを形成すること⁽²⁾、視力の良いクロマグロ幼魚の行動には照度が影響していること⁽¹⁾は既に知られている。今回の研究の結果から、夜間に移動速度が有意に遅くなっていることが、全期間を通して明らかとなった。これは、群れを形成する際に、視力によって他個体の遊泳を確認しながら行動しているクロマグロ当歳魚が、夜間には群れからはぐれないようにするために移動速度を落としているという可能性を示唆している。

また、魚類の群れでは、先行する個体が遊泳する際に残す渦の流れにより、後続の個体の遊泳エネルギーが節約できる。このとき遊泳速度は、尾びれの振動が同じで同じエネルギーをかけたときに比べて数十%あがる⁽³⁾。さらに、同じ速度で遊泳する場合、群れの先頭個体よりも後方個体のほうが 9–14% 尾びれの振動が少なくすむ⁽⁴⁾。最新の研究では、群れ内の相対的な位置に関わらず、群れで遊泳すると単独の場合よりも遊泳コストが下がることが分かっている⁽⁵⁾。

本研究の結果では、6 個体と 125 個体の比較ではあるが、クロマグロ当歳魚において移動速度が異なることが示唆された。これは群れサイズによってエネルギー効率が異なることを意味する。本研究により、群れ行動の利点の 1 つである、遊泳エネルギーの削減に合致する知見が得られ、移動速度を調べることで、クロマグロ当歳魚の群れ行動の一端を解明することができた。

これらのことから、現在資源量が減少しているクロマグロにおいて、当歳魚の生態調査を行うことは将来的な資源量の増加につながると考えられ、本研究で得られた基礎情報は今後の資源保護に役立つと期待される。

謝辞

本研究は、京都大学 ELCAS プログラムを通じて、国立研究開発法人科学技術振興機構のグローバルサイエンスキャンパス事業の支援を受けて行われました。高校生の間にこのような滅多にできない経験をさせていただいたことに深く感謝致します。

また、本研究の調査において、国立研究開発法人水産研究・

教育機構国際水産資源研究所の福田漠生博士、藤岡紘博士を始めとする多くの方々には調査期間中、調査時のみならず生活面においても大変お世話になりました。さらに高知県高岡郡中土佐町上ノ加江漁協の出来良典様、沖様には生簀での調査をする上で、海上での安全確保等、様々なことにご支援いただきました。誠にありがとうございました。

最後に、研究に対して絶えずご指導いただき、調査に参加させていただいた、京都大学大学院農学研究科海洋生物環境学分野の皆様は御礼を申し上げます。特に調査準備からその後の解析まで多大なご指導をいただいた荒井修亮教授、市川光太郎准教授、またティーチングアシスタントの安江功明様、生田健吾様に深く感謝致します。

参考文献

1. Fukuda, H., S. Torisawa, Y. Ishibashi, M. Kurata, Y. Sawada, K. Suzuki & T. Takagi. Effect of illumination intensity on schooling behaviour in the juvenile bluefin tuna. *Memoirs of the Faculty of Agriculture of Kinki University*. No.39 (2006. 3) .p.89- 93
2. 斎藤航. 高精度バイオテレメトリーを用いたクロマグロ 0 歳魚の群れ内個体間距離に影響を与える要因に関する研究. 京都大学大学院情報学研究科修士論文. (2016).
3. Weihs, D. Hydromechanics of fish schooling. *Nature* 241: 290–291. (1973).
4. Herskin, J. & J. F. Steffensen. Energy savings in sea bass swimming in a school: measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds. *Journal of Fish Biology* 53: 366–376. (1998).
5. Marras, S. *et al.* Fish swimming in schools save energy regardless of their spatial position. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 69: 219–226. (2015).
6. Vemco. V9 Coded Transmitter. AMIRIX Systems Inc., Bedford. <https://vemco.com/wp-content/uploads/2013/03/v9_coded.pdf> [accessed on 09. 12. 2016] (2011 onwards).

Analyzing Diel Variation in Swimming Speed of 0-age Pacific Bluefin Tunas, *Thunnus Orientalis*, Using an Automatic Underwater Sound Monitoring System

KOSUKE MATSUNAGA

Tokushima Municipal High School

Abstract

In recent years, the Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, have decreased rapidly in number. Basic ecological research is important for resource protection. Pacific bluefin tuna is known to form schools. Schooling is thought to increase foraging efficiency, survival rate, and reproductive efficiency. We have analyzed the swimming speed of juvenile Pacific bluefin tuna to determine the function of diel variation in schooling behavior using an automatic underwater sound monitoring system (AUSOMS). We conducted behavioral observations of eight juvenile bluefin tunas equipped with ultrasonic transmitters and depth sensors in their abdominal cavity. The fish were kept in a square fish pen off Kaminokae port, Nakatoso, Kochi prefecture from July 29 to 31, and from August 8 to 10, 2016. We used AUSOMS to receive signals from the transmitters. Based on transmission distance and the difference between the arrival times of the signals between the two hydrophones in this system, fish positions were calculated using a hyperbolic function. The average migration speed of the fish was 0.84 ± 0.06 m/s. Our results also suggest that the swimming speed changed diurnally and slowed down at night. The number of individuals in the group and the number of days elapsed also affected the traveling speed.

Key words: Pacific bluefin tuna, Automatic Underwater Sound Monitoring System (AUSOMS), Swimming speed, Diel change, Group function

Correspondence Researcher:

ARAI, N. (arai.nobuaki.8c@kyoto-u.ac.jp)

Field Science Education and Research Center, Kyoto University