

アーカイバルタグデータに基づいた冬季北太平洋亜熱帯海域での カツオ当歳魚の鉛直遊泳行動と生息環境

岡本 俊^{1†}, 清藤秀理¹, 竹井光広², 福田漠生¹, 石川洋一³,
五十嵐弘道³, 増田周平⁴, 杉浦望実⁴

Vertical swimming behavior and habitat of age-0 skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, based on archival tag data in the subtropical North Pacific during winter

Suguru OKAMOTO^{1†}, Hidetada KIYOFUJI¹, Mitsuhiko TAKEI², Hiromu FUKUDA¹, Yoichi ISHIKAWA³,
Hiromichi IGARASHI³, Shuhei MASUDA⁴, Nozomi SUGIURA⁴

Two age-0 skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* (42.5 and 44.0 cm fork length) were recaptured by pole and line one week after released with implanted archival tags in the subtropical North Pacific in February 2011. Data of pressure, peritoneal cavity and ambient temperature data recorded every 20 min for one week were downloaded from two archival tags. The vertical habitat-use during daytime was distributed mainly in the layer of 30–70 m depth, which was deeper than that during nighttime (20–50 m). The deepest swimming depth was 127 m (ambient temperature=22.4°C). Recaptured skipjack tunas spent more than 95% of their time above the thermocline (depth=110–125 m), where the ambient temperature was more than 23.8°C. We defined the area where water mass warmer than 23.8°C was distributed as the potential main habitat (PMH) for age-0 skipjack tuna in February, and investigated the interannual variation of the PMH distribution using the ocean reanalysis product by 4-dimensional variational data assimilation. The PMH in 2003 was wider and deeper than that in 1998. Every year from 1990 to 2006, the PMH in the east of 140°E spread to further north (1–3°) than that in the west of 140°E. Compared with the region off Sanriku-Joban in a previous study, warm water mass and the vertical habitat-use of skipjack tuna during daytime were distributed deeply in the subtropical North Pacific. These differences could be attributed to the differences in the availability and catchability of skipjack tuna for fisheries such as pole and line.

Key words: age-0 skipjack tuna, archival tag, vertical behavior, vertical habitat-use, subtropical North Pacific

はじめに

カツオ *Katsuwonus pelamis* は、スズキ目サバ科カツオ属に属し、太平洋、インド洋の熱帯から温帯にわたる広域に生息している。日本近海を含む中西部太平洋では 40°S–45°N

に漁場が形成され (Matsumoto et al., 1984), 漁獲量は 2010 年現在、熱帯域において最も多い (Williams and Terawasi, 2011)。

北太平洋亜熱帯海域 (以降、亜熱帯海域) での漁場は、2、

2012年12月4日受付, 2013年5月1日受理

¹ 水産総合研究センター国際水産資源研究所

National Research Institute of Far Seas Fisheries, Fisheries Research Agency, 5–7–1 Orido, Shimizu, Shizuoka, Shizuoka 424–8633, Japan

² 宮崎県水産試験場

Miyazaki Prefectural Fisheries Experimental Station, 6–16–3 Aoshima, Miyazaki, Miyazaki 889–2162, Japan

³ 海洋研究開発機構地球情報研究センター

Data Research Center for Marine-Earth Sciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173–25 Showa-machi, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236–0001, Japan

⁴ 海洋研究開発機構地球環境変動領域

Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2–15 Natsushima-Cho, Yokosuka, Kanagawa 237–0061, Japan

† E-mail: suoka@affrc.go.jp

3月頃に145°E以西の18°–30°N付近で形成され, その後次第に北へ遷移する (Shetty et al., 1993; 清藤ほか, 2010; 国際水産資源研究所, 2012). 6月以降になると日本の三陸・常磐沖に主漁場が形成される (Shetty et al., 1993; Okamoto and Kiyofuji, 2011; 国際水産資源研究所, 2012). 標識放流調査の結果に基づいて想定されるカツオの主要な経路には, 黒潮沿い, 紀南・伊豆諸島沿い, 伊豆諸島東沖, 三陸・常磐沖の南からの4つの経路がある (浅野, 1984; 田代・内田, 1989; 川合, 1991). これらの中で, 来遊資源量を考える上で特に重要なのは伊豆諸島沿いと伊豆諸島東沖の経路であり, カツオはそこから日本近海の主要漁場の三陸・常磐沖へと北上してくる. 三陸沖への北上群は9月頃にかけて41°N付近まで達した後, 南下することが明らかとなっている (渡辺ほか, 1995). 小笠原諸島から伊豆諸島を北上する経路では, 伊豆半島西沖に西進する魚群と, 5月以降に伊豆諸島東沖から来遊する魚群とともに房総沖から三陸・常磐沖へ北上する魚群が見られる. 黒潮沿いの経路の魚群は, 南西諸島から薩南海域に入り, 黒潮から分岐する対馬暖流沿いに九州西岸・五島付近に達する魚群と, 薩南海域から四国沖・紀伊半島沖を通過し, 遠州灘・伊豆諸島周辺に達する魚群が見られる. さらに, 遠州灘・伊豆諸島周辺に達した魚群の一部は三陸・常磐沖の海域に北上する.

以上のことから, 亜熱帯海域は日本近海に来遊するカツオの資源動態を考える上で重要である. しかし, 当該海域におけるカツオ分布と海洋環境との関連についての知見は, 定性的な記述を含めても少ない. 当該海域は海洋物理学的に北太平洋亜熱帯前線域 (小橋, 2010) と一致し, 180°以西では2つの亜熱帯前線の存在 (19–21°N, 21–24°N) が報告されている (Kobashi et al., 2006). この前線域と, 安井・森 (1985) の報告による北上回遊する尾叉長40 cm前後のカツオの出現海域とが地理的に一致していることから, カツオ分布が前線域の物理環境に関連している可能性が指摘されている (清藤・岡本, 2011). 東太平洋赤道域では, これまでにアーカイバルタグを用いて比較的大型のカツオ5個体 (尾叉長66 cm以上) の鉛直遊泳行動と生息環境について研究がなされており, 遊泳深度と水温躍層との関連性が示された (Schaefer and Fuller, 2007). この研究では, 1日のうち19時間以上は20°C以上の水塊内を遊泳していたことが観測されている. また, 日本近海の常磐沖においてもアーカイバルタグを用いた研究がなされており, 尾叉長41–50 cmのカツオが主に表面水温20–25°Cの海域を遊泳していたことが明らかとなっている (小倉, 2012). 亜熱帯海域においてもカツオの回遊と海洋環境との関連性に関する知見を蓄積し, それを明らかにしていくことは, 日本近海へのカツオ当歳魚の来遊条件の良し悪しを判断するための一つの知見となりうる.

そこで, 漁期となる4月以降に日本近海で漁獲されるカ

ツオの来遊元を亜熱帯海域と想定し, そこから日本近海へのカツオの来遊経路の詳細を明らかにすること, 遊泳行動と海洋環境との関連性を明らかにすることを目的としてアーカイバルタグ放流調査を実施した. 具体的には, 2011年1–3月の間に亜熱帯海域において尾叉長45.0 cm未満で当歳魚と推定されるカツオ (Tanabe et al., 2003) にアーカイバルタグを取り付けて放流した. 本稿では, 放流後1週間で短期再捕されたデータを用いて亜熱帯海域におけるカツオ当歳魚の鉛直行動特性と生息環境の特徴を明らかにすることを目的とし, 表層漁業における群れ遭遇率との関連性について一つの仮説を導出した.

材料と方法

使用したアーカイバルタグ

本研究で使用したアーカイバルタグはLotek社製のLAT2510である (<http://www.lotek.com/lat2000-fish.htm>). 本体は直径8 mm, 長さ35 mmの円筒形で, 空中重量は4.25 g, 水中重量は2.5 gである. 本体には圧力センサーと腹腔内温度測定用の温度センサーが組み込まれており, 本体から伸びる直径2 mmのケーブルの先に外部水温測定用の温度センサーと照度センサーが組み込まれている. 圧力センサーの測定可能範囲は0から約1000 dbarで, 分解能と測定精度はそれぞれ0.05%, ±1%である. 温度センサーの測定可能範囲は–5–35°Cで, 分解能, 測定精度はそれぞれ0.05°C, 0.2°C以下である. 本体内部にはデータ記録のための容量56 kbyteの内部メモリーが搭載されている. 測定した項目は圧力, 外部水温, 腹腔内温度および照度の4項目である. 冬季から夏季・秋季にかけての亜熱帯海域から日本近海へのカツオの来遊過程を把握するために, 約7ヶ月間内部メモリーにデータを記録できるようデータ計測間隔を20分に設定した (1日72データ). データ解析時には圧力を深度 (m) に変換した.

アーカイバルタグ放流と再捕

アーカイバルタグ放流調査を2011年1月下旬–3月上旬に宮崎県水産試験場調査船みやざき丸 (2航海: 計28日) で実施した. 亜熱帯海域でカツオ漁場を探索し, 20–22°N, 135–139°Eの海域でアーカイバルタグをカツオに取り付け, 放流した (Fig. 1). カツオの漁場探索を含めた調査を実施するにあたり, カツオ群れの発見頻度を上げるために人工衛星センサーMODISによる水温画像を毎日船上で受信・利用しながら10 kmスケールでの大まかな漁場探索域を最初に決定し, その後に双眼鏡によって鳥群れやカツオ群れを数kmスケールで探索した. カツオ漁場を探索した日の正午には, CTD装置によって深度1000 mまでの水温, 塩分を観測し, それらからポテンシャル密度を計算した.

アーカイバルタグの装着対象としたカツオは当歳魚と考えられる尾叉長45 cm未満の個体である (Tanabe et al., 2003). 2月3–6日に56個体, 3月2日に27個体の合計83個

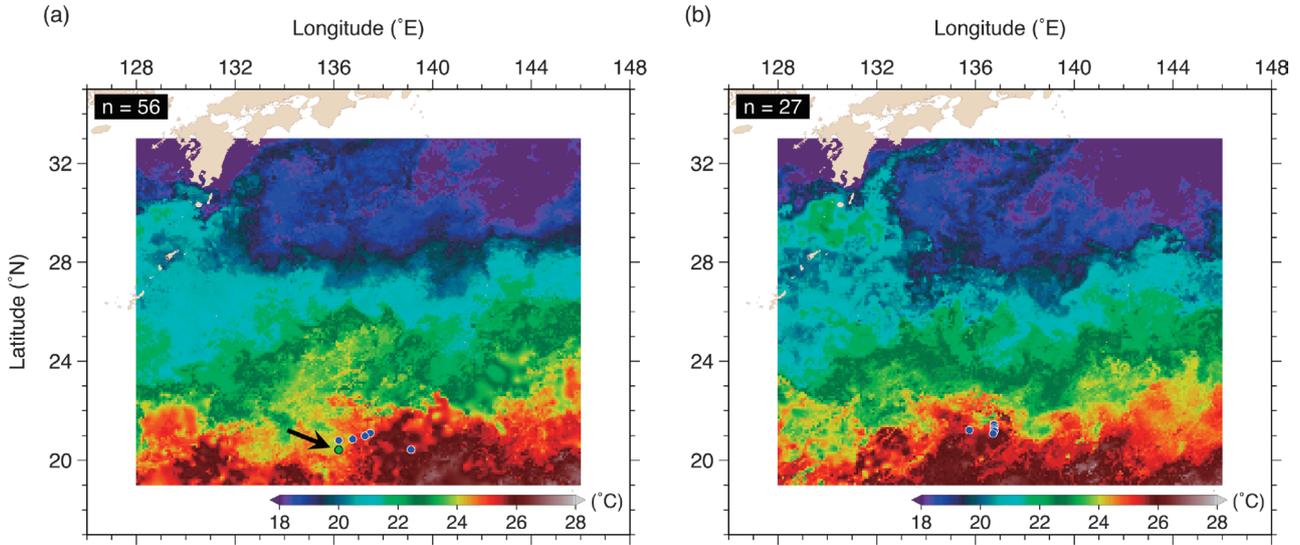


Figure 1. Release positions (circles) of 0-age skipjack tunas with archival tags in (a) early February and (b) early March, 2011. The green circle pointed by a black arrow indicates the position where two recaptured tags were released. Background color shows the 10-day composite of sea surface temperature with color scale from 18 to 28°C.

体を放流した（尾叉長36.5–44.5 cm）。漁法は竿釣りで、釣り上げ後に海水を満たした標識装着用の測定台の中で肛門斜め前方をメスで開腹し、アーカイバルタグを挿入、医療用ステープラーで傷口を塞いで固定した後に放流した（松本，2010）。標識装着作業による魚体へのストレスを軽減するため、一連の作業を1分未満で終えるようにした。なお、アーカイバルタグ装着中にカツオが暴れ始めた場合には、放流後の死亡確率が高まると判断して途中で作業を中断した。

放流した83個体のうち、2月6日に同一の群れで釣り上げて放流した2個体が、1週間後の2月13日に約30 km真西の海域で竿釣り漁業によって同一の群れで再捕された（再捕率：2.4%）。放流・再捕時の尾叉長は42.5 cm（tag no. 0823）と44.0 cm（tag no. 0838）であった。

アーカイバルタグデータ処理・解析

回収されたアーカイバルタグから、カツオ当歳魚2個体の遊泳深度、経験水温、腹腔内温度、照度の時系列データを1週間分取得した。照度データからはカツオが遊泳していた位置を推定可能であるが、今回再捕されたカツオは水平方向に約30 kmしか移動しておらず、放流・再捕位置が推定誤差範囲内に収まってしまうために位置を推定・補正しなかった。各時系列データから昼、夜を区別するために放流・再捕海域の日出と日没の時刻から午前6時から午後6時までを日中、それ以外の時間を夜間とした。なお、データ処理・解析にあたって、放流後1週間程度はアーカイバルタグ装着による遊泳行動への影響が生じる可能性があるためにデータを除外する場合もあるが（山田，2001）、本研究で使用したデータには放流初日から日周的な鉛直遊泳

行動を確認できたため、再捕個体の遊泳行動は自然状態に近い状態であると判断して放流直後を含む1週間全てのデータを使用した。

アーカイバルタグの水温情報に基づいて、カツオ当歳魚の北上過程において主な生息域になりうる海域（potential main habitat: PMH）を調べるために、再捕個体の経験水温の累積頻度が全体の95%以上となる下限水温を求めた。その値を鉛直36層の海洋再解析プロダクト（Masuda et al., 2003, 2009）に適用した。同プロダクトは4次元変分法を用いて観測データを数値モデルに同化することで作成されたプロダクトであり、本研究では時空間解像度がそれぞれ1ヶ月、1°の1990–2006年のプロダクトを使用した。下限水温以上の暖水塊の鉛直的な層厚からPMHの空間分布を推定し、カツオ当歳魚が日本周辺へ北上する前（2月）のPMH北限緯度（すなわち、どの程度北まで主な生息域を拡大し得たかについて）の経年変動を調べた。この経年変動は、日本近海へのカツオの来遊時期の経年変動に関係している可能性がある。下限水温をPMH推定条件としたのは、日本周辺海域へ来遊するカツオ当歳魚は表層海水の季節的な昇温に伴って北上するため（清藤ほか，2010；国際水産資源研究所，2012；二平，2012）、すなわちカツオにとって生理生態学的に水温が低過ぎる海域・時期には北上しないためである。下限水温に対して、上限水温はPMH推定条件として設定しなかった。これは、カツオが亜熱帯海域よりも表層水温の高い熱帯域にも一年中分布しており（例えば，Williams and Terawasi, 2011）、冬季の亜熱帯海域での水温が上限水温となるほど高いとは考え難いためである。

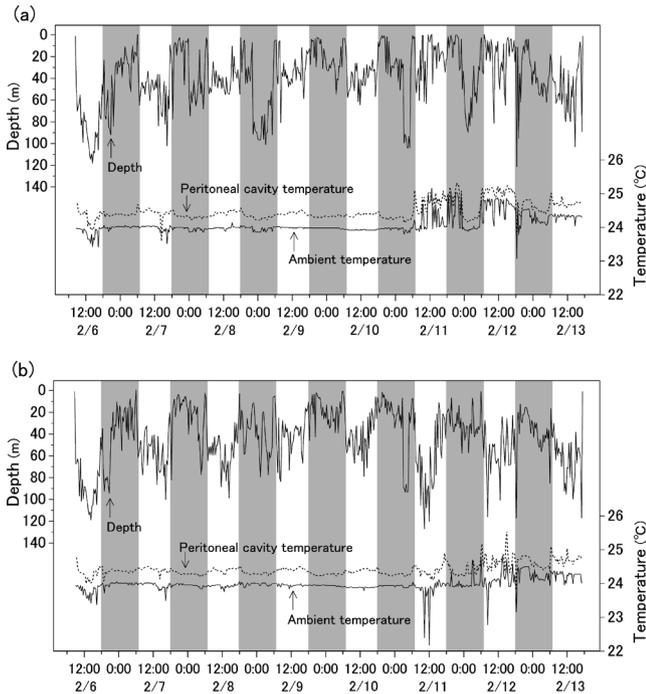


Figure 2. Depth, peritoneal cavity temperature and ambient temperature records for skipjack tuna, (a) tag no. 0823 and (b) 0838, during February 6–13, 2011. Time periods shaded gray indicate nighttime.

結果

鉛直遊泳行動, 外部水温および腹腔内温度

再捕された2個体ともに, 放流20分後(午前9時)には深度70 m付近に移動しており, 5時間後には約120 m深を遊泳していた(Fig. 2)。その後夜間には表層を遊泳し, 放流初日から日周期的な鉛直行動が示された。2個体は, 放流直後から6日目の2月11日午前6時にかけて比較的似通った行動パターンを示し, 2個体間の遊泳深度差が20 m以下であった時間は同期間のうち79%, 10 m以下の時間は57%であった。2月11日の明け方以降, それ以前よりも個体間遊泳深度差の大きい期間が2月12日19時頃まで約1日半続き, 39%の時間は20 m以下, 23%は10 m以下であった。この期間に, 2個体は鉛直方向に最大で114 m離れていたことが観測された。それ以降再捕までの間, 75%の時間は遊泳深度差が20 m以下, 56%は10 m以下であり, 放流6日後までとほぼ同じであった。再捕までの1週間で記録された2個体の最大遊泳深度はそれぞれ121, 127 mで, その時の外部水温は23.1, 22.4°Cであった。昼夜での遊泳深度の違いについて調べると, tag no. 0838では顕著な有意差が検出されたのに対し(Welch's *t*-test (Welch, 1947), $p < 0.01$), tag no. 0823では検出されなかった($p = 0.33$)。しかし, 2個体とも共通して夜間に比べて日中に深い層(主に30–70 m)を遊泳し, 日没後には全体的に浅い層(20–50 m)を遊泳する頻度が高かった(Fig. 3)。

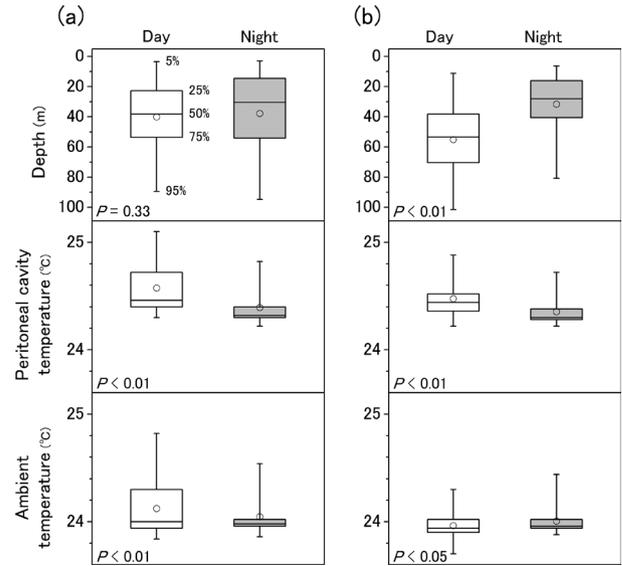


Figure 3. Box-whisker plots of depth (upper panel), ambient temperature (middle panel) and peritoneal cavity temperature (lower panel) for (a) tag no. 0823 and (b) 0838 integrated the day (white) and night (gray). In each box, the center horizontal thick line shows the median, and the bottom and top are the lower and upper quartiles of the data, respectively. The upper (lower) whisker extends from the 5th to 95th percentile. The circle indicates the mean. *P* values were from the Welch's *t*-test between the day and night.

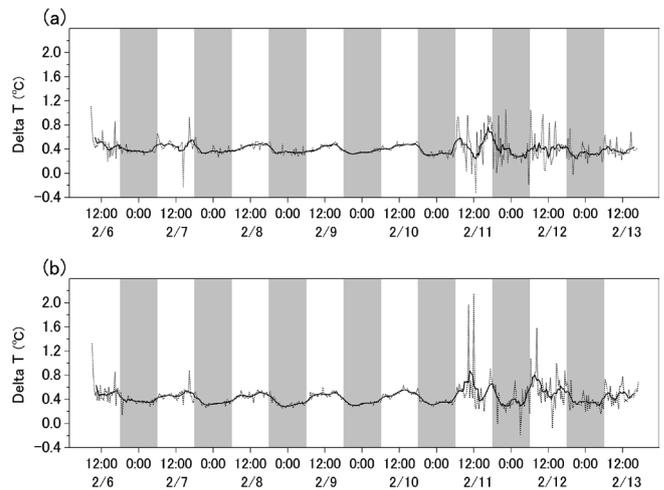


Figure 4. Delta *T* (dotted line), difference between peritoneal cavity and ambient temperature, and its 3-hour running mean (bold line) for (a) tag no. 0823 and (b) 0838. Time periods shaded gray indicate nighttime.

外部水温と腹腔内温度は2月11日の明け方まで比較の変動が小さく, それ以降に大きくなり(Fig. 2), 2月11日以降の変動係数はそれ以前の約3–5倍であった。昼夜別の平均外部水温は, tag no. 0823では日中の方が高かったが

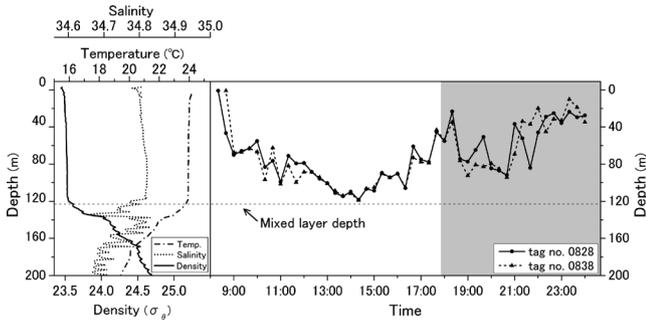


Figure 5. Depth records for two skipjack tunas (right panel) and vertical profiles (left panel) of temperature (chained line), salinity (dotted line) and density (solid line) in the tagging day, February 6, 2011. Dashed line indicates a daily mixed layer depth.

($p < 0.01$), tag no. 0838では夜間の方が高く ($p < 0.05$), 共通した特徴が示されなかった (Fig. 3). ただし, 両個体とも昼夜間の平均水温差は約 0.1°C と小さかった. 腹腔内温度は2個体とも日中の方が平均 $0.1\text{--}0.2^{\circ}\text{C}$ 高かった ($p < 0.01$). 腹腔内温度と外部水温との差 (Delta T) の3時間移動平均は, ほとんどの期間で $0.3\text{--}0.8^{\circ}\text{C}$ の範囲内であった (Fig. 4). ここで3時間移動平均を算出したのは, 外部水温に対する体温保持に関して, 振幅が激しく時間スケールの小さい変動を平滑化し, 日周変動のトレンドを捉えられるようにするためである. 2個体とも, 2月10日までDelta Tは午後9時頃から午後4時頃にかけて徐々に大きくなる傾向が示された. 2月11日以降には時間変化が大きくなり, 明け方や夕暮れ時に極大値が観測された. 全ての日で共通して夜間よりも日中の方がDelta Tは大きく, 夜間の平均値は 0.35°C , 日中には 0.48°C であった.

鉛直遊泳行動と生息環境の特徴

アーカイバルタグ放流後のCTD観測で得られた水温・塩分は深度約120 mまで鉛直的に一様で, それ以深では成層しており, 混合層深度は深度125 mと判断された (Fig. 5). ここでは, 混合層深度をポテンシャル密度が表層 (深度5 m) よりも $0.125\sigma_{\theta}$ 大きくなる深度と定義した (Suga et al., 2004). カツオ2個体は, 放流してから20–40分後 (午前9時) に深度約70 mまで潜り, 午後2時20分には同日の最大の遊泳深度119 mが記録されたが, 混合層深度を超えることは観測されなかった (Fig. 5). 夕方にかけて遊泳深度は浅くなり, 午後9時以降には深度約50 m以浅での遊泳が多く観測されたように, 夜間よりも日中に深い層を遊泳する傾向にあったが, 1日通して深度による鉛直的な水温差は小さく, 水温約 24°C ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) の層を遊泳していた. 2個体は放流後から2月11日午前6時まで, 水温 24.0°C 前後の水塊が深度約100 m深にかけて一様に分布する環境下を遊泳していたが, その後2月12日19時頃までは, 上層 (深度10–40 m以浅) に $24.4\text{--}25.0^{\circ}\text{C}$ のやや暖かい水塊が分

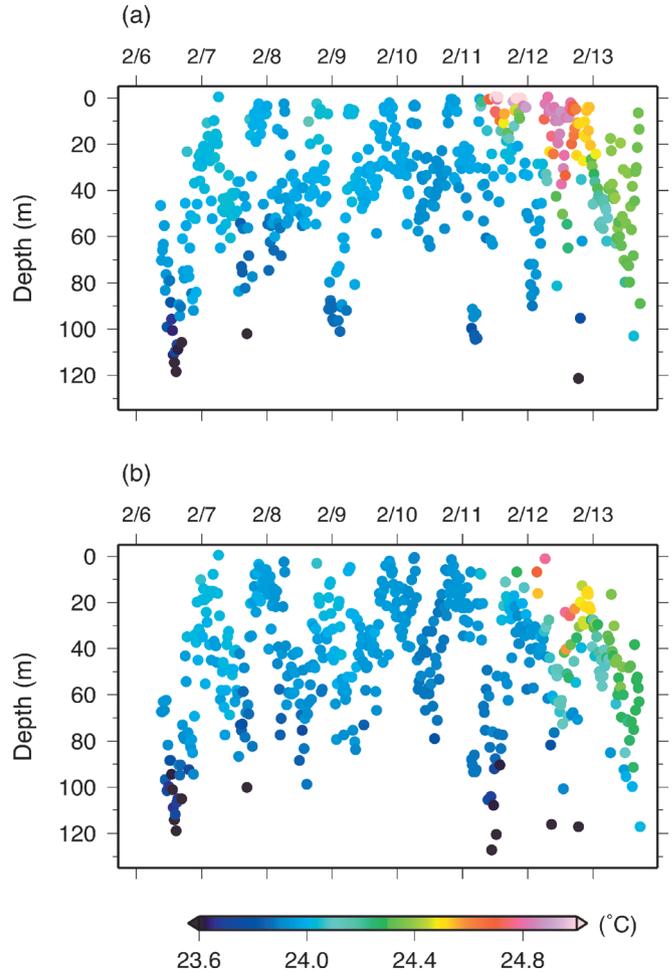


Figure 6. Time series of depth and corresponding temperature data from (a) tag no. 0823 and (b) 0838.

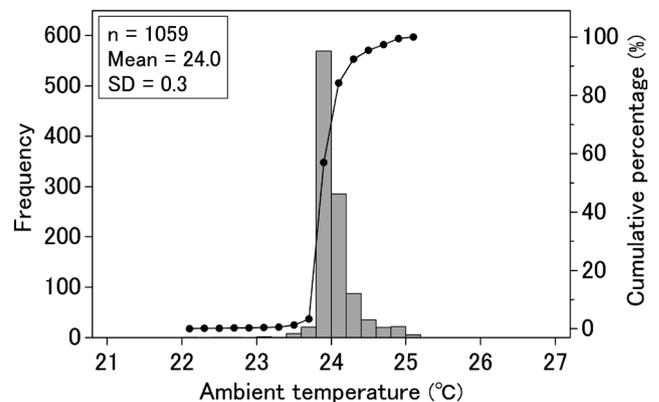


Figure 7. Histogram (bar) and cumulative percentage (line) of ambient temperature for two recaptured skipjack tuna.

布し, 水温躍層が比較的強い環境下を遊泳していた (Fig. 6). それ以降は最初の期間と同様に, 水温が鉛直的に一様で水温躍層が比較的弱い環境下を遊泳していた. ただし,

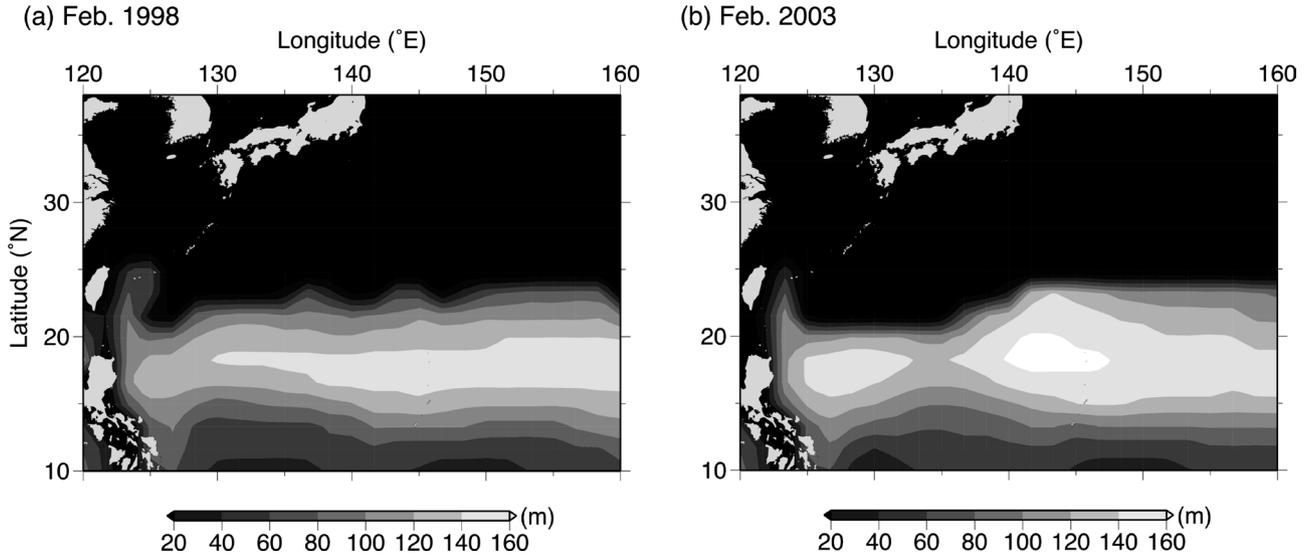


Figure 8. Spatial distribution of thickness of the water warmer than 23.8°C (i.e. PMH for skipjack tuna) in (a) February 1998 and (b) 2003. Bright region indicates where the warm water was thick vertically.

水温は始めの期間よりも高く、24.1–24.5°Cであった。以上の水温環境の変化は2個体間でほぼ同じタイミングで観測され、各日の鉛直的な水温構造についても類似する点が多かった。そして、前節に記した個体間の遊泳深度差は、鉛直水温構造が変化したこれらのタイミングで変化していたことがわかった (Figs. 2 and 6)。なお、全期間を通して、亜表層での水温躍層は深度110–125 mに形成されており、2個体のカツオは95%以上の期間でそれより浅の層を遊泳していた。

2個体が経験した外部水温で最も頻度が高かったのは23.8–24.0°Cの水温帯で、全体の54%を占め、次いで24.0–24.2°Cで27%を占めていた (Fig. 7)。外部水温23.8°C未満で遊泳していた期間は全期間の5%に満たず、23°C以下が記録されたのはtag no. 0828と0838でそれぞれ1回、4回と少なかった。ここで、カツオ当歳魚のPMH推定のため、水温23.8°Cを下限水温と定義した。Fig. 8には特徴的であった1998年と2003年の2月の結果を示した。PMHは、1998年と比較して2003年の方が広域において約10–20 m鉛直的に厚く形成されていた。水平的には、140°E以東の海域で両年ともに同様の緯度 (23.5–24.5°N付近) まで北に分布していたが、それより西の海域では1998年の方が約0.3–2.0°北に広がっていた。PMHの分布北限は、1990–2006年のすべての年で、西側より東側の海域でより高緯度に位置していた (Fig. 9)。特に140°Eを境として東西間でのPMH北限緯度の差は大きく、17年間で平均すると約0.5–1.0°の差があった。PMH北限緯度の経年変動は125–129°E付近で小さく (標準偏差0.4°)、17年間で最南緯度と最北緯度の差は1.0–1.5°であった。一方、それより東側の135–156°E以東では経年変動が大きく (標準偏差0.8°)、

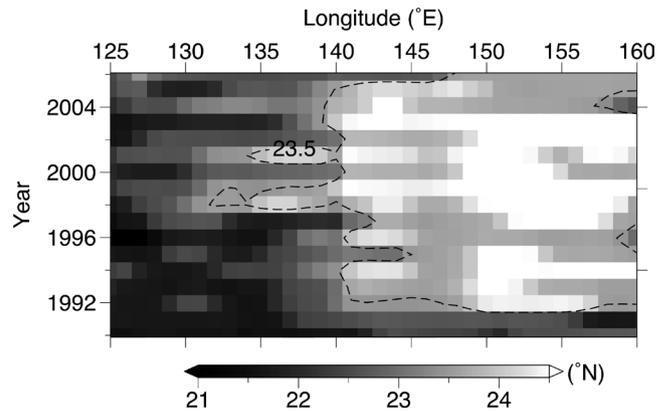


Figure 9. Longitude vs. year plots for the northern limit of the PMH for skipjack tuna in February from 1990 to 2006.

17年間で最南緯度と最北緯度の差は3°を示し、変動の小さかった前者の2倍以上であった。以上のように、亜熱帯海域のカツオ当歳魚は、北上前の2月に140°E以東でより北まで主な生息域を拡げることができ、その北限緯度は経年的に1–3°の幅で変動した。

考察

本章では、再捕された2個体の1週間の鉛直行動と生息環境に焦点を絞り、これまでに得られているカツオの遊泳行動と生息域に関する知見と合わせて議論する。

北太平洋亜熱帯海域と東太平洋赤道域でのカツオの鉛直行動特性の違いとその要因

亜熱帯海域で放流・再捕したカツオ当歳魚 (尾叉長45 cm未満) の潜水深度は、2月に最大127 m (水温22.4°C) であっ

たことが記録された (Fig. 2). この結果は、東太平洋赤道域で比較的大型の約3歳魚 (尾叉長66–69 cm) を対象とした Schaefer and Fuller (2007) の研究結果とは大きく異なり、同カツオの記録した深度596 m (水温7.7°C) よりも469 m 浅かった。また、亜熱帯海域においてカツオ当歳魚は130 m以深を遊泳することはなく、95%以上の時間、水温23.8°C以上の110 m以浅の亜表層内を遊泳していたのに対し (Figs. 3 and 7), 東太平洋赤道域の大型カツオは深度150 mを超えて潜水することが多く (1回あたり平均10分で、1日あたり平均21回)、水温19°C以下の躍層44 m以深での遊泳時間が全体の20%近くを占めていた (Schaefer and Fuller, 2007)。

これらの鉛直遊泳行動の違いが観測された要因の一つとして、魚体サイズの違いが考えられる。クロマグロを対象とした研究では、魚体が大きいほど遊泳能力 (単位時間あたりに遊泳できる距離) や水圧への耐性が増すため、最大の潜水深度が大きくなると考えられている (Kitagawa et al., 2003)。体温保持の観点においても魚体サイズが影響し、潜水深度に関連すると考えられる。体サイズの大きい魚は、小さい魚より体温と外部水温との間の温度勾配が小さく、魚体内外での熱輸送が小さくなるため、低水温環境下での体温の低下が遅くなる (Schmidt-Nielsen, 1984)。クロマグロの場合、魚体サイズと魚体内外での熱輸送係数との関係から、大きい魚体ほど断熱性が増し、単位体重あたりの熱損失が小さいことが明らかとなっている (Kitagawa et al., 2006)。カツオに関しても、尾叉長30.0–44.9 cmの比較的小型のカツオよりも尾叉長45.0–54.9 cmのカツオの方が相対的に体温は高い傾向にあることが示されている (二平, 2012)。本研究ではカツオ当歳魚の日中の平均Delta Tは0.5°Cであったのに対し (Fig. 4)、3歳魚の場合は2.2°Cであったことから (Schaefer and Fuller, 2007)、カツオ当歳魚は尾叉長66–69 cmの3歳カツオに比べて体温保持機構が劣ると推察され、そのために水温躍層以深などの低水温層に潜水する回数が少なかった、あるいはなかったのだと考えられる。ただし、Schaefer and Fuller (2007) で観測された潜水行動の1回あたりの平均時間は10分であったのに対し、本研究の測定インターバルは20分であったことから、実際には水温躍層以深を遊泳していたとしても記録には残っていない可能性は否定できない。

北太平洋亜熱帯海域と三陸・常磐沖でのカツオ当歳魚の遊泳深度と表層漁業における群れ遭遇率との関係

竿釣りやまき網漁業者は、日中に目視によって海洋表層のカツオの群れを発見することが多いのだが、カツオが表層 (0–30 m) を遊泳する時間は日中に短く、夜間の方が長かった (Fig. 3)。当業船は主に、その短い時間に表層を遊泳していたカツオの群れを発見し、漁獲していると推察されるが、群れとの遭遇率は海域によって異なり、日本近海では亜熱帯海域よりも高いといわれている (例えば、カツオ竿

釣り船27源吉丸や28鳳丸の乗組員の私信)。表層漁業では船上での目視が漁場探索の主要な方法の一つであり、極表層を遊泳するカツオ、跳ねるカツオを直接確認するだけでなく、水面下でのカツオの遊泳に影響される海表面での微妙な波の変化によって船上からは直接確認できない群れを発見することも頻繁にあるため、カツオがより深い層を遊泳する時間が長いと、それだけ群れを発見する確率および釣獲率が低くなるはずである。ソナーによって深い層 (50–60 m以深など) を遊泳するカツオの群れを見つけることもあるが、竿釣り漁業では餌を撒いても群れが表層に浮上してこないために漁獲に結びつかないことが多々ある。筆者が竿釣り・まき網当業船や調査船に乗船した際に、三陸・常磐沖では1日あたり10–20回近く群れに遭遇する日が多かったのに対し、亜熱帯海域では「ゼロ」も含めて10回に満たない日も多く、前述の報告と整合していた。この群れ遭遇率の違いの要因として、カツオの遊泳深度の違いが考えられる。亜熱帯海域において日中にカツオ当歳魚が50 m以浅を遊泳していた時間は約50% (6時間) で、海面近くの10 m以浅では10%に満たなかったのに対し (Fig. 3)、三陸・常磐沖のカツオ (尾叉長41–50 cm) が日中に50 m以浅を遊泳していた時間は90%以上、10 m以浅では約40%であったことが観測されている (小倉, 2012)。このように、亜熱帯海域におけるカツオの遊泳深度は日本近海よりも深く、なおかつ鉛直的に分散していた (Fig. 3)。亜熱帯海域のカツオ資源量が三陸・常磐沖よりも少なければ、その違いが原因で群れ遭遇率が低くなる可能性も考えられるが、資源評価結果によると亜熱帯海域の資源量 (あるいは密度) は日本近海よりもむしろ多いと推定されている (Langley and Hampton, 2008; Lehodey et al., 2008, 2011; 岡本・清藤, 2012)。したがって同海域では、カツオ資源量は比較的多いが、カツオが表層を遊泳する時間が短いことが要因の一つとなって、表層漁業での群れ遭遇率は低くなると考えられる。ただし、亜熱帯海域の方がカツオの資源量が多くても群れの分布密度が小さい場合、そのために遭遇率が同様に低くなる可能性が考えられるため、海域間での群れ密度の違いについても実態を把握して総合的に議論する必要がある。

水温や餌生物分布などの海洋環境が海域間でのカツオの遊泳深度の違いに密接に関係していることは、これまでの研究結果からも推察される (例えば、Barkley et al., 1978; 二平, 1992, 1996; Schaefer and Fuller, 2007)。環境水温18–19°C以下の海域や深度では体温低下に伴う代謝機能低下が生じ、代謝を維持できる最低体温22°C (魚体中央部深部組織の温度) をカツオ (尾叉長45 cm未満) が保つためにはそれ以上の環境水温が必要である (二平, 2012)。尾叉長66–69 cmの比較低大型のカツオが水温20°C以下の深部へ潜水する際に費やした1回あたりの平均時間は10分であったことから (Schaefer and Fuller, 2007)、それよりも体温保持機

構が劣ると考えられるカツオ当歳魚も、18–19°C以下の低水温下では長時間遊泳することはできないと推察される。18–19°Cが、カツオが長時間遊泳できる水温の下限であると推察されるが、カツオが水温19°Cより冷たい深度に分布・潜水することは本研究で観測されず、主に23.8°C以上の暖水塊内を遊泳していたため (Fig. 7), その水温に基づいてPMHを推定可能である (Fig. 8)。一般的に、Fig. 8からも確認できるように、暖水塊は日本近海よりも南側の亜熱帯海域で水平的かつ鉛直的に拡がっているため、亜熱帯海域の方が鉛直的に遊泳可能な範囲は広い。それに対して三陸・常磐沖では、深度30 m以深でカツオの腹腔内温度が19°C近くまで低下していたことから (小倉, 2012), 水温はそれ以下であったといえる (カツオは代謝熱によって体温を外部水温よりも高く維持できる内温性の生物であるため)。そのため、上述したように亜熱帯海域と三陸・常磐沖との間でカツオの遊泳深度の違いが観測されたと考えられる。餌環境の観点では、カツオ当歳魚を放流した20–22°Nの亜熱帯海域において、深度100–150 m付近に植物プランクトン生物量の亜表層極大が形成され (Furuya, 1990; Longhurst, 2006), カツオの餌生物となるマイクロネクトン分布も同様の深度帯で極大となっていたことが観測されている (Hidaka et al., 2003)。三陸・常磐沖では、カツオが北上来遊してくる春過ぎから夏に深度20–60 m付近の比較的表層で、植物プランクトン生物量の極大値が観測されている (Chiba et al., 2010)。カツオの餌生物分布やそれを支える環境も、結果として海域間でのカツオ当歳魚の遊泳深度の違いに影響していた可能性が考えられる。

以上のことから、亜熱帯海域において、カツオが長時間遊泳できる暖水は深くまで分布しており、なおかつ餌生物分布は深度100–150 m付近の亜表層が多いため、漁業との接点となる表層での遊泳時間が比較的短く、その結果群れ遭遇率が低くなると考えられる。それに対して三陸・常磐沖では、カツオが来遊する夏に0–50 m付近の浅い層にしか暖水が分布せず、その層で餌環境が好適であるため、表層での遊泳時間が長く、亜熱帯海域よりも群れ遭遇率が高いと考えられる。

まとめと課題

本研究では、アーカイバルタグから得られた外部水温データを用いて亜熱帯海域におけるカツオ当歳魚の鉛直遊泳行動と海洋環境との関係について検討し、23.8°C以上の暖水塊の鉛直分布から、日本近海へ北上前のカツオ当歳魚のPMHとその北限を推定した。PMH北限緯度の推定結果は、カツオ当歳魚の漁獲情報・データを用いて検証する必要があるが、現段階ではそのためのデータセットが無いため比較・検証はできない。今後、QRY (船間漁況無線連絡) データから当歳魚に相当するカツオの漁獲情報を収集し、その推定精度を検証することで実用性を検討する必要がある。

実用性が認められれば、最終的には日本近海への来遊時期の推定・予測に貢献できると考えられる。また本研究では、亜熱帯海域と三陸・常磐沖とでカツオの主な遊泳深度が異なっていたことから、それが表層漁業における群れ遭遇率に影響していることが示唆された。ただし、本研究で使用したアーカイバルタグデータは2個体の1週間分のみであり、結果の偶然性を否定できないため、今後データセットを増やして再解析する必要がある。PMH推定に関しても、主分布域を形成可能な水温「23.8°C以上」の定義を、サンプルサイズを大きくすることで定量的により信頼性の高い値にしなければならない。同時に、季節変化や回遊に伴う海域・環境変化も考慮したパラメータ値を定義する必要がある。そのために、放流個体の再捕率を向上させ、データ取得間隔が短くかつ長期の詳細なデータから特徴化された遊泳行動と生息環境情報に基づいた「より理論的な」カツオ当歳魚の主分布域の推定とその分布生態に関する解釈を発展させなければならない。2011年には、これまで利用してきたものよりも記録容量が100倍以上大きく (8 Mbyte), かつ小型 (直径7.8 mm, 長さ26 mmの円筒形, 水中重量1.2 g) のアーカイバルタグが開発されたため、長期の詳細なデータ (30秒間隔で1年以上) を取得することが可能となった。2012年以降にはそれを使用して調査を継続している。再捕率を向上させるにあたっては、放流後の生残率と再捕個体の報告率の向上が重要である。前者に関しては、まず釣り上げ時のストレス (針掛かり箇所や出血状況) の小さい魚体を厳しく選定し、その上でタグ装着時のストレス (放流前までに要する時間や開腹時の傷口の大きさなど) をこれまで以上に軽減しなければならない。後者に関しては、漁師や漁協などの漁業関係者、加工業者に対する周到的な広報活動によって再捕データの重要性を浸透させ、再捕報告の協力の呼び掛けを継続していく必要がある。

謝辞

標識放流調査時における船上での衛星海表面水温などのデータ利用に関して多大なるご協力を頂いた株式会社グリーン&ライフ・イノベーションの齊藤誠一博士、高橋文宏氏に心より御礼申し上げる。また、国際水産資源研究所の藤岡紘博士、青木良徳氏にはアーカイバルタグのデータ解析にあたり忌憚のない御意見を頂いた。重ねて御礼申し上げる。なお、本研究は水産庁による「国際資源対策推進委託事業」の一環として行われた。

引用文献

- 浅野政宏 (1984) 標識放流からみた東北海区のカツオの移動. 昭和59年度カツオ研究協議会会議報告, 東北区水産研究所, 15–20.
- Barkley, R. A., W. H. Neil and R. M. Gooding (1978) Skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) habitat based on temperature and oxygen re-

- quirements. *Fish. Bull.*, **76**, 653–662.
- Chiba S, T. Hirawake, S. Ishizaki, S. Ito, H. Kamiya, M. Kaeriyama, A. Kuwata, T. Midorikawa, S. Minobe, S. Okamoto, Y. Okazaki, T. Ono, H. Saito, S. Saitoh, D. Sasano, K. Tadokoro, K. Takahashi, Y. Takatani, Y. Watanabe, Y. W. Watanabe, Y. Watanuki, O. Yamamura, N. Yamashita and A. Yatsu (2010) Status and trends of the Oyashio region, 2003–2008. In: *Marine Ecosystems of the North Pacific, 2003–2008*, eds. S. M. McKinnell and M. J. Dagg, PICES Special Publication No. 4, 300–329.
- Furuya, K. (1990) Subsurface chlorophyll maximum in the tropical and subtropical western Pacific Ocean: Vertical profiles of phytoplankton biomass and its relationship with chlorophyll *a* and particulate organic carbon. *Mar. Biol.*, **107**, 529–539.
- Hidaka, K., K. Kawaguchi, T. Tanabe, M. Takahashi and T. Kubodera (2003) Biomass and taxonomic composition of micronekton in the western tropical-subtropical Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **12**, 112–125.
- 川合英夫 (1991) 黒潮系での総観スケールの構造と水産生物に及ぼす影響. 「流れと生物と—水産海洋学特論」川合英夫編, 京都大学学術出版会, 京都, 18–34.
- Kitagawa, T., S. Kimura, H. Nakata and H. Yamada (2003) Diving patterns and performance of Pacific bluefin tuna (*Thunnus thynnus orientalis*) as recorded by archival tags. *Otsuchi Marine Science*, **28**, 52–58.
- Kitagawa, T., S. Kimura, H. Nakata and H. Yamada (2006) Thermal adaptation of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* to temperate waters. *Fish. Sci.*, **72**, 149–156.
- 清藤秀理・岡本 俊 (2011) カツオ回遊動態と環境要因との関連. *海洋と生物*, **33**, 62–68.
- 清藤秀理・岡本 俊・魚崎浩司・増嶋雅親・岡崎 誠・瀬川恭平・稲掛伝三 (2010) 中南海域・西日本沿岸域におけるカツオ北上期の漁場形成機構の解明. 2010年度水産海洋学会講演要旨集, 56.
- 小橋史明 (2010) 北太平洋亜熱帯前線の解析的研究. *海の研究*, **19**, 111–126.
- Kobashi, F., H. Mitsudera and S.-P. Xie (2006) Three subtropical fronts in the North Pacific: Observational evidence for mode water-induced subsurface frontogenesis. *J. Geophys. Res.*, **111**, C09033, doi:10.1029/2006JC003479.
- 国際水産資源研究所 (2012) 平成23年度カツオ資源会議報告. 国際水産資源研究所, 静岡, 220 pp.
- Langley, A. and J. Hampton (2008) Stock assessment of skipjack tuna in the Western and Central Pacific Ocean. Working paper SA-WP-04 presented to the 4th meeting of the scientific committee of the Western and Central Pacific fisheries commission, 1–75.
- Lehodey, P., I. Senina and R. Murtugudde (2008) A spatial ecosystem and populations dynamics model (SEAPODYM)—Modeling of tuna and tuna-like populations. *Prog. Oceanogr.*, **78**, 304–318.
- Lehodey, P., I. Senina, B. Calmettes, J. Hampton, S. Nico, P. Williams, J. J. Molina, M. Ogura, H. Kiyofuji and S. Okamoto (2011) SEAPO DYM working progress and applications to Pacific skipjack tuna population and fisheries. Working paper EB-WP-06 presented to the 7th meeting of the scientific committee of the Western and Central Pacific fisheries commission, 1–61.
- Longhurst, A. R. (2006) *Ecological geography of the sea*, second edition. Academic Press, San Diego, 542 pp.
- Masuda, S., T. Awaji, N. Sugiura, Y. Ishikawa, K. Baba, K. Horiuchi and N. Komori (2003) Improved estimates of the dynamical state of the North Pacific Ocean from a 4 dimensional variational data assimilation. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GRL017604.
- Masuda, S., T. Awaji, T. Toyoda, Y. Shikama and Y. Ishikawa (2009) Temporal evolution of the equatorial thermocline associated with the 1991–2006 ENSO. *J. Geophys. Res.*, **114**, C03015, doi: 10.1029/2008JC004953.
- 松本隆之 (2010) カツオへのアーカイバルタグ装着の試み. *遠洋リサーチ&トピックス*, **7**, 12–13.
- Matsumoto, W. M., R. A. Skillman and A. E. Dizon (1984) Synopsis of biological data on skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*. NOAA Tech. Rep. NMFS Circ., **451**, 1–92.
- 二平 章 (1992) カツオの低水温環境適応と前線漁場形成. *水産海洋研究*, **56**, 227–230.
- 二平 章 (1996) 潮境におけるカツオ回遊魚群の行動生態及び生理に関する研究. *東北水研研報*, **58**, 137–233.
- 二平 章 (2012) カツオの回遊行動と体温調節. *月刊海洋*, **44**, 203–214.
- 小倉末基 (2012) データ記録標識による常磐沖でのカツオの遊泳行動観察. *月刊海洋*, **44**, 146–154.
- Okamoto, S. and H. Kiyofuji (2011) CPUE of skipjack for the Japanese offshore pole and line using GPS and catch data. Working paper SA-WP-09 presented to the 7th meeting of the scientific committee of the Western and Central Pacific fisheries commission, 1–17.
- 岡本 俊・清藤秀理 (2012) 空間生態系—資源動態モデル SEAPO DYMによる中西部太平洋でのカツオ資源動態に関する研究. *月刊海洋*, **44**, 155–164.
- Schaefer, K. M. and D. W. Fuller (2007) Vertical movement patterns of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the eastern equatorial Pacific Ocean, as revealed with archival tags. *Fish. Bull.*, **105**, 379–389.
- Schmidt-Nielsen, K. (1984) *Scaling: Why is animal size so important?* Cambridge University Press, Cambridge, 241 pp.
- Shetty, D. C., T. Kawai and T. Tanabe (1993) A comparative analysis on the intensity of skipjack fishery by purse-seiners and pole & liners in the North-Western Pacific Ocean. *Bull. Tohoku Natl. Fish. Res. Inst.*, **55**, 1–16.
- Suga, T., K. Motoki and Y. Aoki (2004) The North Pacific climatology of winter mixed layer and mode waters. *J. Phys. Oceanogr.*, **34**, 3–22.
- Tanabe, T., S. Kayama and M. Ogura (2003) Precise age determination of young to adult skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) with validation of otolith daily increment. Working paper SKJ-8 presented to the 16th meeting of Sanding Committee on Tuna and Billfish, 1–10.
- 田代一洋・内田為彦 (1989) 標識放流結果からみた薩南海域へ来遊するカツオの移動. *宮崎水試研報*, **4**, 1–34.
- 安井 港・森 訓由 (1985) 標識放流からみた日本近海へのカツオ (*Katsuwonus pelamis*) の来遊経路. *静岡水試研報*, **20**, 1–8.
- 渡辺 洋・小倉末基・田邊智唯 (1995) 標識放流からみたカツオの回遊について—南下期を過ぎてからの移動経路. *東北水研研報*, **57**, 31–60.
- Welch, B. L. (1947) The generalization of 'Student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika*, **34**, 28–35.
- Williams, P. and P. Terawasi (2011) Overview of tuna fisheries in the Western and Central Pacific Ocean, including economic conditions-2010. Working paper GN-WP-01 presented to the 7th meeting of the scientific committee of the Western and Central Pacific fisheries commission, 1–52.
- 山田陽巳 (2001) アーカイバルタグによるクロマグロ幼魚の行動生態の解明. *海洋と生物*, **23**, 540–546.