

短パルス光に対する3種類の高感度カメラの撮影特性

高橋秀行*・澤田浩一**・安部幸樹**・高尾芳三**・渡辺一俊***

Imaging sensitivity of three kind of high-sensitivity imaging cameras under short-pulsed light illumination

Hideyuki TAKAHASHI*, Kouichi SAWADA**, Koki ABE**, Yoshimi TAKAO**, and Kazutoshi WATANABE***

Abstract: As a part of a development of an optical system that enables us to precisely observe negative phototactic fish *in situ*, characteristics of three different types of a high-sensitivity camera were investigated under short-pulsed light illuminations of different colors. These three types of a camera were Image Intensifier connected with CCD camera, EB-CCD camera, and HARP camera and they were tested as candidates of the observing system. A sample fish (Northern lampfish, *Stenobranchius leucopsarus*) was tethered with the snout down in a glass tank filled with fresh water in a dark room. The fish images were observed and recorded under short-pulsed light illuminations of different color of LED (light emitting diode). Red, blue, green and white LEDs were alternately used and pulse widths were changed from 1 to 100 μ s. The camera was set in front of the tank and took video images of the fish. The minimum pulse width was different among cameras to obtain clear images; 1 μ s for the Image Intensifier connected with CCD camera, 5 μ s for the EB-CCD camera, and 25 μ s for the HARP camera, respectively. We judged that the Image Intensifier connected with CCD camera is the best to inspect the fish behavior against short-pulsed light illuminations.

Key words: LED, high-sensitivity camera, short-pulsed light illumination

ハダカイワシ類は世界中の海洋に分布し、その生物量は数億～数十億トンと言われ非常に膨大であり (Gjøsaeter and Kawaguchi, 1980), 直接的な漁獲資源ではないものの、水産資源の餌生物として、また海洋生態系における食物連鎖を解明するために極めて重要な地位を占める生物種である。さらに、活発な日周鉛直運動を行う種の存在も知られており、海洋の物質循環にも重要な役割を担っていると考えられている。しかし、ハダカイワシ類は強い負の走光性を有すること、脆弱な魚体であるため生体のサンプリングが難しいことなどから、その生態に関する知見に乏しい。

水工研で開発された音響光学複合型計測システム

J-QUEST (Japan QUantitative Echo-sounder and Stereo Tv-camera system) は、耐圧深度300mの水密筐体に、計量魚群探知機と超高感度水中ステレオTVカメラを搭載しており、遊泳状態の魚のターゲットストレンジス (音響手法による資源評価などに必要な反射の強さ)、魚種、魚体長、遊泳姿勢等の情報を同時に得ることができる (澤田ら, 2004; 高橋ら, 2004)。著者らはJ-QUESTを活用して、これまでに遊泳状態のサンマやタコイカ等の計測に成功している (Sawada *et al.*, 2004; Takahashi *et al.*, 2004; 澤田ら, 2005)。しかし、これまでのところJ-QUESTでハダカイワシ類を捉えることはできていない。これは、ハダカイワシ類が

魚の走光性を持つためにカメラで撮影できなかったことが原因と考えられる。

そこで著者らは、ハダカイワシ類等の魚の走光性を持つ魚に対して有効な照明 - 撮像系、即ち、魚に見えない（あるいは見えても行動に影響しない）非常に短いパルス幅で発光する照明と、この照明下で魚を捉えることができるカメラによって構成されるシステムの開発を検討することにした。そのためには、対象魚種の視覚特性を調べた上で、短パルス照明下での撮影能力に優れた高感度カメラを選定する必要がある。しかし、ハダカイワシ類を飼育することは極めて難しく、その視覚特性も明らかではない。そこで、現在、製品化されており、J-QUESTへの搭載が可能な小型の高感度カメラ3機種について、短パルス照明下での撮影特性を試験し、最も短いパルス幅の照明に対応できるものを使用することにした。ここに、その試験結果を報告する。

方 法

本試験では、短パルス照明下での鮮明な撮像が期待され、且つ小型でJ-QUESTへの搭載が可能な、3種類の高感度カメラを試験した（Table 1）。イメージインテンシファイア（浜松ホトニクス(株) C8600-03）は、任意のアナログ方式ビデオカメラに接続して使用する感度増倍装置であり、光電面の素材にGaAsP（ガリウム、ヒ素、リン）を使用し、原理的には接続したカメラの感度を 10^6 倍に増幅する。今回の試験では、標準的な感度（最低撮像面照度3.0lux）を持つCCDカメラ（浜松ホトニクス(株) C5405-50）と、後述のHARPカメラに近い焦点距離を持つCCTV用レンズ（ペンタックス(株) B2518（焦点距離：25mm，F値：1.8））を接続して使用した。

EB-CCDカメラ（浜松ホトニクス(株) C7190-43）は、イメージインテンシファイアと同様にGaAsP光電面を

Table 1 Specifications of tested cameras

	Image Intensifier + CCD	EB-CCD	HARP
Product No.	II: C8600-03 CCD: C5405-50	C7190-43	OVS-SKH-501
Manufacturer	Hamamatsu photonics	Hamamatsu photonics	Nippon kaiyo
Photocathode	GaAsP ^{*1 *3}	GaAsP ^{*1 *3}	---
Electron multiplier	2 stage MCP (Micro Channel Plate) ^{*1}	BT (Back-thinned) CCD	single tube black and white HARP ^{*4} target
Imaging device	1/2" interline transfer CCD ^{*2}	BT (Back-thinned) CCD	single tube black and white HARP ^{*4} target
Effective no. of pixels (H × V)	752 × 485 pixels ^{*2}	640 × 480 pixels	640 × 480 pixels
Maximum quantum efficiency	50 %(@530 nm) ^{*1}	50 %	---
Maximum sensitivity	4.0×10^{-4} lux	0.01 lux	0.015 lux
S/N ratio	approx. 32 dB ^{*5}	approx. 50 dB ^{*6}	57 dB or more
Resolution	420 TV lines	350 TV lines	700 TV lines or more
Frame rate	30 frames/sec	30 frames/sec	30 frames/sec
Output signal	EIA	EIA	EIA

^{*1} spec. of image intensifier unit

^{*2} spec. of CCD unit

^{*3} Gallium, Arsenide and Lynn

^{*4} High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor

^{*5} in the case that the gain is set in high gain

^{*6} in the case that the sensitivity is set in maximum

搭載し、また信号対雑音比（以下、SN比）に優れる背面照射型CCD（BT-CCD）を用いることで、高感度と低ノイズを両立している。今回の試験では、上記のイメージンテンシファイア+CCDカメラと同じCCTV用レンズを接続して使用した。

HARPカメラ（日本海洋（株）OVS-SKH-501）は、原理的にノイズが発生しないHARP撮像管を搭載しており、高感度と高SN比を両立している。なお、HARPカメラは、現在J-QUESTに搭載しており（高橋ら、2004）、J-QUEST専用に開発した2種類の耐圧仕様レンズ（標準レンズ、テレコンバージョンレンズ）のいずれかを接続して使用する必要がある。本試験では、ハダカイワシ類等の小型魚を撮影を想定して開発したテレコンバージョンレンズを使用した。テレコンバージョンレンズ装着時に得られる焦点距離は約23mm、F値は約1.67である。

短パルス発光源としては、赤、緑、青、白の4色が利用可能なLEDスポット光源（日進電子工業（株）SP-28）を使用し、これを最小1 μ sのパルス幅で発光させることが可能な制御装置（日進電子工業（株）LPS-203KS）に接続して使用した。各LEDの最大発光時のピーク波長における光量子束密度は、赤色が約0.470 μ mol/m²·s@640nm、緑色が約0.748 μ mol/m²·s@527nm、青色

が約0.308 μ mol/m²·s@470nm、白色が約0.055 μ mol/m²·s@580nmである（LED照射方向前方21cmにおける推定値^a）。

試験は、ハダカイワシ類等の短パルス光に対する行動特性を観察する水槽実験を想定して、暗室内で水槽を使用して行った（Fig. 1）。W60×H30×D30cmのガラス水槽に水を満たし、水槽中央付近にコヒレハダカ *Stenobranchius leucopsarus*（標準体長約9.0cm）の凍結サンプルを吊り下げて撮影対象とした。コヒレハダカは、調査船調査で得た状態の良い冷凍標本を使用した。カメラと光源はともに水密仕様でないため、カメラは水槽前方から水槽内部を観察できるように配置し、光源は水槽直上に設置してサンプルを上側から照明するようにした。カメラはそれぞれ焦点距離が異なるため、水槽全面からの距離60cmを目安に、サンプルが画像に収まるように適宜配置を調節した。

試験中は、暗室内の照明を全て消灯し、LEDを設定したパルス幅で発光間隔1sで連続発光させた。LEDのパルス幅設定は、1、5、10、25、50、100 μ sとし、100 μ sでも鮮明な魚体の輪郭の画像が得られない場合は、100の倍数単位でパルス幅を延長し、鮮明な画像が得られるまで試験を続けることにした。LED光源は赤、緑、青、白の4色を使用した。それぞれのカメラに接

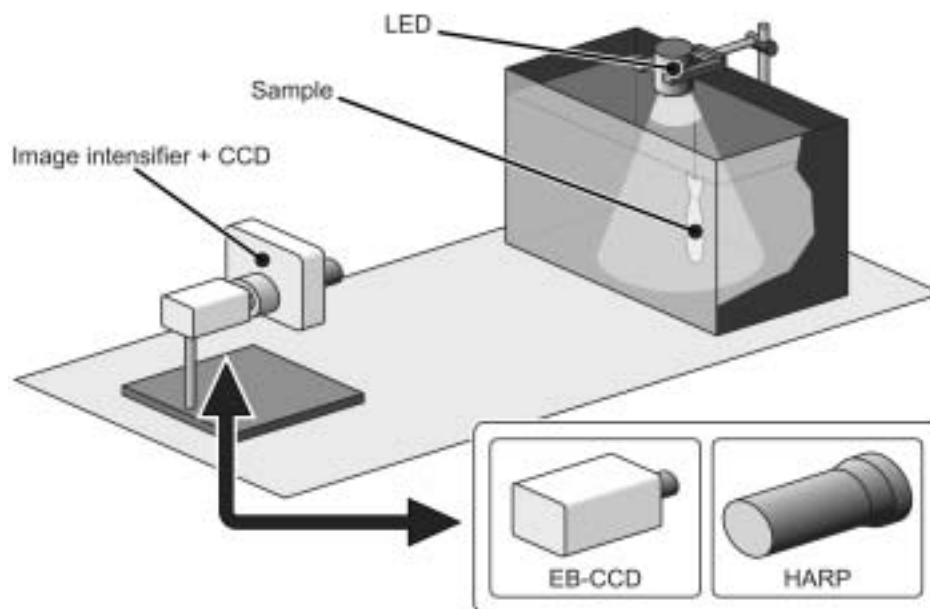


Figure 1 Experimental set up of camera test under short-pulsed light illumination. The set up was settled in a darkened room.

2006年2月7日受理 水産総合研究センター業績水工研C第41号

^a 波長別の光量子束密度を測定するためには、光源を連続発光させる必要がある。しかし、パルス発光用LEDを連続で最大発光させると破損するため、暗室内で最大発光時の約10～30%の電流で連続発光させ、波長別光エネルギー分析装置（LI-COR inc. LI-1800）を用いて、LED照射方向前方21cmにおける光量子束密度を測定した。測定値から求めた電流と光量子束密度の関係式を用いて、最大発光時の光量子束密度を推定した。

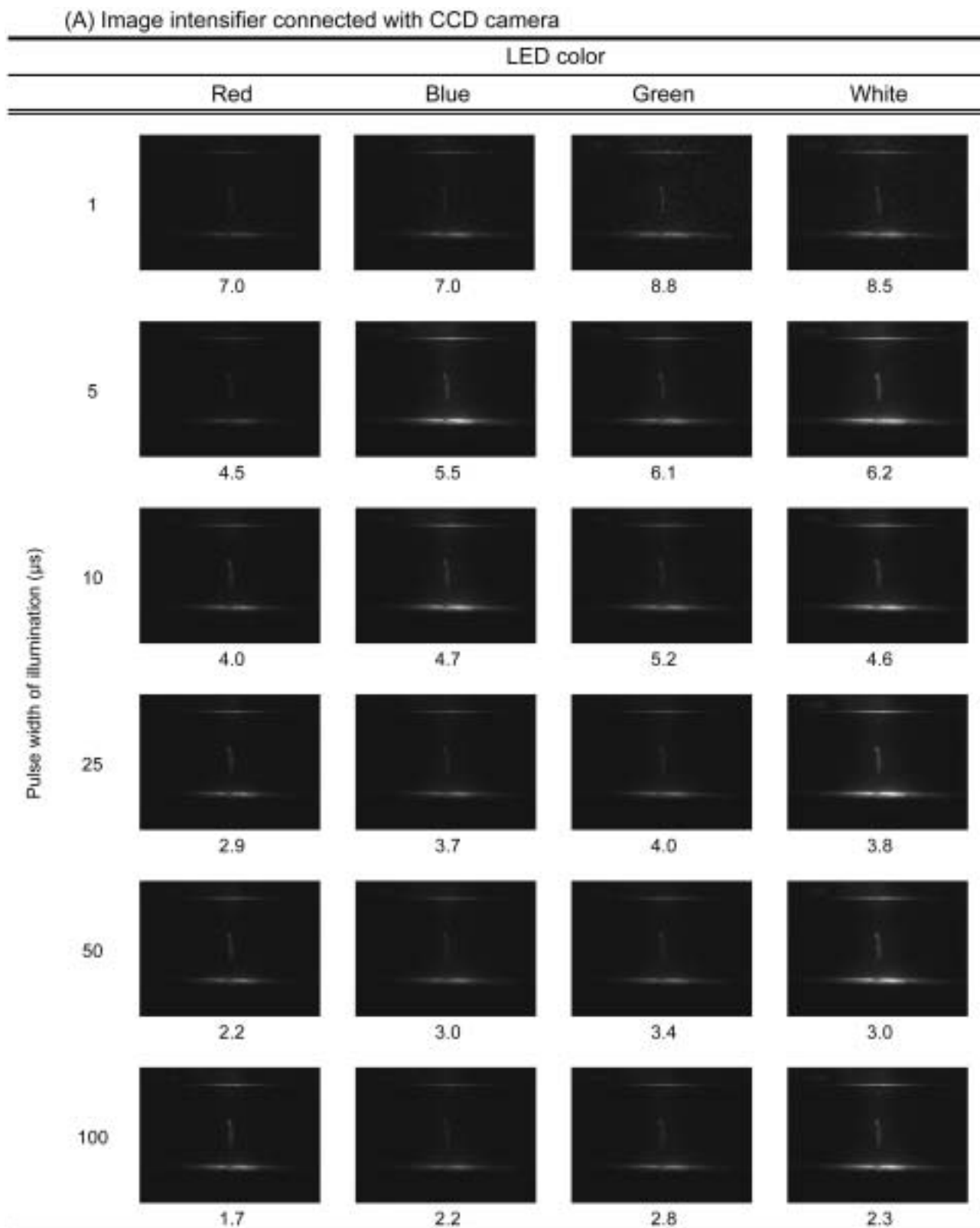


Fig. 2 Obtained images of sample fish under several conditions of short-pulsed light illuminations by (A) image intensifier connected with CCD camera, (B) EB-CCD camera, and (C) HARP camera. Numbers and characters under images mean (A) gain (max. 10.0), (B) sensitivity (max. 10.0), and (C) iris (full for full open).

(B) EB-CCD camera

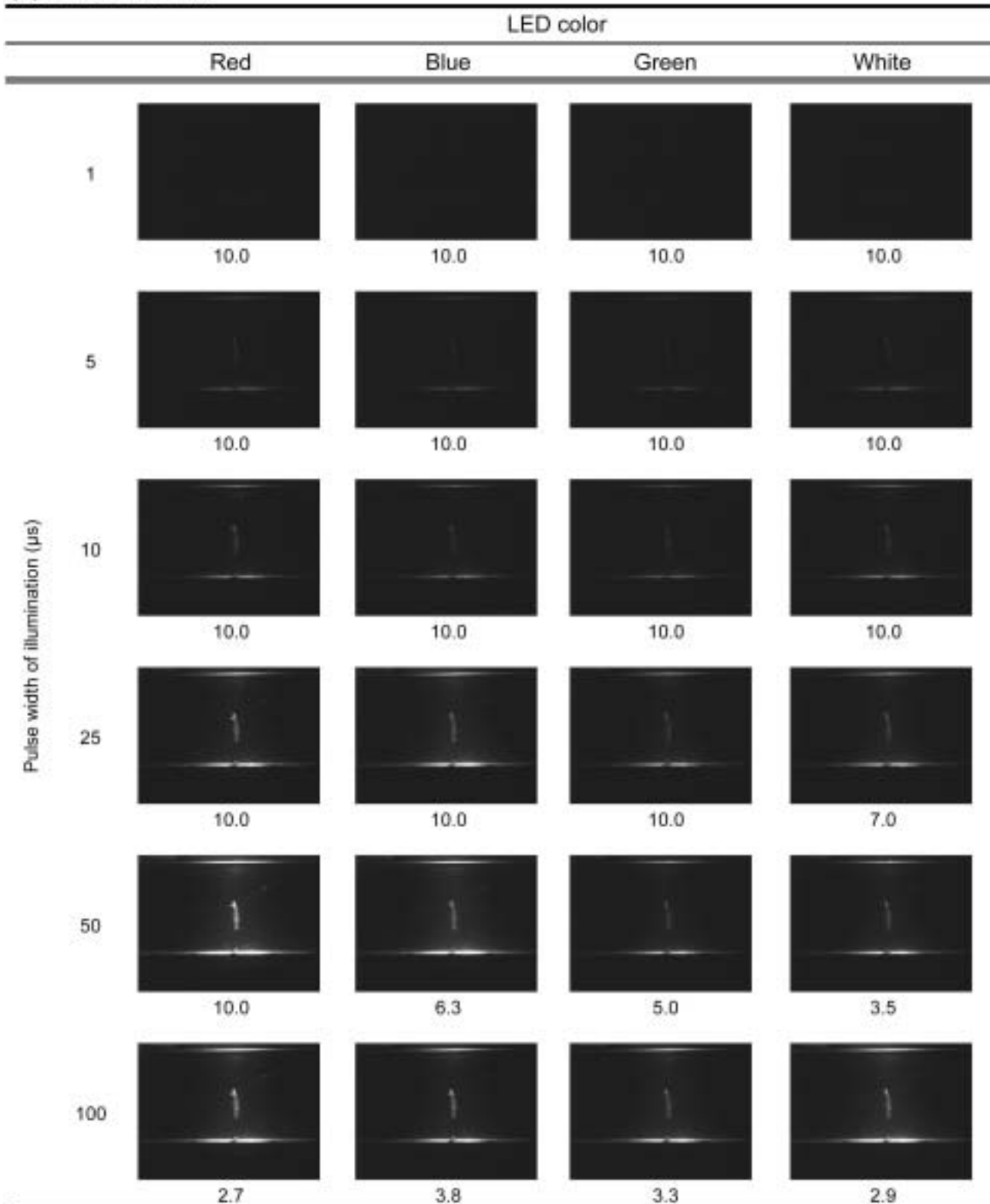


Fig. 2 (continued)

(C) HARP camera

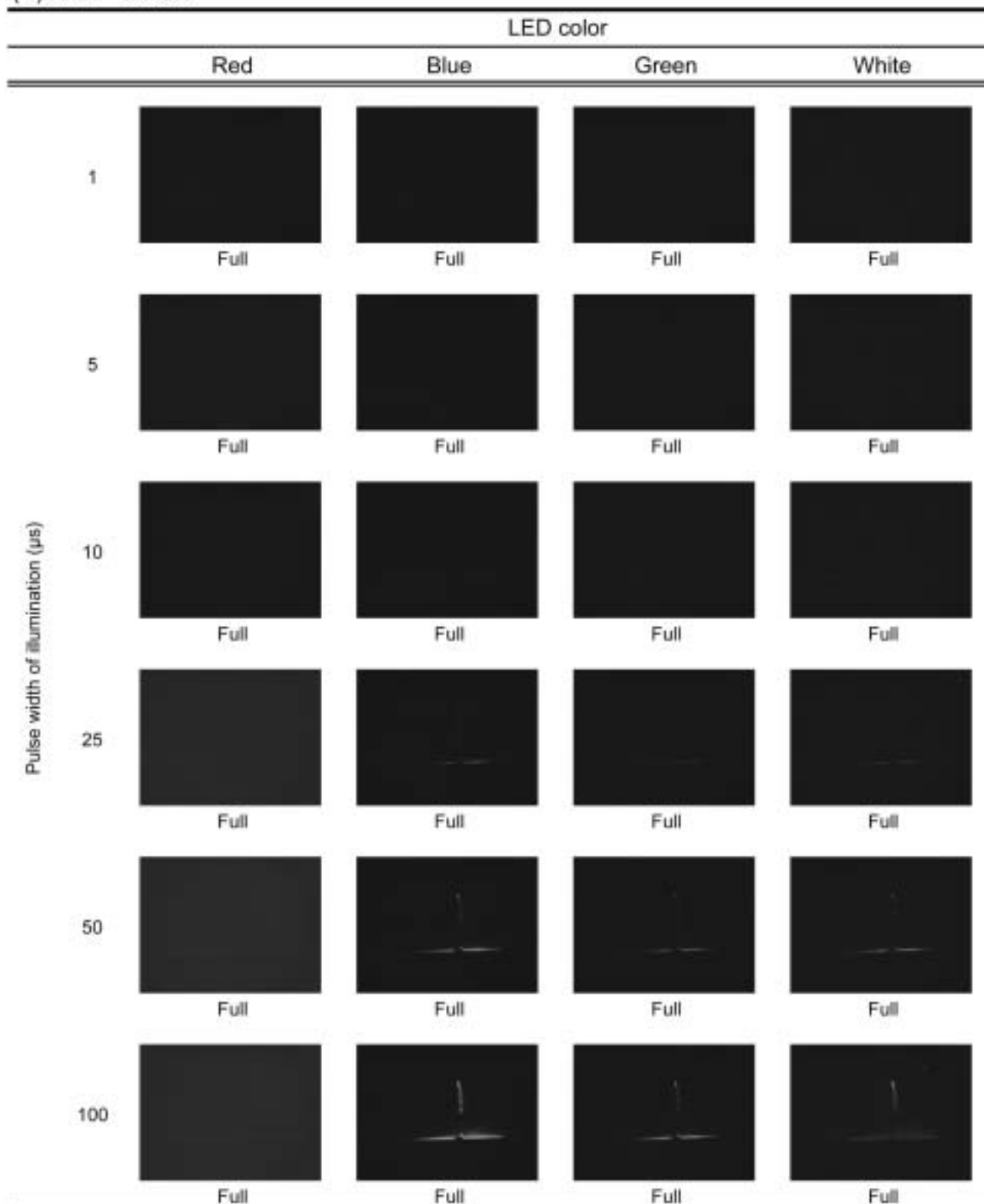


Fig. 2 (continued)

続される制御装置上で調節可能なイメージインテンシファイア+CCDカメラのゲイン, EB-CCDの感度, およびHARPカメラの絞りについては, 最大(全開)を基本として, 撮影に十分な光量がある場合には鮮明な魚体の輪郭の画像を得られるように適宜調節した。

なお今回は, 行動実験等での実際の使用に準じる仕様での撮影特性を調べたため, 3種類のカメラに接続したレンズは, それぞれ仕様(焦点距離, F値, 等)が異なる。したがって, 本報の結果は, カメラあるいは撮像素子そのものの特性を直接比較したものではない。

結 果

各カメラで撮影した結果をFig. 2に示す。それぞれの画像の下にある数値は, イメージインテンシファイア+CCDカメラの場合はゲイン, EB-CCDカメラの場合は感度, HARPカメラの場合は絞りを表している。撮像が可能であった場合には, これらのゲイン, 感度, 絞りを, 適当な明るさの画像となるように適宜調節した。HARPカメラの絞りは, 本試験における設定条件では全て全開(full)となった。

イメージインテンシファイア+CCDカメラ(Fig. 2(A))では, パルス幅 $1\mu\text{s}$ の照明下において, ややSN比が低いもののサンプルを撮像することができた。青色と白色のLED下では $5\mu\text{s}$ より長いパルス幅で鮮明な魚体の輪郭の画像が得られ, 赤色と緑色のLED下でも $10\mu\text{s}$ より長いパルス幅で鮮明な画像が得られた。

EB-CCDカメラ(Fig. 2(B))は, パルス幅 $1\mu\text{s}$ の照明下ではサンプルを撮像することができなかった。しかし, $5\mu\text{s}$ では全色のLED下で不鮮明ながらサンプルを映し出すことができた。また, 赤色と白色では $10\mu\text{s}$, 青色と緑色では $25\mu\text{s}$ より長いパルス幅の照明下で鮮明な魚体の輪郭の画像が得られた。

HARPカメラでは, 1回のLED発光に対して数フレームにわたり撮像される場合があったため, その場合は最も鮮明なフレームを示した(Fig. 2(C))。HARPカメラでは, パルス幅 $10\mu\text{s}$ 以下のLED発光ではサンプルを映し出すことができなかった。また, HARPカメラは, 青色, 緑色, 白色LED照明下では, パルス幅 $25\mu\text{s}$ ないし $50\mu\text{s}$ で不鮮明ながらサンプルを映し出すことができたが, 赤色LED照明下で鮮明な画像を得るには, $800\mu\text{s}$ のパルス幅が必要であった。

考 察

魚に見えない(あるいは魚の行動に影響を与えない)照明を検討するにあたっては, 対象生物の視覚特性を知るとともに, 短パルス光に対するハダカイワシ類等の行動特性を調査する必要がある。そのためには, できるだけ短いパルス幅の照明に対応できる実験系を構築することが肝要である。今回試験した3種類のカメラの中で, 最も短いパルス幅で撮影が可能であったのはイメージインテンシファイア+CCDカメラである。イメージインテンシファイア+CCDカメラでは, パルス幅 $1\mu\text{s}$ の照明下で不鮮明ながらサンプルを撮影することができ, またパルス幅 $10\mu\text{s}$ の照明下では全てのLED色で鮮明な魚体の輪郭の画像が得られた。したがって, イメージインテンシファイア+CCDカメラを採用することによって, 最短でパルス幅 $1\mu\text{s}$ の照明下における行動特性を調査できるようになることがわかった。

耐ノイズ性に優れるEB-CCDカメラは, 撮影可能な照明条件下では, イメージインテンシファイア+CCDカメラよりノイズが少ない画像の撮影が期待できる。また, EB-CCDカメラの筐体は, イメージインテンシファイア+CCDカメラに比べて小さく, J-QUESTに組み込みやすいと思われる。したがって, 今後実施を予定している短パルス光に対する行動特性調査の結果, 対象生物に見えない, あるいは行動に影響を及ぼさない照明条件が, EB-CCDカメラで撮影可能な条件と合致すれば, J-QUESTへの搭載も考えられる。

HARPカメラでは, 1回のパルス発光に対し, 数フレームにわたり撮像された。HARPカメラのフレーム間隔は約 $1/30\text{s}$ で, パルス幅より明らかに長いことから, これは残像である。赤色LED照明下においてHARPカメラで撮影可能なパルス幅は, 他色に比べて極端に長かった。これはHARPカメラの分光感度特性上, 青色付近に最大感度があり, 赤色付近での感度が劣るためと考えられる。

謝 辞

試験の実施にあたっては, 浜松ホトニクス(株)山本直樹氏に技術面のサポートをしていただいた。この場を借りて感謝の意を表す。本研究は, 独立行政法人水産総合研究センター平成17年度運営交付金プロジェクト研究「中深層性マイクロネクトン測定のための不可視ライトの開発」の一環として行われた。

文 献

- Gjøsaeter J., and Kawaguchi K., 1980: A review of the world resources of mesopelagic fish. FAO Fisheries Technical Paper. No.193. Rome. FAO. 151pp.
- 澤田浩一，高尾芳三，高橋秀行，安部幸樹，奥村都誉司，小林朝子，杉本守弘，2004：水産調査のための音響・光学複合システムJ-QUESTの開発I 音響システムの開発．水工研技報，26，23-34．
- Sawada K., Takahashi H., Takao Y., Watanabe K., Horne J. K., McClatchie S., and Abe K., 2004: Development of an acoustic-optical system to estimate target-strengths and tilt angles from fish aggregations. *Proc. OCEANS/TECHNO-OCEAN '04*, 395 ~ 400.
- 澤田浩一，高橋秀行，安部幸樹，一井太郎，高尾芳三，渡辺一俊，2005：音響光学複合システム(J-QUEST)を用いたイカ類の自然状態ターゲットストレングス測定．平成17年度イカ類資源研究会議研究発表プログラム4-1，平成17年8月3日，新潟市ガレソホール．
- 高橋秀行，澤田浩一，高尾芳三，安部幸樹，町田憲司，菊元千史，杉本守弘，2004：水産調査のための音響・光学複合システムJ-QUESTの開発II 光学システムの開発．水工研技報，26，35-45
- Takahashi H., Sawada K., Watanabe K., Horne J. K., McClatchie S., Takao Y., and Abe K., 2004: Development of a stereo TV camera system to complement fish school measurements by a quantitative echo sounder. *Proc. OCEANS/TECHNO-OCEAN '04*, 409-414.