

## 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

澤田浩一\*1・高尾芳三\*1・高橋秀行\*2・安部幸樹\*1・奥村都誉司\*3・小林朝子\*4・杉本守弘\*5

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

Kouichi SAWADA, Yoshimi TAKAO, Hideyuki TAKAHASHI, Koki ABE,  
Tsuyoshi OKUMURA, Asako KOBAYASHI, and Morihiro SUGIMOTO

**Abstract:** An instrument package (J-QUEST), consisting of a quantitative echo sounder and a stereo TV camera, is being developed for the observation of lanternfishes. Swimming speed, target strength, and tilt angle distribution of fish can be measured acoustically and optically using this package to a maximum depth of 250m. In this paper we describe the design and initial laboratory test results of the acoustic system. The optical system is described in a companion paper.

**Keywords:** J-QUEST, lanternfish, target strength, swimming speed, tilt angle

#### 1. はじめに

ハダカイワシ類は、直接的な漁獲対象種ではないものの、その種類も多く、世界中に広く分布しており、日周鉛直移動を行うことで知られている<sup>1)</sup>。生態系の中ではスケトウダラやホキなどの餌として、オキアミ類の捕食者として、重要な位置を占めている。スケトウダラなどの水産有用魚種の音響を用いた資源量調査時には、これら有用魚種と同じ層に分布することも多く、より正確な資源量推定のためには、魚種の音響的な識別が重要な課題である。また、将来的には、ハダカイワシ類の現存量の推定・評価も必要となる。

広域に分布している魚の魚群量調査では、計量魚群探知機（以下、計量魚探機）を用いる音響調査が有効である<sup>2)</sup>。音響調査では、エコー積分方式により、魚群量の推定を行う。エコー積分方式では、エコー積分により得られた面積散乱強度を魚群の面積あたりの密度に変換するために、背方向の平

均ターゲットストレングス（以下、TS）を用いる。しかしながら、ハダカイワシ類については、その値が明らかでない。それは、以下にあげるようなハダカイワシ類の生態的な特徴と測定に関する技術的な問題に起因する。ハダカイワシ類は同型同サイズの近縁種であっても鰭の有無の違いがあり、音響的な特性が大幅に異なる、鉛直移動中の姿勢分布に関する情報がほとんどない、ハダカイワシ類のサイズも5 cmから10 cm程度と小さいために、TSも小さい、送受波器から魚群までの距離が大きくなると、音響ビームが広がることにより、単体エコーの識別ができなくなる<sup>3)</sup>。このため、船底装備の計量魚探機から、数百メートルの深度にいるハダカイワシ類のTS測定は難しい。

このように、ハダカイワシ類は調査船に装備した計量魚探機からだけでは、得られる情報の質・精度に限界がある。そこで、対象となる魚群に近づいて情報を得ることが可能なシステムが必要となる。

2004年1月19日受理 水産総合研究センター業績水工研C第20号

\*1 水産情報工学部資源情報工学研究室

\*2 漁業生産工学部機械化研究室

\*3 水産情報工学部海洋情報工学研究室

\*4 (株)カイジョーソニック

\*5 日本海洋(株)

著者らは特別プロジェクト研究<sup>a</sup>（平成8年 - 平成11年）の中で、自律型海中ロボット（AUV）に搭載可能なスプリットビーム式の小型計量魚探機システム、高感度なHARP撮像管方式水中TVカメラを用いたステレオ計測システム、これらを搭載した耐圧300mのテストベンチの開発を行った<sup>4</sup>。このテストベンチを調査船の舷側から吊り下げ、ハダカイワシに近づけることができれば、音響で“聞く”だけでなくビデオカメラで“見る”ことができるようになる。すなわち、音響手法と光学手法の組み合わせにより、自然状態でのTS・魚体長・魚種識別・姿勢情報・遊泳行動などの複数の情報の同時収集が可能となる。

そこで、このテストベンチを改造して、新たにJ-QUEST（Japan QUantitative Echo sounder and Stereo Tv-camera system）と名付けたシステムの開発を行った。本報では、J-QUESTにのシステム全体と音響部分についての詳しい検討結果と水槽実験結果について述べることにする。なお、カメラ部分についての検討結果は別報告<sup>5</sup>とする。

## 2 必要な仕様

ハダカイワシ類は、50mmから100mm程度の標準体長を持ち、鰭のないものや、あっても体長が大きくなるにつれて鰭の体に対する割合が小さくなるミカドハダカ（*L. regalis*）のような種類があることが知られており、これは、鉛直移動と密接に関わっていると考えられている<sup>6</sup>。日本近海の黒潮混合域で多く見られるハダカイワシ類の昼夜での鉛直移動パターンについては、おおまかにみて4種類のパターンがあることが、Watanabe *et al.*<sup>7</sup>により報告されている。そのパターンは、明確に昼間と夜間で別の層に移動、一部昼間と同

じ深度層に残るものの、鉛直移動を行った層と元の層の深度は明確に異なる、昼夜の深度で差はないが、その種のいる夜間の一番浅い層は、昼間の層より浅くなっている、鉛直移動を行わない、の4つである。

開発するシステムは、あげた、明確に移動する種類について、計量魚探機とステレオTVカメラを同時に用いて、昼夜での行動やTSの違いなどを調べることができるものとする。このために、計量魚探機の有効な最短レンジ3mから、TVカメラの最大有効レンジまで、音響的に観察できる範囲と光学的に観察できる範囲をできるだけオーバーラップさせる。

対象となる魚群を識別しながら、その魚群の鉛直移動に合わせて、システムと魚群との距離を適切に保つためには、船上で音響信号・映像信号のモニターしながら、ケーブル長を変えていく必要がある。改造に供するテストベンチはもともとAUV搭載を前提に開発されたため、データは内部収録されるようになっており、オンラインモニターができない。これを可能にするための改造を施す。ハダカイワシの行動を正確に知るために、ベースとなるテストベンチ自体の動揺をモニターできるようにしておく。ハダカイワシの鉛直移動についての生態的特性やテストベンチの耐圧深度（300m）などから、実用最大深度を250mとする。また、船底装備の計量魚探機と同期動作により同時使用を可能とする。さらに、日本国内だけでなく、ニュージーランド船への搭載対応（AC240V対応）とする。

改造の対象となるテストベンチを図1(a)に、改造後のJ-QUESTを図1(b)に示す。また、必要とされる仕様について、以下にまとめた。



(a)



(b)

図1 (a) AUVの一部として開発したテストベンチの耐圧容器部（赤い砲弾状のもの）。水中ビデオカメラと送受波器取り付け部には円筒型のフタ（図中で、“c”、“t”と表示）がしてある。手前の小さなフタがあるところに片側のビデオカメラ、もう一台は左奥側に装着される。中央上側の大きなフタが送受波器取り付け部。ビデオカメラ、音響送受信機は内部に格納される。(b) 改造後のテストベンチのセットアップ。較正用のフレーム、水中照明が取り付けられている。

<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」

## 仕様

- 1) 測定対象は、体長5 - 10cmの有鰈魚。
- 2) 少なくとも深度250mまで使用可能とすること。
- 3) 音響・映像信号をオンラインで制御・モニターできるようにすること。
- 4) 甲板面積に余裕がない中型調査船においてもケーブルの取り回しができるだけ簡単にできること。
- 5) ロール、ピッチ、深度、水温センサによる姿勢、深度、水温のモニタリング可能なこと。
- 6) 音響ビーム幅を現状よりも広げること。
- 7) J-QUEST搭載の計量魚探機は外部同期信号によっても、動作可能となること。
- 8) 音響ビーム幅に比べて広い画角をもつカメラは逆に、標準の約2倍の焦点距離をもつ交換レンズを装着可能とすること。(別報)
- 9) 水中照明を追加し、そのコントロール可能なこと。(別報)

## 3 仕様の検討

## 3.1 必要な電力および機器接続

システム全体の電力供給、接続図について、図2に示す。船上から耐圧容器に収納した機器に電力を供給し、また、コ

ントロール信号・データ信号の伝送を行う必要がある。また、船の電源部からの電力供給に当たっては、海外での使用や瞬断防止についての考慮が必要である。そこで、単相AC100V、単相AC240V(ニュージーランド船搭載対応)の2種類の電源について、常時インバータ給電による電力供給を可能とする。

表1は、左からユニット名、新たに製作する電源基板の電源の種類、ユニットの内容、新たに製作した電源基板から供給される電力を元に、各ユニット内でつくる電源の種類を示す。例えば、耐圧容器内のカメラ部コントロールユニットには、電源基板側からAC10Vの電源を与え、ユニット内の各機器でこの電源をもとにDC9V、12Vを作り動作することになる。図3に製作した船上の電力供給部を示す。水中照明以外で主要な消費ユニットとなる計量魚探機ユニットについては、使用パルス幅0.6msについて、全体効率50%、全体力率60%として概算し、最大電流、実効電流(表中でカッコ内の値)の2種類について計算した。

初期の設計段階では、J-QUESTのみで最大700VA程度とし、余裕を持たせて、耐圧容器内のトランスの定格容量は963VAに決定した。水中照明を最大の300Wで使用する場合、全体では、実効値で680W、送信時には最大940W程度の容量が必要となる。送信時には、計量魚探機内の電源供給部のコンデンサに貯めた電力を使用するため大きな問題はないが、最大300W分の水中照明をつけることで、結果的には、耐圧容器

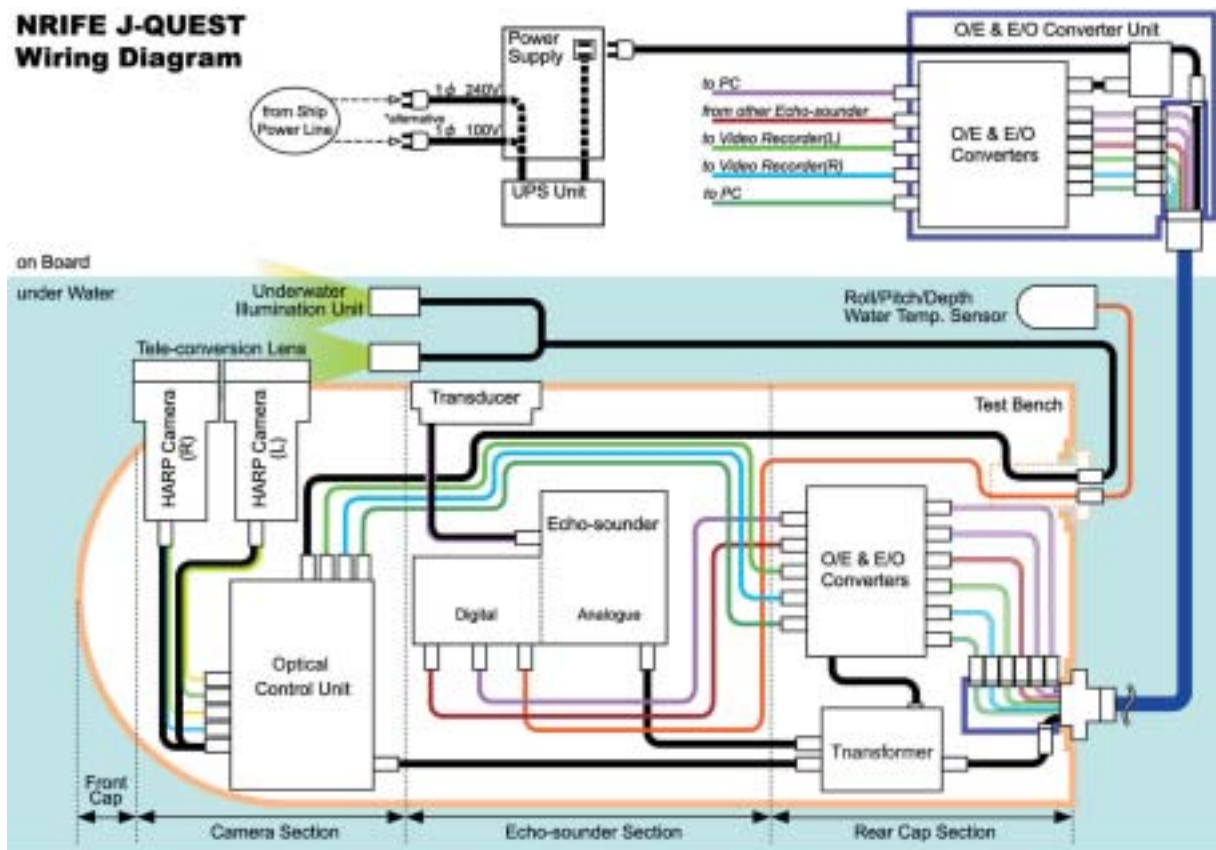


図2 システムブロック図

表 1 使用電源と使用電力推定値

Unit	Power supply	Function	Power consumptions
On deck ( Electric - optical signal converter )			
	DC ± 12V	Video signal (U-S41R , 2)	DC ± 12V, 3.5W × 2
	DC9V	Control (down link) (U-C50T)	DC ± 12V, 3.5W
		Trigger (down link) (U-C50T)	DC ± 12V, 3.5W
		10BaseT (E-TBT-FRL-04)	DC9V,4.5W
Pressure-proof container ( Electric - optical signal converter )			
	DC12V	Video signal (U-S50T <sup>*2</sup> )	DC ± 12V, 3.5W × 2
		Control (down link) (U-C50R)	DC ± 12V, 3.5W
		Trigger (down link) (U-C50R)	DC ± 12V, 3.5W
	DC9V	10BaseT (E-TBT-FRL-04)	DC9V, 4.5W
( Camera, Frame counter, Light control )			
	AC10V,Approx. 80W	HARP Camera, 2 Frame counter Light control	DC12V, 12W × 2 DC9V DC5V
( Lighting )			
	AC100V,Max300W	Light , 2	AC100V , 150W × 2
( Quantitative echo sounder )			
	AC100V	Cooling fan, 2	AC100V, 9.5W × 2
	AC ± 55V	TX	DC ± 75V,360 <sup>*1</sup> (100 <sup>*2</sup> )W
	AC ± 16V	Analogue circuits	DC ± 15V, 98W
		Digital circuits	DC ± 12V, 12W
	AC8V	Analogue circuits	DC5V, 24W
		Digital circuits	DC5V, 28W

\*<sup>1</sup> Maximum\*<sup>2</sup> R.M.S.

図 3 製作した電力供給部

内のトランスの定格ぎりぎりとなった。

船上部については、J-QUEST分の電力のバックアップに加えて、日本から持ち込むPCおよび周辺機器にもバックアップを行う目的で、大容量の2kVAの常時インバータ給電方式を採用した。このため、船電源変換用トランス（定格容量2000VA）と、船上部からJ-QUESTへの給電用トランス（定格容量1440VA）の2個を装備した。

### 3.2 長距離信号ケーブルおよび支援機器

船間での移設を考慮しながら、長距離の信号ケーブルを使用するに当たり、必要な条件としては以下の3つがあげられる。信号の劣化が少ないこと、潮流の影響を極力少なくするとともに、人力で揚収可能とするために、できるだけ細くて軽いケーブルであること、ケーブル両端をコネクタ接続とし、J-QUESTや船上機器と簡単に分離できること、である。

表2 ケーブルの構造と特性

線心	Power lines	Ground line	Optical fiber
Number of lines	2	1	6
Material	Aluminum alloy	Tinning copper	SiO <sub>2</sub>
Nominal cross section (mm <sup>2</sup> )	3.4	0.5	-
Type of optical fibers	-	-	SM 10/125
Structure (lines/diameter in mm)	35/0.35	20/0.18	-
Diameter of each line (mm)	Approx.2.7	Approx.0.93	Approx.0.9
Insulator thickness (mm)	0.6	0.2	-
Material of optical fiber jacket	-	-	Nylon12
Thickness of jacket (mm)	-	-	Approx.0.7
Thickness of internal sheath (mm)	-	1.0	-
Materials of tension member	-	Nylon coating Kevlar fibers	-
Thickness of outer sheath (mm)	-	1.5	-
Diameter of cable (mm)	-	Standard 15.0, Maximum 15.5	-
Cable weight per length (g/m)	-	Approx.180	-
Specific gravity of cable	-	1.00-1.50	-
Breaking stress (N)	-	> 3920	-
Voltage for cable test (V)	1000	-	-
Maximum resistance of conductors (20 ) ( /km)	9.74	39.4	-
Minimum resistance of insulation (20 ) (M -km)	1500	1500	-
Optical loss (dB/km) @ air	-	-	< 5
Optical loss (dB/km) @ 30kgf/cm <sup>2</sup>	-	-	< 10



図4 製作した光電力複合ケーブル  
両端コネクタ接続となっている。



図6 製作した軽量滑車。下側の部品は、舷側固定用ジグ。使用するケーブルを半円形状に配置したローラー上（写真では、ローラーを固定するボルト・ナットのみが見える）に通し、使用する。軽量滑車を吊して使用する場合には、下の支持部を外し、最上部の六角ボルトを使い、コデベルを固定し使用する。



図5 試作したケーブルストッカー（180（横）×90（奥行き）×110（高さ），単位cm）

そこで、大深度対応のRemotely Operated Vehicle (ROV) で使用される光電力複合ケーブルを使用することとした。本ケーブルの構造と特性を表2に、ケーブル本体を図4に示す。

さらに、支援機器として、ケーブルストッカー（図5）を製作し、8の字収納により、キンクしないようにして、ケーブルを簡単に繰り出せるようにした。光ケーブルのため、曲率をなるべく大きく取れるように、大口径（直径600mm）の軽量滑車（図6）を製作（ステンレス製、重量22kg）し、ケーブルが舷側を簡単にかかわるようにした。また、この滑車は、舷側固定あるいは吊り下げても使用が可能となるように設計した。

### 3.3 姿勢，深度，水温センサー

送受波器の揺れにより，TSやSVの推定に大きな誤差が生じることが知られている<sup>8),9)</sup>。そこで，耐圧容器に姿勢センサーを取り付けた。姿勢センサー出力は，耐圧容器内の計量魚探機本体内でエコーデータとともに，各ピング毎に記録される。主要な姿勢センサーの諸元を表3に示す。応答周波数が0.5Hzということから，揺れの周期が2秒以上の場合に対応可能である。図7に姿勢センサーを，また，図8にメーカー（株式会社カイジョーソニック）における深度センサーの較正結果を示す。

### 3.4 オンラインモニタリング

計量魚探機のオンラインモニタリング可能とするために，計量魚探機本体と制御用PCとの間をイーサネット接続によ

表3 姿勢センサー内で使用されている角度センサーの諸元

Dynamic range(degree)	± 60°
Range (degree), Precision	0° ~ ± 10° ± 0.1° ± 10° ~ ± 45° ± 1% ± 45° ~ ± 55° ± 1 ~ 2% ± 55° ~ ± 60° ± 2 ~ 3%
Resolution(degree)	0.001
Frequency response @-3dB (Hz)	0.5



図7 姿勢センサー

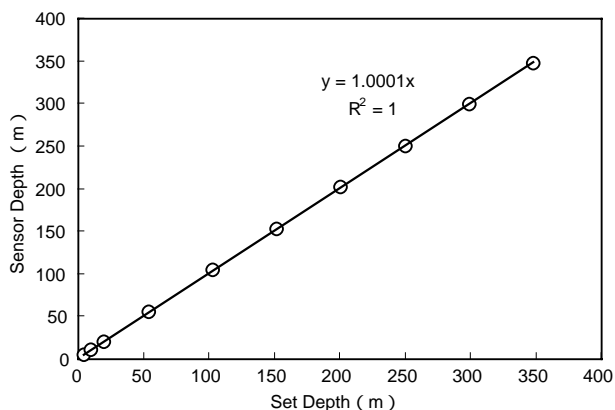


図8 深度センサーの較正結果

り使用可能なKFC-5000（株式会社カイジョーソニック）に変更し，周波数70kHzで使用可能とした。これに伴い，アナログ部の内部基板および，基板を納めるシャーシ（耐圧容器内収納用）の製作が新たに必要となったが，音響関連の制御，データ通信は，イーサネット経由で可能となった。

なるべく細いケーブルを使用し，かつ信号の劣化を防ぐ必要があるため，光ケーブルを採用した。陸上側，耐圧容器内部の両方にイーサネット信号の電気 - 光変換部を新設することにより，細いケーブルを使用しても長距離でのオンラインモニタリングが可能とした。また，外部トリガー動作の信号についても，その信号に相当するTTL信号対応の電気 - 光変換部の新設により可能となった。

映像信号についても，ビデオ信号に対応した，電気 - 光変換部を陸上側と耐圧容器側に新設することにより，オンラインモニタリングが可能とした。

必要な光ファイバーの心線数については，音響側では，イーサネット信号2本（双方向），外部トリガー信号2本（入力/出力トリガー用）で計4本必要である。映像信号側では，ビデオカメラ2台分およびフレームカウンタ + 照明制御用で，計3本の信号線が必要となる。これらの要求をすべて満たすには，光ファイバーの心線が全部で7本必要となる。今回は，外部トリガー信号については，入力トリガー動作のみ可能とすることにし，計6本でまかなうこととした。図9に製作した，船上での光 - 電気変換部を，図10に耐圧容器内の光 - 電気変換部を示す。



図9 光 - 電気変換部（船上）



図10 光 - 電気変換部（耐圧容器内）

### 3.5 送受波器の音響ビーム幅拡大

#### 1) 実現可能な音響ビーム幅

図11に示すような148個の素子からなるアレイ構造の送受波器<sup>4), 10)</sup>を用いる。この場合、送波あるいは受波する素子の組み合わせを変えることにより、実現可能な音響ビーム幅の組み合わせが5通りできる。この組み合わせについて検討を行った。以後、アレイの直径を、波長を  $\lambda$  として表す。例えば、全素子を使用した場合のアレイの直径は  $7\lambda$  である。

A) 送受とも  $7\lambda$  ( $7\lambda$  送信,  $7\lambda$  受信, 現状のナロービーム)

B) 送受とも  $5\lambda$  ( $5\lambda$  送信,  $5\lambda$  受信, 位相ビーム送受信)

C) 送受とも  $3\lambda$  ( $3\lambda$  送信,  $3\lambda$  受信, ワイドビーム送受信)

D) 複合ビーム ( $7+3$ ), 送信が  $7\lambda$ , 受信が  $3\lambda$

E) 複合ビーム ( $5+3$ ), 送信が  $5\lambda$ , 受信が  $3\lambda$

この中でA), D), およびB), E) は同時に実現できる。現状よりもビーム幅を広げる方法としては、B) ~ E) の4通りある。そこで、それぞれのビームについて、ビームパターンの計算を行った。その結果を図12に示す。

図12より、ビーム幅は、送受信ともグループ1 (図11参照)のみを使用する  $3\lambda$  タイプが一番広い。  $5\lambda$  タイプと複合ビーム ( $7+3$ ) タイプはほぼ同じであるが、  $5\lambda$  タイプの方が若干広いビームとなる。

ビームが一番広がる  $3\lambda$  タイプとすると、素子数が少ないことや、素子配列からみても指向性は円形振動子のものからずれる可能性が大きい。素子数が少ないことから、ソースレベルが小さくなり、信号対雑音比も悪くなる。また、ビーム幅が極端に広がることから、魚群の密度によっては、単体からのエコーが混じった群体エコーとなり、単体検出ができず、正確なTS測定ができないおそれがある。

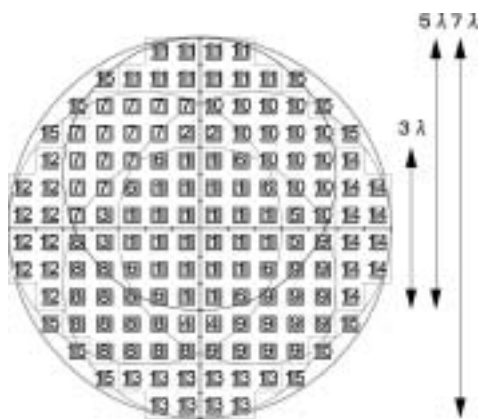


図11 送受波器の素子構成。図中で  $\lambda$  は波長を示す。図中の四角は素子を示し、素子につけた数はグループの番号を示す。送受波器内の4つの円は位相ビームを構成する素子グループの組み合わせを示す。例えば、上側の円内 (Foreビーム) は、素子のグループ1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11から構成される。

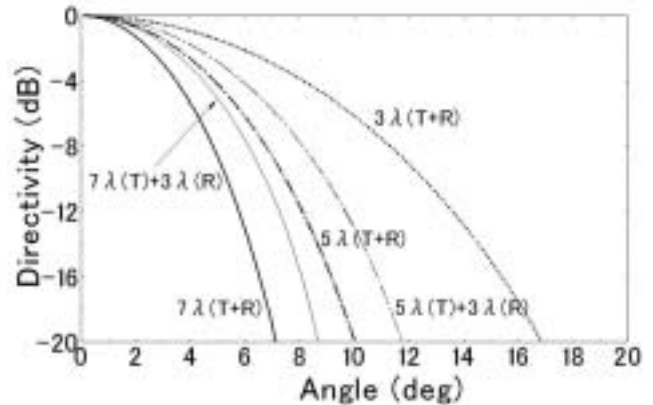


図12 指向性の計算結果。左から、  $7\lambda$  で送受した場合、  $7\lambda$  で送波、  $3\lambda$  で受波した場合 (Composite ( $7+3$ ) タイプ)、  $5\lambda$  で送受した場合、  $5\lambda$  で送波、  $3\lambda$  で受波した場合 (Composite ( $5+3$ ) タイプ)、  $3\lambda$  で送受した場合、の指向性を示す。

一方、複合ビームタイプあるいは  $5\lambda$  タイプであれば、  $7\lambda$  タイプよりもビーム幅が広がる。ソースレベルは  $3\lambda$  タイプほど落ちない。また、単体エコーのレベルを推定するレベルビームの指向性と位置を推定するための位相ビームの指向性がほぼ同じか全く同じとなる。

通常、スプリットビーム法を用いた計量魚探機の単体エコー検出処理を、指向性が位相ビームのものより狭いレベルビームで得られた信号についてしか行っていない。このため、位相ビームでは、群体エコーの可能性もある場合でも、レベルビームでは単体エコーとされる場合がある。このような場合、実際には群体エコーから得られる位相差より指向性補正量を計算するため、その補正量に大きな誤差を生じることになる<sup>11)</sup>。レベルビームと位相ビームの指向性を揃えることができれば、レベルビームの信号について行う単体エコー検出アルゴリズムの中で、群体エコーの除去が可能となる。これにより、TS推定精度の向上が期待できる。さらに、複合ビーム ( $7+3$ ) タイプに比べてビーム幅の広い複合ビーム ( $5+3$ ) タイプのエコーデータも使用可能となる。

以上より、  $5\lambda$  送信タイプの送受波器を第一候補として、具体的な信号対雑音比の検討を行うこととする。まず、信号対雑音比の検討を行う際に必要となる、ハダカイワシのTSについて検討した。

#### 2) ハダカイワシの音響特性の検討

本研究で使用する送受波器のビーム幅を広げるに当たり、信号対雑音比 (SNR) の計算に必要な、魚の音響的な特性を知っておく必要がある。

ここでは、日本近海にも多く分布し、明確な昼夜鉛直移動を行い、鰾のあるトドハダカ (*Diaphus theta*) について検討する。Yasuma *et al.*<sup>12)</sup> は、中層トロールやIKMTによって得られたトドハダカのうち、良好なサンプルについて冷凍保存し、軟X線により、その鰾を観察した。その結果、トドハダカについては、体長と鰾長には相対成長は成り立たず、体長

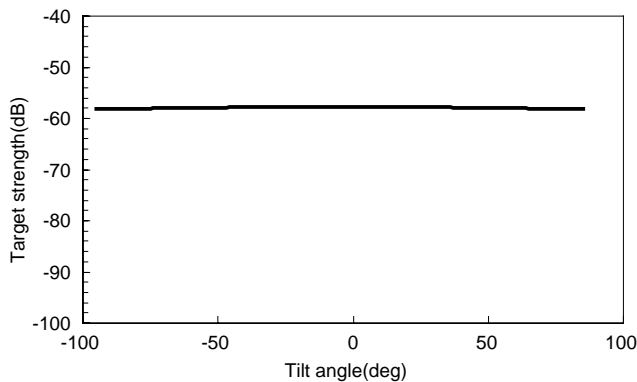


図13 トドハダカ TSパターン計算結果

が大きくなるにつれて、相対的な鰭長は小さくなるということがわかった。

計量魚探機の設計のためには、TSの最小値を考慮すればよい。ここでは、TSパターン内の最大TSが一番小さくなるのが期待される、鰭の長さが一番短いものについて計算する。そこで、Yasuma *et al.* のTable 2のサンプル番号21（標準体長31.6mm、長軸方向の鰭長2.4mm、短軸方向の鰭長1.8mm、体軸と鰭の長軸方向との角度6°）について、周波数70kHzの場合について、回転楕円体理論モデル<sup>13)</sup>によりTSのパターンを計算した。この計算では海水の音速1522m/sを使用した。その結果を図13に示す。

図13より、TSパターンはかなりブロードであり、その最小TS値はほぼ -60dBである。そこで、トドハダカを調査対象とする場合には、TS = -60dBを計量魚探機の設計パラメータとして使用して問題ないことがわかった。

### 3) 信号対雑音比の検討

送受波器の音響ビーム幅を広げるためには、送受波の径を狭くする必要がある。この場合には、ソースレベルが落ちることが予想される。そこで、周波数70kHzについて、従来の直径7タイプ（直径が波長の7倍）と先に候補にあげた5タイプについて、Furusawa<sup>14)</sup>による計量魚探機の設計方法に基づき信号対雑音比の計算を行った。計算に必要なパラメータのうち、ターゲットストレンクスについては、これまでの検討結果より、TS = -60dBを目標とした。その他必要なパラメータの多くは、Furusawa<sup>14)</sup>によった。以下に使用したパラメータと計算方法の概要を示す。

海水の密度  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ 、海水の音速  $c = 1500 \text{ m/s}$ 、水の抗張力  $T = 2 \text{ atm}$ 、送受波器の深度  $d = 1 \text{ m}$

ターゲットストレンクス  $TS = -60 \text{ dB}$

システムの帯域幅  $f = 2.5 \text{ kHz}$

パルス幅  $\tau = 0.6 \text{ ms}$

半径  $a$  の送受波器にキャピテーション限界 ( $l_c$ ) までパワ

ーを投入した場合に得られるソースレベル ( $S_{NF}$ ) は、基準距離  $r_0 = 1 \text{ m}$  として、距離  $r$  (m) では、

$$l_c = 1.7 (\text{ms})^{-0.22} 10^{0.116 f (\text{kHz}) + 3} [1 + d/10 + \pi (\text{atm})] \quad (1)$$

$$S_{NF} = 8^{-4} f^4 l_c D^4 a^6 r_0^2 \text{ep}\alpha (-4r) T_s (c^3 N_p^2 f^4) \quad (2)$$

と表される<sup>b</sup>。設計のためには、 $l_c$  が最も小さくなる、一番浅い送受波器深度を考慮すればよい。

一方、雑音レベルは、西村の経験式より

$$NP = NP_0 - 18 \log ( \text{dB re: } 1 \mu\text{Pa/Hz}^{1/2} ) \quad (3)$$

$$NP_0 = 14 \zeta (\text{dB})$$

と表される。ここで、 $NP_0$  は、ノイズのスペクトラムレベルを示し、220トンの鋼船が11ktで航走している時に得られたものである。今回は、停船した状態での計測となるため、 $NP_0$  は高めの値を使用していることになるが、設計段階なので厳しい条件で検討を行う。信号対雑音比 (Signal to noise ratio, SNR) は、(1)、(2)、(3) 式を用いて、

$$\text{SNR} = 10 \log S_{NF} - NP \quad (4)$$

により表すことができる。そこで、ハダカイワシの  $TS = -60 \text{ dB}$  として、距離とSNRの関係を(4)式により求めた。

送受波器直径が5タイプ、7タイプの送受波器を用いた場合について、魚までの距離を変化させた時の信号対雑音比の計算結果を図14に示す。

図14より、カメラと同じ距離で測定可能な10m程度までの近距離について、ビームの半減半角内で47dB以上の信号対雑音比が期待できる。また、信号対雑音比がほぼ20dBとなる距離は48mであり、カメラで観察できない範囲の魚のTSについても精確に測定可能である。

以上の検討より、5タイプの送受波器とした場合に、信号対雑音比に関しても問題がないことが示された。

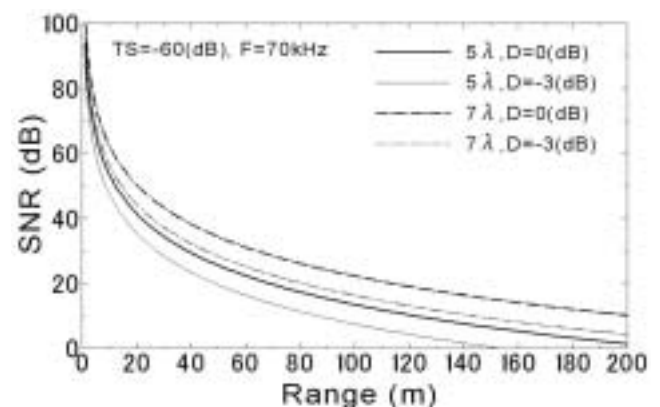


図14 TSが -60dBのターゲットについて、距離 (Range) に対する信号対雑音比 (SNR) の計算結果。図中のDは指向性を表し、D = 0 dBはビーム中心での信号対雑音比、同 -3 dBは、ビームの半減半角での信号対雑音比を意味する。点線は直径7タイプ、実線は5タイプ

<sup>b</sup> (2) 式中の  $\alpha$  は吸収減衰係数を示し、単位は (Np/m)。参考文献 [14] 中では  $\alpha$  を使用している。本報告では、(dB/m) と区別するため  $\alpha$  を使用した。(dB/m) = 8.686 (Np/m) の関係がある。



3.6 交換レンズ

別報で述べる検討結果に基づき、画角を約 1 / 2 倍にする交換レンズを装着できるようにした。

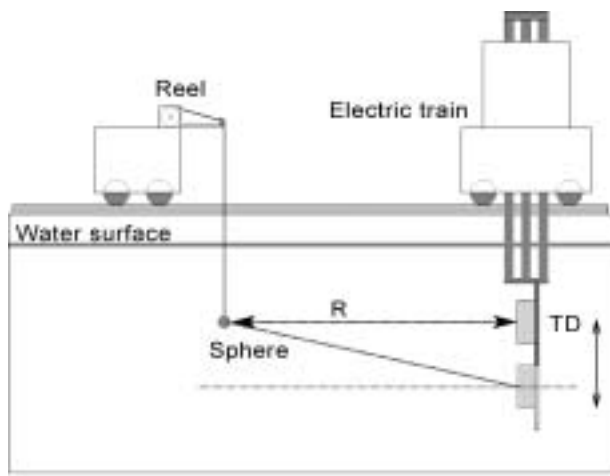
3.7 水中照明

別報で述べる検討結果に基づき、ハロゲン照明を 2 基追加し、フレームに装備可能とした。このときに、方向をある程度自由に変更できるような固定金具とした。

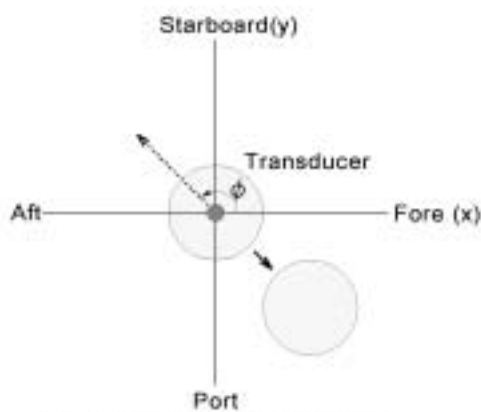
4 水槽実験結果

4.1 送受信係数測定

水産工学研究所の大型水槽（長さ15m×幅10m×深さ10m、淡水）において、図15に示すように、電動台車に送受波器を横向きに設置した。この送受波器の向かいに標準球（直径38.1mmタングステンカーバイド球、 $TS = -40.84\text{dB}$ 、水温15.0、深度3m）を吊し、送受信係数  $TR$  の測定を行った。



(a) Side view of an indoor tank.



(b) Side view from sphere side.

図15 送受信係数および指向性測定のセットアップ。

- (a) 横から見た室内水槽
- (b) 送受波器の移動と標準球の相対的に見た移動方向

表4 水温，吸収減衰係数，音速，標準球TS

	22, May, 2003	2, July, 2003
Frequency(kHz)	70	70
Water temperature( )	13.1 <sup>*1</sup>	15.0
Depth(m)	3	3
Salinity(PSU)	0	0
Absorption coefficient (dB/km)	1.36	1.27
Sound speed(m/s)	1459.12	1465.93
Sphere TS(dB)	- 40.72	- 40.84

<sup>\*1</sup> Measured in 5, June, 2003

$TR$ は、標準球までの距離  $R$  (m)，吸収減衰係数を (dB/m)，エコー電圧のデシベル値であるエコーレベルを  $EL$ ，送受の指向性を  $D_T, D_R$  とすると，

$$TR = EL + 40 \log R + 2 R - D_T - D_R - TS \quad (5)$$

により求めることができる。

較正に必要な，吸収減衰係数，音速は，それぞれ，Francois and Garrisonの式<sup>15)</sup>，Mackenzieの式<sup>16)</sup>より求めた。表4に，水温，吸収減衰係数，音速，標準球  $TS$  をまとめた。

100ピングの送受信データについて，(5)式より，直径5で送受信するナロービーム，および，直径5で送信，3で受信の複合ビームについて送受信係数を計算した。その結果，ナロービームの送受信係数 ( $TR_n$ ) は  $61.50\text{dB} (\pm 0.15\text{dB})$ ，複合ビームの送受信係数 ( $TR_w$ ) は  $61.65\text{dB} (\pm 0.05\text{dB})$  となった。

4.2 指向性測定

較正に引き続き，図15(a)のセットアップの状態では指向性の測定を行った。図15(b)に示すように，送受波器中心を原点に取り，Fore方向をx軸，Starboard方向をy軸，ターゲットの方向をz軸にとった。標準球は吊したまま固定した。送受波器を黒矢印で示した方向に動かすと，相対的には，標準球が送受波器に対して点線で示した方向に移動したことになる。これは，電動台車の横行方向 (x方向)，昇降方向 (y方向) に動かすことにより，送受波器と標準球の相対的な位置関係が機械的にわかることを意味する。(5)式において，ナロービームでは，送波，受波の指向性  $D_T, D_R$  がいずれもナロービームの指向性 ( $DN$ ) となり，複合ビームでは，それぞれナロービームの指向性 ( $DN$ )，ワイドビームの指向性 ( $DW$ ) となる。以上より，機械的に得た位置とエコーレベル，標準球のTS，標準球までの距離を使い，(5)式より，ナロービーム信号から  $2DN$ ，複合ビーム信号から  $DN + DW$  が計算できる。これらの値から  $DN, DW$  が求まる。

送受波器を横断する角度が  $0^\circ, 45^\circ, 225^\circ$  方向の測定 (2003年5月22日実施) では，送受波器から標準球までの距離は4.3mとした。また，近距離での使用を想定し， $= 180^\circ$  方向での測定 (2003年7月2日実施) では，送受波器から標準球までの距離は3.2mにとった。較正で行った手順と同じようにして音速を計算し，各角度100回の送受信データについて解析を行った。

その結果を図16に示す。図16で  $DN$  は直径5の位相ビー

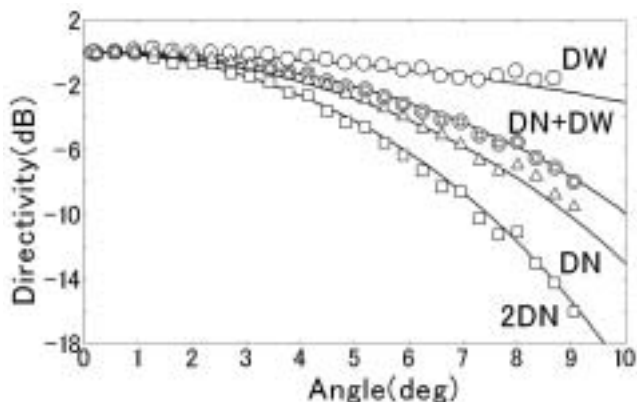
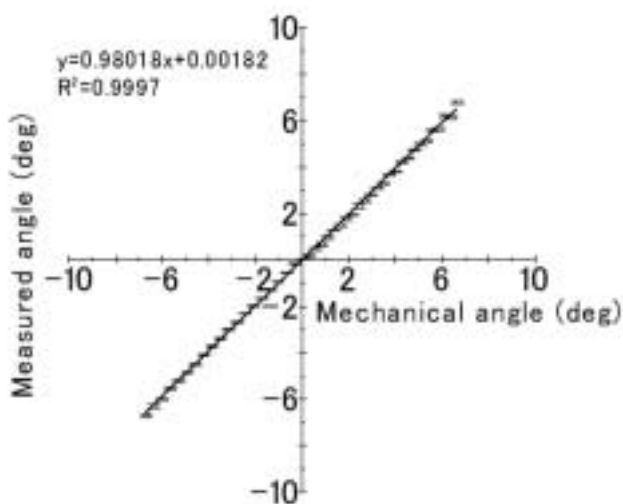
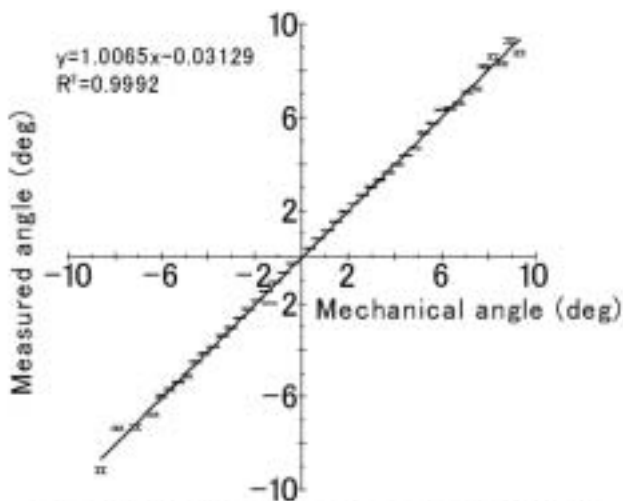


図16 180°方向の指向性測定結果



(a) Transverse direction of 0-180 degree



(b) Transverse direction of 45-225 degree

図17 各横断面での位置測定精度  
(a) 0 - 180°方向 (b) 45 - 225°方向

ム (Fore方向)の指向性測定結果を、 $DM$ は直径3 のワイドビームの測定結果をそれぞれ示す。実線は、同じ直径をもつ円形ピストン送受波器の計算値を示す。

4.3 音響による位置推定

指向性測定で得られたデータについて、機械的に得た位置とスプリットビーム法により音響的に得られた位置とを比較することにより、位置の推定精度を測定することができる。このときに、 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = 180^\circ$ での測定は、送受波器の横断面の指向性となり、これを合わせて0-180°方向の測定と表示する。また、同様に $\theta = 45^\circ$ と $\theta = 225^\circ$ での測定は、45 - 225°方向の測定と表示する。

図17に得られた結果を示す。送受波器の各横断面方向での直線性は以下の通りとなった。

0 - 180°方向の直線性 ( - 6.7° ~ 6.6° )

$$y = 0.98018x + 0.00182 \quad (r^2 = 0.9997)$$

45-225°方向の直線性 ( - 8.6° ~ 9.3° )

$$y = 1.0065x - 0.03129 \quad (r^2 = 0.9992)$$

図17より、標準球の横断面  $\theta = 0 - 180^\circ$ の方の測定可能な角度範囲が45 - 225°より狭くなっていることがわかる。これは、送受波器の中心から見た標準球の角度1度あたりのFore-Aftビーム間の位相差の変化量が、0 - 180°方向では、45 - 225°方向より大きいことによる。スプリットビーム方式では、この変化量が、 $-1/2 \sim 1/2$ の範囲内でないと位置の計算ができないため、 $\theta = 0 - 180^\circ$ 方向では、測定範囲の限界が $\theta = 45 - 225^\circ$ 方向に比べて早くくる。しかしながら、主要な測定範囲である - 6° から 6°の範囲に限れば、標準偏差も小さく、いずれも精度良く測定ができていことがわかる。

まとめ

本研究の主な結果を以下にまとめる。

- 1) 300mの光電力複合ケーブルの採用により、音響・ビデオ信号を高い信号対雑音比により、船上に伝えることを可能とした。
- 2) 滑車、ケーブルストッカーなどの支援機器の製作により、J-QUEST運用の簡便化をはかった。
- 3) 計量魚探機をKFC-5000 (株)カイジョーソニック)と置き換え、イーサネットによるオンライン化を可能とした。
- 4) 調査対象である、ハダカイワシのTSを考慮した信号対雑音比の計算を行い、問題がないことを確認した上で、70kHz送受波器のForeビーム部の送信、受信により、音響ビーム幅を広げた。指向性の計算結果は測定結果とよく一致した。
- 5) ビデオカメラの焦点付近である距離3.2mで標準球の位置測定を行い、指向性の半減半角 $\pm 6^\circ$ の間で正確に推定可能であることを示した。
- 6) 交換レンズを用いて、光学的な視野を広げ、音響部分とオーバーラップする部分を増やした。
- 7) 水中照明を取り付け、夜間の深海でもビデオ撮影ができ

るようにした。

#### おわりに

これから海上実験を行い、ハダカイワシ対象としたJ-QUESTの性能評価を行う予定である。また、性能評価後は実際の調査でもJ-QUESTをより簡便に使用可能にしていく必要がある。このためには、一層の小型化を進めて行き、支援機器がなくても使用可能になるようにしていく必要がある。たとえば、ステレオカメラ部分のみ大幅な小型化を行い、小型の短パルスレーザーとゲート機能付き光電子増倍管 + CCDカメラと組み合わせ、2次元画像を記録する方法なども考えられる。

耐圧容器内で、消費電力が大きいのは、照明、音響送信である。今後、照明をLED化する、近距離での測定に特化させ、送信電力を下げる、などの工夫により電力の消費を押さえることにより耐圧容器内のトランスを小さくすることも可能である。

データ通信に関して、今回6本の光ファイバを使用し、異なるデータの通信を行った。1本の光ファイバで双方向光送受信が可能な安価で高速なメディアコンバータも出現しており、将来的には、複数の信号をデジタル化して一本の光ファイバで双方向通信することも考えられる。

#### 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「ダイナミックな鉛直運動を行う魚類のターゲットストレンジスと生物学的情報の測定手法」により行われたものであり、関係諸氏に感謝する次第である。また、ワシントン大学のJ.K.Horne博士には、英文の校閲を賜った。ここに記し、厚く感謝する。

#### 参考文献

- 1) Gj saeter J. and K.Kawaguchi : , A review of the world resources of mesopelagic fish. Rome:FAO, *FAO Fish. Tech. Pap.*, **193**, pp1-151 (1980).
- 2) 高尾芳三 : スケトウダラの音響資源調査, 月刊海洋, 26, 660-665 (1994).
- 3) Sawada K., M.Furusawa, and N.J.Williamson : Conditions for the precise measurement of fish target strength in situ. *Mar. Acoust. Soc. Jpn.*, **20**, 15-21 (1993).
- 4) 農林水産省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.1-95 (2001).
- 5) 高橋秀行, 澤田浩一, 高尾芳三, 安部幸樹, 町田憲司, 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 - 光学システムの開発 -, 水工研技報, **26**, 35-45 (2004).
- 6) Butler V.E., and W.G. Pearcy : Swimbladder morphology and specific gravity of myctophids off Oregon. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **29**, 1145-1150 (1972).
- 7) Watanabe H., M.Moku, K.Kawaguchi, K.Ishimaru, and A. Ohno : Diel vertical migration of myctophid fishes (Family Myctophidae) in the transitional waters of the western North Pacific, *Fish. Oceanogr.*, **8:2**, 115-127 (1999).
- 8) Stanton T.K. : Effects of transducer motion on echo-integration techniques, *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**, 947-949 (1982).
- 9) Furusawa M. and K. Sawada : Effects of transducer motion error on quantifying single fish echoes, *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, 857-864 (1991).
- 10) 古澤昌彦, 澤田浩一, 有路実, 山谷恭三, 倉都健治 : 計量魚探機用複合ビーム送受波器の開発, 海洋音響学会平成6年度研究発表会講演論文集, 63-66 (1994).
- 11) 古澤昌彦, 澤田浩一 : スプリットビーム方式における側角誤差, 日本音響学会講演論文集, 855-836 (1991).
- 12) Yasuma H., K.Sawada, T.Ohshima, K.Miyashita, and I. Aoki : Target strength of mesopelagic lanternfishes (family Myctophidae) based on swimbladder morphology, *ICES J. Mar. Sci.*, **60**, 584-591 (2003).
- 13) Furusawa M. : Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength, *J. acoust. Soc. Jpn.* (E)**9**, 13 - 24 (1988).
- 14) Furusawa M. : Designing quantitative echo sounders, *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**, 26-36 (1991).
- 15) Francois R.E. and G.R. Garrison : Sound absorption based on ocean measurements. Part 1 : boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 1879-1890 (1982).
- 16) Mackenzie K.V. : Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J. Acoust. Soc. Am.* **70**, 807-812 (1981).