

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

かつお一本釣り漁業におけるコスト削減に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 2023-12-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小田, 憲太郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2000038

博士学位論文

かつお一本釣り漁業における
コスト削減に関する研究

2022 年度
(2022 年 9 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用生命科学専攻

小田 憲太郎

博士学位論文

かつお一本釣り漁業における
コスト削減に関する研究

2022 年度
(2022 年 9 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用生命科学専攻

小田 憲太郎

かつお一本釣り漁業におけるコスト削減に関する研究

第1章 序論

1.1 和食文化—食材としてのカツオの必要性—	1
1.2 かつお漁業の現状	1
1.3 活餌として必要なカタクチイワシの資源状況	4
1.4 かつお一本釣り漁業が抱える課題	5
1.5 本論文の構成	7
1.6 引用文献	7

第2章 飼育下におけるカタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性に関する研究

2.1 はじめに	10
2.2 材料および方法	10
2.3 結果	14
2.4 考察	15
2.5 引用文献	17

第3章 カタクチイワシのアンモニア耐性-かつお一本釣り漁業におけるコスト削減のために-

3.1 はじめに	25
3.2 材料および方法	26
3.3 結果	30
3.4 考察	31
3.5 引用文献	34

第4章 給餌飼育下におけるカタクチイワシの安全飼育指標に基づいた 模擬長期飼育試験

4.1	はじめに.....	58
4.2	材料および方法.....	59
4.3	結果.....	61
4.4	考察.....	62
4.5	引用文献.....	64

第5章 かつお一本釣り漁業における養成および養殖カタクチイワシの 餌料（活餌）としての可能性

5.1	はじめに.....	86
5.2	材料および方法.....	87
5.3	結果.....	90
5.4	考察.....	92
5.5	引用文献.....	95

第6章 総合考察

6.1	船上における活餌の飼育方法.....	110
6.2	活餌用カタクチイワシの人工生産.....	112
6.3	引用文献.....	114

要約.....	116
---------	-----

謝辞.....	119
---------	-----

博士学位論文内容要旨

かつお一本釣り漁業は、刺身用かつおの安定供給を目的とする国内水産業において重要な位置を占める産業である。その漁業では、操業時に活餌として使用するカタクチイワシ *Engraulis japonicus* の安全飼育が航海中に求められている。特に遠洋漁業における船上での飼育には、飼育水をカタクチイワシの至適水温 15°C まで冷却する慣習があり、飼育水の冷却に要する燃油コストが増大する傾向にある。また、現在、カタクチイワシが安定供給されないことによる操業ロス、活餌コストの高騰も大きな問題となっている。このほか、操業経費の大部分を占める燃油費が世界情勢の影響を大きく受け高騰していることから、かつお一本釣り漁業経営に支障を来している。

本研究は、かつお一本釣り漁業における経営コストを削減させる基礎として、筆者が取り組んだ研究成果をとりまとめたものであり、序論（第1章）に続く第2章～第5章と総合考察（第6章）よりなる。第2章では、飼育水温を上昇させ燃油費削減を目指す試みとして、カタクチイワシの高温側水温耐性と低酸素耐性について検討した。第3章では、飼育水の換水量を低減し燃油費削減を目指す試みとして、カタクチイワシのアンモニア耐性を明らかにした。第4章では、第2章と第3章で得られた研究結果を基にした長期間にわたる給餌飼育の可否と、無給餌耐性について検討した。続く第5章では、2種類の方法で人工生産したカタクチイワシの有効性を検証するため、コストを算出するとともに、船上での生残率およびカツオ *Katsuwonus pelamis* の釣獲率を調査した。

第2章 遠洋漁業の現場で使われている飼育水温 15°C より、温度を上げてでも安全に船上飼育が可能となるかを明らかにする目的で試験を実施した。その結果、短期間におけるカタクチイワシの半数致死水温は 27.3～28.5°C と推定され、現在の飼育水温を 5～10°C 上げられる可能性があることが判明した。また、同時に低酸素耐性についても明らかにする中で、水温別のカタクチイワシの酸素消費量について調査したところ、溶存酸素量は 5mg/L 以上で飼育することが安全であること、水温の上昇とともに酸素消費速度が大きくなることが明らかになった。

第3章 遠洋漁業の現場で使われている高い換水率を低くしても、カタクチイワシを安全に船上飼育が可能となるかを明らかにする目的で、アンモニア耐性に着目して試験を実施した。その結果、短期間における非解離アンモニア態窒素の半数致死濃度は、現状の飼育水温 15°C で 0.706~0.770 mg/L、仮に飼育水温を現状よりも 10°C 上昇させた 25°C で 0.450~0.634mg/L と推定され、現状の換水量は高すぎておりエネルギーを浪費していることが明らかになった。また、近海漁業の現場で起こる高水温時期のカタクチイワシの大量死亡を防ぐため、冷却した飼育水による無換水飼育が可能となるか明らかにする目的で試験を実施したところ、断続的換水であれば短期間の飼育が可能であることが明らかになった。

第4章 第2章と第3章で得られた知見は短期間かつ無給餌条件下で、急性的な環境応答を評価したものである。そのため、20°C と 25°C の水温で遠洋漁業での航海日数 50 日間の給餌条件下で、飼育が可能となるかを明らかにする目的で試験を実施したところ、50 日後の生残率は 91%と 81%となった。また、第2章と第3章で実施した試験はいずれも無給餌条件下のため、供試魚の死亡要因に餓死が含まれている可能性がある。それを排除する目的で 20°C と 25°C で飢餓耐性試験を実施したところ、死亡魚が急増し始める日数はそれぞれ 23 日後と 14 日後となり、短期間での試験時の死亡要因に餓死は含まれないことが明らかになった。

第5章 近年、出漁前に積み込むカタクチイワシが安定供給されないことで、活餌価格の高騰や出漁が遅れることによるコストが発生している。これらを解消するため、シラスを捕獲・畜養した養成活餌と、人工的に採卵・種苗生産した養殖活餌の2通りの方法で、カタクチイワシの生産コストと船上における有効性を明らかにする目的で試験を実施した。天然活餌と比較した生産コストは、養成活餌はほぼ同等であったが、養殖活餌は 10 倍以上のコスト高となり、飼育方法に改善の余地が残された。また、船上における生残率およびカツオの釣獲率については、天然活餌と比較し養成・養殖活餌ともに遜色がないことが明らかになった。

以上の研究結果から、遠洋かつお一本釣り漁船では、現状の飼育水温 15°C より 5~10°C 昇温させることや、換水率を下げられる閉鎖循環飼育を用いることで、現状

よりも燃油経費を大幅に削減できる可能性が十分にあることが明らかになった。また、近海かつお一本釣り漁船では、高水温時期に飼育水を冷却せずに飼育することは不可能であることが判明したため、25℃以下の海水を用いた断続換水飼育の実施や、高水温帯を避けた漁場選択により、カタクチイワシの大量斃死を避けられるものと考えられる。さらに、東北地方～常磐海域における太平洋側地域に養殖カタクチイワシ等の生産基地を創設することで、復興支援等の地域活性化を図りつつ、かつお一本釣り漁業の経営改善に寄与することが期待できる。

第1章 序論

1.1 和食文化—食材としてのカツオの必要性—

平成 25 年にユネスコ無形文化遺産に登録された和食（日本人の伝統的な食文化）は、一汁三菜を基本とする理想的な栄養バランスがとれていること、また、「うま味」を上手に使うことで動物性油脂の少ない食生活が実現できるなどの特徴を持ち、日本人の長寿や肥満防止に役立っている。その「うま味」のひとつに欠かせないものとして、かつおだしがある（戸高ら 2014）。かつおだしの原料となる鰹節は、脂が乗っていないものが高品質とされ、インド洋や熱帯太平洋海域において、まき網漁業で漁獲されたカツオ *Katsuwonus pelamis* が主に使用されている。

また、カツオは刺身やタタキとして生食利用されることも多い。春時期に漁獲される初鰹は、脂があまり乗ってないあっさりとした赤身のカツオである。それとは対照的に、黒潮に乗って北上しながら餌をたくさん食べ丸々と太り、その後、秋に三陸沖に南下したところを漁獲される戻り鰹は、別名トロかつおとも呼ばれるほど脂が乗っている。両者はどちらも美味である。また、高知県の特産として有名なかつおの塩たたきは、脂の少ない初鰹でも脂の乗った戻り鰹も美味しく調理され、観光資源として一役買っているところである。「目には青葉山ほととぎす初鰹」と、俳句にも詠まれるように、カツオは日本人にとって愛され、欠くことの出来ない重要魚種のひとつとなっている（芦田 2013）。

1.2 かつお漁業の現状

カツオは主に巻き網、ひきなわ、一本釣り漁法にて漁獲され、令和 2 年度漁業・養殖業生産統計（以下、統計という。）および令和 2 年度漁業産出額確報（以下、確報という。）によれば国内漁業生産量 18.8 万トン、水揚げ金額 452 億円（@240 円/kg）を占める魚種である。カツオの資源動向については、令和 3 年度国際漁業資源の現況

によれば中西部太平洋海域において高位・減少とある。近年、外国船による漁獲圧力が高まっていることから、引き続き国際的な管理が必要とされている。カツオの利用については多種多様あるが、鰹節は巻き網のものを、刺身やたたきには、ひきなわや一本釣りで漁獲されたものが主に使用される。カツオの漁獲方法のうち、一般的に知名度が高く、ひときわ有名でダイナミックな漁法と言え、かつお一本釣りである。本漁業は、さしみ用かつおの安定供給を目的とし、国内水産業において重要な位置を占めている。諸説あるところであるが、近海におけるかつお一本釣り漁業は江戸時代から行われ、樽漕ぎの和船に15～20人が乗り込み、日帰り～3日間程度の漁を行っていたとされている（戸高ら2014）。また、遠洋におけるかつお一本釣り漁業は明治時代後期頃から行われ、漁場は沿岸域から沖合域へと移り、同時に漁船の大型化が進んだとされている（山田1986）。

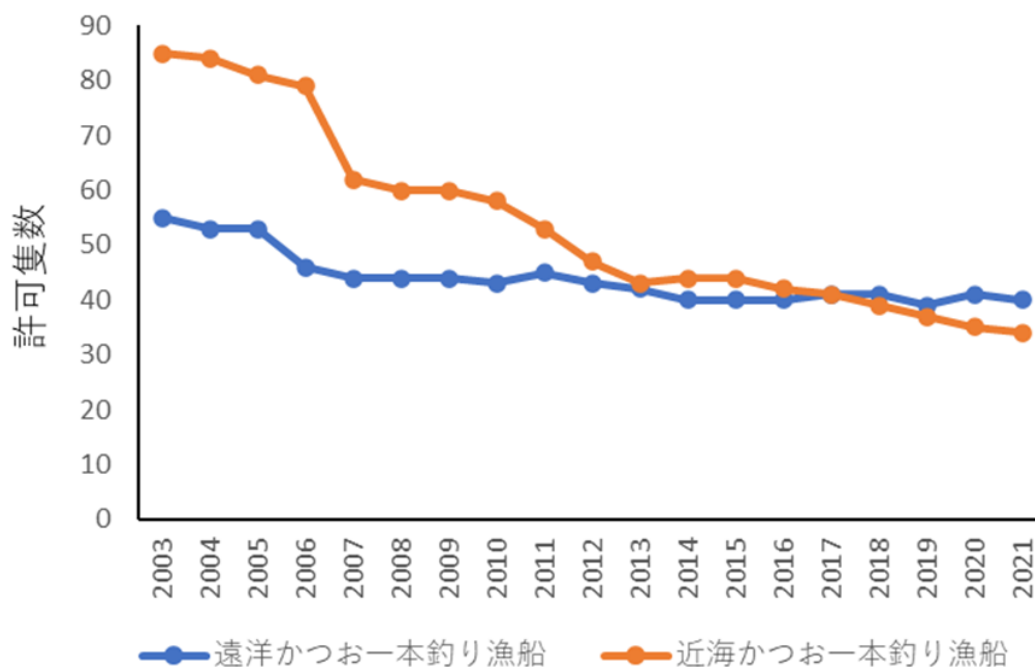
かつお一本釣り漁法は、まず、乗組員全員で双眼鏡を片手に大海原を見つめ、鳥群れや漂流物（流木や流れ藻など）を探るところから始められる。鳥群れや漂流物を探す理由は、鳥群れの下にはカツオの大好物（いわし類等）が泳いでいること、また、漂流物にはモジャコなどの小魚が付いていることが多く、それらを狙ったカツオ・まぐろ類のような大型の魚がつくためである。カツオの魚群が見つかり船を群れに近づけ、餌となるカタクチイワシを海面に蒔き、船の舷側より海面に散水し、カツオをおびき寄せる。散水の効果によってカツオが興奮状態になると、餌のカタクチイワシと海面に垂らした釣り竿の先に着けたシャモと呼ばれる擬餌針との区別がつかなくなり、いとも簡単に釣り上げられる（小田ら2015）。カツオを1本ずつ丁寧に釣り上げる本漁法は、小型魚や対象とする魚種以外の混獲が少なく、資源管理や生態系維持の観点からも評価されている（木村2013）。

このような漁法の特性により、かつお船には多くの乗組員が必要となるが、昨今、乗組員の高齢化と就労者不足が続いており、多くの経営体が若い外国人労働者の力に頼っている。また、カツオの来遊不安定、魚価低迷のほか、燃油代の高騰、活餌不足など、近年の厳しい経営環境から廃業する経営体も多く、かつお船の隻数は減少する傾向にある（Fig. 1-1,2）。



資源エネルギー庁資料より作成

Fig. 1-1. 近年における A 重油価格の変動推移



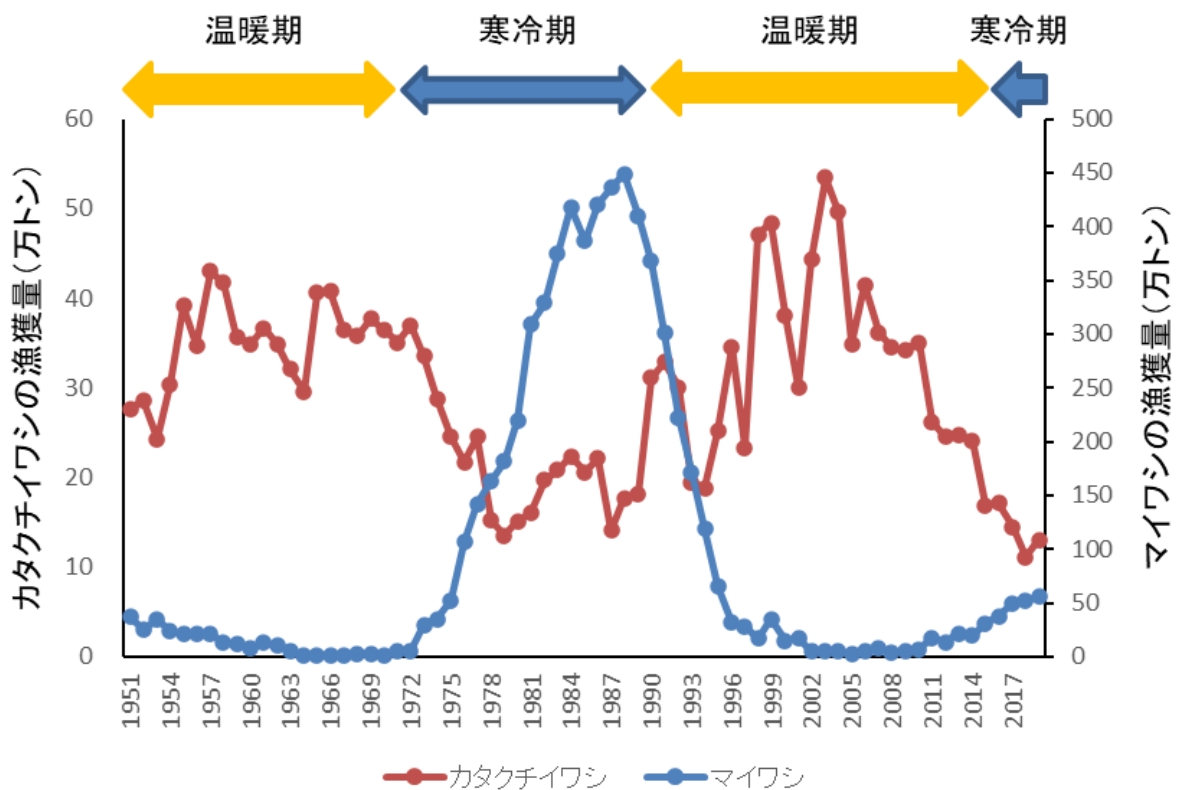
水産庁資源管理部国際課資料より作成

Fig. 1-2. 近年における漁船許可隻数の推移

日本かつお・まぐろ漁業協同組合の調べによれば、実際の遠洋船稼働隻数は2012年以降22~25隻で推移している。

1.3 活餌として必要なカタクチイワシの資源状況

カタクチイワシは、主に船曳網、小型巻き網、定置網で漁獲され、令和2年度の統計および確報によれば国内漁業生産量は14.4万トン、水揚げ金額122億円(@85円/kg)を占める魚種である。カタクチイワシは畳鰯、ちりめん、煮干しなど、いろいろ加工され食卓にあがるほか、刺身として食べられることもある(渡邊ら2017)。また、そのほかの用途として、かつお一本釣り漁業の活餌としても利用されている(益田ら1984)。上述した漁業生産量のうち、約4,000~5,000トンは活餌用として販売されており、水揚げ金額は約40億円(@800円/kg程度)を占める。現在、日本周辺海域では寒冷レジームシフトと呼ばれる現象が起きており(渡邊2012)、国立研究開発法人水産研究・教育機構が公表した2020年度における資源評価結果では、カタクチイワシの資源量が2000年頃をピークに減少する時期に入ったと示している(Fig. 1-3)。寒冷レジームから温暖レジームにシフトする時期はまだ先の予想であり、この先しばらくの間は資源が低迷することが予想されている。かつて、国立研究開発法人水産研究・教育機構開発調査センター(以下、開発調査センターという。)では、カタクチイワシに代わる代替餌の開発としてサバヒー*Chanos chanos*を使ったカツオの釣獲試験を実施している。しかしながら、サバヒーは成長スピードが速く、船内の飼育槽で大きくなること、またそれに伴い遊泳スピードも速くなること、特に下に潜る性質が強いことからカツオを船に寄せづらく、代替餌としての利用は断念されている(野田2005, 伊賀ら2005, 2006-1, 2006-2, 木村ら2008-1, 2008-2, 山下ら2011)。それ以降、カタクチイワシに代わる活餌の候補は無く、かつお一本釣り漁業にとってカタクチイワシは必要不可欠なものであり、いわば生命線である(秋本2004)。



国立研究開発法人水産研究・教育機構資料より作成

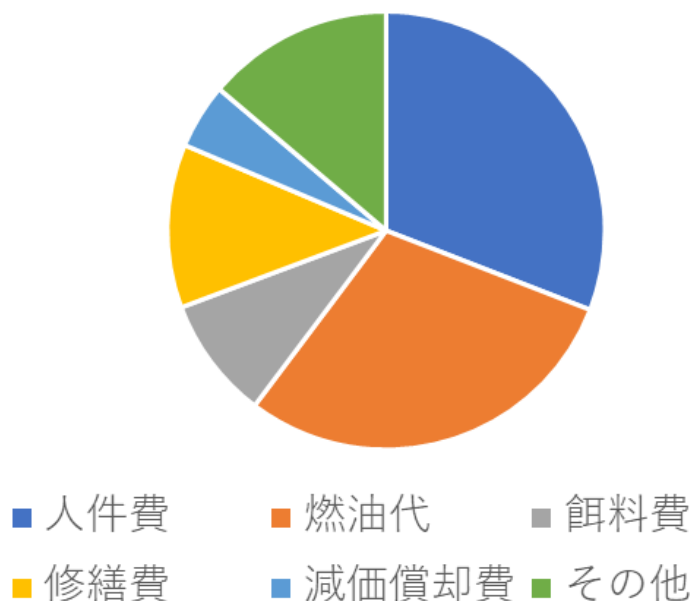
Fig. 1-3. カタクチイワシとマイワシの漁獲量の推移

1.4 かつお一本釣り漁業が抱える課題

上述のとおり、かつお一本釣り漁業では、生きたカタクチイワシが操業に必要なことから、航海前に餌場で1尾約5~7gのカタクチイワシを船に積み込む。生け簀内のカタクチイワシを約1,000尾タモ網ですくい、海水が半分程度入った13L程度のバケツに入れると同時に外に飛び出さないよう蓋をする。その後、乗組員全員でバケツリレーを行い、遠洋船においては1,400杯分、近海船においては140杯分を船内の飼育槽に収容する(秋本2004)。遠洋漁業では、熱帯から温帯海域において長期間操業するため、30°C付近の海水をカタクチイワシの飼育に適した15°Cまで冷却、換水率175%/時にて船上で飼育することから、冷却にかかるコスト(燃油代の増大)が経営を圧迫している(木村ら2009)。遠洋船における全体経費に占める燃油代ほかの割合

を Fig. 1-4 に示す。全体の経費のうち、約 3 割が燃油代である（水産業・漁村活性化推進機構 2020）。2022 年現在では、世界情勢の影響を受け燃油代が再び高騰していることから、その割合はさらに増している。また、近海漁業では、日本周辺の漁場にて操業することから航海日数が短く、飼育水を冷却せず換水率 500%/時で船上飼育が行われており、夏場の海水温が高くなる時期にカタクチイワシが大量死亡することが多くみられる（黒坂ら 2012）。また、カツオの盛漁期になると、活餌用カタクチイワシが餌場において不足しがちになることで、カツオ船が出港出来ず、港での待機を余儀なくされることもしばしば起きている。

以上の様に、遠洋船では飼育水冷却に係る燃油代の負担増大、主に近海船では活餌用カタクチイワシの不足に起因する航海数の減少、すなわち水揚げ金額の低下が起こり、カツオ船の経営に負の影響が生じている。



水産業・漁村活性化推進機構資料より作成

Fig. 1-4. 遠洋かつお一本釣り漁船における支出経費の割合

1.5 本論文の構成

本論文は、かつお一本釣り漁業におけるコスト削減方策のひとつとして、操業に必要な不可欠な活餌であるカタクチイワシの船上、または餌場における効率的な確保方法について、筆者が取り組んだ研究成果をとりまとめたものであり、序論（第1章）に続く第2章から第5章と総合考察（第6章）よりなる。

序論に続く第2章では、カタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性に関する研究を行った。第3章では、カタクチイワシのアンモニア耐性について調査を行い、換水率を下げることによるコストの削減を試みた。第4章では、第2章と第3章で得られた知見を基に50日間にわたる給餌飼育と餓死耐性を調査する無給餌飼育を実施した。第5章では、人工的にカタクチイワシを生産し、そのコストと有効性を検証し、天然カタクチイワシの代替となり得るか調査した。最後の第6章では、本研究で得られた結果を要約して示し、船上における飼育方法を遠洋漁業と近海漁業に分けて考察し、安全に飼育する方法について議論した。また、カタクチイワシの人工生産については養成と養殖の2つの手法について整理し、今後の生産体制の可能性について議論した。

なお、本論文は、第1章、第4章、第5章および第6章を除き、既に学術論文2編 [小田ら 2018 ; Oda et al. 2021] として公表済みである。

1.6 引用文献

戸高大輔・奈須貴芳 (2014) 黒潮の狩人：漁獲量日本一・宮崎県日南市のカツオ漁師。

宮崎日日新聞社。1-160。

芦田拓士 (2013) カツオ。FRANEWS。独立行政法人水産総合研究センター。vol,34。

8-9。

令和2年度漁業・養殖業生産統計 (2021)。農林水産省大臣官房統計部生産流通消費統計課

- 令和 2 年度漁業産出額確報 (2022). 農林水産省大臣官房統計部経営構造統計課
- 令和 3 年度国際漁業資源の現況 (2022) 水産庁・国立研究開発法人水産研究・教育機構
- 山田万樹 (1986) カツオ漁業の歴史:カツオについて一Ⅱ. 碧水. 静岡県水産試験場.
- 35.** 1-3.
- 小田憲太郎・黒坂浩平 (2015) かつお一本釣り漁業.おさかな瓦版. 独立行政法人水産総合研究センター. No65. 2-3.
- 木村拓人 (2013) カツオの漁法. FRANEWS. 独立行政法人水産総合研究センター. vol,34. 12-13.
- 渡邊千夏子・古市生 (2017) イワシ:身近な魚を徹底説明. FRANEWS. 国立研究開発法人水産研究・教育機構. vol,51. 2-15.
- 益田 一・尼岡邦夫・荒賀忠一・上野輝瀬・吉野哲夫 (1984) 日本産魚類大図鑑. 東海大学出版会. 東京. 20.
- 渡邊良朗 (2012) イワシ:意外と知らないほんとの姿. 恒星社厚生閣. 1-111.
- 令和 2 (2020) 年度カタクチイワシ太平洋系群の資源評価 (2021) 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産資源研究所水産資源研究センター
- 野田浩之 (2005) カツオ一本釣り漁業におけるイワシ代替餌料としてのサバヒーについて. 碧水. 静岡県水産試験場. **112.** 1-4.
- 伊加聖・宮崎政宏・伏島一平・廣川純夫 (2005) 平成 15 年度海洋水産資源利用合理化開発事業 (かつお釣:太平洋中・西部海域) 調査報告書. 独立行政法人水産総合研究センター. 神奈川. 36-46.
- 伊加聖・宮崎政宏・伏島一平・廣川純夫 (2006-1) 平成 16 年度海洋水産資源利用合理化開発事業 (かつお釣:太平洋中・西部海域) 調査報告書. 独立行政法人水産総合研究センター. 神奈川. 40-45.
- 伊加聖・阿部周太・伏島一平・廣川純夫 (2006-2) 平成 17 年度海洋水産資源利用合理化開発事業 (かつお釣:太平洋中・西部海域) 調査報告書. 独立行政法人水産総合研究センター. 神奈川. 40-48.

木村拓人・酒井猛・伏島一平・廣川純夫（2008-1）平成 18 年度海洋水産資源利用合理化事業（遠洋かつお釣：太平洋中・西部海域）調査報告書．独立行政法人水産総合研究センター．神奈川．19-32.

木村拓人・橋ヶ谷伊久生・伏島一平・廣川純夫（2008-2）平成 19 年度海洋水産資源利用合理化事業（遠洋かつお釣：太平洋中・西部海域）調査報告書．独立行政法人水産総合研究センター．神奈川．21-54.

山下秀幸・横田耕介・笹尾信（2011）近海かつお一本釣り漁業におけるカタクチイワシ活餌の代用餌としてのサバヒ어의可能性:比較操業試験による漁獲効率の評価．日本水産学会誌．**77(5)**．902-904.

秋本徹（2004）カツオとかつお節の同時代史：ヒトは南へ，モノは北へ．第2章餌屋の世界．コモンズ．215-231.

木村拓人・澤田克彦・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：遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）．独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター．横浜．33-37.

水産業・漁村活性化推進機構（2020）遠洋かつお一本釣り漁業プロジェクト改革計画書（既存船活用（遠洋かつお一本釣りマイルド））．**154**．1-61.

黒坂浩平・山下秀幸・江藤宗義・岡谷喜良・谷口皆人・面地眞吾・松田圭史・廣瀬太郎・小河道生（2012）平成 22 年度海洋水産資源開発事業報告書（システム対応型：近海かつお釣＜南西諸島海域及び九州西方海域＞）．独立行政法人水産総合研究センター．神奈川．57-63.

第2章 飼育下におけるカタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性に関する研究

2.1 はじめに

カタクチイワシ *Engraulis japonicus* は、サハリン・沿海州から日本・韓国・台湾および中国の南部に広く分布し（落合・田中 1986）、我が国周辺では太平洋系群、瀬戸内海系群および対馬暖流系群の3つの系群に分けて評価・管理されている。本種は、旋網、定置網、曳網などで漁獲され、乾物、しらす干しなどで食用されるほか、かつお釣りの活餌としても利用されている（益田ら 1984）。

カタクチイワシを活餌として利用する遠洋かつお一本釣り漁船は、漁場となる熱帯から温帯海域において長期間（40～50日）操業する。活餌は、旋網、定置網で漁獲された後、海上生簀（餌場）で畜養され漁船に販売されている。漁船に積み込んだカタクチイワシは、国内の餌場から漁場に向かう間の水温上昇による活性の減退や死亡が懸念される。そのため、カタクチイワシの船上飼育水としてポンプで取り込まれる海水は、冷却機で約15°Cまで冷却されるのが通例であり、冷却にかかる燃油コストが漁業経営を圧迫している（木村ら 2009）。一方、船上飼育に適切な水温や溶存酸素量についての検討は、十分になされていない。

そこで、本研究では遠洋かつお一本釣り漁業経営の安定化に資するべく、活餌となるカタクチイワシを最小限の燃油コストで、安全に船上飼育するための指標を得る目的で基礎的な2つの試験を行った。試験1ではカタクチイワシの高温側水温耐性を把握し、試験2ではカタクチイワシの水温別低酸素耐性および酸素消費速度を求めた。

2.2 材料および方法

試験1 高温側水温耐性試験

供試魚 試験には、2009年11月に長崎県佐世保湾で捕獲された、平均被鱗体長92.3

± 5.0 mm (平均値±標準偏差), 体重 7.1 ± 1.2 g ($n = 100$) の実際の漁業現場で使われるサイズであるカタクチイワシを用いた。これらのカタクチイワシを活魚車により水産総合研究センター志布志庁舎 (当時) へ輸送後, 自然海水温 (13.8~14.4°C) で準備した 80 kL 八角型コンクリート水槽 (実水量 70 kL) へ収容した。給餌は, 遠洋かつお一本釣り漁船での給餌量と同量とし, 魚体重 1 g あたり 0.006 g の配合飼料 (いわし大漁, 日清丸紅) を毎日 3 回に分けて行った。収容後 20 日以上自然海水温にて飼育し, ハンドリング等による擦れやストレスによる死亡が落ち着いてから試験に供した。

試験区の設定 遠洋かつお一本釣り漁業で使用されているカタクチイワシの飼育水温 15°C (木村ら 2009) を対照区とし, 20°C, 25°C, 30°C および 35°C の合計 5 試験区を設けた。試験には, 200L 黒色ポリエチレン水槽 (実水量 175 L, サミットタンク, サミット樹脂工業株式会社) を用い, 試験区ごとに 2 水槽の繰り返し区を設けた。飼育水として, 13.8~14.4°C の砂ろ過海水を海水電解装置 (送水量 50 kL/時, 殺菌塩素濃度 0.55 ppm, セルフレッシュャーCS80, ヤンマー船用システム株式会社) で処理した滅菌海水を用いた。滅菌海水は, そのまま (新鮮滅菌海水), または, 一旦 2 kL の FRP 水槽へ溜めて 20°C に加温した後に, 水中ポンプ (CSL-100 L, テラダ) を用いてそれぞれの試験水槽へ注水した (Fig. 2-1)。試験開始前日に, 供試魚を遠洋かつお一本釣り漁船で実際に積み込まれている密度 13kg/kL (小田ら 2011) で各試験水槽に 380 尾ずつ収容した。この時の各水槽の水温は 20°C とした。給餌を止めて 1 日の馴致期間を置いた後, 各試験水槽に新鮮滅菌海水または前述の加温滅菌海水を注水し, 0.5°C/時間の速度で降温または加温して各設定水温に調整した。各試験水槽の飼育水温が設定水温に到達した時点を試験開始とし, 120 時間後まで飼育して生残状況を観察した。なお, 試験期間中は無給餌とした。換水率は一般の遠洋かつお一本釣り漁船に準じて 4,200%/日 (木村ら 2009) とし, 各水槽には 500 W ヒーター (パワーセーフプロ 500, NISSO) 1 本を取り付け, 飼育水温を調整した。通気は, エアーストーン (セラミックエアーストーン AS-80, nitto) 1 個を用いて 1.4L/分の強さで行った。日長は, 遠洋かつお一本釣り漁船での飼育方法に準じ, 24 時間連続照明とした。この時の試験水槽

の水面照度は、照度計 (T10Ws, コニカミノルタ) を用いて測定したところ 700~1,900 lx の範囲であった。溶存酸素量 (DO) の測定には蛍光式溶存酸素計 (HQ-30d, HACH) を pH の測定にはベーシック pH 計 (PB-11, ザルトリウス) を使用した。

カタクチイワシの致死状況の把握 試験期間中、毎日 1 時、7 時、13 時および 19 時の 6 時間おきに死亡魚を取り出し計数するとともに、水温、DO、pH の値を記録した。また、24 時間後、48 時間後の高温側半数致死温度は、直線回帰を求めるプロビット法 (Goldstein et al. 1976) により算出した。その際、25°C と 30°C の試験データを用い、温度と死亡率を変数とした。

試験 2 水温別低酸素耐性試験および水温別酸素消費速度の調査

試験区の設定 水温別低酸素耐性試験においては、15°C、20°C、25°C および 30°C の 4 試験区を設けた。供試魚には、80 kL 八角型コンクリート水槽にて 20 日間以上水温 20°C で飼育した試験 1 と同じ由来のカタクチイワシを用い、馴致用の 200 L 黒色ポリエチレン水槽 (ストック水槽) 8 基に 13 kg/kL の密度で一旦収容した。ストック水槽は、移送元の水槽で飼育していた時と同じ水温 20°C に予め調整し、エアーストーン 1 個を用いて 1.4L/分の通気を行うとともに、前述した滅菌海水により 4,200%/日の割合で換水した。ストック水槽 8 基のうち 2 基は 20°C に維持、2 基は試験魚収容直後より 0.5°C/時間の速度で 25°C になるまで加温、2 基は 30°C になるまで加温、さらに 2 基は収容 2 日後から 15°C になるまで 0.5°C/時間の速度で降温した。調温は、新鮮滅菌海水の注水または 500W ヒーター 1 本をそれぞれのストック水槽に取り付けを行った。ストック水槽が設定温度に到達するまでの間は給餌飼育を行い、設定温度に達した後は給餌を止め、その後 24 時間以上馴致させた後に試験魚を試験水槽に移した。

試験水槽には 75L 白色ポリエチレン水槽 (実水量 50 L, ポリタル, スイコー株式会社) を各水温区 2 基ずつ用いて試験を行い、これを 2 回繰り返した。試験開始直前に試験水槽にエアーストーン 1 個を用いて純酸素を通気し、飼育水中の DO を過飽和状態となる 10mg/L 近くまで上昇させた。その直後に、各試験水温に馴致したカタクチイワシを 2 基の試験水槽へそれぞれ 100 尾ずつ速やかに収容した。DO 測定のため蛍

光式溶存酸素計のプローブを水槽底に設置した後、通気も換水も行わず、試験水槽内の水面と空気が接触しないように透明のビニールシートで水面全体を覆った。さらにビニールシートと水槽壁面との間にプローブによる隙間ができないように自作の留め具（外径 8 mm のビニールチューブに太さ 2 mm のステンレスの棒を通し、直径 47 cm のリング状にしたもの）と水槽壁面の間にビニールを挟んで固定した。各水槽には 500 W ヒーター1 本を取り付け、水温調整を行った。DO は蛍光式溶存酸素計を用いて 3 分ごとに計測した。日長は、試験 1 と同じく恒明とし、試験水槽の水面照度は 1,400~1,800 lx の範囲であった。

カタクチイワシの致死状況の把握 試験開始後、土田ら（1997）の方法に従い、目視により 3 分間隔で積算死亡尾数を計数し、時間経過及び DO 低下に伴う生残率を求めた。

酸素消費速度の計算 上記の試験結果をもとに、各水温における試験魚 1 kg あたり、1 時間あたりの酸素消費速度を下記の式より計算した。なお、試験水槽への収容直後は試験魚が狂奔状態にあったため、遊泳行動がほぼ落ちついた試験開始 6 分経過後から、低酸素の影響によって狂奔する個体が出現するまでの時間内の DO データを使用した。

$$X = 60000 (DO_6 - DO_n) V / (n-6) / S_n / W$$

X : 酸素消費速度 (mL/kg/時)

DO_6 : 試験開始より 6 分後の DO (mg/L)

DO_n : 試験開始より n 分後の DO (mg/L)

V : 水量 (L)

S_n : n 分後の生残尾数 (=収容尾数)

W : 平均体重 (kg)

酸素飽和度の計算 試験期間中の気圧は 1 気圧、使用した滅菌海水の塩分濃度 32 の値を用いて Truesdale の式によりその水温 t における酸素飽和度 100% の値 K を求めたのち、下記の式により計算した。

$$K \text{ (mg/L)} = 14.161 - 0.3943t + 0.007714t^2 - 0.0000646t^3 - 32(0.0841 - 0.00256t +$$

0.0000374t²)

その水温における酸素飽和度 (%) = DO (mg/L) /K (mg/L)

2.3 結果

試験 1 高温側水温耐性試験 試験期間中の水温, DO, pH, 試験開始時と終了時の被鱗体長および試験終了時の生残率を Table 2-1 に, 生残率の変化を Fig. 2-2 に示した。

試験期間中 15°C, 20°C および 25°C 区でのカタクチイワシの死亡はほとんど見られず, 試験終了時の生残率は 97%以上を示した。一方, 30°C 区では試験開始直後から死亡する個体が観察され, 66 時間後には全個体が死亡した。さらに, 35°C 区では加温中の 31.5°C までに全個体が死亡した (Fig. 2-2)。

プロビット法により算出した 24 時間後および 48 時間後の高温側半数致死温度の値は, それぞれ 28.5°C, 27.3°C であった。

試験 2 水温別低酸素耐性試験および水温別酸素消費速度の調査 試験期間中の平均水温, 試験開始時の DO, 被鱗体長および体重, 試験終了時の DO および平均経過時間を Table 2-2 に, DO と生残率の変化を Fig. 2-3 に示した。

水温が高い区ほど DO が急速に減少し, 死亡個体の出現までの時間も短くなった。最も水温の低い 15°C 区では比較的ゆるやかに DO が減少し, 試験開始から 81 分後 (DO = 1.12 mg/L, 酸素飽和度 13.9%) には狂奔して死亡する個体が出現し, 107 分後 (DO = 0.72 mg/L, 酸素飽和度 9.0%) には全個体が死亡した。

一方, 最も水温の高い 30°C 区では, 狂奔・死亡個体の出現は 15°C 区の場合のほぼ 3 分の 1 の経過時間にあたる 27 分後 (DO = 1.92 mg/L ; 酸素飽和度 30.9%) であり, 全個体の死亡も 15°C の 2 分の 1 以下の経過時間である 41 分後 (DO = 1.39 mg/L ; 酸素飽和度 22.3%) であった。全試験区を通じ, 狂奔・死亡個体が現れる DO は 1.12 ~ 2.36 mg/L (酸素飽和度 13.9% ~ 35.1%), 全個体が死亡した時の DO は 0.72 ~ 1.39 mg/L (酸素飽和度 9.0% ~ 22.3%) の範囲であり, 水温が高いほど低酸素耐性が低下するこ

とが確認された (Fig. 2-3)。

次に、DO と酸素消費速度の関係を水温別に示した (Fig. 2-4)。試験水槽内の DO が 5 mg/L 以上の範囲では、各試験区の酸素消費速度の平均値に大きな変化は無かった。しかしながら、5 mg/L 未満の範囲では DO の減少とともにその平均値は減少した。

15°C、20°C、25°C および 30°C の試験区におけるカタクチイワシの酸素消費速度を、試験開始 6 分後から低酸素の影響によって狂奔する個体が出現するまでの時間内のデータを使用し計算した結果、それぞれ 396 mL/kg/時、702 mL/kg/時、810 mL/kg/時および 1,092 mL/kg/時であった。

2.4 考察

遠洋かつお一本釣り漁業におけるカタクチイワシの船上飼育水は、冷却コストをかけて 15°C (木村ら 2009) に保持されていることが通例である。しかしながら、日本周辺海域に分布するカタクチイワシは、主に 15~30°C の水温帯に生息する (靄田 2006) とされている。このことより、著者らは船上飼育水温を 15°C より高く設定しても飼育が可能でありコスト削減に繋がるのではないかと考えた。そこでまず、カタクチイワシの生息可能な上限水温を把握することを目的とし、高温側水温耐性試験を行った。

遠洋かつお一本釣り漁船での一航海 (40~50 日) におけるカタクチイワシの斃死率は 13~27% (木村ら 2011) であり、言い換えるならば積み込み総量の 73~87% 程度の生残が必要である。本試験の結果から、カタクチイワシは 25°C の飼育温度で 5 日目でも 98% が生残し、27.3°C では 2 日後に半数が死亡すると推察された。これらのことから、遠洋かつお一本釣り漁業におけるカタクチイワシの飼育温度は 25°C 以下であることが望ましいと言える。また、本試験の 35°C 試験区では加温作業中の 31.5°C の水温で全個体が死亡した。土田 (2002) は 20°C で馴致後のカタクチイワシの高温側死亡温度は 32.7°C と報告している。

水温別低酸素耐性試験では、DO は 1.12~2.36 mg/L (酸素飽和度 13.9~35.1%) で全ての試験区でカタクチイワシが狂奔し始めた。従って輸送時の DO は 2.36 mg/L 以

上に保つ必要があると考えられた。また、試験開始時から試験終了時まで3分間隔で酸素消費速度のデータをみると、飼育水のDOが5 mg/Lの値より少なくなると酸素消費速度が減少する傾向にあった (Fig. 4)。これは、DOの低下あるいはそれに伴う水質の変化によって、カタクチイワシの生理性状が変化したことを示唆している。したがって、5 mg/Lが水槽内のDOの目安になると考えられる。一般的に養殖魚では、健全に生活するために要する最小のDOは、海水の酸素飽和量の50%であると言われている (下茂ら 2004)。本試験の水温範囲における海水の酸素飽和量は約 6.2 mg/L (30°C) ~8.0 mg/L (15°C) (半谷 1964) であり、その50%は約 3.1~4.0 mg/L となる。遠洋かつお一本釣り漁業現場における船上飼育時のDOは、4.7~8.1 mg/L (木村ら 2011) との報告があるが、この値は今回の試験結果および既知の知見からカタクチイワシの適正範囲であることが確認できた。

以上、今回行った2つの試験結果より、現状におけるカタクチイワシの船上飼育時の水温、DOは大きな問題が生じる状況でないと考えられる。一方で、カタクチイワシの高温側水温耐性およびDO耐性が明らかになったことにより、現状よりもさらに高い水温での飼育を行うことで冷却コストを削減できる可能性も示唆された。飼育水温については、20~25°Cの範囲内でカタクチイワシの斃死はほとんど見られないため、現行の飼育水温15°Cから5~10°C上げられる可能性があり、海水冷却に要する燃料費の削減が期待できる。

DOについては、酸素消費速度に変化が見られた5 mg/L以上、酸素飽和度については15°Cなら62.3%、20°Cなら68.4%、25°Cなら74.4%以上を保持することにより、カタクチイワシの大量斃死を防ぐとともに操業の効率低下を抑制できる可能性がある。

以上述べてきたように、今回実施した陸上水槽での試験結果により、高温側水温耐性試験が5日間、水温別低酸素耐性試験が2時間以下という短い期間のものであるものの、遠洋かつお一本釣り漁業のコスト削減が見込まれた。木村ら (2015) によれば、換水率4,200%/日、飼育水温20°Cにて40日間船上で飼育した時のDOは4.6~8.3 mg/Lとの報告がある。この値は、15°C飼育時のDOと大差がないことから換水率を変更す

ることなく飼育水温を 5°C 上げられることを示唆している。実際に漁場水温が 20°C 前後となった際、飼育海水冷却用の冷凍機を停止し、漁場水温で飼育した場合 1 航海あたり約 10 キロリットルの燃油削減が報告されている。一般的な遠洋かつお一本釣り漁船（499 トン型）の年間平均航海数 6.5 航海を乗じると、年間約 65 キロリットルの削減が見込まれている（木村ら 2015）。この値に 2017 年 11 月 A 重油価格約 70 円/L を用い試算すると、船上での飼育水温を 5°C 上げることにより漁船の燃油経費を年間 455 万円程度削減することが期待できた。本研究の結果は、遠洋かつお一本釣り漁業経営の安定化に寄与するものと考えられた。

2.5 引用文献

- 落合 明・田中 克（1986）新版魚類学（下）．恒星社厚生閣．東京．502-503.
- 益田 一・尼岡邦夫・荒賀忠一・上野輝瀾・吉野哲夫（1984）日本産魚類大図鑑．東海大学出版会．東京．20.
- 木村拓人・澤田克彦・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：遠洋かつお釣く太平洋中・西部海域）．独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター．横浜．33-37.
- 小田憲太郎・橋本 博・増田賢嗣・今泉 均・薄 浩則・照屋和久・木村拓人・黒坂浩平・橋ヶ谷伊久生・大島達樹・山下秀幸・伏島一平・小河道生・岡 雅一（2011）カタクチイワシ *Engraulis japonicus* のアンモニア濃度耐性：かつお一本釣り漁業のコスト削減のために．栽培漁業センター技報．**13**．独立行政法人水産総合研究センター．横浜．10-17.
- Goldstein A（1976）生物検定法入門（木村正康・渡辺和夫・木村郁子訳）．南江堂．東京．140-150.
- 土田修二・田端重夫・永井 彰（1997）宮城県万石浦産ニシン幼魚の温度選好と温度耐性．東海大学紀要海洋学部．**43**．117-129.
- 蘆田義成（2006）カタクチイワシの成熟・産卵特性から産卵調査を設計する．水産総

合研究センター研究報告別冊第4号. 43-46.

木村拓人・橋ヶ谷伊久生・澤田克彦・大島達樹・伏島一平（2011）平成21年度海洋水産資源開発事業報告書（資源対応型：遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）.

独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター. 横浜. 29-30.

土田修二（2002）沿岸性魚類の温度選好に関する実験的研究. 海生研研報. 4. 11-66.

下茂 繁・秋本 泰・高浜 洋（2004）海生生物の水質環境耐性について：総説. 海生研研報. 6. 8-16.

半谷高久（1964）溶存酸素ガス測定法：総論（主として飽和溶解量について）. 分析化学 vol.13. 6. 567-572.

木村拓人・上原崇敬・江藤宗義・佐谷守明・大島達樹・伏島一平（2015）平成25年度海洋水産資源開発事業報告書（遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）. 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. 46-47.

Table 2-1. カタクチイワシの水温耐性試験

試験区	試験水槽数 (容量175L)	水温 (°C)	DO (mg/L)	酸素飽和度 (%)	pH	試験開始時			試験終了時(5日後)		
						収容尾数 (尾)	平均被鱗体長 (n=50) (mm)	平均体重 (n=50) (g)	平均被鱗体長 (n=30) (mm)	平均体重 (n=30) (g)	平均生残率 (%)
15°C区	2基	15.4±0.6	6.86±0.48	76.3~99.3	8.15±0.02	380	92.3±5.0	7.1±1.2	92.4±5.9 ^a	6.8±1.3 ^A	99.3±0.5
20°C区	2基	20.5±0.3	6.29±0.36	78.0~96.4	8.10±0.02	380	92.3±5.0	7.1±1.2	93.2±5.2 ^a	7.0±1.2 ^A	97.6±1.3
25°C区	2基	25.2±0.3	5.77±0.22	80.2~92.6	8.07±0.02	380	92.3±5.0	7.1±1.2	92.8±5.3 ^a	6.7±1.1 ^A	98.3±0.6
30°C区	2基	30.1±0.3	5.78±0.95	62.7~107	8.08±0.15	380	92.3±5.0	7.1±1.2	-	-	0*
35°C区	2基	-	-	-	-	380	92.3±5.0	7.1±1.2	-	-	0**

* 飼育開始後66時間後に全滅

** 水温上昇中に全滅

同一アールファベット間において有意差無しを示す $p > 0.05$

Table 2-2. カタクチイワシの水温別貧酸素耐性試験

試験区	試験水槽数 (容量50L)	平均水温 (°C)	収容尾数 (尾)	試験開始時			狂奔固体出現時			試験終了時(全滅時)		
				DO (mg/L)	酸素飽和度 (%)	平均被鱗体長 (n=100) (mm)	平均体重 (n=100) (g)	DO (mg/L)	酸素飽和度 (%)	DO (mg/L)	酸素飽和度 (%)	平均経過時間 (分)
15°C-1区	2基	14.9±0.2	100	10.08±0.11	126	93.0±5.8	8.0±1.4	1.12	13.9	0.72±0.01	9.00	102.0±4.2
15°C-2区	2基	14.8±0.2	100	10.43±0.03	130	92.7±5.9	7.8±1.5	1.25	15.6	0.72±0.00	9.00	112.5±6.4
20°C-1区	2基	20.4±0.2	100	10.28±0.26	141	90.9±6.8	7.4±1.7	1.54	21.1	0.89±0.06	12.2	73.5±2.1
20°C-2区	2基	20.7±0.1	100	10.25±0.23	140	91.7±6.5	7.5±1.6	1.76	24.1	0.86±0.02	11.8	76.5±6.4
25°C-1区	2基	24.7±0.2	100	10.58±0.11	157	91.4±6.7	7.1±1.6	1.76	26.2	0.92±0.03	13.7	55.5±2.1
25°C-2区	2基	25.1±0.1	100	10.32±0.18	154	89.7±7.2	6.8±1.6	2.36	35.1	1.00±0.04	14.9	64.5±2.1
30°C-1区	2基	30.1±0.8	100	10.42±0.11	168	90.8±6.5	7.4±1.5	1.92	30.9	1.39±0.04	22.3	37.5±2.1
30°C-2区	2基	30.0±0.5	100	10.65±0.04	171	90.3±6.2	7.1±1.5	2.02	32.5	1.35±0.00	21.7	43.5±2.1

1区は1回目試験, 2区は2回目試験を指す

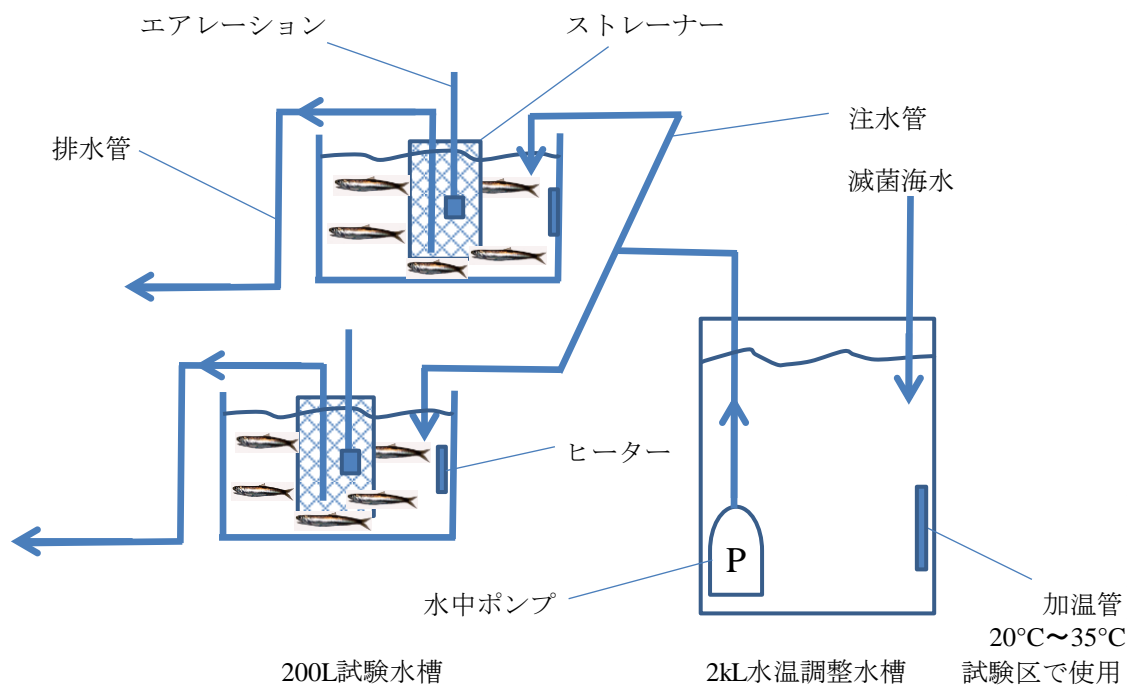


Fig. 2-1. 水温調整水槽から試験水槽への配管図

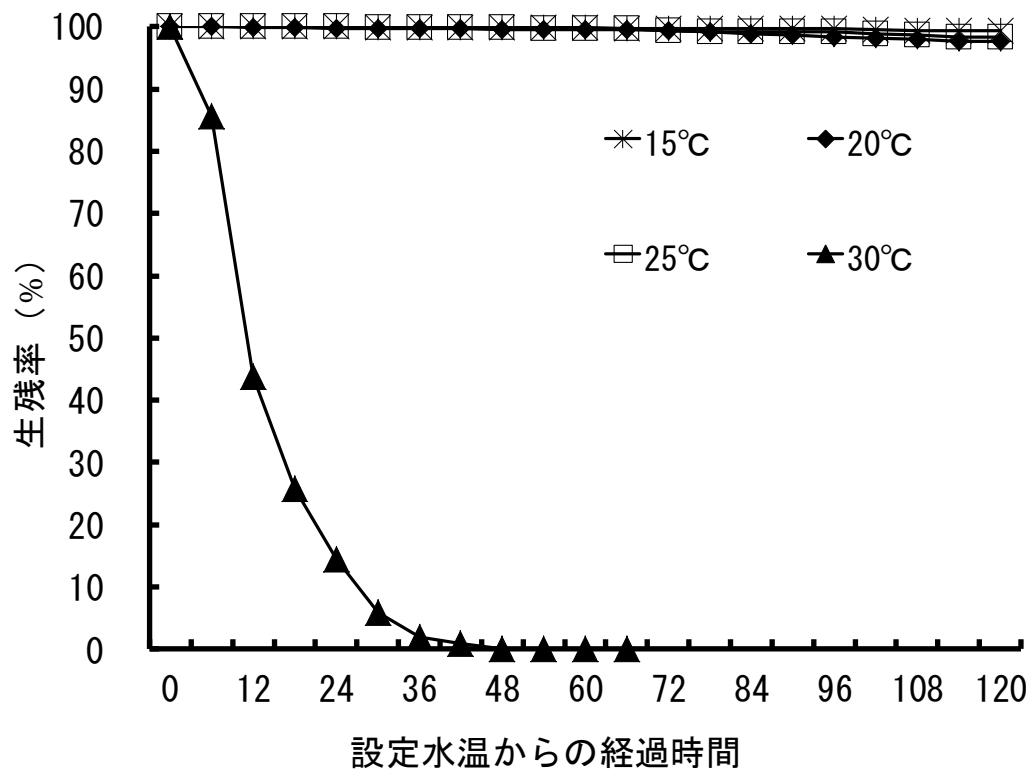


Fig. 2-2. カタクチイワシの水温別経過時間生残率

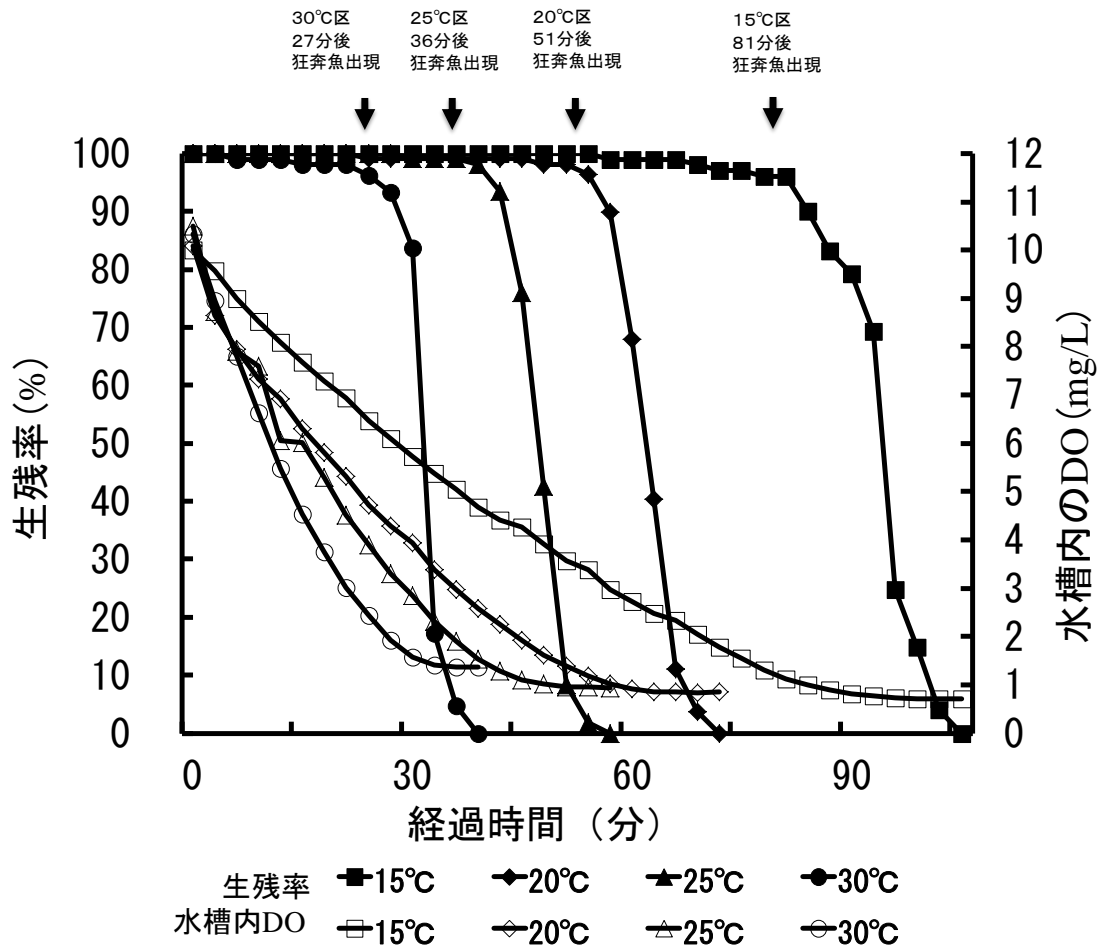


Fig. 2-3. 水温の違いによるカタクチイワシの生残率と水槽内 DO との関係

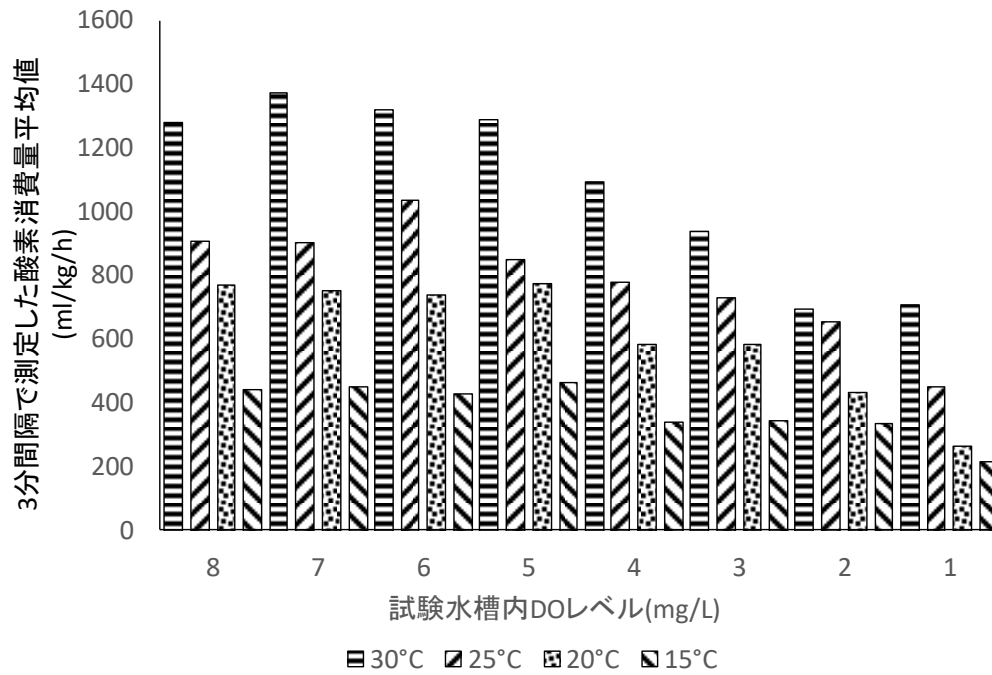


Fig. 2-4. カタクチイワシの水溫別酸素消費速度と DO の関係

DO レベルは中央値を示している

例として, 4 なら 3.5 以上 4.5 未満を意味する

第3章 カタクチイワシのアンモニア耐性-かつお一本釣り漁業におけるコスト削減のために-

Ammonia tolerance of Japanese anchovy *Engraulis japonicus*: Implications for cost reduction in a skipjack pole-and-line fishery

3.1 Introduction

In Japan's pelagic and inshore skipjack pole-and-line fishery (SPLF), the Japanese anchovy *Engraulis japonicus* is transported live to fishing grounds by fishing boats equipped with holding tanks for use as a live bait (Yamashita et al. 2011). For pelagic SPLF boats operating in tropical seas, transportation of live Japanese anchovies by fishing boats can take up to 50 days, while for vessels working inshore this transportation can take as little as 4 days.

In the pelagic SPLF, to maintain healthy Japanese anchovies aboard vessels, fishers empirically reduce the high temperature (~30°C) of ambient seawater to 15°C using a cooling system and exchange water in tanks by a flow-to-waste system at a rate $\geq 160\%$ volume h^{-1} (Kimura et al. 2012). This cooling of water is costly; with depressed fish and soaring fuel prices, reducing costs is increasingly important to ensure the continued viability of the pelagic SPLF.

For inshore boats the water in tanks containing Japanese anchovies is not cooled, and water quality is maintained by a flow-to-waste system at 500% of its volume h^{-1} (Kurosaka et al. 2012). However, during summer when seawater temperatures can exceed 29°C, mass death of Japanese anchovies often occurs in holding tanks.

In the SPLF, therefore, for efficient and cost-effective transportation of Japanese anchovies to fishing grounds, knowledge of their upper temperature limits and lower water exchange rates is essential to ensure their viability in transit.

The upper thermal tolerance of Japanese anchovies was reported by Oda et al. (2018) after exposing fish to 15, 20, 25, 30, and 35°C for 120 h. Anchovy survival was high (> 98%) at

temperatures ranging 15–25°C, but all fish died at temperatures $\geq 30^\circ\text{C}$. Accordingly, holding tank water temperature during transfer of Japanese anchovies to pelagic and tropical fishing grounds could be increased from the current 15°C to 25°C, but it would be necessary to control temperatures below lethal limits during summer for the inshore fishery.

Fish generally excrete ammonia as a principal waste product, and they are very sensitive to ammonia toxicity (Handy and Poxton 1993; Wang and Walsh 2000; Ip et al. 2001). Therefore, high ammonia concentrations might negatively affect survival of Japanese anchovies during transportation, if fish are being fed, and in instances where water exchange was limited. An understanding of ammonia tolerance limits of Japanese anchovies would enable appropriate water exchange rates when transporting them aboard SPLF boats to be determined. Despite this, no study of which we are aware has reported the ammonia tolerance of Japanese anchovy.

To improve transportation methods of Japanese anchovies and SPLF cost efficiency, we conducted experiments that 1) evaluated the ammonia tolerance ability of Japanese anchovy; and 2) examined the effects of stocking density and water exchange rate, and 3) water exchange frequency on survival of Japanese anchovies.

3.2 Materials and Methods

Experimental fish

Japanese anchovies were captured with purse seine fishing or fixed shore net fishing along the west coast of Nagasaki Prefecture, Japan, for use in the SPLF in November 2009 (for experiment 1) and in February 2010 (for experiments 2 and 3). Fish were then transported live by truck to the Shibushi Field Station laboratory, FRA, Kagoshima Prefecture, Japan, and stocked in an 80-kl concrete tank (70 kl seawater volume) with flow-through water (exchange rate 12.5% volume h^{-1} , temperature 14–22°C, salinity 32 PSU), and cultured with formulated feed pellet (Iwashitairyō; Marubeni Nisshin Feed Co., Ltd., Tokyo, Japan) daily at a ratio of

0.6% of fish body weight (employed in the SPLF). Feeding ceased the day before and during each experiment.

Experiment 1: evaluating anchovy ammonia tolerance

To determine the ammonia tolerance of Japanese anchovies under the current temperature regime of the pelagic SPLF (15°C) and upper safe temperature (25°C) for culturing Japanese anchovies (Oda et al. 2018), we exposed test fish to seawater with total ammonia nitrogen (TAN) at concentrations of 40, 80, 120 and 160 mg l⁻¹ at 15°C, and 10, 20, 40 and 80 mg l⁻¹ at 25°C. We prepared the sump tanks of 2 kl volume with seawater containing concentrations of TAN, adjusted using ammonium chloride (NH₄Cl; Nacalai Tesque Inc., Kyoto, Japan). A control sump tank in which no ammonium chloride was added was also prepared. We used two 200-l black polyethylene tanks (actual water volume, 175 l) for each treatment. Seawater was supplied to experimental tanks from sump tanks using small pumps at an exchange rate of 20.8% volume h⁻¹. Tanks were aerated using airstones.

Ammonia tolerance experiments were conducted on December 14, 2009 at 25°C and from February 3, 2010 at 15°C, for 48 h. Tests were run under conditions of constant light (700–1900 lx) used in the pelagic SPLF. Average anchovy body size was 95.4 ± 4.9 mm total length (TL) and 5.2 ± 1.0 g body weight (BW) (mean ± standard deviation, N = 30) for experiments at 25°C, and 104.6 ± 8.1 mm TL and 7.3 ± 1.6 g BW for experiments at 15°C (a body size comparable to that of bait fish used in the SPLF). Water temperature was controlled by heater. The stoking density of fish in each test tank was ~13 kg fish kl⁻¹ used in the pelagic SPLF (~400 individuals at 25°C and ~320 individuals at 15°C). To acclimate for 3 days prior to commencing experiments, we stocked fish into test tanks and roughly counted their number in a short time (to minimize stress on test animals). Japanese anchovies were observed every 3 h during experiments; dead fish were counted and removed. On completion of experiments, the final numbers of surviving fish were counted; the initial numbers of stocked fish in test tanks was determined as 384–417 at 25°C, and 297–342 at 15°C.

To determine TAN concentrations, 50 ml samples of seawater were collected from each tank every 3 h and stored at -80°C . Temperature was measured using a stem thermometer, dissolved oxygen (DO) and pH was determined using DO (HQ-30d; Hach Company, Loveland, CO) and pH (PB-11; Sartorius Japan, Tokyo, Japan) meters, respectively. On completion of the experiment, frozen seawater samples were thawed, centrifuged at 5000 rpm for 10 min, and filtered with a syringe filter (Minisart-plus; Sartorius Japan) with $0.2\ \mu\text{m}$ pore size attached to a 5-ml syringe to remove extraneous material. TAN concentrations were measured using a salicylate method (Reardon et al. 1966) by spectrophotometer (DR2010; Hach Company). TAN is present in seawater as unionized ammonia (NH_3) and ionized ammonium (NH_4^+); environmental pH, temperature, and salinity affect the equilibrium of NH_3 and NH_4^+ , and ammonia toxicity is particularly related to NH_3 concentration (Handy and Poxton 1993; Wang and Walsh 2000; Ip et al. 2001). The concentration of highly toxic un-ionized ammonia nitrogen (UIAN) was calculated from the TAN concentration, pH and temperature at 32 PSU salinity according to Kido et al. (1991) based on reports of Whitfield (1974) and Bower and Bidwell (1978) by: $X(\%) = 100 / (1 + \text{antilog}(9.35 + 0.0324(298 - T) - \text{pH}))$, where X is the percentage of UIAN to TAN, and T the temperature ($^{\circ}\text{K}$). Oxygen saturation (%) in test water was also calculated based on the saturated DO concentrations (100%) in seawater (32 PSU) at designated temperatures following Truesdale et al. (1955) as: $K(\text{mg l}^{-1}) = 14.161 - 0.3943T + 0.0007714T^2 - 0.0000646T^3 - 32(0.0841 - 0.00256T + 0.0000374T^2)$, where K is the saturated DO concentration, and T the temperature ($^{\circ}\text{C}$).

Ammonia tolerance of Japanese anchovy was evaluated by median lethal concentration (MLC) as the UIAN concentration at which 50% of test fish died after 24 h or 48 h from the onset of experimentation. MLC values were estimated by applying a generalized linear model (GLM) with a binomial distribution using the *glm* function (quasibinomial family, logit link) in R statistical software version 4.0.2 (R Core Team 2020). In the GLM, the number of live or dead fish after 24 or 48 h was the two-vector response variable; the mean value of the UIAN concentration until 24 or 48 h was the explanatory variable. MLC values with 95%

confidence intervals were estimated based on GLM results using the *invest* function implemented in the *investr* package (Greenwell and Schubert Kabban 2014) in R.

Experiment 2: effects of stocking density and water exchange rate on anchovy survival

Our three treatments were: 1) high stocking density (~ 49 kg fish kl^{-1}) with water exchange at 500% volume h^{-1} (control), 2) high stocking density (~ 49 kg fish kl^{-1}) without water exchange, and 3) low stocking density (~ 24.5 kg fish kl^{-1}) without water exchange. Treatment 1 represented standard inshore SPLF conditions.

We used two 200-l black polyethylene tanks (actual water volume 100 l) in each treatment. Fish of 112.7 ± 6.5 mm TL and 7.8 ± 2.0 g BW were stocked 2 days before initiating an experiment for acclimation to tank environments. Pure oxygen was provided to tank water by airstone, as is sometimes performed on inshore SPLF boats during summer. The experiment commenced on April 29, 2010 for 96 h at 25°C under constant illumination. Dead fish were counted and removed every 6 h; the initial number of fish stocked in low-density tanks was 333–335 individuals, and in high-density tanks, 649–655 individuals. TAN concentration was measured, and UAN concentration was estimated every 6 h as in experiment 1.

Experiment 3: effect of water exchange method on anchovy survival

Of two treatments, the first, the control, had tank water continuously exchanged at a rate of 500% volume h^{-1} (as operated on inshore SPLF boats). Treatment 2 had one third of the tank water exchanged with the same volume of fresh seawater every 12 h. Fish of 112.9 ± 4.0 mm TL and 8.3 ± 1.6 g BW were stocked in tanks at ~ 49 kg fish kl^{-1} ; the experiment was conducted from May 8, 2010. The initial number of stocked fish in replicate tanks in the two treatments ranged 511–535; methodology is otherwise as in experiment 2.

3.3 Results

Experiment 1: evaluating anchovy ammonia tolerance

Water tank environmental parameters are presented in supplementary Tables 3-S1 and 3-S2. TAN concentrations were higher than designated concentrations in some tanks, but differentiation of TAN concentrations could be maintained between treatments.

At 15°C most Japanese anchovies survived in the control and 40 mg l⁻¹ treatments, with mean survival rates after 48 h 99.8% and 99.4%, respectively (Fig. 3-1A). In the 80, 120 and 160 ppm treatments, fish mortality increased sharply as TAN concentration increased, with mean survival rates after 48 h being 82.6% in the 80 mg l⁻¹ treatment, 12.9% in the 120 mg l⁻¹ treatment, and 0% after 33 or 36 h in the 160 mg l⁻¹ treatment. DO and oxygen saturation tended to decrease with increased TAN concentration, particularly early in experimentation (Table 3-S1). Oxygen saturation varied from ~38–76%. The 24 h and 48 h MLC values (+ 95% confidence intervals) of UIAN were estimated as 0.770 (0.751–0.790) mg l⁻¹ and 0.706 (0.661–0.750) mg l⁻¹, respectively, based on GLM analysis (Fig. 3-2A; Table 3-1).

At 25°C high fish mortality occurred in one control tank when aeration was (accidentally) not provided; results for this tank have been excluded from analysis. The survival rate of control and 10 mg l⁻¹ treatment fish reached about 94% (Fig. 3-1B). In the 20 mg l⁻¹ and 40 mg l⁻¹ treatments fish mortality varied between replicate tanks, the number of dead fish increased with time, and the mean survival rate after 48 h was 74.8% and 26.8%, respectively. In the 80 mg l⁻¹ treatment, the decrease in survival rate was pronounced, with 100% mortality after 12 or 30 h. DO and oxygen saturation tended to fluctuate as it did at 15°C (Table 3-S2). Oxygen saturation varied from ~51%–112%. The UIAN 24 h and 48 h MLC values (+ 95% confidence intervals) were estimated as 0.634 (0.466–0.802) mg l⁻¹ and 0.450 (0.379–0.521) mg l⁻¹, respectively, based on GLM analysis (Fig. 3-2B; Table 3-1).

Experiment 2: effects of stocking density and water exchange rate on anchovy survival

No significant decrease in survival rates of Japanese anchovies was observed in the control treatment at high stocking density with a water exchange; mean survival rate after 96 h was 87.5% (Fig. 3-3A). Mean survival rate in the high- and low-density treatments without a water exchange decreased sharply after 30 h and 54 h, with 100% mortality by 54 h and 96 h, respectively.

The UIAN concentration in the control treatment remained at about 0.01 mg l^{-1} but increased in high- and low-density treatments, exceeding 0.4 mg l^{-1} after 36 h and 48 h in the high- and low-density treatments, respectively (Fig. 3-3B; Table 3-S3), at which point survival rate declined sharply (Fig. 3-3A); a substantial increase in the UIAN concentration was observed in the high-density treatment (Fig. 3-3B). DO was supersaturated during experimentation (Table 3-S3).

Experiment 3: effect of water exchange method on anchovy survival

Survival of Japanese anchovies with an intermittent (test) and continuous (control) water exchange gradually differed from 12 h; the mean survival rate after 96 h was 71.5% in the control treatment and 50.8% in the test treatment, with survival rate variable in the test treatment (tank 1 43.8%, tank 2 57.7%) (Fig. 3-4A). The UIAN concentration in the control group was less than 0.01 mg l^{-1} during experimentation, but in the test group reached $\sim 0.3 \text{ mg l}^{-1}$ by 36 h, then fluctuated between ~ 0.21 and 0.35 mg l^{-1} (Fig. 3-4B; Table 3-S4). DO was supersaturated during experimentation (Table 3-S4).

3.4 Discussion

In experiment 1, we determined the acute toxicity of UIAN to Japanese anchovies of 5-7 g BW, and estimated 24 h and 48 h MLC values (+ 95% confidence intervals) at 15°C to be 0.770 (0.751 – 0.790) mg l^{-1} and 0.706 (0.661 – 0.750) mg l^{-1} , and at 25°C , 0.634 (0.466 – 0.802)

mg l⁻¹ and 0.450 (0.379–0.521) mg l⁻¹, respectively. Ammonia toxicity has been reported for several marine fish species, e.g., 96 h MLC values of UIAN between 1.7 and 2.6 mg l⁻¹ for seabass *Dicentrarchus labrax*, seabream *Sparus aurata* and turbot *Scophthalmus maximus* juveniles of 6–163 g BW under optimal environmental conditions (17–18°C, 34 PSU, and > 75% oxygen saturation) (Person-Le Ruyet et al. 1995). Person-Le Ruyet et al. (1995) also calculated 6 h, 12 h, 24 h, and 48 h MLC values of UIAN for these fish juveniles and documented that the MLC values did not change significantly from 24 to 96-h exposure and were not related to fish size. Thus, ammonia tolerance ability appeared to be lower in Japanese anchovies than in juveniles of seabass, seabream and turbot.

In experiment 1, DO and oxygen saturation tended to decrease with increasing ammonia concentration, possibly because of increased oxygen consumption by fish affected by elevated ammonia concentration (Lemarié et al. 2004). Because the toxicity of ammonia to fish increases with decreasing oxygen (Wajsbrodt et al. 1991), it should be noted that our MLC estimates are based on the survival of Japanese anchovies that may have been synergistically affected by increased ammonia concentration and decreased oxygen (minimum saturation 38% at 15°C and 51% at 25°C). Further study is required to determine the ammonia toxicity level for Japanese anchovies under non-oxygen limited conditions with pure oxygen supply as employed in experiments 2 and 3.

In the pelagic SPLF, to maintain healthy Japanese anchovies, fishers empirically reduce holding tank water to 15°C and have a high water-exchange rate ($\geq 160\%$ volume h⁻¹) (Kimura et al. 2012). The UIAN concentration of water containing Japanese anchovies aboard pelagic SPLF boats was ≤ 0.011 mg l⁻¹ (Kimura et al. unpublished data), which is much lower than our estimated 24 h and 48 h MLC values for UIAN for Japanese anchovies at 15°C. The mean UIAN concentration of 0.34–0.36 mg l⁻¹ at 15°C in the TAN 40 mg l⁻¹ treatment with oxygen saturation of ~70% (Table 3-S1) had a survival rate exceeding 99% over 48 h (Fig. 3-1). Consequently, aboard pelagic vessels, the water in tanks holding Japanese anchovies might be being replaced more often than is necessary given anchovy ammonia tolerance.

In experiment 2, mortality of Japanese anchovies was density dependent at 25°C when held without a water exchange. Mortality was highly associated with increased UIAN concentration in tank water because severe fish mortality occurred at UIAN concentrations exceeding 0.4 mg l⁻¹ (Fig. 3-3), equivalent to 48 h MLC of Japanese anchovies at 25°C. Thus, UIAN concentration manifested lethal effects on Japanese anchovies at similar levels in different oxygen saturation conditions in experiments 1 (limited) and 2 (saturated). In experiments 2 and 3 at 25°C, the UIAN concentration in control treatments (standard protocols aboard inshore vessels: water exchange rate 500% volume h⁻¹) was very low (\leq 0.01 mg l⁻¹) and survival rate of test fish was relatively high (88% in experiment 2, and 72% in experiment 3) at 96 h (Figs. 3-3 and 3-4). In experiment 3, in the test group, the UIAN concentration did not reach MLC, and was maintained at around 0.3 mg l⁻¹ by means of intermittent renewal of holding tank water (Fig. 3-4). This water exchange frequency maintained the mean survival rate of test fish at 51%, which is 71% the survival rate (72%) of the control treatment. The upper UIAN concentration to keep Japanese anchovies healthy may be ~0.1 mg l⁻¹, as recorded during the experiment until 12 h before the anchovy survival rate tended to separate in control and test treatments (Fig. 3-4; Table 3-S4).

We reveal that exchanging water of or below 25°C to reduce the UIAN below chronic toxicity levels is necessary for efficient and cost-effective transfer of Japanese anchovies from port to fishing grounds in the SPLF. For pelagic SPLF, the fuels costs would be reduced by decreasing water exchange rates to control the UIAN concentration below the upper safe level (~0.1 mg l⁻¹) under the upper safe temperature condition (25°C) in transit. For inshore SPLF which require relatively short voyages to transport Japanese anchovies to fishing grounds, to reduce costs of cooling system installation, seawater ice could be used to cool anchovy water to or below 25°C before departing port; then, a second stock tank could be prepared with seawater ice to maintain temperature and UIAN concentration below the upper safe level (~0.1 mg l⁻¹) by means of intermittent renewal of holding tank water in transit.

Further study is required to determine appropriate and practical water exchange rates and

methodologies for commercial application, in addition to a trial aboard a commercial vessel to verify if costs can be reduced by the methodology that we advocate herein for the pelagic and inshore SPLF.

3.5 References

- Bower, C. E., Bidwell, J. P. (1978). Ionization of ammonia in seawater: Effects of temperature, pH, and salinity. *J. Fish Res. Board Canada* 35: 1012–1016.
- Greenwell, B. M., Schubert Kabban, C. M. 2014. *investr*: An R package for inverse estimation. *R J.* 6(1): 90–100.
- Handy, R. D., Poxton, M. G. (1993). Nitrogen pollution in mariculture: Toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish. *Rev. Fish Biol. Fish.* 3: 205–241.
- Ip, Y. K., Chew, S. F., Randall, D. J. (2001). Ammonia toxicity, tolerance, and excretion. *Fish Physiology* 20: 109–148.
- Kido, K., Watanabe, Y., Nakamura, Y., Okamura, T. (1991). Effect of ammonia on the survival of red sea bream, *Pagrus major* eggs and larvae. *Aquacult. Sci.* 39: 353–362.
- Kimura, T., Hashigaya, I., Oshima, T., Fusejima, I. (2012). Annual Reports of the Marine Fisheries Resource Exploitation: Pelagic Skipjack Pole-and-Line Fishery in the Central and Western Pacific. Marine Fisheries Research and Development Center, Japan Fisheries Research and Education Agency, Yokohama (in Japanese).
- Kurosaka, K., Yamashita, H., Eto, M., Okaya, K., Taniguchi, M., Omoji, S., Matsuda, K., Ogawa, M. (2012). Annual Reports of the Marine Fisheries Resource Exploitation: Inshore Skipjack Pole-and-Line Fishery in the Nansei Island Water and Western Kyushu Water. Marine Fisheries Research and Development Center, Japan Fisheries Research and Education Agency, Yokohama (in Japanese).
- Lemarié, G., Dosdat, A., Covès, D., Dutto, G., Gasset, E., Person-Le Ruyet, J. (2004). Effect of chronic ammonia exposure on growth of European seabass (*Dicentrarchus labrax*)

- juveniles. *Aquaculture* 229: 479–491.
- Oda, K., Hashimoto, H., Masuda, Y., Imaizumi, H., Usuki, H., Teruya, K. (2018). Resistance of Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, in captivity to high water temperature and hypoxia. *J. Fish. Tech.* 10: 1–7 (in Japanese with English abstract).
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>(accessed 22 June 2020).
- Person-Le Ruyet, Chartois, H., Quemener, L. (1995). Comparative acute ammonia toxicity in marine fish and plasma ammonia response. *Aquaculture* 136: 181–194.
- Truesdale, G. A., Downing, A. L., Lowden, G. F. (1955). The solubility of oxygen in pure water and sea-water. *J. Appl. Chem.* 2: 53–62.
- Wang, Y., Walsh, P. J. (2000). High ammonia tolerance in fishes of the family Batrachoididae (toadfish and midshipmen). *Aquat. Toxicol.* 50: 205–219.
- Wajsbrodt, N., Gasith, A., Krom, M. D., Popper, D. M. (1991). Acute toxicity of ammonia to juvenile gilthead seabream *Sparus aurata* under reduced oxygen levels. *Aquaculture* 92: 277–288.
- Whitfield, M. (1974). The hydrolysis of ammonium ions in sea water—a theoretical study. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.* 54: 565–580.
- Yamashita, H., Yokota, K., Sasao, S. (2011). Potential of milkfish as live bait in a skipjack pole and line fishery: Evaluation of catch efficiency in comparative operations. *Nippon Suisan Gakkaishi* 77: 902–904.

Table 3-1. Coefficient estimates with standard errors (SE) in the generalized linear model with a binomial distribution for evaluating relationships between un-ionized ammonia nitrogen concentration (Doses) and survival of Japanese anchovies, experiment 1.

Experimental temperature (°C)	Time	Coefficient	Estimate	SE	t value	p value
15	24 h	Intercept	9.07	0.73	12.35	< 0.0001
		Doses	-11.78	0.97	-12.16	< 0.0001
	48 h	Intercept	7.18	0.78	9.2	< 0.0001
		Doses	-10.17	1.14	-8.95	< 0.0001
25	24 h	Intercept	3.27	0.57	5.72	0.000717
		Doses	-5.15	1.27	-4.06	0.004803
	48 h	Intercept	3.73	0.64	5.83	0.000641
		Doses	-8.29	1.55	-5.34	0.001079

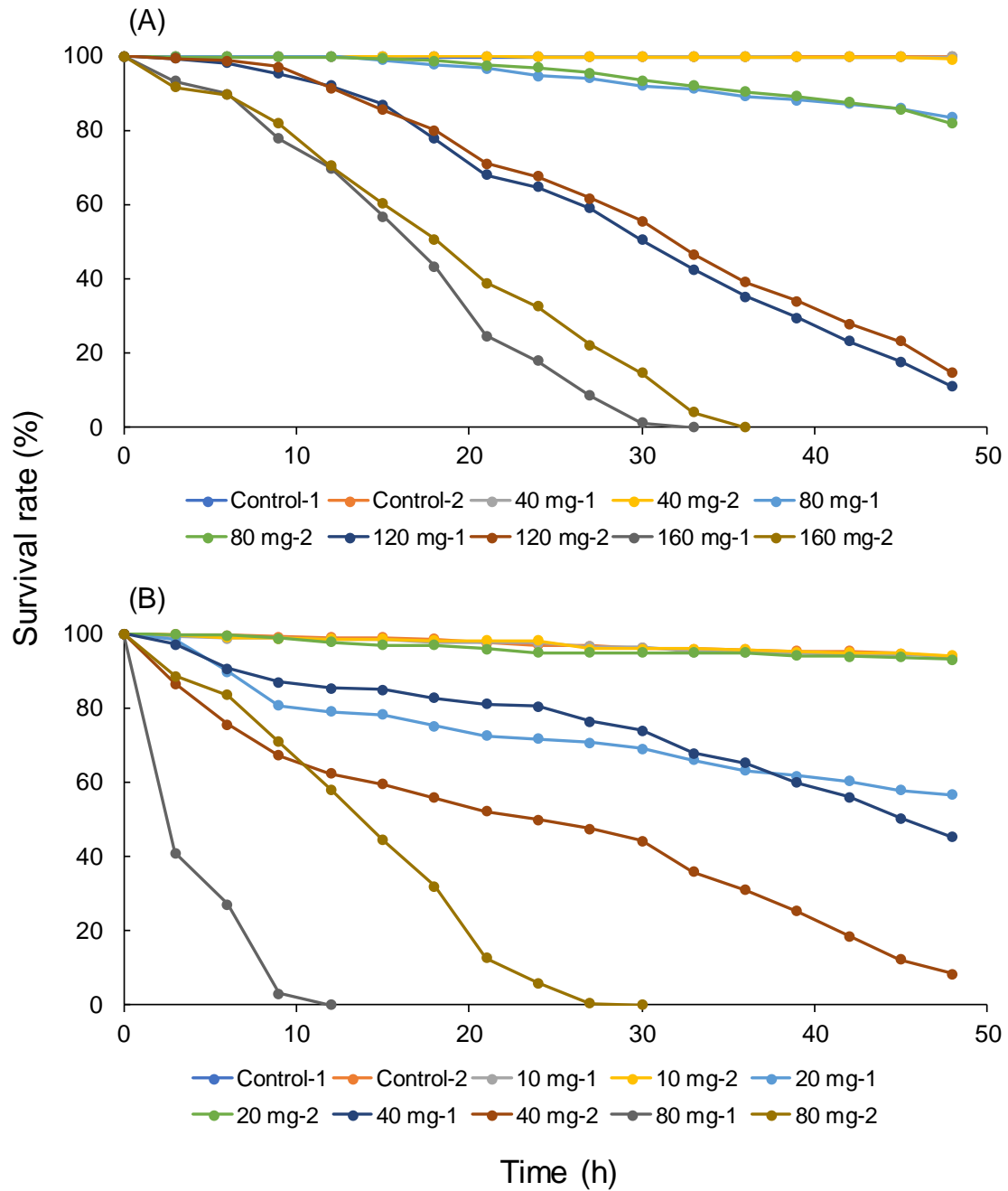


Fig. 3-1. Survival rate of Japanese anchovies exposed to seawater with different total ammonia nitrogen concentrations at 15°C (A) and 25°C (B), experiment 1 (with two replicate tanks per treatment). Ammonia concentration controlled at 10–160 mg l⁻¹ by adding NH₄Cl to water (the control tank received no NH₄Cl).

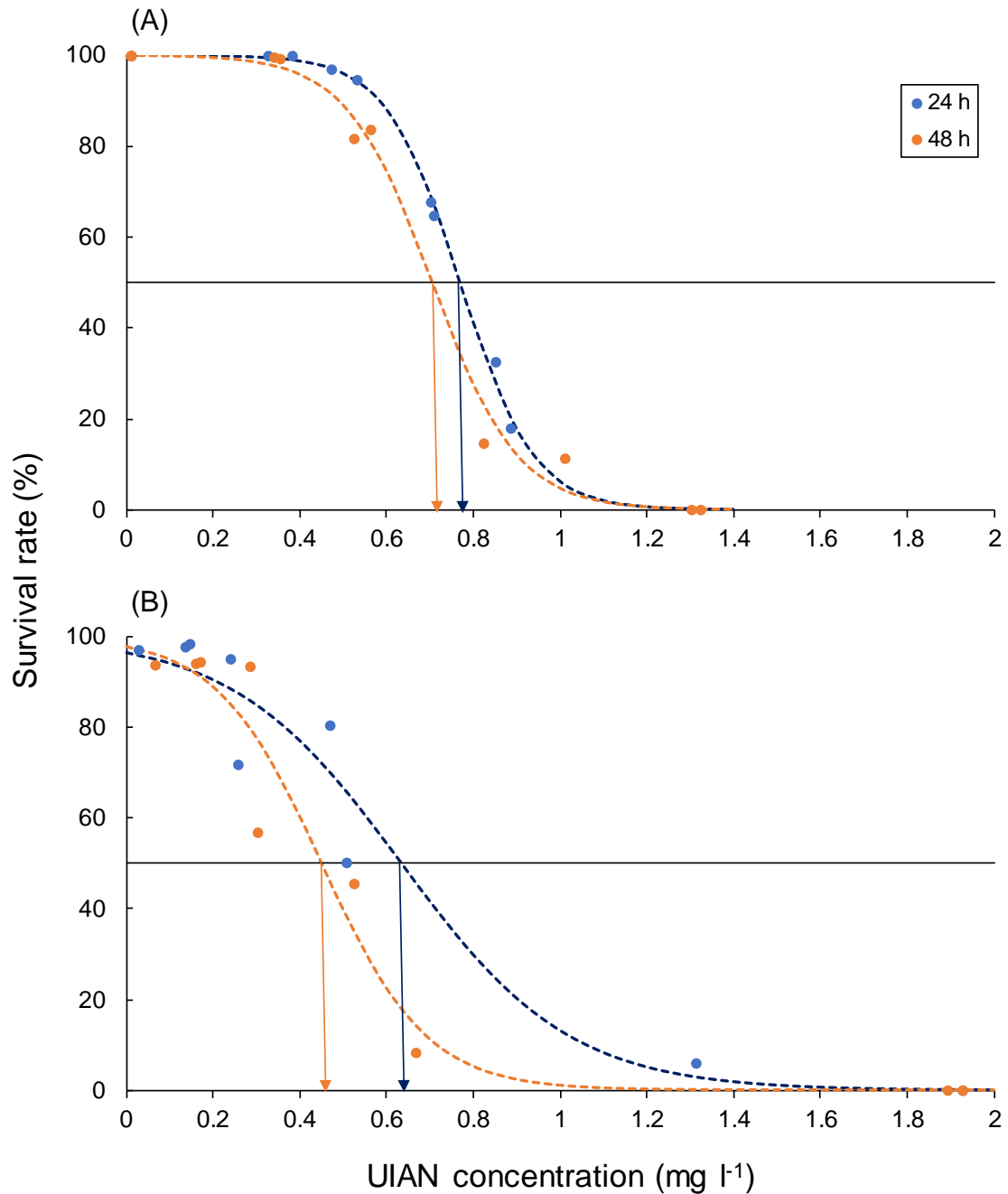


Fig. 3-2. Survival response of Japanese anchovies to different concentrations of un-ionized ammonia nitrogen (UIAN) after 24 h or 48 h at 15°C (A) and 25°C (B), experiment 1. Curves illustrated using coefficient estimates from the generalized linear model to evaluate relationships between UIAN and anchovy survival (Table 1). Arrows indicate the median lethal concentration at which 50% of test anchovies died.

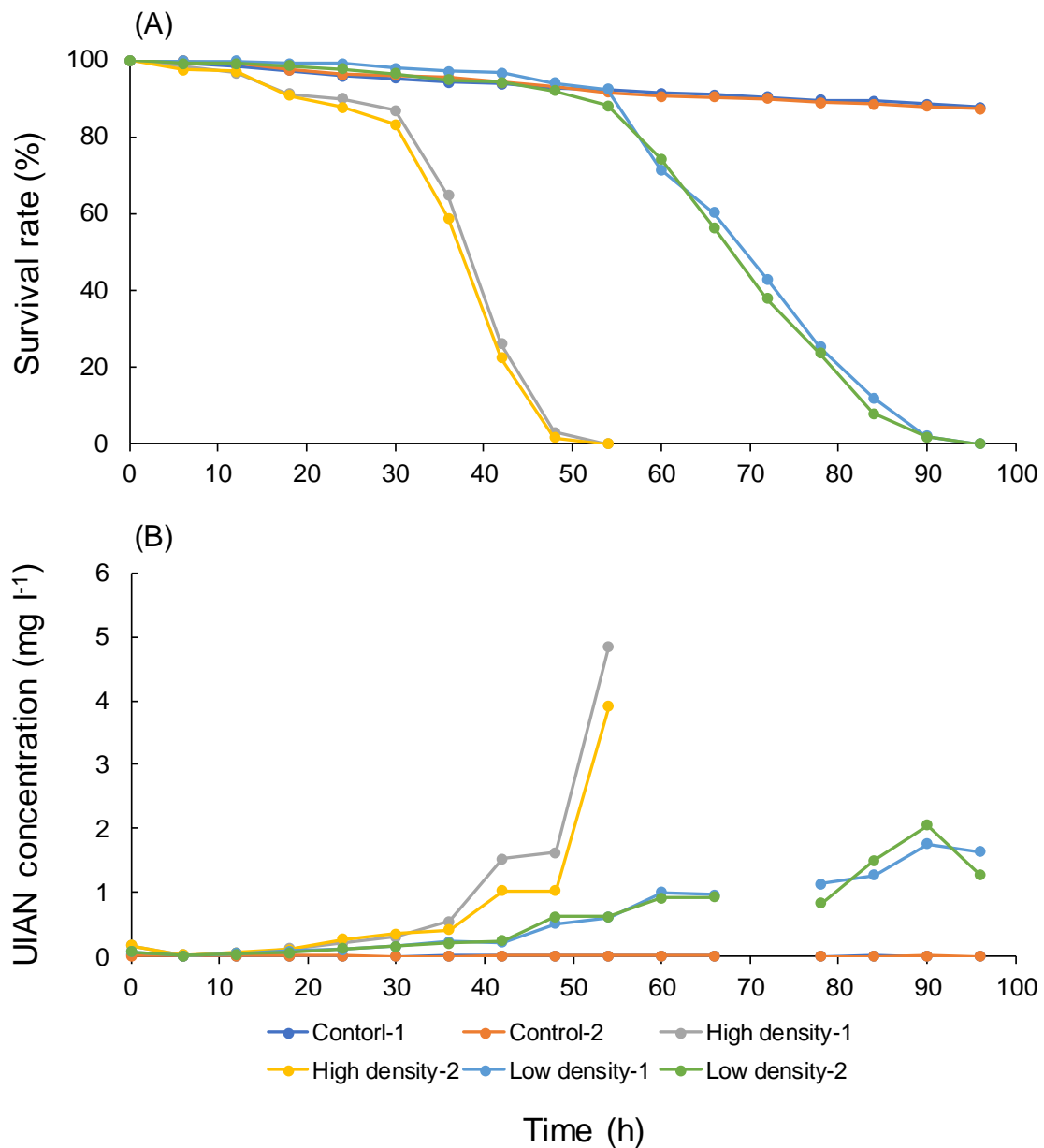


Fig. 3-3. Survival rate of Japanese anchovies (A) and un-ionized ammonia nitrogen (UIAN) concentration (B), experiment 2 at 25°C for three treatments: 1) high stocking density with water exchange (control), 2) high stocking density without water exchange, and 3) low stocking density without water exchange. Two tanks were used for each treatment. Ammonia concentration was not examined after 72 h.

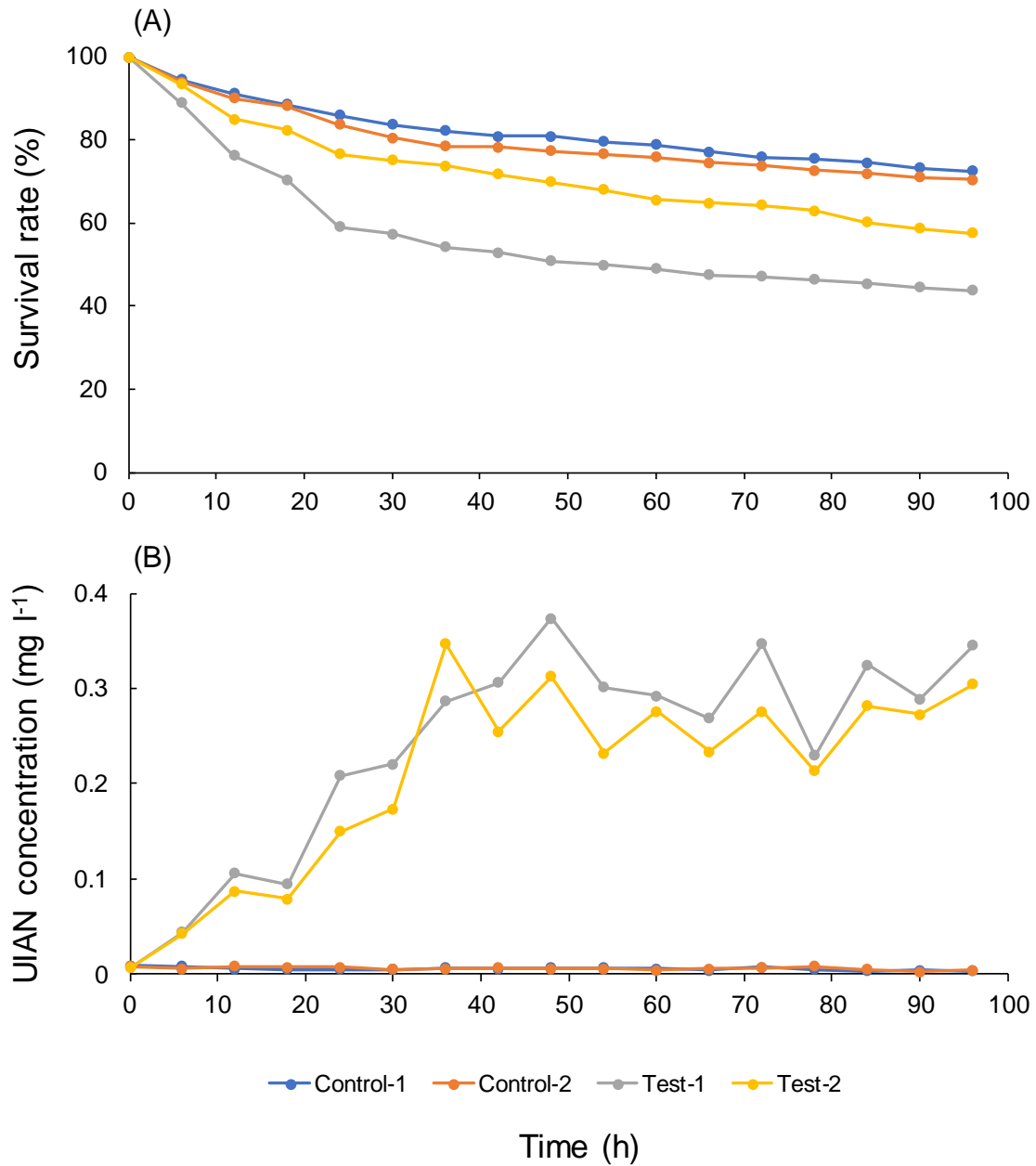


Fig. 3-4. Survival rate of Japanese anchovies (A) and un-ionized ammonia nitrogen (UIAN) concentration (B), experiment 3 at 25°C for two treatments: 1) tank water continuously exchanged (control), and 2) one third of the tank water drained and replenished with the same volume of fresh seawater every 12 h (test). Two tanks were used for each group.

Supplementary material

Table 3-S1. Water parameters: exposure test, 15°C, experiment 1 (two tanks per treatment). Ammonia concentration was controlled at designated values (40–160 mg l⁻¹) by adding NH₄Cl to tank water. The control tank received no NH₄Cl.

	Control		40 mg l ⁻¹		80 mg l ⁻¹		120 mg l ⁻¹		160 mg l ⁻¹	
	Water temperature (°C)									
Time	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	14.5	14.0	14.1	14.1	14.2	14.4	14.4	14.4	14.5	14.5
3	15.5	15.0	15.5	15.6	15.6	15.0	14.8	15.5	15.5	15.5
6	15.4	15.0	15.4	15.5	15.4	14.9	15.0	15.6	15.5	15.4
9	15.8	15.4	15.9	15.9	16.0	15.2	15.4	15.7	16.0	15.9
12	15.8	15.4	15.8	15.9	15.9	15.1	15.4	15.6	15.8	16.0
15	15.7	15.3	15.9	15.9	15.9	15.4	15.5	15.7	16.0	16.0
18	15.7	15.4	15.8	16.0	16.0	15.4	15.5	15.7	15.9	16.0
21	15.4	15.1	15.5	15.5	15.6	14.9	15.0	14.3	14.7	14.7
24	15.4	15.1	15.5	15.6	15.6	14.9	15.0	15.4	14.5	14.5
27	15.5	15.1	15.5	15.5	15.6	14.8	15.0	15.4	15.5	15.3
30	15.4	15.1	15.4	15.5	15.7	14.9	15.0	15.3	15.5	15.5
33	15.8	15.3	15.8	15.8	15.9	15.3	15.3	15.7	15.9	16.0
36	15.6	15.4	15.8	15.9	16.0	15.3	15.4	15.7		16.0
39	15.8	15.4	15.8	15.9	16.0	15.2	15.4	15.7		
42	15.7	15.0	15.4	15.5	15.6	14.9	15.0	15.2		
45	15.5	15.2	15.5	15.6	14.8	15.0	15.0	14.8		
48	15.5	15.1	15.5	15.5	15.7	15.0	15.0	15.2		
Mean	15.5	15.1	15.5	15.6	15.6	15.0	15.1	15.3	15.4	15.5

SD	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6
Dissolved oxygen (mg l ⁻¹)										
Time	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	5.70	5.67	5.77	5.72	5.74	5.63	5.65	5.22	4.48	4.44
3	5.72	5.38	5.43	5.26	5.05	4.80	4.88	4.42	3.00	3.08
6	5.72	5.68	5.38	5.22	4.95	4.84	4.94	4.49	3.03	3.01
9	5.82	5.67	5.35	5.31	5.15	4.98	5.00	4.54	3.33	3.29
12	5.90	5.68	5.47	5.46	5.38	5.03	5.06	4.61	3.30	3.28
15	5.81	5.68	5.63	5.43	5.14	5.00	5.03	4.91	3.64	3.39
18	5.85	5.61	5.58	5.49	5.31	5.09	5.11	4.73	4.08	3.64
21	5.85	5.65	5.63	5.56	5.51	5.24	5.27	4.82	4.82	4.10
24	5.83	5.77	5.73	5.57	5.58	5.17	5.30	4.94	5.07	4.54
27	5.77	5.61	5.64	5.49	5.24	5.11	5.24	5.02	5.38	4.95
30	5.84	5.71	5.69	5.56	5.37	5.14	5.38	5.16	5.80	5.29
33	5.79	5.68	5.65	5.51	5.29	5.03	5.36	5.34	5.82	5.94
36	5.72	5.62	5.61	5.49	5.31	5.20	5.57	5.52		5.99
39	5.77	5.67	5.63	5.53	5.37	5.15	5.57	5.59		
42	5.97	5.70	5.67	5.58	5.33	5.20	5.73	5.71		
45	5.76	5.67	5.62	5.55	5.36	5.10	5.84	5.90		
48	5.57	5.49	5.54	5.48	5.32	5.17	5.89	5.93		
Mean	5.79	5.64	5.59	5.48	5.32	5.11	5.34	5.11	4.31	4.23
SD	0.09	0.09	0.12	0.12	0.19	0.18	0.32	0.49	1.06	1.06

Oxygen saturation (%)										
Time	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	70.25	69.18	70.54	69.93	70.32	69.25	69.50	64.21	55.22	54.72
3	71.92	66.98	68.28	66.27	63.62	59.76	60.51	55.58	37.72	38.73

6	71.78	70.71	67.51	65.63	62.12	60.14	61.50	56.57	38.10	37.77
9	73.61	71.15	67.80	67.29	65.39	62.25	62.74	57.31	42.28	41.69
12	74.62	71.28	69.18	69.19	68.18	62.75	63.50	58.08	41.74	41.65
15	73.34	71.14	71.35	68.81	65.14	62.74	63.25	61.98	46.22	43.04
18	73.85	70.40	70.58	69.71	67.42	63.87	64.25	59.71	51.71	46.22
21	73.41	70.48	70.79	69.91	69.42	65.11	65.61	59.17	59.65	50.74
24	73.16	71.98	72.05	70.17	70.30	64.24	65.98	61.99	62.49	55.96
27	72.55	69.98	70.92	69.03	66.02	63.36	65.24	63.00	67.65	61.99
30	73.29	71.23	71.40	69.91	67.79	63.86	66.98	64.62	72.93	66.51
33	73.23	71.14	71.46	69.69	67.04	63.00	67.13	67.41	73.76	75.42
36	72.06	70.52	70.96	69.57	67.42	65.13	69.90	69.68		76.06
39	72.98	71.15	71.21	70.08	68.19	64.37	69.90	70.56		
42	75.36	70.96	71.15	70.16	67.15	64.61	71.34	71.37		
45	72.42	70.87	70.66	69.92	66.46	63.49	72.71	73.16		
48	70.04	68.48	69.66	68.90	67.16	64.36	73.33	74.12		
Mean	72.82	70.45	70.32	69.07	67.01	63.66	66.67	64.03	54.12	53.12
SD	1.36	1.22	1.35	1.38	2.15	2.09	3.90	6.05	13.18	13.39

pH										
Time	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	7.68	7.73	7.58	7.54	7.57	7.56	7.52	7.47	7.38	7.39
3	7.64	7.71	7.53	7.49	7.45	7.38	7.30	7.27	7.17	7.17
6	7.62	7.68	7.49	7.44	7.39	7.34	7.31	7.26	7.23	7.22
9	7.62	7.68	7.50	7.45	7.40	7.36	7.32	7.27	7.28	7.27
12	7.63	7.68	7.51	7.48	7.42	7.38	7.34	7.28	7.29	7.27
15	7.65	7.69	7.54	7.49	7.43	7.40	7.36	7.30	7.33	7.32
18	7.65	7.69	7.55	7.50	7.44	7.42	7.38	7.33	7.40	7.35

21	7.70	7.75	7.58	7.54	7.46	7.43	7.43	7.37	7.54	7.44
24	7.67	7.73	7.58	7.46	7.40	7.45	7.52	7.66	7.51	7.39
27	7.66	7.71	7.58	7.54	7.46	7.43	7.49	7.43	7.75	7.58
30	7.66	7.70	7.58	7.53	7.47	7.42	7.51	7.45	7.88	7.66
33	7.67	7.71	7.58	7.53	7.48	7.43	7.60	7.53	8.03	7.85
36	7.66	7.70	7.55	7.54	7.49	7.44	7.65	7.59		7.98
39	7.66	7.71	7.56	7.50	7.50	7.46	7.68	7.63		
42	7.67	7.71	7.56	7.53	7.51	7.47	7.74	7.68		
45	7.68	7.72	7.58	7.55	7.53	7.49	7.82	7.74		
48	7.65	7.73	7.63	7.58	7.56	7.54	7.89	7.82		
Mean	7.66	7.71	7.56	7.51	7.47	7.44	7.52	7.48	7.48	7.45
SD	0.02	0.02	0.04	0.04	0.05	0.06	0.18	0.18	0.27	0.25

Total ammonia nitrogen concentration (mg l⁻¹)

Time	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	1.0	1.1	60	70	80	100	150	160	200	200
3	0.8	0.8	20	60	100	70	140	140	170	210
6	1.2	1.2	60	70	100	90	160	160	210	210
9	1.1	2.4	60	90	100	90	150	190	220	210
12	1.2	1.1	50	50	80	80	120	120	160	170
15	1.0	1.0	30	30	60	70	110	90	160	150
18	1.0	1.0	40	40	80	100	140	130	180	180
21	1.1	1.0	40	50	100	90	130	130	180	180
24	1.0	0.9	30	50	80	70	110	120	130	180
27	0.9	0.8	30	40	80	80	130	120	150	200
30	1.1	0.9	40	40	90	90	120	140	150	180
33	0.8	1.0	50	30	100	90	110	160	150	120

36	1.0	1.1	50	50	100	110	150	140	180	
39	1.1	1.1	50	60	100	110	140	140		
42	1.2	1.3	40	50	50	110	150	130		
45	1.1	0.8	50	50	100	100	170	90		
48	0.8	0.8	30	20	60	70	70			
Mean	1.0	1.1	43	50	86	89	132	135	172	182
SD	0.1	0.4	12	17	17	14	24	26	27	26

Un-ionized ammonia concentration (mg l⁻¹)

Time	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	0.010	0.012	0.453	0.483	0.595	0.738	1.011	0.961	0.985	1.008
3	0.008	0.009	0.150	0.413	0.627	0.358	0.587	0.577	0.557	0.688
6	0.011	0.012	0.406	0.426	0.539	0.417	0.697	0.650	0.790	0.770
9	0.010	0.025	0.432	0.577	0.576	0.446	0.689	0.795	0.963	0.892
12	0.012	0.011	0.365	0.344	0.479	0.412	0.577	0.510	0.706	0.728
15	0.010	0.011	0.236	0.211	0.368	0.386	0.558	0.403	0.786	0.720
18	0.010	0.011	0.320	0.290	0.505	0.577	0.743	0.624	1.030	0.925
21	0.012	0.012	0.335	0.383	0.642	0.512	0.745	0.617	1.298	1.033
24	0.010	0.010	0.251	0.321	0.448	0.417	0.775	1.199	0.862	0.907
27	0.009	0.009	0.251	0.306	0.514	0.452	0.855	0.709	1.852	1.652
30	0.011	0.010	0.333	0.299	0.596	0.501	0.826	0.859	2.488	1.811
33	0.008	0.011	0.429	0.229	0.687	0.528	0.951	1.214	3.594	1.929
36	0.010	0.012	0.400	0.394	0.708	0.660	1.464	1.219		3.882
39	0.011	0.012	0.409	0.432	0.725	0.686	1.463	1.335		
42	0.013	0.014	0.318	0.374	0.360	0.686	1.745	1.339		
45	0.012	0.009	0.419	0.394	0.710	0.658	2.372	1.032		
48	0.008	0.009	0.282	0.168	0.488	0.516	1.145			

Mean	0.010	0.012	0.341	0.355	0.563	0.526	1.012	0.878	1.326	1.303
SD	0.001	0.004	0.085	0.102	0.114	0.120	0.491	0.312	0.898	0.884

Table 3-S2. Water parameters: exposure test, 25°C, experiment 1 (two tanks per treatment). Ammonia concentration was controlled at designated values (10–80 mg l⁻¹) by adding NH₄Cl to the tank water. The control tank received no with NH₄Cl.

	Control	10 mg l ⁻¹		20 mg l ⁻¹		40 mg l ⁻¹		80 mg l ⁻¹	
Water temperature (°C)									
Time	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	23.9	24.9	24.9	23.6	24.0	24.0	23.5	23.5	25.4
3	25.7	25.9	26.1	26.2	25.5	25.5	25.9	26.1	26.2
6	25.7	25.7	26.2	26.3	25.7	25.7	25.9	26.2	26.4
9	25.7	26.0	26.1	26.4	25.7	25.7	25.9	26.2	26.4
12	25.8	26.3	26.2	26.2	25.5	25.8	26.1	26.4	26.0
15	25.9	26.1	26.3	26.3	25.7	25.7	26.1		26.2
18	25.8	26.1	26.2	26.4	25.7	25.8	26.1		26.2
21	25.7	26.1	26.2	26.4	25.8	25.9	26.2		26.4
24	25.8	26.2	26.4	26.4	25.8	25.8	26.2		26.5
27	26.0	26.3	26.5	26.6	26.0	25.9	26.2		26.5
30	26.2	26.6	26.6	26.6	26.0	26.0	26.2		26.7
33	26.1	26.6	26.7	26.7	26.2	26.2	26.4		
36	26.4	26.6	26.7	26.7	26.0	26.2	26.4		
39	26.5	26.7	26.9	26.9	26.4	26.4	26.8		
42	26.6	27.0	27.0	26.9	26.3	26.5	26.3		
45	26.5	26.8	26.9	27.0	26.5	26.5	26.9		
48	26.8	27.2	27.2	27.3	26.8	26.8	27.1		
Mean	25.9	26.3	26.4	26.4	25.9	25.9	26.1	25.7	26.3
SD	0.6	0.5	0.5	0.8	0.6	0.6	0.8	1.2	0.3

Dissolved oxygen (mg l⁻¹)

Time	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	7.34	7.19	6.96	6.95	6.88	6.71	6.84	6.76	6.97
3	5.28	5.61	5.50	5.44	5.18	3.77	3.51	4.27	4.06
6	4.77	4.74	4.82	4.14	4.68	3.42	3.49	4.99	4.00
9	5.27	5.42	5.43	4.97	5.28	3.45	3.95	6.07	4.53
12	5.03	5.30	5.33	4.92	4.70	3.50	3.94	7.37	4.93
15	4.88	5.36	5.65	5.55	5.43	5.79	4.43		5.41
18	4.78	5.30	5.58	5.49	5.47	6.01	4.48		5.55
21	4.97	5.50	5.65	5.72	5.37	4.79	4.98		6.43
24	5.07	5.61	5.66	5.61	5.34	4.98	4.91		7.00
27	5.47	5.67	5.75	5.79	5.71	4.96	5.17		7.47
30	5.16	4.08	5.23	5.29	5.47	4.60	4.86		7.57
33	5.63	5.83	5.94	5.60	5.74	4.97	5.43		
36	5.47	5.57	5.81	5.73	5.51	5.07	6.09		
39	5.45	5.64	5.66	5.75	5.59	4.89	5.54		
42	5.75	5.76	5.76	5.84	5.62	5.23	6.48		
45	5.59	5.78	5.70	5.87	5.75	5.25	6.17		
48	5.65	5.68	5.67	5.69	5.56	5.48	6.66		
Mean	5.39	5.53	5.65	5.55	5.49	4.87	5.11	5.89	5.81
SD	0.59	0.61	0.43	0.57	0.47	0.92	1.08	1.27	1.34

Oxygen saturation (%)

Time	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	107.24	106.76	103.34	101.04	100.68	98.19	99.28	98.12	104.32
3	79.40	84.63	83.24	82.46	77.65	56.52	52.95	64.62	61.54
6	71.73	71.28	73.06	62.85	70.38	51.43	52.65	75.64	60.82
9	79.25	81.90	82.18	75.57	79.40	51.88	59.59	92.01	68.88

12	75.76	80.46	80.79	74.58	70.46	52.72	59.63	112.06	74.49
15	73.62	81.12	85.78	84.26	81.66	87.07	67.04		82.00
18	72.00	80.21	84.58	83.48	82.26	90.52	67.80		84.13
21	74.74	83.24	85.64	86.98	80.88	72.26	75.49		97.77
24	76.37	85.03	86.06	85.30	80.43	75.01	74.42		
27	82.65	86.08	87.57	88.32	86.28	74.83	78.37		
30	78.21	62.23	79.77	80.69	82.65	69.51	73.67		
33	85.20	88.93	90.75	85.55	87.01	75.33	82.57		
36	83.17	84.96	88.76	87.54	83.26	76.85	92.60		
39	83.00	86.16	86.74	88.12	85.00	74.35	84.77		
42	87.71	88.41	88.41	89.50	85.32	79.65	98.38		
45	85.13	88.44	87.35	90.10	87.57	79.95	94.56		
48	86.45	87.46	87.30	87.75	85.07	83.85	102.38		
Mean	81.27	83.96	85.96	84.36	82.70	73.53	77.42	88.49	79.24
SD	8.41	8.95	6.13	8.11	6.82	13.65	16.24	18.68	15.97
pH									
Time	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	7.84	7.72	7.67	7.73	7.74	7.75	7.77	7.81	7.72
3	7.28	7.31	7.32	7.24	7.23	7.24	7.18	7.21	7.18
6	7.18	7.21	7.25	7.15	7.18	7.19	7.31	7.29	7.20
9	7.33	7.35	7.38	7.29	7.39	7.30	7.29	7.61	7.26
12	7.28	7.31	7.35	7.32	7.30	7.29	7.28	7.75	7.30
15	7.20	7.26	7.32	7.31	7.30	7.38	7.35		7.30
18	7.32	7.35	7.39	7.36	7.31	7.39	7.39		7.37
21	7.46	7.47	7.52	7.48	7.39	7.47	7.52		7.62
24	7.32	7.36	7.41	7.33	7.27	7.34	7.41		7.62

27	7.37	7.38	7.44	7.39	7.42	7.38	7.48		7.86
30	7.35	7.35	7.45	7.40	7.43	7.35	7.48		7.96
33	7.50	7.43	7.45	7.40	7.42	7.38	7.49		
36	7.46	7.42	7.43	7.41	7.43	7.39	7.50		
39	7.53	7.49	7.48	7.48	7.49	7.46	7.58		
42	7.46	7.49	7.51	7.52	7.50	7.51	7.67		
45	8.10	7.41	7.42	7.45	7.45	7.43	7.72		
48	8.10	7.42	7.43	7.44	7.44	7.45	7.79		
Mean	7.48	7.40	7.42	7.39	7.39	7.39	7.48	7.53	7.49
SD	0.28	0.11	0.09	0.13	0.13	0.12	0.18	0.27	0.28

Total ammonia nitrogen concentration (mg l⁻¹)

Time	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	1.0	11	11	22	20	38	37	100	90
3	1.4	12	12	22	21	43	44	110	90
6	2.3	15	13	24	23	46	40	130	100
9	2.8	13	12	25	24	39	44	100	100
12	3.0	10	13	24	23	38	39	110	80
15	3.6	12	12	24	23	39	48		110
18	3.3	13	11	23	22	40	47		120
21	3.6	9	10	20	22	42	39		80
24	3.5	12	13	20	25	43	41		120
27	3.8	13	13	24	25	40	39		90
30	3.6	12	14	24	24	44	42		130
33	3.8	14	14	24	24	44	41		
36	3.5	14	12	22	24	44	40		
39	3.5	13	16	27	25	45	44		

42	3.2	13	14	24	24	49	44		
45	3.3	14	13	25	22	43	40		
48	6.0	16	16	31	26	50	46		
Mean	3.2	13	13	24	23	43	42	110	101
SD	1.1	2	2	3	2	4	3	12	17

Un-ionized ammonia concentration (mg l⁻¹)

Time	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	0.028	0.253	0.226	0.470	0.450	0.875	0.860	2.541	2.146
3	0.013	0.117	0.122	0.187	0.166	0.348	0.319	0.868	0.668
6	0.016	0.115	0.113	0.168	0.164	0.337	0.391	1.240	0.788
9	0.028	0.140	0.140	0.242	0.277	0.367	0.411	1.973	0.904
12	0.027	0.101	0.142	0.245	0.213	0.352	0.361	3.017	0.769
15	0.027	0.106	0.124	0.241	0.216	0.440	0.521		1.074
18	0.033	0.141	0.132	0.261	0.212	0.465	0.559		1.374
21	0.049	0.128	0.161	0.298	0.256	0.590	0.628		1.638
24	0.035	0.134	0.165	0.212	0.221	0.446	0.514		2.475
27	0.043	0.153	0.178	0.296	0.316	0.458	0.573		3.178
30	0.039	0.135	0.198	0.303	0.310	0.474	0.617		5.808
33	0.058	0.189	0.199	0.305	0.308	0.515	0.626		
36	0.050	0.185	0.163	0.286	0.310	0.527	0.624		
39	0.059	0.203	0.248	0.418	0.381	0.642	0.848		
42	0.046	0.207	0.234	0.407	0.372	0.788	1.001		
45	0.197	0.183	0.176	0.364	0.309	0.577	1.064		
48	0.366	0.221	0.226	0.451	0.365	0.718	1.451		
Mean	0.066	0.160	0.173	0.303	0.285	0.525	0.669	1.928	1.893
SD	0.088	0.045	0.043	0.090	0.080	0.157	0.294	0.889	1.528

Table 3-S3. Water parameters: experiment 2, 25°C. Three treatments were prepared: 1) high stocking density with a water exchange (Control), 2) high stocking density without a water exchange (High density), and 3) low stocking density without a water exchange (Low density). Two tanks were used for each treatment. The ammonia concentration was not examined after 72 hours.

		Control		High density		Low density				Control		High density		Low density	
		Water temperature (°C)						pH							
Time		1	2	1	2	1	2	Time		1	2	1	2	1	2
0		24.2	24.5	24.7	24.6	24.6	25.0	0		8.08	8.07	8.05	8.06	8.09	8.08
6		25.2	25.3	25.0	25.6	25.5	25.2	6		7.96	7.95	6.85	6.84	6.86	6.83
12		25.5	25.7	25.2	25.7	25.5	25.0	12		7.98	8.01	6.78	6.78	7.00	6.89
18		25.5	25.8	25.0	25.5	25.7	25.0	18		7.99	7.99	6.91	6.82	6.97	6.90
24		25.5	25.8	25.3	25.8	25.9	25.3	24		7.99	7.98	7.04	7.11	7.02	7.00
30		25.5	25.7	25.0	25.8	25.7	25.0	30		7.99	7.99	6.96	7.00	6.98	6.98
36		25.6	25.8	25.0	25.5	25.6	25.3	36		8.03	8.03	7.09	7.11	7.15	7.11
42		25.5	25.8	25.0	25.6	25.5	25.2	42		8.03	8.03	7.42	7.26	7.04	7.02
48		25.4	25.5	25.0	25.5	25.6	25.0	48		8.04	8.04	7.79	7.57	7.43	7.42
54		25.5	26.0	25.0	26.0	25.6	25.0	54		8.00	8.00	8.03	7.90	7.38	7.37
60		25.5	25.8			25.5	25.0	60		8.04	8.05			7.49	7.43
66		25.8	25.8			25.8	25.0	66		8.05	8.06			7.31	7.24
72		25.5	25.8			25.7	25.0	72		8.05	8.05			7.36	7.31
78		25.8	25.8			25.6	25.3	78		8.02	8.03			7.46	7.36
84		25.8	25.8			25.5	25.0	84		8.02	8.03			7.44	7.35
90		25.5	25.8			25.3	25.0	90		7.98	8.01			7.59	7.55
96		25.5	25.7			26.0	25.0	96		8.00	8.01			7.76	7.68
Mean		25.5	25.7	25.0	25.6	25.6	25.1	Mean		8.01	8.02	7.29	7.25	7.31	7.27

SD	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.1	SD	0.03	0.03	0.49	0.45	0.32	0.33
Dissolved oxygen (mg l ⁻¹)							Total ammonia nitrogen concentration (mg l ⁻¹)						
Time	1	2	1	2	1	2	Time	1	2	1	2	1	2
0	17.87	14.22	17.60	16.20	17.78	12.80	0	0.8	0.4	3.7	3.6	1.5	1.5
6	9.25	8.05	11.32	18.66	18.82	16.84	6	0.2	0.3	9	9	5.1	4.6
12	7.93	9.42	8.74	8.45	19.02	17.03	12	0.3	0.3	21	21	12	11
18	8.74	7.34	11.83	10.02	17.38	12.50	18	0.3	0.3	33	37	19	19
24	9.42	8.34	12.34	16.95	16.51	16.53	24	0.2	0.3	42	45	22	26
30	8.66	9.11	10.88	14.14	15.25	15.48	30	0.2	0.2	76	74	35	37
36	8.68	9.35	7.83	12.12	14.91	13.57	36	0.2	0.2	100	70	36	35
42	7.70	8.48	19.28	14.90	10.50	8.19	42	0.2	0.3	130	120	44	52
48	8.27	11.35	21.34	17.57	17.28	16.31	48	0.2	0.3	60	60	41	53
54	8.55	11.77			16.28	15.01	54	0.2	0.2	105	105	55	60
60	9.89	14.01			21.74	21.50	60	0.2	0.2			70	76
66	10.47	15.54			19.68	15.77	66	0.2	0.2			100	120
72	10.66	12.21			20.30	17.26	72						
78	10.17	11.95				19.23	78	0.2	0.2			85	80
84	10.31	12.13				17.52	84	0.4	0.2			100	150
90	10.09	12.10					90	0.2	0.2			100	130
96	10.61	11.85					96	0.2	0.2			60	60
Mean	9.84	11.01	13.46	14.33	17.34	15.70	Mean	0.3	0.2	58	54	49	57
SD	2.28	2.38	4.77	3.50	2.85	3.12	SD	0.2	0.1	44	39	34	45

Oxygen saturation (%)							Un-ionized ammonia concentration (mg l ⁻¹)						
Time	1	2	1	2	1	2	Time	1	2	1	2	1	2
0	262.35	209.78	260.49	239.38	262.73	190.36	0	0.039	0.020	0.175	0.173	0.077	0.077
6	138.00	120.29	168.35	280.17	282.13	251.24	6	0.010	0.011	0.029	0.029	0.017	0.014

12	118.88	141.66	130.39	127.07	285.12	253.27	12	0.011	0.013	0.058	0.060	0.056	0.038
18	131.02	110.56	175.93	150.21	261.37	185.90	18	0.011	0.013	0.121	0.114	0.084	0.068
24	141.21	125.62	184.40	255.31	249.07	247.01	24	0.009	0.011	0.212	0.276	0.111	0.120
30	129.82	137.00	161.80	212.98	229.34	230.21	30	0.007	0.008	0.312	0.353	0.158	0.159
36	130.33	140.83	116.45	181.69	223.87	202.78	36	0.011	0.009	0.553	0.420	0.239	0.207
42	115.43	127.73	286.73	223.72	157.40	122.19	42	0.010	0.014	1.526	1.023	0.225	0.248
48	123.78	170.15	317.36	263.39	259.45	242.56	48	0.011	0.013	1.626	1.027	0.515	0.622
54	128.17	177.84			244.44	223.22	54	0.010	0.010	4.848	3.908	0.616	0.629
60	148.26	211.02			325.90	319.74	60	0.010	0.012			1.000	0.913
66	157.70	234.07			296.43	234.53	66	0.011	0.012			0.970	0.935
72	159.80	183.91			305.28	256.69	72						
78	153.18	179.99				287.36	78	0.008	0.009			1.142	0.838
84	155.29	182.71				260.55	84	0.017	0.007			1.275	1.502
90	151.26	182.25					90	0.007	0.010			1.765	2.051
96	159.05	178.21					96	0.007	0.009			1.635	1.270
Mean	147.27	165.51	200.21	214.88	260.19	233.84	Mean	0.012	0.011	0.946	0.738	0.618	0.606
SD	33.05	35.59	70.77	52.35	42.80	46.41	SD	0.008	0.003	1.492	1.171	0.598	0.608

Table 3-S4. Water parameters: experiment 3, 25°C. Two treatments were prepared: 1) tank water continuously exchanged (control), and 2) one third of the tank water drained and replenished with the same volume of fresh seawater every 12 hours (test). Two tanks were used for each treatment.

Control		Test		Control		Test			
Water temperature (°C)				pH					
Time	1	2	1	2	Time	1	2	1	2
0	25.8	26.0	25.3	25.5	0	7.90	7.87	7.89	7.89
6	25.2	26.0	25.3	25.8	6	7.94	7.94	6.90	6.91
12	25.6	26.0	25.2	25.8	12	7.97	7.98	6.95	6.94
18	25.7	26.0	25.3	25.8	18	7.94	7.96	6.99	6.94
24	25.2	26.0	25.5	25.5	24	8.01	8.01	7.12	7.03
30	25.8	26.0	25.5	25.5	30	8.00	8.00	7.17	7.08
36	25.7	26.0	25.3	25.6	36	8.00	8.02	7.24	7.12
42	25.5	26.0	25.2	25.7	42	8.03	8.04	7.26	7.13
48	25.4	26.0	25.0	25.6	48	8.05	8.05	7.32	7.18
54	25.7	26.0	25.2	25.8	54	7.96	7.98	7.29	7.12
60	25.7	26.0	25.0	25.8	60	7.99	8.00	7.31	7.14
66	25.3	26.0	25.2	25.7	66	7.96	7.98	7.31	7.15
72	25.3	26.0	25.2	25.8	72	7.94	7.96	7.28	7.15
78	25.2	26.0	25.0	25.8	78	7.94	7.95	7.33	7.16
84	25.2	26.0	25.2	25.8	84	7.95	7.97	7.35	7.17
90	25.3	26.0	25.2	26.0	90	8.01	8.01	7.39	7.22
96	25.5	26.0	25.2	25.6	96	7.86	8.02	7.42	7.21
Mean	25.5	26.0	25.2	25.7	Mean	7.97	7.98	7.27	7.15
SD	0.2	0.0	0.1	0.1	SD	0.05	0.04	0.22	0.21

Dissolved oxygen (mg l ⁻¹)					Total ammonia nitrogen concentration (mg l ⁻¹)				
Time	1	2	1	2	Time	1	2	1	2
0	17.99	17.84	15.86	13.28	0	0.3	0.3	0.2	0.2
6	14.68	15.52	20.26	21.50	6	0.2	0.2	12	11
12	15.35	15.58	19.42	19.38	12	0.1	0.2	26	21
18	14.79	15.26	19.57	20.18	18	0.1	0.2	21	19
24	15.79	15.72	19.60	19.44	24	0.1	0.2	34	30
30	15.80	16.00		21.50	30	0.1	0.1	32	31
36	16.19	15.62		20.51	36	0.1	0.1	36	56
42	16.32	16.24			42	0.1	0.1	37	40
48	16.57	15.81		20.94	48	0.1	0.1	40	44
54	16.07	15.44		20.80	54	0.2	0.1	34	37
60	15.45	15.86		20.89	60	0.1	0.1	32	42
66	16.30	15.86			66	0.1	0.1	29	35
72	16.14	16.13			72	0.2	0.2	40	41
78	16.28	15.52			78	0.1	0.2	24	31
84	16.26	16.06			84	0.1	0.1	32	40
90	17.46	16.14			90	0.1	0.1	26	34
96	17.09	16.15			96	0.1	0.1	29	40
Mean	16.15	15.93	18.94	19.84	Mean	0.1	0.1	28	32
SD	0.85	0.57	1.75	2.42	SD	0.0	0.0	10	13

Oxygen saturation (%)					Un-ionized ammonia concentration (mg l ⁻¹)				
Time	1	2	1	2	Time	1	2	1	2
0	270.97	269.56	237.00	199.08	0	0.009	0.009	0.007	0.007
6	219.02	234.51	302.75	323.84	6	0.008	0.006	0.044	0.043
12	230.47	235.41	289.73	291.91	12	0.006	0.008	0.106	0.087

18	222.42	230.58	292.44	303.96	18	0.005	0.007	0.094	0.079
24	235.58	237.53	293.82	291.42	24	0.005	0.008	0.209	0.150
30	237.98	241.76		322.30	30	0.005	0.005	0.220	0.174
36	243.47	236.02		307.95	36	0.006	0.006	0.287	0.347
42	244.65	245.39			42	0.006	0.007	0.306	0.255
48	248.00	238.89		314.41	48	0.006	0.006	0.374	0.312
54	241.67	233.30		313.30	54	0.007	0.006	0.301	0.232
60	232.34	239.64		314.65	60	0.006	0.004	0.292	0.276
66	243.57	239.64			66	0.004	0.006	0.269	0.234
72	241.18	243.72			72	0.007	0.006	0.346	0.276
78	242.89	234.51			78	0.005	0.009	0.230	0.213
84	242.59	242.67			84	0.004	0.005	0.325	0.282
90	260.91	243.88			90	0.005	0.002	0.289	0.272
96	256.19	244.03			96	0.004	0.004	0.346	0.304
Mean	241.99	240.65	283.15	298.28	Mean	0.006	0.006	0.238	0.208
SD	12.85	8.62	26.26	36.57	SD	0.002	0.002	0.111	0.102

第4章 給餌飼育下におけるカタクチイワシの安全飼育指標に基づいた 模擬長期飼育試験

4.1 はじめに

カタクチイワシ *Engraulis japonicus* は、サハリン・沿海州から日本・韓国・台湾および中国の南部に広く分布し（落合・田中 1986）、我が国では食用されるほか、かつお釣りの活餌としても利用されている（益田ら 1984）。カタクチイワシを活餌として利用する遠洋かつお一本釣り漁船は、漁場となる熱帯から温帯海域において長期間（40～50日）操業する。そのため、船上においてカタクチイワシの飼育水を冷却する必要があり、冷凍機稼働に要する燃油コストが多くなり漁業経営を圧迫している（木村ら 2009）。これに対応し、高水温でも安全にカタクチイワシを飼育する条件を探る目的で、無給餌による短期間の試験が実施された先行研究がある。先行研究ではカタクチイワシの高温側水温耐性（高温側半数致死水温）が 27°C 付近にあること、また、安全に飼育するためには飼育水中に必要な DO が 5 mg/L 以上であることについても明らかにされている（小田ら 2018）。そのほか、飼育時における適切な換水量の指標を示したカタクチイワシのアンモニア耐性についての先行研究もある。その研究では飼育水温 15°C、25°C におけるアンモニア暴露試験時における 48 時間後の半数致死濃度の値がそれぞれ 0.706 mg/L、0.450 mg/L であることが明らかにされている（Oda et al. 2021）。

そこで、本研究では小田ら 2018、Oda et al. (2021) で得られた知見を活かし、遠洋かつお一本釣り漁業の一航海の平均日数 50 日間にわたる長期間の飼育でも、安全な船上飼育が可能となるかを模擬する目的で、給餌飼育下におけるカタクチイワシの水温別模擬長期飼育試験（試験 1）を行った。また、これまでに得られている知見は無給餌、かつ短期間における試験の結果であり、試験時に発現した死亡魚の死亡要因に餓死が含まれている可能性がある。そのため、当該魚種が無給餌でどの程度生残できるかを把握する目的で、カタクチイワシの水温別飢餓耐性試験（試験 2）も同時に行

った。

4.2 材料および方法

試験 1 水温別模擬長期飼育試験

供試魚 2010年2月に長崎県西海市で畜養されているカタクチイワシ2.5万尾を活魚車で輸送し、80 kL 八角形水槽で12日間予備飼育した体重 7.89 ± 1.21 g ($n=50$) のカタクチイワシを試験魚として用いた。予備飼育期間における給餌は、遠洋かつお一本釣り漁船での給餌量と同量とし、魚体重あたり 0.006 g の配合飼料（いわし大漁A；日清丸紅飼料株式会社）を用い、朝、昼、夕の3回に分けて行った。また、ビブリオ病予防策として80 kL 八角形水槽へ収容時およびその翌日と7日目にOTC（水産用OTC散「TG」10%；株式会社トーヨー技術研究所）を配合飼料に対して重量で0.4～0.5%混ぜて与えた。

試験区の設定 水温20°Cおよび25°Cの2試験区を設け、1試験区に2 kL FRP 角型水槽を2基用いた。80 kL 八角形水槽で予備飼育を行った供試魚を、2 kL FRP 角型水槽（縦1,250 mm×横2,250 mm×高さ1,525 mm；実容量1.6 kL）へ遠洋かつお一本釣り漁船（以下、漁船という。）での飼育時における最高密度（25.0 kg/kL）と同等の密度で収容した。供試魚を収容した際の水温は17.8°Cであり、その後約6時間かけてそれぞれの設定水温へ加温した。

試験期間中の飼育方法 試験期間中における給餌は、予備飼育期間中と同じ配合飼料を用い、朝、昼、夕の3回に分けて行った。カタクチイワシの消費エネルギー量は水温に依存するため、実際に漁船において15°Cで給餌している量を基本として、20°C区では0.42 kg/水槽/日、25°C区では0.49 kg/水槽/日の給餌量とした。また、水温を上昇させた飼育を行うことでビブリオ病による死亡魚が増加すること予測されたことから、予防策として配合飼料重量の0.4～0.5%の割合でOTCを配合飼料に混ぜて週一回の頻度で与えた。飼育には電解処理海水を使用し、換水率は漁船の新鮮海水の換水率と同等の1,260%/日（木村ら2009）とした。照明は24時間連続照明とし、照度は

250～500 lx とした。カタクチイワシは飼育水の溶存酸素濃度（以下、DO という。）が 5 mg/L 以下になると酸素消費量が減少するなどの異常をきたす可能性があることが示唆（小田ら 2018）されているため、飼育水には通常の空気に加えて酸素も供給し、DO を 5 mg/L 以上に保った。その結果、20°C 区での通気量は空気を 4.2 L/分、酸素を 1.2～1.6 L/分とし、25°C 区では空気を 4.2 L/分、酸素を 3.0～3.6 L/分に設定した。通気に使用したエアーストーンは、空気はセラミックエアーストーンの AS200（nitto）を使用し、酸素はセラミックエアーストーンの AS80（nitto）を使用した。

試験魚の測定 試験開始時に 50 尾、試験終了時にそれぞれの水槽から 30 尾ずつ採取し、全長、尾叉長、被鱗体長および体重の測定を行った。試験区間の体重の差は、Welch の t 検定により比較した。

飼育環境の測定 試験期間中の飼育水の水温、DO、pH を毎日 8 時と 16 時に測定した。また、週に 2 回、14 時に飼育水中の全アンモニア濃度（以下、TAN という。）の測定を行った。

試験 2 水温別飢餓耐性試験

供試魚 試験には、試験 1 で用いたものと同じロットのカタクチイワシを用いた。

試験区の設定 水温 20°C および 25°C の 2 試験区を設けた。試験には、200 L 黒色ポリエチレン水槽（実水量 150 L、サミットタンク、サミット樹脂工業株式会社）を 2 基用い、試験区ごとに 2 水槽の繰り返し区を設けた。80 kL 八角形水槽で予備飼育を行った供試魚を 200 L 黒色ポリエチレン水槽へそれぞれ 100 尾ずつ収容した。供試魚を収容した際の水温は 17.8°C であり、その後約 6 時間かけてそれぞれの設定水温へ加温した。試験水槽へ収容後ならびに試験開始後は無給餌とし、すべての試験魚が死亡するまで飼育を行った。

試験期間中の飼育方法 試験に使用した 200 L 黒色ポリエチレン水槽を、船上の飼育水槽と出来るだけ同じ環境に近づける意味合いで、飼育水槽内をクリーム色にペンキ（建物用ロックコート；ロックペイント株式会社）で塗装した。海水は電解処理海水を使用し、換水率は漁船の新鮮海水の換水率と同等の 1,260%/日とした（木村ら 2009）。

照明は 24 時間連続照明とし、その照度は 1,200~2,000 lx とした。飼育水槽内の溶存酸素濃度の低下を防ぐために、エアーストーン（セラミックエアーストーン，AS80；nitto）を用いて通気を行い、その通気量は 1.4 L/分とした。

死亡魚の測定 試験期間中に死亡した個体は、毎日 8 時と 16 時に水槽内から取り除き、全長、尾叉長、被鱗体長および体重を測定した。

飼育環境の測定 試験期間中の飼育水の水温、DO、pH を毎日 8 時と 16 時に測定した。

4.3 結果

試験 1 水温別模擬長期飼育試験 試験区ごとの結果を Table 4-1 に示した。飼育当初 25°C 区で死亡魚が若干数見られたものの、15 日目頃までは大きな差は現れなかった。しかし、その後両試験区の差が徐々に開き、試験終了時の生残率は 20°C 区 89.9~92.3%、25°C 区 78.7~83.1%となった（Table 4-1, Fig. 4-1）。試験終了時に生残していた個体を水槽ごとに 30 尾ずつ体重を測定し、試験区間で検定した結果、25°C 区の体重は 20°C 区の体重よりも有意に小さな値（ $P < 0.05$ ）を示した（Table 4-1）。試験期間中の水温および水質の飼育環境を Table 4-S1 に示した。試験設定水温は試験期間中を通して維持しており、DO は各区でほぼ同等、pH は 20°C 区が 25°C 区と比べて若干高い傾向にあり、飼育水の TAN は 25°C 区が 20°C 区と比べて高い傾向にあった（Table 4-S1）。

試験 2 水温別飢餓耐性試験 20°C 区では 22~24 日後までは生残率 90%以上を保っていたが、生残率 90%以下になった 23~25 日後からは急激に死亡が増加し、35~36 日後には生残率 50%、そして 56~57 日後にはすべての個体が死亡した（Table 4-2, Fig. 4-2）。25°C 区では 13~15 日後までは生残率 90%以上を保っていたが、生残率 90%以下になった 14~16 日後からは急激に死亡が増加し、23~24 日後には生残率 50%、そして 36 日後にはすべての個体が死亡した（Table 4-2, Fig. 4-2）。それぞれの死亡した個体は、飼育開始時の平均体重と比べると 20°C 区では約 33~34%減少しており、

25°C 区では約 34～37%減少していた (Table 4-2)。試験期間中の水温および水質の飼育環境を Table 4-S2 に示した。試験設定水温は試験期間中を通して維持しており、DO は 25°C 区で 20°C 区と比べて若干低く、pH は各区でほぼ同等であった (Table 4-S2)。

4.4 考察

小型水槽を用いた水温別模擬長期飼育試験の死亡個体は、両区とも痩せた個体が主に死亡しており、そのような個体の割合は 25°C 区で多い傾向がみられた。一方、水槽内の魚の遊泳速度などの活動性は日々の観察の中で 25°C 区が高かった。また、今回はカタクチイワシのエネルギー代謝が水温によって異なることを考慮して給餌量を調整したが、試験終了時の 25°C 区の平均体重は 20°C 区の水槽よりも有意に小さな値 ($p < 0.05$) を示した (Table 1)。これは、飼育期間中の死亡は摂餌不足が主因であると推察され、特に 25°C 区では給餌量が充分でなかった可能性が考えられた。また、同時に行っていた試験水温 20°C および 25°C における水温別飢餓耐性試験において、25°C 区では 14～16 日後から急激に死亡数が増加し (Fig. 4-2)、水温別模擬長期飼育試験の 25°C 区においても 15 日齢から死亡数が増加していることから、死亡要因は摂餌不足であると裏付けられる。

その他、配合飼料の給餌時にはカタクチイワシの遊泳速度が高まり、その結果飼育水の DO が急激に低下することも死亡の一因と考えられる。実際の漁業現場においても、餌場にてカタクチイワシを積み込み漁場に向け航海を始めたばかりの頃、すなわち高密度飼育時においては給餌後に同様の事例が報告されている (木村ら 2017)。また、給餌後 30 分間で 20°C 区では給餌前の 59～62%、25°C 区では 41～51%まで DO が低下する飼育事例があり (小田ら、未発表)、このとき酸素欠乏により死亡したと思われる個体が多数観察されている。

一方で、試験開始から 5 日経過するまでの間、両試験区においてほとんど死亡個体が見られなかったことより、短期間における無給餌条件下の水温試験 (第 2 章) 及びアンモニア耐性試験 (第 3 章) で発生した死亡個体の死因は餓死では無いことが判明

した。

試験期間中の TAN の平均値は 20°C 区では 1.5 mg/L, 25°C 区では 2.0~2.1 mg/L であり (Table 4-S1), これらの値から非解離アンモニア濃度 (以下, UIAN という。) を計算すると, 20°C 区では 0.015 mg/L, 25°C 区では 0.018 mg/L となる。Oda et al. (2021) では, UIAN による急性死亡濃度は, 15°C, 48 時間での半数致死濃度が 0.661~0.750 mg/L (UIAN), 25°C, 48 時間では 0.379~0.521 mg/L (UIAN) と推定されていることや, 0.1mg/L (UIAN) 以下であればカタクチイワシは死亡しないものと推定されている。また, 木村ら (2011) の報告でも実際の漁業現場における飼育水のアンモニア濃度は 0.011mg/L とあり, 試験結果の値は同程度であった。これらの値と比較すると本試験期間中の UIAN は極めて低く, 生残に影響を与える濃度ではなかったと考えられる。

今般の試験では, 飼育水温の上昇による生残率の変化を把握する目的があることから, 他の要因による死亡は極力さける必要がある。カタクチイワシはビブリオ病による死亡が漁業現場ではよく見られるため (木村ら 2011), 今回その予防策としてカタクチイワシで見られるビブリオ病に感受性のあるテトラサイクリン系の薬剤である OTC を週 1 回の間隔で, 配合飼料に混ぜて経口投与した。その結果, 試験期間中にビブリオ病によると思われる大きな減耗は見られず, この方法はカタクチイワシのビブリオ病対策に効果があるものと考えられた。

これまで, かつお漁場までのカタクチイワシの輸送は水温 15°C で行なわれており, 一航海 (40~50 日) の生残率が 73~87% である (木村ら 2011)。今回の試験結果から, 経済的により有利な 20°C でも, 50 日間で 89.9~92.3% の生残を保てることが可能であることが示された。この結果より, 小田ら (2018) で示された遠洋かつお一本釣り漁船における年間燃油経費を 455 万円削減 (A 重油 70 円/L : 当時 (2017 年 11 月) の価格で計算) できるとの考察については, ひきつづき支持できるものと考えられた。

一方で, 従来の飼育水温 15°C から 5°C 上昇させた 20°C とすることによりデメリットが発生する可能性もある。それは, 水温 20°C ではカタクチイワシの活動性が 15°C と比べ大幅に上がることにある。小田ら (2018) では, 水温 15°C と水温 20°C におけ

る酸素消費量の値は、それぞれ 396 mL/kg/時、702 mL/kg/時であり、約 77%程度活動性が上昇することが明らかになっている。そのため、飼育水の DO の低下、特に給餌後の DO の急激な低下（小田ら、未発表）に注意する必要がある、カタクチイワシの安全な船上飼育を達成するためには、飼育水への酸素通気が必須となることが予想される。

今後は、本試験結果を応用して、実際の漁船を用いた実証試験を行う必要がある。その際は、水温を 15°C から 20°C へ上昇させることによるエネルギー消費量の増加を補うための給餌量増加のコスト、および純酸素の通気にかかるコストについて検討していく必要がある。

4.5 引用文献

- 落合 明・田中 克（1986）新版魚類学（下）．恒星社厚生閣．東京．502-503.
- 益田 一・尼岡邦夫・荒賀忠一・上野輝瀾・吉野哲夫（1984）日本産魚類大図鑑．東海大学出版会．東京．20.
- 木村拓人・澤田克彦・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：遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）．独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター．横浜．33-37.
- 小田憲太郎・橋本博・増田賢嗣・今泉均・薄浩則・照屋和久（2018）飼育下におけるカタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性に関する研究．水産技術第 10 巻第 1 号．1-7.
- Oda, K., Hashimoto, H., Teruya, K., Dan, S., Hamasaki, K. (2021) Ammonia tolerance of Japanese anchovy *Engraulis japonicus*: Implications for cost reduction in a skipjack pole-and-line fishery. *Aquatic Animals*. 2022, AA2021-1
- 木村拓人・澤田克彦・上原崇敬・彦坂明孝・原 孝宏・佐藤晴朗・佐谷守明・大島達樹・伏島一平（2017）平成 27 年度海洋水産資源開発事業報告書（遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）．国立研究開発法人水産研究・教育機構開発調査セン

ター. 横浜. 42-55.

木村拓人・橋ヶ谷伊久生・澤田克彦・大島達樹・伏島一平（2011）平成 21 年度海洋
水産資源開発事業報告書（資源対応型：遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）.

独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター. 横浜. 29-30.

Table 4-1. 水温別模擬長期飼育試験（試験1）の概要

試験区	試験日数	水温 (°C)	溶存酸素 (mg/L)	pH	態窒素 (mg/L)	アノニア						生残率 (%)		
						試験開始時 (n=50)			試験終了時 (n=30)					
					全長 (mm)	尾叉長 (mm)	被鱗体長 (mm)	体重 (g)	全長 (mm)	尾叉長 (mm)	被鱗体長 (mm)	体重 (g)		
20°C-1		20.1±0.1 (20.0-20.2)	9.26±1.36 (6.01-12.95)	7.41±0.14 (7.09-7.69)	1.5±0.3 (1.1-2.1)	108.16±5.15 (95.33-118.66)	100.57±4.58 (90.14-109.23)	93.86±4.67 (83.35-104.32)	7.89±1.21 (4.62-10.39)	114.23±4.54 (101.71-121.33)	103.90±4.18 (93.02-110.32)	99.13±3.99 (88.50-105.33)	8.96±1.65 (5.39-12.24)	92.3 a
						20.2±0.1 (20.0-20.3)	8.79±1.72 (4.52-12.96)	7.40±0.12 (7.07-7.64)	1.5±0.2 (1.2-1.8)	111.33±5.09 (103.49-120.46)	101.73±4.55 (94.12-109.96)	96.71±4.44 (89.76-106.02)	8.56±1.60 (6.00-11.51)	
25°C-1	50	25.0±0.1 (23.9-25.0)	9.75±1.42 (4.44-12.33)	7.27±0.11 (7.01-7.54)	2.0±0.2 (1.7-2.2)	102.80±3.88 (99.39-127.08)	97.92±3.45 (91.05-115.91)	8.28±1.62 (4.76-13.19)	112.95±3.97 (99.39-127.08)	102.80±3.88 (91.05-115.91)	97.92±3.45 (86.64-111.53)	8.28±1.62 (4.76-13.19)	78.7 b	
						25.0±0.1 (24.0-25.1)	9.55±1.52 (5.21-12.76)	7.22±0.13 (6.96-7.76)	2.1±0.1 (1.9-2.4)	112.72±6.53 (99.39-127.08)	102.91±5.79 (91.05-115.91)	98.19±5.51 (86.64-111.53)	7.76±1.98 (4.76-13.19)	83.1

※a,b間において有意差ありp<0.05

Table 4-2. 水温別飢餓耐性試験（試験2）の概要

試験区	試験開始時 (n=50)					死亡時						
	水温 (°C)	溶存酸素 (mg/L)	pH	全長 (mm)	尾叉長 (mm)	被鱗体長 (mm)	体重 (g)	全滅日数 (日)	全長 (mm)	尾叉長 (mm)	被鱗体長 (mm)	体重 (g)
20°C-1	20.2±0.3	9.27±0.20	8.13±0.04					56	107.94±5.80 (93.03-120.84)	99.05±5.46 (86.60-112.54)	93.18±5.12 (80.53-105.62)	5.26±0.85 (3.35-7.86)
	20.3±0.3	9.14±0.19	8.15±0.04					57	107.10±5.54 (94.59-122.22)	98.15±5.26 (85.54-111.50)	92.48±4.94 (79.90-105.21)	5.20±0.90 (2.98-7.93)
25°C-1	25.5±0.3	8.35±0.27	8.12±0.05	108.16±5.15 (95.33-118.66)	100.57±4.58 (90.14-109.23)	93.86±4.67 (83.35-104.32)	7.89±1.21 (4.62-10.39)	36	106.36±5.81 (81.69-119.92)	97.44±5.54 (76.47-109.13)	91.79±5.07 (71.62-103.28)	4.97±0.83 (2.68-6.66)
	25.7±0.3	8.19±0.27	8.12±0.05					36	106.87±5.46 (91.99-118.23)	97.87±5.12 (84.52-109.11)	92.08±5.00 (78.87-103.27)	5.17±1.00 (2.65-7.71)

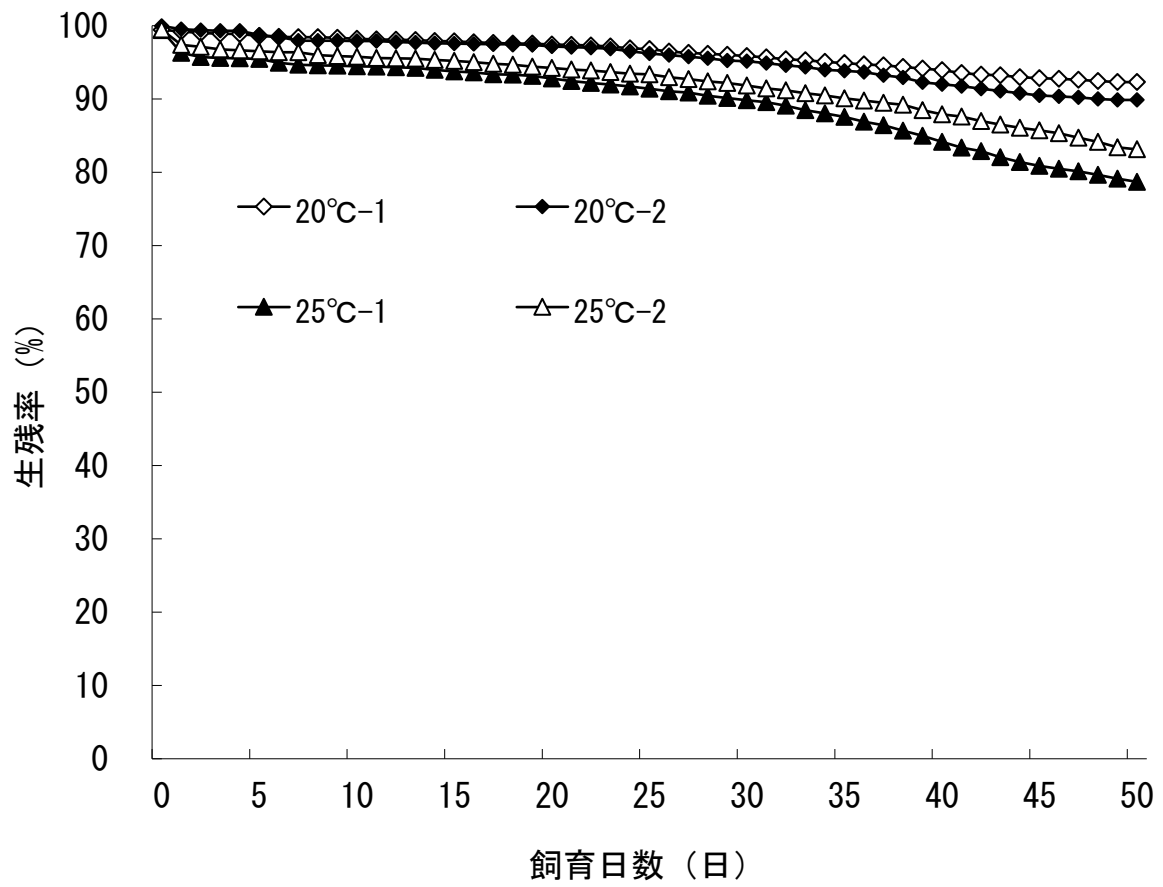


Fig. 4-1. カタクチイワシの水溫別生残率の推移 (試験 1)

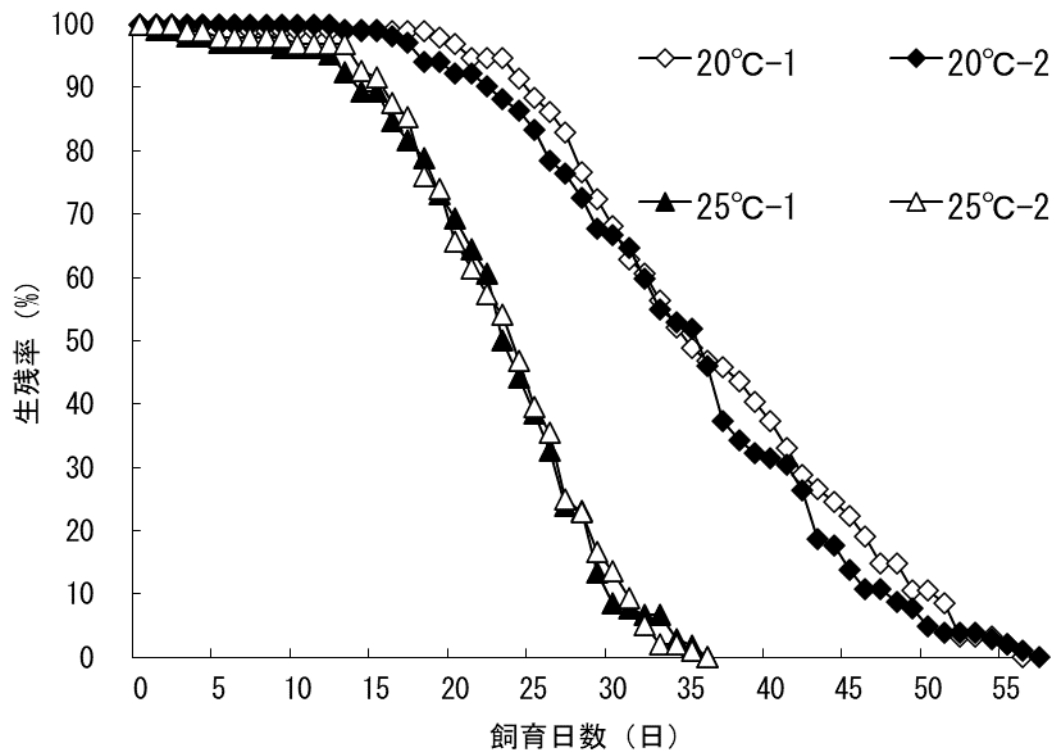


Fig. 4-2. カタクチイワシの水温別生存率の推移 (試験 2)

Table 4-S1. 水温別 (20°C, 25°C) 模擬長期飼育試験における水質環境 (試験区ごとに2水槽)

試験日数	時刻	20° C-1			アンモニア態窒素 (mg/L)	20° C-2			アンモニア態窒素 (mg/L)
		水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH		水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH	
0	8:00	17.8	7.78	7.50		17.9	8.08	7.48	
	16:00	20.0	6.40	7.34		20.1	10.32	7.36	
1	8:00	20.1	10.49	7.38	1.1	20.2	11.43	7.38	1.2
	16:00	20.1	9.52	7.32		20.2	10.49	7.32	
2	8:00	20.1	6.97	7.38		20.2	8.46	7.34	
	16:00	20.1	7.34	7.31		20.1	8.90	7.25	
3	8:00	20.1	9.29	7.59		20.2	11.79	7.50	
	16:00	20.1	9.38	7.50		20.2	12.96	7.47	
4	8:00	20.0	9.09	7.65	1.3	20.1	12.83	7.58	1.5
	16:00	20.1	8.61	7.47		20.1	11.77	7.44	
5	8:00	20.0	8.47	7.68		20.1	7.65	7.62	
	16:00	20.1	11.51	7.50		20.2	8.90	7.41	
6	8:00	20.0	11.54	7.69		20.1	9.58	7.62	
	16:00	20.1	11.71	7.51		20.1	7.43	7.39	
7	8:00	20.2	10.04	7.62		20.3	6.36	7.45	
	16:00	20.2	9.88	7.39		20.3	11.38	7.37	
8	8:00	20.1	11.63	7.57	1.4	20.2	11.90	7.49	1.3
	16:00	20.1	10.55	7.44		20.2	10.92	7.38	
9	8:00	20.1	11.65	7.60		20.2	11.71	7.55	
	16:00	20.0	10.40	7.42		20.1	10.71	7.35	
10	8:00	20.1	10.26	7.59		20.1	10.73	7.53	
	16:00	20.1	10.15	7.44		20.2	10.40	7.38	
11	8:00	20.1	10.69	7.61	1.3	20.1	10.81	7.62	1.6
	16:00	20.1	10.00	7.47		20.1	10.01	7.41	
12	8:00	20.0	10.43	7.68		20.1	9.52	7.64	
	16:00	20.0	9.85	7.47		20.1	9.21	7.43	
13	8:00	20.0	10.32	7.67		20.1	10.79	7.59	
	16:00	20.1	8.67	7.41		20.2	8.70	7.37	
14	8:00	20.1	8.99	7.61		20.1	8.75	7.57	
	16:00	20.1	8.94	7.37		20.2	8.82	7.33	
15	8:00	20.2	9.35	7.49	1.2	20.2	9.15	7.44	1.5
	16:00	20.2	8.81	7.39		20.3	8.79	7.32	
16	8:00	20.1	9.64	7.48		20.2	9.00	7.39	
	16:00	20.1	8.69	7.35		20.2	7.53	7.24	
17	8:00	20.1	9.17	7.44		20.1	8.63	7.39	
	16:00	20.1	8.51	7.29		20.2	7.56	7.23	
18	8:00	20.1	9.53	7.46	1.4	20.2	9.09	7.44	1.4
	16:00	20.0	8.59	7.12		20.1	8.25	7.17	
19	8:00	20.1	9.98	7.54		20.1	9.04	7.47	
	16:00	20.1	8.99	7.34		20.2	8.14	7.31	
20	8:00	20.1	9.99	7.61		20.1	8.86	7.56	
	16:00	20.1	8.50	7.46		20.2	7.62	7.35	
21	8:00	20.1	10.24	7.59		20.1	8.65	7.54	
	16:00	20.1	8.74	7.41		20.1	7.03	7.33	
22	8:00	20.0	10.25	7.64	1.7	20.1	8.22	7.56	1.7
	16:00	20.1	8.55	7.43		20.1	6.65	7.32	
23	8:00	20.0	8.75	7.57		20.1	6.99	7.49	
	16:00	20.1	8.31	7.42		20.1	7.34	7.38	
24	8:00	20.2	8.45	7.49		20.2	6.83	7.44	
	16:00	20.1	8.34	7.35		20.1	7.81	7.34	
25	8:00	20.2	8.16	7.40	1.2	20.3	7.94	7.45	1.2
	16:00	20.2	7.01	7.27		20.3	5.35	7.18	

26	8:00	20.1	10.00	7.49		20.2	11.30	7.53	
	16:00	20.1	8.95	7.27		20.2	9.49	7.29	
27	8:00	20.0	9.04	7.44		20.1	9.38	7.44	
	16:00	20.1	8.84	7.31		20.2	8.90	7.32	
28	8:00	20.1	9.18	7.51		20.1	9.04	7.54	
	16:00	20.1	8.96	7.36		20.2	8.53	7.38	
29	8:00	20.1	8.36	7.42	1.3	20.2	8.53	7.47	1.3
	16:00	20.1	8.31	7.32		20.2	7.97	7.33	
30	8:00	20.2	9.56	7.62		20.3	9.08	7.63	
	16:00	20.2	8.48	7.36		20.3	9.08	7.63	
31	8:00	20.1	9.30	7.51		20.2	8.62	7.53	
	16:00	20.1	8.66	7.34		20.2	7.90	7.35	
32	8:00	20.0	10.02	7.41	1.4	20.1	8.23	7.42	1.4
	16:00	20.2	8.40	7.40		20.3	7.42	7.40	
33	8:00	20.2	8.92	7.50		20.3	8.21	7.54	
	16:00	20.1	8.44	7.34		20.2	7.73	7.36	
34	8:00	20.2	8.61	7.45		20.3	7.60	7.47	
	16:00	20.1	8.29	7.25		20.2	7.09	7.21	
35	8:00	20.2	8.63	7.45		20.3	8.38	7.46	
	16:00	20.2	7.69	7.27		20.3	8.45	7.26	
36	8:00	20.2	8.62	7.46	1.7	20.3	8.52	7.39	1.6
	16:00	20.2	8.23	7.27		20.3	7.34	7.25	
37	8:00	20.1	9.76	7.42		20.2	8.55	7.45	
	16:00	20.1	8.75	7.64		20.2	8.46	7.39	
38	8:00	20.1	8.40	7.41		20.2	8.23	7.48	
	16:00	20.0	7.16	7.26		20.2	7.19	7.31	
39	8:00	20.0	7.17	7.35	1.8	20.1	7.34	7.42	1.6
	16:00	20.1	6.51	7.23		20.1	6.17	7.26	
40	8:00	20.0	7.78	7.34		20.0	7.89	7.45	
	16:00	20.1	6.94	7.18		20.1	6.54	7.26	
41	8:00	20.0	7.05	7.34		20.1	6.55	7.41	
	16:00	20.0	6.81	7.21		20.1	5.57	7.24	
42	8:00	20.1	9.10	7.38		20.2	9.32	7.44	
	16:00	20.2	9.67	7.29		20.3	11.52	7.37	
43	8:00	20.2	12.95	7.53	1.9	20.3	11.03	7.51	1.8
	16:00	20.2	11.58	7.27		20.2	9.50	7.23	
44	8:00	20.2	12.32	7.37		20.3	10.25	7.40	
	16:00	20.1	10.06	7.20		20.2	7.72	7.17	
45	8:00	20.2	10.85	7.20		20.3	8.58	7.31	
	16:00	20.2	9.85	7.09		20.3	8.30	7.07	
46	8:00	20.2	10.76	7.29	2.1	20.3	9.12	7.30	1.7
	16:00	20.2	9.00	7.17		20.3	7.71	7.21	
47	8:00	20.0	10.35	7.33		20.2	7.69	7.32	
	16:00	20.1	10.37	7.21		20.2	7.94	7.22	
48	8:00	20.0	12.36	7.39		20.1	8.84	7.44	
	16:00	20.1	10.55	7.17		20.2	6.27	7.16	
49	8:00	20.1	11.24	7.37		20.2	12.91	7.45	
	16:00	20.1	10.14	7.24		20.2	12.58	7.32	
50	8:00	20.2	9.73	7.28		20.3	11.64	7.39	
平均		20.1	9.30	7.41	1.5	20.2	8.88	7.40	1.5
標準偏差		0.1	1.33	0.14	0.3	0.1	1.67	0.12	0.2

試験日数	時刻	25° C-1			アンモニア態窒素 (mg/L)	25° C-2			アンモニア態窒素 (mg/L)
		水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH		水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH	
0	8:00	17.8	6.35	7.48		17.8	7.17	7.61	
	16:00	23.9	6.77	7.15		24.0	7.69	7.13	
1	8:00	25.0	9.43	7.08	1.8	25.0	10.11	7.00	2.2
	16:00	25.0	8.38	7.01		24.9	12.28	6.99	
2	8:00	25.0	7.20	7.08		25.0	10.82	7.02	
	16:00	25.0	8.30	7.03		25.0	10.66	6.96	
3	8:00	25.0	9.37	7.12		25.0	9.93	7.07	
	16:00	25.0	10.46	7.23		25.0	10.77	7.13	
4	8:00	25.0	11.23	7.28	2.1	25.0	10.58	7.76	2.3
	16:00	25.0	10.95	7.20		25.1	10.60	7.11	
5	8:00	24.9	11.13	7.30		25.0	11.39	7.29	
	16:00	25.0	10.64	7.16		25.0	10.01	7.14	
6	8:00	25.0	10.98	7.30		24.9	10.67	7.28	
	16:00	25.0	11.80	7.18		24.9	10.87	7.14	
7	8:00	25.0	11.81	7.31		24.8	11.05	7.29	
	16:00	25.0	10.92	7.11		25.0	8.80	7.08	
8	8:00	24.9	11.97	7.28	2.0	25.0	9.68	7.22	2.0
	16:00	25.0	11.16	7.19		24.9	11.14	7.11	
9	8:00	25.0	11.47	7.31		25.0	11.20	7.24	
	16:00	25.0	10.51	7.12		24.9	11.12	7.13	
10	8:00	25.0	11.57	7.34		25.1	11.66	7.28	
	16:00	25.0	9.42	7.19		25.0	10.27	7.10	
11	8:00	25.0	10.24	7.31	1.9	25.0	11.11	7.28	2.0
	16:00	25.0	9.71	7.22		25.0	8.98	7.10	
12	8:00	25.0	11.05	7.38		25.0	11.21	7.27	
	16:00	25.0	9.85	7.24		24.9	10.27	7.17	
13	8:00	25.0	11.66	7.38		25.0	11.37	7.30	
	16:00	25.0	9.82	7.24		25.0	9.18	7.17	
14	8:00	25.0	10.19	7.43		25.0	10.52	7.37	
	16:00	25.0	9.19	7.13		24.9	8.91	7.07	
15	8:00	25.0	9.96	7.30	1.7	24.9	9.08	7.17	2.0
	16:00	24.9	9.13	7.22		25.0	7.76	7.11	
16	8:00	25.0	10.70	7.28		25.0	9.85	7.19	
	16:00	25.0	9.35	7.19		25.0	9.14	7.12	
17	8:00	25.0	10.73	7.23		25.0	9.43	7.18	
	16:00	25.0	9.73	7.16		25.0	8.96	7.09	
18	8:00	25.0	11.42	7.30	1.9	24.9	10.18	7.34	2.1
	16:00	25.0	9.69	7.25		24.8	9.12	7.31	
19	8:00	25.0	10.56	7.42		25.0	10.89	7.34	
	16:00	25.0	8.77	7.24		25.0	10.92	7.16	
20	8:00	25.0	10.19	7.45		25.0	11.81	7.39	
	16:00	25.0	8.81	7.30		25.0	10.40	7.23	
21	8:00	25.0	10.01	7.42		25.0	12.30	7.37	
	16:00	25.0	8.18	7.27		25.0	10.09	7.16	
22	8:00	25.0	9.54	7.49	2.1	25.0	11.71	7.41	2.0
	16:00	25.0	7.66	7.25		25.0	10.03	7.19	
23	8:00	25.0	8.28	7.39		25.0	10.70	7.34	
	16:00	25.0	6.67	7.20		25.0	9.11	7.17	
24	8:00	25.0	7.52	7.33		25.0	8.91	7.32	
	16:00	25.0	8.84	7.25		25.0	11.90	7.19	
25	8:00	25.0	10.08	7.36	1.8	25.0	12.76	7.35	2.1
	16:00	25.0	7.51	7.11		25.0	10.02	7.06	

26	8:00	25.0	11.33	7.35		24.9	11.68	7.30	
	16:00	25.0	10.12	7.20		25.0	9.85	7.15	
27	8:00	25.0	10.79	7.35		25.0	10.72	7.31	
	16:00	25.0	9.51	7.21		24.9	9.04	7.16	
28	8:00	24.8	10.88	7.48		24.9	10.25	7.42	
	16:00	25.0	9.58	7.26		25.0	8.38	7.18	
29	8:00	25.0	9.82	7.37	1.8	25.0	8.94	7.33	1.9
	16:00	25.0	8.25	7.20		24.9	7.04	7.13	
30	8:00	25.0	10.50	7.54		25.0	9.21	7.43	
	16:00	25.0	8.24	7.23		24.9	7.12	7.14	
31	8:00	25.0	10.73	7.45		25.0	9.21	7.37	
	16:00	25.0	9.33	7.23		24.9	7.86	7.18	
32	8:00	25.0	10.84	7.52	1.9	24.9	9.34	7.57	2.1
	16:00	25.0	10.00	7.27		25.0	7.40	7.23	
33	8:00	25.0	12.33	7.44		25.0	9.14	7.36	
	16:00	25.0	10.36	7.23		24.9	7.57	7.18	
34	8:00	25.0	12.12	7.43		25.0	10.14	7.41	
	16:00	25.0	10.35	7.16		25.0	8.02	7.12	
35	8:00	25.0	11.04	7.40		25.0	9.39	7.35	
	16:00	25.0	9.53	7.20		25.0	10.07	7.16	
36	8:00	25.0	10.12	7.36	1.9	25.0	10.68	7.33	2.1
	16:00	25.0	9.65	7.19		24.9	9.49	7.13	
37	8:00	25.0	10.60	7.38		24.9	10.70	7.33	
	16:00	24.8	9.32	7.25		24.9	9.52	7.21	
38	8:00	25.0	10.50	7.42		25.0	9.90	7.35	
	16:00	25.0	9.86	7.22		25.0	9.35	7.21	
39	8:00	24.9	8.80	7.30	2.1	25.0	9.37	7.33	2.1
	16:00	25.0	7.66	7.17		24.9	7.13	7.12	
40	8:00	24.8	9.10	7.33		25.0	9.00	7.30	
	16:00	25.0	8.28	7.17		24.9	8.04	7.19	
41	8:00	25.0	8.71	7.33		24.9	8.78	7.33	
	16:00	25.0	7.96	7.18		25.0	7.67	7.15	
42	8:00	25.0	9.86	7.39		25.0	9.22	7.32	
	16:00	25.0	6.54	7.20		24.9	7.04	7.18	
43	8:00	25.0	11.86	7.44	2.2	24.9	10.19	7.38	2.3
	16:00	25.0	10.02	7.20		25.0	8.87	7.14	
44	8:00	25.0	10.98	7.33		25.0	9.02	7.26	
	16:00	25.0	8.52	7.11		25.0	7.22	7.03	
45	8:00	25.0	9.51	7.23		25.0	8.09	7.18	
	16:00	25.0	8.55	7.03		25.0	7.07	6.98	
46	8:00	25.0	10.93	7.30	2.2	25.0	8.67	7.22	2.4
	16:00	25.0	8.89	7.13		25.0	6.18	7.07	
47	8:00	25.0	11.10	7.30		25.0	7.16	7.19	
	16:00	25.0	10.22	7.18		25.0	6.16	7.06	
48	8:00	25.0	11.66	7.37		25.0	7.01	7.31	
	16:00	25.0	9.35	7.11		25.0	9.26	7.02	
49	8:00	25.0	9.70	7.30		25.0	12.04	7.30	
	16:00	25.0	8.80	7.13		25.0	10.50	7.08	
50	8:00	25.0	8.81	7.29		25.0	10.19	7.22	
平均		24.9	9.79	7.27	2.0	24.9	9.59	7.22	2.1
標準偏差		0.1	1.29	0.11	0.2	0.1	1.46	0.13	0.1

Table 4-S2. 水温別（20°C, 25°C）飢餓耐性試験における水質環境（試験区ごとに2水槽）

試験日数	時刻	20° C-1			20° C-2		
		水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH	水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH
0	8:00						
	16:00	20.2	9.13	8.07	20.4	8.76	8.05
1	8:00	21.0	9.36	8.08	21.0	8.91	8.06
	16:00	19.8	9.13	8.07	19.9	9.03	8.08
2	8:00	19.5	9.64	8.14	20.0	9.27	8.13
	16:00	19.3	9.87	8.12	19.8	9.30	8.12
3	8:00	19.3	9.54	8.15	19.8	9.32	8.15
	16:00	20.5	9.40	8.11	20.5	9.03	8.12
4	8:00	20.0	9.59	8.18	20.5	9.22	8.19
	16:00	21.0	9.11	8.13	21.0	8.96	8.13
5	8:00	20.5	9.36	8.18	20.5	9.03	8.18
	16:00	20.5	9.15	8.14	20.5	8.95	8.14
6	8:00	20.5	9.11	8.17	20.5	8.89	8.17
	16:00	21.0	8.88	8.14	21.0	8.61	8.14
7	8:00	21.0	9.18	8.16	21.5	8.94	8.16
	16:00	21.0	9.16	8.13	21.0	8.85	8.13
8	8:00	20.5	9.32	8.10	20.4	9.08	8.10
	16:00	20.5	9.22	8.11	20.5	9.12	8.12
9	8:00	20.0	9.45	8.15	19.9	9.20	8.16
	16:00	20.5	9.32	8.10	20.5	9.09	8.11
10	8:00	20.5	9.34	8.13	20.5	9.50	8.13
	16:00	20.7	8.98	8.11	20.7	8.85	8.11
11	8:00	20.0	9.16	8.19	20.0	9.04	8.20
	16:00	20.5	9.17	8.17	20.5	8.94	8.17
12	8:00	20.5	8.98	8.17	20.5	8.82	8.17
	16:00	21.0	8.89	8.10	21.0	8.73	8.11
13	8:00	20.5	9.19	8.15	20.3	8.93	8.15
	16:00	20.5	9.12	8.09	20.5	8.86	8.10
14	8:00	20.0	9.22	8.13	20.0	9.03	8.14
	16:00	20.5	9.04	8.09	20.7	8.81	8.09
15	8:00	20.8	9.24	8.10	20.5	8.84	8.10
	16:00	20.3	8.92	8.06	20.3	8.79	8.07
16	8:00	20.3	9.39	8.06	20.5	9.00	8.07
	16:00	20.3	8.84	8.06	20.5	8.88	8.06
17	8:00	20.3	9.31	8.05	20.5	9.15	8.06
	16:00	20.3	9.52	8.04	20.5	9.20	8.06
18	8:00	20.0	9.52	8.08	20.3	9.31	8.09
	16:00	20.0	9.14	8.06	20.5	9.11	8.04
19	8:00	19.5	9.56	8.14	19.5	9.27	8.14
	16:00	20.0	9.34	8.09	20.0	9.11	8.11
20	8:00	20.0	9.64	8.17	20.0	8.99	8.17
	16:00	20.0	9.47	8.12	20.0	9.21	8.13
21	8:00	19.5	9.05	8.18	19.8	9.34	8.18
	16:00	20.0	8.73	8.16	20.0	9.21	8.16
22	8:00	20.0	9.67	8.21	20.5	9.18	8.19
	16:00	20.5	9.33	8.18	20.0	9.13	8.19
23	8:00	20.5	9.30	8.24	20.5	9.18	8.21
	16:00	20.5	9.13	8.16	20.5	9.00	8.17
24	8:00	20.5	9.05	8.14	20.5	8.95	8.13
	16:00	20.0	9.06	8.10	20.0	8.95	8.11
25	8:00	20.0	9.06	8.11	20.0	8.96	8.11
	16:00	20.0	9.15	8.10	20.0	9.03	8.11

26	8:00	20.0	9.47	8.12	20.0	9.13	8.13
	16:00	20.0	9.13	8.10	20.2	8.88	8.10
27	8:00	20.2	9.31	8.13	20.2	9.07	8.14
	16:00	20.5	9.21	8.12	20.3	9.03	8.13
28	8:00	20.0	9.23	8.18	20.0	9.04	8.19
	16:00	20.2	9.11	8.13	20.2	8.98	8.15
29	8:00	20.0	9.31	8.14	20.0	9.15	8.15
	16:00	20.2	9.14	8.11	20.5	9.04	8.12
30	8:00	20.2	9.13	8.15	20.2	9.01	8.17
	16:00	20.2	9.27	8.14	20.3	9.08	8.15
31	8:00	20.0	9.54	8.19	20.0	9.31	8.19
	16:00	20.0	9.32	8.17	20.0	9.14	8.17
32	8:00	20.0	9.37	8.22	20.0	9.21	8.22
	16:00	20.0	9.41	8.19	20.2	9.09	8.21
33	8:00	20.1	9.18	8.18	20.2	9.08	8.19
	16:00	20.6	9.11	8.16	20.7	9.01	8.16
34	8:00	20.5	9.28	8.09	20.2	8.97	8.12
	16:00	20.8	8.49	8.04	20.3	9.01	8.13
35	8:00	20.3	9.17	8.10	20.0	9.14	8.15
	16:00	20.3	9.24	8.08	20.0	9.08	8.12
36	8:00	20.5	9.39	8.09	20.0	9.29	8.16
	16:00	20.4	9.34	8.13	20.0	9.33	8.14
37	8:00	20.0	9.58	8.13	20.0	9.15	8.15
	16:00	20.0	9.19	8.15	20.2	9.10	8.13
38	8:00	20.4	9.65	8.18	20.5	9.40	8.16
	16:00	20.5	9.54	8.16	20.0	9.27	8.14
39	8:00	20.0	9.34	8.14	20.5	9.25	8.14
	16:00	20.0	9.29	8.09	20.5	9.15	8.10
40	8:00	20.5	9.33	8.14	20.5	9.30	8.14
	16:00	20.0	9.23	8.08	20.0	9.20	8.10
41	8:00	20.2	9.30	8.16	20.2	9.31	8.15
	16:00	20.3	9.23	8.11	20.3	9.18	8.12
42	8:00	20.1	9.43	8.13	20.0	9.24	8.13
	16:00	20.2	9.35	8.16	20.0	9.16	8.16
43	8:00	20.3	9.34	8.15	20.3	9.27	8.17
	16:00	20.2	9.24	8.08	20.5	9.21	8.13
44	8:00	20.2	9.28	8.06	20.0	9.24	8.15
	16:00	20.5	9.25	8.08	20.7	9.20	8.13
45	8:00	20.1	9.43	8.10	20.2	9.34	8.16
	16:00	20.1	9.34	8.12	20.3	9.28	8.17
46	8:00	20.0	9.33	8.08	20.1	9.36	8.15
	16:00	20.0	9.27	8.07	20.0	9.24	8.12
47	8:00	20.2	9.31	8.13	20.1	9.35	8.16
	16:00	20.2	9.24	8.11	20.1	9.23	8.12
48	8:00	20.1	9.37	8.15	20.1	9.28	8.17
	16:00	20.2	9.24	8.12	20.2	9.22	8.13
49	8:00	20.3	9.35	8.11	20.4	9.37	8.20
	16:00	20.2	9.22	8.13	20.3	9.33	8.15
50	8:00	20.2	9.30	8.10	20.3	9.24	8.22
	16:00	20.2	9.17	8.14	20.3	9.15	8.17
51	8:00	20.2	9.34	8.11	20.2	9.35	8.21
	16:00	20.2	9.31	8.15	20.3	9.32	8.19
52	8:00	20.2	9.38	8.17	20.4	9.41	8.25
	16:00	20.1	9.32	8.13	20.2	9.35	8.21

53	8:00	20.3	9.41	8.13	20.3	9.38	8.22
	16:00	20.1	9.33	8.13	20.1	9.29	8.16
54	8:00	20.1	9.34	8.14	20.1	9.34	8.15
	16:00	20.1	9.32	8.15	20.2	9.31	8.15
55	8:00	20.0	9.41	8.13	20.1	9.61	8.22
	16:00	20.0	9.35	8.13	20.1	9.49	8.21
56	8:00	20.1	9.55	8.15	20.2	9.54	8.20
	16:00				20.1	9.49	8.23
57	8:00				20.2	9.52	8.23
	16:00						
平均		20.2	9.27	8.13	20.3	9.14	8.15
標準偏差		0.3	0.20	0.04	0.3	0.19	0.04

試験日数	時刻	25° C-1			25° C-2		
		水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH	水温 (° C)	溶存酸素 (mg/L)	pH
0	8:00						
	16:00	25.0	8.07	8.00	25.0	7.95	7.98
1	8:00	26.0	8.19	8.01	26.0	7.97	8.01
	16:00	24.2	8.12	8.05	24.5	8.04	8.05
2	8:00	24.0	8.66	8.09	24.5	8.38	8.07
	16:00	25.2	8.19	8.08	25.5	8.07	8.07
3	8:00	25.3	8.22	8.10	25.5	8.17	8.10
	16:00	25.5	8.30	8.10	25.5	8.10	8.08
4	8:00	26.0	8.39	8.12	26.0	8.10	8.09
	16:00	25.5	8.02	8.09	26.0	7.91	8.08
5	8:00	25.5	8.11	8.13	25.5	8.02	8.13
	16:00	25.5	8.10	8.10	25.5	8.04	8.09
6	8:00	25.5	8.27	8.10	26.0	8.13	8.11
	16:00	25.5	8.02	8.09	25.5	8.00	8.09
7	8:00	25.5	8.06	8.11	26.0	8.04	8.10
	16:00	25.5	8.10	8.09	25.5	7.97	8.09
8	8:00	25.3	8.04	8.06	25.6	7.99	8.07
	16:00	25.3	8.16	8.10	25.5	8.08	8.09
9	8:00	25.4	8.16	8.12	25.5	8.03	8.12
	16:00	25.5	8.35	8.06	25.5	8.02	8.06
10	8:00	25.5	8.17	8.11	25.5	7.85	8.10
	16:00	25.5	8.04	8.09	25.9	7.90	8.07
11	8:00	25.5	7.97	8.16	26.0	7.91	8.16
	16:00	25.5	8.11	8.14	25.5	7.86	8.13
12	8:00	25.5	8.10	8.14	25.5	7.90	8.13
	16:00	25.5	8.22	8.09	25.5	7.94	8.09
13	8:00	25.8	8.06	8.13	25.5	7.82	8.12
	16:00	25.8	7.91	8.08	25.5	7.89	8.09
14	8:00	25.5	8.06	8.11	25.5	7.87	8.10
	16:00	25.5	8.15	8.06	25.2	7.90	8.06
15	8:00	25.3	7.90	8.07	25.1	7.83	8.07
	16:00	25.5	7.94	8.07	25.5	7.74	8.07
16	8:00	25.5	8.18	8.05	25.5	7.94	8.04
	16:00	25.5	8.05	8.03	25.5	7.88	8.03
17	8:00	25.5	8.37	8.05	25.5	8.06	8.04
	16:00	26.0	8.16	8.06	26.0	7.92	8.05
18	8:00	26.0	8.24	8.09	26.0	8.05	8.07
	16:00	26.0	8.16	8.08	26.0	8.12	8.07
19	8:00	25.5	8.44	8.13	25.5	8.22	8.14
	16:00	25.5	8.24	8.11	25.5	8.09	8.10
20	8:00	25.5	8.36	8.14	25.5	8.07	8.14
	16:00	25.0	8.23	8.12	25.5	8.01	8.13

21	8:00	25.5	8.38	8.15	25.8	8.12	8.15
	16:00	25.5	8.28	8.14	26.0	8.10	8.14
22	8:00	25.5	8.48	8.17	26.0	8.15	8.17
	16:00	25.5	8.50	8.13	26.0	8.18	8.15
23	8:00	25.5	8.40	8.18	26.0	8.19	8.18
	16:00	26.0	8.23	8.17	26.0	8.10	8.16
24	8:00	25.8	8.35	8.13	25.8	8.28	8.13
	16:00	25.5	8.68	8.13	25.5	8.27	8.12
25	8:00	25.5	8.75	8.13	25.8	8.32	8.13
	16:00	25.5	8.39	8.13	26.0	8.36	8.13
26	8:00	25.7	8.59	8.14	26.0	8.43	8.14
	16:00	25.5	8.50	8.12	25.6	8.31	8.12
27	8:00	25.8	8.97	8.14	26.0	8.45	8.15
	16:00	25.6	8.54	8.14	25.8	8.44	8.14
28	8:00	25.5	8.50	8.19	25.8	8.42	8.19
	16:00	25.5	8.81	8.16	25.8	8.47	8.16
29	8:00	25.5	8.53	8.17	25.8	8.48	8.17
	16:00	25.8	8.57	8.15	25.8	8.50	8.15
30	8:00	25.5	8.77	8.18	25.6	8.58	8.18
	16:00	25.0	8.62	8.18	25.8	8.57	8.17
31	8:00	25.2	8.72	8.21	25.7	8.66	8.21
	16:00	25.6	8.85	8.19	25.8	8.66	8.19
32	8:00	25.2	8.69	8.23	25.8	8.61	8.22
	16:00	25.3	8.64	8.22	25.8	8.58	8.22
33	8:00	25.5	8.65	8.20	25.8	8.61	8.20
	16:00	25.2	8.53	8.18	25.5	8.53	8.18
34	8:00	25.2	8.73	8.14	25.7	8.67	8.14
	16:00	25.3	8.63	8.10	25.8	8.61	8.10
35	8:00	25.5	8.69	8.14	25.8	8.66	8.15
	16:00	25.1	8.64	8.13	25.2	8.61	8.12
36	8:00	25.3	8.72	8.14	25.8	8.71	8.14
	16:00						
平均		25.5	8.35	8.12	25.7	8.19	8.12
標準偏差		0.3	0.27	0.05	0.3	0.27	0.05

Table 4-S3. 水温別 (20°C, 25°C) 模擬長期飼育試験における試験開始時, 終了時のカタクチイワシの測定記録

試験開始時

番号	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	110.35	99.99	93.17	7.19
2	115.51	101.49	99.14	9.55
3	98.53	93.52	85.24	6.67
4	107.90	100.16	94.31	8.08
5	98.32	91.94	86.35	5.67
6	107.97	97.49	90.81	7.67
7	117.06	107.87	101.49	10.39
8	103.53	94.84	89.49	7.33
9	108.51	100.33	94.90	7.76
10	103.84	99.56	90.30	6.03
11	107.89	98.68	91.85	8.14
12	110.11	101.11	94.49	7.11
13	118.66	109.23	104.32	9.97
14	105.27	98.38	91.27	6.93
15	104.16	97.06	91.22	7.76
16	111.95	101.49	96.32	7.13
17	112.73	107.25	100.36	8.97
18	108.68	99.83	93.58	8.78
19	105.08	96.74	89.16	6.35
20	106.26	99.67	92.47	8.01
21	104.39	101.40	95.84	8.59
22	95.33	90.14	83.35	4.62
23	103.32	96.00	89.89	6.39
24	101.21	93.95	88.33	7.09
25	113.42	103.00	97.29	8.56
26	114.13	107.78	99.43	9.68
27	104.83	96.28	90.78	6.92
28	110.01	107.51	101.60	9.80
29	104.10	95.89	88.91	7.25
30	109.75	102.23	93.40	7.27
31	101.45	95.60	86.66	6.44
32	112.64	106.40	96.96	9.64
33	112.53	100.27	95.27	8.38
34	105.49	99.84	91.41	7.05
35	116.68	105.18	99.98	8.81
36	110.74	102.00	95.88	8.57
37	113.85	108.37	98.65	8.64
38	106.40	95.81	90.18	7.54
39	104.37	100.80	92.60	7.22
40	110.51	102.83	97.67	9.33
41	108.42	104.04	96.67	8.93
42	106.85	100.95	92.49	7.55
43	104.68	97.74	89.98	6.90
44	111.19	102.94	96.64	9.00
45	110.51	103.79	96.18	8.61
46	116.43	108.81	100.94	8.19
47	106.64	100.91	94.46	7.78
48	104.70	97.06	88.82	6.89
49	115.51	106.30	99.77	9.36
50	105.58	98.19	92.89	8.10
平均	108.16	100.57	93.86	7.89
標準偏差	5.15	4.58	4.67	1.21
最大	118.66	109.23	104.32	10.39
最小	95.33	90.14	83.35	4.62

試験終了時
20° C-1

番号	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	120.12	109.36	104.01	8.51
2	115.63	104.97	99.01	7.94
3	117.91	105.28	102.19	8.97
4	110.66	100.52	95.73	8.90
5	101.71	93.02	88.50	5.65
6	115.96	104.38	98.54	9.45
7	120.43	108.02	104.63	11.12
8	109.10	100.81	95.88	8.01
9	113.16	104.08	99.58	10.44
10	119.36	108.96	103.92	12.22
11	112.83	102.96	98.10	8.29
12	113.07	97.64	94.80	7.17
13	108.78	98.52	93.65	7.85
14	113.83	102.45	99.15	8.69
15	110.19	100.60	96.65	8.25
16	109.98	100.26	95.82	7.81
17	121.33	110.32	105.33	12.24
18	111.19	100.82	96.01	9.75
19	111.91	102.26	97.49	7.75
20	115.38	105.90	101.01	11.19
21	113.05	104.35	99.40	9.91
22	115.79	105.93	100.19	10.56
23	109.11	99.29	93.91	7.96
24	114.15	104.94	100.80	5.39
25	115.95	106.50	100.99	10.22
26	110.10	100.57	95.73	7.05
27	120.37	110.27	103.54	9.98
28	119.62	109.11	104.87	8.78
29	118.99	107.73	102.34	9.32
30	117.14	107.26	102.07	9.41
平均	114.23	103.90	99.13	8.96
標準偏差	4.54	4.18	3.99	1.65
最大	121.33	110.32	105.33	12.24
最小	101.71	93.02	88.50	5.39

試験終了時
20° C-2

番号	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	113.66	104.31	99.26	10.20
2	112.90	102.67	98.12	8.13
3	113.92	105.35	99.79	11.51
4	116.88	107.34	101.83	9.63
5	109.88	99.97	97.19	8.49
6	104.72	94.12	90.77	6.86
7	110.46	101.12	96.08	8.36
8	103.49	96.17	89.76	6.00
9	111.06	103.25	97.32	7.92
10	105.29	97.65	92.95	7.57
11	112.93	103.65	97.79	10.66
12	115.22	106.03	100.20	10.96
13	113.73	104.83	98.50	8.71
14	109.13	100.58	93.63	8.77
15	108.95	98.66	93.38	7.16
16	103.62	95.87	91.43	6.40
17	115.86	104.47	100.88	9.02
18	104.18	95.42	89.97	7.03
19	120.30	109.14	104.22	10.98
20	107.58	100.28	93.07	6.34
21	119.50	109.96	103.09	10.05
22	106.83	95.15	92.09	7.28
23	109.25	99.24	95.63	8.05
24	120.46	109.62	106.02	11.04
25	105.80	96.75	90.85	6.41
26	116.81	104.49	100.12	10.42
27	118.25	106.60	101.91	9.19
28	111.42	101.24	96.20	7.27
29	106.99	97.42	94.02	7.92
30	110.75	100.63	95.28	8.61
平均	111.33	101.73	96.71	8.56
標準偏差	5.09	4.55	4.44	1.60
最大	120.46	109.96	106.02	11.51
最小	103.49	94.12	89.76	6.00

試験終了時
25° C-1

番号	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	114.82	104.86	100.52	7.65
2	116.25	106.82	101.58	7.61
3	107.51	98.90	94.00	7.38
4	108.41	98.61	93.18	8.08
5	108.52	97.69	94.92	7.89
6	109.95	99.86	95.57	6.58
7	114.18	105.15	99.26	10.41
8	117.32	109.38	102.91	7.69
9	116.13	106.34	100.79	9.48
10	120.95	109.68	103.23	8.48
11	112.60	102.33	97.17	6.11
12	108.63	97.69	94.21	5.94
13	110.41	99.58	96.44	8.13
14	112.41	102.32	97.64	9.00
15	112.11	102.50	96.27	7.68
16	106.73	96.44	93.34	7.23
17	118.48	107.41	103.28	9.48
18	116.92	105.80	101.42	9.80
19	109.45	98.04	93.64	6.76
20	115.76	105.09	100.63	9.99
21	115.18	105.32	98.80	10.30
22	114.02	104.36	99.17	9.30
23	110.07	100.41	95.42	5.05
24	108.74	98.07	94.18	8.36
25	119.05	107.50	103.72	11.80
26	113.94	104.30	98.72	9.57
27	110.43	100.70	95.08	9.13
28	118.45	106.99	101.69	10.72
29	107.42	98.29	93.03	5.82
30	113.64	103.48	97.81	7.00
平均	112.95	102.80	97.92	8.28
標準偏差	3.97	3.88	3.45	1.62
最大	120.95	109.68	103.72	11.80
最小	106.73	96.44	93.03	5.05

試験終了時
25° C-2

番号	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	107.57	98.85	94.34	6.56
2	112.32	102.13	98.11	7.88
3	113.97	106.22	100.82	9.05
4	116.39	106.34	101.48	9.65
5	114.34	103.94	98.95	7.57
6	116.45	107.00	100.58	11.64
7	114.10	105.67	99.47	7.46
8	118.61	107.88	104.14	9.34
9	120.09	109.03	104.80	8.23
10	118.25	106.89	102.66	8.81
11	120.35	109.03	103.82	9.48
12	118.32	107.14	103.72	8.20
13	116.55	105.52	100.61	9.05
14	99.39	91.05	86.64	6.18
15	107.62	97.40	93.64	4.76
16	106.40	96.37	92.41	6.23
17	109.71	99.15	96.50	7.18
18	102.48	94.10	88.95	5.88
19	105.66	95.82	92.94	5.00
20	103.35	93.77	90.60	5.15
21	107.56	99.49	94.38	5.50
22	106.04	98.54	92.37	6.10
23	127.08	115.91	111.53	13.19
24	116.40	105.79	100.89	8.76
25	114.71	106.06	99.92	8.41
26	108.90	98.60	93.42	5.75
27	120.43	109.49	102.96	7.70
28	106.30	98.33	95.04	5.80
29	119.53	107.92	102.53	9.82
30	112.78	103.73	97.56	8.44
平均	112.72	102.91	98.19	7.76
標準偏差	6.53	5.79	5.51	1.98
最大	127.08	115.91	111.53	13.19
最小	99.39	91.05	86.64	4.76

Table 4-S4. 水温別 (20°C, 25°C) 飢餓耐性試験における試験開始時, 死亡時のカタク
チイワシの測定記録

試験開始時

番号	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	110.35	99.99	93.17	7.19
2	115.51	101.49	99.14	9.55
3	98.53	93.52	85.24	6.67
4	107.90	100.16	94.31	8.08
5	98.32	91.94	86.35	5.67
6	107.97	97.49	90.81	7.67
7	117.06	107.87	101.49	10.39
8	103.53	94.84	89.49	7.33
9	108.51	100.33	94.90	7.76
10	103.84	99.56	90.30	6.03
11	107.89	98.68	91.85	8.14
12	110.11	101.11	94.49	7.11
13	118.66	109.23	104.32	9.97
14	105.27	98.38	91.27	6.93
15	104.16	97.06	91.22	7.76
16	111.95	101.49	96.32	7.13
17	112.73	107.25	100.36	8.97
18	108.68	99.83	93.58	8.78
19	105.08	96.74	89.16	6.35
20	106.26	99.67	92.47	8.01
21	104.39	101.40	95.84	8.59
22	95.33	90.14	83.35	4.62
23	103.32	96.00	89.89	6.39
24	101.21	93.95	88.33	7.09
25	113.42	103.00	97.29	8.56
26	114.13	107.78	99.43	9.68
27	104.83	96.28	90.78	6.92
28	110.01	107.51	101.60	9.80
29	104.10	95.89	88.91	7.25
30	109.75	102.23	93.40	7.27
31	101.45	95.60	86.66	6.44
32	112.64	106.40	96.96	9.64
33	112.53	100.27	95.27	8.38
34	105.49	99.84	91.41	7.05
35	116.68	105.18	99.98	8.81
36	110.74	102.00	95.88	8.57
37	113.85	108.37	98.65	8.64
38	106.40	95.81	90.18	7.54
39	104.37	100.80	92.60	7.22
40	110.51	102.83	97.67	9.33
41	108.42	104.04	96.67	8.93
42	106.85	100.95	92.49	7.55
43	104.68	97.74	89.98	6.90
44	111.19	102.94	96.64	9.00
45	110.51	103.79	96.18	8.61
46	116.43	108.81	100.94	8.19
47	106.64	100.91	94.46	7.78
48	104.70	97.06	88.82	6.89
49	115.51	106.30	99.77	9.36
50	105.58	98.19	92.89	8.10
平均	108.16	100.57	93.86	7.89
標準偏差	5.15	4.58	4.67	1.21
最大	118.66	109.23	104.32	10.39
最小	95.33	90.14	83.35	4.62

死亡時
20° C-1

番号	経過日数	時刻	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	7	16:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	19	8:00	104.87	95.85	89.73	5.68
3	20	8:00	105.24	96.91	88.57	4.50
4	21	8:00	96.10	87.16	82.99	3.35
5	21	8:00	109.41	101.35	94.16	5.76
6	24	8:00	109.87	99.40	93.83	6.71
7	24	8:00	105.55	96.98	91.97	5.27
8	24	16:00	109.34	97.62	93.56	5.24
9	25	8:00	109.02	98.83	93.82	6.98
10	25	8:00	114.48	109.04	99.17	5.79
11	25	8:00	110.02	100.10	94.92	5.88
12	26	8:00	104.50	95.09	90.55	5.43
13	26	16:00	113.37	104.44	97.67	5.77
14	27	8:00	105.74	97.60	91.23	5.16
15	27	8:00	98.66	92.08	85.10	3.95
16	27	16:00	106.88	96.80	91.64	5.53
17	28	8:00	110.78	104.12	96.99	6.30
18	28	8:00	99.48	92.22	86.51	3.93
19	28	8:00	109.98	101.22	95.76	5.34
20	28	16:00	113.29	106.07	98.43	6.42
21	28	16:00	104.36	100.77	90.15	4.93
22	28	16:00	111.02	104.74	94.77	5.96
23	29	8:00	108.88	99.82	94.21	5.88
24	29	8:00	113.28	104.10	97.14	5.41
25	29	16:00	106.68	99.52	91.61	4.97
26	29	16:00	110.74	103.87	96.14	5.57
27	30	8:00	110.24	100.35	93.64	6.18
28	30	8:00	112.54	102.90	97.15	6.09
29	30	16:00	120.84	112.54	105.62	7.86
30	30	16:00	112.23	105.05	97.78	6.12
31	31	8:00	115.94	105.95	99.71	6.19
32	31	8:00	96.49	88.93	83.14	4.01
33	31	8:00	115.37	105.70	99.58	5.95
34	31	8:00	111.85	102.87	96.01	5.64
35	31	16:00	117.59	104.86	100.82	5.88
36	32	8:00	100.25	92.13	84.63	5.06
37	32	16:00	116.32	106.53	100.58	6.15
38	33	8:00	98.82	90.24	84.13	4.54
39	33	8:00	93.03	86.60	80.53	3.35
40	33	16:00	113.91	101.96	96.73	5.67
41	33	16:00	117.77	106.21	101.19	6.36
42	34	8:00	97.50	88.98	84.10	3.60
43	34	8:00	112.25	101.46	95.68	5.70
44	34	8:00	105.83	96.70	92.58	4.48
45	34	16:00	112.63	103.73	97.17	5.81
46	35	8:00	100.37	92.19	86.33	3.99
47	35	8:00	106.80	96.89	91.39	5.37
48	35	16:00	97.90	94.36	86.31	3.82
49	36	8:00	103.92	94.84	88.89	4.55
50	36	16:00	110.85	102.33	96.53	5.76
51	37	8:00	107.49	96.77	92.30	5.23
52	38	8:00	108.48	98.36	93.68	5.19
53	38	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
54	39	8:00	104.86	97.32	90.31	5.37
55	39	8:00	99.60	92.29	88.02	3.87
56	39	8:00	112.23	103.27	97.23	5.87
57	40	8:00	108.26	98.45	93.23	5.76
58	40	16:00	105.37	97.56	92.87	5.43
59	40	16:00	107.73	96.32	91.90	5.12
60	41	8:00	98.38	91.34	85.31	4.03
61	41	8:00	111.27	101.36	93.38	5.69
62	41	16:00	113.29	105.27	97.32	5.88
63	41	16:00	109.78	101.88	95.12	5.65
64	42	8:00	97.42	88.52	86.37	3.66
65	42	8:00	103.75	94.59	89.34	4.76
66	42	16:00	102.37	93.26	88.23	4.58
67	42	16:00	107.87	98.12	92.45	5.12
68	43	8:00	115.83	105.76	99.88	5.74
69	43	8:00	112.42	104.29	99.28	5.64
70	44	16:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
71	44	16:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
72	45	8:00	106.29	97.23	93.98	5.31
73	45	8:00	95.29	87.32	81.31	3.47
74	46	8:00	108.27	98.99	93.08	5.44
75	46	8:00	107.91	97.43	94.32	5.42
76	46	16:00	106.45	96.21	93.21	5.45
77	47	8:00	104.29	96.47	91.43	4.78
78	47	8:00	114.25	103.34	98.63	5.76
79	47	16:00	98.84	88.19	82.21	3.42
80	47	16:00	114.43	107.32	100.28	5.63

死亡時
20° C-2

番号	経過日数	時刻	全長(mm)	尾叉長(mm)	被鱗体長(mm)	体重(g)
1	13	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	16	16:00	100.54	93.47	87.07	4.25
3	17	8:00	108.96	98.96	92.68	6.39
4	18	8:00	109.49	97.17	91.47	5.47
5	18	16:00	98.68	89.97	83.42	3.48
6	18	16:00	105.86	95.64	89.79	4.12
7	20	8:00	109.28	99.60	91.55	5.95
8	20	16:00	110.43	101.39	94.85	6.12
9	22	8:00	97.46	87.81	83.39	4.64
10	22	16:00	114.28	107.82	101.65	5.44
11	23	8:00	99.14	91.57	85.74	5.23
12	23	8:00	105.79	94.06	90.33	4.74
13	24	16:00	101.67	93.72	87.47	4.27
14	24	16:00	109.44	100.77	93.13	5.54
15	25	8:00	105.33	96.70	90.00	4.64
16	25	8:00	100.00	92.30	85.41	4.28
17	25	16:00	106.26	98.74	94.11	5.32
18	26	8:00	111.45	102.24	96.52	6.50
19	26	8:00	108.31	100.31	93.90	5.34
20	26	8:00	107.95	98.98	93.96	5.54
21	26	16:00	118.55	106.53	102.55	6.33
22	26	16:00	113.97	103.28	99.83	5.50
23	27	8:00	101.39	91.73	87.70	5.65
24	27	8:00	103.34	93.13	87.24	4.70
25	28	8:00	103.10	98.93	88.90	5.08
26	28	8:00	114.36	103.84	98.00	7.23
27	28	8:00	106.30	101.83	92.86	4.77
28	28	16:00	104.64	97.59	90.11	4.80
29	29	8:00	103.78	95.25	89.46	4.32
30	29	8:00	100.45	91.68	86.13	4.09
31	29	8:00	112.79	103.07	96.96	5.88
32	29	16:00	114.87	107.60	97.97	6.27
33	29	16:00	107.97	100.26	95.49	6.87
34	30	16:00	112.32	104.31	97.22	6.41
35	31	8:00	110.38	100.09	94.56	5.54
36	31	16:00	110.98	100.96	95.98	5.75
37	32	8:00	100.97	89.72	91.80	5.05
38	32	8:00	112.02	101.60	95.77	7.03
39	32	16:00	113.47	102.16	98.36	6.39
40	32	16:00	103.53	94.52	89.41	4.87
41	32	16:00	101.61	92.36	87.71	4.42
42	33	8:00	105.12	95.79	90.33	5.35
43	33	8:00	106.27	100.17	91.77	6.15
44	33	8:00	104.52	96.29	89.79	5.13
45	33	8:00	114.88	107.30	99.13	6.04
46	33	8:00	109.74	100.73	94.78	5.63
47	34	8:00	112.82	102.15	97.14	5.99
48	34	16:00	116.36	107.23	100.90	6.33
49	35	8:00	108.43	100.07	93.45	5.25
50	36	8:00	100.99	90.78	85.80	5.09
51	36	8:00	110.74	100.58	95.10	5.38
52	36	8:00	96.22	87.46	81.99	3.76
53	36	8:00	99.08	89.86	85.23	3.83
54	36	16:00	107.07	99.96	94.23	5.29
55	36	16:00	106.14	100.00	91.35	4.71
56	37	8:00	111.55	100.76	94.86	5.89
57	37	8:00	98.50	88.72	84.33	3.72
58	37	8:00	104.55	92.89	88.47	4.12
59	37	8:00	110.53	99.56	94.68	5.79
60	37	16:00	107.66	98.56	93.49	4.94
61	37	16:00	111.20	101.68	96.08	5.55
62	37	16:00	101.29	91.42	87.15	4.59
63	37	16:00	113.38	103.21	97.77	6.08
64	37	16:00	103.50	95.22	89.89	4.92
65	38	8:00	101.78	93.31	87.78	4.42
66	38	16:00	111.98	105.04	96.28	5.54
67	38	16:00	110.99	101.29	96.27	5.55
68	39	8:00	108.23	99.23	94.26	5.12
69	39	16:00	109.28	100.27	95.26	5.22
70	40	8:00	110.34	100.21	96.38	4.98
71	41	8:00	96.54	91.34	86.89	3.43
72	42	8:00	109.28	99.57	94.67	5.11
73	42	8:00	95.78	87.55	79.90	3.41
74	42	16:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
75	42	16:00	108.45	100.34	95.29	5.23
76	43	8:00	107.43	99.53	95.23	5.36
77	43	8:00	110.56	100.34	96.21	5.45
78	43	8:00	109.17	99.98	94.88	5.21
79	43	8:00	95.78	88.57	85.67	3.22
80	43	8:00	122.22	111.50	105.21	7.93

81	49	8:00	104.67	95.45	91.27	4.33
82	49	8:00	114.26	107.35	101.26	5.63
83	49	16:00	109.79	99.76	94.87	5.54
84	49	16:00	106.75	97.12	94.45	4.78
85	51	8:00	113.84	104.45	98.26	5.57
86	51	16:00	110.98	100.25	95.53	5.43
87	52	8:00	113.45	104.50	98.85	5.53
88	52	8:00	107.89	99.76	93.21	4.68
89	52	16:00	106.77	96.37	91.67	4.35
90	52	16:00	108.35	99.48	94.87	5.33
91	52	16:00	109.14	100.74	94.38	5.38
92	55	8:00	112.95	102.44	95.56	5.45
93	56	8:00	109.48	98.21	93.21	4.54
94	56	8:00	110.77	100.97	93.43	5.32
	平均		107.94	99.05	93.18	5.26
	標準偏差		5.80	5.46	5.12	0.85
	最大		120.84	112.54	105.62	7.86
	最小		93.03	86.60	80.53	3.35

81	43	8:00	108.29	97.28	91.46	5.39
82	43	16:00	108.75	97.11	93.64	5.34
83	43	16:00	111.43	102.28	96.37	5.43
84	44	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
85	45	8:00	105.39	97.21	93.67	5.26
86	45	16:00	111.27	99.79	93.89	5.47
87	45	16:00	110.58	99.27	93.56	5.48
88	45	16:00	106.33	96.74	92.88	5.33
89	46	8:00	113.28	104.68	98.34	5.55
90	46	16:00	107.37	98.73	93.45	5.45
91	46	16:00	108.35	99.28	93.67	5.53
92	48	8:00	97.37	91.78	85.76	3.21
93	48	8:00	95.37	89.45	80.23	3.13
94	49	8:00	107.79	99.25	93.55	5.44
95	50	8:00	110.09	103.58	96.43	5.39
96	50	16:00	108.28	97.48	92.34	5.41
97	50	16:00	94.59	85.54	83.28	2.98
98	51	8:00	110.38	103.26	95.45	5.38
99	54	8:00	111.76	103.33	94.44	5.34
100	55	8:00	107.29	99.35	93.02	5.33
101	56	16:00	108.53	97.29	93.24	5.41
102	57	8:00	111.17	104.47	98.23	5.11
	平均		107.10	98.15	92.48	5.20
	標準偏差		5.54	5.26	4.94	0.90
	最大		122.22	111.50	105.21	7.93
	最小		94.59	85.54	79.90	2.98

死亡時 25° C-1						
番号	経過日数	時刻	全長(mm)	尾叉長(mm)	胴體長(mm)	体重(g)
1	1	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	3	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
3	5	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4	9	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	12	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
6	13	8:00	104.22	95.54	90.56	4.10
7	13	8:00	107.65	98.47	92.75	4.77
8	13	16:00	101.41	93.50	85.95	4.96
9	14	8:00	109.54	100.40	94.64	5.68
10	14	8:00	92.56	84.57	80.32	2.85
11	14	8:00	103.72	94.43	89.28	5.01
12	16	8:00	109.91	100.45	95.44	6.10
13	16	8:00	108.93	100.09	94.52	5.93
14	16	8:00	107.26	98.12	93.00	6.21
15	16	8:00	109.03	98.70	92.76	5.09
16	16	8:00	102.18	92.30	88.49	5.46
17	17	8:00	108.02	98.85	92.50	5.76
18	17	8:00	114.29	105.73	100.14	5.89
19	17	16:00	109.96	101.23	95.35	5.33
20	18	16:00	110.65	100.96	94.15	5.88
21	18	16:00	112.08	103.34	96.33	5.02
22	18	16:00	111.40	102.42	96.67	5.22
23	19	8:00	104.22	95.37	89.72	5.72
24	19	8:00	112.66	100.88	93.75	5.07
25	19	8:00	107.01	96.03	89.19	5.79
26	19	8:00	101.89	93.07	86.66	4.39
27	19	16:00	106.55	100.38	91.36	4.65
28	19	16:00	106.08	97.75	92.93	6.10
29	20	8:00	102.01	94.76	87.88	4.69
30	20	8:00	105.25	101.40	92.00	5.98
31	20	8:00	81.69	76.47	71.62	2.68
32	20	16:00	98.55	88.06	82.95	3.56
33	21	8:00	101.96	93.72	89.17	4.01
34	21	8:00	100.25	92.59	87.85	4.30
35	21	16:00	105.44	96.73	90.97	6.00
36	21	16:00	107.57	97.91	91.75	5.11
37	21	16:00	114.20	105.58	98.50	5.07
38	22	8:00	106.83	97.54	93.09	4.79
39	22	16:00	104.77	95.32	90.20	4.09
40	22	16:00	115.08	105.53	98.89	5.27
41	22	16:00	99.92	91.76	85.90	4.60
42	23	8:00	105.70	96.51	91.09	4.96
43	23	8:00	103.75	94.83	90.18	5.04
44	23	8:00	107.70	97.22	92.28	5.49
45	23	8:00	112.31	102.77	96.21	5.84
46	23	8:00	104.36	93.31	89.26	4.46
47	23	8:00	109.71	100.09	94.30	4.42
48	23	8:00	104.69	96.98	92.44	4.36
49	23	8:00	101.29	91.72	88.46	3.60
50	23	8:00	106.57	97.10	91.28	4.71
51	23	8:00	113.44	102.59	98.05	5.03
52	23	16:00	103.09	93.23	88.46	3.85
53	24	8:00	105.41	96.24	90.68	5.37
54	24	8:00	112.34	105.06	96.35	6.01
55	24	8:00	108.73	99.04	93.25	5.28
56	24	8:00	109.92	102.25	94.97	5.72
57	24	8:00	97.56	89.50	85.05	4.06
58	24	8:00	110.68	104.11	95.32	6.25
59	25	8:00	104.68	96.44	91.89	5.02
60	25	8:00	99.31	89.35	84.65	3.51
61	25	16:00	99.87	90.66	86.43	3.07
62	25	16:00	112.20	102.35	96.36	5.95
63	25	16:00	100.98	94.94	89.35	4.41
64	25	16:00	102.40	93.78	87.87	4.37
65	26	8:00	100.73	91.19	87.40	4.49
66	26	8:00	118.29	108.43	103.28	6.66
67	26	8:00	106.72	96.79	92.25	4.98
68	26	16:00	109.56	99.46	93.28	5.37
69	26	16:00	101.92	93.23	87.64	4.12
70	26	16:00	106.24	97.56	93.36	5.13
71	27	8:00	114.71	105.94	100.97	6.09
72	27	8:00	107.70	95.41	91.10	4.78
73	27	8:00	106.60	97.91	92.86	4.70
74	27	8:00	108.12	100.10	94.68	5.12
75	27	8:00	111.20	100.18	96.63	5.38
76	27	8:00	111.11	103.60	96.55	5.33
77	27	8:00	111.08	99.55	94.55	5.40
78	27	8:00	106.95	96.22	90.95	4.64
79	27	16:00	106.52	96.86	92.02	4.98
80	28	16:00	98.00	88.46	83.66	4.32

死亡時 25° C-2						
番号	経過日数	時刻	全長(mm)	尾叉長(mm)	胴體長(mm)	体重(g)
1	3	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	5	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
3	10	16:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
4	14	8:00	112.60	100.97	96.99	7.61
5	14	8:00	94.42	85.95	80.91	4.50
6	14	8:00	105.81	96.53	91.01	5.50
7	14	8:00	100.72	90.84	86.59	5.28
8	15	16:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
9	16	8:00	102.81	93.92	89.49	5.36
10	16	8:00	118.11	107.40	102.62	6.86
11	16	16:00	104.76	96.03	90.88	5.65
12	16	16:00	108.84	99.48	93.70	6.81
13	17	8:00	106.63	97.48	90.87	5.57
14	17	8:00	115.65	105.61	100.26	7.32
15	18	8:00	102.71	91.85	85.63	5.38
16	18	8:00	111.10	99.61	94.09	5.12
17	18	8:00	115.48	105.53	98.35	7.42
18	18	8:00	99.59	92.76	85.89	4.98
19	18	8:00	102.98	95.88	89.80	3.90
20	18	8:00	98.51	93.99	84.80	3.86
21	18	8:00	115.46	108.45	98.58	7.52
22	18	16:00	109.82	102.06	94.13	6.37
23	18	16:00	101.04	90.35	86.30	3.40
24	19	8:00	109.97	101.37	95.32	5.58
25	19	8:00	95.85	86.45	81.51	3.38
26	20	8:00	109.98	99.94	93.46	6.64
27	20	8:00	105.67	97.67	88.26	4.50
28	20	8:00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
29	20	16:00	96.00	89.56	82.68	3.91
30	20	16:00	109.46	100.07	94.22	6.22
31	20	16:00	103.63	94.69	88.49	4.15
32	20	16:00	112.75	104.05	96.69	4.84
33	20	16:00	109.47	100.36	94.78	6.13
34	21	8:00	102.36	94.46	88.90	4.33
35	21	8:00	113.30	101.24	97.10	5.01
36	21	16:00	99.73	91.45	86.23	4.35
37	21	16:00	103.77	94.31	89.28	5.10
38	22	8:00	107.78	95.59	91.57	4.91
39	22	8:00	94.10	86.00	80.69	3.59
40	22	8:00	108.71	99.41	94.98	5.93
41	22	8:00	107.02	99.70	92.00	4.76
42	23	8:00	109.39	99.13	93.62	4.90
43	23	16:00	111.16	100.59	95.46	6.51
44	23	16:00	111.51	101.34	96.86	5.31
45	24	8:00	108.39	98.39	92.66	5.65
46	24	8:00	105.36	97.71	90.80	4.66
47	24	8:00	107.22	97.26	90.75	5.53
48	24	8:00	107.31	97.86	92.66	4.89
49	24	8:00	100.54	94.22	87.18	4.57
50	24	8:00	109.32	100.51	94.80	5.14
51	24	16:00	112.25	102.06	96.48	6.01
52	25	8:00	103.41	94.74	89.91	4.79
53	25	8:00	100.38	92.88	85.55	4.77
54	25	8:00	104.87	97.38	91.01	4.61
55	25	8:00	106.05	100.64	92.17	4.86
56	25	8:00	111.71	103.61	96.99	5.61
57	25	16:00	105.42	96.95	91.14	6.08
58	25	16:00	104.53	95.90	90.03	4.63
59	26	8:00	111.65	104.06	97.57	5.04
60	26	8:00	110.67	101.83	96.36	5.50
61	26	8:00	106.70	97.47	93.23	5.07
62	26	8:00	109.65	99.19	96.16	6.46
63	27	8:00	108.15	97.83	93.84	4.49
64	27	8:00	109.61	99.15	94.43	4.97
65	27	8:00	105.77	94.90	90.60	4.96
66	27	8:00	100.46	92.77	86.00	3.71
67	27	8:00	99.38	89.89	86.33	3.99
68	27	8:00	105.09	97.53	91.98	5.06
69	27	8:00	107.11	96.46	91.67	4.68
70	27	8:00	97.39	87.95	81.24	3.15
71	27	8:00	108.19	97.69	91.95	4.61
72	27	16:00	114.20	103.49	99.02	5.16
73	28	8:00	103.43	96.98	89.41	4.04
74	28	16:00	103.74	94.95	89.06	5.08
75	29	8:00	114.12	103.62	96.91	5.69
76	29	8:00	113.48	103.60	99.07	7.07
77	29	8:00	110.32	101.66	96.97	5.32
78	29	16:00	107.85	98.82	94.21	4.84
79	29	16:00	106.12	95.33	89.98	4.63
80	29	16:00	108.34	101.86	94.24	4.99

81	29	8:00	98.41	89.86	84.34	4.34
82	29	8:00	100.90	92.86	86.79	4.11
83	29	8:00	106.80	98.03	92.47	4.67
84	29	8:00	112.92	105.17	98.14	5.57
85	29	8:00	109.98	101.54	94.06	6.31
86	29	16:00	104.43	98.77	93.81	4.98
87	29	16:00	114.43	106.88	97.68	5.51
88	29	16:00	94.93	85.62	80.87	3.34
89	29	16:00	105.83	95.65	90.24	5.16
90	29	16:00	101.64	93.67	86.47	4.24
91	30	8:00	94.86	86.90	81.80	2.95
92	30	8:00	112.45	103.74	96.81	6.27
93	30	8:00	101.05	93.01	87.27	4.64
94	30	8:00	108.48	100.32	95.09	4.48
95	30	8:00	105.85	98.60	92.40	4.48
96	31	16:00	107.48	96.83	92.74	5.53
97	32	16:00	112.25	103.60	96.02	5.85
98	34	8:00	105.36	96.86	91.99	4.57
99	34	8:00	116.85	107.12	101.15	5.73
100	34	8:00	105.80	96.33	92.28	4.79
101	34	16:00	119.92	109.13	103.21	6.26
102	35	8:00	105.02	97.87	92.11	4.69
103	36	8:00	102.56	92.90	88.01	4.16
104	36	8:00	114.27	104.03	98.64	5.58
		平均	106.36	97.44	91.79	4.97
		標準偏差	5.81	5.54	5.07	0.83
		最大	119.92	109.13	103.28	6.66
		最小	81.69	76.47	71.62	2.68

81	30	8:00	113.60	103.26	97.59	5.79
82	30	8:00	91.99	84.52	78.87	2.65
83	30	16:00	114.56	108.90	98.74	5.82
84	31	8:00	112.85	103.64	97.42	4.97
85	31	8:00	109.96	100.48	95.02	4.49
86	31	16:00	100.38	91.86	86.50	3.67
87	31	16:00	108.48	99.28	93.66	5.66
88	32	8:00	107.21	98.63	93.00	4.98
89	32	8:00	118.23	109.11	103.27	7.71
90	32	16:00	109.68	100.39	95.01	5.45
91	32	16:00	105.03	95.02	91.09	5.52
92	33	8:00	111.70	103.74	97.93	5.33
93	33	8:00	105.99	97.96	92.27	4.99
94	33	16:00	103.63	93.78	89.27	4.37
95	35	8:00	110.25	100.60	95.37	5.57
96	36	8:00	104.39	95.45	89.20	4.87
		平均	106.87	97.87	92.08	5.17
		標準偏差	5.46	5.12	5.00	1.00
		最大	118.23	109.11	103.27	7.71
		最小	91.99	84.52	78.87	2.65

第5章 かつお一本釣り漁業における養成および養殖カタクチイワシの餌料（活餌）としての可能性

5.1 はじめに

かつお一本釣り漁業で使用する餌料用のカタクチイワシは、まき網や定置網漁業で漁獲されたものを使用している（益田ら 1984）。かつお一本釣り漁船は、出漁前に餌場で一般的な価格@3~5 円/尾のカタクチイワシをタモで 13 L 程度のバケツに取り込み、遠洋船においては 1,400 杯分、近海船においては 140 杯分を船内に収容する（秋本 2004）。近年、カタクチイワシの資源量が減少傾向にあることから、餌料用カタクチイワシの供給が不安定になることが多く、餌待ち（港で 2~3 日待機）せざるを得ないことがたびたび起こる。また、盛漁期になると餌場の餌料用カタクチイワシが不足する事態が発生するため、餌場では他海域で獲れたカタクチイワシを購入し、活魚船にて輸送してきたものを販売している。これらのカタクチイワシは「かいまわし」と呼ばれ、輸送コストを価格に転嫁するため高額な活餌（@12 円/尾）となっている。かつお一本釣り漁船の漁労長は、成漁期には 1 航海でも多く操業して水揚げ金額を向上させたいことから、かいまわしのカタクチイワシを購入して漁場へ向け出港する。このように、餌待ちによる操業ロス（収入減）と、高額な餌料を購入せざるを得ず（支出増）、かつお一本釣り漁船を運営する船主は、コストの増大を余儀なくされている。

そこで、本研究では人工的にカタクチイワシを生産し、かつお一本釣り漁業の経営改善が可能となるか検討することとし、次の 3 つの試験を行った。

試験 1 では、小型巻き網船にて漁獲したシラスを畜養して生産したカタクチイワシ（以下、養成活餌という。）のコスト計算を実施した。

試験 2 では、陸上水槽にて養成したカタクチイワシ親魚から受精卵を得て種苗生産を行い、その後海上にて中間育成して生産したカタクチイワシ（以下、養殖活餌という。）のコスト計算を実施した。

試験 3 では、試験 1 と 2 で生産した養成活餌と養殖活餌を近海漁船に積み込み、船内飼育試験とカツオ釣獲試験を実施した。

5.2 材料および方法

試験 1 養成活餌生産試験

供試魚の採捕 試験は 2014 年度に 7 回、2015 年度に 7 回、計 14 回実施した。実施海域は高知県宿毛湾とし、すくも湾漁業協同組合所属の火光利用小型まき網漁船 1 統あるいは 2 統（1 統とは、網船 1 トン、母船（灯船兼輸送船）4.38 トンの 2 隻で構成する。）と海上移送船 4.39 トン 1 隻を使用した。漁網は、浮子網長約 75 m × 網丈約 25 m、目合は約 2~4 mm（身網約 2.5~4 mm、魚捕約 2 mm）を使用した。採捕は夜間に行い、集魚は 7 W の LED 灯（緑・青）を使用した。漁網内のカタクチイワシの幼稚魚（以下、シラスという。）を、9 m 角金属製養殖生簀内に取り付けた正八角形生簀網（縦 9 m × 横 9 m × 深さ 6 m、目合 160 径）内に灯火を用いて誘導した。誘導後は、養成場所（宿毛市小筑紫町栄喜）まで養殖作業船 4.39 トンで、生簀を微速（0.23~0.53 ノット）にて押して移動させた（Fig. 5-1）。移動距離は 180~3300 m の範囲であった。

試験期間中の飼育方法 試験期間中における給餌は、基本毎日 1 回飽食するまで与え、漁獲したシラスのサイズおよび成長段階に併せた粒径とし、主にもじゃこ B（日清丸紅飼料株式会社）を用いた他、おとひめ C2（日清丸紅飼料株式会社）およびいわし大漁 B（日清丸紅飼料株式会社）を使用した。生け簀網は付着物等の汚れを落とす必要があることから、週 1 回交換・洗浄した。収容から出荷までの飼育日数は、7~54 日間であった。

試験魚および飼育環境の測定 試験開始（採捕）時、試験終了（出荷）時に生け簀網から 30 尾以上採取し、全長および体重の測定を行った。また、飼育環境（塩分、塩分濃度、溶存酸素濃度）の測定をおおむね週 1 回の頻度で実施した。

養成コストの計算 コストの算出に使用した項目は、用船料、飼育管理人件費、飼料

費とした。経費の合計金額を生産した尾数で除し、カタクチイワシ1尾あたり経費を算出した。

試験2 養殖活餌生産試験

親魚養成 試験に使用した親魚は、高知県宿毛湾にて漁獲したシラス（試験1で捕獲したものの一部）を海上生け簀で2週間程度蓄養したものを、株式会社山崎技研古満目事業所の陸上水槽（50 kL 八角形コンクリート）に收容し、その後約3ヶ月間親魚養成したものを使用した。給餌は毎日行い、毎日配合飼料（おとひめ S2：日清丸紅飼料株式会社）を2～3.5 kg/日範囲で、成長段階に併せた量とした。飼育水温は、自然水温（19.2～28.9℃）とし、換水率は4回転/日とした。2014年度の試験では、6月13日～16日までに採れた4日分の浮上受精卵を同事業所の試験水槽（12 kL 円形FRP）に、2015年度の試験では、7月25日～29日の採卵量がまとまった時期の5日分の受精卵を株式会社山崎技研浦ノ内事業所へ車で毎日輸送し、試験水槽（55 kL 長方形コンクリート）に收容した。親魚養成終了時には、生残していた親魚数を計測した。

種苗生産 種苗生産は、直接飼育水槽に受精卵を收容する方式で行った。受精卵は、最初に收容した日から3～4日連続して毎日追加收容を行なった。最初に受精卵を收容した翌日にふ化（0日齢）が始まり、ワムシを1日齢から、20日齢よりアルテミアを、22日齢よりコペポータを、25日齢より配合飼料（おとひめ B1, B2：日清丸紅飼料株式会社ほか）を給餌し、飼育を行なった。飼育水温は自然水温（22.2～28.2℃）とした。換水率は0.3回転/日から徐々にあげていき、最終的には5回転とした。1年目は70日齢、2年目には35～38日齢に取りあげ、生産尾数を計測するとともに生残率を求めた。

中間育成 中間育成は、種苗生産とりあげ後の稚魚を、1年目は高知県大月町古満目沖に設置された8 m × 8 m × 8 mの海上小割生け簀1基に收容し、93日間行なった。2年目は、とりあげ後の稚魚を高知県須崎市浦ノ内沖に設置された5基に收容した。その後、出荷日の数日前に活魚船にて輸送し、古満目沖に設置された8 m × 8 m × 8 m海上小割生け簀2基に收容した。給餌は毎日行い、配合飼料（おとひめ C1, C2, S2,

EP0：日清丸紅飼料株式会社ほか) 0.8～12.0 kg/日の量を与え、成長に併せて増量するとともに種類を変更した。飼育水温は自然水温 (15.0～27.6℃) とした。出荷日までの飼育期間は 60～67 日間であった。

試験魚および飼育環境の測定 親魚養成時には、試験開始時および産卵開始時に、種苗生産時には、ふ化から取りあげ時まで毎日、中間育成時には、出荷直前と出荷時に、それぞれサンプリングした個体の全長および体重の測定を行った。また、飼育環境 (塩分、塩分濃度、溶存酸素濃度) の測定は、親魚養成時、種苗生産時および中間育成時において毎日実施した。

養殖コストの計算 コストの算出に使用した項目は、傭船経費、光熱水費、人件費、餌料費とした。経費の合計金額を生産した尾数で除し、カタクチイワシ 1 尾あたり経費を算出した。

試験 3 近海漁船における船内飼育試験とカツオ釣獲試験

供試魚 (養成活餌) 養成活餌を用いた試験は 3 回実施し、船舶は近海かつお一本釣り漁船第五萬漁丸 71 トンを使用した。1 回目の試験は、2014 年 4 月に試験区として全長 8.6 cm、体重 6.0 g の養成活餌 129 kg を高知県宿毛湾内の養成場所において、対照区として全長 10.2 cm、体重 6.7 g の天然カタクチイワシ 130 kg を宮崎県目井津港 (餌場) において積み込んだ。試験漁場は西沖 (南西諸島周辺海域) とし、船内における飼育時の生産状況の把握とカツオ釣獲状況について調査した。2 回目の試験は、2014 年 5 月に全長 10.8 cm、体重 13.2 g の養成活餌 128 kg を養成場所において、また全長 10.2 cm、体重 6.7 g の天然カタクチイワシ 130 kg を高知県土佐佐賀港 (餌場) において積み込み、試験漁場は東沖 (小笠原諸島周辺海域) とした。3 回目の試験は、2015 年 5 月に全長 9.4 cm、体重 4.4 g の養成活餌 130 kg を養成場所において、また全長 10.2 cm、体重 6.7 g の天然カタクチイワシ 130 kg を宮崎県目井津港 (餌場) において積み込み、試験漁場は西沖 (南西諸島周辺海域) とした。

供試魚 (養殖活餌) 養殖活餌を用いた試験は 1 回実施し、船舶は養成活餌試験と同様のものとした。試験は、2015 年 11 月に全長 9.0 cm、体重 5.1 g の養成活餌 158 kg を

高知県幡多郡大月町古満目にて積み込み、試験漁場は西沖（南西諸島周辺海域）とし、船内における飼育時の生産状況の把握と、カツオ釣獲状況について調査した。なお、対照区となる天然カタクチイワシは、諸事情により積み込みが出来なかった。

船内飼育試験 餌場にて飼育されているカタクチイワシを網で寄せ、密度が高くなったところをタモ網ですくいとり、海水が半分程度入った 13 L バケツに入れると同時に外に飛び出さないよう蓋を閉め、その後バケツリレー方式で船内の飼育槽まで運び収容した。飼育槽内の換水量は 500%/時、水温は現場における海水温（養成試験時：19.1～25.5℃、養殖試験時：23.5～26.2℃）とし、日長は恒明とした。給餌量は、魚の活性を見る目的程度で与え、極少量とした。収容後から 46 時間経過後までの間、6 時、12 時、18 時の定時に死亡魚の数量計測のほか、水質の環境（水温、溶存酸素濃度、塩分濃度、pH）測定を実施した。

カツオ釣獲試験 鳥群れレーダーや双眼鏡を用い、カツオの魚群を発見し、一定時間操業が続けられる魚群と判断した操業時に試験を実施した。出来るだけ同じ性状の群れで 2 種類の活餌の比較ができるよう努めたが、出来なかった際は違う性状の群れで試験を実施した。操業時間、活餌の使用量、カツオの漁獲量より天然活餌と養成活餌・養殖活餌の有効性についての検証を実施した。天然活餌を対照区とし、養成活餌および養殖活餌を試験区と設定した。養成活餌の検証は 3 回、養殖活餌の検証は 1 回実施した。

5.3 結果

試験 1 養成活餌生産試験 採捕から養殖場所までの移送状況について、2 年間にわたって実施した試験全 14 回の結果を Table 5-1 に示した。漁獲された場所、漁獲量、養殖場所までの移送距離、移送速度、移送後の生残状況について 2014 年と 2015 年を比較したところ、いずれも大きな差が見られなかった。

次に、コスト計算に使用した経費項目を Table 5-2 に、採捕から出荷までの生産状況の結果を Table 5-3 に示した。2014 年度の 1 回目と 7 回目、2015 年度の 1 回目の採捕

分は大雨による大量死亡，養殖活餌試験用親魚へ振り替えたこと等から，コスト計算より除外した。また，養成途中に数量が激減した 2014 年度の 2 回目の採捕群は 3 回目と，2015 年度の 4～5 回目の採捕群は 6 回目と併せて出荷した。これらより，1 年目は 887,714 尾の採捕から 77,800 尾の出荷に成功し，最終生残率 16.0%，1 尾あたりのコストは 23.7 円となった。2 年目は採捕時のサイズが総じて小さかったことから，採捕尾数が大幅に増加した。その結果，2,415,313 尾の捕獲から 307,938 尾の出荷に成功し，最終生残率 19.3%，1 尾あたりのコストは 6.0 円となった。

試験 2 養殖活餌生産試験 親魚養成，種苗生産，中間育成，各ステージにおける生残状況を Table 5-4 に示した。また，2014 年と 2015 年における産卵量の推移を Fig. 5-2 に示した。産卵は両年とも 5 月～9 月までの間，ほぼ毎日確認できた。また，両年とも 9 月に 1 日あたりの採卵量が最大になった。試験期間中における総採卵数量と親魚の生残率は，2014 年は 21,171 g，76.3%，2015 年は 20,384 g，82.8%であった。種苗生産では，生産尾数，飼育日数に違いがあるものの，2014 年で 66.6%，2015 年で 46.4～57.7%と高い生残率となった。種苗生産時における平均全長の推移を Fig. 5-3 に示した。2014 年と 2015 年では，飼育水槽，飼育担当者の違い等があることから，一概に比較することは困難であるが，2 年目は飼育技術の習熟が進んだためか成長が早かった。中間育成期間は，全長が概ね 80 mm を超えるまでの期間を目標に実施し，出荷尾数と生残率は 2014 年で 3,000 尾と 10.0%，2015 年は 2 回出荷し 86,200 尾と 28.7%，56,000 尾と 18.7%であった。

試験 3 近海漁船における船内飼育試験とカツオ釣獲試験 養成活餌と養殖活餌を用いた試験結果をまとめて示す。船内における生残率は Table 5-6 に示したとおり，養成活餌の 1 回目の試験では，天然活餌 87.4%に対し，養成活餌 73.0%の生残であり，天然活餌の生残率が養成活餌のそれを上回った。2 回目と 3 回目の試験では，天然活餌 92.4%，95.1%に対し，養成活餌が 97.0%，96.6%の生残となり養成活餌の生残率が天然活餌のそれを上回った。養殖活餌の試験では，対照区となる天然活餌の積み込みが

出来ず比較が出来なかった。養殖活餌の生残率は 75.9%であった。

次に、カツオの釣獲状況について Table 5-7~9 に示したとおり、1 回目の試験では午前の操業で天然活餌を、午後の操業で養成活餌を使用し、活餌 1 kg あたりのカツオの漁獲量を算出したところ、天然活餌 7.38 kg, 養成活餌 10.34 kg となった。2 回目の試験では、午前と午後の活餌の種類を入れ替え同様に実施したところ、天然活餌 53.04 kg, 養成活餌 9.96 kg となった。3 回目の試験では、乗組員の多大な協力のもと活餌の種類を交互に入れ替え操業試験を実施したところ、天然活餌 23.86 kg, 養成活餌 26.91 kg となった。また、養殖活餌を使用したカツオの釣獲状況については、Table 5-10 に示したとおり対照区を設けて試験をすることが出来なかった。養殖活餌を使用した活餌 1 kg あたりのカツオの漁獲量は 11.02 kg となった。

5.4 考察

本研究では、人工的にカタクチイワシを生産し、かつお一本釣り漁業の経営改善が可能となるか検討した。

養成活餌の生産では、1 尾あたりのコストが 1 年目に 23.7 円であったものを 2 年目に 6.0 円まで低減することに成功し、天然活餌の 1 尾あたりの単価 3~5 円に近づけることができた。コストダウンの主な要因は、採捕・出荷尾数の増加、採捕時・出荷時サイズの低下があげられる。飼育日数が多くなれば、人件費増、生残率低下を招きコストは上昇することから、計画的に採捕を行うことが重要となる。生残率低下の第一の要因は、採捕時・移動時・網交換時等に起こる網に魚体が擦れて起きる死亡の発現である。産まれたてのカタクチイワシ仔魚（高知県宿毛地方では、しらさ、かえりと呼ばれる。）は鱗が未形成であり（黒坂ら 2016）、ハンドリングに弱いため、網に魚体が擦れないような網の工夫や作業工程の見直しが急務となる。また、捕獲したシラスには、カタクチイワシ以外の魚種（マイワシ *Sardinops melanostictus* 等）が混ざっていることが多く、蓄養日数が長くなると網中にはカタクチイワシ以外の魚種の割合が増加することがある（黒坂ら 2017）。これは、カタクチイワシよりもマイワシの方がハ

ンドリングに強く、また成長が速いことが要因として考えられた。シラスの捕獲も計画どおり行うことが難しい状況の昨今、国立研究開発法人水産研究・教育機構が公表した 2020 年度における資源評価結果は、カタクチイワシは減少傾向、マイワシは増加傾向と示している。餌料用カタクチイワシが不足する際には、かつお一本釣り漁業ではマイワシも活餌として使用されている。また、10 cm 程度までの小型のマイワシならば、カタクチイワシと同様に使用できると漁業者は判断しており、ハンドリングに強いマイワシを人工生産する方法も今後検討していくべきと考える。

次に、養殖活餌の生産では、1 尾あたりのコストが 1 年目に 617 円であったものを、2 年目には 70 円までコストダウンすることに成功したものの、天然活餌の 1 尾あたりの単価 3~5 円や、かいまわし単価 12 円には及ばなかった。高コストとなった主な要因は、採卵量がまとまらなかったことのほか、中間育成時における減耗のため出荷尾数が減少したことがあげられる。種苗生産時における生残率が 1 年目より 2 年目が低下した理由については、収容卵数の計算ミスにより想定以上の多くふ化仔魚が得られ、高密度飼育となってしまったことが原因と考えられる。中間育成時における減耗の主な理由は、網交換時等に起こる網に魚体が擦れて起きる死亡のほか、食害生物（アカカマス *Sphyræna pinguis* Gunther, 1874 等）が侵入したことによる減耗である。

一方、養殖活餌の大量生産には採卵数を向上させることが必要不可欠である。靄田（2001）は、カタクチイワシの産卵期間は資源の低水準時に 4 月から 10 月までの 7 ヶ月であり、高水準時にはさらに翌年の 2~3 月まで拡大すると報告している。また、靄田（1997）は、カタクチイワシは 2~3 年と短い寿命の中で産卵期間が長く、同一個体が数十回産卵すると報告している。今回の試験では 5~9 月の間に産卵が確認されたが、同一個体が複数回の産卵を経験していたかは不明である。今回の親魚養成および種苗生産時に使用した水槽には冷却機能が無く、自然水温下での飼育条件であり成熟の制御を行うことは出来なかった。志村ら（2008）は、成熟、産卵の調節には光日周期や水温などの物理的環境と、餌環境や個体密度などの生物的環境が影響を及ぼすと報告している。カタクチイワシは産卵適水温 18~20℃、種苗生産飼育水温 20~21℃ であり、また、採卵を誘発させるためには水温の上昇と下降を繰り返すことで

親魚の成熟を同期させ、1日あたりの採卵数を増加させることもできるとの報告がある（木村ら 2014）。その他、松田ら（2014）による、親魚養成中に与える配合飼料の成分量と卵質の関係については相関があり、給餌飼料の選択は重要であるとの報告や、黒坂ら（2019）による、夜間電照を用いて沖だし以降の成長を加速させる技術を使うことで、養殖活餌の生残率を大幅に上げることが期待できる。これらの知見を活かし、カタクチイワシの産卵に適した環境を整えることが可能な施設整備、水槽内の親魚による卵食を防ぐ効率的な卵回収方法の技術取得、中間育成時の生残率を向上させるための適切な沖だしサイズの解明をすべてクリア出来れば、養殖活餌の大量生産は実現可能と考えられる。

最後に養成、養殖活餌の有効性の検証では、結論から先に述べれば天然活餌と比較して遜色なしとの結果であった。船上飼育中の生産率は、3回実施した天然活餌との比較において2回目と3回目の試験で養成活餌のほうが高かった。1回目の試験では養成活餌の生産率が低かったが、これはDOが低下したため酸素を曝気しすぎたことによるトラブルによるものであった。養殖活餌の生残率は対照区が無いことから比較はできないものの、生残率が他の試験と比較して低い要因は飼育水温が高かったことが一因と考えられる。

次に、カツオの釣獲率の比較については養成活餌を使用した試験を3回実施し、1回目と3回目は養成活餌が、2回目は天然活餌が優位な結果となった。1回目と3回目の試験時の魚群性状は天然・養成試験ともに瀬付きの群れであったため比較できると考える。しかしながら、2回目試験時は午前中に瀬付きの群れで養成活餌の試験を終了し、午後の試験漁場に移動中、流れ物（海上に浮遊するものの総称：一般的に魚群が付いており大漁が期待できる。）を発見し、急遽操業することとなったことから試験が成立しなかった。養殖活餌を用いた試験は、対照区である天然活餌を積み込まなかったことから比較できないこと、瀬付きの群れに対して1回だけの試験結果より評価が難しいものの、養殖活餌1kgあたりの漁獲量を養成活餌試験と比較すれば同等レベルであることが判明した。また、参考として養殖活餌を用いた同様の試験は、2014年9月に船上飼育槽における生残率比較調査と、カツオ釣獲率比較調査を遠洋かつお

一本釣り漁船第三十一日光丸でも実施しており、天然活餌と比較したところ遜色なしとの結果が得られている（木村ら 2015）。さらに、養成活餌と養殖活餌の使い勝手についても、かつお一本釣り漁業に従事する漁業者にアンケートを実施したところ、「天然物と変わらない」、「釣獲については問題ない」、「人に慣れており飼いやすい」、「サイズが丁度よくカツオを誘引させられる」、「天然活餌が手に入らない時は多少高価でも購入したい」など、好評価の意見も多く見られている（黒坂ら 2017）。

これらのことから、養成活餌・養殖活餌は、生産尾数を向上させることやハンドリング時に起こるスレを防ぐ方策の開発を進め、コスト削減が可能となれば、欲しい時期、場所に安価で供給できる可能性が十分にある。また、天然活餌と同等に船上において機能することも確認できていることから、天然活餌に代替するものとして十分に利用できるものと考えられる。

5.5 引用文献

益田 一・尼岡邦夫・荒賀忠一・上野輝瀬・吉野哲夫（1984）日本産魚類大図鑑．東海大学出版会．東京．20．

秋本徹（2004）カツオとかつお節の同時代史：ヒトは南へ，モノは北へ．第2章餌屋の世界．コモンズ．215-231．

黒坂浩平・小田憲太郎・櫻井正輝・日高浩一・佐谷守明・廣瀬太郎・小河道生（2016）平成 26 年度海洋水産資源開発事業報告書（近海かつお釣：九州周辺～三陸沖周辺海域）．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．97-122．

黒坂浩平・櫻井正輝・日高浩一・保尊脩・小田憲太郎・佐谷守明・廣瀬太郎・小河道生（2017）平成 27 年度海洋水産資源開発事業報告書（近海かつお釣：九州周辺～三陸沖周辺海域）．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．99-126．

令和 2（2020）年度カタクチイワシ太平洋系群の資源評価（2021）国立研究開発法人水産研究・教育機構水産資源研究所水産資源研究センター

令和 2 (2020) 年度マイワシ太平洋系群の資源評価 (2021) 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産資源研究所水産資源研究センター

轟田義成 (2001) カタクチイワシの生活史戦略. 日本水産学会誌. **67(6)**. 1133-1134.

轟田義成 (1997) 黒潮続流域および混合水域におけるカタクチイワシ *Engraulis japonicus* H.の産卵生態. 北水研報告. **61**. 9-15.

志村健・山本潤・森本晴之・木下誠二・下山俊一・桜井泰憲 (2008) 春季の日本海鳥取沖におけるカタクチイワシの成熟と産卵. 水産海洋研究. **72(2)**. 101-106.

木村拓人・江藤宗義・佐谷守明・大島達樹・伏島一平 (2014) 平成 24 年度海洋水産資源開発事業報告書 (遠洋かつお釣<太平洋中・西部海域>). 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. 32-39.

松田圭史・橋本 博・木村拓人・伏島一平・増田賢嗣・神保忠雄・今泉 均 (2014) 飼料の違いがカタクチイワシの親魚養成と産卵成績, 仔魚に及ぼす影響. 水産技術. **6(2)**. 139-146.

黒坂浩平・米田道夫・高山剛・津崎龍雄・稲葉太郎・齋藤尚希・保尊脩 (2019) 太陽光パネルによる電力自給システムを利用した海面網生簀におけるカタクチイワシの育成に及ぼす夜間電照の影響. 水産技術. **12(1)**. 7-16.

木村拓人・上原崇敬・江藤宗義・佐谷守明・大島達樹・伏島一平 (2015) 平成 25 年度海洋水産資源開発事業報告書 (資源対応型: 遠洋かつお釣<太平洋中・西部海域>). 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. 25-38.

Table 5-1. 採捕量と移送後の生残状況

年度	操業 回次	操業日	推定 採捕数量	移送 距離	移送 時間	平均 移送速度	移送後 4日間の 斃死計	生残率 (重量比)
2014	1	2014/5/30	400kg	620m	82分	0.24kt	131kg	67.3%
	2	2014/6/20	200kg	590m	60分	0.32kt	44kg	78.0%
	3	2014/7/18	200kg	700m	65分	0.35kt	48kg	76.0%
	4	2015/1/21	200kg	220m	24分	0.30kt	119kg	40.5%
	5	2015/2/24	100kg	1,080m	82分	0.43kt	20kg	80.0%
	6	2015/3/3	150kg	2,920m	178分	0.53kt	39kg	74.0%
	7	2015/3/17	400kg	3,100m	188分	0.53kt	102kg	74.5%
合計			1,650kg	9,230m	679分	2.70kt	503kg	490.3%
平均			236kg	1,319m	97分	0.39kt	72kg	70.0%
2015	1	2015/4/24	400	3,000m	215分	0.45kt	80	80.1%
	2	2015/5/22	500	880m	68分	0.42kt	184	63.2%
	3	2015/10/23	200	3,300m	221分	0.48kt	66	67.2%
	4	2016/2/3	50	720m	95分	0.25kt	23	54.0%
	5	2016/2/11	30	240m	25分	0.31kt	10	66.7%
	6	2016/3/4	200	180m	25分	0.23kt	67	66.6%
	7	2016/3/17	150	200m	20分	0.32kt	61	59.3%
合計			1,530kg	8,520m	669分	2.47kt	490kg	457.0%
平均			219kg	1,217m	96分	0.35kt	70kg	65.3%

Table 5-2. 養成活餌コスト計算に使用した経費

年度	試験回次	用船経費 (円)	飼育日数 (日)	人件費 (円)	餌料費 (円)	経費合計 (円)	生産尾数 (尾)	1尾/円
2014	2	100,000	54	588,000	28,840	716,840	0	39.2
	3	100,000	7	84,000		184,000	23,000	
	4	100,000	31	357,000	2,524	459,524	21,600	21.3
	5	100,000	7	84,000	2,100	186,100	25,700	7.2
	6	100,000	18	196,000	3,090	299,090	7,500	39.9
合計		500,000	117	1,309,000	36,554	1,845,554	77,800	23.7
平均		100,000	23	261,800	9,139	369,111	15,560	23.7
2015	2	108,000	42	498,960	47,277	654,237	81,438	8.0
	3	108,000	20	241,920	10,970	360,890	75,000	4.8
	4,5,6	194,400	42	468,720	4,553	667,673	112,900	5.9
	7	64,800	9	98,280	309	163,389	38,600	4.2
	合計		475,200	113	1,307,880	63,109	1,846,189	307,938
平均		118,800	28	326,970	15,777	461,547	76,985	6.0

※H26,H27年度ともに出荷は4回した。

Table 5-3. 採捕から出荷までの生産状況

年度	試験 回次	採捕量 (kg)	採捕時重量 (g)	推定漁獲数 (尾)	出荷数 (尾)	1尾/円	出荷時重 量 (g)	飼育日数 (日)	最終生残率 (%)
2014	2, 3	400	0.7	571,428	23,000	39.2	2.02	54	4.0
	4	200	1.05	190,476	21,600	21.3	3.13	30	11.3
	5	100	1.23	81,300	25,700	7.2	2.03	7	31.6
	6	150	3.37	44,510	7,500	39.9	3.52	18	16.9
	合計	850	-	887,714	77,800	-	-	109	-
	平均	212.5	1.59	221,929	19,450	23.7	2.68	27.3	16.0
2015	2	500	0.44	1,136,364	81,438	8	1.87	42	7.2
	3	200	0.28	714,285	75,000	4.8	0.72	21	10.5
	4, 5, 6	280	0.22~1.08	453,553	112,900	5.9	1.27	42	24.9
	7	150	1.35	111,111	38,600	4.2	2.08	9	34.7
	合計	1,130	-	2,415,313	307,938	-	-	114	-
	平均	282.5	0.69	603,828	76,985	6	1.49	28.5	19.3

※2014年度の1回目7回目、2015年度の1回目の採捕分は大雨による大量死亡、養殖活餌試験用親魚へ振り替えしたこと等から、コスト計算より除外した。

Table 5-4. 親魚養成，種苗生産，中間育成各ステージにおける生残状況

年度	親魚養成		種苗生産			中間育成		
	2014/4/10	2014/6/16	2014/6/13	2014/8/23		2014/8/23	2014/11/23	
2014	収容時	68日間 終了時	収容時	72日間	終了時	収容時	93日間	終了時
	5,000尾	→ 3,818尾	45,000尾	→	30,000尾	30,000尾	→	3,000尾
	生残率 76.3%		生残率 66.6%			生残率 10.0%		
2015	2015/5/7	2015/8/4	2015/7/25	水槽1	2015/9/2	2015/9/2	2015/11/7	
	収容時	90日間 終了時	収容時	38日間	終了時	収容時	67日間	終了時
	6,000尾	→ 4,966尾	646,667尾	→	300,000尾	300,000尾	→	86,200尾
	生残率 82.8%		生残率 46.4%			生残率 28.7%		
			2015/7/30	水槽2	2015/9/4	2015/9/4	2015/11/2	
			収容時	35日間	終了時	収容時	60日間	終了時
			519,667尾	→	300,000尾	300,000尾	→	56,000尾
			生残率 57.7%			生残率 18.7%		

※H26年度の種苗生産、中間育成は2水槽、2生け簀にて実施

Table 5-5. 養殖活餌コスト計算に使用した経費

年度	用船経費 (円)	光熱水費 (円)	人件費 (円)	餌料費 (円)	合計 (円)	生産尾数 (尾)	1尾/円
H26	15,000	741,387	355,000	739,613	1,851,000	3,000	617
H27	396,000	2,131,370	816,500	6,611,588	9,955,458	142,200	70

Table 5-6. 船上飼育槽におけるカタクチイワシの生残率

活餌の種類	試験回次	試験航海時期	生残率	飼育水温	DO	pH	塩分濃度
		試験年日	対照区 (%)	(°C)	(mg/L)		(‰)
天然	1	2014年4月	87.4	19.1~23.5	4.3~6.6	8.05~8.24	30.9~32.5
天然	2	2014年5月	92.4	22.0~24.4	4.1~5.8	8.15~8.26	32.1~32.4
天然	3	2015年5月	95.1	20.8~25.5	3.1~5.5	-	-
-	1	2015年11月	-	-	-	-	-

※1：対照区は天然活餌

※2：-はデータ無し

活餌の種類	試験回次	試験航海時期	生残率	飼育水温	DO	pH	塩分濃度
		試験年日	試験区 (%)	(°C)	(mg/L)		(‰)
養成	1	2014年4月	73.0	19.4~24.7	2.8~6.7	8.11~8.32	32.2~32.4
養成	2	2014年5月	97.0	22.0~24.4	3.5~5.4	8.15~8.24	31.5~32.4
養成	3	2015年5月	96.6	21.0~25.5	3.7~6.0	-	-
養殖	1	2015年11月	75.9	23.5~26.2	2.2~3.7	-	-

Table 5-7. カツオの釣獲状況（養成活餌 1 回目）

活餌の種類	試験回次	試験航海時期	操業開始	操業終了	操業時間 (分間)	活餌投与量 (kg)	カツオ漁獲量 (kg)
		試験年日	時刻	時刻			
天然	1	2014年4月	6:00	6:25	25	23	80
対照区			8:15	8:35	20	23	80
			9:30	9:50	20	23	270
			10:00	10:25	25	25	264
合計					90	94	694
天然活餌1kgあたりの漁獲量						1	7.38
活餌の種類	試験回次	試験航海時期	操業開始	操業終了	操業時間 (分間)	活餌投与量 (kg)	カツオ漁獲量 (kg)
		試験年日	時刻	時刻			
養成	1	2014年4月	13:40	14:00	20	44	453
試験区			14:10	14:40	30	44	457
合計					50	88	910
養成活餌1kgあたりの漁獲量						1	10.34

Table 5-8. カツオの釣獲状況（養成活餌2回目）

活餌の種類	試験回次	試験航海時期	操業開始	操業終了	操業時間 (分間)	活餌投与量 (kg)	カツオ漁獲量 (kg)
		試験年日	時刻	時刻			
天然	2	2014年5月	12:15	12:25	10	30	1340
対照区			12:25	12:45	20	40	1600
			12:45	12:50	5	12	1500
			12:50	13:05	15	30	1500
合計					50	112	5940
天然活餌1kgあたりの漁獲量						1	53.04
活餌の種類	試験回次	試験航海時期	操業開始	操業終了	操業時間 (分間)	活餌投与量 (kg)	カツオ漁獲量 (kg)
		試験年日	時刻	時刻			
養成	2	2014年5月	4:15	4:45	30	30	40
試験区			7:15	7:30	15	20	20
			7:50	8:10	20	20	176
			9:00	9:30	30	30	590
			9:40	9:55	15	12	290
合計					110	112	1116
養成活餌1kgあたりの漁獲量						1	9.96

Table 5-9. カツオの釣獲状況（養成活餌3回目）

活餌の種類	試験回次	試験航海時期	操業開始	操業終了	操業時間 (分間)	活餌投与量 (kg)	カツオ漁獲量 (kg)
		試験年日	時刻	時刻			
天然	3	2015年5月	5:50	5:55	5	4	149
対照区			6:00	6:05	5	15	689
			9:00	9:15	15	21	826
			9:15	9:40	25	21	514
			14:27	14:57	30	14	0
			15:50	16:05	15	42	614
合計					95	117	2792
天然活餌1kgあたりの漁獲量						1	23.86
活餌の種類	試験回次	試験航海時期	操業開始	操業終了	操業時間 (分間)	活餌投与量 (kg)	カツオ漁獲量 (kg)
		試験年日	時刻	時刻			
養成	3	2015年5月	6:15	6:40	25	25	866
試験区			8:25	9:00	35	38	2095
			10:00	10:30	30	14	47
			12:30	12:55	25	25	78
			16:05	16:15	10	14	36
合計					125	116	3122
養成活餌1kgあたりの漁獲量						1	26.91

Table 5-10. カツオの釣獲状況（養殖活餌）

活餌の種類	試験回次	試験航海時期 試験年月日	操業開始 時刻	操業終了 時刻	操業時間 (分間)	活餌投与量 (kg)	カツオ漁獲量 (kg)
養殖	1	2015年11月	6:27	7:12	45	70	877
試験区			7:15	8:08	53	28	696
			8:47	9:35	48	14	57
			10:17	10:44	27	14	41
			12:34	13:00	26	35	104
合計					199	161	1775
養殖活餌1kgあたりの漁獲量						1	11.02

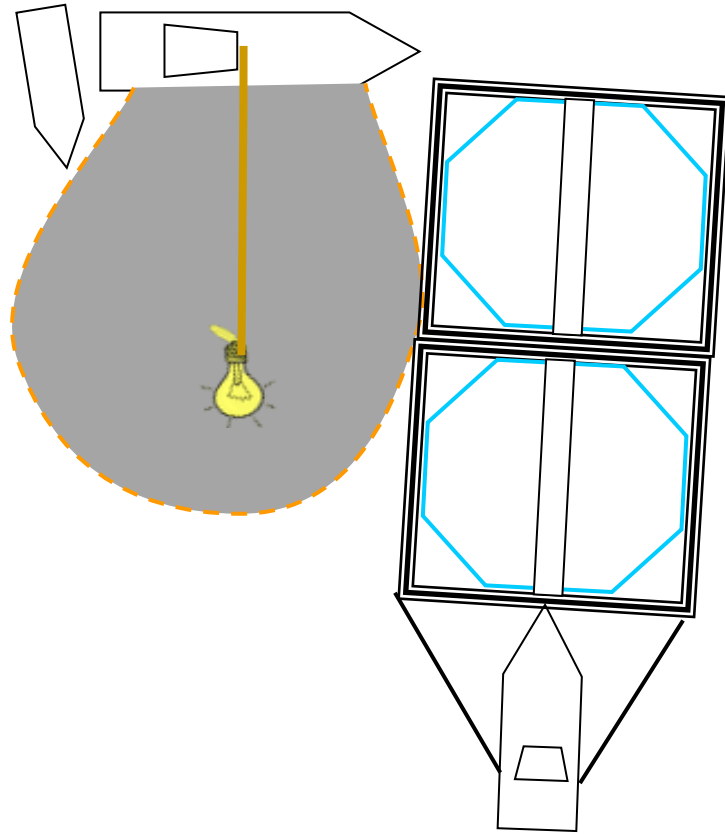


Fig. 5-1. シラスの漁獲と生け簀の輸送

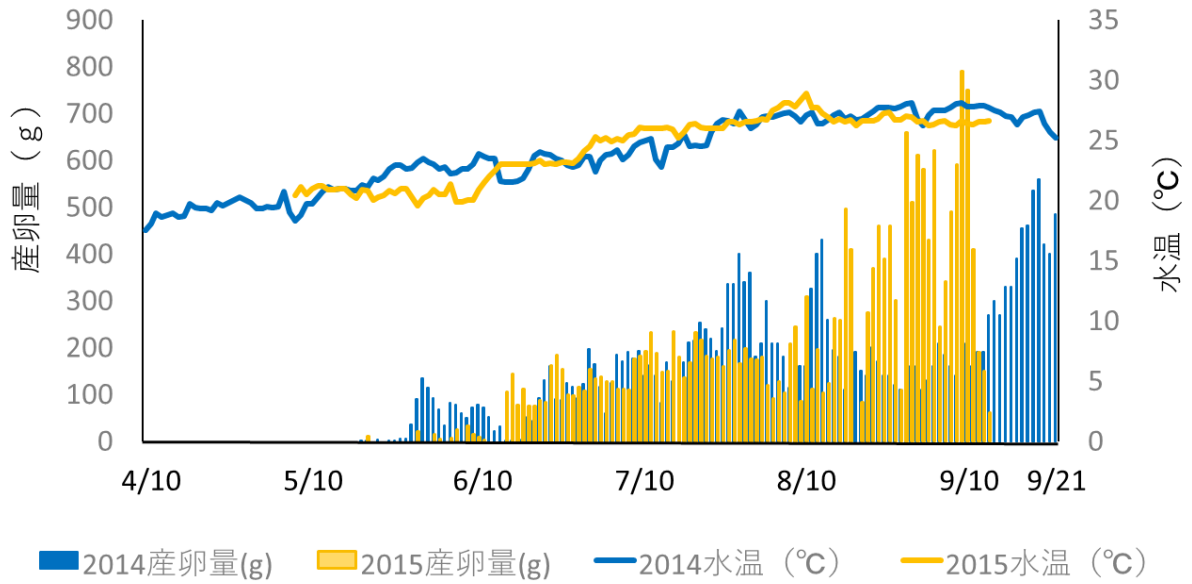


Fig. 5-2. 2014年と2015年におけるカタクチイワシ産卵量の推移

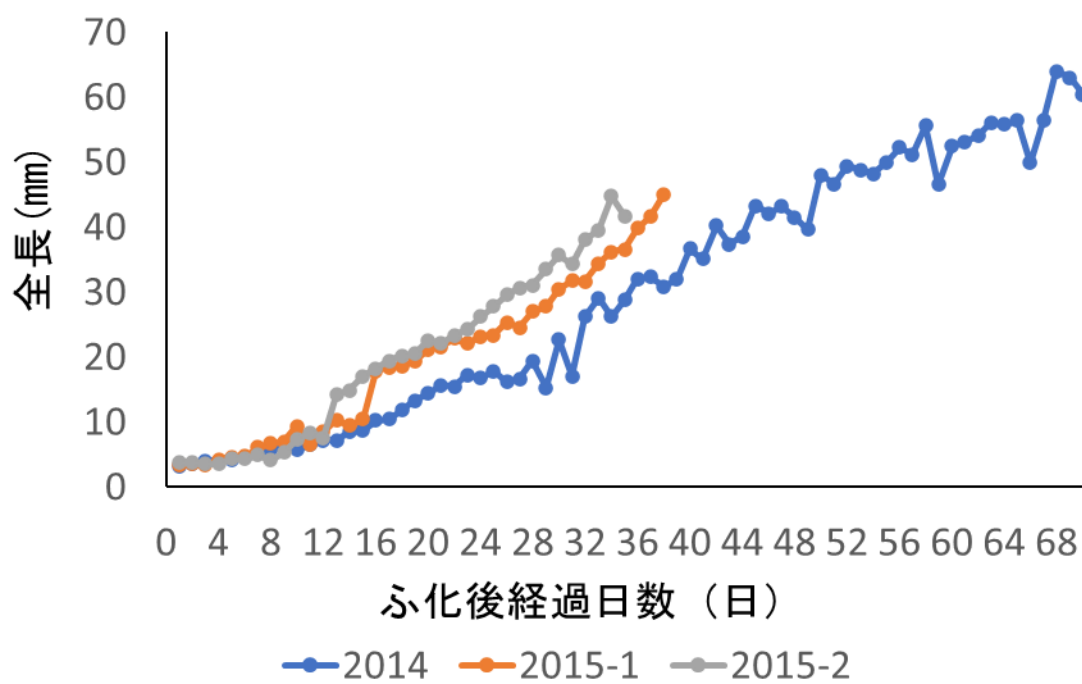


Fig. 5-3. カタクチイワシの種苗生産時における平均全長の推移

第6章 総合考察

本研究を始めた動機は、刺身用かつおの安定供給を担うだけでなく、資源にやさしくエコロジーであるかつお一本釣り漁業の存続、すなわち日本の伝統文化を守りたい思いからである。そのため、かつお一本釣り漁業の経営改善を目指し、餌料用カタクチイワシに焦点をあてたコスト削減方策について検討した。

本章では、まず船上における活餌の飼育方法として本研究で得られた結果を要約して示した上で、安全に船上飼育ができる指標について考察した。次に、活餌用カタクチイワシの人工生産について本研究で得られた結果を要約して示した上で、コスト削減方法について考察した。

以下では、これまでの知見と本研究で明らかになった知見およびかつお一本釣り漁船に乗船してきた筆者の経験を併せ考察する。

6.1 船上における活餌の飼育方法

第2章では、カタクチイワシの船上飼育時には水温を低く維持しなければならず、大きな燃油経費がかかるため経費削減の方法を求めた。船上で安全にカタクチイワシを飼育できる飼育条件の解明が必要であり、本種の高温側水温耐性と低酸素耐性について検討した。その結果、24時間後、48時間後の高温側半数個体致死温度は、それぞれ28.5°Cと27.3°Cであった。また、本種が狂奔し始める溶存酸素濃度は、15~30°Cの範囲で1.12~2.36 mg/L（酸素飽和度13.9~35.1%）であった。以上により、漁業現場では現行の15°Cから5~10°C上げて本種を安全に飼育できることが明らかとなった（小田ら2018）。

第3章では、効率的かつ費用対効果の高い船上における飼育方法を開発するため、カタクチイワシのアンモニア耐性と、収容密度と換水が生存に及ぼす影響を評価した。その結果、カタクチイワシの24時間および48時間半数致死非解離アンモニア態窒素濃度（95%信頼区間）は、15°Cで0.770 (0.751-0.790) mg/L, 0.706 (0.661-0.750)

mg/L, 25°C で 0.634 (0.466-0.802) mg/L, 0.450 (0.379-0.521) mg/L と判明した。また 25°C での無換水飼育では、非解離アンモニア態窒素濃度は致死レベルまで上昇し、収容密度に依存しつつ死亡する個体が急激に発生したが、12 時間おきに飼育水の 1/3 を換水すれば非解離アンモニア態窒素濃度は非致死レベルに維持することができることも明らかとなった (Oda et al. 2021)。

第 2 章と第 3 章の試験は無給餌条件下で、かつ急性的な環境応答を評価したものであることから、第 4 章では、遠洋漁業での航海日数 50 日間の給餌条件下で 20°C と 25°C の水温でカタクチイワシの飼育が可能であるか試験を実施した。その結果、50 日後の生残率は 91% および 81% となり、実際の漁船での生残率よりも高い結果となった (木村ら 2012)。また、20°C, 25°C で飢餓耐性試験を実施したところ、死亡魚が急増し始める日数はそれぞれ 23 日後 14 日後となり、短期間での試験時の死亡要因に餓死は含まれないことが明らかになった。

これらの研究結果を受け、開発調査センターでは、飼育水温を 5°C 上昇させ、20°C でカタクチイワシを飼育する実証試験を 2011 年より開始している。その報告では、15°C での飼育時の生残率と比べて遜色のない結果が得られている (木村ら 2013, 2014)。遠洋漁船においては、飼育水の非乖離アンモニア態窒素濃度は現状、極めて低い値 (0.011 mg/mL) との報告があるため (木村 2011)、換水率を下げる飼育方法である閉鎖循環式システム (山本 2022) を取り入れることで、飼育水の冷却にかかるコストを削減できる可能性が考えられる。このことについても、開発調査センターでは実際に、閉鎖循環式システムを取り入れた実証試験を 2018 年より開始している。その報告では、飼育水のアンモニア態窒素濃度の値は一旦上昇するものの、その後、濃度が低下する硝化作用が起こり、カタクチイワシに致命的なダメージを与える値にまでは上昇しないことや、33 日間の閉鎖循環式システムを取り入れた飼育 (飼育水温 15.2~15.9°C) により、1 航海で 12.3kL の燃油消費量削減に成功したと報告されている (木村ら 2020)。他方、飼育水温を 5°C 上昇させた 20°C での飼育では、燃油コストを 1 航海で 10 kL 燃油消費量が削減できたことから、世界情勢の影響を受け高騰した燃油単価 102 円 (2022 年 2 月 A 重油価格) を使用した場合、年間 6.5 航海すると年

間 663 万円経費を削減できるものと改めて推定できた。このような開発調査センターの実証調査の結果から、水産業・漁村活性化推進機構が実施する「もうかる漁業の実施計画書」(遠洋かつお一本釣漁業プロジェクト改革計画書 (既存船活用 (遠洋かつお一本釣りマイルド)) にも、飼育水温を 15°C から 20°C に変更する取り組みが事業として採用されるなど、今日の業界内において普及が進んでいる。

その他、飼育水温の昇温によりビブリオ病に罹患する可能性が上がるため、OTC の投与を適宜実施することや、給餌後 30 分間は溶存酸素濃度が急激に低下することにも細心の注意を払う必要がある。かつお船にとって生命線であるカタクチイワシの全滅を回避するためには、船内飼育時における給餌量を適切に管理することが最重要であると考えられた。

近海漁船においては、飼育水温を維持できるレベルの冷却器は装備されているものの、500%/時ほどで換水する飼育水を、第 2 章で提示したカタクチイワシを安全に飼育できる温度である 25°C 以下に維持することは、夏場の高水温時には不可能なことが明らかとなっている。また、第 3 章では、25°C での止水飼育で 6 時間以上はカタクチイワシを安全に飼育できないが、断続換水方法を用いればカタクチイワシを 4 日程度生かすことが可能であることが判明した (Oda et al. 2021)。これらのことより、カタクチイワシの積み込み量は半分程度となるものの、断続的換水方法を採用することで、夏場の高水温時でも操業が可能となり、漁業経営を改善できるものと考えられる。同時に、高水温帯が餌場から漁場までの航路に存在しないかを見極めた上で、漁場を選択する操業計画の立案も重要となる。

6.2 活餌用カタクチイワシの人工生産

第 5 章では、出漁前に積み込むカタクチイワシの安定供給と、活餌価格の高騰や出漁が遅れることによるコストを解消するため、養成活餌と、養殖活餌の人工生産を試みるとともに生産コストと船上における有効性を明らかにした。天然活餌と比較した生産コストは、養成活餌はほぼ同等、養殖活餌は 10 倍以上のコスト高となったが、

飼育方法に改善の余地が残された。また、船上における生残率およびカツオの釣獲率については、天然活餌と比較し養成・養殖活餌ともに遜色が無いことが明らかになった。

養成活餌については、価格面においては天然活餌と同等にまでコストを抑えることができたものの、シラスの漁獲自体がカタクチイワシの漁獲と同様に不安定である。また、採捕後に養殖場所まで生け簀を移動する際の魚体の擦れ問題の解決も残されていることから、実用面においては厳しいことが予想される。

一方、養殖活餌においては、現時点では価格面においては天然活餌と比較して 10 倍以上のコスト高となっており、普及に至るまでには困難な状況にあるものの、飼育担当者の飼育技術の向上が進むことで、大きく改善できる見込みがあると考えられる。養殖活餌の大量生産には、親魚養成時における採卵数の向上が必要不可欠である。カタクチイワシの産卵期間は資源の低水準時に 4 月から 10 月までの 7 ヶ月であり、高水準時にはさらに翌年の 2~3 月まで拡大すること（靄田 2001）や、カタクチイワシは産卵期間が長く、同一個体が数十回産卵すること（靄田 1997）から、大量の卵を得ることは比較的容易と考えられる。また、成熟、産卵の調節には日周期や水温などの物理的環境と餌環境や個体密度などの生物的環境が影響を及ぼすこと（志村ら 2008）や、産卵を誘発させるためには水温の上昇と下降を繰り返すことで親魚の成熟を同期（木村ら 2014）させ、1 日あたりの産卵数を増加させることで、まとまった数の受精卵を用いて種苗生産を行えると考えられる。同時に、松田ら（2014）の報告にあるように、親魚養成中に与える配合飼料は、ふ化後の仔魚の質と費用対効果から判断するとモジヤコ EPO（日清丸紅株式会社）が優れているとの結果や、黒坂ら（2019）の報告にあるように夜間電照を用いることで、沖だし以降のカタクチイワシの成長を加速させられるとの先行研究もある。これらの知見を活かし、カタクチイワシの産卵に適した環境を整えることが可能な施設整備、水槽内の親魚による卵食を防ぐ効率的な卵回収方法の技術取得、中間育成時の生残率を向上させるための適切な沖だしサイズの解明をすべてクリア出来れば、養殖活餌の大量生産は実現可能と考えられる。

第 5 章でも述べたように、盛漁期になると餌場の餌料用カタクチイワシが不足する

事態がたびたび起きているが、現在のカタクチイワシの資源状況を鑑みれば、今後も供給量が不足することが予想される。人工生産による餌料用カタクチイワシの生産拠点を盛漁期の水揚げ港周辺地域に設けること、すなわち、東北～常磐太平洋側地域での養殖活餌の生産基地の創設が実現できれば、復興支援等の地域活性化と、かつお一本釣り漁業の経営改善に寄与することが期待できる。

6.3 引用文献

小田憲太朗・橋本博・増田賢嗣・今泉均・薄浩則・照屋和久（2018）飼育下におけるカタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性に関する研究．水産技術第10巻第1号．1-7.

Oda, K., Hashimoto, H., Teruya, K., Dan, S., Hamasaki, K. (2021) Ammonia tolerance of Japanese anchovy *Engraulis japonicus*: Implications for cost reduction in a skipjack pole-and-line fishery. *Aquatic Animals*. 2022, AA2021-1

木村拓人・江藤宗義・佐々木安之・佐谷守明・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：遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）．独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター．横浜．46-73.

木村拓人・江藤宗義・佐々木安之・佐谷守明・大島達樹・伏島一平（2013）平成23年度海洋水産資源開発事業報告書（遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）．独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター．横浜．30-31.

木村拓人・江藤宗義・佐谷守明・大島達樹・伏島一平（2014）平成24年度海洋水産資源開発事業報告書（遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）．独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター．横浜．32-39.

木村拓人・橋ヶ谷伊久生・澤田克彦・大島達樹・伏島一平（2011）平成21年度海洋水産資源開発事業報告書（資源対応型：遠洋かつお釣＜太平洋中・西部海域＞）．独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター．横浜．29-30.

山本義久（2022）閉鎖循環式陸上養殖．我が国の現状と事業性評価．養殖ビジネス．

第 59 卷第 9 号. 11-17.

木村拓人・上原崇敬・佐藤晴朗・佐々木安之・宮原一・小川真拓・佐谷守明・横田耕介・大島達樹 (2020) 平成 30 年度海洋水産資源開発事業報告書 (遠洋かつお釣<太平洋中・西部海域>). 国立研究開発法人水産研究・教育機構開発調査センター. 横浜. 42-52.

水産業・漁村活性化推進機構 (2020) 遠洋かつお一本釣漁業プロジェクト改革計画書 (既存船活用 (遠洋かつお一本釣りマイルド)). **154**. 1-61.

鶴田義成 (2001) カタクチイワシの生活史戦略. 日本水産学会誌. **67(6)**. 1133-1134.

鶴田義成 (1997) 黒潮続流域および混合水域におけるカタクチイワシ *Engraulis japonicus* H. の産卵生態. 北水研報告. **61**. 9-15.

志村健・山本潤・森本晴之・木下誠二・下山俊一・桜井泰憲 (2008) 春季の日本海鳥取沖におけるカタクチイワシの成熟と産卵. 水産海洋研究. **72(2)**. 101-106.

松田圭史・橋本 博・木村拓人・伏島一平・増田賢嗣・神保忠雄・今泉 均 (2014) 飼料の違いがカタクチイワシの親魚養成と産卵成績, 仔魚に及ぼす影響. 水産技術. **6(2)**. 139-146.

黒坂浩平・米田道夫・高山剛・津崎龍雄・稲葉太郎・齋藤尚希・保尊脩 (2019) 太陽光パネルによる電力自給システムを利用した海面網生簀におけるカタクチイワシの育成に及ぼす夜間電照の影響. 水産技術. **12(1)**. 7-16.

要約

第1章 序論

カツオは、日本人にとって欠くことの出来ない重要魚種のひとつであり、漁獲方法のひとつに一本釣り漁法がある。その漁法では、活餌としてカタクチイワシが必要不可欠であり、船上での安全飼育が航海中に求められている。業界では、カツオの来遊不安定、魚価低迷のほか、燃油代の高騰、活餌不足など厳しい経営状態から脱却することが急務となっている。本論文は、かつお一本釣り漁業におけるコスト削減方策のひとつとして、操業に必要な不可欠な活餌であるカタクチイワシの効率的な確保方法について、筆者が取り組んだ研究成果をとりまとめたものである。第2章では、カタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性を、第3章では、カタクチイワシのアンモニア耐性を、第4章では、50日間にわたる給餌飼育と無給餌飼育を、第5章では、人工カタクチイワシの生産と有効性を検証した。そして、最後の第6章では、船上における安全に飼育する方法を遠洋漁業と近海漁業に分けて示し、養成・養殖カタクチイワシの生産について整理し、今後の生産体制の可能性について議論した。

第2章 飼育下におけるカタクチイワシの高温側水温耐性と水温別低酸素耐性に関する研究

カタクチイワシは、かつお一本釣り漁業で使う活餌として重要である。本種の船上飼育時には水温を低く維持しなければならず、大きな燃油経費がかかるため、経費削減の方法が求められている。そのため、船上で安全にカタクチイワシを飼育できる条件の解明が必要である。そこで、本種の高温側水温耐性と低酸素耐性について検討した。その結果、24時間後、48時間後の高温側半数個体致死温度は、28.5°C および 27.3°C であった。また、カタクチイワシが狂奔し始める溶存酸素濃度は、15~30°C の範囲で 1.12~2.36 mg/L (酸素飽和度 13.9~35.1%) であった。以上により、漁業現場では現行の 15°C から 5~10°C 上げてカタクチイワシを安全に飼育することが可能であり、経費削減につながる期待が高まった。同時に、溶存酸素量は 5mg/L 以上で飼育するこ

とが安全であることも明らかになった。

第3章 カタクチイワシのアンモニア耐性-かつお一本釣り漁業におけるコスト削減のために-

カタクチイワシは、かつお一本釣り漁業で活餌として使用されることから、一航海4～50日の間、漁船内で飼育されながら漁場まで運ばれる。カタクチイワシから排泄されるアンモニアは航海中の生存に影響を与える可能性があるため、漁業者は経験的に175～500%/時の割合で飼育水を換水し、カタクチイワシを健康な状態に維持している。より効率的かつ費用対効果の高い輸送方法を開発するために、カタクチイワシのアンモニア耐性と、収容密度と換水が生存に及ぼす影響を評価した。その結果、カタクチイワシの24時間および48時間半数致死非解離アンモニア態窒素濃度(95%信頼区間)は、15°Cで0.770 (0.751-0.790) mg/L, 0.706 (0.661～0.750) mg/L, 25°Cで0.634 (0.466-0.802) mg/L, 0.450 (0.379-0.521) mg/Lと判明した。25°Cでの無換水飼育では非解離アンモニア態窒素濃度は致死レベルまで上昇し、収容密度に依存しつつ死亡する個体が急激に発生したが、12時間おきに飼育水の1/3を換水すれば非解離アンモニア態窒素濃度は非致死レベルに維持することができた。以上の結果により、漁船における経験的に推定されたカタクチイワシの飼育時の換水率を低減できる可能性が示された。

第4章 飼育下におけるカタクチイワシの安全飼育指標に基づいた模擬長期飼育試験

第2章と第3章で得られた知見は、短期間かつ無給餌条件下の結果であり、急性的な環境応答を評価したものである。そのため、20°Cと25°Cの水温で遠洋漁業での航海日数50日間の給餌条件下で、カタクチイワシの飼育が可能となるかを明らかにする目的で試験を実施したところ、50日後の生残率は91%と81%となった。また、第2章と第3章で実施した試験はいずれも無給餌条件下のため、供試魚の死亡要因に餓死が含まれている可能性がある。それを排除する目的で20°Cと25°Cで飢餓耐性試験を

実施したところ、死亡魚が急増し始める日数はそれぞれ 23 日後、14 日後となり、短期間での試験時の死亡要因に餓死は含まれないことが明らかになった。

第 5 章 かつお一本釣り漁業における養成および養殖カタクチイワシの餌料（活餌）としての可能性

近年、出漁前に積み込むカタクチイワシが安定供給されないことで、活餌価格の高騰や出漁が遅れることによるコストが発生している。これらを解消する目的でシラスを捕獲・畜養した養成活餌と、人工的に採卵・種苗生産した養殖活餌の 2 通りの方法で、カタクチイワシの生産コストと船上における有効性明らかにする目的で試験を実施した。天然活餌と比較した生産コストは、養成活餌はほぼ同等との結果が得られたが、シラスの漁獲自体が不安定であり実用面においては厳しいと考えられた。一方、養殖活餌は 10 倍以上のコスト高となったものの、飼育方法を改善することで実現性は十分にあると考えられた。また、船上における生残率およびカツオの釣獲率については、天然活餌と比較し養成・養殖活餌ともに遜色がないことが明らかになった。

第 6 章 総合考察

遠洋かつお一本釣り漁船では、現状の飼育水温 15°C より 5°C~10°C 昇温させることや、換水率を下げられる閉鎖循環式システムを用いた飼育を行うことで、現状よりも燃油経費を大幅に削減できる可能性が十分にあることが明らかになった。また、近海かつお一本釣り漁船では、高水温時期に飼育水を冷却せずにカタクチイワシを飼育することは不可能であることが判明したため、25°C 以下の海水を用いた断続換水飼育の実施や、高水温帯を避けた漁場選択により、カタクチイワシの大量斃死を避けられるものと考えられた。さらに、東北地方～常磐海域における太平洋側地域に、養殖カタクチイワシ等の生産基地を創設することで、復興支援等による地域活性化を図りつつ、かつお一本釣り漁業の経営改善に寄与することが期待できる。

謝辞

本研究成果をまとめるにあたり、東京海洋大学の濱崎活幸教授には終始温かいご指導と適切なお鞭撻を賜った。ここに深甚なる謝意を表す。また、本論文の作成にあたり貴重なご助言を賜った東京海洋大学のストルスマン・カルロス・アウグスト教授、横田賢史教授、團 重樹准教授に深く感謝申し上げる。

また、学部在学中に父親を亡くした私を現職に導き、公私に亘り父親のように温かく、時には厳しくご指導いただいた東京海洋大学の中村善彦名誉教授に対し、心から御礼を申し上げます。

さらに、東京海洋大学大学院博士後期課程に同時期に所属した国立研究開発法人水産技術研究所八重山庁舎の三田哲也研究員とは、ともに励まし合い執筆を進めてきた。この場を借りて心から感謝申し上げます。

本研究は、国立研究開発法人水産研究・教育機構開発調査センターが実施する、海洋水産資源開発事業「遠洋かつお釣く太平洋中・西部海域」・近海かつお釣く九州周辺から三陸沖周辺海域」における実証試験の一環として実施した。開発調査センター伏島一平所長および現在水産業・漁村活性化機構の小河道生氏からは、当時、当該事業の推進リーダーを務めていた際に、本研究の推進に力強く応援していただいた。また、開発調査センター副所長の山下秀幸博士には叱咤激励を頂き、当該事業の担当者である黒坂浩平博士、木村拓人主任研究員からは、数々の試験データおよび情報提供を頂くとともに、有益なご意見と絶大なご協力を頂いた。さらに、小職が現在所属している養殖システムグループの大河内裕之リーダー、小林真人博士には、論文執筆や大学院通学等に関し、温かく見守っていただくと共に多大なる配慮を頂いた。この場を借りて心から感謝申し上げます。

高知県内水面漁業センターの稲葉太郎氏、元株式会社山崎技研の平岡 真氏の諸氏には、養成・養殖カタクチイワシの生産ならびに研究を進めるにあたり、甚大なるご支援とご協力を頂いた。生産した養成・養殖カタクチイワシを用いた飼育・釣獲試験を遂行するにあたり、近海かつお一本釣り漁船第五萬漁丸の日高誠悟漁労長、山本潤

二機関長をはじめとする乗組員の方々には、データ収集、魚体測定作業など、操業の傍ら絶大なるご協力を賜った。また、株式会社むつ丸の小橋六津雄氏、ヤマトシ水産株式会社の大山俊一氏には、活餌用カタクチイワシの流通・販売事情について情報提供していただいた。さらに、有限会社日昇の中田勝淑氏には、近海かつお一本釣り漁船第八日昇丸に乗船させていただいた他、近海かつお船の経営実態について詳しく教えていただいた。ここに記して厚く御礼申し上げる。

水産技術研究所志布志庁舎にて実施したカタクチイワシの各種試験は、同庁舎の職員の協力により遂行されたものである。特に、橋本 博博士（現：水産大学校）、増田賢嗣博士（現：水産技術研究所日光庁舎）両氏の協力なしでは研究の完遂は不可能であった。また、当時志布志庁舎の場長であった照屋和久博士（現：水産技術研究所上浦庁舎）および薄 浩則博士（現：水産技術研究所神栖庁舎）をはじめ、今泉 均主幹研究員（現：水産技術研究所南伊豆庁舎）の便宜と激励により執筆を進めることができた。また、志布志庁舎の山元栄一氏、恒吉守一氏、上野裕幸氏、清水武宏氏、春口嵩紘氏、湯地幸枝氏、白鳥智恵美氏、上杉郁也氏、柞木悦子氏をはじめとする嘱託職員各位、並びに桐原久子事務職員には研究業務の補助など大変お世話になった。ここに記して深謝する。

最後に、惜しめない助力と深い理解のもと私を支え続けてくれた妻の悦子、また、心の支えになってくれた息子の直輝・和弥・拓未、媳の愛花、そして孫の誠也に対し心から感謝する。