

第29回 ACNフォーラム

— 日本の水産増養殖を考える会 —

講演要旨集



会 期：平成30(2018)年10月16日(火)

会 場：ホテルマイステイズ鹿児島天文館
鹿児島市山之口町2-7

主 催：特定非営利活動法人ACN(アクアカルチャーネットワーク)

後 援：(一社)九州経済連合会

広島県種苗生産者組合

(有)湊文社(月刊アクアネット)

(株)みなと山口合同新聞社(みなと新聞)

第29回 ACNフォーラム

— 日本の水産増養殖を考える会 —

プログラム

会 場：ホテルマイステイズ 鹿児島天文館
〒892-0844 鹿児島市山之口町2-7 (TEL: 099-224-3211)

1. 受付 (10:00~13:00)

2. 開会の挨拶 (13:00~)

MBC開発株式会社 専務取締役 假屋 哲尋 様
NPO法人ACN (アクアカルチャーネットワーク) 理事長 田嶋 猛

3. 来賓挨拶

有限会社 湊文社 代表取締役 池田 成己 様

4. 講演1 (13:30~)

ブリ養殖生産と販売・輸出等を取り巻く環境について

日本水産株式会社中央研究所 大分海洋研究センター

主任研究員 原 隆 様

— 休憩 — (10分)

5. 講演2 (14:40~)

魚類仔魚は本当はどの餌がお好き？

— 感覚に訴える餌とは~マグロ類などを通して —

鹿児島大学学術研究院農水産獣医学域水産学系 教授 小谷 知也 様

6. 講演3 (15:30~)

緑色LED光によるカレイ・ヒラメの成長促進

北里大学海洋生命科学部

教授 高橋 明義 様

— 休憩 — (15分)

7. 質疑応答及びディスカッション (16:40~)

6. 閉会の挨拶

第29回 ACNフォーラム in 鹿児島

2018年10月16日

NPO法人アクアカルチャーネットワーク

理事長 田嶋 猛

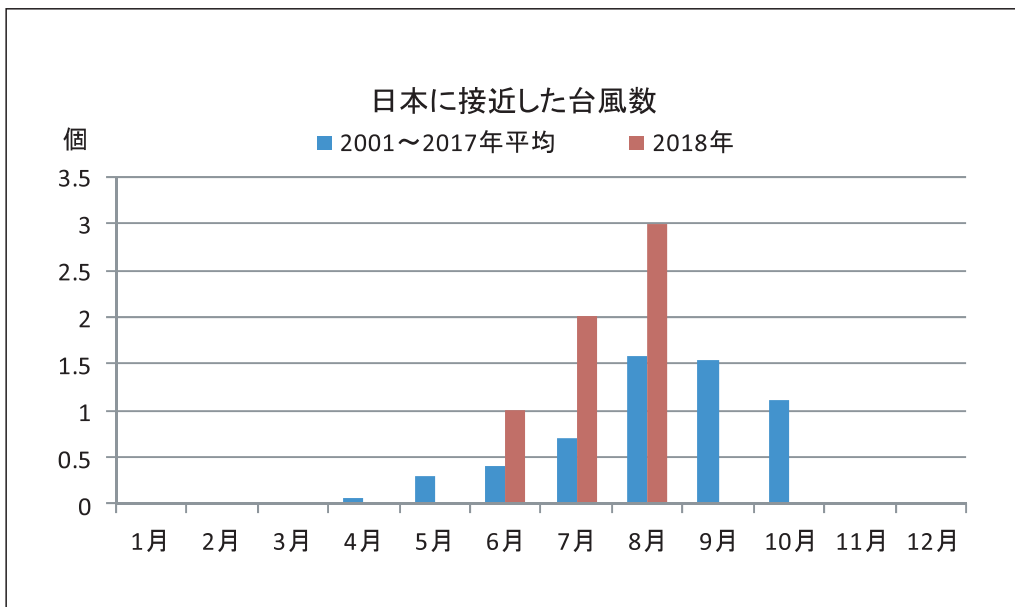
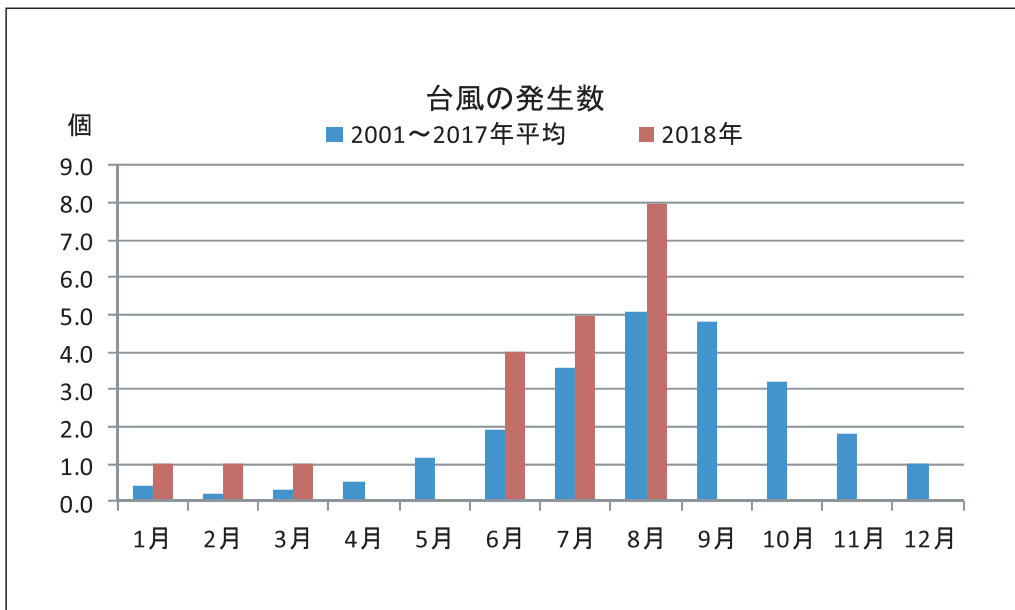
第29回ACNフォーラムを開催するに当たり、ご後援の各関係機関、ご講演の先生方や全国各地からお越しの水産増養殖関係の皆様には厚くお礼申し上げます。

イベント主催者の常と思いますが、ACNフォーラムが近づいてくると天気予報、特に台風の進路予報にとっても敏感になります。とりわけ、本年の開催地は鹿児島市ということもあり例年以上に気を揉んでいました。ところが、それを見透かしたかのように、7月末の台風12号は、東海地方から九州へと逆走し、8月になると日本各地で気温は40℃を超え、12日からは5日連続、5個の台風が発生して、日本付近に3つの台風進路図が記載されていました。「50年に一度」、「統計開始後では初めて」の気象庁発表を「普通」と感じてしまう「異常」気象のこの頃です。

前回、鹿児島市でフォーラムを開催した2008年8月は、MBC開発(株)の神田専務様(故人)の開会のご挨拶に続いて、水産総合研究センター(現、水産研究・教育機構) 照屋場長から「水産総合研究センターでのハタ類種苗生産技術の現状について」、及び鹿児島大学 山本教授からは「マス類とブリ類養殖における疾病問題と対策 山梨と鹿児島の対比」というテーマでご講演を頂きました。そして、翌日は完成間もない指宿市の鹿児島県水産技術開発センターを見学しました。当時は、カンパチ人工種苗が脚光を浴び始めたときで、それから10年経過した今回は、ブリ種苗生産施設が新設された かがしま豊かな海づくり協会(垂水市)を見学させていただきます。これからの増養殖業界に、カンパチ及びブリにクロマグロの3魚種は、大きな経済効果をもたらすことと期待しています。

今回の講演は、日本水産(株) 原主任研究員に「ブリ養殖生産と販売・輸出等を取り巻く環境について」、続いて、鹿児島大学 小谷准教授に「魚類仔魚は本当はどの餌がお好き?」、最後に、北里大学 高橋教授による「緑色LED光によるカレイ・ヒラメの成長促進」の3題となっています。

NPO法人ACN会員一同は、このフォーラムに参加して頂いた皆様に、情報交換の場を提供できることを誇りに思っております。来年は、30回目のACNフォーラムを、福岡市で開催予定です。これからも、ご支援ご鞭撻の程、何卒宜しくお願い申し上げます。



台風が中心が国内のいずれかの気象官署等から300km以内に入った場合を「日本に接近した台風」としてしています。 資料：気象庁ホームページ 2018年8月31日

「適切かつ有効」な養殖業振興策とは？

2018年10月16日

有限会社 湊文社 月刊「アクアネット」

発行編集人 池田 成己

今年6月、我が国漁業制度・政策の大幅改訂についての政府案が公表されました。具体的な内容は「水産政策の改革について」として、水産庁ホームページ*に掲載されています。改革の方向性は「水産資源の適切な管理と水産業の成長産業化を両立させ、漁業者の所得向上と年齢のバランスのとれた漁業就業構造を確立することを目指す」です。問われるのは、そのためにどのようなやり方をするか？でしょう。

養殖業に関しては、①漁業をめぐるトラブルを回避する観点から漁業権制度は維持する、②養殖業の規模拡大や新規参入が円滑に行われるよう漁業権付与に至るプロセスを透明化する、③可能な場合は養殖のための新区画の設定も積極的に推進する、④定置漁業権および区画漁業権は個別漁業者に対して付与する、⑤都道府県が漁業権を付与する際の優先順位（これまでは地元漁協が第1位）の法定制は廃止する、⑥国は国内外の需要を見据えて戦略的養殖品目を設定し、生産から販売・輸出に至る総合戦略を立てた上で養殖業の振興に本格的に取り組む、⑦魚類養殖経営のボトルネックとなる優良種苗・低コスト飼料等に関する技術開発・供給体制の整備を強化する、⑧国際競争力のある養殖を育成するため実証試験等の支援を拡充する、⑨HACCP対応型施設の整備や輸出先国に使用が認められた薬剤数の増加など輸出促進のための環境を整備する…などが記されています。

上掲の特に⑥⑦⑧などは本日ご参加の皆さんも大いに期待されるころだと思いますが、気になる点も少なくありません。一つは、「養殖生産数量ガイドライン」との関係です。同ガイドラインは、需要に見合った生産を促す（魚価の安定化を図る）べく、水産庁が2014年から毎年発出しているもので、ブリ・カンパチおよびマダイの種苗導入量を抑制させる格好になってきました。聞くところによると、同ガイドラインは今後も発出され、新区画などによる増産分は全て輸出に回るそうですが、どのような手法でその“隔離”が可能なのか、思惑通りに輸出できなかった場合の在池魚はどのように売り切るのか。

また、上掲⑤の「漁業権付与の優先順位の法定制廃止」に伴い、都道府県が「既存の漁業権者が水域を適切かつ有効に活用している場合はその継続利用を優先する」「それ以外の場合は、地域の水産業の発展に資するかどうかを総合的に判断する」ことを法定化すると記されていますが、「適切かつ有効」では何とも曖昧であるとの指摘を受け、その具体的な判断基準は国が示すことになりました。つまり、現時点では不明です。さらに、従来は都道府県が漁協単位で付与していた区画漁業権を個別経営者単位にすること一つをとっても、都道府県の水産担当部署の仕事量が著増すると予想されますので（獲る漁業のTACやIQ関連の業務なども著増するはず）、今の人員で物理的に可能なのか？ 大幅増員が認められるのか？ その財源はどう確保されるのか？

改革案についての説明会において、水産庁担当官は「漁業者が浜の主役であることに変わりはない。柔軟な対応を行っていく」などとしていましたが、一度法定化されれば、その文言に沿って執行されていくはずで、現役の生産者や関係者も、同案に対する疑問や意見を積極的に発信していくべきだと思います。小誌8月号でもこのテーマで特集を組みましたので、ご一読いただければ幸いです。

*<http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/kaikaku/suisankaikaku.html>

講師紹介

ブリ養殖生産と販売・輸出等を取り巻く環境について

日本水産株式会社 中央研究所大分海洋研究センター

主任研究員 原 隆

【略 歴】

- 1969年 東京都生まれ
- 1991年 鹿児島大学水産学部卒業
- 1993年 鹿児島大学水産学部修士課程修了
- 1993年 日本水産株式会社 中央研究所
- 1994年 日本水産株式会社 中央研究所大分海洋研究センター
- 2012年 黒瀬水産株式会社 常務取締役（種苗生産，養殖，加工担当）
- 2017年 西南水産株式会社 常務取締役（R&D，加工担当）
- 2018年 日本水産株式会社 中央研究所大分海洋研究センター

【所属学会等】

日本水産学会

【これまでの活動】

- 1994年～2003年 生物餌料培養，マダイ，トラフグ，ハタ類等の種苗生産技術開発
および飼料開発に関する研究
- 2004年～2012年 ブリ，カンパチ，クロマグロ種苗生産技術開発に関する研究
- 2012年～2013年 黒瀬水産（株）ブリ種苗生産施設建設
- 2014年～2017年 九州経済連合会農林水産委員会水産部会委員
- 2016年～2017年 宮崎県 みやざき産業人財育成P Fワーキンググループ委員
- 2017年 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 主催
第2回ブリ類養殖振興勉強会 講演
- 2017年～2018年 西南水産（株）クロマグロ加工施設建設

ブリ養殖生産と販売・輸出等を取り巻く環境について

日本水産株式会社 中央研究所大分海洋研究センター

主任研究員 原 隆

ブリは日本の養殖魚として最も生産量が多く、日本の固有種であることから輸出対象種としても期待される存在です。今回の報告では、まず、ニッスイの関連会社でブリ養殖を手掛ける“①黒瀬水産(株)における輸出の取組み”を紹介し、次に“②ブリを取り巻く国内および世界の環境”、最後に輸出を拡大するために必要と考えられる“③これからのブリ養殖に求められる要件”についてお話したいと思います。

① 黒瀬水産(株)における輸出の取組み

・黒瀬水産(株)について

黒瀬水産(株)は2004年1月に日本水産(株)の100%出資で設立され、同3月に(株)貴丸より事業譲渡を受け、宮崎県串間市、延岡市、島野浦および鹿児島県内之浦で養殖事業を開始しました。

2017年度の生産尾数は、約150万尾、売上げ約70億円、従業員は2018年8月現在で204名、平均年齢は36.5歳と水産業界では若手の多い会社です。

事業構造はシンプルで、養殖と加工を中心に、種苗生産と製品販売の一部を自社で手掛けています。その他、飼料は同じニッスイグループのファームチョイス(株)や大手飼料メーカーから、養殖用天然モジャコは各漁協や専門業者から購入し、研究開発面はニッスイ研究部門がサポートする体制になっています(図1)。

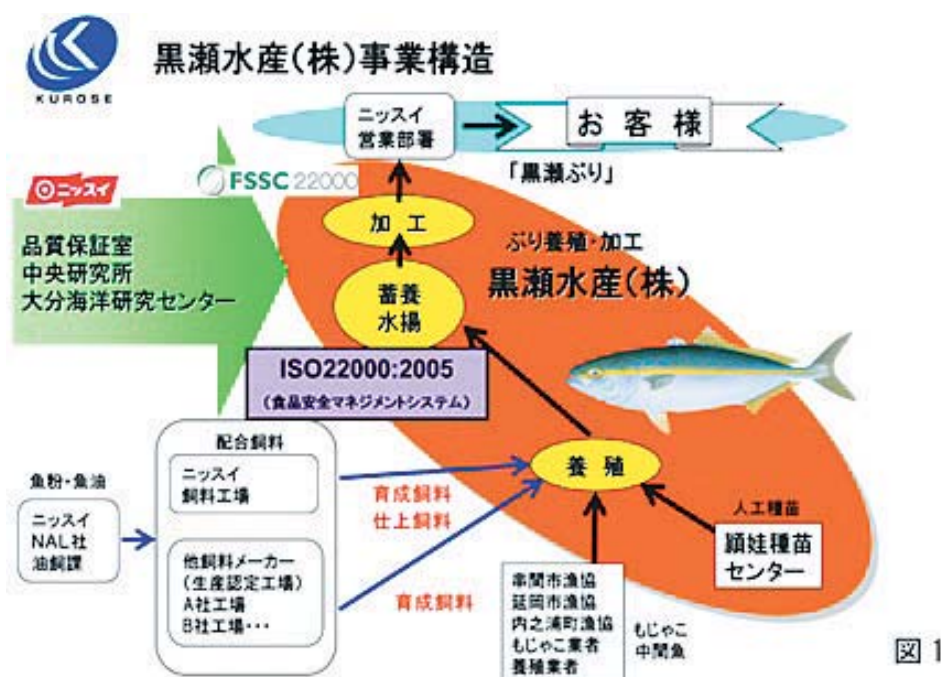


図1

養殖の特徴は、立地条件もあり、沖合で沈下式生簀を用いています（写真1，図2）。潮流が速く、潮通しの良い環境で飼育する事により、安定したブリの育成が可能となっています。



また、人工種苗を用いた養殖を業界に先駆けて実施し、自社で種苗生産場を運営しています（写真2）。更に、養殖から加工までのオペレーションは、ISO22000（HACCPシステムに品質管理マネジメントシステムの考え方を組み合わせた食品安全の国際規格）の規定に沿って運用しています。



写真2 ブリ人工種苗生産施設

・輸出への取組み

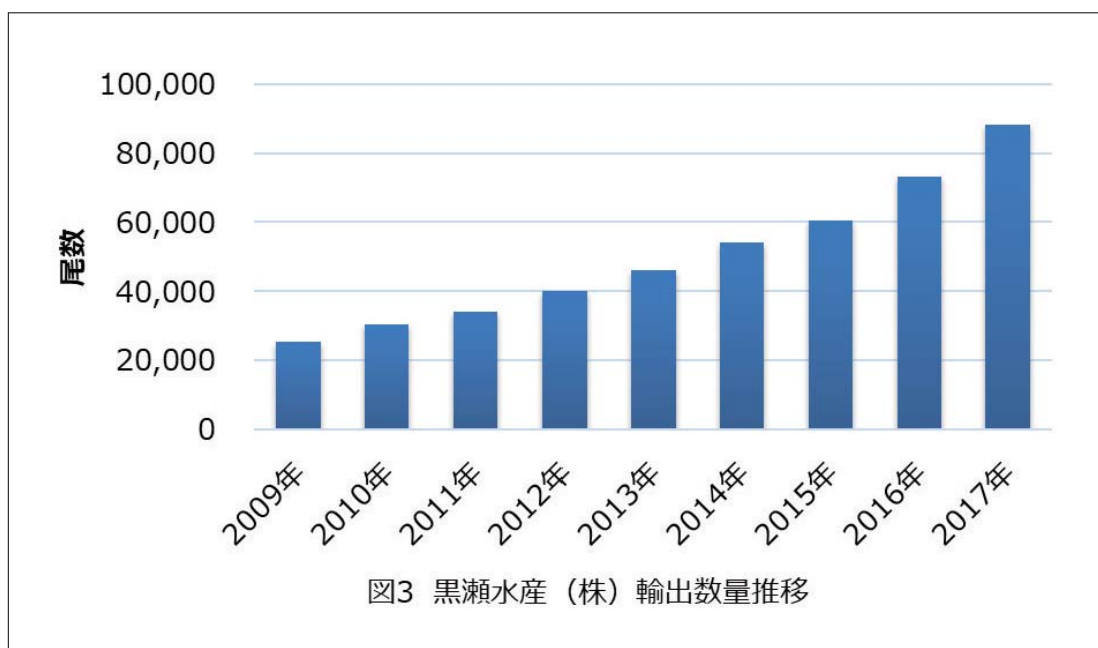
黒瀬水産（株）では設立当初から輸出の取組みを開始しました。当初は年間数千尾を香港に輸出することから始め、2006年に養殖漁場のEU認定を取得、2007年に加工場が対EU輸出水産食品取扱施設の認定を取得したことを受け輸出先を広げました。更に、2015年からは輸出活動に一層力を入れ、2015年は宮崎県の取り組みに参加し、イタリアで開催されたミラノ万博とドイツで開催された世界最大の食品見本市と言われるアヌーガに出展するとともに、ベルギーのブリュッセルで開催された

シーフードショーにも参加しました（写真3）。



写真3 ミラノ万博
アヌーガ
シーフードショー

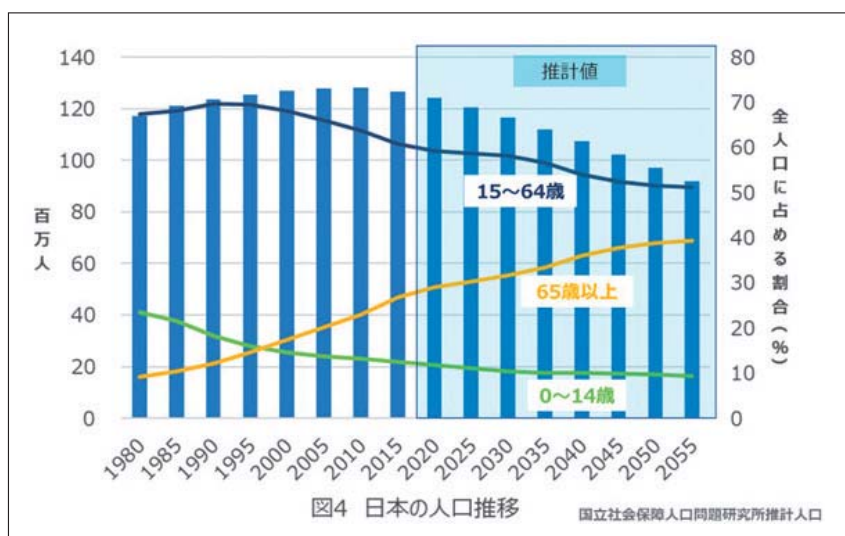
また、農林水産省の革新的技術緊急展開事業として、鹿児島大学や他企業との共同研究によりブリの凍結保存技術を開発し、高品質な冷凍フィレやロインの生産を可能にしました。2016年には加工場がFSSC22000認証（ISO22000を発展させた食品安全規格で世界の主要小売、食品関係企業の団体により承認されたもの）を取得、中国本土やタイにも販売先を広げ、それぞれの地域で販売数量を伸ばす取組みを進め、2017年度には輸出尾数が、約88,000尾とこれまでで最高となりました（図3）。



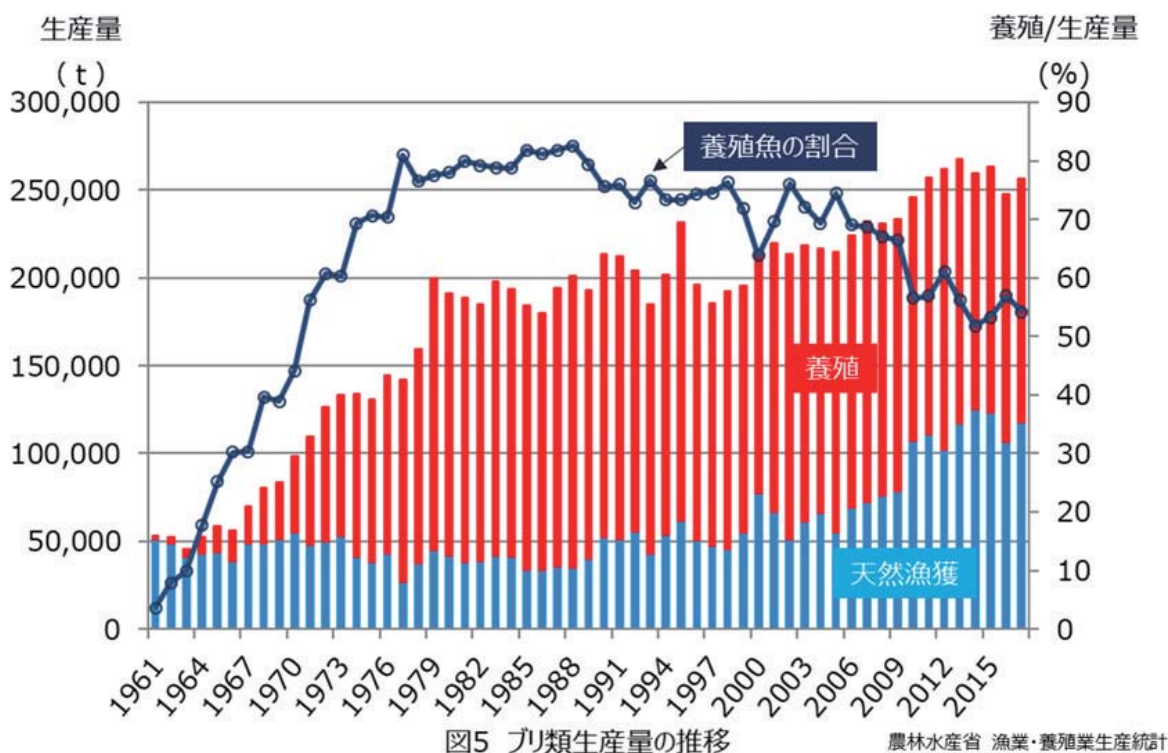
② ブリを取り巻く国内および世界の環境

・国内の環境

日本の人口は既に減少期に入っており、2055年には約9,200万人となり、全人口に占める65歳以上の高齢者が39.4%になると推計されています¹⁾(図4)。次に、水産物需要については、2017年度の魚介類消費は24.4kg/年と報告されており、畜肉の32.5kg/年より少なく、肉類消費の合計に占める魚介類の割合は42.9%と過去最低の数値となりました。



このような中で、ブリ類の生産量推移を見てみると、2000年代に入り天然漁獲量が増加したことで、徐々に総生産量が増加し、ここ数年は25万t/年の生産量で安定しています²⁾(図5)。生産されたブリ類のほとんどが食用として流通すると考えると、消費量が過去50年間で約5倍に増えたことになり、魚介類の消費量が減っている中においては、異なる動きをしている魚種と言えそうです。



次に、輸出について過去10年間を見てみると、輸出量もしくは輸出金額が前年度を上回り、2017年度には、輸出数量が約9,000t、金額で150億円を超え、毎年増加傾向にあります³⁾。

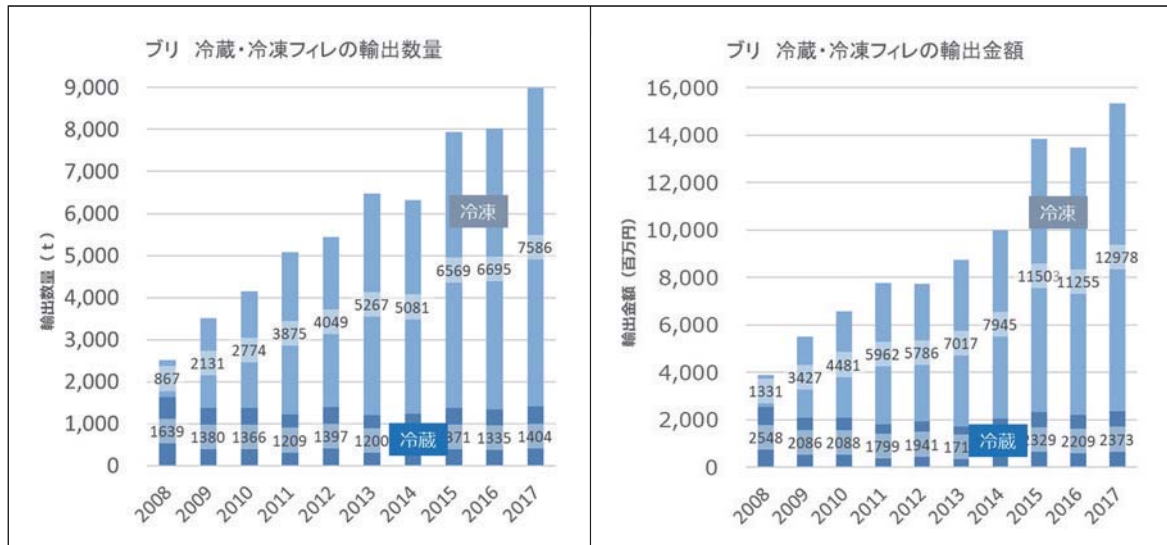


図6 ブリの輸出実績

財務省 貿易統計

また増加している製品は冷凍品であり、その85%が米国への輸出になっています³⁾ (図7)。

これまでも指摘されていますが、他国のマーケットを開拓することで、更に輸出量を増やす余地は大きいと思われます。

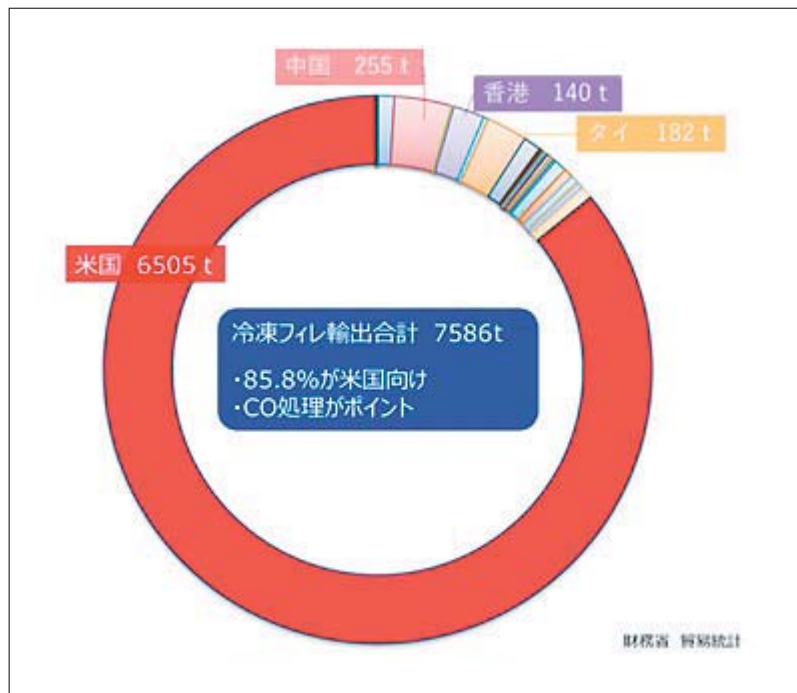


図7 国別冷凍フィレ輸出量

財務省 貿易統計

・世界の環境

次に世界の環境を見てみると、2017年に国連が発表した「世界人口予測2017年改定版」によると、毎年約8,300万人の人口増により、現在76億人の世界人口は、2030年までに86億人、2050年には98億人に達すると予測されています⁴⁾。このような中で世界の水産物需要も増加することは確実です。

ここで、これまでの漁業と養殖業による水産物生産量の推移を見てみると、1960年に36百万tだっ

た生産量が2016年には178百万tと約4.9倍に増えています。また、全生産量に占める養殖の割合は1980年代に入ってから急激に増加し、2012年には漁業を上回り、2016年には54.6%に達したと推定されています⁵⁾ (図8)。

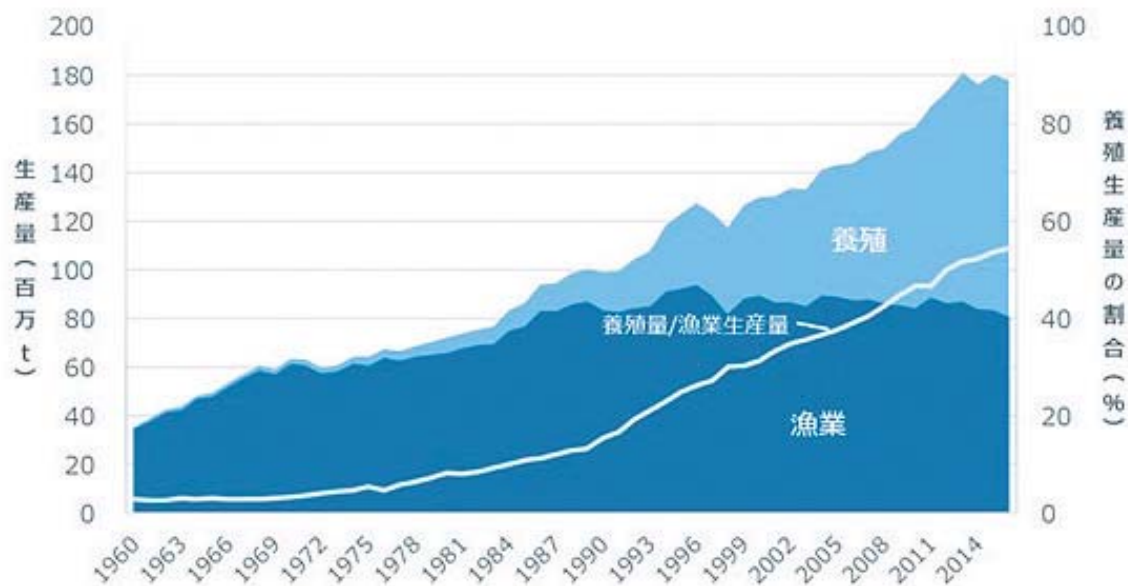


図8 世界の漁業・養殖業生産量

FAO FishStat

更に、FAOが発表した食用とされる水産物消費量の予測では、漁業による漁獲魚消費量が微増にとどまる中、養殖魚消費量の増加が際立っています。漁獲漁業による生産量の増加が期待できない現状では、養殖魚の重要性は更に高まることになると考えられます⁶⁾ (図9)。

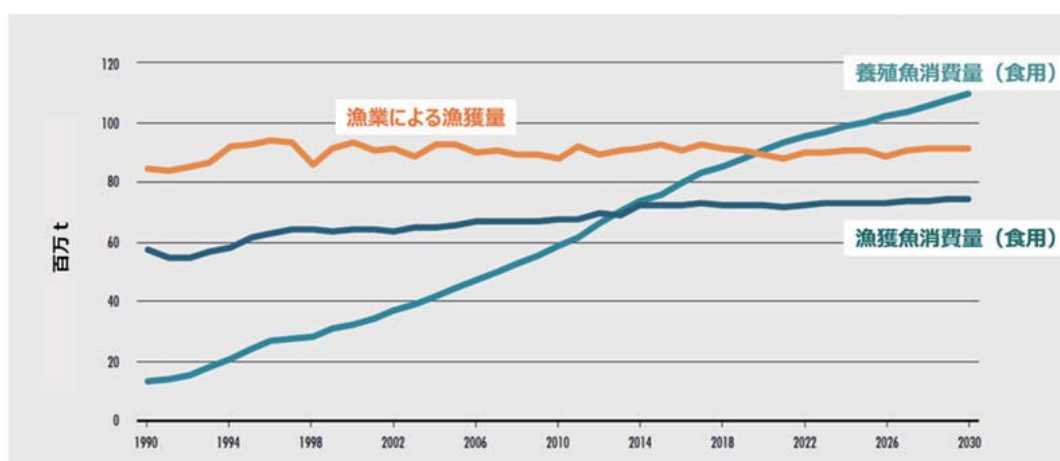


図9 世界の漁業・養殖業生産量 1990~2030年

FAO : THE STATE OF WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE 2018

また、産業の成長率について農業や畜産業と比較すると、1990年から2009年には、穀物や牛の生産が1.0%程度、野菜や果物栽培、養鶏が4.0%前後の成長率の中、養殖は8.0%と高い成長率となっていました⁷⁾。また2011年から2016年を同様に見てみると、各産業1~3%の成長率に対し、養殖は5.3%と引き続き高い成長率を保っています⁴⁾。

産業規模が大きくなるにつれ、将来的には成長率が低下することも予測されていますが、20年代前半まではこのような成長が続くのではないかと思います（図10，図11）。

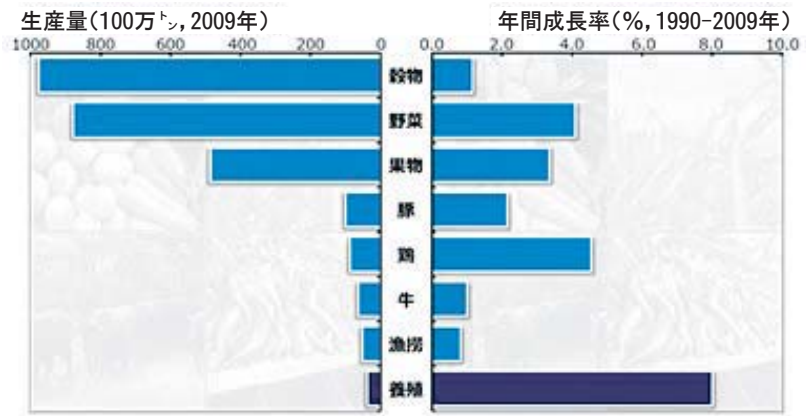


図10 1990～2009年の生産量と年間成長率

Troell et al. (2014) * 穀物は人の食料として生産されたもの

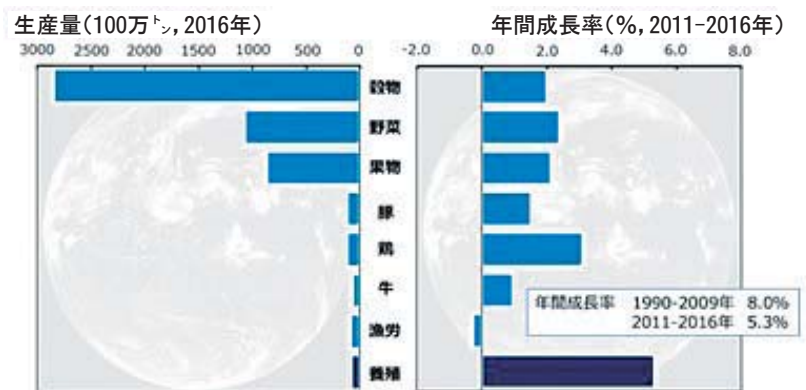


図11 2011～2016年の生産量と年間成長率

FAO統計資料 * 魚類以外も含む

③ これからのブリ養殖に求められる要件

最後に、輸出を増やすために必要と思われるブリ養殖に求められる要件について、いくつか述べたいと思います。

現時点で最も重視されている要件は、食品としての“安全性”です。米国やEU輸出のためのHACCP認証でもこの観点の項目が中心で、特に、加工面で“一般的な衛生管理”、“温度管理”、“製品への薬剤残留の防止”などの“適切な運営”とそれを確認するための“記録の徹底”が求められています。ただ、これは国内販売においても求められることですので、程度の差はあるものの必ずしも輸出促進のための要件とは言えません。

一方、最近一部の地域から輸出の際に求められる要件は、“持続可能性”とそのための“客観的評価”についてです。例えば、米国のモンレー水族館が運営している“Seafood Watch”というウェブサイトがあります。これは、量販店や寿司屋などで販売される各種水産物を、種類毎に複数の視点で（資源量、漁獲方法、養殖方法など）評価し、消費者に“BEST CHOICE（良い選択）”や“AVOID（食べない方が良い）”といった情報を提供するものです。環境意識の高い消費者の方々に一定の影響があり、日本でも数年前から紹介されています。ただ、残念なことに、このサイトで日本の養

殖ブリを調べてみると“AVOID（食べない方が良い）”と評価されてしまっています⁸⁾（図12）。



図12 SeafoodWatchによる日本産養殖ブリの評価

Monterey Bay Aquarium <http://www.seafoodwatch.org/>

また、養殖魚の認証制度としては、水産養殖管理協議会（ASC）の認証が注目されています。こちらはオランダに本部があり、環境に負担をかけず地域社会に配慮して持続可能な事業運営を行っている養殖事業者を認定する制度で、ロンドン、リオデジャネイロのオリンピックでは、この認証を取得している魚介類だけが会場内での提供を許されました。ブリ類に関しては、2016年に基準が発行し、7原則30判定基準76指標で評価され、既に当社も含めて複数の事業者が認証を取得しました⁹⁾（表1）。一方で、認証費用や必ずしも日本の実情に合わない部分が課題と考えられます。

表1 ブリ類のASC認証状況

Company Name	Certificate Number	Farm	Country	Species	Status	Certified Until	Public Consultation Until
Kingfish Zealand BV		Kingfish Zealand BV	Netherlands	Seriola Lalandi (Yellowtail amberjack)	In Assessment		
Chansuan Seafood Limited		Port Lincoln Farm	Australia	Seriola Lalandi (Yellowtail amberjack)	In Assessment		
Chansuan Seafood Limited		Louth Bay	Australia	Seriola Lalandi (Yellowtail amberjack)	In Assessment		
Kurasa Suisan	ASC F-SCS-055	Kushima Farm	Japan	Seriola quinqueradiata (Japanese amberjack)	Certified	15 Dec 2025	
Kurasa Suisan	ASC F-SCS-055	Uchisaura Farm	Japan	Seriola quinqueradiata (Japanese amberjack)	Certified	15 Dec 2025	
Kurasa Suisan	ASC F-SCS-055	Nishika Farm	Japan	Seriola quinqueradiata (Japanese amberjack)	Certified	15 Dec 2025	
GLOBAL OCEAN WORKS CO., LTD. And Fukuyama Fish Farm	ASC-AMTA-F-1002	Fukuyama Fish Farm	Japan	Seriola quinqueradiata (Japanese amberjack)	Certified	21 Dec 2025	
Maruha Nichiro Corporation	ASC-AMTA-F-1003	Farm of Aquafarm Co., Ltd.	Japan	Seriola quinqueradiata (Japanese amberjack)	Certified	25 Apr 2021	
Seshimi Royal		Seshimi Royal Farm	Denmark	Seriola Lalandi (Yellowtail amberjack)	In Assessment		03 Sep 2018

<http://asc.force.com/>

このような新たに求められている要件は、日本の現状にそぐわない部分も多々あると感じますが、輸出を前提に考えれば、対応しなければなりません。一方で、これらに対し日本から意見を発信し

たり、認証制度を設けたりする活動も必要でしょう。海外の制度に対しては、ハードルが高い部分もありますが、その基準達成のための取組みを評価する仕組みもあるため、積極的に利用しても良いと思います。また認証制度ではマリンエコラベルジャパン（MEL）が国際認証として認められるための活動を行っていますので、今後に期待しています。

その他、特にノルウェーのサーモン養殖の取組みを参考に、“養殖システムの高度化”、“加工技術の開発”も必要と思われ、一部は国の補助事業として検討されています。また、ノルウェー水産物審議会（NSC）のような組織的な水産物マーケティングの取組みが出来れば更に輸出を増やすことが出来るのではないかと思います。

最後に、世界的には、『水産養殖は成長産業』であり、食料供給という面でも重要な役割を担っています。国内の養殖業は産業として成熟した感もありますが、まだまだ発展の余地もあると思います。業界全体で新たな取組みを進め、再度成長産業となるように頑張れば、新しい未来も見えてくると思います。

参考資料

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所；<http://www.ipss.go.jp/>
- 2) 農林水産省 海面漁業生産統計調査；
http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/
- 3) 財務省 貿易統計；<http://www.customs.go.jp/toukei/info/>
- 4) FAO FAOSTAT；<http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- 5) FAO FishStatJ；<http://www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/>
- 6) FAO；The State of World Fisheries and Aquaculture 2018.
- 7) Max Troell, Rosamond L. Naylor, Marc Metian, Malcolm Beveridge, Peter H. Tyedmers, Carl Folke, Kenneth J. Arrow, Scott Barrett, Anne-Sophie Crépin, Paul R. Ehrlich, Åsa Gren, Nils Kautsky, Simon A. Levin, Karine Nyborg, Henrik Österblom, Stephen Polasky, Marten Scheffer, Brian H. Walker, Tasos Xepapadeas, and Aart de Zeeuw(2014)；Does aquaculture add resilience to the global food system? PNAS September 16, 2014. 111 (37) 13257-13263
- 8) Monterey Bay Aquarium Seafood Watch；<http://www.seafoodwatch.org/>
- 9) 水産養殖管理協議会（ASC）；<https://www.asc-aqua.org/ja/>

講師紹介

魚類仔魚は本当はどの餌がお好き？

— 感覚に訴える餌とは～マグロ類などを通して —

鹿児島大学学術研究院農水産獣医学域水産学系

教授 小谷 知也

【略 歴】

- 1969年 和歌山県田辺市生まれ
- 1994年 長崎大学水産学部 卒業
- 1996年 長崎大学大学院水産学研究科修士課程 修了
- 1999年 長崎大学大学院海洋生産科学研究科博士課程 修了 博士（学術）の学位を取得
- 2000年 Oceanic Institute（米国ハワイ州）研究員
- 2002年 長崎県産業振興財団 地域結集型共同研究事業 研究員
- 2004年 福山大学生命工学部海洋生物工学科 講師
- 2009年 福山大学生命工学部海洋生物科学科 准教授
- 2010年 鹿児島大学水産学部 准教授
- 2018年 鹿児島大学学術研究院農水産獣医学域水産学系 教授（現在）

【所属学会】

日本水産学会、日本水産増殖学会、World Aquaculture Society、European Aquaculture Society

【主な研究成果】

<著書>

1. R. J. Shields, T. Kotani, A. Molnar, K. Marion, J. Kobashigawa & L. Tang (2005) Intensive cultivation of a subtropical paracalanid copepod, *Parvocalanus* sp., as prey for small marine fish larvae. In: (C.-S. Lee, P. O'Bryen, N. Marcus, eds) *Copepods in Aquaculture*. pp. 209-223. Blackwell Publishing. Ames, U.S.A.
2. M. Yúfera, L.E.C. Conceição, S. Battaglene, H. Fushimi & T. Kotani (2011) Early development and metabolism. In: (M. Pavlidis, C. Mylonas, eds) *Sparidae: Biology and aquaculture of gilthead sea bream and other species*. pp. 133-168. Wiley-Blackwell, U.S.A.
3. T. Kotani (2017) The current status of the morphological classification of rotifer strains used in aquaculture. In: (A. Hagiwara, T. Yoshinaga, eds) *Rotifers: Aquaculture, Ecology, Gerontology, and Ecotoxicology*. pp. 3-13. Springer Singapore, Singapore.
4. T. Kotani (2017) Enrichment of rotifers, and its effect on the growth and survival of fish larvae. In: (A. Hagiwara, T. Yoshinaga, eds) *Rotifers: Aquaculture, Ecology, Gerontology, and Ecotoxicology*. pp. 47-62. Springer Singapore, Singapore.

<論文>

5. T. Kotani, T. Genka, M. Tanabe, A. Miyashima, H. Fushimi & M. Hayashi (2010) Effect of nutritional enrichment method on fatty acid contents of rotifer *Brachionus plicatilis*. *Journal of the World Aquaculture Society* 41, 884-892.
5. T. Kotani, Y. Wakiyama, T. Imoto & H. Fushimi (2011) Improved larviculture of ocellate puffer *Takifugu rubripes* through control of stocking density. *Aquaculture* 312, 95-101.
6. T. Kotani, M. Yokota, H. Fushimi & S. Watanabe (2011) How to determine the appropriate mortality in experimental larval rearing? *Fisheries Science* 77, 255-261.
7. T. Kotani & H. Fushimi (2011) Determination of the appropriate feeding schedule in finfish larviculture, relating to diurnal feeding rhythm. *Aquaculture* 315, 104-113.
8. Y. Haga, S. -J. Du, S. Satoh, T. Kotani, H. Fushimi & T. Takeuchi (2011) Analysis of mechanism of skeletal deformity in fish larvae using vitamin A-induced bone deformity model. *Aquaculture* 315, 26-33.
9. A. Miyashima, T. Kotani, H. Tawa & H. Fushimi (2012). Relationship between oxygen consumption, growth and survival of larval fishes. *Aquaculture Research* 43, 679-687.
10. T. Kotani, H. Fushimi, Y. Ohta, A. Miyashima, K. Sudoh, M. Hayashi, N. Sato & S. Satoh (2013) Effect of graded levels of dietary DHA included in rotifers *Brachionus plicatilis* on larviculture performance of red sea bream *Pagrus major*. *Aquaculture Science* 61, 321-330.
11. 米山和良, 國澤慎太郎, 外薗博人, 小谷知也, 今村昭則, 松岡達郎 (2015) 画像解析による水槽内を遊泳するクロマグロ稚魚の3次元位置の検出. *数理水産科学* 12, 51-61.
12. T. Kotani, H. Imari, A. Miyashima, H. Fushimi (2016) Effects of feeding with frozen freshwater cladoceran *Moina macrocopa* on the performance of red sea bream *Pagrus major* larviculture. *Aquaculture International* 24, 183-197.
13. T. Kotani, T. Haraguchi, Y. Yamazaki, T. Doi, H. Matsui, S. Yokoyama, M. Ishikawa, S. Koshio (2017) Effect of the length of nutritional enrichment on the fatty acid composition of polar lipids of euryhaline rotifers *Brachionus* and larviculture performance of red sea bream *Pagrus major*. *Aquaculture Science* 65, 133-144
14. H. Matsui, R. Okawa, K. Anraku, T. Kotani (2017) Application of spectrophotometry to estimate optimum condition of *Nannochloropsis oculata* batch culture for a diet of zooplankton. *Aquaculture Science* 65, 209-219.
15. 早坂央希, 永田兼大, 垣内美由紀, 宮本真規子, 石崎宗周, 小谷知也 (2018) コロンビア・マダグレナ大学での新たな養殖プロジェクト創出と学生派遣によるJICA大学間連携ボランティアプログラムの役割について. *農学国際協力* 16, 31-40.

魚類仔魚は本当はどの餌がお好き？

— 感覚に訴える餌とは～マグロ類などを通して —

鹿児島大学学術研究院農水産獣医学域水産学系

教授 小谷 知也

栄養強化の何が問題？

魚類種苗生産で海産ツボワムシ類Brachionus（以下ワムシ）が仔魚用餌料として使われ始めて半世紀近く経ちますが、この間、ワムシの使用に関する最大の関心事は栄養強化でした。1970年代以降、東京水産大学（現東京海洋大学）の渡邊武先生のグループが栄養強化の必要性を報告し、ワムシおよび甲殻類アルテミアArtemiaノープリウス幼生へのn-3系高度不飽和脂肪酸（n-3 HUFA）を中心とした栄養強化が実施されるようになっていきます。この栄養強化のおかげで、魚類種苗の生残率が上昇し、異常行動なども減少するようになりました。また、n-3 HUFAだけでなく、ビタミンAやタウリン、セレンなども強化する対象として加わるようになり、魚類種苗の生産成績は著しく向上するようになりました。一方で、大量斃死や変形魚の出現なども相変わらず見られており、今後も栄養強化剤の開発や改良は行われるものと考えられます。しかし、ここで問題としたいことは、栄養強化についてではなく、むしろワムシがそもそも抱える問題点（？）についてです。

天然域で魚類仔稚魚の餌として利用されているのは、甲殻類のカイアシ類（Copepod、コペポダ）であり、ワムシの使用がまだ一般的ではなかった頃、あるいは栄養強化の技術が十分でなかった頃には、種苗生産でも天然海域から採取されカイアシ類が餌として利用されていました。餌としてのカイアシ類の利用効果は非常に高いものであり、生残率の向上、変形率の減少、遊泳行動の改善など、報告されている好例を挙げればキリがありません。こうした研究報告例も有り、カイアシ類が理想的な魚類種苗用の初期餌料として期待され、数々の大量培養に関する研究報告もなされてきました。

確かにカイアシ類給餌の効果は高いものの、実用的な大量培養が行われていないことも事実です。ただ、栄養的な観点で考えれば、ワムシの栄養強化技術は相当高いレベルまで到達しているとも言えます。つまり、カイアシ類の栄養価に匹敵するワムシを作り出すことも夢ではないとも言えるのです。しかし、栄養強化技術の粋を極めたワムシといっても、魚類仔魚は好んであるいは積極的に摂餌しているかどうかについては不明なままです。つまり、ワムシを魚類仔魚に十分に食べさせているのかどうかは分っていないのが現状なのです。そして、この比較対象もないということも言えます。

我々の研究室では、カイアシ類の培養を小規模なが



図1. *Pseudodiaptomus inopinatus*の外観
(左)ノープリウス幼生、(右)成体

ら実現し、これをワムシの比較対象として実験を行ってきました。それらの研究が進むに従い、魚類仔魚の摂餌対象物に対する認識の仕方についても研究を進めるようになりました。ここでは、それらの結果について紹介すると共に、将来、ワムシの栄養強化に加わるべき項目について考察します。

魚類仔魚はワムシを好んで食べている？

先述のように、我々の研究グループはカイアシ類の人工培養に成功し、これを材料として研究を進めてきました。培養に成功したカイアシ類は、汽水・河口域から沿岸域に広く生息する *Pseudodiaptomus inopinus*

(図1) という種で、我々はこの種を鹿児島県奄美大島の役勝川河口域のマングローブ林周辺で採取しました。残念ながら培養に成功したのは我々が最初ではなく、過去に既に培養例が報告されている種です。

この *P. inopinus* をワムシと同時に給餌し、ワムシと *P. inopinus* のどちらを優先して摂餌するのかについて調べてみました。実験は2種類行い、1) ワムシ給餌で予備飼育した仔魚を使用して、ワムシと *P. inopinus* を同時に給餌することによる、仔魚の摂餌選択性の検討、2) カイアシ類およびワムシを仔魚開口時から同時給餌することによる飼育成績および胃内容物構成の検討を行いました。

1) 仔魚の摂餌選択性

仔魚の摂餌選択性を調べるに当たっては、Ivlev (1961) の摂餌選択指数を算出して、選択性の指標としました。この指数は仔魚の飼育水中の餌料生物種の比を基にして、消化管内の餌料生物種の比から、目的とする餌料生物に対する仔魚の選択性を導き出すものです。実験では、マダイ、クロマグロ、スマの仔魚を用いました。

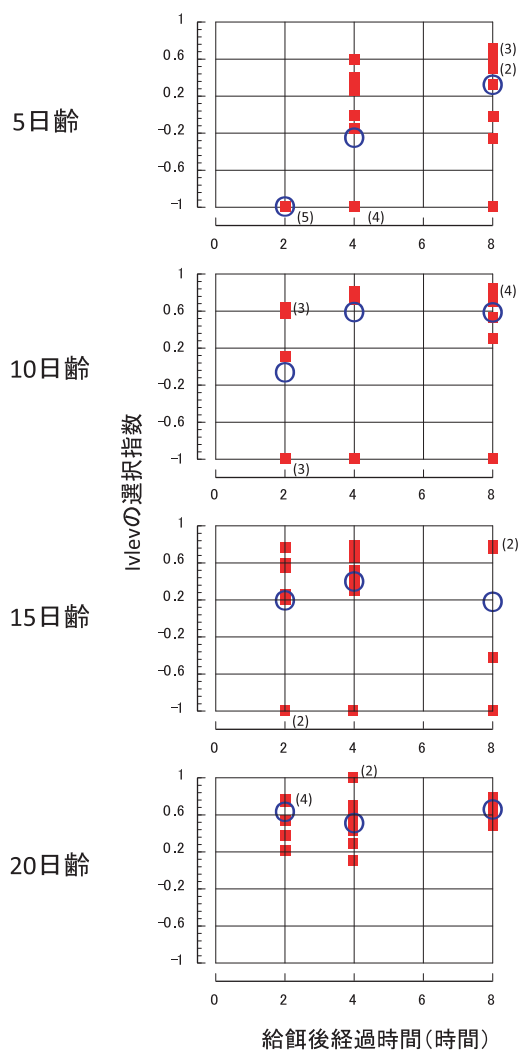


図2. マダイ仔魚のカイアシ類に対するIvlev (1961) の選択指数の変化
括弧内の数字は重なったプロットの数を示す。

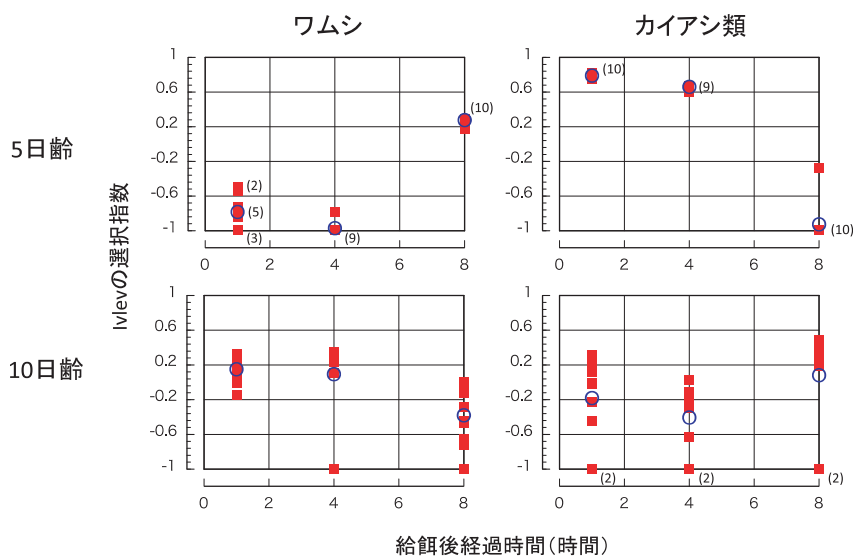


図3. スマ仔魚のワムシおよびカイアシ類に対するIvlev (1961) の選択指数の変化
括弧内の数字は重なったプロットの数を示す。

マダイでは、5日齢に実験を行った時には、実験開始時にカイアシ類は避けられ、ワムシを選択的に摂餌していました。これが時間経過と共にカイアシ類を選択的に摂餌するようになっていきます(図2)。ところが、10-15日齢になるに従って、最初からカイアシ類を選択的に摂餌する個体が増え、20日齢に至っては、終始カイアシ類を選択的に摂餌しています。一方、クロマグロやスマでは、5日齢前後では最初からカイアシ類を選択的に摂餌する傾向があるものの、10日齢以降ではカイアシ類でもワムシでも摂餌する傾向に変わっています(図3)。ただし、スマの予備飼育の餌として、イシダイふ化仔魚を給餌すると、ワムシやカイアシ類を給餌しても摂餌しなくなりました。

2) ワムシ・カイアシ類同時給餌による飼育成績

マダイ仔魚を使用した実験でしたが、開口時からカイアシ類とワムシを同時に給餌してみました。ただし、カイアシ類の生産能力が限定されていますので、仔魚にはカイアシ類をワムシ個体数の5%の比率で給餌しました(ワムシ・カイアシ類給餌区)。対照として、ワムシ→アルテミアの餌料系列で給餌する飼育区も設けました。ワムシの給餌量は両区で同じとしました。

結果として、ワムシ・カイアシ類給餌区は、対照区と比べて生残率が非常に低くなりました(図4)。5~15日齢

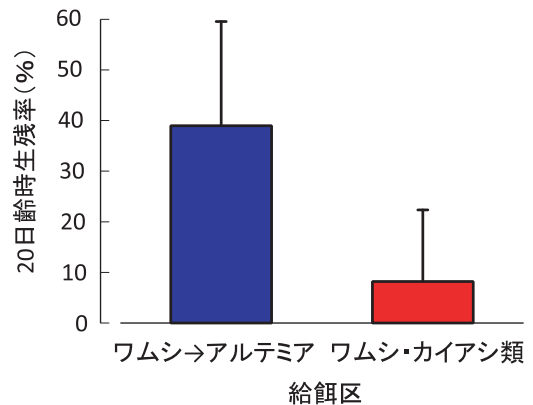


図4. ワムシ・カイアシ類同時給餌とワムシ→アルテミア餌料系列の20日齢時の生残率の比較棒は平均(n=3)、縦線は標準偏差。

の間で5日毎に胃内容物を確認すると、対照区に比べるとワムシ・カイアシ類給餌区では、ワムシの量が少なくなることが分かりました(図5)。

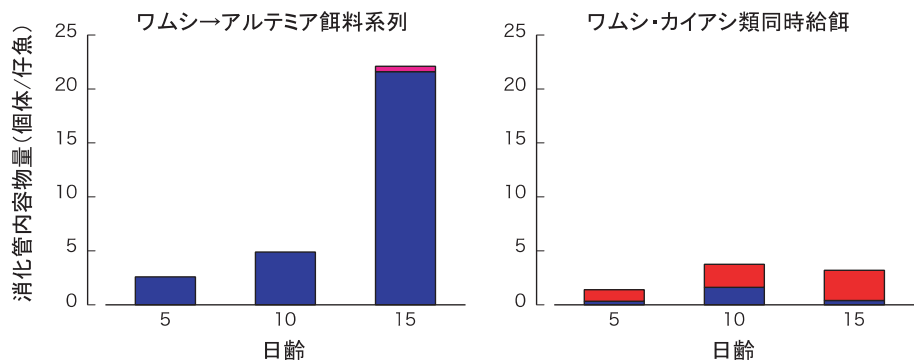


図5. ワムシ・カイアシ類同時給餌とワムシ→アルテミア餌料系列の胃内容物量の比較青棒はワムシ、桃色棒はアルテミア、赤色棒はカイアシ類を表す。

1) および2) から考察すると、マダイだ

けでなくクロマグロ、スマ仔魚は、ワムシよりもカイアシ類を選択的に摂餌することが分かりました。ただし、クロマグロやスマは魚食性に変化する頃には、目前に現れる餌であれば、特に種類に関係なく摂餌するということが分かりました。また、マダイ仔魚では、開口時からカイアシ類を給餌すると、極端にカイアシ類に嗜好性を示し、目前にワムシが存在しても摂餌しなくなる傾向があることも判明しました。つまり、マダイはワムシよりもカイアシ類を餌として好むと考えられます。クロマグロやスマも開口直後はカイアシ類を好むが、成長するとワムシでもカイアシ類でも良くなり、魚食性が強くなり、ふ化仔魚給餌が始まると見向きもしなくなると考えられます。

一方で、カイアシ類の遊離アミノ酸含量を分析すると、過去の研究で摂餌誘因に関わると判断された、グリシン、アラニン、アルギニンが、栄養強化されたワムシやアルテミアよりも多く含まれることが分かりました。マダイ仔魚が遊離アミノ酸によりカイアシ類を選択的に摂餌したのであれ

ば、5～15日齢の間に最初からカイアシ類をもっと選択的に摂餌したと考えられます。つまり、嗅覚が発達していないから、視覚に頼った摂餌を行ったものと考えられます。さらに、泳ぎ方の目立つカイアシ類を選択する傾向にあるものの、自身の遊泳スピードが追いつかないので、摂餌を失敗したり、選択性のない摂餌をしたりする傾向にある、と考えられます。しかしながら、スマやクロマグロは当初からカイアシ類に選択性があるため、嗅覚が関係している可能性も捨てられません。

仔魚期の網膜の変化

マダイでは視覚が摂餌に強く関係している可能性があるため、マダイ、スマ、クロマグロの網膜の発達について解析しました。魚の網膜細胞には錐体細胞と桿体細胞があることが知られています。そのうち錐体細胞には単錐体と双錐体が存在し、これら2種類の細胞がモザイク状に整列すると、対象物をハッキリと見えるようになると考えられるため、錐体細胞の配列の仕方について組織切片から観察しました。全長6mm（13日齢）のマダイでは単錐体のみが観察され、その後全長13mm（66日齢）で双錐体が出現しますが、モザイクは形成されません。モザイクが形成されるのは全長16mm（63日齢）に達してからです（図6）。双錐体が表れた時点では、既に稚魚に成長していますので、仔魚期は網膜には単錐体のみで、ハッキリと見えないままに摂餌しているものと考えられます。これはスマやクロマグロでも同様であり、仔魚期には網膜は単錐体のみで構成されています（図7）。

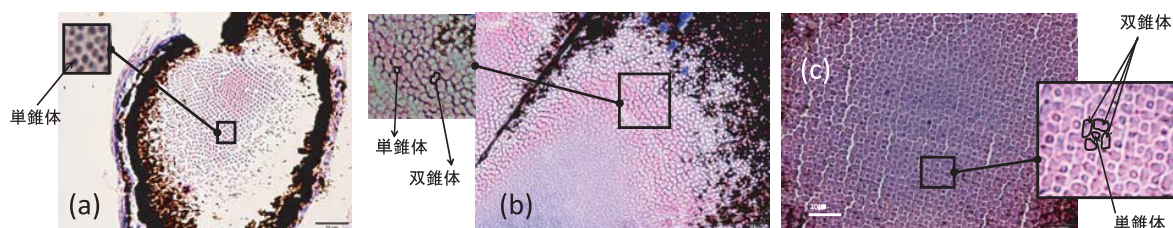


図6. マダイ仔稚魚の網膜組織の発達
(a)全長6mmの仔魚；単錐体のみが観察される。(b)全長13mmの稚魚；双錐体が出現するが、モザイク構造は形成されていない。(c)全長16mmの稚魚；モザイク構造が確認された。

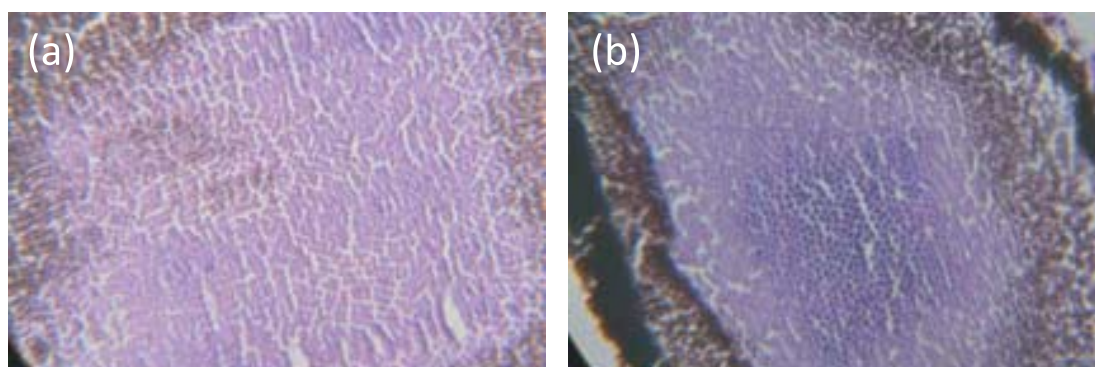


図7. スマおよびクロマグロ仔魚（15日齢）の網膜組織
(a)スマ、(b)クロマグロ、共に双錐体は観察されない

このようなハッキリと対象物が見えない状態で摂餌を促すためには、仔魚にとって見えやすい、あるいは視覚的に気を引きやすいものである必要があります。つまり、ワムシをカイアシ類のように目立つように泳がせるか、背景から際立たせて目立たせるか、目に付きやすくすれば、ワムシはさらに摂餌されるようになると考えられます。

ワムシを染色したらどうなる？

ワムシをカイアシ類のように泳がせるわけにはいきませんので、ワムシを染色してどの色を選択するかを検討しました。ワムシの染色は、青色をアルシアンブルー、赤色をニュートラルレッドで染色しました。緑色での染色も試みましたが、ワムシを生きたままに染められる染色剤がありませんでしたので、クロレラを飽食させて、緑色に見せるようにしました。また、背景色によって見え方が変わる可能性があるため、白色および黒色水槽を用いて実験を行いました。各色のワムシは5個体/mLになるように実験水槽に接種し、給餌から1、4、8時間後に仔魚を10尾ずつ採取し、消化管内の各色ワムシの数を数えました。また、色の選択性についても前述のIvlevの選択指数を用いました。試験はマダイ、ヒラメ、スマ、クロマグロで実施しました。

結果として、どの魚種も、赤色を選択的に摂餌することがなかったか、極僅かに摂餌した程度でした。マダイやヒラメは、5日齢前後では青色に染色したワムシに選択性を示す個体が多く、その後、緑色に選択性を示すようになります。一方、スマやクロマグロは、5～10日齢では緑色に選択性を示す傾向にあり、15日齢になると青でも緑でもどちらの色にも選択性を示すようになります。この場合、青色ワムシでは被甲が青色を呈しますが、緑色ワムシは消化管のみが濃く見える傾向にあります。見え方の問題か、色の問題か、これを解決する必要があります。

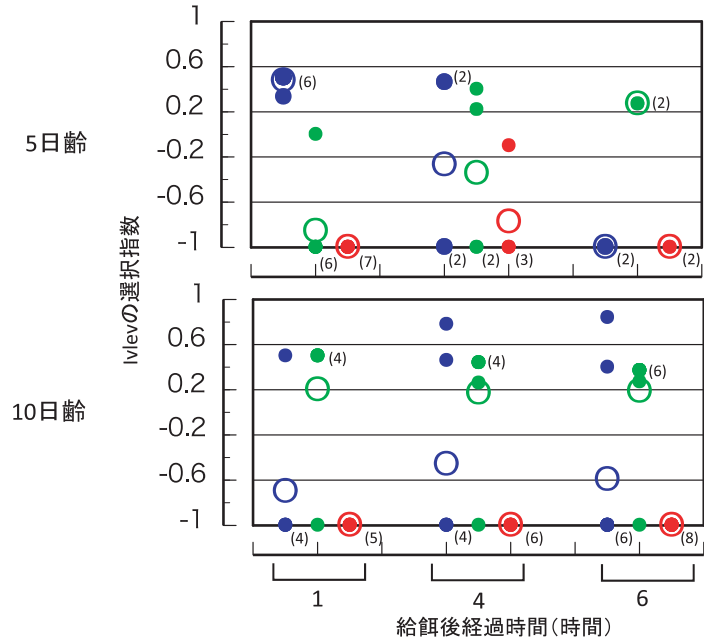


図8. 5および10日齢のマダイ仔魚の各色に染色されたワムシに対するIvlev (1961) の選択指数の変化
括弧内の数字は重なったプロットの数を示す。中抜き円は平均を示す。

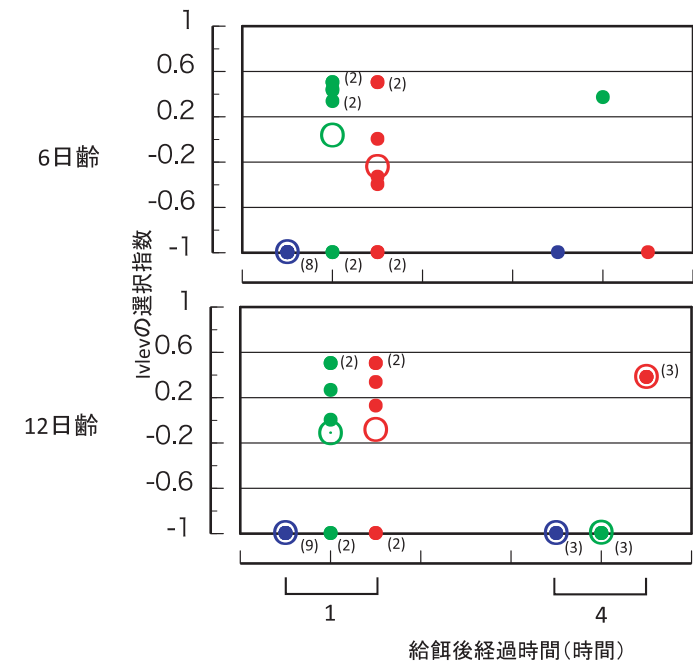


図9. 6および12日齢のクロマグロ仔魚の各色に染色されたワムシに対するIvlev (1961) の選択指数の変化
括弧内の数字は重なったプロットの数を示す。中抜き円は平均を示す。

まとめ

各魚種の仔稚魚はカイアシ類が存在する環境下ではカイアシ類を優先して摂餌します。これは視覚的刺激に依るものであると考えられます。しかし、カイアシ類がいない環境下では、ワムシは当然摂餌されますが、仔魚にとって積極的に摂餌する「忘れられない」餌ではないとも言えます。ワムシが仔魚の目に付くようにすれば、ワムシを更に摂餌させられるようになる可能性はありますが、ワムシに「夢中」にさせるには、更にカイアシ類についての分析を進める必要があります。

講師紹介

緑色LED光によるカレイ・ヒラメの成長促進

北里大学海洋生命科学部

教授 高橋 明義

【略 歴】

- 1957年 岩手県釜石市生まれ
- 1980年 北里大学水産学部卒業
- 1982年 北里大学大学院水産学研究科修士課程修了
- 1985年 北里大学大学院水産学研究科博士課程修了 水産学博士の学位を取得
- 1985年 日本学術振興会奨励研究員
- 1986年 北里大学水産学部助手
- 1988年 北里大学医学部助手
- 1992年 北里大学水産学部講師
- 1996年 北里大学水産学部助教授
- 2006年 北里大学水産学部教授
- 2008年 北里大学海洋生命科学部教授（学部名称変更）現在に至る

【主な研究分野】

- 魚類分子内分泌学（魚類ホルモンの基礎研究）
- 増殖生物学（魚類ホルモンの応用研究）

【主な研究業績】

<和文図書・総説>

1. 高橋明義 (2017) 11章 内分泌学. 魚類学, 矢部衛・桑村哲生・都木靖彰 編, 恒星社厚生閣, 東京, 111-120.
2. 高橋明義・清水大輔・水澤寛太・古藤澄久 (2017) 緑色LED光照射によるカレイ類養殖の新展開. 養殖ビジネス 54, 21-24.
3. 高橋明義 (2017). 魚類の潜在能力を呼びおこす“光”. 月刊海洋 49, 243-248.
4. 高橋明義・伊藤道彦 共編 (2016) 成長・成熟・性決定―継―. ホルモンから見た生命現象と進化シリーズⅢ, 裳華房, 東京, pp. 204.
5. 高橋明義・水澤寛太 (2016) 光があやつる魚類の体色とホルモン. ホルモンから見た生命現象と進化シリーズⅦ―守―. 水澤寛太・矢田崇編, 裳華房, 東京, 119-132.
6. 高橋明義・伊藤道彦 (2016) 序論 生命の連続性とサケの一生. ホルモンから見た生命現象と進化シリーズⅢ―継―, 伊藤道彦・高橋明義 共編, 裳華房, 東京, 1-9.
7. 高橋明義・水澤寛太・古藤澄久・安藤忠 (2016) 光環境が魚類の体色と成長に及ぼす効果. 空気調和・衛生工学90, 953-960.

8. 高橋明義 (2016) 平成27年度水産学進歩賞 魚類の体色調節関連ホルモンの基礎と応用に関する研究. *Nippon Suisan Gakkaishi* 82, 270-273.
9. 渡部俊広・岡内正典・清水大輔・長谷川英一・稲田博史・高橋明義 (2013) 水産業への光技術の応用. *月刊オプトロニクス*32, 105-110.
10. 高橋明義・水澤寛太・古藤澄久・菊地重人 (2013) 魚類の成長と特定波長光照射～発光ダイオードの効果～. *アクアネット*8, 18-23.
11. 高橋明義・奥村誠一 共編 (2012) ナマコ学—生物・産業・文化—. 成山堂書店, 東京, pp. 1-227.
12. 高橋明義・小林勇喜・山野目健・水澤寛太 (2011) 魚類・光・内分泌～体色と食欲の深い仲. *ビオフィリア* 7, 31-36.
13. 高橋明義・小林勇喜・阿見弥典子・須沼俊和・水澤寛太・天野勝文・山野目健 (2010) 光環境と魚類の成長～カレイ目マツカワが教えてくれること. *Jasco Report* 52, 20-29.
14. 山野目健・高橋明義 (2009) 光環境と魚類生理～マツカワの無眼側黒化から成長促進へ. *比較内分泌学* 35, 93-98.

<英文総説・原著論文>

15. Takahashi A., Kasagi S., Murakami N., Furufuji S., Kikuchi S., Mizusawa K., Andoh, T. (2018) Effects of different green light intensities on the growth performance and endocrine properties of barfin flounder *Verasper moseri*. *General and Comparative Endocrinology* 257, 203-210.
16. Kasagi S., Mizusawa K., Takahashi A. (2018) Green-shifting of SWS2A opsin sensitivity and loss of function of RH2-A opsin in flounders, genus *Verasper*. *Ecology and Evolution* 8, 1399-1410.
17. Takahashi A., Kasagi S., Murakami N., Furufuji S., Kikuchi S., Mizusawa K., Andoh T. (2016) Chronic effects of light irradiated from LED on the growth performance and endocrine properties of barfin flounder *Verasper moseri*. *General and Comparative Endocrinology* 232, 101-108.
18. Kasagi S., Mizusawa K., Murakami N., Andoh T., Furufuji S., Kawamura S., Takahashi A. (2015). Molecular and functional characterization of opsins in barfin flounder (*Verasper moseri*). *Gene* 556, 182-191.
19. Takahashi A., Mizusawa K, Amano, M. (2014) Multifunctional roles of melanocyte-stimulating hormone and melanin-concentrating hormone in fish: evolution from classical body color change. *Aqua-BioScience Monographs* 7, 1-46.

緑色LED光によるカレイ・ヒラメの成長促進

北里大学海洋生命科学部

教授 高橋 明義

北里大学海洋生命科学部

准教授 水澤 寛太

水産研究・教育機構 東北区水産研究所

主任研究員 清水 大輔

1. 要 約

マツカワはカレイの仲間の冷水性高級魚である。北海道ではマツカワの栽培漁業が積極的に行われている。われわれはマツカワを研究対象として、波長などの光条件が成長に影響を及ぼすことを示してきた。まず白背地（白色水槽）で屋内飼育したマツカワの成長が黒背地（黒色水槽）飼育に対して優れていることを見出した。次いでフィルター透過光照射下での飼育により、緑色光が成長に対して促進的に働き、赤色光が抑制的に作用することを報告した。この現象には特定波長光を受容する視覚系、ならびに視覚系に刺激される神経系、内分泌系および代謝系が関与していると考えられる。さらに研究を進め、青、緑、赤のLED光照射がマツカワの成長促進に有効であることを見出した。特に緑色光の照射は、自然光下では成長がほとんど認められない低水温下でもマツカワの成長を促進した。さらに、マツカワで得られた成果は近縁の水産重要魚種であるホシガレイやヒラメにも応用可能であることが明らかになってきた。すなわち、カレイ目魚類の種苗生産時から中間育成期にかけて特定波長光を活用することにより成長の促進が可能である。これにより、一定の期間でより成長して大きくなった個体を利用すれば、放流後の自然界での歩留まり向上を期待できる。また養殖での飼育期間の短縮も可能である。

2. はじめに

われわれは色彩から多くの情報を得ている。360 nmから830 nmの間の波長の光を可視光線として感じることができ、それぞれの波長を色として認識する。普段の生活においても、色彩が物体の認識やそれにもとづく行動と密接に関連していることは容易に理解できる。

光波長は網膜に存在する視細胞によって感知される。視細胞には色を識別する錐体と薄明視に関わる桿体がある。錐体に含まれる視物質は特定の波長光を吸収する。ヒトにはこの錐体視物質が3種類あり、光の三原色をもたらしている。色は光のすべての波長を感知して識別されるのではない。各錐体細胞が感知する特定波長光の比率に応じて色が識別されるのである。

淡水魚や浅海性魚類にはこの錐体視物質が少なくとも4種類ある¹⁾。これらの視物質が吸収する波長域は人間に比べて広い範囲にわたっている。従って、魚の色覚はヒトとは異なり、少なくとも分子レベルでは優れている。一方で、光がほとんど届かない深海に生息する魚類には錐体は存在せず、桿体のみが存在する。水圏においては光が豊富で色彩に満ちあふれている浅いところでは色覚が発

達し、暗いところでは退化したのであろう。

最近、特定波長光がヒトの心理面にも影響を及ぼすことが示された。たとえば青色光は防犯に利用されている。光が影響を及ぼすのは心理面のみではなかろう。眼で受容された光情報は脳で統合される。脳は神経系や内分泌系を統御していることから、これらの生体内情報伝達系を介して全身に作用を及ぼすことが想定される。魚類もまた優れた視覚系を有し、脳を中心とする神経系と内分泌系が備わっていることを考え合わせると、増養殖において特定波長光が魚類の心理や生理状態に影響することは十分ありうる。

3. マツカワにおける特定波長光照射の効果

3.1. 鍵の「メラニン凝集ホルモン」

メラニン凝集ホルモン（MCH）は魚類の体色を明るくするホルモンとして、北里大学水産学部（現海洋生命科学部）の川内浩司教授らにより、他の動物に先駆けてサケで最初に発見されたホルモンである²⁾。われわれは2004年以来、マツカワのMCHについて化学的性状や生物活性を明らかにしてきた³⁾（図1）。MCHは脳で産生されるホルモンであり、背景色の変化に応じて血液中への分泌量が変わる⁴⁻⁷⁾。たとえば白背地では分泌量が増え、これが皮膚や鱗の色素胞に作用して体色を明るくする。

MCHは哺乳類にも存在するが、体色調節ではなく食欲増進に係わっている。魚類におけるMCHと食欲の関係はまだ良くわかってはいない。もし魚類でもMCHによって食欲が増進されるならば、MCH産生量が増加する白背地で飼育した魚では成長が速くなるはずである。この仮定のもとで、白背地と黒背地でそれぞれ飼育したマツカワの全長と体重の変化を調べたところ、期待通り白色水槽飼育魚の成長は黒色水槽飼育魚より良い結果となった。実際、白背地では摂餌量が増える。このことは自発摂餌法によって証明した⁸⁾。自発摂餌とは魚が触覚センサーを引くたびに給餌器から餌が落ちるしくみのことで、魚が食欲に応じて餌を食べることができる。

MCHと成長もしくは食欲との関係の解明は今後の重要な課題であるものの、光環境（白あるいは黒背地）がマツカワの成長に影響を及ぼすことは間違いない。光の三原色が混じると白色光になる。白背地では光のほとんどが反射されており、黒背地ではその多くが吸収される。従って、白背地では「光の総量」が黒背地よりも多いものと大雑把にみなすことができる。白背地の成長促進効果は光の総量に起因するのであろうか、あるいは波長に依存するのであろうか。

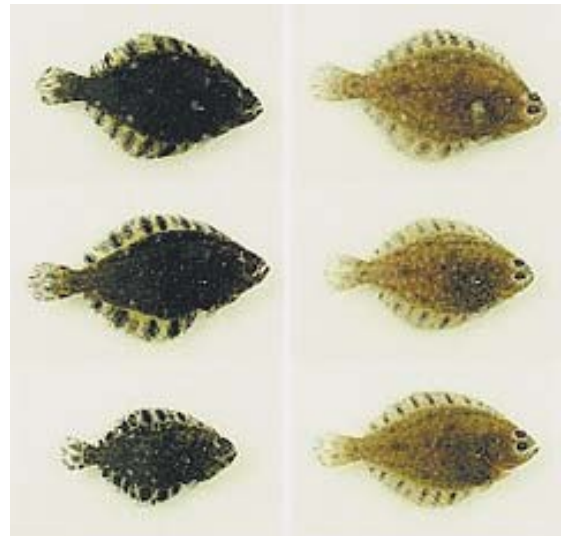


図1 メラニン凝集ホルモンを投与したマツカワの体色

体重1gあたり0.1 μgのメラニン凝集ホルモンの腹腔内投与から4時間後の体色を示す¹²⁾（右列。左列は対照群）。MCHは視床下部で産生され神経下垂体から分泌されるホルモンである。このホルモンは、マツカワにおいても他の魚類と同様に、色素凝集活性を現す。マツカワでは脳内MCH遺伝子発現量は白背地で高く、黒背地では低い。脳内MCH産生細胞数と脳内MCH含量も白背地で高い。さらに血中MCH濃度も白背地で高くなる。このような条件下でマツカワの体色は明るく、黒色素は収縮傾向にある。MCHの産生は背地色によく応答して変動し、その血中濃度の増減に応じて色素が凝集もしくは拡散する。

3.2. マツカワの成長とフィルター透過光

マツカワの成長に及ぼす特定波長光の効果を、まずフィルター透過光を用いて調べた⁹⁾。蛍光灯のフィルター透過光（青446 nm, 緑555 nm, 赤色622 nm）をマツカワに照射して飼育したところ、マツカワの成長は緑色光照射群において最高であり、赤色光照射群で最低であった。白色（無色透明）フィルター透過光を照射する実験群も加えてみたところ、この群の成長は緑と赤色光をそれぞれ照射した群の間であった。555 nm付近の波長がマツカワの成長に促進的に作用し、622 nm付近の光は抑制的に作用することになる。

さらに実験を進め、屋内において環境光（自然光および必要に応じて点灯する蛍光灯の光）を光源とし、水槽に各色フィルターをかぶせてマツカワを飼育した。フィルターを乗せない水槽を対照とした。この場合でも、緑色光照射群の成長が最も優れていた⁹⁾。緑色フィルターが成長に対して負に作用する赤色光等の長波長光を環境光から除去したと考えることもできる。

3.3. マツカワの成長とLED光照射および水温

特定波長光の効果をより厳密に調べるため、有彩色光を照射する青、緑、および赤発光ダイオード（LED）を用いて飼育実験を行った（図2）。1回目の飼育実験は平成22年4月から5月にかけて行った。前半（4/1～4/22）では、青および緑色光照射群の日間成長率が赤色光照射群よりも高い値を示したが、後半（4/23～5/13）では差がなかった。飼育期間中に水温は次第に上昇した。前半の平均水温は9.3℃であり、後半では12.1℃であった。すなわち、水温が次第に上昇する春季から夏季にかけては、水温10℃以下の時に、赤色LED光照射群の日間成長率は青および緑の各LED光照射群よりも低かったが、興味深いことに、この差は水温の上昇とともに消失したのである。



図2 発光ダイオード(LED)を設置したマツカワ飼育水槽～その1

2回目の飼育実験の状態。右上から時計回りに青色光、緑色光、および赤色光を照射した。左上は対照の環境光照射水槽。ピーク波長は青464 nm、緑518 nm、赤635 nmとした。LEDの特性を活かして水面上の放射照度を約0.8W/m²にそろえた。照射は午前9時から午後5時までの8時間行った。光条件は1回目の飼育実験も同様である。光源はスタンレー電気（株）製。水槽は（株）ケイ・エム アクト製。

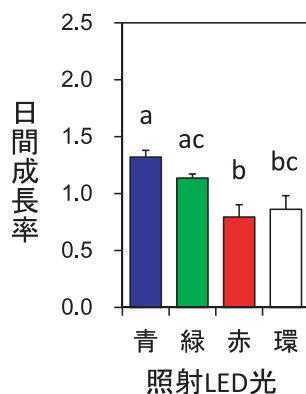


図3 LED光（青、緑、あるいは赤）を照射して飼育したマツカワの成長

平均水温が17.4℃の前期（10/12～11/12）では、各LED光照射群と対照群（環境光照射）の日間成長率に差は認められなかった。平均水温13.3℃の中期（11/13～12/13）では、LED光照射群の成長が対照群よりも優れていた。LED光照射群のなかでは青色光照射群の日間成長率が最大であり、緑色光照射群がそれに続いた。図に示した平均水温8.8℃の後期（12/14～1/13）では、青色光照射群と緑色光照射群の日間成長率が赤色光照射群と対照群よりも高かった。統計上の有意差は異なる記号の間に認められる。

2回目の飼育実験は同年10月から翌1月にかけて行った。この時は対照に環境光飼育群を設けた。水温が次第に低下する秋季から冬季にかけては、平均水温17°C以上の時には、LED光照射群間の日間成長率に差は見られなかった。しかし、水温の低下に伴って、赤色LED光照射群と環境光下（対照群）では日間成長率が青および緑LED光照射群より減少した。さらに水温が低下したところ（平均水温8.8°C）、これらの差は拡大した（図3）。特定波長光の成長促進効果、あるいは摂餌行動刺激効果は水温が低い時に顕著に発揮されることを、初めて認めたのである。



図4 発光ダイオード（LED）を設置したマツカワ飼育水槽～その2

（独）水産総合研究センター（現国立研究開発法人水産研究・教育機構）北海道区水産研究所厚岸庁舎におけるLED光照射の様子。右下挿入図は対照の環境光照射群。

以上の実験結果を評価するために、（独）水産総合研究センター北海道区水産研究所厚岸庁舎の村上直人主任研究員の支援を得て、一定水温下での飼育実験を行った¹⁰（図4）。その結果、水温が高い時にはLED光照射は青・緑・赤いずれの光でもマツカワの成長を促進することが示された。そして、マツカワがほとんど活動しない、すなわち成長しない低水温下でもLEDが発する有彩色光はマツカワの摂餌行動を刺激して成長を促進させることが認められた（図5）。これらマツカワにおける一連の研究結果と飼育担当者の経験に基づいて、成長には緑色光が有効であると総合的に判断した。

環境光は一般的な屋内飼育での光環境そのものである。この光条件ではマツカワはほとんど動か

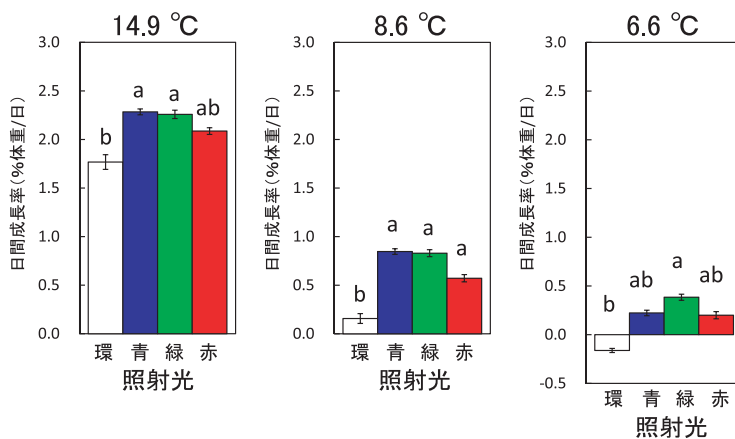


図5 青、緑あるいは赤色LED光照射下で4週間飼育したマツカワの日間成長率

平均水温14.9°C、8.6°C、6.6°Cのすべてにおいて、青色LED光、緑色LED光および赤色LED光のいずれにも成長促進効果が認められた。水温の低下に伴って成長率も低下する。14.9°C群の対照（環境光照射）群の成長率は低い。6.6°C群の体重は飼育中に減少した。これはほとんど摂餌しないものの、異化作用は進行したことを示す。このような極限条件下でも、LED光により成長が促進される。統計上の有意差は異なる記号の間に認められる。文献10の数値に基づいて作図した。

ない。しかし緑や青の光により、通常では動かないマツカワの遊泳が活発になる（図6）。これらの光の波長がなぜ行動を刺激するのか、現在のところまったく不明である。

LEDから照射される光波長の性質は蛍光灯やタングステンランプから発せられるものとは異なる（図7）。総じて、LEDはマツカワの成長に対して他の光源よりも有利に働いていると、一応結論できる。網膜で感知された特定波長光の刺激が脳に伝わり、脳で神経系や内分泌系を刺激することによって行動に加えて食欲や代謝が活性化されたものと推測されるが（図8）、その詳細は現在のところよくわかっていない。LEDの、特に低水温下での、作用は謎であり極めて興味深い研究課題である。

3.4. マツカワ・オプシンの構造と動態

われわれは、マツカワには他の浅海性あるいは淡水魚と同様に、桿体オプシン (RH1), 紫外線型オプシン (SWS1), 青型オプシン (SWS2AおよびSWS2B), 緑型オプシン (RH2-BおよびRH2-C), および赤型オプシン (LWS) が存在することを証明した¹¹⁾。これらのオプシンの最大吸収波長を測定したところ、具体的な値は省略するが、マツカワは一連の実験に使用したLED光とフィルター透過光を感知できることが示された。

これらオプシン遺伝子の発現量は成長に伴って変動する。0歳齢から1歳齢にかけて発現が減少するオプシン (LWS, RH2-C, SWS2BおよびSWS1) と、発現が変動しないオプシン (RH2-BとSWS2A), また発現が上昇するRH1とがある。RH1は桿体において薄明視に関与し、錐体オプシンは色弁別に関与するとされている。各種オプシン遺伝子の発現動態にもとづけば、マツカワにおいては0歳齢から1歳齢にかけて薄明視が発達するとともに、短波長光 (青色光) および長波長光 (赤色光) に対する感受性が相対的に低下すると推測される。

この考えが的を射ているのならば、マツカワの成長に対する特定波長光の効果が成長段階によって変化する可能性がある。マツカワは稚魚期には浅海に生息するが、成長に伴ってより深い海域に移動する。

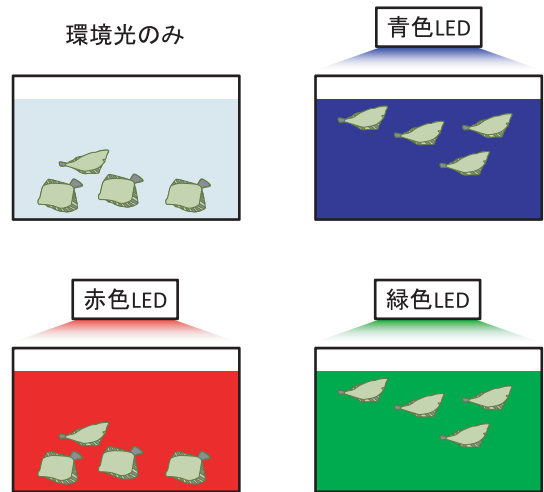
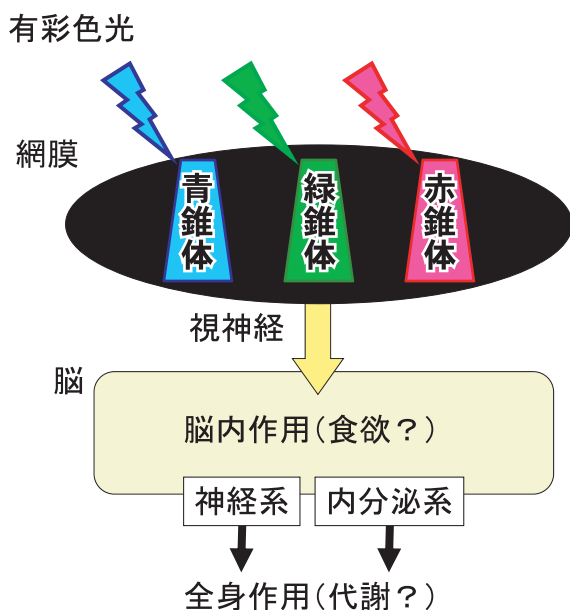


図6 マツカワの行動に及ぼすLED光と水温の関係

図2と4で紹介した水槽で飼育実験を行ったところ、水温が10℃以下の時、環境光下で飼育されたマツカワの行動は不活発であった。赤色LED光を照射した場合も同様である。ところが、青色LED光と緑色LED光を照射すると、通常はあまり動かないマツカワの行動が活発になる。

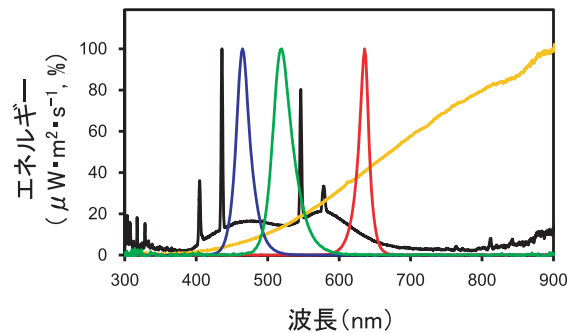


図7 照明光の波長分布

白熱球 (オレンジ色の線)、蛍光灯 (黒色の線)、LED照明 (464 nm 青色の線、518 nm 緑色の線、635 nm 赤色の線) の波長分布の例を示す。縦軸は各波長のエネルギーを表す。それぞれのピーク波長のエネルギーを100%とした。

図8 有彩色光が魚類生理に影響を及ぼす経路

それぞれの波長の光が各種錐体細胞中のオプシンにより受容される。視神経を通じて脳内へ伝達された刺激が脳内作用として食欲を刺激して、摂餌行動を活発にする。光刺激は神経系や内分泌系によって全身に伝播する。結局、光は全身作用として代謝に係わる。

光量は深くなるにつれて減少するが、相対的に緑色光が多くなる。マツカワの光感受性の変化はその生態と関連しているのであろう（図9）。

4. ホシガレイとヒラメでの効果

緑色LED光はホシガレイとヒラメの成長促進にも有効であることを認めている。この成果の概略は「特定波長光飼育によるホシガレイおよびヒラメ稚魚の成長」と題して、平成28年度日本水産学会春季大会で清水らが発表した。白色、青色、青緑色、緑色および赤色LED光の中で、緑色光の効果が最も優れていることを見出している。本稿では日刊水産経済新聞に掲載された記事を原文のまま引用して、これら魚種での効果を紹介する。

4.1. “ホシガレイ 緑LEDで体重1.5倍 水研センターと北里大グループが確認（2015年5月12日）”

“特定の色（波長）の光を魚に照射することで、種苗生産や養殖する魚の成長を促進できることが分かってきた。緑色に感受性の高いホシガレイに対し、約3か月間、緑LED（発光ダイオード）を照射して育成した実験では、通常に比べ体長で10%、体重で1.5倍に成長したという。特定の色による魚の成長促進はホシガレイ以外の魚にも有効なことが分かっており、種苗や養殖魚生産の効率化に大きな効果をもたらさそうだ。

この研究は、北里大学の高橋明義教授が行ってきた特定の色で魚の成長が促される基礎研究のもと、水産総合研究センター東北区水産研究所沿岸漁業資源研究センター資源増殖グループと、高橋教授、スタンレー電気（株）などの研究グループが、50トン水槽の量産規模で実施した（図10）。

（中略）

実験は昨年7月に実施。日中の自然光に加え、ホシガレイに緑色LED光を7時間照射したところ、緑LED光が照射されたカレイは約3か月後に体長が10センチから18センチまで成長。緑LEDを照射していないカレ

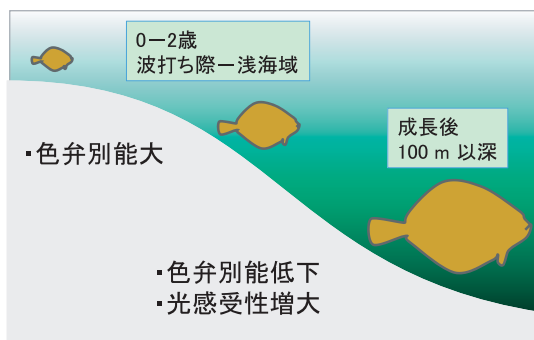


図9 マツカワの成長と棲息深度と色弁別の関係

浅瀬に棲息する稚魚期には色弁別能が優れているが、成長に伴って棲息域が深くなるとこの能力は低下すると考えられる。逆に光感受性は弱い光を感知するために増大するのであろう。



図10 「LEDで緑に照らされた水槽」（高橋教授提供）



図11 「3か月でこれだけの成長差に」（清水主任研究員提供）

イが16センチにとどまる中で10%以上の成長促進が確認された。

体重も、自然光のみのカレイが3か月間で18グラムから55グラムの成長にとどまったのに対し、緑LEDを使ったカレイは80グラムと自然光の1.5倍に成長したという（図11）。

養殖試験の前、春先に行われた種苗中間育成でも、緑LEDを使った種苗は約3か月で4センチから8センチまで成長したのに対し、自然光のみの種苗は8センチに成長するまで4か月を要した。種苗の中間育成では放流適期に合わせるために加温して成育を促すこともあるが、緑LEDを使えば加温せずに成長を早められ、コスト削減にもつながる可能性がある。

（以下略）”

4.2 “ヒラメ成魚, 冬に効果大 緑LEDで成長加速 大分県 研究から普及へ（2018年7月18日）”

“大分県が実施した緑色LED光の照射によるヒラメ成長促進の長期試験結果が明らかになった。LED照射区は水温が下がる冬でも食欲が旺盛で、10か月後の測定で体重は対照区に比べ6割増加、増肉係数（魚が1キロ太るのに必要な餌の量）は1割近く下がった。実験した県農林水産研究指導センターの報告を受け、県内の民間ヒラメ養殖会社が機器導入に高い関心を示している。

緑色LED光による成長促進効果はヒラメやカレイ類で報告が多く、放流事業用の種苗生産で実用化も始まっている。ヒラメ養殖が盛んな大分でも昨年8月まで77日間の短期試験を行い、対照区に比べ平均体重で1.24倍の成長を確認した。

昨年9月からは長期試験を開始。短期の試験同様に、民間ヒラメ養殖場の陸上水槽で、照明器具メーカーのスタンレー電気社製緑色LED灯（波長518ナノメートル）を一日12時間照射した区（図12）と、自然光のみの対照区で飼育、比較した。

平均体重の推移をみると、導入時に21グラムだった稚魚は306日後の今年7月にLED区で584.3グラム、対照区で364.8グラムと1.6倍もの差が出た（図13）。

施設を提供したヒラメ養殖業者は「総じて肉厚で、バラつきが少ない」と評価した、

LED区は照射直後から活発に遊泳した。水底に潜み、あまり動かない対照区と大きく異なる。また、LED区は餌食いもよかった。泳ぎ続けることでエネルギーを消費し、飼料効率の悪化も懸念されたが、期間中の増肉係数は対照区の1.05に対しLED区は0.97で、むしろ効率がよい。同センターは「遊泳で消化、吸収が促進されたため」とみている。

成長差は魚の活性が下がる低水温期に、特に顕著だ。体重で比較すると1月の測定時までLED区が



図12 緑色LED光を照射する試験区

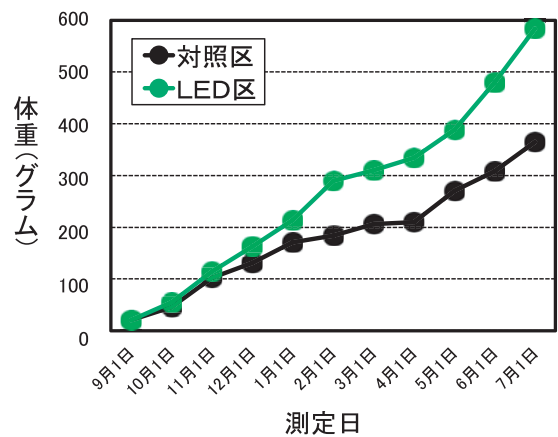


図13 ヒラメ平均体重の推移

*数値をもとに新たに作図したため、原因とは体裁が若干異なる。

1.2倍程度だったが、2月の測定時には1.5倍に広がり、現在もその差を維持している。LED区では冬でも餌をよく食べたという。

特定波長による魚の成長を研究する北里大学海洋生命科学部の高橋明義教授は、過去にマツカワなどカレイ類で行った試験で「特に低水温期に成長差が大きかった」と話す。緑色LED光の照射でメラニン凝集ホルモンの増加を確認しており「これが食欲増進を引き起こした」と推測。ヒラメでも同様の効果があったと解説する。

同センターは生産者が集中する県南域で成果を報告。成長と飼料効率のよさから、導入を希望する声が挙がったという。

ただ、特定波長のLED灯は高額で、導入を阻む最大の理由になっている。同センターは今後、収容尾数の多い稚魚期に集中して照射し、成長に勢いをつけてから分養するなど、最小限の投資で大きな成果が得られる条件を検証する方針だ。”

5. 課題と展望～緑色光誘導性成長の仕組みと利点

5.1. 緑色光と摂餌行動

緑色光照射による成長促進は、マツカワ、ホシガレイ、ヒラメに加えて、神奈川県水産技術センターによりマコガレイにも認められている。これら4魚種に共通する現象は緑色光による行動の活発化である。大分の養魚場で観察された体重数百グラムのヒラメの群泳は壮観でさえある。

緑色光がこれらカレイ類の摂餌行動を活発にすることは間違いなからう。緑色光と摂餌行動を結びつけているのが、脳内で作用するMCHである可能性が高い。ホシガレイで食欲に関連する複数のホルモン遺伝子の発現を調べたところ、このホルモンの発現量だけが緑色光により常に上昇することがその根拠である。しかし、カレイ類におけるMCHの食欲増進作用は哺乳類での結果に基づく推測であり、まだ実際には証明されていない。その証明が急務となっている。

5.2. 緑色光と同化作用

緑色光照射により誘起されるもう一つの興味深い現象は、飼料効率と増肉係数が良好となり、さらに肥満度が高まることである。これらの現象は魚類養殖においては有利であることは間違いない。緑色光の作用により同化作用が活性化し、筋肉などの細胞での吸収効率が高まったものと考えられる。この同化作用は、エネルギーバランスの観点では、行動の活発化のためのエネルギー物質を生産する、異化作用を上回ることになる。食べて、運動して、そして体重が増えることは、筋トレになぞらえることができる。

同化作用は如何にして活性化されるのであろうか。成長には脳下垂体から分泌される成長ホルモンが極めて重要な役割を担っている。しかしマツカワとホシガレイで調べた限り、緑色光照射下での成長と成長ホルモン遺伝子発現の間には現在のところ対応が認められない。別のホルモンが関与している可能性が高い。摂餌行動活発化（あるいは食欲増進）の鍵としてMCHが浮上しているが、同化作用に関する手掛かりは、現在のところ得られていない。

6. おわりに～基礎から応用へ

本稿で述べた一連の研究成果は、当時岩手県水産技術センターに所属していた山野目健氏とマツカワを用いて一緒に行った、MCH作用の分子レベルでの基礎研究に端を発する。魚類においてMCHが食欲と体色に関与するのは、脳の視床下部で産生されたこのホルモンが脳内のみならず、血液中に分泌されて全身に作用するからである。脳内での作用は脊椎動物共通である。これに対して、血液中への分泌は形態学的な特徴に起因する魚類に特異的な現象であり、体色を変化させるカモフラージュなどに寄与する。緑色光による成長促進は、カレイ類におけるMCHの食欲増進作用の証明が前提であるが、魚類の特性を巧みに活用して潜在能力を引き出すことに他ならない。

ただし限界もある。緑色光照射が効果を発揮するのは変態が完全に終了して着底し、しばらく時間が経過した後の稚魚期以降である。ホシガレイでは全長20cm程度の未成魚にも有効との知見がある。一方で浮遊期の仔魚と着底直後の個体への照射は、斃死などの悪影響を招くため禁忌である。

体色調節の研究は水産分野では成長や成熟・繁殖とは異なり、地味な領域である。緑色LED光によるカレイ・ヒラメの成長促進が生産現場に応用されて水産増養殖に貢献できるのであれば、基礎研究者として望外の喜びである。

本稿は湊文社のアクアネット第16巻第7号（2013）の特集「LEDの増養殖利用」に寄稿した「魚類の成長と特定波長光照射～発光ダイオードの効果～」を大幅に増補改訂したものである。記事の引用には日刊水産経済新聞社の許諾を得ている。

参考文献

- 1) 源利文, 清水勇. 魚類の視覚適応の分子基盤. 魚類学雑誌 2005; 52: 91-106.
- 2) Kawauchi H, Kawazoe I, Tsubokawa M, Kishida M, Baker BI. Characterization of melanin-concentrating hormone in chum salmon pituitaries. *Nature* 1983; 305: 321-23.
- 3) Takahashi A, Tsuchiya K, Yamanome T, Amano M, Yasuda A, Yamamori K, et al. Possible involvement of melanin-concentrating hormone in food intake in a teleost, barfin flounder. *Peptides* 2004; 25: 1613-1622.
- 4) Amano M, Takahashi A, Oka Y, Yamanome T, Kawauchi H, Yamamori K. Immunocytochemical localization and ontogenic development of melanin-concentrating hormone in the brain of a pleuronectiform fish, the barfin flounder. *Cell Tissue Res.* 2003; 311: 71-77.
- 5) Amiya N, Amano M, Takahashi A, Yamanome T, Kawauchi H, Yamamori K. Effects of tank color on melanin-concentrating hormone levels in the brain, pituitary gland and plasma of the barfin flounder as revealed by a newly developed time-resolved fluoroimmunoassay. *Gen. Comp. Endocrinol.* 2005; 143: 251-256.
- 6) Amiya N, Amano M, Yamanome T, Yamamori K, Takahashi A. Effects of background color on GnRH and MCH Levels in the barfin flounder brain. *Gen. Comp. Endocrinol.* 2008; 155: 88-93.
- 7) Amiya N, Amano M, Iigo M, Yamanome T, Takahashi A, Yamamori K. Interaction of orexin/hypocretin-like immunoreactive neurons with melanin-concentrating hormone and

- α -melanocyte-stimulating hormone neurons in the brain of a pleuronectiform fish, barfin flounder. *Fish. Sci.* 2008; 74: 1040-1046.
- 8) Sunuma T, Yamanome T, Amano M, Takahashi A, Yamamori K. White background stimulates the food intake of a pleuronectiform fish the barfin flounder, *Verasper moseri* (Jordan et Gilbert). *Aquacult. Res.* 2009; 40: 748-751.
- 9) Yamanome T, Mizusawa K, Hasegawa E, Takahashi, A. Green light stimulates somatic growth in the barfin flounder *Verasper moseri*. *J. Exp. Zool. A* 2009; 311: 73-79.
- 10) Takahashi A, Kasagi S, Murakami N, Furufuji S, Kikuchi S, Mizusawa K, Andoh T. Chronic effects of light irradiated from LED on the growth performance and endocrine properties of barfin flounder *Verasper moseri*. *Gen. Comp. Endocrinol.* 2016; 232: 101-108.
- 11) Kasagi S, Mizusawa K, Murakami N, Andoh T, Furufuji S, Kawamura S, Takahashi A. Molecular and functional characterization of opsins in barfin flounder (*Verasper moseri*). *Gene* 2015; 556: 182-191.
- 12) Yamanome T, Chiba H, Takahashi A. Melanocyte-stimulating hormone facilitates hypermelanosis on the non-eyed side of the barfin flounder, a pleuronectiform fish. *Aquaculture* 2007; 270 505-511.