浮魚礁周辺のカツオ *Katsuwonus pelamis* を対象とした 広域および長期追跡システムの開発

浅井 咲樹,¹ 内田 圭一,¹ 宮下 和士,² 荒井 修亮,^{3a} 三田村 啓理,^{4bc}
北川 貴士,⁵ 白川 北斗,^{2d} 富安 信,⁶ 笹倉 豊喜,⁷ 宮本 佳則^{1*}

(2020 年 4 月 8 日受付, 2020 年 12 月 7 日受理, 2021 年 2 月 5 日 J-STAGE 早期公開)

¹東京海洋大学, ²北海道大学北方生物圏フィールド科学センター, ³京都大学フィールド科学教育研究センター,
⁴京都大学大学院情報学研究科, ⁵東京大学大気海洋研究所, ⁶北海道大学大学院水産科学研究院,
⁷株式会社アクアサウンド

Development of wide-area and long-term tracking system for skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* around FADs

SAKI ASAI,¹ KEIICHI UCHIDA,¹ KAZUSHI MIYASHITA,² NOBUAKI ARAI,^{3a}
HIROMICHI MITAMURA,^{4bc} TAKASHI KITAGAWA,⁵ HOKUTO SHIRAKAWA,^{2d}
MAKOTO TOMIYASU,⁶ TOYOKI SASAKURA⁷ AND YOSHINORI MIYAMOTO^{1*}

¹Tokyo University of Marine Science and Technology (TUMSAT), Minato, Tokyo 108-8477, ²Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 040-0051, ³Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Sakyo, Kyoto 606-8502, ⁴Graduate School of Informatics, Kyoto University, Sakyo, Kyoto 606-8501, ⁵Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8564, ⁶Marine Bioresource and Environment Sensing Faculty of Fisheries Science, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, ⁷AquaSound Inc., Kobe, Hyogo 650-0046, Japan

Skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* is known to aggregate around fish aggregating devices (FADs), and many ultrasonic biotelemetry investigations have been conducted around FADs. However, the investigation areas have been limited to the area around surface type FADs where receivers can be installed, and adequate tracking cannot be achieved. To clarify the behavioral ecology of skipjack in more detail, it is necessary to carry out extensive and long-term observations. We have developed a fishing boat-mounted receiving system that combines an ultrasonic biotelemetry receiving system and a data communication terminal. The developed system was installed on a fishing boat that operated around FADs in waters around Yonaguni Island, Okinawa, Japan, located in the upper Kuroshio Current. The effectiveness of behavioral investigation of skipjack around FADs was verified. As a result, we were able to expand the tracking area and received the locations of individuals by GPS and successfully tracked them for long periods. Furthermore, data were collected in an efficient manner by using an information and communication technology (ICT) network as a data acquisition method.

キーワード : ICT, 浮魚礁, カツオ, 超音波バイオテレメトリー, 追跡システム

カツオ *Katsuwonus pelamis* は高度回遊性魚類であるが、パヤオと呼ばれる浮魚礁に蟄集し一定期間滞留することが知られている。^{1,2)} この蟄集メカニズムと滞留実態の解明を目的に、超音波バイオテレメトリーによる調査研究が数多く行われてきた。³⁻⁵⁾ 超音波バイオテレメトリーは、送信側の超小型超音波発信器（以下、発信器）と、発信器からの超音波信号を受信する受信機で構成される。追跡対象に発信器を装着し、受信システムの受信可能範囲に供試個体が存在さえすれば、個体情報や遊泳深度などの情報取得が可能である。受信機には、リアルタイムにデータを確認できる有線式のものや、データを内部に記録し蓄積するロガー式のものがある。有線式の受信機は調査中に現場での操作が必要となり長期の調査には向かない。このため先行研究の多くはロガー式の受信機（以下、設置型）を浮魚礁に設置する方法によって調査が行われてきた。これまでの設置型を用いたカツオの行動調査では、浮魚礁周辺における鉛直行動および滞留行動の特徴が明らかにされている。⁶⁾ さらに、複数の浮魚礁に設置型を装着することで、浮魚礁間の標識個体の移動を調査した例もある。⁷⁾ 一方、設置型の受信範囲は、設置した浮魚礁周辺の数 100 m に制限され、受信範囲から離脱した個体の追跡は不可能である。また受信範囲内では、発信器の存在の有無しか得られず詳細な位置情報を得ることはできない。超音波バイオテレメトリーでは複数の受信機を用いることで、受信機ごとの受信範囲の重なり⁸⁾ や受信時間差⁹⁾ から発信器の大まかな位置を求めることが可能である。しかし、浮魚礁は概ね水深 100–3000 m の海域に数キロ間隔で敷設されており、⁹⁾ 任意の場所に受信機を設置することや測位可能なアレイを組むことは難しい。

日本では黒潮流域を中心に多数の浮魚礁が設置されており、これらを活用することで、カツオの移動や滞留を知ることはできる。しかし、必ずしもすべての浮魚礁に設置型を装着することができるわけではない。浮魚礁は浮体・係留索・アンカーの 3 要素から構成されており、¹⁰⁾ 浮体の敷設深度の異なる「表層型」と「中層型」に大別される。表層型は浮体部が海面から露出しており、目視でその位置を探すことが可能である。中層型は浮体部が水面から約 50 m の深度に保持されている。近年では、普段は表層型と変わらないが、潮流の影響を強く受けると浮体部が海面下に沈み込む「表中層型」（表層型と表中層型をまとめて以下、表層パヤオ）も利用されている。¹⁰⁾ 設置型を用いた調査では、潜水土による表層パヤオの浮体部への受信機の設置は可能であるが、中層型（以下、中層パヤオ）では潜水土による設置はできない。したがって、設置型による中層パヤオ周辺の調査は行われず、その周辺でのカツオの行動は明らかにされていない。黒潮流域には、多くの中層パヤオが設置され

ており、周年にわたってカツオ・マグロ類が漁獲されている。¹¹⁾ しかし、カツオは表層パヤオに付きやすいとされており、¹²⁾ 同じ中層パヤオでも浮体水深が浅いものほど漁獲量が多いとの報告もある。¹¹⁾ そのため、中層パヤオ周辺でのカツオの行動生態を明らかにすることは、その蟄集効果を明らかにする上でも重要である。また、流れの速い海域では浮魚礁の破損や流失が起こるため、^{12,13)} 設置型では受信機ごとデータを失うこともある。このように設置型は、長期間安定して追跡を続けることができる反面、追跡範囲とデータの回収に問題があった。したがって、確実にデータを得ることができる新たな回収方法を検討する必要がある。

そこで本研究では、これまで設置型中心で行われてきた浮魚礁周辺のカツオの行動調査の問題点を解決し、浮魚礁周辺のカツオの蟄集メカニズムおよび滞留目的の解明に繋げるための新規受信システムの開発を試みた。新規受信システムは、設置型で追跡できない中層パヤオ周辺のデータ収集を可能にし、受信機を回収しなくても遠隔的にデータを得ることができるものを開発した。その上で、カツオを対象に浮魚礁周辺において本システムの有効性について検証した。

材料と方法

開発したシステムの概要 システムを設置するプラットフォームとして浮魚礁で操業する漁船に着目した。パヤオ漁業を営む漁船は、カツオが集まる浮魚礁周辺へ向かいながら操業する。これらの漁船に受信システムを搭載すれば、カツオに遭遇する確率が高くなるとともに、受信機を紛失する恐れはない。この受信システムに GPS を組み込むことで、受信位置情報の取得とその時の漁船の船速などの情報を同時に得られるようにした。さらに携帯電話通信端末を組み込むことで、携帯通信網を介して得られたデータを自動的に収集することを可能とした。本稿ではこれらを漁船搭載型受信システム（以下、

Fig. 1 Outline block diagram of the fishing boat-mounted receiving system.

漁船搭載型)とした。

漁船搭載型の仕様 開発した漁船搭載型は受波器 (FRTD-60k, フェージョン有限会社), 超音波受信システム (FRTD-250D, フェージョン有限会社), GPS ユニット (PA6H, Global Top), 携帯電話通信端末 (Open Blocks IoT EX1, Plat' Home), 無線通信アンテナ (DP-BRO-AD, 日本アンテナ株式会社) から構成されている (Fig. 1)。電源は漁船から供給するためバッテリー交換の必要がない。また, 漁業者がシステムを起動・停止しなくても, 漁船のエンジン始動に合わせてシステムが起動し, エンジン停止に合わせて停止するシステムを構築した。超音波信号を受信する受波器は, 魚槽内の排水孔 (スカッパー) に船底取付け用ジグを用いて受波部を船底から少し突出するように設置した。漁船によってスカッパーの位置が異なり, 使用状況も異なったため, 船尾側と船首側のどちらかで操業に支障がない位置に設置した。GPS ユニットからは, 1 秒毎の測位データ (時刻, 緯度経度, 速度) が携帯電話通信端末に出力される。超音波信号を受信されると, 超音波受信システムからその受信データ (ID, 深度情報) が携帯電話通信端末に出力される。携帯電話通信端末は, 15 分毎に測位データと受信データをメールでデータサーバに送信する。発信器の受信が無い場合でも測位データが送信されるため, 漁船の出漁状況や操業場所を把握することもできる。さらに, 超音波受信システム内の SD カードに放流個体の ID と, 超音波信号の深度解析に必要な係数を登録しておく, 登録した ID が受信された際に, 船上の超音波受信システムの液晶表示器にその遊泳深度が表示される。同様に, 事前にデータサーバに SD カードと同様の放流個体の情報を登録しておけば, 専用のウェブサイト上で受信個体情報と受信位置, 受信時間, 遊泳深度を確認できる。事前に登録していない個体

であっても, データサーバに蓄積されたデータから個体情報を抽出することも可能である。また, 沖合などで携帯電話網の電波が利用できない場合は, 携帯電話通信端末にデータが蓄積され, 再び携帯電話網のサービスエリアに入った時に蓄積データが一括してサーバに送信される。

発信器の装着と放流 供試個体には深度センサー付発信器とダートタグの 2 種類を装着した。発信器は漁船搭載型に対応したアクアサウンド社製の AQPX-1000P (長さ 36 mm × 直径 9.5 mm, 水中重量 1.6 g) を使用した。この発信器は M 系列信号を用いた Gold code (ゴールド符号) 発信器であるため, パルス信号の相互干渉が少なく, 同時に多数個体の追跡が可能である。¹⁴⁾ 使用可能なゴールド符号は 32 種類なので, パルスを 2 回発信する場合, 1024 通りの個体 ID を指定できる。本研究では, 深度情報と個体 ID を 90 秒または 180 秒おきに送信するように設定した。電池寿命は 90 秒周期で約 180 日, 180 秒周期で約 360 日である。また, 計測可能な最大深度は 500 m, 信号到達距離は約 500 m, 使用周

Table 1 Summary of five acoustic tagging investigations in waters around Yonaguni Island

Period of tagging	Number of tagged skipjack tunas		Total	Transmission interval of acoustic transmitter (s) (Battery life)
	FADs type (release point)			
	Surface	Middle layer		
2017/3/16–20	37	86	123	90 (180 days)
2017/5/25–27	4	54	58	90 (180 days)
2017/8/25	9	—	9	180 (360 days)
2018/1/7	—	12	12	180 (360 days)
2018/3/1–6	32	60	92	180 (360 days)

Fig. 2 Map of the waters around Yonaguni Island showing the locations of fish aggregating devices (FADs). S indicates surface type FADs and M indicates middle layer type FADs. S1 was washed away in July 2017. S5 was additionally installed in December 2017.

波数は 62.5 kHz である。

発信器の装着と放流は、漁船搭載型が稼働している期間中に与那国島周辺海域 (Fig. 2) にて計 5 回行い、合わせて 294 個体を放流した (Table 1)。供試個体は、それぞれ与那国島漁業協同組合に所属する小型漁船を用船し、表層パヤオおよび中層パヤオ周辺において曳縄により漁獲した。35 cm 以上のカツオを対象に発信器の装着を実施した。操業は明け方から 6-8 時間行い、1 日に 2 から 4 基の浮魚礁を移動しながら行った。捕獲した魚は魚体測定台にて尾叉長を測定後、ダートタグ (PDA, Hallprint Pty Ltd) と発信器を装着して放流した。ダートタグはカツオの背鰭の基部に専用のアプリケーターを用いて装着した。発信器は個体の肛門から斜め前方 (頭側) 1 cm 程度をメスで開腹し、腹腔内に発信器を挿入後、手術用スキンステップラーで縫合した。カツオは長く船上に上げておくことができないため、迅速に放流することを最優先として麻酔による処理は行わなかった。一連の装着作業は釣獲から 30 秒以内に終わらせ、その場で直ちに放流した。また、放流した 294 尾の平均尾叉長は 41.6 ± 3.8 cm であり、最小尾叉長が 35.0 cm で最大尾叉長が 65.0 cm であった (Fig. 3)。

漁船搭載型の評価方法

1. 受信特性の評価 漁船の航跡や船速、船上作業 (移動中・曳縄中・漁獲中) を解析し、これらと受信があっ

Fig. 3 Fork length frequency distribution for tagged skipjack tuna.

た船速ごとの受信回数から求めた受信頻度を比較し、漁船搭載型の受信特性を明らかにした。解析には漁船搭載型を装備した漁船で行った放流調査時のデータのうち、受信特性を判断するのに十分な受信数が得られた 2018 年 6 月 13 日の出港から帰港までの 5 時間 33 分のデータを用いた。漁船搭載型の受信特性として、データサーバに送信された GPS 情報から取得された漁船の船速に対する受信頻度を調べ、乗船中に目視で確認した船上作業 (移動中・曳縄中・漁獲中) と比較し、受信の特徴を記述した。同日に中層パヤオで発信器を取り付けて放流した 30 個体のうち、放流直後に受信された 23 個体から受信があった。なお、放流作業にあたり、通常の操業を妨げないように配慮した。

2. 有効性の評価 漁船搭載型を沖縄県与那国島の漁船 4 隻に搭載し、2017 年 3 月 16 日から 2018 年 6 月 13 日までの 455 日間のうち操業が確認された 368 日間のデータを使用した。調査期間中の日ごとの出漁数を Fig. 4 に示す。いずれの漁船も浮魚礁周辺での操業を主とする小型漁船 (5 トン未満) で、操業は全て日中に行われた。受信データの解析では、放流日の翌日からのデータを用い、受信 ID の組み合わせから個体の識別が可能であり、かつ深度データが確認できた場合に 1 回の受信としてカウントした。一部の漁船搭載型では、GPS アンテナの不調から位置データと受信時刻を取得できない期間があったため、それらの期間はメールの送信日をデータ受信日と判断し、受信位置を必要とする解析は行わなかった。

まず漁船搭載型による中層パヤオでの追跡の有効性について評価するために、放流場所を表層パヤオと中層パヤオに分け、それぞれ放流数に対する遭遇個体数の割合 (受信個体数/放流数) を遭遇率として求めた。次に、漁船搭載型によって取得できるカツオの移動について評価するために、個体ごとに受信があった浮魚礁を求め、複数の浮魚礁で受信された個体を浮魚礁間の移動が確認された個体とした。さらに、複数の表層パヤオで受信された個体、表層パヤオと中層パヤオで受信された個体、複数の中層パヤオで受信された個体の 3 つのパターンに分けて、漁船搭載型で把握できる浮魚礁間の移動について評価した。また、漁船搭載型によって取得できるカツ

Fig. 4 Number of operating fishing boats per day.

オの滞留について評価するために、個体ごとに追跡日数と受信日数を求めた。追跡日数と受信日数は、それぞれ放流日から最後に受信された日までの日数と受信が確認された日数とした。最後に、漁船搭載型の追跡範囲について評価するために、浮魚礁ごとに受信位置の浮魚礁からの水平距離分布と追跡面積を最外郭法¹⁵⁾を用いて算出した。追跡面積の解析では3点以上の受信が確認された浮魚礁を対象とした。そして、発信器の信号到達距離をもとに設置型を用いた場合の追跡面積を半径500mの円の面積 0.785 km^2 であると仮定し、これを基準として漁船搭載型の浮魚礁ごとの追跡面積を比較した。浮魚礁ごとに受信位置を分ける際は、最も近い浮魚礁を選択した。

結 果

受信特性と操業実態 漁船は出港してから浮魚礁に到着するとただちに操業を開始し、Fig. 5(a)に示すように浮魚礁の周りを回りながら操業していた。操業中は船速の変化が大きく、加速と減速を繰り返していた。放流

Fig. 5 (a) Receiving position and ship tracking when conducting an acoustic tagging investigation around M9. The square is the position where the data shown in Fig. 5(b) were received. (b) An example of ground speed over time during operation of the trolling fishing boat and the receiving time of transmitter signals. The solid line is the ground speed from GPS, and the diamonds below are the receiving time.

直後に確認された受信では、漁船が減速した際に受信する傾向がみられた (Fig. 5b)。船上作業の目視観察結果から、浮魚礁近くで曳縄をしながら6-8ノットで魚を探索し、魚がかかったことを認識すると船速を4ノット程度まで減速させて巻き上げ作業を行い、漁獲後は漁具を再び船尾に流しながら船速を6-8ノットに戻すという作業を繰り返していることが確認できた。この巻き上げ作業時の減速時に受信頻度が高くなっており、調査中に確認された42回の受信時の船速を求めた結果、船速が5ノット以下で受信頻度が76%を占めていた (Fig. 6)。また、8ノット以上で移動している時間帯の受信は一度も無かった。操業時の速度は 5.9 ± 1.6 (平均 $\pm$ 標準偏差, 以下同様) ノットで、漁場までの移動時の船速は 9.6 ± 1.1 ノットであった。操業中の船速は7ノット前後の頻度が高く (Fig. 7)、これは操業中に魚を探索している時の船速と一致した。

漁船搭載型による受信結果 与那国島海域では表層パヤオ周辺で82尾、中層パヤオ周辺で212尾、合計294尾のカットオに発信器を装着して放流した。そのうち表層パヤオで放流された個体との遭遇率が39.0% (32/82)、中層パヤオで放流された個体との遭遇率が52.4% (111/212) となった。表層パヤオと中層パヤオを合わせた遭遇率は48.6% (143/294) であった。

浮魚礁間の移動については、複数の表層パヤオで受信

Fig. 6 Frequency distribution of the ground speed when receiving 42 times in a tagging investigation.

Fig. 7 Frequency distribution of the ground speed during operation.

Fig. 8 Position of receiving by the boat-mounted system.

した個体が1個体、表層パヤオと中層パヤオで受信した個体が10個体、複数の中層パヤオで受信した個体が13個体であった。中層パヤオと表層パヤオで受信した個体のうち1個体は、2017年5月26日にM1で放流後、2017年6月7-29日にM4で5日間の受信があり、その後2017年9月1日にS4から500 m以内の場所を受信された。この個体は3か月以上の長期間にわたって追跡できており、放流点以外に2か所の位置情報を取得できた。個体ごとの追跡日数の解析では、受信された143個体のうち1週間以内のものは17個体に留まり、53個体が3か月以上の追跡日数となった。また、2017年3月に放流した12個体は放流直後から受信を確認できなかったが、2017年9月に受信された。このように、追跡日数が長くても受信日数が少なく、放流後や一度受信が途切れた後に長く期間が空いて再度受信される個体が多かった。受信日数の解析では最も多い個体は10日間であり、1日のみの個体は68個体で、受信個体の半数程度を占める結果となった。

追跡範囲の解析では、浮魚礁が存在しない与那国島の東側でも受信が確認されたが、浮魚礁周辺に受信が多い傾向がみられた (Fig. 8)。与那国島海域には5基の表層パヤオと9基の中層パヤオが設置されているが、そのうち5基の表層パヤオ周辺とM6・M7以外の7基の中層パヤオ周辺で受信されていた。中層パヤオでの受信では受信位置が密集していたのに対し、表層パヤオでは浮魚礁から1マイル以上離れた位置でも受信されており、広い範囲で受信していた (Fig. 9, Table 2)。表層パヤオでの受信位置は浮魚礁から161-3420 mの範囲内

Fig. 9 Distribution of distance of the receiving position from FADs. The black bar shows the result for the surface type FADs and the white bar shows the result for the middle layer type FADs.

に収まっており、253回の受信の9割以上が浮魚礁から500 m以上離れた位置での受信であった。さらに、浮魚礁ごとに漁船搭載型の追跡面積を求めた結果、表層パヤオでは3基中2基で設置型の追跡面積を上回った (Table 2)。中層パヤオではいずれも設置型の追跡面積を下回り、ほとんどが設置型の3分の1以下であった (Table 2)。S1, S2, M6, M7は受信が無い、もしくは2点以下の受信数であったため追跡面積を求めなかった。

考 察

船速と受信の関係 受信状況と船速の関係から5ノット以下の船速で受信頻度が高くなり、8ノット以上

Table 2 Boat-mounted system tracking area per FAD and the longest and shortest distances from FAD to receiving system

FAD	Tracking area (km ²)	Longest distance (m)	Shortest distance (m)
S1	—	1777	286
S2	1.110	1836	566
S3	—	1157	1157
S4	3.907	3420	482
S5	0.631	924	161
M1	0.546	533	6
M2	0.011	134	27
M3	0.054	282	71
M4	0.185	564	9
M5	0.263	423	26
M6	—	—	—
M7	—	—	—
M8	0.146	686	34
M9	0.137	437	44

の高速航行時では受信されない結果から、速い船速の場合に受信頻度が低くなることが示唆された。船速が速い場合に受信頻度が少なくなった理由として三つのことが考えられる。一つ目は、船速が速いほど砕波によって気泡が多く生成されることである。気泡が多く生成されると気泡層が厚くなり超音波信号の受波阻害が起きるとともに、気泡の破裂による雑音でS/N比が低下する。¹⁶⁾ 一方、船速が遅ければ、生成される気泡が少なく船底に入り込む量が少なく抑えられるため、受波阻害を抑えることができる。受波器設置の際に船底を伝って流れる気泡の影響を低減させるために受波部を船底から少し突出する形で取り付けしたが、高速航行時では気泡の影響を除くことはできなかったと推測される。しかし、これらの影響の程度や出現パターンは、船底形状や受波器の取り付け位置など、船の総合的な特性によって異なるとされており¹⁷⁾ 評価が難しい。また、船底下の気泡の有無や程度の観察が困難であったため、本研究では定量的な影響評価には至らなかった。

二つ目は、船から発せられるノイズによって受信阻害が起きることである。周囲の雑音レベルが大きいほど超音波信号は受信しづらくなる¹⁸⁾ ため、船から発せられる雑音は受信距離に大きく影響する。漁船が海中に放射する雑音には機械雑音とプロペラ雑音がある。¹⁹⁾ 特にプロペラ雑音では船速の変化によってノイズレベルが顕著に異なる。²⁰⁾ 金澤ら¹⁸⁾ によると小型船(FRP製, 9.2 m, 2.8 トン) ではエンジン停止時よりも3ノットで航行時に受信距離が短くなるとしている。与那国島の曳縄漁船では5ノット以下では受信頻度が高かったことから、漁船搭載型は船舶ノイズによる受信阻害の影響を考え、

漁場において5ノット以下の低速、もしくは停船状態で操業する漁業形態の漁船に搭載することが望ましいと考えられる。カツオを対象としたパヤオ漁業では曳縄の他に竿釣りによるカツオ漁が行われている。竿釣り漁の場合、停船した状態で漁獲作業を行うため、曳縄漁よりも雑音が少なく適した受信環境が得られる。従って、曳縄漁か竿釣り漁を行う漁船であれば漁船搭載型を搭載するのに適していると考えられる。

三つ目は漁船が高速で通り過ぎることによって魚が逃避することで受信頻度が減少したという可能性である。船の発する水中音が魚に影響するかどうかは魚の聴覚に依存し、これは魚種によって異なる。²¹⁾ 畠山²¹⁾ は魚が音源から遠ざかる反応を示す音圧レベルを威嚇レベルと分類し、音圧範囲を140 dBから160 dBとしているが、鈴木ら²²⁾ は曳縄漁船(4.9 トン)が発する126 dBの水中音でも魚の垂直移動が観測されたとしている。漁船との距離によっても水中音の影響は変わり、近いほど魚の行動に影響を及ぼすと考えられる。これらのことから、漁船が威嚇レベルの水中雑音を発した場合、近くに存在する魚に逃避を促した可能性が考えられる。浮魚礁までの移動時の船速が9.6ノット前後であり、これは操業時の平均船速よりも約4ノット速い船速であるため、特に魚が逃避する可能性が高い。しかし、驚いて逃避するほどの近い位置に魚が存在したと仮定しても、そこから数百メートル先の受信範囲外まで逃避を続けるとは考えづらい。実際、操業時に船が魚の群れの上を通り過ぎたタイミングで多く漁獲されていたため、逃避による受信頻度低下の可能性は低いと考えられる。

以上のことから、漁船搭載型を使用する場合、漁船が高速航行する浮魚礁までの移動など、操業時以外は受信範囲内に追跡個体が存在しても受信されない可能性を考慮した調査設計が必要である。これは、浮魚礁周辺での受信数が多かったという結果にも表れており、浮魚礁周辺に限定した追跡が想定される。一方で浮魚礁周辺においては、パヤオ漁業を主とする漁船の操業特性を利用することで、受信への影響が懸念される気泡や船舶ノイズの影響を軽減させて受信することができる。さらに、魚が蟄集する浮魚礁周辺での探索努力量が高くなるため、必然的に受信回数も多くなり、浮魚礁周辺におけるカツオの行動生態の把握に有効である。

漁船搭載型の有効性 本研究では、放流数の48.6%の情報を受信することに成功した。放流場所ごとに求めた遭遇率では、中層パヤオが52.4%で表層パヤオの39.0%よりも高い遭遇率であった。同じ海域で表層パヤオに設置型を装着した調査では、中層パヤオで放流した個体の遭遇率は25.7%、表層パヤオ放流個体が85.4%との報告があり、⁶⁾ 中層パヤオで放流した個体の約75%のデータは得られていない。漁船搭載型と設置型の

遭遇率を比較すると、表層パヤオで放流した個体の追跡では設置型に及ばないが、中層パヤオで放流した個体の追跡では設置型よりも漁船搭載型の遭遇率の方が高く、その有効性が示された。設置型は表層パヤオ周辺で昼夜問わず連続した追跡が可能だが、中層パヤオで放流した個体の情報は、表層パヤオに個体が移動しないと受信できない。したがって、漁船搭載型による受信は浮魚礁の種類に関係なく、中層パヤオでも追跡が可能であることから、中層パヤオ放流個体との遭遇率が向上することが示された。また、表層パヤオ放流個体との遭遇率が、設置型よりも低くなった理由として、設置型が24時間追跡しているのに対して、漁船搭載型は追跡時間が作業時間に限られていることが挙げられる。

カツオの移動についての評価では、設置型では把握が困難な表層パヤオと中層パヤオでの受信、複数の中層パヤオでの受信が得られた。これは複数の浮魚礁での受信から移動が確認された24個体のうち大半を占める23個体であった。中層パヤオから表層パヤオへの移動の例で示した個体では、中層パヤオから他の中層パヤオに渡り、その後表層パヤオで設置型を用いた際の追跡範囲内で受信された。この場合、設置型のみであると放流場所の情報と表層パヤオでの2点の情報しか得られないが、漁船搭載型の利用によって、設置型で追跡できない場所の移動情報を得られることが示された。これらの結果から浮魚礁間の移動や所在の把握に漁船搭載型が有効であると示された。さらに個体ごとの追跡日数の結果では、追跡日数が1週間以内の個体は17個体と少なかった。53個体が3か月以上の追跡日数となり、数か月にわたり追跡することができた。しかし、受信日数に着目すると半数近くが1日のみという結果であったため、追跡個体の所在を明らかにすることには適しているが、正確な滞留期間や海域の入出状況の把握は困難である。漁船の性質上、毎日同じ条件で追跡することは難しく、設置型のような連続した追跡は行えない。漁船搭載型の搭載船数を増やして遭遇回数を上げることで、受信日数の増加に繋がる可能性はあるが、悪天候時はどの船も出漁しないため、この期間の追跡は不可能である。さらに、搭載する漁船によって作業頻度と作業場所には差があり、天気や漁業者の判断に依存する点が多くあることから、安定した連続的な観察を行うことができないのが課題である。

漁船搭載型の受信位置はほとんどが浮魚礁周辺に限定されていた。これは、カツオが浮魚礁周辺に滞留する性質があることと、前述したように漁船の低速航行時に受信頻度が高くなるためだと考えられる。また、受信位置から追跡範囲が明らかになり、表層パヤオの場合、浮魚礁から161–3420 mの範囲に収まるものの、受信された9割以上が500 m以上であった。すなわち、漁船搭載型

が受信した位置は、表層パヤオ周辺の9割以上で設置型受信機の追跡可能範囲外であったことから、設置型受信機では受信ができない海域の情報を得られることが示された。これらのことから、設置型を併用することにより浮魚礁が設置されている海域において網羅的な調査が可能であることが明らかとなった。一方、中層パヤオの追跡範囲は表層パヤオに比べて狭く、受信位置の中層パヤオからの距離は6–686 mで、設置型の3分の1以下の面積であった。中層パヤオでは浮体が海中に沈んでいるため曳縄漁具の引っ掛かりや接触の危険性が無く、浮魚礁の直近での作業が可能であることから受信範囲が狭くなったのではないかと考えられる。このように、追跡範囲は漁船の作業場所に限定され、漁業者の判断や経験則に依って制限されることも明らかとなった。

漁船搭載型では information and communication technology (ICT) を利用して、確実なデータ回収およびデータ収集の効率化が図られた。調査期間中に設置型を設置した表層パヤオ1基が流失し、改めてデータを自動収集する漁船搭載型の有用性が示された。近年、長期間作動する設置型もあるが、現地での電池交換とデータ回収作業は必須である。漁船から電源を供給している漁船搭載型は、電池交換が不要で長期間の追跡が可能であり、遠隔的にデータを得られるため、調査地へ赴く研究者の負担軽減にも資する。

おわりに 漁船搭載型によって長期間かつ、設置型による追跡が不可能な場所での広範囲の追跡が可能であることが示された。このことから漁船搭載型の利用により、浮魚礁に滞留しているカツオについて、蟄集メカニズムと滞留実態の解明に繋がる新たな知見が得られると期待される。今後は受信機搭載船をさらに増やすことで遭遇回数を向上させ、受信がない空白期間を減らし、滞留・来遊実態を明らかにしていきたい。さらに、漁船搭載型に加え、設置型を同時に使用することで相補的な追跡が可能であり、より多くの情報取得に繋がると考える。

本研究ではカツオという単一種を対象としているが、浮魚礁に蟄集する他回遊魚にも応用可能である。黒潮沿岸域の浮魚礁には、カツオの他にメバチ *Thunnus obesus* やキハダ *T. albacares* などの魚種が蟄集している。カツオと同様に浮魚礁調査への利用も期待でき、他魚種との関係性も明らかにできると考える。さらに、与那国島海域にて試験的に調査を行ったが、データの送信に携帯電話網を使用しているため、国内であればどこでも対応可能であり、他海域への応用も期待される。

謝 辞

調査の実施にあたり協力を頂いた与那国町漁業協同組合の皆様、並びにダイビングショップあーびゅん与那国の皆様に深く感謝の意を表する。味の素株式会社の杉本

信幸氏, 長谷川泰伸氏, 太田史生氏には多大なるご支援を頂き, ここに深謝の意を表する。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松本隆之博士には, 放流作業を行うにあたりご教授いただきましたことに謝意を表する。本研究は, 味の素株式会社との共同研究であり, JST・CREST, JPMJCR13A5「データ高回収率を実現するバイオロギング・システムの構築—魚類の個体群・群集ダイナミクス解明に挑む—」によるものである。また, (一社)ヤンマー資源循環支援機構研究助成を受けて行った。

文 献

- 1) Kawasaki T. On the structure of fish school of tunas. *Japan J. Ecol.* 1959; **9**: 52–54 (in Japanese with English abstract).
- 2) Govinden R, Jauhary R, Filmlalter J, Forget F, Soria M, Adam S, Dagorn L. Movement behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) and yellowfin (*Thunnus albacares*) tuna at anchored fish aggregating devices (FADs) in the Maldives, investigated by acoustic telemetry. *Aquat. Living Resour.* 2013; **26**: 69–77.
- 3) Yuen HS. Behavior of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, as determined by tracking with ultrasonic devices. *J. Fish. Res. Board Can.* 1970; **27**: 2071–2079.
- 4) Schaefer KM, Fuller DW. Behavior of bigeye (*Thunnus obesus*) and skipjack (*Katsuwonus pelamis*) tunas within aggregations associated with floating objects in the equatorial eastern Pacific. *Mar. Biol.* 2005; **146**: 781–792.
- 5) Schaefer KM, Fuller DW. Simultaneous behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), bigeye (*Thunnus obesus*), and yellowfin (*T. albacares*) tunas, within large multi-species aggregations associated with drifting fish aggregating devices (FADs) in the equatorial eastern Pacific Ocean. *Mar. Biol.* 2013; **160**: 3005–3014.
- 6) Asai S, Uchida K, Miyashita K, Arai N, Mitamura H, Kitagawa T, Shirakawa H, Miyamoto Y, Sasakura T. Study of remaining and migration of skipjack tuna in waters around Yonaguni Island, Okinawa, Japan. 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Kobe. 2018; 1–4, doi:10.1109/OCEANSKOB.2018.8559300.
- 7) 浅井咲樹, 内田圭一, 宮本佳則, 宮下和士, 白川北斗, 荒井修亮, 三田村啓理, 北川貴士, 笹倉豊喜. 超音波/バイオテレメトリーシステムを用いた与那国島周辺海域浮魚礁におけるカツオの行動調査 (特集 水産業にみる超音波等の活用). *超音波 techno* 2019; **31**: 11–16.
- 8) Heupel MR, Semmens JM, Hobday AJ. Automated acoustic tracking of aquatic animals: scales, design and deployment of listening station arrays. *Mar. Freshw. Res.* 2006; **57**: 1–13.
- 9) Uchida K, Ogawa H, Hasegawa K, Miyamoto Y, Noro H, Wada Y, Akiyama S. Monitoring the behavior of young bluefin tuna *Thunnus orientalis* and yellowtail *Seriola quinqueradiata* in set nets using ultrasonics biotelemetry. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2018; **84**: 14–22 (in Japanese with English abstract).
- 10) 熊本修太. 浮魚礁の概要. 日本水産工学会誌 2013; **49**: 199–202.
- 11) 越智洋介. 南西諸島周辺水域における中層型浮魚礁の適正な利用技術に関する研究. 博士論文, 東北大学, 宮城. 1995.
- 12) 甲斐哲也. 沖縄県における浮魚礁漁業の概要. 日本水産工学会誌 2013; **49**: 203–206.
- 13) Rodriguez-Tress P, Capello M, Forget F, Soria M, Beeharry SP, Dussooa N, Dagorn L. Associative behavior of yellowfin *Thunnus albacares*, skipjack *Katsuwonus pelamis*, and bigeye tuna *T. obesus* at anchored fish aggregating devices (FADs) off the coast of Mauritius. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2017; **570**: 213–222.
- 14) 宮本佳則, 内田圭一, 高尾芳三, 笹倉豊喜. M 系列信号を用いた新型超音波バイオテレメトリーシステムの開発. *海洋音響学会誌* 2011; **38**: 119–127.
- 15) Ozaki K, Kudo T. Home range: its estimators and effects of autocorrelation between locations. *Japan J. Ecol.* 2002; **52**: 233–242 (in Japanese).
- 16) 古澤昌彦, 宮野鼻洋一, 澤田浩一, 高尾芳三. 計量魚群探知機の較正方法. *水工研技報 (漁船工学)* 1995; **15**: 9–37.
- 17) Honda S, Suzuki C, Mukai T, Iida K. Occurrence of acoustic attenuation by sailing corresponding with ship speed and sea condition in hydroacoustic surveys. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2003; **69**: 558–567 (in Japanese with English abstract).
- 18) 金澤 誠, 宮城亜紀, 内田圭一, 宮本佳則, 柿原利治. 超音波/バイオテレメトリーの実海域における周波数と受信距離の関係. 日本水産工学会誌 2012; **48**: 183–187.
- 19) 三橋邦宏, 野尻武生, 湯浅 肇. 船舶の放射雑音. *騒音制御* 1985; **9**: 90–95.
- 20) Chung Y, Matsuno Y, Fujieda S, Yamanaka Y. The underwater noise emitted by fishing boats. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1995; **61**: 553–560 (in Japanese with English abstract).
- 21) 畠山良己. 魚の聴覚能力. 日本水産工学会誌 1992; **28**: 111–119.
- 22) 鈴木 裕, 濱田悦之, 斎藤清隆, 間庭愛信, 白井靖幸. 船の発生する水中音と海中生物への影響. *航海* 1980; **63**: 25–31.