

マルチ送受波ソナーとピンガーを用いた
生簀クロマグロの計数手法の開発

濱野 明・笹倉 豊喜・鉛 進・榊原 昇
井藤 俊亮・古寺 建二・野村 高樹・渡邊 勝世
能勢 正貴・稲井 邦夫・中村 武史・田上 英明

【報 文】

マルチ送受波ソナーとピンガーを用いた 生簀クロマグロの計数手法の開発

濱野 明^{1*}・笹倉 豊喜²・鉛 進²・榊原 昇³・
井藤 俊亮⁴・古寺 建二⁵・野村 高樹⁵・渡邊 勝世⁶・
能勢 正貴⁶・稲井 邦夫⁶・中村 武史¹・田上 英明¹

Development of a New Counting Method of Caged Bluefin Tuna Using Multi-transducer Sonar and Pinger

Akira HAMANO^{1*}, Toyoki SASAKURA², Susumu NAMARI², Noboru SAKAKIBARA³,
Shunsuke ITO⁴, Kenji KODERA⁵, Takaki NOMURA⁵, Katsuyo WATANABE⁶,
Masataka NOSE⁶, Kunio INAI⁶, Takeshi NAKAMURA¹ and Hideaki TANOUÉ¹

Abstract

Over the past decade, the farming of bluefin tuna has played an increasingly important role in the aquaculture of Japan. According to a recent report with respect to tuna farming, there are 160 tuna farms and 1432 cages of bluefin tuna in Japan. For the bluefin tuna farmer in Japan, to determine the number of farmed fish is one of the key issues to monitor the number of fish in addition to feed waste, escapement, behavior, and dead fish. However, there presently exists no reliable method to count the number of bluefin tuna in a cage. The most popular type of counter is currently the underwater stereoscopic camera system which has mainly been used by a diver for counting. However, this kind of counting method is not only labor-intensive, but its accuracy is low in dark or turbid water. The purpose of this study is to develop an accurate counting method for the farmed bluefin tuna using the multi-transducer sonar and pinger. This newly developed a multi-transducer sonar system is based on counting the individual fish that has passed through "the sound curtain" consisting of 15 transducers (460 kHz). In addition, a pinger was used to clarify the behavior and swimming speed of the caged fish. As a result, it was found that all of the fish regularly swim in a concentric circle in the cage space, and the lap time in each lane of 1m from cage center for one round was estimated by a linear regression equation. The number of fish in each lane for one round could be calculated by multiplying this lap time and the number of fish that passed through "the sound curtain" per unit time. The total number of fish could then be calculated by adding up the number of fish in each lane. The accuracy of this method verified by multiple actual tests was 1% or less and 1 fish. It was considered that this approach is effective for counting caged bluefin tuna with the objective of practical use.

2017年12月4日受付, 2017年12月5日受理

キーワード: クロマグロ, マルチ送受波ソナー, ピンガー計測, 尾数計測法, 養殖生簀

Key words: Bluefin tuna, multi-transducer sonar system, pinger measurement, new counting method, aquaculture

¹ National Fisheries University, 2-7-1 Nagata-hon' machi, Shimonoseki, 759-6595, Japan (国立研究開発法人水産研究・教育機構水産大学校 〒759-6595 山口県下関市永田本町2-7-1)

² Fusion Incorporation, 1-1-1-806, Daiba Minato-ku, Tokyo, 135-0091, Japan (フュージョン有限会社 〒135-0091 東京都港区台場1-1-1-806)

³ Chubu Shiryo Co., Ltd., 14-6, Kitahama-cho, Tita, Aichi, 478-8502, Japan (中部飼料株式会社 〒478-8502 愛知県知多市北浜町14-6)

⁴ Ho-Yo Suisan Ltd., 15-8, Kazura-minato, Saiki, Oita, 876-0801, Japan (有限会社豊洋水産 〒876-0801 大分県佐伯市葛港15-8)

⁵ The National Federation of Fisheries Cooperative Associations Mutual Aid, 1-1-12, Uchikanda, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0047, Japan (全国漁業共済組合連合会 〒101-0047 東京都千代田区内神田1-1-12)

⁶ Nippon Kaiji Kentei Kyokai, 2-14-9, Shibaura, Minato-ku, Tokyo, 210-0013, Japan (一般社団法人日本海事検定協会 〒210-0013 東京都港区芝浦2丁目14-9)

*Tel: 080-1638-1227, Fax: 083-252-0903, ahamano@fish-u.ac.jp (水産大学校名誉教授)

1. はじめに

生簀養殖の主要魚種の一つであるクロマグロは、その表皮が弱いという生物学的な特性もあって¹⁾、一度生簀に活け込むと、出荷までその魚体に触れることができないため、養殖業者の多くは稚魚の活け込み (IN) から出荷 (OUT) までを、経験的な方法で尾数管理を行っている。このため、出荷時における実際の尾数と帳簿が合わなくなることもあり、経営管理上多くの問題が生じている。生簀内の確かな尾数管理は、給餌量及び生産出荷量の調整を行う上でも極めて重要であり、養殖尾数をリアルタイムで把握できる計測手法の確立が強く望まれている。

しかしながら、これまでの計測法の多くは既存の魚群探知機を用いて、生簀内の魚群密度 (単位体積当りの尾数) を計測し、一方で1尾当りのTS (ターゲットストレンジス)²⁾を測定し、その両者から生簀内の総尾数を推定するという、密度推定法³⁾が用いられてきた。この方法の欠点はTSの値が魚の体長や遊泳姿勢によって大きく異なるため、原理的に計数精度を上げることができないという点である。一方で、計数精度を上げる目的で、水中カメラを用いた方法⁴⁾が用いられてきたが、この方法は水中視認範囲内であれば個体数を計測できるが、低照度や濁りの影響で画像が不鮮明の場合、計数が困難となるため、計測時期や時間が限定されるという欠点がある。このような現状を踏まえ、本研究は、マグロ生簀用に開発したマルチ送受波ソナーとピンガーを用いて、従来、水中カメラでは計測が困難であった水中の濁りの影響や低照度の環境下においても、リアルタイムで生簀内のクロマグロの尾数を計測できる計数システムの開発を目的とした。

2. 材料及び解析方法

1) 材 料

大分県津久見市にある (有) 豊洋水産の2基 (以下、生簀A、生簀Bという) の30m円形生簀 (ポラーサークル型) で飼育されているクロマグロを対象として、マルチ送受波ソナーとピンガーを用いて、平成27年4月から平成29年6月の間、計6回計測実験を行った。今回の解析では、生簀A (4歳魚) では、平成28年10月31日及び平成29年6月8日、生簀B (5歳魚) では、平成29年2月27日及び6月8日に計測したデータ、さらに生簀現場で得られる水揚げ尾数 (出荷及び死亡尾数の合計) の集計データを用いた。

2) 解析方法

本研究の解析方法は、クロマグロが生簀内を一定方向に周回する遊泳行動に着目したものであり、周回するクロマグロが生簀の一断面を通過する単位時間当たりの通

過尾数と1周当りの周回時間を掛け合わせることで、生簀内の総尾数を求める方法である。従って、本法は従来の音響計測法で用いられてきた単位体積当たりの魚群密度を生簀の空間領域 (Space domain) に引き延ばす密度推定法ではなく、単位時間当たりの通過尾数を周回時間の時間領域 (Time domain) に引き延ばして求める方法である。

ここで、クロマグロの周回時間は周回半径によって変化するため、周回半径と周回時間との関係を求める必要がある。そこで、遊泳軌跡の中から、周回半径すなわち生簀中央から外周までの1m毎の同心円上のコース (以下、各レーンと呼ぶ。) における周回データを取り込み、それらを基に周回時間と周回半径の関係式を求めた (式(1))。

次に、生簀の一断面を通過した尾数を単位時間当たりの通過尾数として求め、先に求めた各レーンにおける周回時間と単位時間当たりの通過尾数を掛け合わせ、これを各レーンにおける通過尾数として求め、これらを総計することにより生簀内のクロマグロ総量 Q を求めた (式(2))。以下にこれらの算式を示す。

$$y(i) = ax(i) + b \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

$y(i)$: i 番目のレーンの周回時間 (s)

i : 生簀中心から外周までの1mごとのレーン番号

x : 生簀中心から外周までの距離 (周回半径 (m))

$$Q = \sum_{i=1}^n (m(i)/t \times y(i)) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

Q : 総尾数

$m(i)$: i 番目のレーンにおける t 時間の通過尾数

t : 計測時間 (s)

n : レーン番号の総数 である。

上記の考え方の下、マルチ送受波ソナーとピンガーで得られた計測データを式(1)、(2)を用いて解析し、この結果を生簀現場で集計された水揚げ尾数 (出荷及び死亡尾数の合計) と比較、検討した。

3. 結 果

1) マルチ送受波ソナーの開発

今回、新たに開発したマルチ送受波ソナーの基本設計の考え方は、30m型生簀の中を遊泳するクロマグロを見落しなく計測できる装置の開発であり、そのための要件としては、①遊泳するクロマグロの個体識別が可能な周波数、距離分解能 (パルス幅) 及びビーム幅、②高速で遊泳する個体を捕捉可能なパルス発射回数、③鉛直断面 (70度) をカバーできる送受波器の配列方法の検討であ

る。そこで、本研究では、周波数は高分解能が可能な高周波数帯の460 kHz、マグロの個体識別が可能な距離分解能を持つパルス幅として0.064ms（距離分解能4.8cm）、一断面を見落としなく探査できるためのビーム幅として5度、遊泳速度が約1 m/sのクロマグロからの反射エコーを十分受波できるためのパルス発射回数を20回/sとし、これら要件をすべて満たす小型送受波器（50×40×25mm）の開発を行った。そこで、これら機能要素を持つ送受波器を扇形状に15個配置したマルチ送受波ソナー装置を完成させた（Fig. 1）。このマルチ送受波ソナーを、生簀の内側に設置し、このソナーから発信する超音波で生簀の一断面をいわゆる「音響カーテン」で仕切り、周回するクロマグロがこの音響断面を通過する尾数を見落としなく計測できるようにした（Fig. 2）。

2) ピンガーによる遊泳行動の計測

クロマグロが生簀を1周するのにかかる時間、すなわち周回時間を求めるためには、魚の遊泳行動を把握する必要がある。その一つの方法として、ピンガーを利用し

た計測法が考えられるが、クロマグロへの発振器の装着は、本種の表皮が極めて弱いという生物的特性もあり、これまで実施することができなかった。そこで、クロマグロの餌であるサバの体内に小型ピンガー（Fusion社製、長さ36mm、直径9.5mm）を挿入し、それをクロマグロに食べさせることによりクロマグロの体内に非接触でピンガーを取り込ませる方法を考案した⁵⁾（Fig. 3）。ピンガー信号をもとに遊泳軌跡を求める方法は、遊泳する魚から発信されるピンガー信号をFig. 4に示す生簀内の4か所に設置した受信機で受信して、それぞれの信号の受信時間差から得られる位置の線の交点から魚の位置をリアルタイムで求めるものである。このピンガーの周波数は62.5kHzで、発信間隔は1回/sである。本研究では5尾の魚にピンガーを装着し生簀内の魚の行動を計測した。クロマグロの体内から発信されたピンガー信号は、欠落することもなく受信機に受信され、生簀内で遊泳するクロマグロの遊泳行動を1秒ごとにリアルタイムで受信計測することができた。この遊泳軌跡をFig. 5に示す。

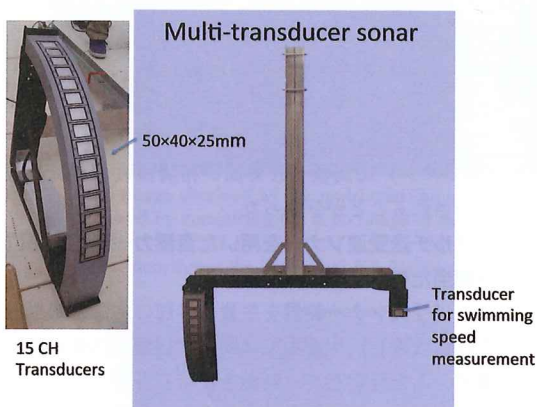


Fig. 1 An overview of the newly developed multi-transducer sonar system consisting of 15 transducers.

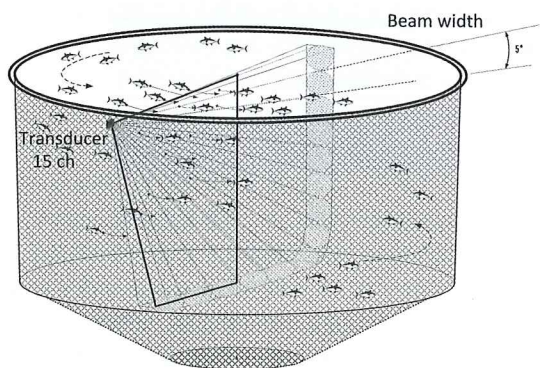


Fig. 2 Schematic diagram of a concept drawing of "the sound curtain" by using the multi-transducer sonar. The beam-width of 1 channel is designed to cover 70 degrees at five degree intervals.



Fig. 3 By letting mackerel swallow the pinger, it was entered the body of a tuna through this bait. As a consequence, wearing of a pinger occurred without injuring the tuna.

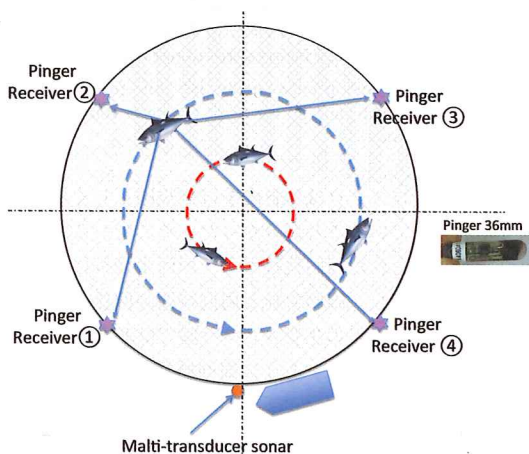


Fig. 4 Schematic diagram of pinger measurement system. The difference in arrival time of pinger signal is used to determine the position of fish.

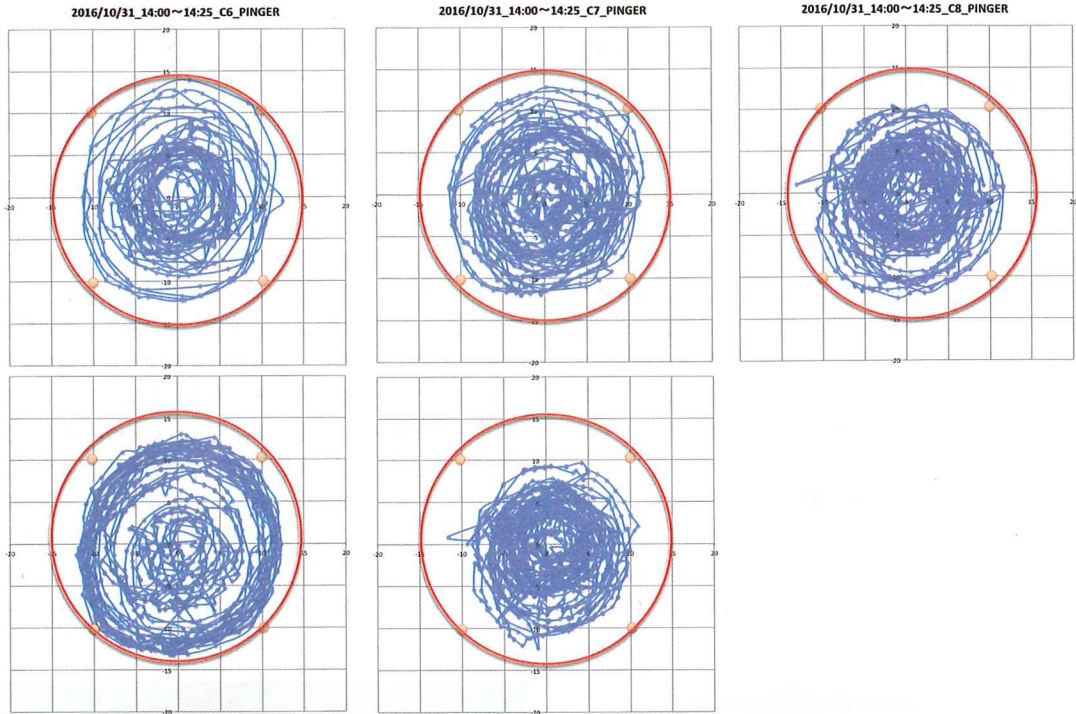


Fig. 5 Swimming traces of caged tuna obtained by the pinger measurement. All of the fish regularly swam counterclockwise in a concentric circle in the cage space.

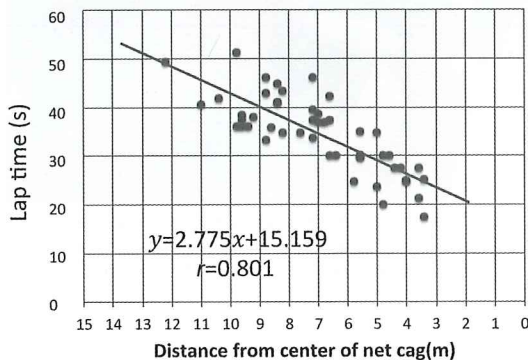


Fig. 6 The relationship between the lap time for one round and the each lane of 1m from the cage center to the outer frame.

この結果、クロマグロは生簀内をほぼ規則正しく反時計回りに周回していることが分かった。そこで、これらピンガーから得られた周回軌跡から、周回半径毎に魚の遊泳軌跡を取り出し、周回半径と周回時間の関係を調べた。この結果、10月31日の生簀Aでの計測では25分間の軌跡データからFig. 6に示すように周回時間 (y) と周回半径 (x) との関係は $y=2.775x+15.159$ ($r=0.801$) の一次回帰式で表すことができた。また、2月27日の生簀Bでの計測では、1時間の軌跡データから $y=3.315x+14.88$ ($r=0.867$) の一次回帰式が得られた。このことから、生簀内で遊泳するクロマグロの周回時間は、周回半径

(各周回レーン) の関数として高い相関係数の一次回帰式で表わされることが分かった。

3) マルチ送受波ソナーを用いた音響カーテンの単位時間当たりの通過尾数と総尾数

マルチ送受波ソナー装置を生簀の外周の内側水深1mのところ設置し、生簀中央に向けて15個の送受波器から音響ビームを発信し、一断面を仕切る音響カーテンを形成した。このソナーからは、1秒間に20回の超音波が発信されるので、1秒間に20枚の断層画像が得られる。また、マルチ送受波ソナーからは通常の魚群探知機のような映像が15チャンネル分の画像としてPC画面上に表示される。しかし、本ソナーシステムは同一周波数の信号を15チャンネル同時に送信するため、隣り合う送受波器に他チャンネルからの反射信号が偽像として受信される。従って、この混信に起因する偽像を取り除く必要がある。そこで各チャンネルの映像で計測時間と距離が一致する個体反応画像を比較して、個体反応が強い画像を取り込み、そうでない反応を偽像として取り除く処理をマニュアルで行った。この取り込まれ反応画像を白丸(O)、取り除いた反応を×印(×)として例示したのがFig. 7である。ここで取り込んだ個体反応におけるチャンネルの送信俯角 θ 、及び個体反応までの距離 R をもとに、生簀内の魚の3次元的位置、すなわち生簀外側からの水平距離 ($R\cos\theta$)、及び遊泳水深 ($R\sin\theta + 1$) を

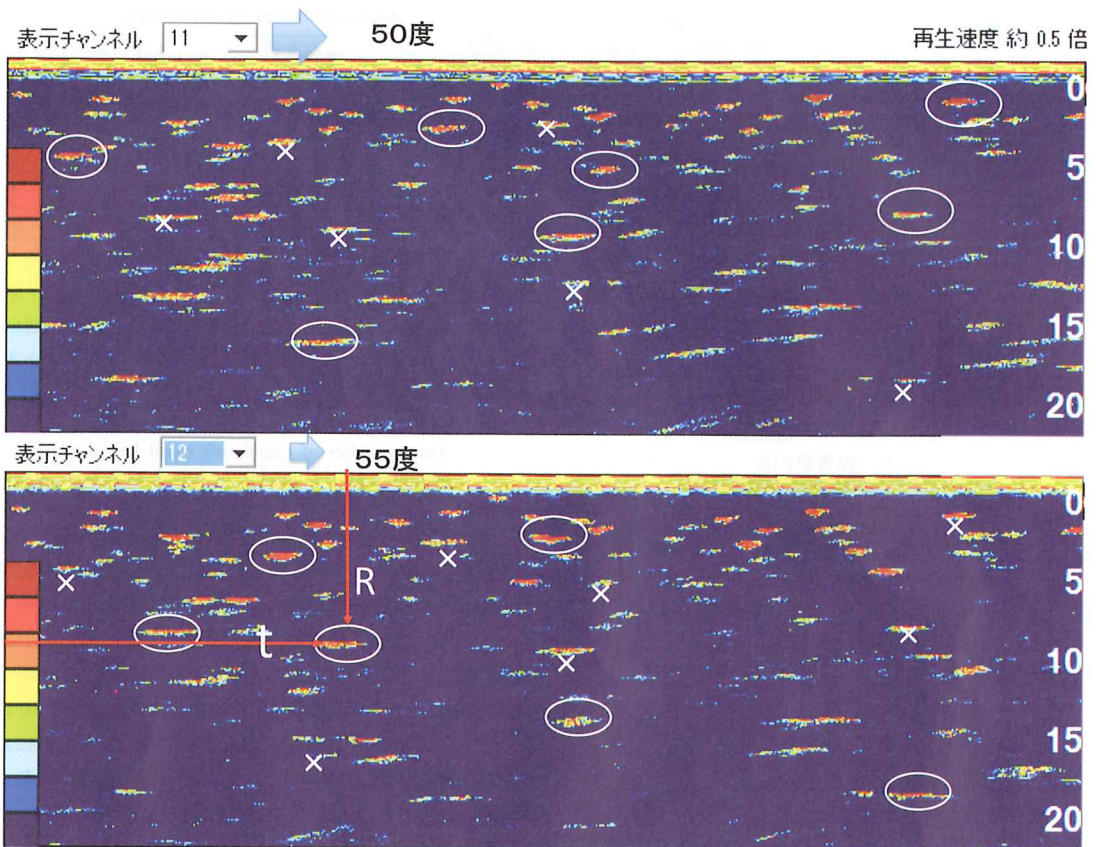


Fig. 7 Echo image obtained by the multi-transducer sonar displayed on a PC. The interference of the fish image was removed by comparing the echo image of the so-called "ghost image" on the next channel. ○ : true image × : ghost image
After identifying the individual fish indicated by a white circle, the position of fish in R and t was measured.

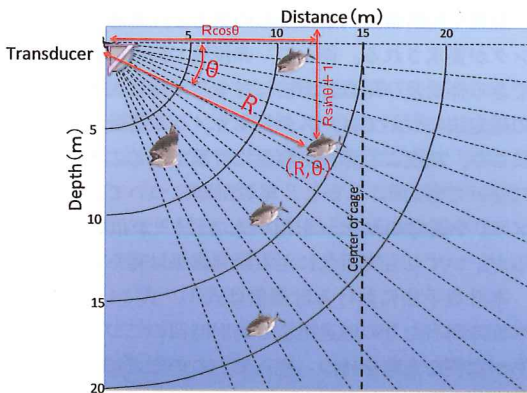


Fig. 8 A tomography image of fish position. For each fish, the distance from the outer frame of the cage and depth of the swimming layer were calculated.

それぞれ求めた (Fig. 8)。

このような方法で、10月31日、遊泳が比較的安定していた2分間の画像データを解析に用いた。この結果、音響カーテンを通過する単位時間当たりの通過尾数の水平的分布を生簀中央から生簀の外周にかけて周回レーン毎

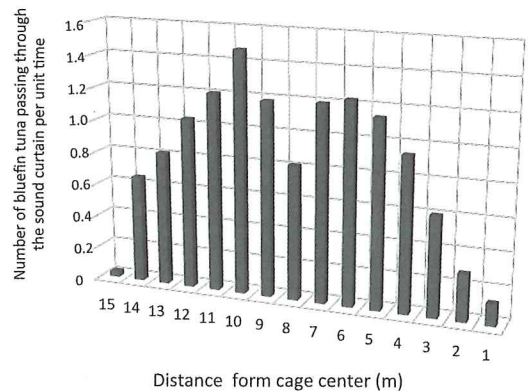


Fig. 9 The number of bluefin tuna passing through the sound curtain per unit time in the horizontal plane.

に示したのがFig. 9である。すなわち、全体の74%の魚が生簀の中央から4-7mのレーン、及び9-12mのレーンで遊泳していることが明らかにされた。また、深度方向では、表層から1-6mの層に52%の魚が遊泳分布していることが分かった (Fig. 10)。

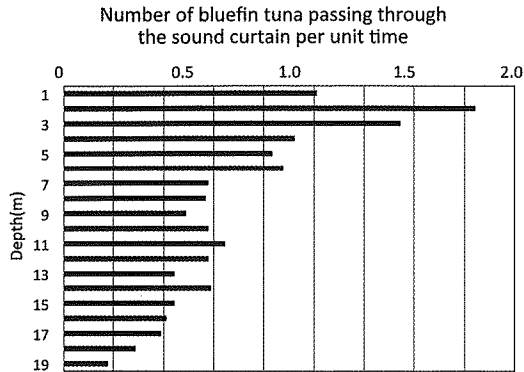


Fig. 10 The number of bluefin tuna passing through the sound curtain per unit time in the vertical plane.

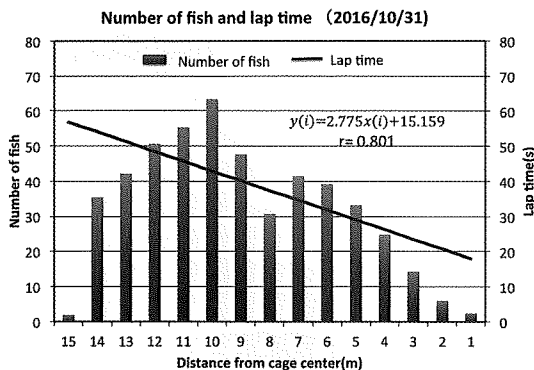


Fig. 11 This figure shows the number of fish in each lane of 1m for one round in cage A. In addition, the regression line of lap time for one round was added to this figure. Total number of caged fish could be calculated by summing up the number of fish in each lane. It was estimated that there were 489 fish in the cage.

ここで、式(1)で得られた各レーンの周回時間 (s) とマルチ送受波ソナーで得られた音響カーテンを通過した単位時間当たりの通過尾数を掛け合わせるにより、各レーンにおけるクロマグロの1周分の通過尾数を求めることができる。この結果を各レーンの通過尾数として示したのがFig. 11である。さらに、式(2)に基づきこの各レーンにおける通過尾数を足し合わせるにより生簀に現存するクロマグロの尾数が求められる。この結果、10月31日における生簀Aにおける解析結果は489尾が得られた。また、同様の方法で同一の生簀の計測を6月8日に行った結果は、459尾であった。従って、この約7ヶ月間における生簀のクロマグロの減少数は30尾となる。一方、この間における生簀Aからの出荷は2月27日以降から始まり、6月8日までに水揚げされたクロマグロの合計は28尾であった。このことから、この7か月間における両者の差は2尾であることが示された。

さらに、すべての水揚げを約半年後に控えた生簀Bで飼育されているクロマグロの尾数を2月27日に計測し、

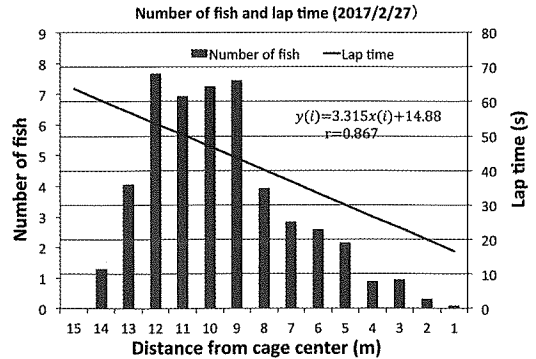


Fig. 12 This figure shows the number of fish in each lane of 1m for one round in cage B. In addition, the regression line of lap time for one round was added to this figure. Total number of caged fish could be calculated by summing up the number of fish in each lane. It was estimated that there were 48 fish in the cage.

3分間の計測データを解析した結果、生簀内の残存尾数は48尾であった (Fig. 12)。一方、2月27日からすべてのクロマグロが最終水揚げされた9月25日までの間に、出荷及び死亡のために水揚げされた総尾数は49尾であった。このことからこの両者の差は1尾であることが分かった。これらの結果から生簀A及び生簀Bの両生簀において、本計測システムで計測された尾数と水揚げされた尾数には、大きな差がないことが明らかにされた。

4. 考 察

生簀クロマグロの飼育期間は活け込みから2年から3年と長期にわたるため弊死亡率も高い。このため飼育環境の整備や給餌量の調整に多くの労力と注意深いモニタリングが要求される。従って、非接触で簡便に計ることができる体長及び尾数計測法に対する期待は大きい。体長の推定法については、ステレオカメラが普及されたことにより、精度よく体長が容易に計測できることが明らかになってきた⁶⁾。しかし、尾数計測については、音響カメラ⁷⁾や通常のソナーを用いた方法^{8,9)}が用いられているが、いずれも実用化に至る研究成果は得られていない。

本計測手法における計測値は式(1)、式(2)に示す通り、単位時間当たりの通過尾数と周回時間の二つのパラメータが重要な意味を持つ。従って、この2点について検討しておかなくてはならない。最初の単位時間当たりの通過尾数に関しては、音響カーテンの送受波器に対して遊泳個体が重なることによる見落としが考えられるが、2分から3分間の解析データの中で遊泳個体が常に重なる可能性は低く、また通過尾数を単位時間当たりの通過尾数として平均化することから、この見落としについては相殺されると考えられた。また、通過尾数のデータ読み込みについては、今回の解析では2名の専門家による手作業で行ったが、今後は実用化と作業の迅速化のために

もソフトウェアの開発を進め、ソフトウェアとの併用も検討する必要があると考えられた。次に、周回時間については、10月31日では25分間、2月27日では1時間の軌跡計測データから周回半径と周回時間の回帰式を求めたが、この2例とも高い相関係数のもとで一次回帰式が得られたことから、これら回帰式が計測値に及ぼす影響は僅少であると考えられた。

次に、本研究の計測結果を検証する方法として、計測後すべての魚を水揚げし、その水揚げ尾数と計測結果を比較検証する方法が考えられるが、魚体を傷つける可能性もあり、この方法を用いることはできない。

そこで、今回の計測結果を検証する方法として、ある一定の期間における本計測値の差と養殖現場でのこの期間における水揚げ尾数（出荷及び死亡尾数の総計）との比較、さらにある時期における計測値と、すべての魚が水揚げされた最終水揚げ尾数を比較した結果について考察を行った。

ここで、生簀で養殖されているクロマグロの現存尾数Nは、下記の式で表される。

$$N = \text{活込み尾数} - (\text{出荷尾数} + \text{死亡尾数}) - (\text{逃亡} + \text{盗難})$$

上式で活け込み尾数、出荷尾数、死亡尾数は既知、あるいは把握できる情報であるが、逃亡、盗難については把握できない。今回の計測間隔は生簀Aでは飼育期間途中の7か月、生簀Bでは最終水揚げ前までの7か月であり、この間における逃亡、盗難の可能性を無視することはできない。しかし、本研究では、計測結果を比較検証するデータとして水揚げ尾数（出荷尾数+死亡尾数）を検証用の基準値として用いた。

今回の計測結果から、生簀Aにおける7か月間の計測値の差は、30尾で、これに対して水揚げ尾数は28尾であった。これは計測値が実際の水揚げ尾数より2尾多い結果を示す。一方、生簀Bでは2月27日の計測値が48尾であるのに対して、同日から9月25日の最終水揚げまでの7か月間における水揚げ尾数は49尾であり、その差は1尾である。

これらのことから、本計数方法により、異なる2つの生簀の水揚げ尾数と比較しても、1~2尾の差であったことから、従来の方法では達成できなかった高い精度で現存尾数の計測値が求められることが明らかにされた。従って、本計測システムは水中の濁りの影響や低照度の

環境下においても、非接触で生簀クロマグロを計測できる極めて有効な計測手法であると考えられた。このことから、従来の養殖現場での、経験値や属人的な情報に基づいて行ってきた尾数管理を、今回の研究開発によって、革新的な生産・在庫管理システムの導入に新たな道筋を示すことができた。今後は養殖現場での厳密な尾数管理の実現により、品質及び数量管理の面で市場への戦略的な供給計画の立案や、経営の安定化、さらにはクロマグロの資源管理にも本計数システムが有効に活用されることが期待される。

参考文献

- 1) 小野征一郎編著：マグロの科学－その生産から消費まで－、成山堂書店、東京、1-337,2004.
- 2) R.B.Mitson:ソナー（濱野 明・前田 弘共訳）厚生社恒星閣社、東京、1-231,1994.
- 3) J.Brucynski: Introduction to the use of sonar systems for estimating fish biomass. *FAO Fish. Tech. Pap.*, 191 : Rev.1. 1-89, 1982.
- 4) A.Ramfos, A.Tzoumas, P.Alaveras and G.Katselis : Pilot study of dual camera system for the determination of size of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus Thynnus*, L. 1758) during caging. *Collect. vol. Sci. Pap. ICCAT*, 68(1) : 230-235, 2012.
- 5) A. Hamano, T.Sasakura, N.Sakakibara, T. Nomura, T.Nakamura, S.Namari, S.Ito, H.Tanoue: Development of a new counting method of caged bluefin tuna using multi-transducer sonar and pinger. ICES-WGFAST, Report of 2017 WGFAST, 33, Nelson, New Zealand, 2017.
- 6) V.Ticina, I.Katavic, T.Segvic-Bubic and L.Grubisic: Estimation of capture-at-size data of live bluefin tuna using underwater stereoscopic camera system. *Collect. vol. Sci. Pap. ICCAT*, 72 (6) : 1457-1462, 2016.
- 7) J.Han, N.Honda, A.Asada, and K.Shibata: Automated acoustic method for farmed fish counting and sizing during transfer using DIDSON. *Sixth International symposium on underwater technology UT' 9*, Wuxi, China, April 2009.
- 8) G.D.Melvin: *In situ* acoustic observation of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus Thynnus*) with high resolution multi-beam sonar. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 71(3) : 1446-1455, 2015.
- 9) 片貝 剛：ソナーを利用した生簀養殖マグロの計数、*アクアネット*, 3(8) : 23-27, 2000.