

## 水産調査のための音響・光学複合システムJ-QUESTの開発 光学システムの開発

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\*\*\*

### Development of an acoustic-optical system (J-QUEST) for fisheries surveys Optical System

Hideyuki TAKAHASHI, Kouichi SAWADA, Yoshimi TAKAO, Koki ABE,  
Kenji MACHIDA, Chifumi KIKUMOTO and Morihiro SUGIMOTO

**Abstract:** The acoustic-optical system, J-QUEST is an instrument package designed to measure mesopelagic fish schools such as lanternfishes. The system consists of a quantitative echo-sounder and a stereo TV camera system. This paper describes specifications of the J-QUEST optical system (The detail of entire system and its acoustic system are described in a companion paper). We made a stereo camera system with two highly sensitive underwater TV cameras to estimate the size, tilt angle, and swimming speed of targets. Standard and tele-conversion lens sets were developed to be interchanged to match target sizes. A guideline chart set is introduced to choose suitable lens set according to assumed target size and distance. A pair of underwater illumination units was attached on the J-QUEST. An optical control unit was developed and installed in the J-QUEST pressure housing. Camera images are monitored on deck via a underwater cable, while control commands are sent to optical control unit via the cable.

**Keywords:** J-QUEST, HARP target, stereo TV camera, fish size estimate

#### 1. はじめに

ハダカイワシ類は直接的な漁獲対象魚種ではないものの、水産有用魚種を含む食物連鎖において重要な位置を占めることから、現存量の推定は重要である。しかし、船底装備の計量魚群探知機（以下、計量魚探機）ではハダカイワシ類の測定が困難であり、詳細な情報を得るには新たな手法の開発が必要である。表1のように、計量魚探機は魚群の分布や密度など、群れとしての性質を知る能力に優れる一方、カメラは個々の魚種や大きさを知る能力に優れる。そこで、調査船より垂下し、魚群に接近して計測を行う計量魚探機と、これを補完するステレオ方式水中TVカメラを組み合わせた音響・

光学複合システムJ-QUEST（Japan QUantitative Echo-sounder and Stereo Tv-camera system）を開発した。

平成8～11年度の特別プロジェクト研究<sup>a</sup>において、自律型海中ロボット（AUV）用のセンサとして、小型計量魚探機と、低照度撮影に優れる白黒HARP（High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor）撮像管方式水中TVカメラ（表2）を用いたステレオ計測システム、およびこれら格納する耐圧容器を開発した。<sup>1)</sup>これを調査船から垂下し魚群に接近させれば、音響と光学で同時に詳細な観測が行える。そこで、特別プロジェクト研究の成果をベースとして、調査船から垂下する方式の計測システムとして必要な改造を施し、その名称をJ-QUESTとした。

<sup>a</sup> 農林水産技術会議新技術開発特別研究「漁業資源量調査のためのマリノセンシング技術の開発」

表1 水産資源調査における音響・光学手法の特徴

Term	Acoustic method	Optical method
Fish identification		
Fish size		
Density		
School volume		×
Survey range		

表2 HARP撮像管方式水中TVカメラの仕様

Imaging method	Single tube black and white HARP target
Minimum illuminance level	0.015Lux (F=1.4, Auto gain control ON)
Resolution	700TV lines or more (at horizontal center)
S/N ratio	57dB or more
Signal output	VS* signal 1.0Vp-p 75 NTSC
Electric power	DC12V / approx. 12W
Sensitivity switching	Auto
Amplifier gain switching	Auto
Master lens	Type: C814BEX-2
Focal length	8mm
F number	Equivalent to 1.4 ~ 360
Iris	Auto
Focus	Manual
Housing	Anticorrosive aluminum (hard anodic coating)
Dimensions	124 × 327mm
Weight	Approx. 5.0kg
Submersible limit	1000m
Quantity	2
O-ring type	G95

\* Vertical synchronization

本報は、J-QUESTカメラ部の仕様について記載する。J-QUEST全体と音響（計量魚探機）部については別報<sup>2)</sup>とする。

## 2. 必要な仕様

以下に、J-QUESTカメラ部において必要な仕様をまとめる。

J-QUESTは、調査船より垂下する単独の計測システムとすることから、水中TVカメラの映像を船上においてオンラインでモニタリングできる仕様とする。<sup>b)</sup>

J-QUEST耐圧容器の耐圧深度が300mであることから、少なくとも深度250mまで使用可能とする。そのためには、水中ケーブル長を300m以上とすること（別報<sup>2)</sup>）、各部の耐圧深度をJ-QUEST耐圧容器と同等かそれ以上とすること、環境光がほとんどない大深度に対応するために水中照明を追加すること、が必要である。水中照明について、照明光がプランクトン等の浮遊物に当たって乱反射し却って視界を悪化させる可能性、あるいは、照明光が撮影対象の行動に何らかの影響を与える可能性に配慮して、必要最低限の光量で使用でき

るように、船上からオンラインで照度調節可能な仕様とする。

ステレオ計測のために2台のカメラを同期させ、それぞれの映像中に同じフレーム値（またはフィールド値）を表示するフレームカウンタ装置について、船上から制御可能な仕様とする。<sup>c)</sup>

主な計測対象は体長5～10cm程度のハダカイワシ類であることから、これを距離5m付近において鮮明に撮影可能な仕様とする。ただし、耐圧容器の仕様上、ステレオ計測のためのカメラ配置（基線長：30cm、光軸方向：平行）は固定のため、レンズの変更により、計測対象に適した視野を確保する。

計測対象の遊泳姿勢を推定するためには、J-QUEST自身の姿勢情報が必要なことから、姿勢センサを搭載し、オンライン・モニタリングが可能な仕様とする（別報<sup>2)</sup>）。

## 3. 仕様の検討

### 3.1 オンライン・モニタリングおよび制御

J-QUESTの水中ケーブルとしては、長距離でも信号劣化がなく、ケーブル径が細い光ファイバケーブルを使用することとした。光ファイバケーブルの使用にあたっては、電気信号を光信号に変換する必要があるため、J-QUEST耐圧容器内部と船上部に光-電気変換部を設ける。これにより、水中TVカメラの映像は、カメラ部コントロールユニット（後述）を経由して光-電気変換部で光信号に変換され、水中ケーブルを通じて船上部に伝送される。光信号は、船上部の光-電気変換部において再び電気信号に変換・出力され、最終的に映像記録装置で録画される。一方、フレームカウンタ装置・水中照明ユニットの制御は、船上からパーソナル・コンピュータ（PC）を使用して行う。PCから発する制御信号は、RS232C経由で光-電気変換部に入力、光信号に変換され、水中ケーブルを通じてJ-QUEST本体に伝送される。J-QUEST内部では、光-電気変換部で再び電気信号に変換され、カメラ部コントロールユニットに伝えられる（水中ケーブル、光-電気変換部の詳細は別報<sup>2)</sup>）。

### 3.2 交換用レンズ

撮影対象に応じて適当な焦点距離を選択できるように、カメラ耐圧筐体のレンズ部分を本体と別体とし、交換可能とする。できるだけ安価に抑えるため、現行製品の中で使用可能なレンズから、計測目的に適するものを検討する。検討に際しては、両眼視野の広さ（幅あるいは高さの狭い方）、平均的な分解能（任意の撮影距離における画像1ドットあたりの大きさの平均値）、焦点の設定に応じた被写界深度（焦点が合う距離の範囲）における近点（被写界深度におけるカメラに近い側の限界点）および遠点（被写界深度におけるカメラより遠い側の限界点）を判断基準とする。概略の近点  $N$

<sup>b)</sup> 特別プロジェクト研究では、映像は耐圧容器内部の映像記録装置で録画する仕様であった。

<sup>c)</sup> 特別プロジェクト研究では、耐圧容器内部のフレームカウンタ装置を直接操作してカウンタを始動・停止させる仕様であった。

(mm) と遠点  $F$  (mm) は下式によって求められる；<sup>3)</sup>

$$N = \frac{HD}{H + D} \dots \dots \dots (1)$$

$$F = \frac{HD}{H - D} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $H$  は過焦点距離 (mm)、 $D$  は焦点を合わせた物体までの距離 (mm) である。 $H$  は、レンズの焦点距離を  $f$  (mm)、 $F$  値を  $F$ 、許容錯乱円径を  $c$  (mm) として、次式により求める；

$$H = \frac{f^2}{Fc} \dots \dots \dots (3)$$

許容錯乱円径とは、ある程度のぼけまでを合焦と見なすときの、その直径を指す。 $c$  の値は使用目的や画面サイズ、あるいは画素の大きさなどによって違っており、画面横幅の  $1/300 \sim 1/1500$  程度が目安となる。<sup>4)</sup> HARP 撮像管の場合は経験的に  $c = 0.02\text{mm}$  として計算している。なお、焦点を合わせた物体までの距離が過焦点距離以上 ( $D > H$ ) になると、上記 (2) 式の分母はゼロまたは負値となり、遠点は無限遠に発散する。

撮影対象の大きさと撮影距離をパラメータとして、上記の判断基準に基づいて各レンズの適用範囲を求める。実際の調査に照らして、活用度が高いと判断されたレンズを製作する。具体的な判断の目安としては、体長  $5 \sim 10\text{cm}$  の魚を距離  $5\text{m}$  付近において鮮明に撮影する場合を想定する。

なお、焦点調整は、耐压容器内部の調整ダイヤル操作によって行うため、屋外での調整は困難である。したがって、事前に想定される観測対象に対応する撮影条件を慎重に検討し、屋内で最適な焦点に調整しておく必要がある。特に、同一調査中に焦点距離の異なるレンズに交換する場合には、それぞれのレンズが同じ焦点において適切な被写界深度になるよう、焦点を慎重に調整する必要がある。

### 3.3 水中照明ユニット

夜間や大深度域など環境光が殆ど存在しない場合、低照度撮影能力に優れる HARP 撮像管方式水中 TV カメラでも鮮明な映像が得られないことが予想される。そこで、環境光が不足する場合でも鮮明な映像が得られるようにするため、水中照明を設置する。使用可能な照明器具の種類としては、高輝度 LED、メタルハライド、ハロゲンなどがある。この中で、有索無人潜水機 (ROV) 用等の照明として普及が進んでおり、信頼性やコストの面で有利なハロゲンをを用いた水中照明ユニットを製作する。照度については、船上からの制御によりきめ細かい調節を可能とする。

### 3.4 カメラ部コントロールユニット

J-QUEST 耐压容器内のスペースは限られていることから、カメラ部の制御に必要な下記の機能を一括して内蔵するカメラ部コントロールユニットを製作する。

- 水中 TV カメラへの電源供給
- 水中照明ユニットへの電源供給
- 水中 TV カメラの同期 (フレームカウンタ機能)
- 水中 TV カメラの映像信号の入力
- フレームカウンタ制御信号の入力
- 水中照明ユニット制御信号の入力
- 光 - 電気変換部へ映像信号の出力

上記のうち、 $\quad$ 、 $\quad$ については、特別プロジェクト研究において開発済であることから、これをベースとして、 $\quad$ 、 $\quad$ の機能を追加し、J-QUEST 耐压容器内に搭載可能な一体型のユニットとする。

## 4. 装置の製作

### 4.1 オンライン・モニタリングおよび制御

電力は、船上部の電源ユニットから光 - 電気変換部、水中ケーブルを經由して J-QUEST 本体内部のトランスに至り、カメラ部コントロールユニットに供給される。カメラ部の制御コマンドは、船上部の制御用 PC から光 - 電気変換部に出力され、光信号に変換されてから水中ケーブルを介して J-QUEST 本体内部の光 - 電気変換部に至り、再び電気信号に変換され、カメラ部コントロールユニットに送信される。水中 TV カメラの映像は、カメラ部コントロールユニットから光 - 電気変換部に送信され、光信号に変換されてから水中ケーブルを介して船上部の光 - 電気変換部に至り、再び電気信号に変換され、映像記録装置およびモニタに出力される (電力供給と信号伝送の詳細は別報<sup>2)</sup>)。

### 4.2 交換用レンズ

HARP 撮像管方式水中 TV カメラに使用可能なレンズは、標準レンズ (焦点距離約  $6\text{mm}$ ) の他に 2 倍のテレコンバージョンレンズ (焦点距離約  $12\text{mm}$ ) があり、これら 2 種類のレンズについて検討した。レンズ交換が可能な仕様でレンズの耐压容器を設計したところ、レンズ配置の制限により得られる焦点距離が変わることが判明した。そこで、実際に得られる焦点距離 (標準レンズ: 約  $11\text{mm}$ 、2 倍テレコンバージョンレンズ: 約  $23\text{mm}$ ) において、視野の範囲 (図 1)、分解能 (図 2)、近点および遠点 (図 3) を計算し、これらをもとにそれぞれのレンズの適用範囲を示すチャートを作成した (図 4)。図 4 において、近点、遠点、分解能、視野範囲の 4 本の線で囲まれる範囲が、各レンズの適正な使用範囲の目安となる。図 4 をもとに、撮影距離  $5\text{m}$  において体長  $5 \sim 10\text{cm}$  の魚を体長の  $1/20$  程度の分解能 ( $0.25 \sim 0.5\text{cm}$ )、体長の 5 倍程度の両眼視野幅 ( $25 \sim 50\text{cm}$ ) で観測する場合を検討した。焦点について、標準レンズでは焦点約  $4.5\text{m}$  で近点が約  $2.2\text{m}$ 、遠点が無限遠となるのに対し、2 倍テレコンバージョンレンズでは近点  $3.6\text{m}$ 、遠点が約  $5.9\text{m}$  となり、距離  $5\text{m}$  をほぼ中心とする被写界深度が得られることから、 $4.5\text{m}$  とした。それぞれのレンズにおいて、これらの条件 (分解能:  $1/20$ 、両眼視野幅: 5 倍、焦点:  $4.5\text{m}$ ) を満たす撮影距離と撮影対象の大きさの範囲は、図 4 のグレーで塗りつ

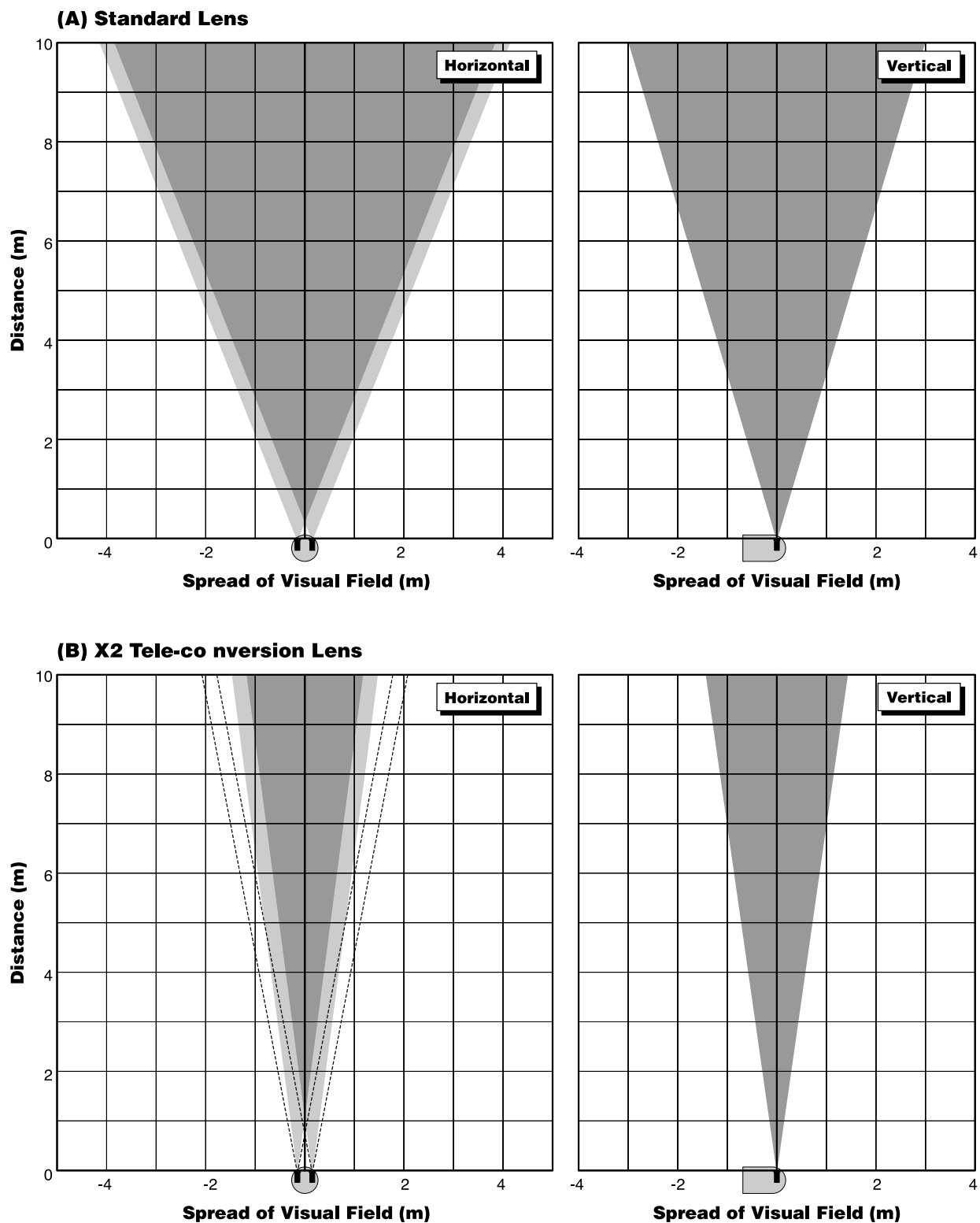


図1 水中TVカメラの視野

(A)標準レンズ使用時,(B)2倍テレコンバージョンレンズ使用時。濃いグレーは両眼視野,薄いグレーは単眼視野。点線は焦点距離に基づく視野で,実際にはけられが生じるためこれより狭くなる(けられについては図7参照)。

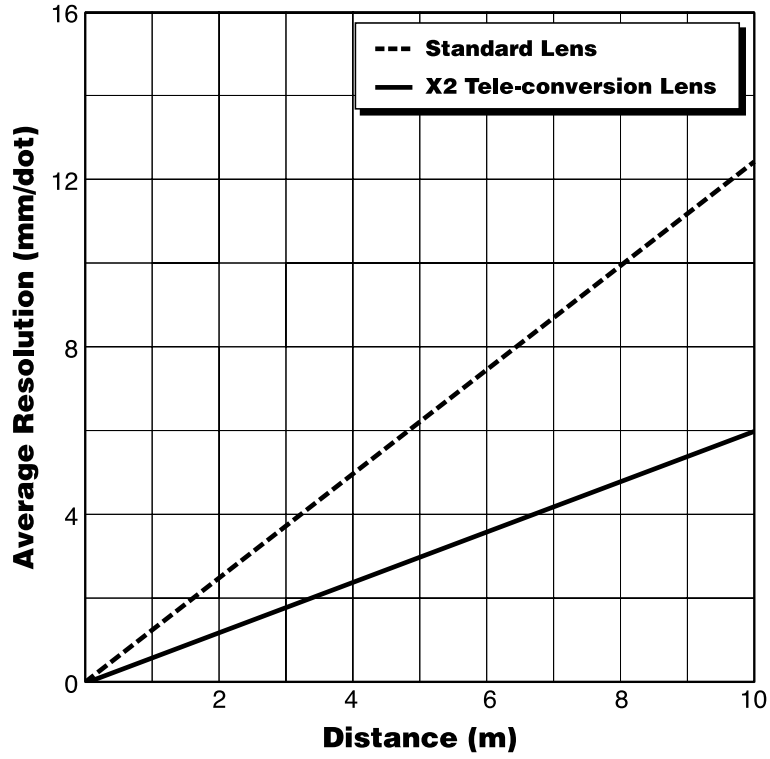


図2 平均的な分解能と撮影距離の関係

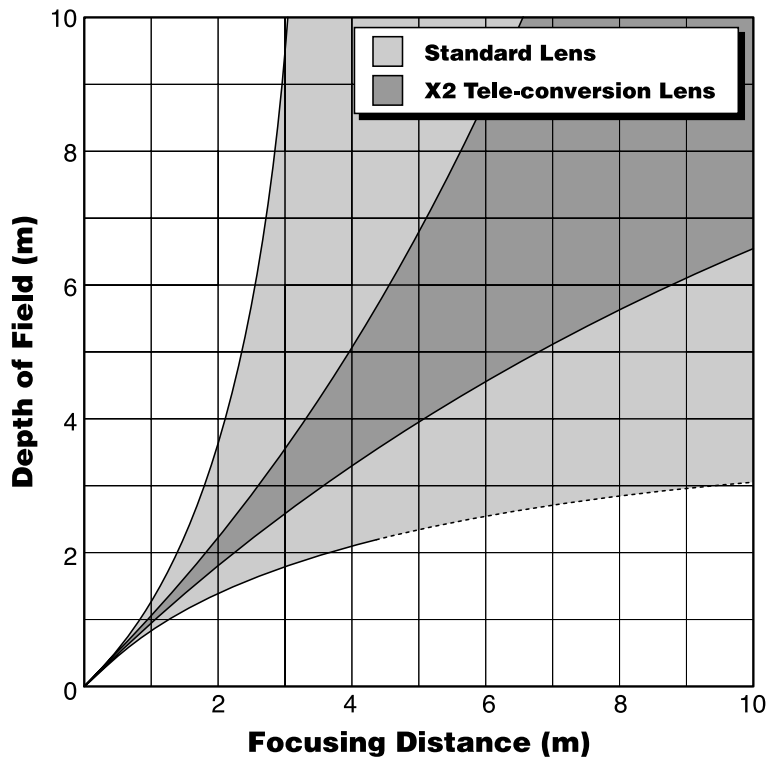


図3 焦点と被写界深度の関係

薄いグレーは標準レンズ，濃いグレーは2倍テレコンバージョンレンズの被写界深度の範囲を表す。点線部は過焦点距離を超える焦点の範囲を表す。

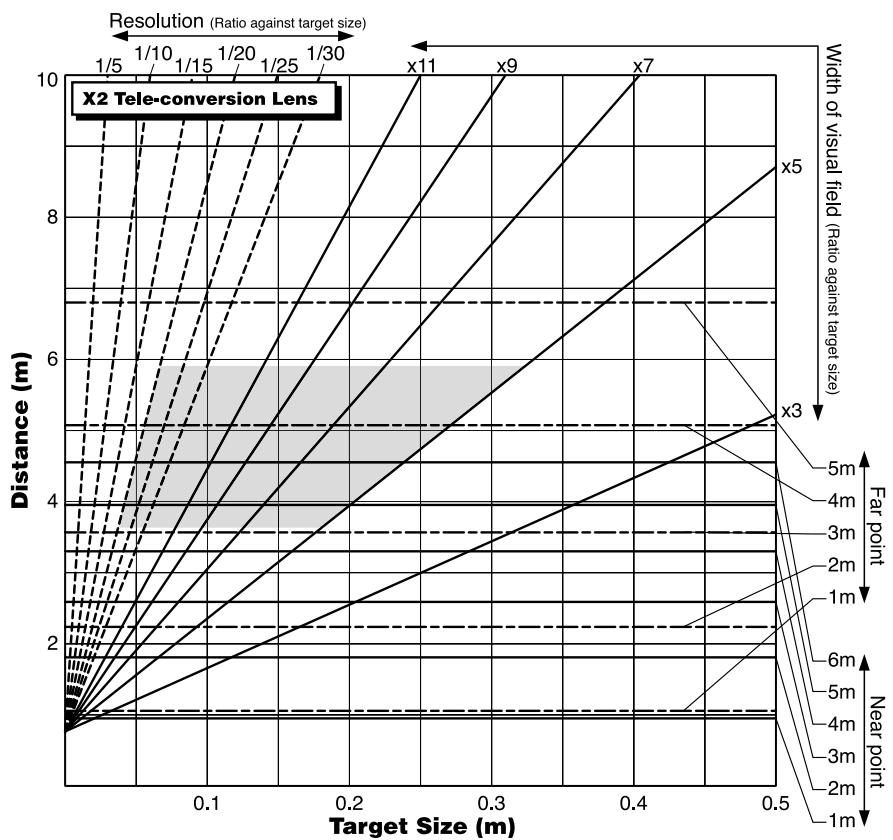
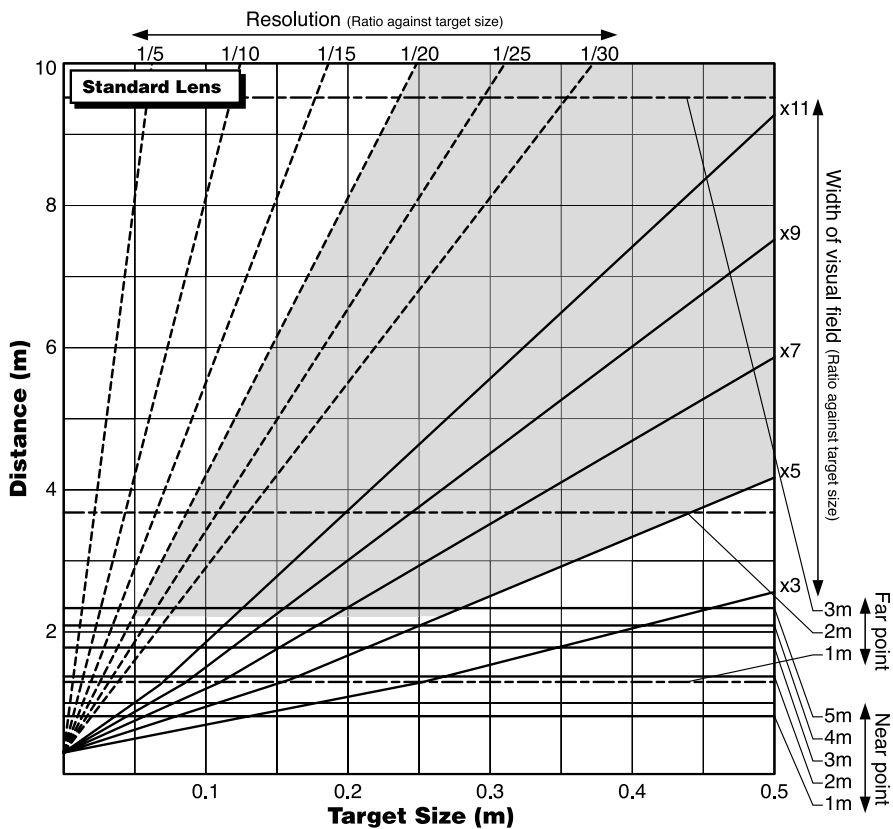


図4 レンズ選択チャート

撮影対象の大きさと距離を基準として、視野、分解能、被写界深度から撮影に適するレンズを選択する。詳細は本文を参照のこと。

ぶした部分となる。これより、体長5～10cmの魚を距離5mで鮮明に観測するという条件は、標準レンズでは完全に適用範囲から外れるのに対し、2倍テレコンバージョンレンズでは概ね適用範囲に入ることがわかったため、これを製作した。交換用レンズの仕様と外観を、表3および図5、6に示

す。2倍コンバージョンレンズについては、レンズの仕様と筐体サイズの制限の関係で、撮影範囲がレンズに収まりきらない箇所、いわゆる「けられ」が発生した。図7にけられの状況を示す。

なお、レンズ配置の制約により、交換用レンズと本体の間

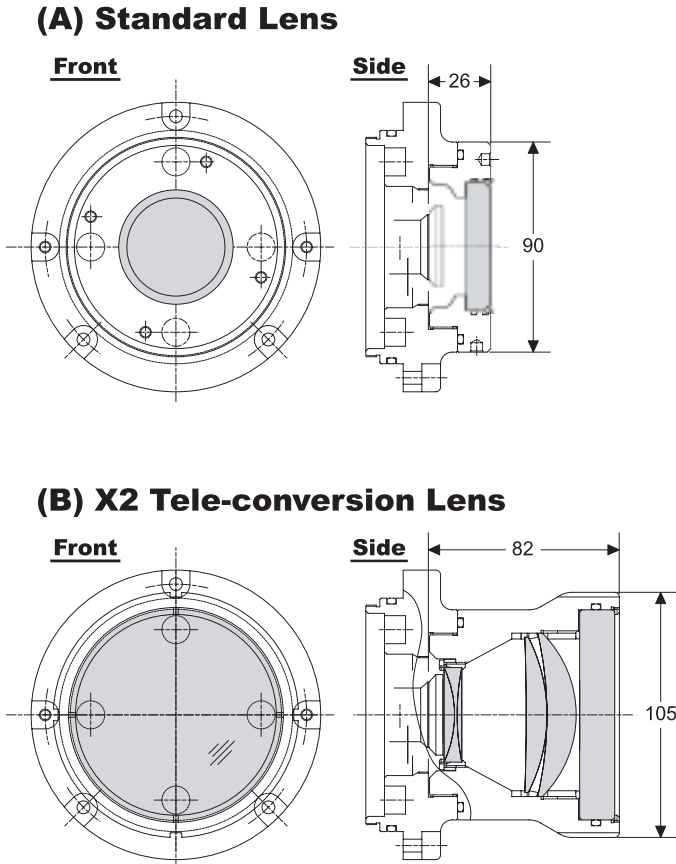


図5 交換用レンズ図面  
細線は水中TVカメラ本体レンズマウント部。



図6 水中TVカメラに装着した交換用レンズ  
(A)標準レンズ  
(B)2倍テレコンバージョンレンズ

表3 アタッチメントレンズの仕様

	Standard lens	×2 Tele-conversion lens
Focal length	Approx. 11.1mm	Approx. 23.0mm
Lens construction	1 element in 1 group	3 elements in 3 groups
Material of external lens	Pyrex glass (refractive index 1.47)	
Diameter of external lens	54.5mm	90mm
Material of internal lens	---	Glass
Horizontal field of view (in water)	Approx. 43.3°	Approx. 15.0°*
Hyperfocal distance	4.38m	18.88m
Housing	Anticorrosive aluminum (hard anodic coating)	
Dimensions	90×26mm	105×82mm
Weight	Approx. 0.25kg	Approx. 1.0kg
Quantity	2	2
O-ring type	G75	

\* Available field of view excluding the shading

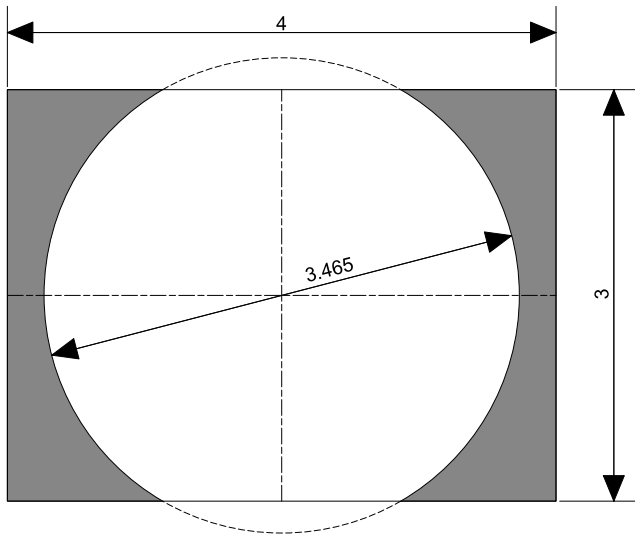


図7 2倍テレコンバージョンレンズ使用時のけられ縦横比が4：3の長方形の水中TVカメラ映像に対して、撮影できる範囲は直径3.465の円状となり、その周囲にけられが生じる（グレー部分）

に防水機構を内蔵する空間が確保できず、交換用レンズを取り外した際に防水が保たれない仕様となった。したがって、レンズ交換時には、交換用レンズ取付部から水分等が内部に侵入しないよう細心の注意を払う必要がある。また、レンズ交換を行うとJ-QUEST耐圧容器全体の気密が解けるため、交換後にJ-QUEST耐圧容器の気密試験を行う必要がある。

#### 4.3 水中照明ユニット

製作した水中照明ユニットの仕様と外観を、表4および図8、9に示す。水中照明ユニットとカメラ部コントロールユニットは、J-QUEST耐圧容器後方キャップ部の水密コネクタ取付筒部を経由して接続した。水密コネクタは、特別プロジェクト研究で評価試験用に製作したものを流用した。水中照明ユニットは、撮影条件に応じて照明位置や方向を変更できるように、固定方向可変の固定金具によってJ-QUEST音響校正用フレーム（別報<sup>2)</sup>参照）の任意の箇所固定できるようにした。

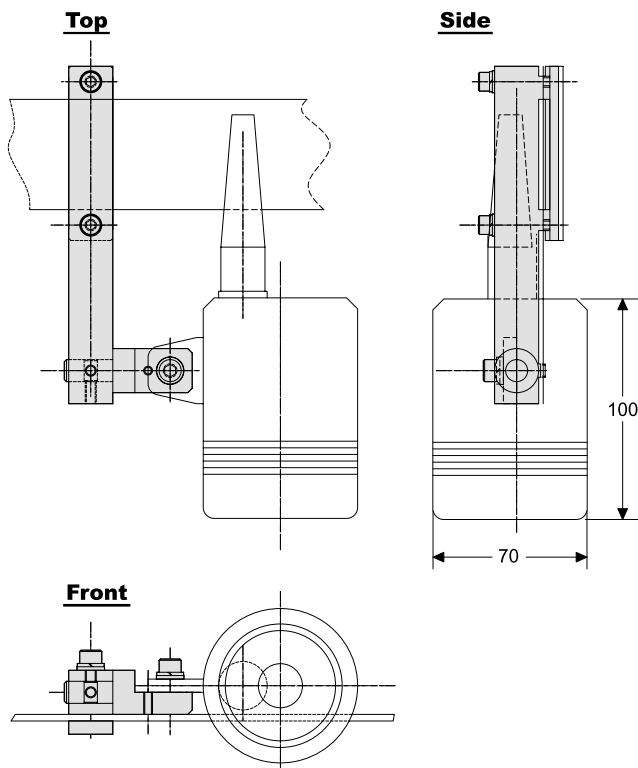


図8 水中照明ユニット図面

グレー部分はJ-QUEST音響用校正治具（細線）に固定するための金具部分。



図9 水中照明ユニット

表4 水中照明ユニットの仕様

Type	Halmeic light (Type: JCD100V150WM) (Color temperature: 3075K, Average life: 200 hours)
Electric power	AC100V / 150W (50/60Hz)
Housing	Anticorrosive aluminum (hard anodic coating)
External lens	Pyrex heat-resistant glass
Connector type	XSJ-2-BCR
Submersible limit	300m (30kgf/cm <sup>2</sup> )
Dimensions	70 × 100mm (connector not included)
Weight	Approx. 0.5kg
Quantity	2



#### 4.4 カメラ部コントロールユニット

製作したカメラ部コントロールユニットの仕様と外観を、表5および図10, 11に示す。また、フレームカウンタの表示フォーマットを図12に、カメラ部コントロールユニットを外部制御する際の制御コマンドの一覧を表6に示す。フレームカウンタ装置の外部制御については、装置本体を直接操作するのと同様の制御を行えるようにした。また、フレームカウンタ装置本体の操作パネルをカメラ部コントロールユニット上に移設し、直接操作も可能とした。水中照明ユニットの制御について、撮影条件に応じて照度をきめ細かく調節できるように、サイリスタ制御方式による供給電圧の変更によって照明強度を16段階に調節可能とした。

なお、船上のPCから送信される制御コマンドは垂れ流し

方式で、フィードバック機能を持たない。そのため、コマンドが正しく実行されたか否かは、水中TVカメラ映像中の照明光の状態から判断する必要がある。

#### 5. おわりに

J-QUESTカメラ部はステレオ計測システムであり、最終的にはキャリブレーションの結果や立体計測精度を明確にする必要がある。また、水中照明ユニットについては、配光の特性等を検証する必要がある。これらについては今後の課題とする。

なお、今後は海上実験等を行ってJ-QUESTの性能評価を行い、これを踏まえて、実際の水産資源調査においてより実用的なシステムとするための改良を重ねる予定である。

表5 カメラ部コントロールユニットの仕様

Dimensions	160 × 144 × 200mm
Weight	Approx. 3.5kg
Connectors	Power input × 1 Power output for underwater TV camera × 1 Video image input × 2 Video image output × 2 Gain lock output × 2 Power output for underwater illumination unit × 1 Command signal input × 1
Input voltage	AC10V (for underwater TV camera, remote control) AC100V 8for underwater illumination unit)
Output voltage	DC12V ± 0.1V / 1.3A (for underwater TV camera) AC0~ 100V (for underwater illumination unit, variable)
Remote control	
Control	RS232C
Transmission speed	9600bps
Communication	One-way communication from control PC
Synchronizing	Start-stop synchronizing
Bit composition	Start bit : 1 bit Data bit : 7 bit Parity (Vertical) : 1 bit Stop bit : 1 bit
Parity check	Even (Vertical)
Frame counter	
Image	NTSC color signal / 525 lines, 60Hz, black and white signal
Image input	Composite VBS* / VS** 1.0V p-p 75 load, L/R-channel independent
Image output	Composite VBS* / VS** 1.0V p-p 75 load, L/R-channel independent
Character level	Approx. 1.0Vp-p
Format	( see Fig.12)
Underwater illumination unit	
Maximum output	100V / 400W
Control method	Thyrister
Intensity control	Voltage divider
Illumination level	16 steps (100.0, 93.3, 86.6, 80, 73.3, 66.6, 53.3, 46.6, 40.0, 33.3, 20.0, 13.3, 6.6, 0.0V)

\* Video-burst and synchronization

\*\* Vertical synchronization

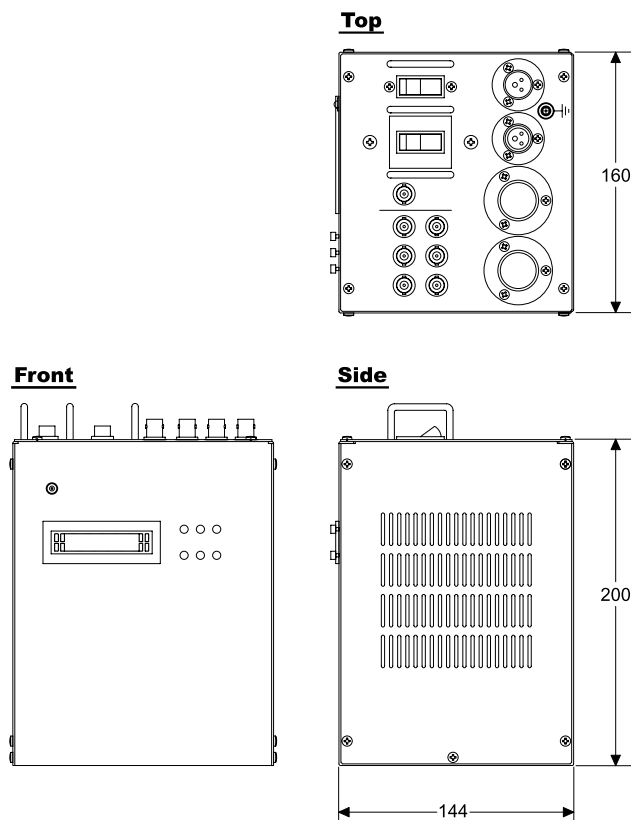


図10 カメラ部コントロールユニット図面



図11 カメラ部コントロールユニット

表6 カメラ部コントロールユニット外部制御コマンド

Command	Action	Valid condition(s)
A. Control of frame counte		
START	Start counting	Counter stop
STOP	Stop counting	Counter counting
RES_CNT	Reset counter value (maintaining page value)	Counter stop
RES_ALL	Reset all value	Counter stop
POSx	Move counter to a set position (x: 0 ~ 9)	None
POS_INC	Increase counter position	None
POS_DEC	Decrease counter position	None
FRM2FLD	Change count unit to field	None
FLD2FRM	Change count unit to frame	None
PAGExx	Set page value to xx (xx: 00 ~ 99)	Counter stop
B. Control of underwater illumination units		
LIGHT_ON	Turn lights on at set intensity	Invalid when TEST, LIGHT_OFF
LIGHT_OFF	Turn lights off (maintaining set intensity)	Invalid when TEST, LIGHT_ON
LIGHT_INC	Increase illumination intensity	Invalid when TEST, LIGHT_ON
LIGHT_DEC	Decrease illumination intensity	Invalid when TEST, LIGHT_ON
LIGHTxx	Set illumination intensity to xx (xx: 00~ 15)	Invalid when TEST
TEST_mm_nn	Test (turn light on at mm intensity for nn seconds) (mm: 01~ 04, nn: 01~ 99)	None
C. All		
INIT	Initialize (Stop counting, Page and counter values to 0, Count unit to frame, Turn light off, Light intensity to 0)	None

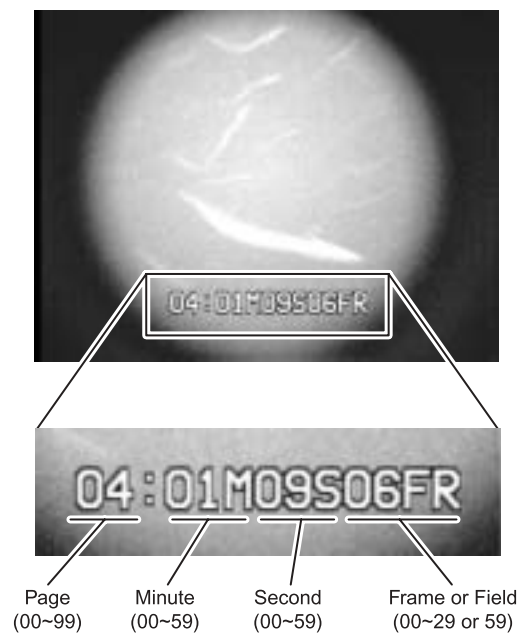


図12 フレームカウンタの画面表示フォーマット

## 謝 辞

本研究は、平成13～15年度水産総合研究センター国際共同研究「ダイナミックな日周鉛直運動を行う魚類のターゲットストレンクスと生物学的情報の測定手法」の一環として行われたものであり、この場を借りて関係各位に感謝の意を表す。また、本報の英語部分について助言をいただいたワシントン大学・John K. Horne博士に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 農林水産技術会議事務局：研究成果370「漁業資源量調査のためのマリノセンシング技術の開発」, pp.1-93, 2001.
- 2) 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：水産調査のための音響・光学複合システムJ-QUESTの開発 音響システムの開発, 水工研技報, 26, 2004 (印刷中).
- 3) 小柳修爾：オプトロニクス光技術用語辞典(改訂増補版), オプトロニクス社(東京), pp.1-406, 1998.
- 4) 岸川俊郎：光学入門, オプトロニクス社(東京), pp.1-330, 1990.