

棒受網のための LED 水中灯 による海中の光環境の カタクチイワシ視感度に基づく評価

梶川和武 ・ 毛利雅彦 ・ 中村武史 ・ 濱野 明

Evaluation of underwater illuminance of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* based on their relative luminosity for LED fishing lamps used for stick-held dip net fishing

Yoritake Kajikawa, Masahiko Mohri, Takeshi Nakamura & Akira Hamano
水産大学校: National fisheries university

We used the electroretinogram method to determine the relative luminosity curve for Japanese anchovy *Engraulis japonicus*. The peak wavelength of the relative luminosity curve was found to be 499 nm, and the visible wavelength range was 450-550 nm.

Based on this, we then estimated their underwater illuminance at a depth of 2 m in the presence of LED or halogen fishing lamps. In the case of a halogen lamp, the illuminance was found to be a maximum directly below the lamp, and decreased to $0.001 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at a horizontal distance of 16 m from it. For an LED fishing lamp, the illuminance was lower directly below it than in other areas, and decreased to $0.001 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at a horizontal distance of 14 m. These results show that in terms of intensity, an LED fishing lamp is only slightly inferior, if at all, to a halogen fishing lamp for attracting Japanese anchovy swimming near the sea surface.

1 緒言

近年の燃油価格の高騰化は、漁船漁業の経営を逼迫させている。特に、集魚灯漁法では、漁船の運用による消費に、集魚灯による消費が加わることになり、その深刻さが増しており、対策が急務である。このような現状において、省エネ灯具として世間の注目を集めている LED 集魚灯の導入に関する取り組みや研究が盛んに実施されている[1~3]。LED は、選択した波長帯の光だけを出力することができる特性を有している。したがって、LED 集魚灯において、海水による減衰が極力少なく、かつ、漁獲対象の海洋生物の視認性が高い波長域の光を選択的に出力することで、従来から集魚灯の光源として使用している放電灯や白熱灯のように無駄な光の出力を抑えることで、消費電力を低くすることがで

きる。しかし、現時点において、LED 集魚灯は実用化に至っていない。漁獲対象種が集魚灯に蝟集する機構に関して未解明な部分が多く、実証実験においても、LED 集魚灯では十分に漁獲できない場合が生じ、漁業者の LED 集魚灯に対する信頼を十分に得られていない。LED 集魚灯を漁業の現場に迅速に導入するためには、光に対する漁獲対象種の反応を明らかにし、その行動特性および漁場の環境に適した集魚灯を製作することが極めて重要であると考えられる。著者らは、山口県日本海沿岸で操業している棒受網漁業に、LED 水中灯の導入を進めてきた。漁獲対象のカタクチイワシの光に対する反応などの蝟集メカニズムを明らかにするためには、最初に、既存灯であるハロゲン水中灯の出力する光のうち、カタクチイワシが認識できる光量分布を把握することが大切である。

そこで、本研究は、カタクチイワシの視感度に基づく光量の評価方法を提案する。さらに、提案した評価方法に基づき、ハロゲン水中灯と、試作した LED 水中灯が放出する海中の光環境の評価を行い、LED 水中灯が出力する光の有効性の検討を行った。

2 材料と方法

実験に使用した水中灯

本実験で使用した LED 水中灯(0.3kw, 水口電装(株)製)は、著者らが試作したもので、主波長が 530nm の砲弾型と 450nm と 510nm の白色 SMD 型のチップが搭載されており、4 面で構成されており、円柱型のアクリル製の籠体に収納されている。また、LED 水中灯の光量の比較対象として、既存灯であるハロゲン水中灯(3kw, JW3-200, 拓洋理研(株)製)を用いた。

カタクチイワシの視感度に基づく照度の評価方法

照度(lx)は、人の視感度を考慮した明るさを表わす心理物理量で、式(1)で表現することができる[4]。本研究では、カタクチイワシが認識することができる光量を、式(1)の中、人の比視感度照度 $V(\lambda)$ をカタクチイワシの比視感度に置き換えて表現する。また、式(1)の最大視感効率 K_m は、魚種によって変化するものである。本報告では、魚種はカタクチイワシだけであり、灯具(LED 灯、ハロゲン灯)の違いによる光量の評価であるため、 $K_m=1$ とした。

$$\Phi = K_m \int_{Min}^{Max} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$\Phi_e(\lambda)$: 放射照度 $V(\lambda)$: 比視感度 K_m : 最大視感効率

カタクチイワシの比視感度の計測

カタクチイワシの比視感度を算出するために、ERG(Electro Retino Gram)測定を行った。測定実験は、2012 年 5 月 21～23 日に山口県水研センター外海研究部の暗室で実施した。刺激を与えた波長域は 430～700nm で、20nm ずつ 9 段階に変化させた。1 回の光の照射時間は 50ms、照射間隔は 10 秒間とし、同波長・同出力で照射を 6 回実施した。実験中、カタクチイワシには海水(水温 10.3～11.3℃)を 1 分間につき 1.2ℓ 換水させた。実験期間中に使用したカタクチイワシは、6 尾で、平均尾叉長は 97mm であった。測定には、生体電気増幅器(MEG-1200 日本光電社製)、データ収容器(Power Lab2/25 ADINSTRUMENTS 社製)、シャッターコントローラ(F77-7 駿河精機社製)を用いた。

水中集魚灯の海中の光量の計測

水中集魚灯(ハロゲン・LED 灯)の水中に透過する光量の計測は、2012 年 11 月 29 日に、山口県水研センター外海研究部所属の調査船「第 2 くろしお」を用船し、山口県油谷湾(N34.23.5 E130.58.7)にて実施した。光量の計測には、放射照度計(JAZ-COMBO オーシャンオプティクス社製)を用いた。測定波長の範囲は、250-800nm であり、測定限界は $0.01\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm}^{-1}$ である。ここでは、ハロゲン水中灯および試作型の LED 水中灯を深度 2m に設置し、水中灯の中心から水平方向に 1～6m まで 1m ずつ離れた地点に、放射照度計と光ファイバケーブルで接続させているコサインコレクタープローブ(CC-3, オーシャンオプティクス社製)を移動させて、それぞれの地点で計測した(Fig. 1)。

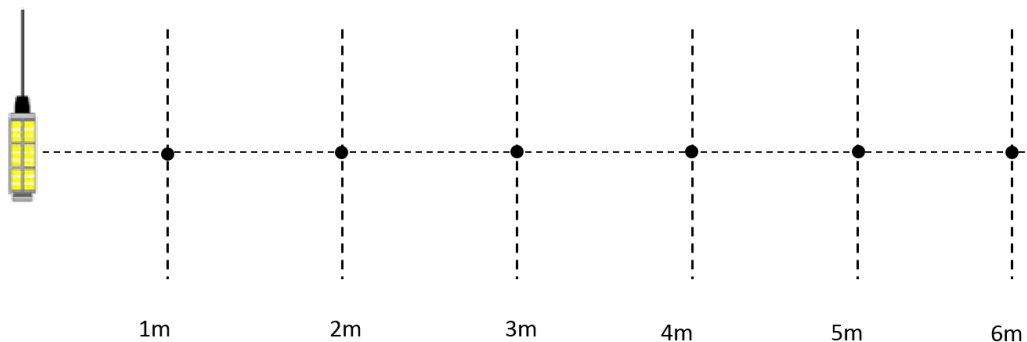


Fig. 1 水中灯の光量の計測ポイント(●).

水中灯周りの光量の計測

2012 年 10 月 4 日に、鳥取県産業技術センターにて、LED 水中灯周辺の光量の計測を実施した。光量の測定は LED 遠方配光測定装置(GP-2000, 大塚電子(株)製)を用いた。本装置の測定波長の範囲は 360-830nm であり、測定限界は $10^{-8}\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm}^{-1}$ である。ここでは、配光測定装置によって、LED 水中灯を 0～90 度まで 15 度ずつ 7 段階に回転させて、それぞれの回転角 (θ) における光源から 1m の地点の光量を計測した(Fig. 2)。

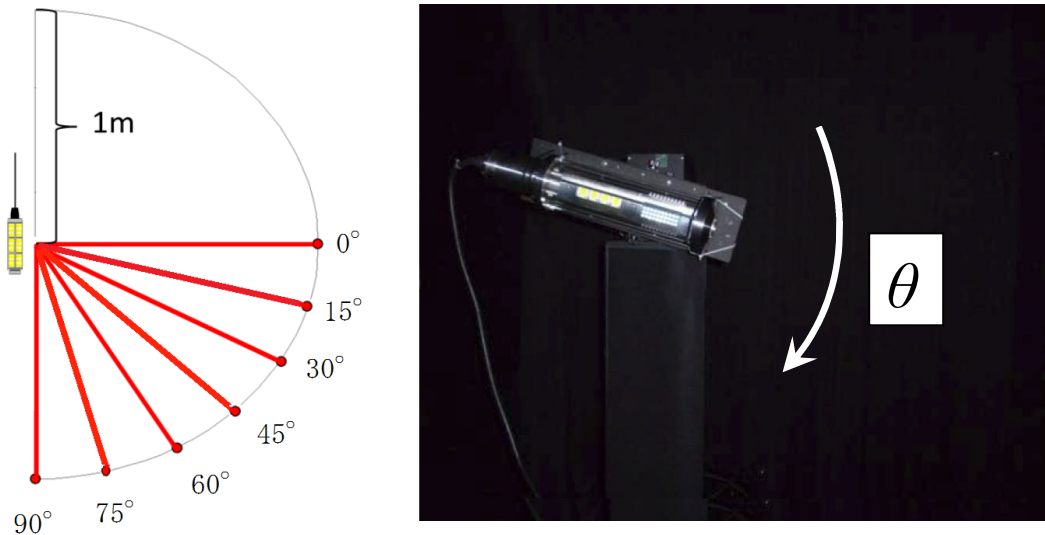


Fig. 2 水中灯の光量の計測ポイント(●)と水中灯回転装置.

一方、ハロゲン水中灯周辺の光量の計測は、2013 年 10 月 11 日に、福岡県工業技術センター機械技術研究所にて実施した。使用測定機器および測定方法は LED 水中灯周辺の光量を計測時と同じである。

海中の消散係数の算出方法

水中集魚灯の光の減衰から海中の光環境を算出するために、2012 年 11 月 29 日の実験で得た LED 灯・ハロゲン灯における水平方向距離別の放射照度より距離ごとの消散係数を求めた。一般に光源からの水平距離 r における放射照度を求める式は、以下で表現される[5]。

$$\frac{I_r}{I_0} = e^{-cr} \quad (2)$$

I_r : r 地点の照度 I_0 : 光源の放射照度 c : 消散係数 r : 水平距離

式(2)を以下の式に変換することができる。

$$c = -\left(\frac{1}{r}\right) * \ln\left(\frac{I_r}{I_0}\right) \quad (3)$$

本報では、式(3)により、波長別の消散係数を算出した。

3 結果および考察

ハロゲン灯およびLED灯の放射照度と海中の消散係数

LED 灯、ハロゲン灯の放射照度の計測結果を Fig. 3 にまとめた。既存灯であるハロゲン灯の波長別の光量特性は、400~700nm までの波長帯の出力が認められた。また、波長が長くなるにつれて、出力が大きくなる傾向を示した。光源から 1m の地点の光量は、400nm 付近では $0.5\mu\text{W}/\text{cm}^2$ であったが、700nm 付近では $8.5\mu\text{W}/\text{cm}^2$ であった。光源から 2m 以上離れると、いずれの波長帯においても $2.0\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以下の出力であり、光源からの距離が離れると、大きく減衰する傾向を示した。これに対して、LED 灯の波長別の光量特性は 455nm および 540nm にピークがあり、2 峰性の分布を示した。光源から 1m の地点の光量は、455nm では $5.0\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、540nm では $2.5\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の出力が認められた。455nm 付近の出力は、ハロゲン灯の出力の 2.5 倍であったが、それ以外の波長帯においては、ハロゲン灯の出力の方が上回った。

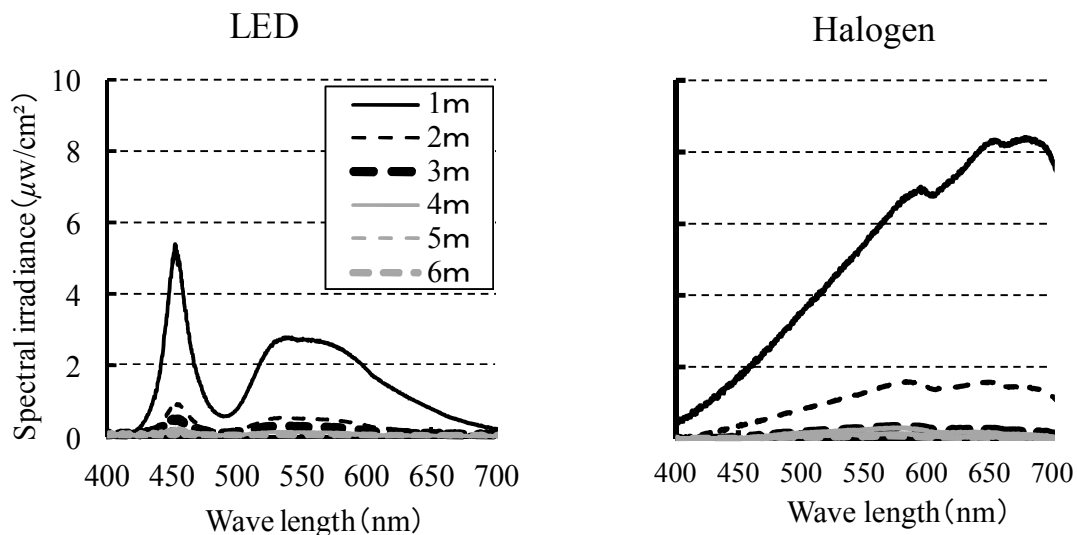


Fig. 3. 波長別の出力特性(LED、ハロゲン)

さらに、計測した放射照度データを用いて、LED 灯およびハロゲン灯における消散係数を(3)式により算出した(Fig.4)。ここでは光源の放射照度 I_0 には 1m の地点での光量を、 I_r には 2m の地点での光量をそれぞれ用いた。

消散係数は、両灯ともに 450~500nm 付近の 0.007 であったが、650nm 付近では、LED 灯で 0.0095、ハロゲン灯で 0.0085 となり、波長が長くなるにつれて、減衰が大きくなった。ハロゲン灯では、450nm 以下の消散係数は上昇する傾向が認めれた。一方、LED 灯では、420nm 以下で低下する傾向が認めれた。Hulbert[6]によれば、沿岸域の海水において、500nm 以下の出力は、波長が短くなるにつれて、消散係数が増大すると報告されている。本研究において、測定された LED 灯の 420nm 以下の波長帯の出力は、1m の地点で $0.1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以下と低かった。したがって、1m の地点で、測定限界に近い値を示しており、2m

の地点の光量の差を精度よく計測されていない可能性がある。このため、前述の既存の研究結果やハロゲン灯の消散係数と異なる傾向を示したと推察される。また、LED 灯とハロゲン灯では、500nm から 650nm の範囲の消散係数に、0.001 以下の差が生じた。前述したように、LED 灯は主波長が 530nm の砲弾型と、450nm と 510nm の白色 SMD 型のチップが搭載されている。砲弾型は直進性が強い光を出力することができるが、照射範囲が狭い。このため、照射範囲から外れると、光量が極端に低下する。したがって、LED 灯の消散係数がハロゲン灯に比べて小さかったのは、2m の測定点では、1m の時には入っていた照射範囲から外れた可能性があり、そのことが減衰に大きく影響したと推察される。

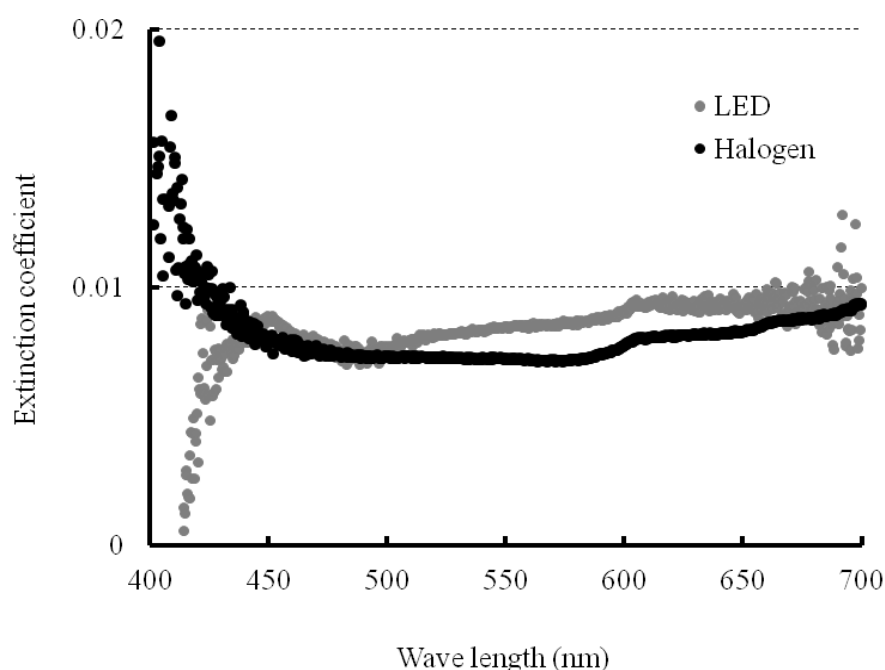


Fig. 4 波長別の消散係数(LED、ハロゲン)

カタクチイワシの比視感度曲線の推定

ERG 法により、波長別(430, 470, 490, 530, 550, 580, 620, 700nm)の比視感度を得た(Fig. 5)。波長 550nm 以上の光に対しては、ERG 反応が認められなかった。さらに、これらのデータに基づき、D. G. Stavenga[7]が報告した方法にしたがい、ガウス関数から比視感度曲線の推定を行った。その結果、以下の式が得られた。

$$\alpha = 1.315e^{((-3984.622[\log(\lambda/\lambda_{max})]^2 (1+3.510 \log(\lambda/\lambda_{max})))} \quad (4)$$

推定した比視感度曲線により、ピーク波長(λ_{max})は499.58nmと算出された。また、カタクチイワシが認識できる光の波長範囲は450~550nmと推察された。

本報では式(4)を用いて、波長別の比視感度を求め、式(1)に代入することでカタクチイワシが感じることができる光量の評価を行った。

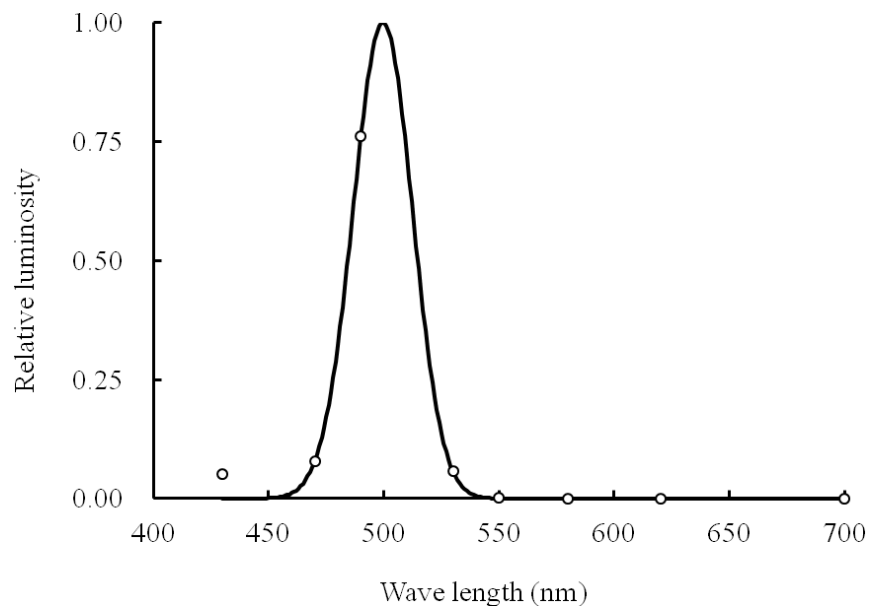
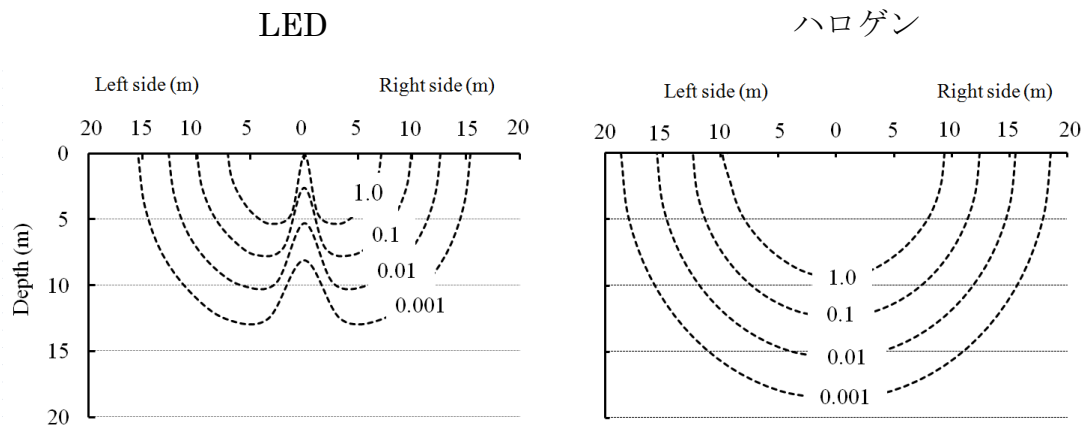
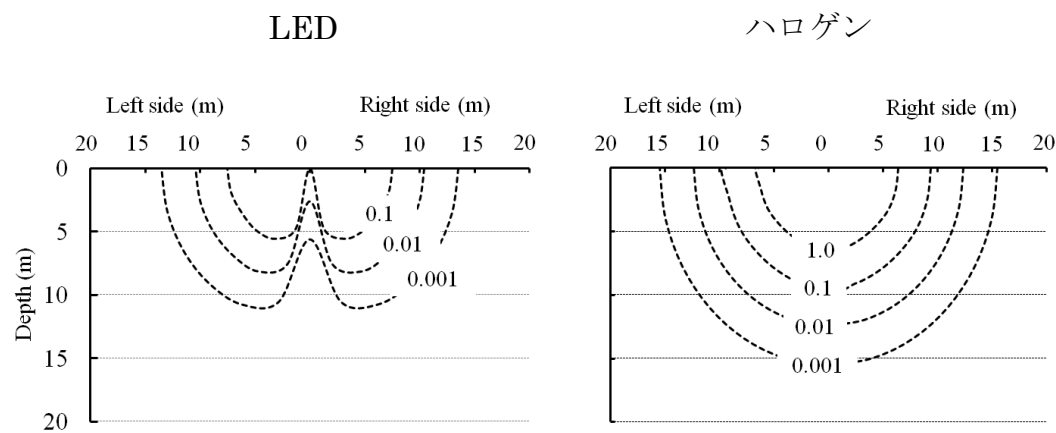


Fig. 5 カタクチイワシの比視感度(○)と推定された比視感度曲線.

水中灯(LED、ハロゲン)の海中における光環境

海中で計測した光源から1mの地点での放射照度データと前述した消散係数を用いて、光源からの距離に対する光量の変化を算出した。さらに、空中での集魚灯周りでの光量の計測結果を用いて、水中灯の水中での光量を算出した。また、ここでは計測した放射照度が1.0, 0.1, 0.01, 0.001 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ であったポイントを曲線でつなぎ、これを等放射照度曲線とした (Fig.6)。なお、Fig.6の横軸の0m地点が水中灯の設置位置である。ハロゲン灯の放射照度分布を見ると、等放射照度曲線は灯具の設置位置を中心に等心円状に分布しており、1.0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の等放射照度曲線は、水中灯から水平方向、垂直方向ともに約10mの地点に分布した。また、0.001 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の等放射照度曲線は、水中灯から水平方向、垂直方向に18mの地点に分布した。一方、LED灯の等照度曲線は、ハロゲン灯の場合のように等心円状には分布しておらず、水中灯直下の放射照度が低い、凸型の分布であった。しかし、水平方向に対しては、0.001 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の等照度曲線が15.5m付近に分布した。0.001 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の光量であれば、消費電力が1/10であっても、ハロゲン灯の9割程度の距離まで届けることができることが明らかになった。

一方、カタクチイワシの比視感度に基づいた照度分布を見ると、ハロゲン灯の場合、1.0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の等照度曲線は、同灯、同光量の放射照度曲線の分布位置より3割程度短かった。しかし、0.001 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の等照度曲線になると、1割程度とその差が縮まった。したがって、光源から近い地点ではカタクチイワシが認識することができないと推察される550nm以上の長波長の光が多く届いていると考えられる。しかし、光源から離れるにしたがって、短波長帯の光に比べて、長


 Fig. 6 海中における水中灯の放射照度分布($\mu\text{W}/\text{cm}^2$).

 Fig.7 カタクチイワシの比視感度に基づいた水中灯の光量分布($\mu\text{W}/\text{cm}^2$).

波長帯の光が届きにくくなり、その結果、550nm以上の光が占める割合が減ったことが影響したと推察される。LED灯においても、ハロゲン灯の場合と同様な傾向が認められた。

カタクチイワシは、夜間、海表面近くに分布するため、水平方向にカタクチイワシが認識することができる光を、消費電力を抑えて出力することができるLED灯は、効率よくカタクチイワシを集魚できると推察される。しかし、今回、試作したLED灯が出力した光はカタクチイワシの比視感度に十分に適合していなかった。今後はよりカタクチイワシの視感度に適合する配光のLED灯を製作する予定である。

4 謝辞

カタクチイワシのERG計測の際には、鹿児島大学水産学部准教授の安楽和彦博士にご協力頂いた。また、空中における水中灯の光量計測では、山口県産業技術センター専門研究員の吉村 和正博士にご協力頂いた。洋上で水中灯の光量計測では、山口県水産研究センター外海研究部の渡邊俊輝専門研究員をはじめ、

調査船第 2 くろしおの乗組員にご協力頂いた。ここに、厚くお礼を申し上げる。

5 参考文献

- [1] Y. Matsushita, Y. Yamashita: Effect of a stepwise lighting method termed “stage reduced lighting” using LED and metal halide fishing lamps in the Japanese common squid jigging fishery, *Fish. Sci.*, 78(2012), 977-983.
- [2] 四方崇文, 山下邦治, 白田光司, 町田洋一: 日本海沖合漁場におけるイカ釣り漁業用青色LED漁灯の性能評価, 日本水産学会誌, 78(2012), 1104-1111.
- [3] 海洋水産システム協会: 平成 21 年度省エネルギー技術導入促進事業報告書, 海洋水産システム協会(2010), 1-622.
- [4] 篠田博之, 藤枝一郎: 色彩工学入門, 森北出版株式会社, 2007.
- [5] 杉森康宏, 坂本 亘: 海洋環境光学, 東海大学出版, 1985.
- [6] E. O. Hulbert: Optics of distilled and natural water. *J. Opt. Soc. Amer.*, 35(1945), 698-705.
- [7] D. G. Stavenga, R. P. Smits, B. J. Hoenderst. Simple exponential functions describing the absorbance bands of visual pigment spectra. *Vision Res.*, 33(1993), 1011-1017.

受付日

受理日

著者略歴

氏名 梶川和武

1995 水産大学校漁業学科 卒業

1997 水産大学校水産学研究科 修了

1998 東京水産大学研究生 修了

2000 東京水産大学大学院 水産学研究科博士後期課程 中退

2000 水産大学校 海洋生産管理学科 助手

2007 水産大学校 海洋生産管理学科 助教

2013 水産大学校 海洋生産管理学科 講師

現在に至る

研究対象: 漁具の漁獲過程および選択性に関する研究

所属学会: 日本水産学会, 日本水産工学会, 水産海洋学会

氏名 毛利雅彦

1987 水産大学校漁業学科 卒業

1988 水産大学校漁業学科専攻科 修了
1990 東京水産大学大学院 水産学研究科博士前期課程 修了
1991 東京水産大学大学院 水産学研究科博士後期課程 中退
1991 水産大学校海洋生産管理学科 助手
2000 水産大学校海洋生産管理学科 講師
2010 水産大学校海洋生産管理学科 准教授
2013 水産大学校海洋生産管理学科 教授

現在に至る

研究対象：高度回遊性魚類の持続的生産に関する研究

所属学会：日本水産学会，日本水産工学会，水産海洋学会，日仏海洋学会

氏名 中村武史

1997 水産大学校漁業学科 卒業
1999 水産大学校水産学研究科 修了
2000 東京大学研究生 修了
2000 水産大学校海洋生産管理学科 助手
2007 水産大学校海洋生産管理学科 助教

現在に至る

研究対象：海洋生物の定量的モニタリング手法に関する研究

所属学会：日本水産学会，水産海洋学会，海洋音響学会，日本海洋学会

氏名 濱野 明

1972 水産大学校漁業学科卒業
1973 水産大学校漁業学科専攻科卒業
1973 水産庁入庁
1975 水産大学校 助手
1985 水産大学校漁業学科 助手
1989 水産大学校漁業学科 講師
1992 水産大学校漁業学科 助教授
1997 水産大学校海洋生産管理学科 助教授
2000 水産大学校海洋生産管理学科 教授
2013 水産大学校 校長

現在に至る

研究対象：音響計測手法による人工魚礁漁場の定量的評価に関する研究

所属学会：日本水産学会，日本水産工学会，水産海洋学会，海洋音響学会