

原著論文

遠洋まぐろ延縄漁業における 魚倉保冷温度変更による省エネルギー効果

上原崇敬*・横田耕介*・澤田克彦*・大島達樹*・伏島一平*

Energy savings achieved by changing fish-hold temperature on a large-distant-water type tuna longline vessel

Takayoshi UEHARA, Kosuke YOKOTA, Katsuhiko SAWADA,
Tatsuki OSHIMA and Ippei FUSEJIMA

We examined the energy-saving effect of changing the fish-hold temperature on a large-distant-water type tuna longline fishery. For the first half of the fishing trip, the fish-hold temperature was set to -55°C , which is the ultra-low temperature that is conventionally used for this purpose. For the latter half of the trip, the temperature was set to -45°C . We then compared the electric energy consumption of the refrigerator compressor for these two temperature settings. Increasing the fish-hold temperature from -55°C to -45°C reduced the electricity consumption by 34.1% during non-operational periods, and by 11.9% during operational periods. We estimated the change of the fish-hold temperature reduced the fuel consumption by 32.65 kL per a fishing trip (130 days of non-operation and 200 days operation). Thus, changing the fish-hold temperature is an effective method for saving energy on large-distant-water type tuna longline vessels.

キーワード：省エネルギー，冷凍機，魚倉保冷温度変更
2014年6月17日受付 2015年12月18日受理

遠洋まぐろ延縄漁業は、2010年では約8万トンの刺身用まぐろ類を漁獲しており、我が国の重要な漁業種のひとつとなっている（農林水産省大臣官房統計部2010）。しかし、近年、遠洋まぐろ延縄漁業は、漁獲の低迷や燃油価格の上昇・不安定等、厳しい生産環境に置かれている。燃油価格の高騰は、2008年には1kL当たり12万円を超える水準となり、この時の経費の35%を超える等、経営を大きく圧迫した。その後、一時沈静化したかに見えた燃油価格も依然として高い水準で推移している。

遠洋まぐろ延縄の漁獲物は、急速冷凍処理をされた後に、 -55°C 以下の超低温の魚倉に移され、漁獲してから水揚げされるまで一般的に6ヶ月から1年程度船内で冷

凍保管される。遠洋まぐろ延縄漁船の燃料消費量の内、全体の55%は主機関で消費されているが、次に大きな割合を占めているのがこの魚倉保冷に要するものであり、全体の14%を占めている（横田ら未発表）。

一方で、 -55°C よりさらに低温で冷凍保管することが、まぐろ類の長期保存における品質確保の必要条件であるとの科学的な知見はほとんど無い（村田2010）。田中ら（1984）および田中ら（1985）によると、代表的な刺身用赤身商材であるメバチの品質保証限界は、魚肉の褐色変化の指標であるミオグロビンのメト化率から判定して、 -40°C 保管で17ヶ月以上とされている。このことは、船上で急速凍結したまぐろ類を魚倉・陸上施設等において -40°C 以下の温度帯で保管すれば、品質（色調）を確

* 国立研究開発法人水産総合研究センター開発調査センター
〒220-6115 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-3クイーンズタワーB棟15階
Marine Fisheries Research and Development Center, Fisheries Research Agency,
15F Queen's Tower B, 2-3-3 Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa 220-6115, JAPAN
uehara@jamarc.go.jp

保できることを示唆している。

これらを受けて、まず魚倉保冷に係わる冷凍機において、遠洋まぐろ延縄漁船の省エネルギーに取り組むことが効果的と考えられ、国立研究開発法人水産総合研究センター開発調査センターは、魚倉保冷温度の変更による省エネルギー効果および販売価格への影響に関して、検証を行ってきた（上原ら 2009, 上原ら 2010, 上原ら 2012）。また横田ら（2011）は、実際に超低温で保冷した製品（セミドレス処理されたメバチ *Thunnus obesus*）と $-40 \sim -45^{\circ}\text{C}$ 程度で保冷した製品を販売し、それらの販売単価を比較した結果、保冷温度の違いによる販売価格への影響は認められなかったことを明らかにした。

一方、省エネルギー効果に関しては、魚倉保冷温度を超低温から $-40 \sim -45^{\circ}\text{C}$ 程度に上げた場合、魚倉保冷に関する消費電力量 (kWh) を約 56%削減できると試算されている（上原ら 2009）。しかしながら、ここでの試算は実際の航海、操業の状況下におけるものではなく、魚倉に製品が入庫されてない状態で、かつ 6 時間から 61 時間の電力量の測定結果を元に試算したものであった。また、横田ら（2011）の保冷温度別の製品販売に関する調査を行った際には、保冷魚倉を 2 つに分けて、それぞれ異なる設定温度としていたために、実際の航海、操業時には全ての魚倉を同じ設定温度にして省エネルギー効果を検討することはできなかった。

こうしたことから、実際の航海、操業条件下において、改めて魚倉保冷温度の変更による省エネルギー効果を検証する必要があると考えられた。そこで、本研究では、対象とする全ての魚倉の温度を異なる期間に -45°C および -55°C に設定して、実際の航海（ここでは、操業は行わず連続した航走を意味する。以下、航海と称す）と延縄操業（以下、操業）において検証試験を行った。運行

状況毎に、各設定温度における冷凍機（圧縮機）の電力量を測定し、それらの消費電力量を比較することによって、魚倉保冷温度の変更による省エネルギー効果を検討した。

材料と方法

本研究は、2013 年 1 月 11 日から 3 月 28 日に、遠洋まぐろ延縄漁船・開発丸（489 GT）を用いて実施した。

1 月 10 日に仏領ポリネシア・タヒチ島を出港し、ハワイ東方およびジョンストン島周辺の公海域で 56 回の延縄操業を行い、その後、3 月 28 日に神奈川県三崎港に入港した。

船内には、3 つの保冷魚倉（1 番魚倉： 213.35m^3 ，2 番魚倉： 285.06m^3 ，3 番魚倉： 46.06m^3 ）があるが、その内、1 番魚倉と 2 番魚倉を本研究対象とした。小型の 3 番魚倉に関しては、主に食糧等の保管に使用していたため、本研究期間を通じて -45°C に設定していた。

開発丸で使用されている冷凍装置一式は、日新興業株式会社製で、圧縮機は長谷川鉄工株式会社の高速多気筒二段圧縮機（VZL62RM75, $75\text{kW} \times 6\text{p} \times \text{AC}220\text{V}$ ）であり、これが 3 台搭載されている。冷凍機の運転方法は、 -45°C 設定時の航海中に関しては、冷凍機の運転台数は 1 台であった。 -45°C および -55°C 設定時の操業中の冷凍機の運転台数は 2 台であり、並列冷却運転を行った。魚が多く取れた場合は冷凍機 1 台を、凍結室冷却用に単独運転に切り替えて調整を行った。 -55°C 設定時の航海中は魚倉保冷のみであるが、冷凍機 2 台運転を必要とした。 -45°C および -55°C 設定時の航海中と操業中の冷凍機の運転方法概要を図 1 に示す。航海中の運転状況下における冷凍機の成績係数（冷凍能力 / 軸動力）は、長谷

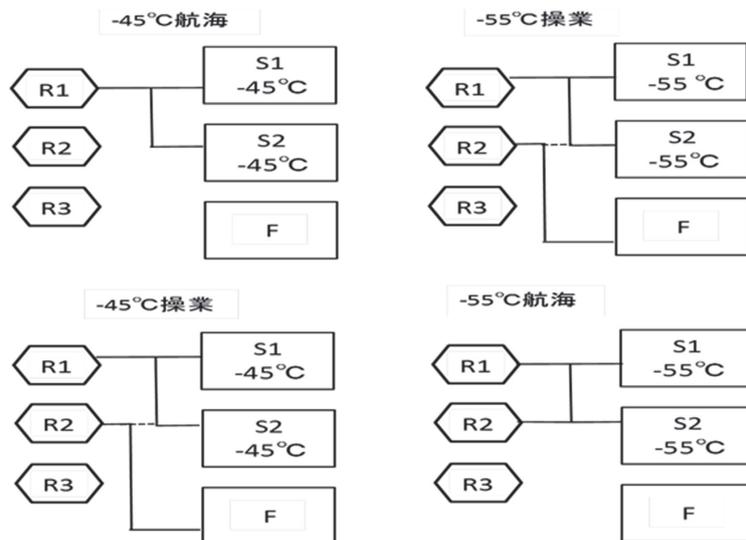


図 1. -45°C および -55°C 設定時の航海中と操業中の冷凍機の運転方法概要 R：冷凍機 F：急速凍結室 S：魚倉

川鉄工株式会社のVZ/VZL圧縮機冷凍能力・軸動力表(長谷川鉄工株式会社1999)より、温度が+35°C(海水温:+25°C)の条件下で、-45°C設定時に1.36、-55°C設定時に1.09である。また、膨張弁は前川製作所株式会社製の電子膨張弁(MWP-35)を使用している。これによって、冷媒流量が最適過熱度になるように自動制御される。

電力量データ収集の概要を表1に示す。まず、本研究期間の前半である1月11日から19日の航海期間、1月20日から2月18日の操業期間に設定温度を-45°Cとして電力量データを収集した。2月19日に魚倉の設定温度を-55°Cに変更し、温度が-55°C付近で安定した後の2月25日から3月16日の操業期間、3月19日から3月28日の航海期間に-55°C設定における電力量データを収集した。温度ロガー(安立計器製AMS-8000)を用いて計測した本研究期間中の魚倉の温度変化を図2に示す。-45°C設定時および-55°C設定時における実際の魚倉温度の平均値±標準偏差は、それぞれ-43.8±0.7°C(n=988)、-54.8±1.2°C(n=782)であった。なお、本研究を実施した海域の表面水温は、-45°C設定時および55°C設定時で、それぞれ25.19±1.80°C、25.94±2.91°Cであった。また、魚倉に保管されていた製品量の推移は、-45°C設定の航海時で185.3tであり、操業終了日時点で202.6tであった。-55°C設定の操業開始時点で206.2tで

あり、航海開始時点で223.7tであった。なお、本研究開始時には、すでに1番魚倉は満車で閉鎖されており、本研究期間中の製品の入庫はすべて2番魚倉であった。操業中、1日あたりの魚倉への製品入庫量の平均重量±標準偏差は、-45°C設定時、-55°C設定時でそれぞれ692.7±392.8kg、970.8±319.5kgであった。

電力量の測定には、東芝製の電力計KK-11Aを用いた。冷凍機1台毎に30分あたりの電力量データを収集した。エラー値、冷凍機の負荷増加となる別の研究実施時(横田ら2014)および操業期間中の漁場移動時のデータを除いて、航海中、操業中のそれぞれに関して-45°C設定時および-55°C設定時の平均電力量を算出した。それぞれの設定温度における電力量の差を取ることで、魚倉の温度を-55°Cから-45°Cに変更したことによる省電力量を算出した。また、得られた省電力量データを元に、まぐろ延縄漁船1隻の1航海〔ここでは、開発丸の運行実績を元に330日(操業200日、航海130日)とする〕あたりの省電力量を、さらに過去の開発丸を利用した研究で得られている消費電力量(x)と燃油消費量(y)の関係式 $y(kL) = 0.000296x(kWh)$ (上原ら2009)を用いて、燃油消費削減量をそれぞれ推定した。

航海中に関して冷凍機(凍結準備室等の保冷も一部含まれるものの)は、主に魚倉の保冷のみに使用されており、得られた電力量データは、魚倉保冷に係るものとみなすことができる。一方、操業中に関しては、急速凍結室の冷却にも冷凍機が使われる。しかし、冷凍機の電力量データを魚倉の保冷と急速凍結室の冷却毎に分けることはできないために、操業中に関しては、これらを合わせた電力量で検討を行った。

表1. 電力量データ収集の概要

運行状況	魚倉設定温度	電力量データの収集期間	有効な電力量データの合計時間(時)*
航海	-45°C	1/11 - 1/19	200.5
操業	-45°C	1/20 - 2/18	528
操業	-45°C→-55°C	-	-
操業	-55°C	2/25 - 3/16	451
航海	-55°C	3/19 - 3/28	214

* エラー値、冷凍機の負荷増加となる別試験実施時、操業期間中の漁場移動時のデータを除く

結果

電力測定期間中における冷凍機消費電力量の時系列変

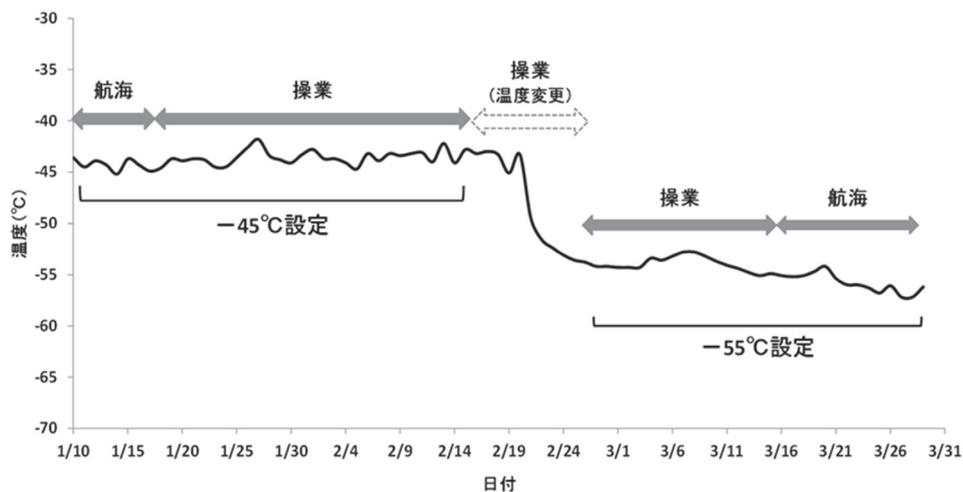


図2. 電力量測定期間中における魚倉の温度変化

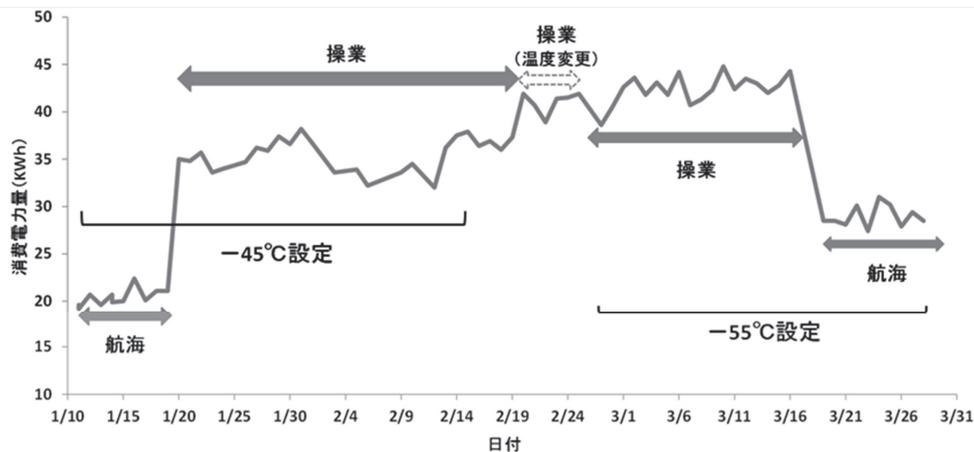


図3. 電力量測定期間中における冷凍機の消費電力量変化

化を図3に示す。航海中の-45°C設定時と-55°C設定時の消費電力の差は大きく、一方で操業中に関しては、その差は小さいものであった。魚倉設定温度毎の冷凍機の消費電力量の測定結果と1日あたりの消費電力量および燃油消費量の推定値を表2に示す。魚倉温度変更による30分あたりの省電力量は、航海中で10.3kWh、操業中で4.8kWhであり、それぞれ34.1%、11.9%の省エネルギー

効果となった。これを元に、1日あたりの省電力量を推定したところ、航海中、操業中でそれぞれ494.4kWh、230.4kWhとなった。さらに、1日当たりの燃油削減量は、航海中、操業中でそれぞれ0.15kL、0.07kLと推定された。

1航海あたりの魚倉設定温度別の冷凍機の燃油消費量の推定値を表3に示す。魚倉保冷温度を-55°Cから-45°Cに変更した場合、1航海で32.65kLの燃油が削減

表2. 魚倉保冷温度別の冷凍機の消費電力量及び1日あたり燃油消費量

運行状況	魚倉設定温度	30分当たり平均消費電力量±標準偏差 (kWh)	1日当たり消費電力量 (推定値) (kWh)	1日当たり燃油消費量 (推定値) (kL)
航海中	-45°C	19.9±2.3	955.2	0.28
	-55°C	30.2±2.4	1449.6	0.43
	-55°C → -45°C 電力 (燃油) 消費量の差	10.3	494.4	0.15
操業中	-45°C	35.7±2.6	1713.6	0.51
	-55°C	40.5±3.0	1944.0	0.58
	-55°C → -45°C 電力 (燃油) 消費量の差	4.8	230.4	0.07

表3. 1航海 (330日) あたりの魚倉設定温度別の冷凍機の燃油消費量 (推定値)

魚倉設定温度	運行状況	燃油消費量 (kL)
-45°C	航海 (130日)	36.76
	操業 (200日)	101.45
	合計	138.21
-55°C	航海 (130日)	55.78
	操業 (200日)	115.08
	合計	170.86
-55°C → -45°C 燃油消費量の差		32.65

されると推定された。燃油代を 85,000 円/kL とした場合、年間 2,775,250 円の燃油代の削減効果と試算された

考 察

本研究において、魚倉の設定温度を変更する（上げる）ことによる省エネルギー効果を実際の航海、操業状態において示すことができた。魚倉温度の変更は、設定温度および冷凍機の運転方法を変更するだけであり、設置コストが掛からない利点がある。また、過去の販売調査から、 -45°C 程度で保冷された製品は、超低温で保冷された製品と同等の評価が得られており（横田ら 2011）、問題も生じていない。こうしたことから、魚倉保冷温度の適正化は、遠洋まぐろ延縄漁船の省エネルギー方策導入の第一歩として最も適していると考えられる。

本研究で使用した開発丸は、膨張弁に電子式膨張弁を使用していたため、最適な温度設定を保つことが可能であり、より正確な研究を行うためには適したものであった。一方で、遠洋まぐろ延縄漁船の多くは、温度式膨張弁を使用しているため、本研究のような温度制御は難しいと考えられる。しかし、膨張弁による冷媒の制御に係わらず、冷凍機における消費電力量自体を減らすことができ、魚倉設定温度の変更による省エネルギー効果は得られる。

航海中に関しては、 -55°C 設定の場合は冷凍機を 2 台運転する必要があったが、 -45°C 設定の場合は 1 台の運転で設定温度を維持できていた。冷凍機の運転台数を減らすことができたため、このことが大きな省エネルギー効果に繋がった。過去の研究では、魚倉に製品が無く、かつ短時間の電力量測定による研究であったが、魚倉保冷温度を -60°C 程度から $-40 \sim -45^{\circ}\text{C}$ 程度に上げた場合、消費電力量を約 56% 削減できると試算されていた（上原ら 2009）。本研究では、実際に製品を入庫した状態で長期間にわたるデータを取得して、 -55°C 設定と -45°C 設定における消費電力量を比較して、約 34% の電力量を削減できることを示した。設定温度および実験条件は異なるため単純な比較はできないものの、いずれの研究からも設定温度を上げることにより消費電力量が大幅に削減されることが示された。

一方、操業中に関しては、冷凍機の消費電力量は、 -55°C 設定時に比べて、 -45°C 設定時の方が少なかったものの、急速凍結室の冷却のために冷凍機を常時 2 台運転していたことによって、航海中に比べると省エネルギー効果が小さくなった。操業中の運転方法の変更による消費電力は、急速凍結室への製品の入庫量によっても変わってくるために、単純な比較は困難である。本研究では、魚倉保冷に係わる電力量と急速凍結に係わる電力量を分けることができなかったため、操業中における魚倉保冷に関する冷凍機の省エネルギー効果を明確に示すことはできなかった。一方で、遠洋まぐろ延縄漁船の燃

料消費量の内、魚倉保冷の次に大きな割合を占めているのが急速凍結室の冷却に係わるものであり、全体の 12% を占めると推定されている（横田ら 未発表）。このことから、急速凍結室における省エネルギー方策も今後検討する必要がある。

著者らの一連の研究によって、魚倉保冷温度を -45°C に変更することによって省エネルギー効果を得られることが実証された。他方、一般的な遠洋まぐろ延縄漁船では、冷凍機の冷媒にフロン系ガスが用いられている。フロン系ガスはオゾン層の破壊、地球温暖化に大きな影響を与えることから、使用に関して国際的な規制が定められている。モントリオール議定書では、現在、船上で最も多く使われている冷媒 HCFC (R22) について 2020 年に全廃する目標を立てている（United Nations Environment Programme 2000）。また、代替フロンとして使用されつつある HFC についても、大きな温室効果を有していることから京都議定書において排出規制が定められている（United Nations 1997）。将来的に、フロン系ガスを使用できなくなると自然冷媒を活用する必要性が想定されるが、フロンに替わる冷媒として現時点で考えられるものは、アンモニアである。アンモニア冷媒は、過去にはまぐろ延縄漁船で利用されていた実績があり、最近のかつお漁船では、冷媒として再び使用され始めている。アンモニアを使用した場合の実用的な下限温度は -45°C 程度と言われている。このように -45°C 保冷は、フロンの使用が困難になる将来を見据えた保冷温度帯にも対応している。現在の超低温保冷に替わり、自然冷媒で達成可能な温度帯での生産流通に関して、早急に導入を進める必要がある。

謝 辞

日本鯉鮪漁業開発株式会社の中村泰博氏、男帛勇一機関長をはじめとした開発丸の乗組員の皆様には、本研究にご協力頂いた。日新興業株式会社の中野寿治氏、浜田幸男氏、元株式会社前川電気の半澤良一氏には、冷凍機に関する有益なご助言を賜った。厚く御礼申し上げます。

文 献

- 長谷川鉄工株式会社 (1999) VZ/VZL 圧縮機冷凍能力・軸動力表。2p.
- 前川製作所 (2012) 自然冷媒への取り組み（ナチュラルファイブ）別利用温度域について。 <http://www.mayekawa.co.jp/ja/>, 2012 年 5 月 10 日（閲覧日）
- 村田昌一 (2010) 省エネルギーを目指した水産物冷凍保管温度の設定—水産総合研究センター「水産業エネルギー技術研究会」を受けて—。海洋水産エンジニアリング, **90**, 58-61.
- 農林水産省大臣官房統計部 (2010) 平成 22 年漁業・養殖業生産統計年報, 農林水産省, 東京。

- 田中武夫・高橋憲治・西脇興二（1984）船内凍結マグロの陸上保管中における T.T.T.（温度別品質保証期間）の設定－第 1 報－マグロ肉の色変度からみた T.T.T.－ [商業的規模における大型凍結形態での研究]. 日本冷凍協会論文集, 1, 99-107.
- 田中武夫・浜本裕吉・西脇興二（1985）船内凍結マグロの陸上保管中における T.T.T.（温度別品質保証期間）の設定 - 第 2 報－マグロ肉の ATP 分解物からみた T.T.T.－ [商業的規模における大型凍結形態での研究]. 日本冷凍協会論文集, 2, 35-43.
- 上原崇敬・伊加 聖・大島達樹・伏島一平（2009）平成 20 年度海洋水産資源開発事業報告書（資源対応型：遠洋まぐろはえなわく太平洋中・東部海域）, 国立研究開発法人水産総合研究センター開発調査センター, 横浜, 125p.
- 上原崇敬・横田耕介・澤田克彦・大島達樹・伏島一平（2010）平成 21 年度海洋水産資源開発事業報告書（資源対応型：遠洋まぐろはえなわく太平洋中・東部海域）, 国立研究開発法人水産総合研究センター開発調査センター, 横浜, 133p.
- 上原崇敬・横田耕介・澤田克彦・村田昌一・金庭正樹・木宮 隆・今村伸太郎・鈴木道子・渡部俊広・山越康行・長谷川勝男・溝口弘泰・小田健一・大島達樹・伏島一平（2012）平成 22 年度海洋水産資源開発事業報告書（資源対応型：遠洋まぐろはえなわく太平洋中・東部海域）, 国立研究開発法人水産総合研究センター開発調査センター, 横浜, 136p.
- United Nations (1997) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto. 47P.
- United Nations Environment Programme (2000) The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. United Nations, Nairobi, Kenya. 20p.
- 横田耕介・上原崇敬・澤田克彦・伊加 聖・今村伸太郎・木宮 隆・鈴木道子・平岡芳信・金庭正樹・大島達樹・伏島一平（2011）遠洋まぐろ延縄漁業におけるメバチの販売価格に及ぼす潜在要因の影響：一般化線形混合モデルによる検討. 日水誌, 77, 593-599.
- 横田耕介・上原崇敬・澤田克彦・佐々木安之・佐谷守朗・大島達樹・伏島一平・金庭正樹・大村祐治・木宮 隆・今村伸太郎・鈴木道子・明田定満・長谷川勝男・溝口弘泰・山越康行・小田健一（2014）平成 24 年度海洋水産資源開発事業報告書（遠洋まぐろはえなわく太平洋中・東部海域）, 国立研究開発法人水産総合研究センター開発調査センター, 横浜, 134p.