

養殖魚の成長を速めるための方策として、餌の改良、加温、育種、遺伝子組換え、遺伝子編集など多くの試みがある。筆者らはカレイの一種であるマツカワの成長が白色水槽(すなわち白背地)で飼育することにより促進されることを見出した。これが切っ掛けとなり、緑色光を照射して飼育することによって高成長を導けることが分かった。これらの現象を養殖に活用すれば生産性を向上させることができ、食料生産に役立つはずである。翻って基礎研究の視点から眺めると、特定の有彩色光が成長に係わる生命現象を刺激したことを示しており、極めて興味深い。

緑色光によるカレイ類の成長促進

緑色光による成長促進現象を最初にマツカワ(*Verasper moseri*)において発見し、研究を重ねてきた。この成長促進がマツカワ以外のカレイ類、さらにはカレイ類以外の魚種においても認められるかが、産業上ならびに学術上極めて重要である。

筆者らは最近、ホシガレイ(*V. variegatus*)とヒラメ(*Paralichthys olivaceus*)の成長も緑色光照射によって促進されることを直径1m(0.8㎡)の円形水槽での飼育で見出した。これらの成果は緑色光照射がカレイ類全般の成長促進に有効であることを実験事実

によって示すものである。さらに、ヒラメにおいては20㎡の角型水槽でもその効果を認めている。これは緑色光照射が、生産現場に適用可能であることを示唆する極めて重要な知見である。以下にホシガレイとヒラメにおける成果を紹介する。

ホシガレイの成長と有彩色光

1)ホシガレイの成長に有効な有彩色光の探索実験

(国研)水産研究・教育機構 東北区水産研究所 宮古庁舎が生産したホシガレイを用いて同所で実験を行った。直径1m(0.8㎡)の円形黒水槽を用いて、約400Lのかけ流し海水で飼育を行った。

屋内に設置したこの水槽の上部に白、青、青緑、緑、赤の各色の光を発するLED灯具(スタンレー電気(株)製LLM0200型)をそれぞれ設置した(20頁口絵)。ピーク波長は白を447nmおよび550nm、青を464nm、青緑を497nm、緑を518nm、赤を635nmとした。LEDの点灯は毎日午前7時から午後5時までの10時間とし、水面上の光量子束密度を $10\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に設定した。ホシガレイは自然光および作業のために点灯する蛍光灯からの光を含む屋内光(これを環境光と呼ぶ)の下でLED光の照射を受けた。対照区のホシガレイは環境光下で飼育した。それぞれの水槽に40尾のホシガレイを収容し、2015年5月7日から同年7月6日まで60日間飼育した。この間の水温は10.9℃から18.7℃に上昇した。飼料には日清丸紅飼料(株)のおとひめ

新技術

緑色光照射による ホシガレイとヒラメの成長促進

高橋 明義¹, 清水 大輔², 都留 久美子³,
木藪 仁和³, 水澤 寛太¹

1 北里大学海洋生命科学部

2 (国研)水産研究・教育機構 東北区水産研究所宮古庁舎

3 大分県農林水産研究指導センター水産研究部

EP-3を用い、午前9時から午後4時の間に1日6回、自動給餌器により飽食まで与えた。飼育最終日は無給餌とした。残餌は毎日午前8時から9時の間にサイホンで取り除いた。全長と体重は初日(0日)、20日目、40日目および最終日(60日目)に測定した。ただし、初日には対照区の40尾のみを代表として測定し、その他の測定日には全個体を測定した。20日目と40日目には、測定後に全個体をそれぞれの水槽に戻した。個体識別はしなかった。数値は“平均値±標準誤差”で表した。

2) 成長に対する有彩色光の効果

白、青、青緑、緑および赤のLED光をそれぞれ照射して60日間飼育したホシガレイの体重の推移を図1Aに示す。20日目ではまだ差は認められないが、40日目には緑色光区と青緑色光区の体重が対照区(環境光)に対して有意に増加していた。飼育最終日にも同様の結果が認められ、緑色光区が最大の値(9.0 ± 0.47 g)を示した。この値は対照区の体重(6.8 ± 0.51 g)の1.3倍であった。体重増加に対するそれぞれの光の効果を順位で表すと以下のとおりである。

緑≧青緑≧青>白≧赤=環境光

緑と青緑間のピーク波長の差は21 nmであるが、体重の平均値に3.2%の差がある。マツカワの場合と同様に、ホシガレイの体重増加においても緑色光が最大の効果を有することが明らかである。

白色光と赤色光には成長促進効果が認められない。赤色光のピーク波長は魚類が感知できる波長領域よりも長波長側にあるため、効果が低いであろう。白色光のスペクトルは可視光領域を広くカバーしているが、青色光と緑色光のスペクトルとは一部が重なるのみである(図2)。白色光に成長促進効果が認められない理由の一つに、成長促進効果を示す緑色光と青緑色光のスペクトルが少な

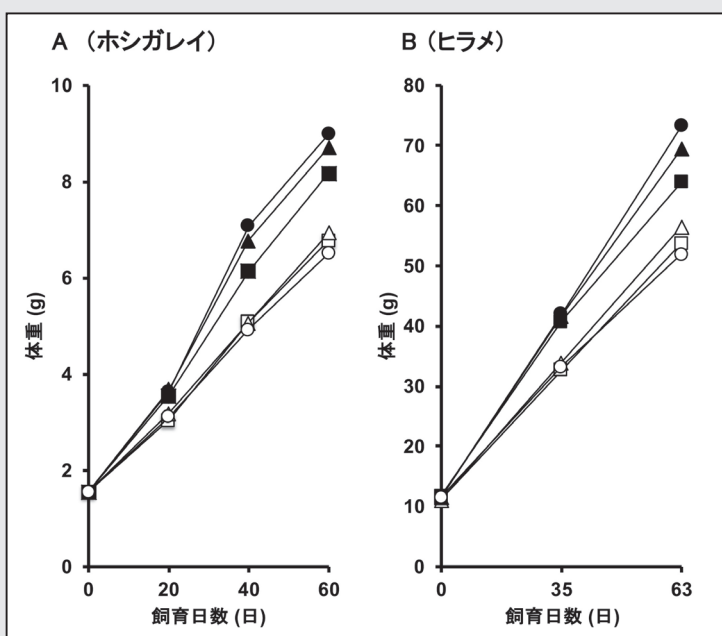


図1 有彩色光照射下でのホシガレイおよびヒラメの体重の推移
□:環境光、△:白LED光、■:青LED光、▲:青緑LED光、●:緑LED光、○:赤LED光。
誤差線は省略した。

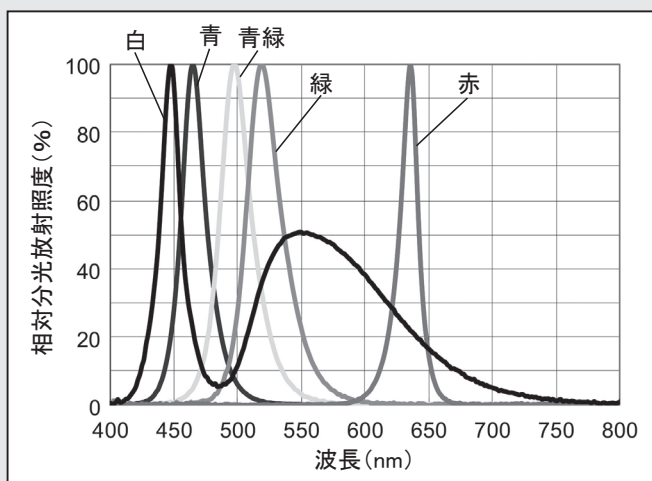


図2 スタンレー電気(株)製LEDから照射される有彩色光のスペクトル
ピーク波長は左から447 nm (白)、464 nm (青)、497 nm (青緑)、518 nm (緑)、635 nm (赤)。
Elsevier社 Gen. Comp. Endocrinol. 271, 82-901, ©2019より許可を得て転載。

いことが挙げられよう。

この実験結果が示す重要な点の一つは、単に明るさが成長を促進するものではないことである。ホシガレイの飼育は、自然光が差し込み、作業に応じて天井の照明を点灯する屋内で行った。その状態の水槽に

光源となるLEDを設置し、さらにそれぞれの光量子束密度が水面上で同等となるように調整した。このような飼育条件において白色光下のホシガレイの成長は対照区と同等であり、緑色光下での成長は対照区および白色光区よりも優れていたことから、518nmをピーク波長とする緑色光が成長を促進したことは明らかである。

ヒラメの成長と有彩色光

1) ヒラメの成長に有効な有彩色光の探索実験

マツカワに次いでホシガレイの成長も緑色光によって促進されることが明らかになった。そこで次に、養殖と種苗放流が盛んに行われているヒラメについて、成長に対する有彩色光の効果を調べた。

ヒラメの実験は前述のホシガレイと同様に行った。2015年8月25日から10月27日まで63日間飼育した(各試験区30尾)。この間の水温は20.7℃から15.7℃に低下した。全長と体重の測定は初日(0日)、35日目および最終日(63日目)に全個体で行った。

2) 成長に対する有彩色光の効果

体重の推移はホシガレイに類似していた(図1B)。35日目には緑色光区、青緑色光区および青色光区の体重は対照区に対して有意に高い値を示した。最終日には緑色光区の体重に最大の値(73.3±3.1g)が認められた。これは対照区の体重(53.8±2.2g)の1.36倍であった。順位は以下のとおりである。

緑≧青緑≧青>白≧赤=環境光

統計的には緑色光区と青緑色光区に有意な差はないが、緑色光区の平均値は青緑色区より5.5%大きく、実感でも緑色光区が大きい。白色光と赤色光には成長促進効果は認められなかった。

このように、ヒラメの成長に対しても緑色光が有効であることが分かった。この成果は、カレイ類の養殖および種苗生産に緑色光照射法を導入して生産性を高めることができる大きな可能性を秘めている。これまでの飼育試験は主に直径1mの水槽を用いて行ってきた。緑色光照射を魚類養殖に導入するためには、業者が使っている大きさの水槽でその効果を試す必要がある。また、養殖場により屋内光の条件も様々である。そのような多様な条件下で緑色光の有効性が

明らかになれば、導入の可能性が開けることになる。現場レベルでの緑色光の成長促進効果は、大分県でのヒラメでの取り組みにより、次に述べるように実証された。

ヒラメ養殖施設における緑色光の効果

大分県のヒラメ養殖業は、全国2位の生産量(2016年農林水産統計)を誇り、水産業の中核をなす。これまでのカレイ類に対する緑色光の成長促進効果は、変態後から種苗サイズにおいて明らかにされてきたが、出荷サイズまでの効果については調べられていなかった。そこで、同県内の養殖業者の理解と協力のもと、実際の屋内養殖水槽を用いて、緑色光照射によるヒラメの成長促進効果を検証した。

1) 緑色光下のヒラメ飼育方法

飼育試験は津久見市のヒラメ養殖業者に委託した。大分県農林水産研究指導センター水産研究部で生産したヒラメ種苗(平均体重20.6g)を角型コンクリート陸上水槽(4.5m×4.5m、水深約30cm)3面に各600尾(収容密度30尾/㎡)収容し、2017年9月6日に試験を開始した。飼育水は生海水を使用し、流量は1日約24回転とした。試験期間中は温度データロガー(HOBO社製)により各水槽の水温を測定した。飼育室には天井からの若干の自然光を取り入れた。

自然光、自然日長で飼育した区を対照区とした。緑色光区は2区設けた。一方にはスタンレー電気製の緑色LEDを設置した(スタンレー区)。他方には市販の緑色LED集魚灯を設置した(市販区)。LED光の照射時間は6:00~18:00の12時間とした。餌料はヒラメ用EP(株ヒガシマル)を使用し、1日1~2回飽食給餌し、給餌量を記録した。毎月各区20尾(但し8月6日は各区22尾、最終日は各区50尾)を取り上げ、体重、全長、体長、体高、体幅を測定した。

2) 緑色光下のヒラメ飼育結果

上記の飼育試験で得られた結果のうち、体重について紹介する(図3)。緑色LED光照射区は、スタンレー区と市販区の両方とも対照区に比べて高成長の傾向が認められ、2017年12月には両区ともに体重が対照区に対して統計的に有意に増加していた。スタンレー区と市販区の体重は2018年2月に差が開き始め、以

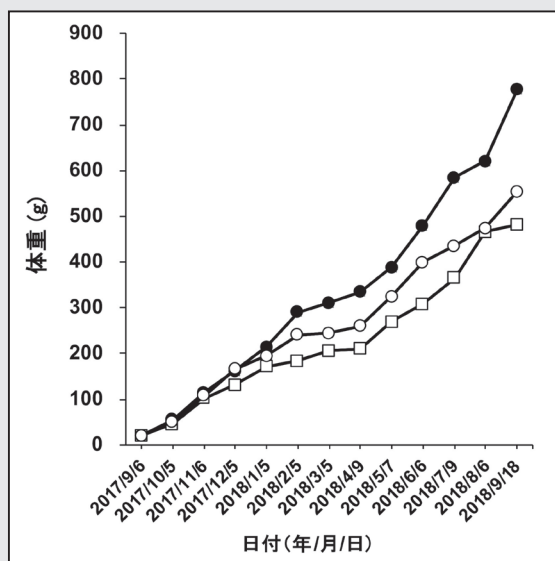


図3 ヒラメの成長に対する緑LED光の効果

□: 対照区、●: スタンレー区、○: 市販区。

本飼育試験は深良津二世養殖漁業生産組合(竹尾久信組合長/大分県津久見市)の協力を得て行った。誤差線は省略した。

後は常にスタンレー区の値が勝った。最終日の同年9月の体重は スタンレー区>市販区>対照区 の順であり、スタンレー区の平均体重(776.1±26.2g)は対照区(481.6±18.9g)の61%増となった。このようにLEDを光源とする緑色光照射により、実験レベルよりも大きな養殖場の水槽でもヒラメの成長を促進できることが判明した。

図4には各飼育区の最終日における雌雄別体重を示した。ここで分かることは、対照区と市販区では雌の体重が雄よりも有意に増えているが、スタンレー区では体重に雌雄差がないことである。この結果は、緑色光照射により少なくとも体重800g付近までは雌雄が同等に成長すること、すなわち緑色光が成長の雌雄差を解消し得る可能性を示唆する。

ヒラメの飼育実験では緑色光に遊泳行動を活性化させる効果があることを示す重要な確証が得られた。自然光下では通常水槽底面に静止していることがほとんどであるが、緑色光下では兎に角よく動き回る。マツカワとホシガレイも同様である。そのメカニズムについては少しずつではあるが知見を増やしつつある。行動観察から得られた印象では、緑色光が運動に係わる中枢神経系を刺激し、それが摂餌行動と連動し

て摂餌量が増加し、結果として体重増加に反映された可能性がある。スタンレー区では飼料効率(95.9%)が対照区(90.9%)を上回っていることから、緑色光は同化作用をも刺激したものと考えられる。

以上のように、緑色光による成長促進は養殖業者の水槽でも有効であることが分かった。ヒラメ養殖における水槽の大きさ、水温、屋内光、給餌法などは様々であり、業者独特の秘伝があるかもしれない。今

回使用した水槽は4.5m角(20㎡)であるが、ヒラメ養殖によく使用されるのは8~10m角(64~100㎡)である。緑色LEDを水槽上に適切に配置して照らすことにより、ヒラメの摂餌活動を活発にさせて高成長を導くことが期待される。これを証明するためにも、ヒラメ養殖の現場での試験が必要であり、現在計画中である。

ホシガレイによる仕組みの解明

緑色光によるカレイ類の成長促進は、元来備わっている成長に係わる生物現象が活性化したことによると考えられる。脳で産生されるメラニン凝集ホルモン(MCH)が重要な役割を果たしているらしいことが分かってきた。脳で産生されたMCHは脳下垂体神経葉から血液中に分泌されると、皮膚の色素胞に作用し

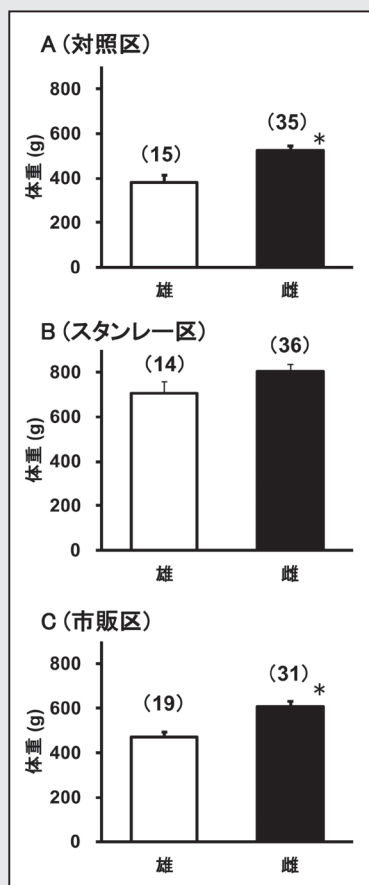


図4 ヒラメ飼育試験最終日における雌雄別体重

カッコ内は尾数を示す。*はt検定での有意差を示す(P<0.001)。

表1 ホシガレイの成長成績に対する緑LED光の効果

水温	試験区	全長 (cm)	体重 (g)	日間成長率 (全長、% day ⁻¹)	日間成長率 (体重、% day ⁻¹)	肥満度
12℃	対照区	23.5 ± 0.4	169 ± 10	0.184 ± 0.032	0.46 ± 0.17	1.30 ± 0.04
	緑LED区	24.4 ± 0.4	206 ± 14*	0.318 ± 0.032**	1.10 ± 0.18*	1.40 ± 0.03
15℃	対照区	24.1 ± 0.3	177 ± 6	0.292 ± 0.028	0.74 ± 0.09	1.27 ± 0.01
	緑LED区	24.9 ± 0.3	214 ± 11*	0.395 ± 0.060	1.25 ± 0.20*	1.38 ± 0.03**
18℃	対照区	24.1 ± 0.3	178 ± 9	0.290 ± 0.029	0.67 ± 0.12	1.27 ± 0.02
	緑LED区	24.9 ± 0.4	209 ± 12*	0.361 ± 0.047	1.14 ± 0.15*	1.34 ± 0.02*
21℃	対照区	23.9 ± 0.3	173 ± 9	0.276 ± 0.046	0.61 ± 0.19	1.27 ± 0.03
	緑LED区	24.8 ± 0.2*	209 ± 11*	0.386 ± 0.050	1.25 ± 0.21*	1.36 ± 0.05

* ($P < 0.05$)と ** ($P < 0.01$)はt-テストによる有意差を示す (n = 8)

て色素を凝集させて体色を明るくする。一方、このホルモンは脳内では食欲亢進作用を現す。これまでのマツカワにおける研究により、MCHは異体類でも食欲を刺激して摂餌量を増やすものと睨んでいる。以下に宮古庁舎でホシガレイを用いて行った研究結果を紹介する。

1) 緑色光下での水温別成長

飼育水槽および緑色光照射の条件は「ホシガレイの成長に有効な有彩色光の探索実験」と同様とした。水槽は4基使用し、それぞれの平均水温を12℃、15℃、18℃および21℃とした(各試験区8尾)。全ての個体をPITタグで標識した。飼育試験は2016年に行った。飼育期間は12℃区と18℃区は11月21日から12月22日までの31日間、15℃区と21℃区は11月21日から12月21日までの30日間とした。環境光区を対照とした。結果を表1に示す。

緑色光下で飼育したホシガレイの成長は、全ての水温において対照区よりも良好であった。体重と体重の日間成長率には統計的に有意差が認められた。全長の実測値には21℃区に、全長の日間成長率には12℃区に有意差が認められた。以上の結果から、ホシガレイの成長に対して緑色光は12℃から21℃の範囲で有効であることが分かった。肥満度は15℃と18℃で対照区より高かったことから、この水温の範囲で緑色光の最大の効果が得られるものと推測される。

表2 各種遺伝子の発現に対する緑色光の効果

器官	ホルモン遺伝子	飼育水温 (℃)			
		12	15	18	21
脳	メラニン凝集ホルモン (MCH)-1	○	○	○	○
	メラニン凝集ホルモン (MCH)-2	—	—	—	○
	ニューロペプチドY	—	○	—	○
	オレキシン	—	—	—	—
	アデニル酸シクラーゼ活性化ポリペプチド	○	—	○	○
	プロオピオメラノコルチン-C	○	—	—	—
	アグチ関連タンパク質1	—	—	—	—
	アグチ関連タンパク質2	—	—	—	—
脳下垂体	成長ホルモン	—	—	—	—
	ソマトラクチン	—	—	—	—
	プロラクチン	—	—	—	—
	プロオピオメラノコルチン-A	—	—	—	—
	プロオピオメラノコルチン-B	—	—	—	—
	プロオピオメラノコルチン-C	—	—	—	—

“○”印は緑色光照射によって遺伝子発現量が増加したことを示し、“—”は緑色光照射区と非照射区で差がなかったことを示す。

2) 内分泌に対する緑色光の効果

上記のホシガレイの脳と脳下垂体を用いて、食欲および成長に関する各種ホルモン遺伝子の発現量を逆転写定量ポリメラーゼ連鎖反応法により調べた。その結果を表2にまとめた。すべての水温下で、緑色光により発現量に増加が認められたのはMCH-1型のみであった。MCH-2型、ニューロペプチドY、アデニル酸シクラーゼ活性化ポリペプチドおよびプロオピオメラノコルチン-C 遺伝子にも増加が認められたが、全ての水温にわたるものではなかった。一般的に成長には脳下垂体から分泌される成長ホルモンが深く関与するが、緑色光による遺伝子発現の増加は認められな

かった。緑色光による成長促進に成長ホルモンの関与は低いのであろう。

以上の結果から、眼で感知された緑色光の刺激が脳の視床下部に伝わり、そこでMCHの産生量が増加したことにより食欲が亢進し、摂餌行動が活発になるものと考えられる。摂餌量の増加が高成長に結びつくのであろう。マツカワでは緑色光照射による飼料効率の向上も認められていることから、異化作用に比べて同化作用にバランスが傾いていることが推測される。

展望

緑色光がマコガレイの成長にも有効であることを神奈川県水産技術センターと大分県東部振興局が認めており、それぞれ2016年8月5日付毎日新聞夕刊と2017年7月13日付水産経済新聞で最初に報道された。この事実は、緑色光照射による成長促進をカレイ類全体に適用可能であることを示唆する。一方で緑色光照射は、カレイの変態が終了し着底後十分時間が経過した稚魚に対して行うことが必要との知見を得てい

る。着底後間もない時期に照射を開始すると斃死を招く可能性が高いためである。現在のところ、注意点はこれのみである。ここに留意するのみで、薄暗い養殖施設で使用することができる緑色光照射は極めて簡単な方法であることから、カレイ類の生産に広く適用されて生産増に貢献できることが大いに期待される。

本稿はGeneral and Comparative Endocrinology (2019年) 第27巻82-90頁に掲載された内容に基づいたものであり、アクアネット第16巻(2013年)7号18-23頁の続編であることを付記する。

謝辞

ヒラメの飼育試験にご協力を頂いた深良津二世養殖漁業生産組合(竹尾久信組合長)に感謝申し上げます。本研究の実施には生研支援センター「革新的技術開発・緊急展開事業(うち地域戦略プロジェクト)」、日本学術振興会「科学研究費補助金基盤研究(A)」、ならびにさんりく基金の支援を受けた。

A

「月刊アクアネット」2019年4月号

【新技術】

緑色光照射による ホシガレイとヒラメの成長促進

高橋明義, 清水大輔, 都留久美子, 木藪仁和, 水澤寛太 著

別刷

