

研究報告

発光ダイオードを用いた種苗生産における稚魚の蝟集

河村希典**, 山田潤一***, 斎藤和敬***, 佐藤正人***, 甲本亮太***, 柴田 理***

Settlement of Juvenile Fishes for a Seeding Production
by Using Several Color Light Emitting DiodesMarenori Kawamura**, Junichi Yamada***, Kazuyoshi Saito***,
Masato Sato***, Ryota Komoto***, Osamu Shibata***

Abstract

The phototactic responses of the zoo-plankton of *Artemia* and juvenile fishes such as red sea bream, ocellate puffer, schlegel's black rockfish, sweet fish, and sailfin sandfish were investigated in an indoor tank by using a light emitting diode (LED) at several wavelengths and its different luminance level. We applied the blue LED illumination for development of the technique in the fish seed production. The juvenile sandfish were reared under three different areas: without the light illumination, with a halogen lamp and the blue LED illuminations for 65 days in an outdoor fish tank. Both the growth and survival of the sandfish can be improved by using the blue LED illumination.

1. はじめに

秋田沿岸を主な産卵場としている秋田県の県魚であるハタハタについては'80年代から資源が激減したものの、平成4~7年の禁漁を経て、その後の資源管理により資源量は6,000トン前後まで回復した。しかし年級群に偏りが見られるなど、資源の状態は依然として不安定であり、人為的な種苗の添加が必要とされている。そこで秋田県農林水産技術センター・水産振興センターでは、1月~4月にかけて漁港内に設置した網生簀で発眼卵から放流前の稚魚までの育成を行っている。夜間には稚魚が生簀の網地に接触し、衰弱して斃死する場合がある。それを防止することと餌料を補うことを目的として、生簀上に白熱灯を点灯して周囲に稚魚及び動物プランクトンを集め、生残率の向上に一定の成果を上げている⁽¹⁾。しかし、この手法は経験的なものであり光学的な評価がまだ行われていない他、光源の種類や稚魚の行動についての光学的・生物学的な面については解明されていない。このため、種苗生産における各種光源と稚魚の行動について把握し、種苗生産に効果的な新たな技術を開発することにより、生残率をさらに高めることが期待される。稚魚の生

残率を高めることで人為的な添加量を増やし、資源変動の安定化につなげることが可能となる。

アジ、イワシ、サンマ等の海産魚の多くは灯火の光に集まる性質として正の走光性⁽²⁾⁻⁽⁹⁾があり、夜間に高輝度のメタルハライド等の集魚灯を用いて夜釣りが行われ、時間効率的に漁獲を得ることができる^{(10),(11)}。近年、技術の革新的な進歩により発光ダイオード(LED)の高輝度化や短波長化に関する研究が飛躍的に進み、植物生産におけるLED照明の利用^{(12),(13)}や水産業の集魚灯⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾に用いる研究が盛んになされている。特に青色LEDを用いた集魚灯は従来のメタルハライド集魚灯に比べ消費電力が低いこと燃料消費量を削減することができる。また高寿命であるため、メンテナンス等の大幅な削減が可能となる。

本研究では異なる中心波長をもつLED光源を試作し、種々の稚魚及び動物プランクトンにおける蝟集について実験及び考察を行った結果について示す。また、海上に設置した網生簀に従来使用している耐震白熱球による電照区、非電照及びLED光源による電照区との3区で、ハタハタ稚魚の成長及び生残率の比較実験を行った結果についても示す。

2. 実験方法

2-1 光源のスペクトル特性の測定

耐震白熱電球と各種発光ダイオードのスペクトル特性について、直径φ0.8mmの石英光ファイバを介してファイバマルチチャネル分光器(USB4000, オーシャン옵ティクス社製)により波長350nm~1000nmの範囲で光スペクトル特性の測定を行った。

2010年7月2日受理

**秋田大学大学院工学資源学研究所電気電子工学専攻
Department of Electronic and Electric Engineering,
Graduate School of Engineering and Resource Science
Faculty of Engineering and Resource Science, Akita
University

***秋田県農林水産技術センター・水産振興センター
Akita Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries
Research Center

2-2 海水の透過スペクトル特性の測定

水産振興センター甲殻類棟に配置されている屋内コンクリート水槽(水深 2 m, 容積 50 kl)を用いて, 海水を満たした状態で図 1 に示すように水面上に耐熱白熱球を設置し, 直径 $\phi 0.8$ mm の光ファイバを用いて海中より海水の透過スペクトル特性を上述した同様の USB4000 マルチチャンネル分光器を用いて測定を行った. ここで, $l_1=3$ cm, $l_2=15$ cm であり, 水面の振動等が安定になった状態で測定を開始した.

2-3 稚魚の走光性行動に関する実験装置

稚魚の走光性行動に関する基礎実験を行うための実験装置を図 2(a), (b)に示す. 暗室に設置した

200 リットルパンライト水槽(黒色, $\phi 75$ cm)を用いて, 好適照度把握実験と好適スペクトル把握実験を行った. 好適照度把握実験では水槽の4辺に超高輝度白色 LED (OSPW5161P) を図 3 に示すように9個接続した試作光源を設置し, 0 ~ 約 30 lx の範囲で照度を変化させて実験を行った. ここで, LED 光源用電源は図 4 のように作製した. LED への電流負荷および発熱を抑えるため, ボリュームによりパルス幅を変え, 点灯時間を変えることにより発光強度を制御することができる.

また, 好適スペクトル把握実験では図 2(b)に示すように, 4 辺に超高輝度青色 LED (OSUB5161P), 超高輝度緑 LED (OSPG5161A-RS), 超高輝度赤 LED

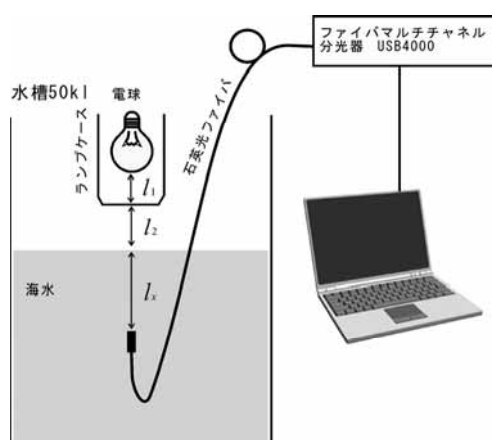


図 1 海水中からの光ファイバによるスペクトル特性の測定模式図.



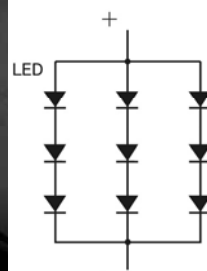
(a) 外観



(b) LED 点灯時の水槽様子



(a) 光源写真



(b) 接続図

図 2 パンライト水槽.

図 3 試作 LED 光源.

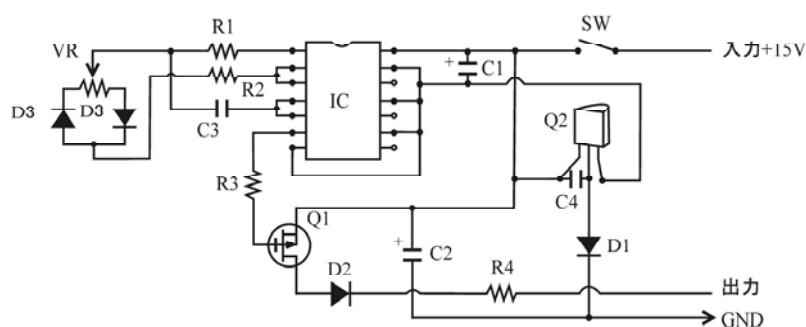
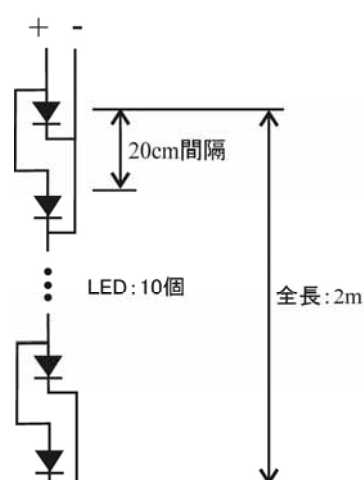


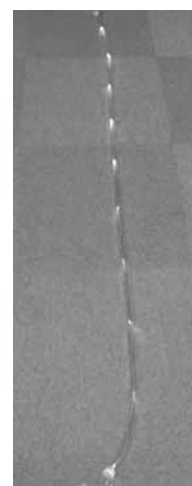
図 4 LED 光源電源回路(IC: 4069U, Q1: MOS-FET; 2SJ304, Q2: 三端子レギュレータ;79L12, D1:1SR139-400, D2: 20KDA20, D3:1SS133T, C1: 100 μ F, C2: 220 μ F, C3: 0.0047 μ F, C4: 0.1 μ F, R1: 1M Ω , R2: 1k Ω , R3: 200 Ω , R4: 50 Ω , VR: 100k Ω)



図5 ハタハタ稚魚の写真(体長：約14mm).



(a) 接続図



(b) 光源部外観

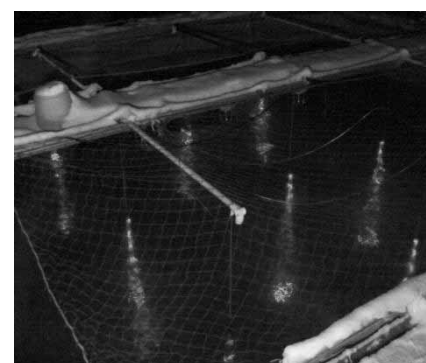
図6 ハタハタ稚魚生簀用LED光源.



(a) 日中の様子



(b) 耐震白熱電球区(夜間・点灯時)



(c) 青色LED区(夜間・点灯時)

図7 男鹿市椿地先の海上筏・ハタハタ網生簀.

(OSR5MA5111A), 超高輝度白色LED (OSPW5161P) を設置し, 稚魚の蜻集状況について, ワイドダイナミックレンジ CCD カメラ (Mintron 社製 MTV-63W1N) で撮影し, 別室に設置した PC により画像を記録した. また, 稚魚の走光行動をより鮮明に撮影するため, CCD 内部に取り付けている赤外線カットフィルターを取り除き, 魚の目に感度を持たない赤外線 LED を照明光として用いた. なお, 稚魚の蜻集状況の把握は, 10 秒ごとに各領域に存在した稚魚の頻度を計数し, 時間内における出現頻度の比率を比較して行った.

2-4 稚魚の蜻集に有効な光源の検索

発光ダイオード (LED) を用いて, 稚魚の蜻集・忌避等の行動について把握した. 実験は暗室で行い, 水槽は 200 ℓ パンライト水槽 (φ75cm), 60 ℓ プラスチック水槽 (45cm × 45cm × 30cm), 36 ℓ ガラス水槽 (30cm × 30cm × 40cm) を各魚種に応じて使用した.

各水槽の底面に4区画の目印を付けて稚魚の分布位置を確認しやすいようにした. 使用した稚魚はマダイ, トラフグ, クロソイ, アユ, ハタハタ(図5)の5種及び動物プランクトンであるアルテミアで, 実験の数日前から暗室内に設置した別水槽(微流水)で飼育し馴致させてから実験を行った.

2-5 ハタハタ種苗生産への実証実験

図6に示すように青色LEDを20cm間隔に10個接続した全長2mの配線を男鹿市椿地先の海上筏の網生簀(4.8m × 4.6m × 水深2.5m, 実効水量54.6kl)に設置し, 従来使用している耐震白熱球(60W × 2球)による電照区及び非電照区との3区で, ハタハタ稚魚の成長を比較した. 各網生簀には, ハタハタの稚魚1万8千尾を收容した. 実験に使用したLEDは軟質PVC製・ビニール管(内径φ6mm × 外径φ8mm, 長さ5m)に通し, エチレン酢酸ビニル樹脂で封止し防水処置を行ったもので, 生簀内

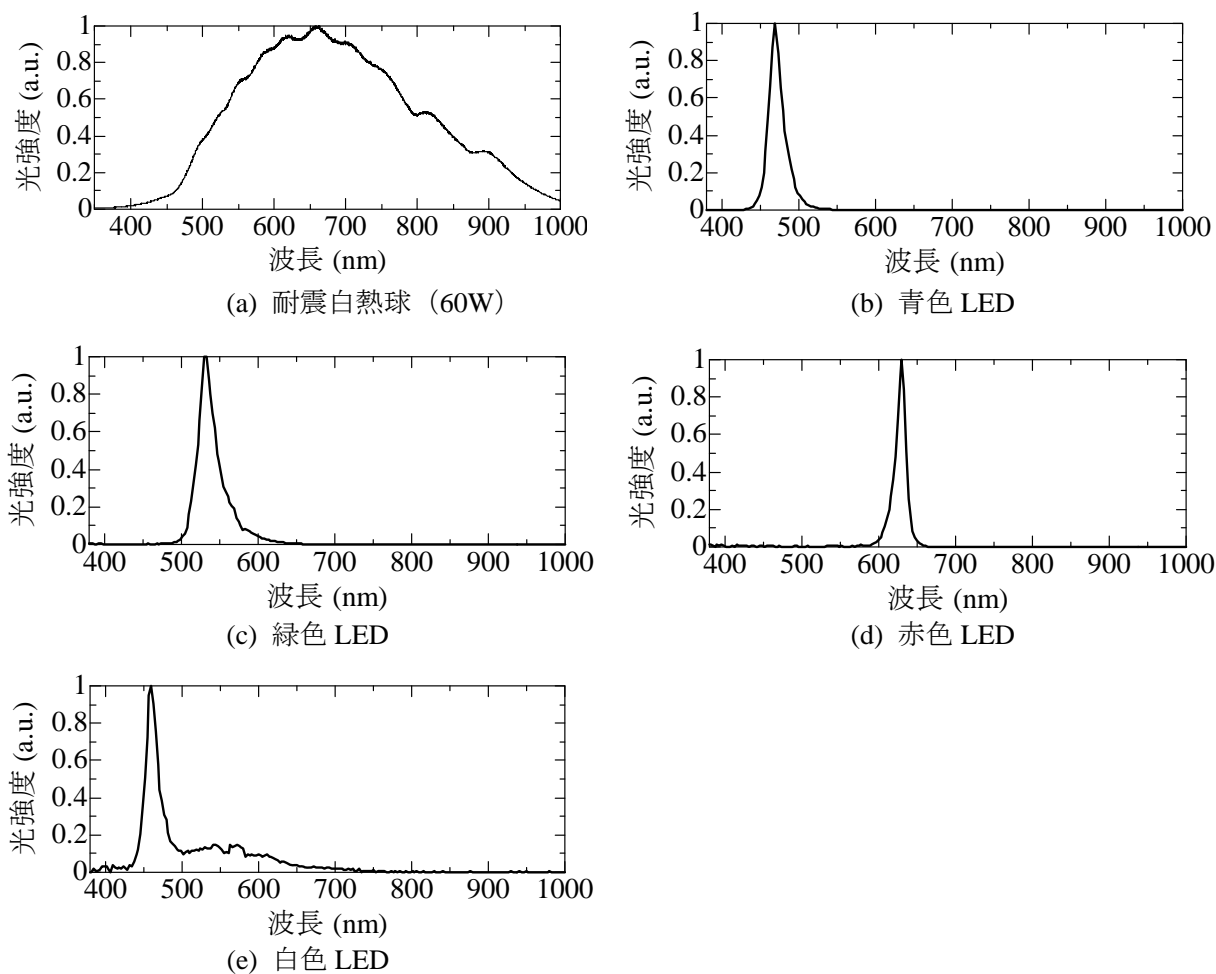


図8 耐震白熱球および各種 LED のスペクトル特性.

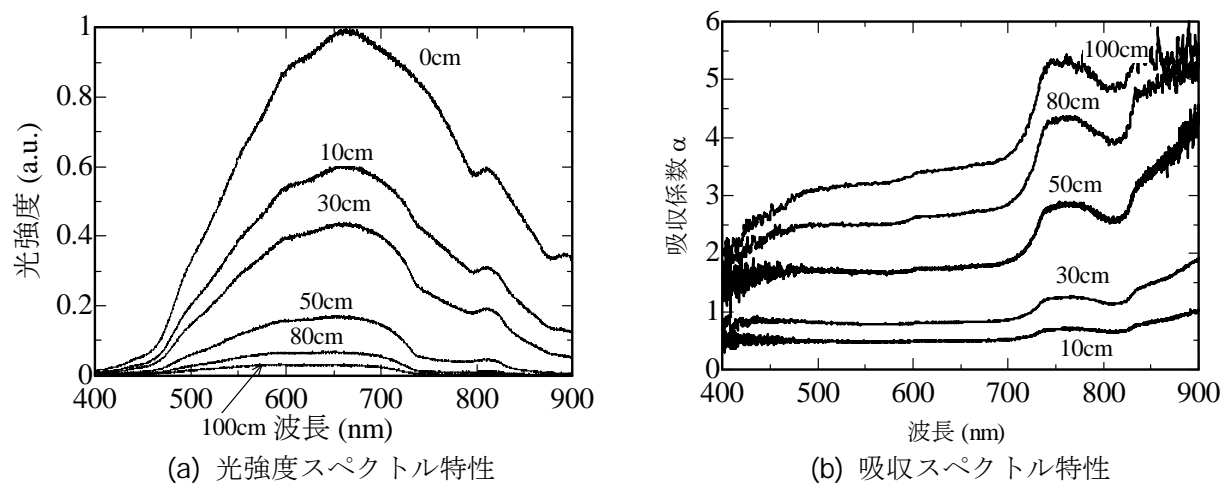


図9 水中から測定した耐震白熱球の光スペクトル特性及び吸収特性.

に9連(90個)垂下し, 耐震白熱球及びLED光源の照明はタイマーを用いて16時から翌朝9時まで行った. 図7は男鹿市椿地先の海上筏に配置しているハタハタの稚魚を種苗生産するための網生簀の写真を示している.

3. 実験結果及び考察

3-1 稚魚の蠕集に有効と考えられる光源の光学特性

図8(a)~(e)は耐震白熱電球(60W), 青色, 緑色, 赤色及び白色LEDの光強度スペクトル特性を示している. 耐震白熱球の光強度は波長約650nmを中心とし, 400~1000nm付近にかけて非常にブロード

な強度分布を示している。一方、青色 LED の中心波長は 470 nm, 緑色 LED の中心波長は 550 nm, 赤色 LED の中心波長は 630 nm 付近であることが分かる。白色 LED については、450 nm 付近にピーク波長を持ち、広い波長範囲でスペクトルがブロードであるような値が見られた。白色 LED の光強度のピーク位置が、青色 LED の波長とほぼ同様であり白色を呈していることから、青色 LED と黄色系蛍光体を用いた組み合わせ方式であることが分かる。

3-2 海水の光透過スペクトルの測定

図 1 に示した光スペクトル強度の測定システムを用いて、耐震白熱球の光を海中の光ファイバを介して測定したスペクトル測定結果及び吸収スペクトル特性を図 9(a), (b) に示す。距離 l_x は海面から受光側の光ファイバ先端との距離である。光強度は光源と

の距離の二乗に反比例して減少した。また、特に波長 700 nm ~ 800 nm 付近にかけて他の波長よりも吸収係数が高いことが見られ、より長波長側では光強度の減衰が著しいことが分かった。以上のことから、海水中において 690 nm 以上の光の減衰傾向が著しく、波長 490 nm 前後での減衰が小さいため青色の光が海底に届くことになる。

3-3 稚魚・動物プランクトンの好適照度把握実験

マダイ、トラフグ、クロソイ、アユ、ハタハタ (図 5) の稚魚及び種苗生産に用いる餌料生物 (動物プランクトン) であるアルテミアについて好適照度把握実験を行った。実験条件を表 1 に示す。好適照度は、図 10(a) ~ (f) に示すように魚種により相違し、マダイ (全長: 73 mm) では 7.0 lx, トラフグ (107 mm) では 0 ~ 3.2 lx, クロソイ (118 mm) では 0 ~ 1.4 lx, ア

表 1 好適照度把握実験における実験条件。

魚種	実験日	尾数 (尾)	全長 (mm)	体重 (g)	水温(°C)
マダイ	2009/10/21	1	73	8.0	17.5
トラフグ	2009/10/21	1	107	45.6	17.3
クロソイ	2009/11/25	1	118	26.7	13.7
アユ	2010/ 1/15	1	44	0.25	8.7
ハタハタ	2010/ 1/26	2	14	0.01	7.9
アルテミア	2010/ 3/ 5	3.2 万尾	0.7	測定不可	15.0

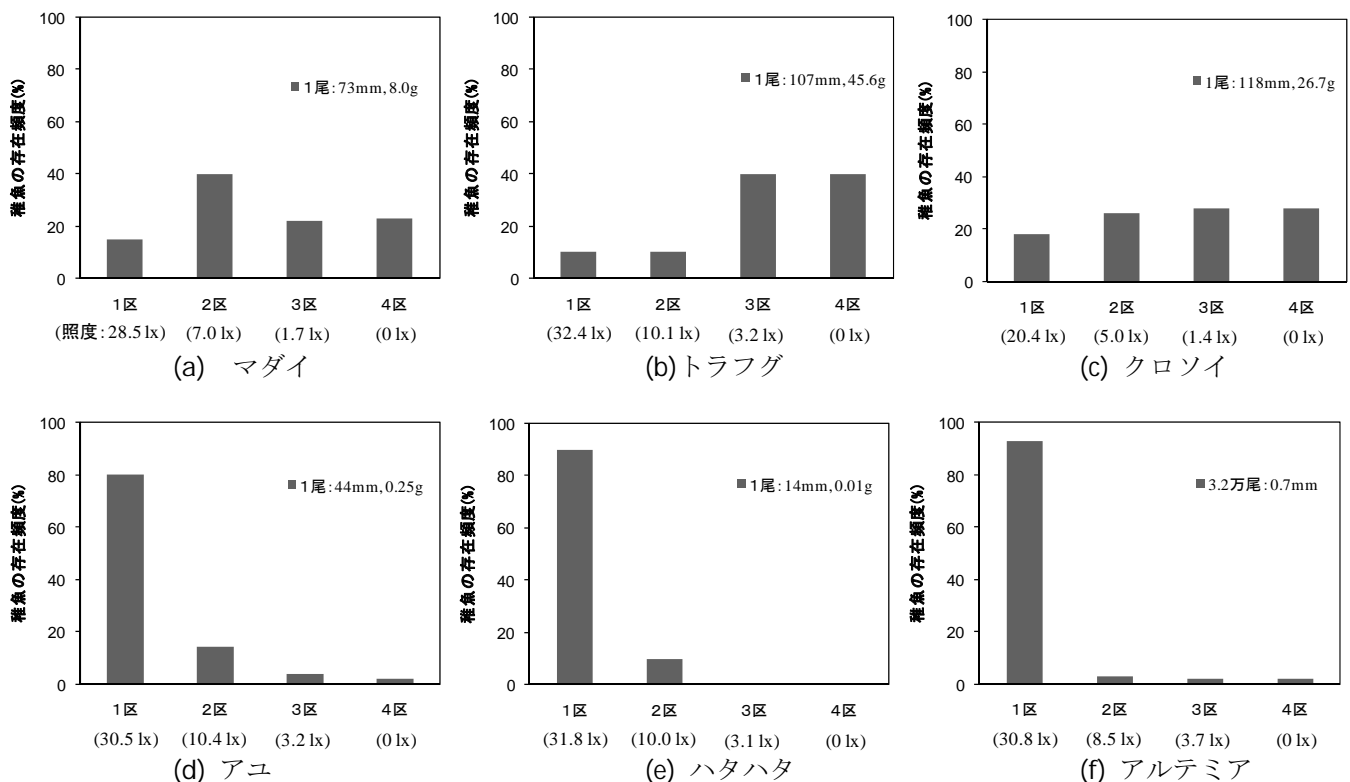


図 10 好適照度把握実験結果。

ユ (44 mm) では 30.5 lx, ハタハタ (14 mm) では 31.8 lx であった。また, アルテミア (0.7 mm) についても最も照度が高い 30.8 lx で蟻集効果が見られた。

アユ, ハタハタの稚魚及びアルテミアでは, 30.5, 31.8, 30.8 lx と最も高い照度を設定した区域に出現する頻度が 90, 80, 93% と高かったのに対し, マダイ, クロソイで 0 ~ 28.5 lx に 15~40% の頻度で出現していることから, 好適照度の選択の幅広い傾向を示した。トラフグに関しては, 0 と 3.2 lx の低照度区に合計 80% の頻度で出現し, 実験した魚種では最も低照

度を好む傾向を示した。参考文献(8)の報告にあるようにトラフグは光に対して非常に敏感であるためである。

3-4 稚魚・動物プランクトンの好適スペクトル把握実験

種々の魚種における稚魚及びアルテミアの好適スペクトル把握実験結果を図 11(a) ~ (f) に示す。好適スペクトルは魚種により異なり, 最も顕著な蟻集効果を示したのは, ハタハタ (全長: 14 mm) とアユ (44 mm) で, 青色 LED 照射区で約 90 % 以

表 2 好適スペクトル把握実験における実験条件。

魚種	実験日	尾数 (尾)	全長 (mm)	体重 (g)	水温(°C)
マダイ	2009/10/22	1	74	7.0	17.7
	〃	1	83	10.5	
	〃	1	67	5.3	
	〃	3	74	7.4~8.3	
トラフグ	2009/10/28	1	105	37.6	17.3
	〃	1	112	33.4	
	2009/10/29	1	93	35.2	
	〃	3	110~113	32.9~37.6	
クロソイ	2009/11/25	3	119~135	22.4~36.8	13.7
	〃	1	125	33.9	
	〃	1	115	22.5	
	〃	1	150	51.3	
アユ	2010/ 1/15	1	46	0.31	8.7
		3	43~53	0.2~0.4	
ハタハタ	2010/ 1/26	3	14~15	0.01	7.9
		2	19~20	〃	
		4	17~20	〃	
アルテミア	2010/ 3/ 5	3.2 万	0.7	測定不可	15.0

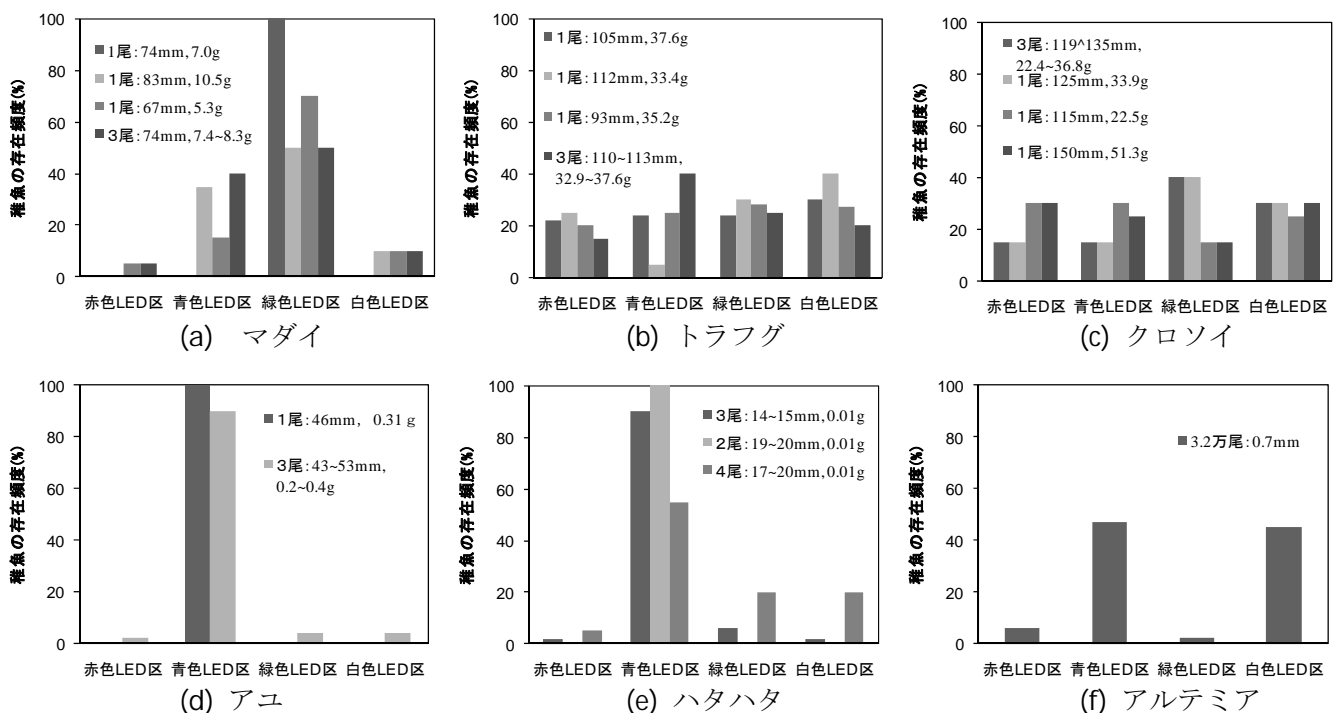


図 11 好適スペクトル把握実験結果。

上と高い頻度で出現したことから、青色に対し、強い蝟集傾向を示すものと思われる。マダイ (73 mm) では緑色区への出現頻度が 50% ~ 100% と高い傾向を示した。トラフグ (107 mm) とクロソイ (118 mm) に関しては、各試験区に 15% ~ 30% の頻度で出現し、色に対する選択の差は小さい傾向を示した。

3-5 ハタハタ種苗生産への実証実験

上述したハタハタ稚魚に対する好適照度把握実験及び好適スペクトル把握実験を行った結果から、青色のスペクトルに対して蝟集する傾向が見られたため、図 6 に示したように青色 LED を 20 cm 間隔に 10 個接続した全長 2.0 m のハタハタ稚魚生簀用 LED 光源を網生簀 (4.8 cm × 4.6 cm × 3.0 m, 実効水量 54.6 kl) に配置し、従来使用している耐震白熱球 (60W × 2 球) による電照区 (図 7(b)) 及び非電照区との 3 区でハタハタ稚魚の成長を比較した。図 7(c) に示したように網生簀へのハタハタ稚魚生簀用 LED 光源 9 連の設置は、2010 年 2 月 4 日に行った。照明は 16 時から翌朝の 9 時まで点灯し、種苗生産が終了する 4 月 20 日まで継続した。2 月 5 日に水産振興センターの水槽で飼育管理していたハタハタの発眼卵を収容し、網生簀へのハタハタの発眼卵は 2 月 8 日からふ化を開始した。各網生簀におけるハタハタ種苗生産の設定状況として、青色 LED 区、従来区・60W 耐震白熱球、及び無灯火区でのハタハタ稚魚の収容尾数は約 18,000 尾であり、各網生簀における稚魚の密度は約 300 尾/kl である。その時のハタハタ稚魚の体長は約 13.5mm であった。

図 12 はハタハタ稚魚の種苗生産終了 (生産終了時での日齢: 65 日) までの生残率を示している。従来区である耐震白熱球区と本実験で導入した青色 LED 照射区での生残率は約 72%, 78% であった。無灯火区では 28% であり、約 7 割近くが生産終了時まで生残できなかったことになる。この理由と

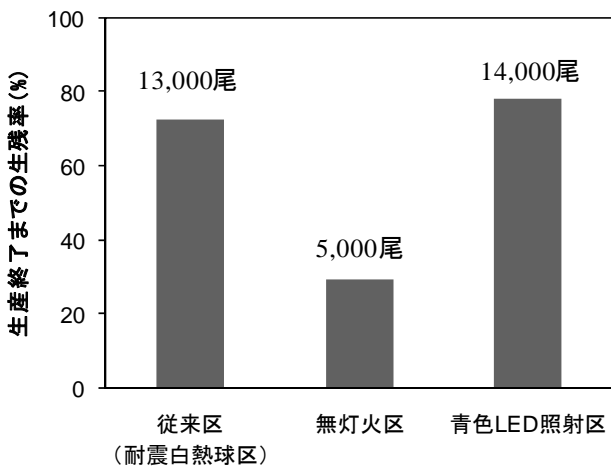


図 12 種苗生産結果.

して、夜間照明がない場合、ハタハタの稚魚がプランクトン等の捕食を行なえないことが考えられる。また、網生簀周囲の網地に稚魚が接触し、衰弱して斃死する可能性があるものと考えられる。従来の耐震白熱球よりも LED 照射区での生残率が高い原因として、上述した実験結果よりハタハタ稚魚及び天然動物プランクトンが青色 LED の波長の光に対して蝟集率が非常に高くハタハタ稚魚が餌料を捕うことができることから、生残率の向上につながったものと思われる。

図 13 は生簀を照射する電照の有無及び電照の違いによるハタハタ種苗の日齢に対する標準体長及び標準偏差の推移を測定した結果である。従来区と無灯火区での標準体長の差異がそれほど変わっていないのは、図 12 で示したように無灯火区における生残率が低いためハタハタ稚魚の密度が低くなることで、天然動物プランクトン等の餌料を捕食しやすく、成長ができたものと思われる。また、青色 LED 照射区での成長速度が他の 2 区よりも早い傾向が見られた。これは、動物プランクトンが青色 LED の波長の光に対して蝟集することにより、餌料量が増えたため、捕食により成長が促進されたものと思われる。

以上のことから、青色 LED 区が成長、生残とも良好との結果を示し、ハタハタ稚魚の種苗生産に大いに期待できる結果が得られた。

4. まとめ

本研究では、種々の光源に対する稚魚の蝟集行動を観察・解析することにより、より効果的に稚魚を蝟集させることが可能で、生残率の向上に結びつく光源について実験を行った。魚種により LED の波長や照度の違いが見られた。特にハタハタとアユの稚魚及び動物プランクトンであるアルテミアに関しては、青色 LED の光に対して顕著な蝟集効果が見られた。この実験結果を踏まえ、男鹿市椿地先の

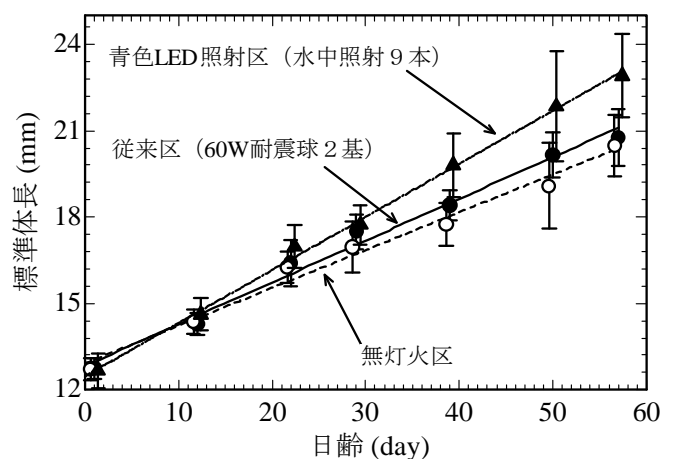


図 13 生け簀を照射する電照の有無及び電照の違いによるハタハタ種苗の成長(飼育密度:300尾/kl).

海上筏の網生簀に設置した青色 LED 区, 従来区・60W 耐震白熱球及び無灯火区の 3 区でハタハタ稚魚の種苗生産を 65 日間行った結果, 夜間に青色 LED 光源を用いることで, 天然プランクトン等の餌料量が増えるだけでなく, 光源周囲に稚魚が蝟集し網生簀周囲の網地に稚魚が接触せず, 衰弱して斃死することがなくなることから, 効率よく稚魚の種苗生産を行えることができた。

本研究で提案した青色 LED 光源を用いた稚魚の蝟集法が実用化に結びつくことにより, 本県のハタハタ稚魚の種苗生産の育成手法のみならず, 他の魚介類に波及し, 全国的な栽培漁業に貢献するところが大きいと考えられる。

謝辞

本研究は, 秋田県平成 21 年度実用化を目指した試験研究開発実施可能性調査『種苗生産における稚魚の蝟集に有効な光源の検索に係る実施可能性調査』の助成を得て行われた。本研究を行うにあたり, 助言を頂いた北海道大学大学院水産科学研究院 藤森康澄教授, 及び木村暢夫教授に感謝いたします。

参考文献

- (1) 遠藤実 (2009): ハタハタの年級群豊度と発生量の変動-水産資源変動要因調査-, 秋田県農林水産センター水産振興センター報告書, pp.2-3.
- (2) 高橋正(1978): 移動光膜の魚類行動に及ぼす影響について, *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 44, pp.869-874.
- (3) Koike, T., Matsuike, K. (1987): Response of a Fish School to Different Blinking Frequencies and Intensity Ratios of Intermittent Light, *Nippon Suisan Gakkaishi* 53, pp. 925-932.
- (4) 川村軍蔵, 法花正志, 荒牧孝行, 新村巖 (1991): マダイによる He-Ne レーザー光線視認, 日本水産学会誌, 57, pp. 421-424.
- (5) 林多恵子, 山川紘, 松生治 (1992): インダイ稚魚の成長に伴う走光行動の変化, 日本水産学会誌, 58, pp. 1043-1047.
- (6) 梁振林, 松田皎, 東海正, 藤森康澄, 兼広春之 (1993): 数種の淡水魚に対するレーザスクリーン駆集効果, 水産工学, 30, pp.1-8.
- (7) 藤森康澄, 東海正, 松田皎 (1994): 水槽実験におけるニジマス日周活動と照度の刺網漁獲に及ぼす影響, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 60, pp. 577-583.
- (8) 畑中宏之 (1997): トラフグ仔稚魚の成長と尾鰭の形状に及ぼす飼育水槽の色, 照度および飼育密度の影響, 日本水産学会誌, 63, pp. 734-738.

(9) 川村軍蔵, 安樂和彦, 中原真弥, 重里憲広 (2002): 負走光性マダイ稚魚の光馴致と光による誘導, 日本水産学会誌, 68, pp. 706-708.

(10) 荒川久幸, 崔漸珍, 有元貴文, 中村善彦 (1996): 小型イカ釣り漁船の集魚灯光の海中放射照度分布, 日本水産学会誌, 62, pp. 420-427.

(11) 崔漸珍, 荒川久幸, 中村善彦, 有元貴文 (1998): 日本海のイカ釣り漁場における海水の光学的水型と集魚灯光の透過特性, 日本水産学会誌, 64, pp.650-657.

(12) 後藤英司 (2005): LED と植物育成 一時代を先取りする先端技術ー「LED の農林水産分野への応用」, 農業電化協会編, pp.35-49.

(13) 後藤英司 (2009): 農林水産における LED の利用と展望, 農林水産技術研究ジャーナル, 32, pp. 15-19.

(14) 岡本研正 (2007): 平成 18 年度青色発光ダイオード集魚灯によるイカ釣り漁業革命事業に関する報告書, (社)マリノフォーラム 21 海域総合開発研究会, p.43.

(15) Okamoto, T., Takahashi, K., Ohsawa, H., Fukuchi, K., Hosogane, K., Kobayashi S., Moniwa, M., Sasa, K., Yoshino, H., Ishikawa, H., Harada, M., Asakura K., Ishii, H. (2008): Application of LEDs to Fishing Lights for Pacific Saury, *Journal of light and visual environment*, 32, pp.38-42.

(16) 岡本研正 (2009): 漁業における LED の利用と展望, 農林水産技術研究ジャーナル, 32, pp.32-37.