

## 超音波と画像処理技術を使用した河川を遡上する 鮎等の小型魚計数技術の研究

A study on counting technology of small anadromous fish such as  
sweetfish by using ultrasonic and image processing technologies

高木陽市\*, 米丘孝幸\*, 山本重雄\*\*,  
後藤繁文\*\*, 原稔明\*\*\*, 自閑茂治\*\*\*\*,  
寺菌勝二\*\*\*\*\*, 斉藤健\*\*\*\*\*, 森英雄\*\*\*\*\*

\* 日立プロセスコンピュータエンジニアリング(株) / 〒319-1293 茨城県日立市大みか町 5-2-1

\*\* 本多電子(株) / 〒441-3193 愛知県豊橋市大岩町小山塚 20

\*\*\* 水資源開発公団 試験研究所 / 〒338-0812 埼玉県浦和市大字神田 936 番地

\*\*\*\* 水資源開発公団 第一工務部 / 〒107-8488 東京都港区赤坂 5-3-3

\*\*\*\*\* (株) 建設技術研究所 (元ダム水源地環境整備センター理事) / 〒103-8430 東京都中央区日本橋本町 4-9-11

\*\*\*\*\* (株) 日立製作所 / 〒101-8010 東京都千代田区神田駿河台四丁目 6 番

\*\*\*\*\* 山梨大学電気電子システム工学科 / 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11

Yoichi Takagi\*, Takayuki Yoneoka\*, Shigeo Yamamoto\*\*,  
Shigefumi Goto\*\*, Toshiaki Hara\*\*\*, Shigeharu Jikan\*\*\*\*,  
Katsuji Terasono\*\*\*\*\*, Takeshi Saito\*\*\*\*\*, Hideo Mori\*\*\*\*\*

\* Hitachi Process Computer Engineering, Inc. / 5-2-1, Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1293, Japan

\*\* Honda Electronics, Inc. / Oyamazuka-20, Oiwa-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-3193, Japan

\*\*\* Water Resources Development Public Corporation . / 936, Kanda, Urawa-shi, Saitama, 338-0812, Japan

\*\*\*\* Water Resources Development Public Corporation . / 5-3-3, Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107-8488, Japan

\*\*\*\*\* 5 Kensetsu Gijutsu Kenkyusyo. / 4-9-11, Nihonbashi Honcho, Chuo-ku, Tokyo, 103-8430, Japan

\*\*\*\*\* Hitachi, Ltd. / 6, Kanda Surugadai 4-chome, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8010, Japan

\*\*\*\*\* Sciences, Univ. of Yamanashi 4-3-11, Takeda, Kofu-shi, Yamanashi, 400-8511, Japan

### Abstract

There has been much R/D on the counting technology of large anadromous fish such as salmon and trout, but no R/D on the counting technology of small anadromous fish such as sweetfish has been reported. We conducted a R/D study of an automatic counting technology of small anadromous fish by using ultrasonic and image processing technologies. Because we use ultrasonic waves, the counting method has various advantages in that fish can be counted even at night or when the river becomes muddy. In addition, this method has no influence on fish. In this report, we describe the characteristics of ultrasonic waves generated from the experimental equipment, the creation of ultrasonic images, and analysis processing of ultrasonic images. In this evaluation experiment, the measurement ratio using the experimental equipment was approx. 70% for the actual number of sweetfish that swam up the river.

**Key Words** : fish counter, ultrasonic, image processing

## 1 はじめに

河川の魚道を遡上する魚の計数作業は河川における漁業資源を把握し管理するために必要である。鮎や鱒のような大型魚については、光や電気抵抗の変化等各種の方式が開発され実用化されているが、鮎のような小型魚の遡上数を計数する技術は、大型魚に比べ難しく、実用化された例は報告されていない。鮎の遡上数については、従来、人手による計数が実施されており、自動計測技術の開発が強く要請されていた。筆者等は超音波と画像処理を使用して鮎の遡上数を計測する技術の研究を行ったので以下報告する。

## 2 実験装置

### 2.1 概要

実験装置の概要を Fig.1 に示す。

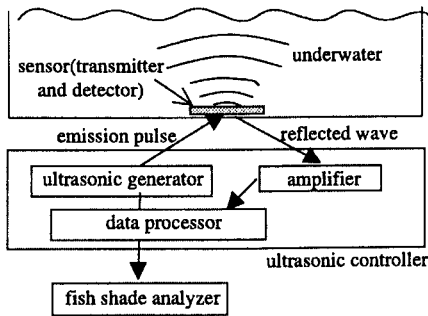


Fig.1 Configuration of fish counting experimental equipment

〈実験装置の概略仕様〉

超音波周波数 1MHz

発射サイクル 1/240 秒に 1 回パルスを発射

データの採取 パルス 4 回分 (1/60 秒) のデータを超音波画像の 1 ラインに格納した。1 回でも反射波を受信時、センサの値をオンとする

超音波センサ 直径 10mm の振動板を使い、128 個を縦に 7mm 間隔に並べた

画像処理 画像専用プロセッサを使用し、176 ラインのデータを約 3 秒以内で処理する

### 2.2 超音波による魚検知の原理

超音波による魚検知の原理を Fig.2 に示す。超音

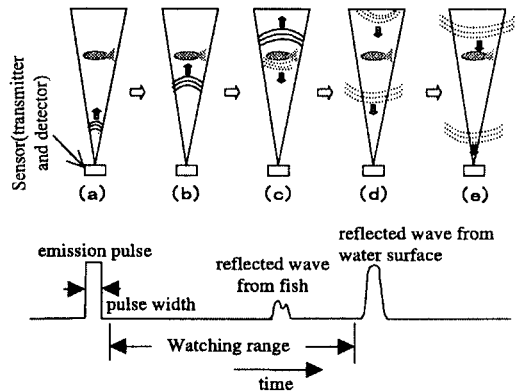


Fig.2 Theory of fish detection by an ultrasonic wave

波センサ部は送波器と受信器を兼用させる構造とした。送波器は水中に対して超音波のパルスを発射する。センサの前方に魚が通過中であれば、超音波の一部は魚に反射され、一部はそのまま通過し直進する。魚からの反射波は受信器で受信される。一方、直進した音波は、反対側の壁に当たって反射される。反射波は受信器に到達するが、魚からの反射波とは時間差があり識別できる。水中の音波は夜間や水の濁水時にも効果が変わらない点優れている。鮎のような小型魚が隣接して遡上するのを計数する場合には、超音波センサを一列に並べる必要がある。今回の実験装置の超音波センサ部の外観と設置状態を Fig.3 に示す。本実験ではセンサを魚道の側壁に取り付け、128 個の超音波センサを上下方向に 7mm ピッチに等間隔に並べた。これによりセンサの前方を通過する複数の魚を分離して計数するための情報を得ることが可能となった。超音波センサの設置密度は大きい程小型魚の魚体を正確に決定できるが、センサの直径から制約される。超音波の指向性はセンサの直径が大きいほど鋭く計測には都合がよい。要求される

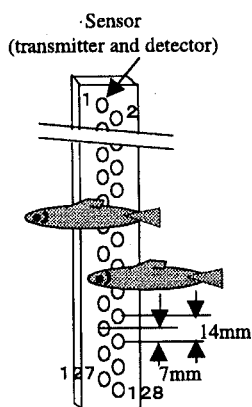


Fig.3 Ultrasonic sensor section

指向性を確保するため今回の実験ではセンサの直径を約10mmとした(詳細は後述する)。被計測対象の大きさからセンサ設置密度は最低魚高の約8mm以下とする必要があった。結局直径10mmのセンサを上下方向14mmピッチで2列千鳥に並べることにした。

### 2.3 超音波の特性の検討<sup>1)</sup>

#### 2.3.1 超音波の周波数

超音波の音源仕様は、対象物の大きさによって決まる。対象物の反射波を確実に得るためには、水中での超音波の波長が対象物の大きさに比較して十分小さいことが必要である。

Table1に被対象物(鮎)の概略の大きさを示す。魚

Table 1 Size of object(sweetfish) to be counted

length of a fish (mm)	height of a fish (mm)
50~300	8~50

高8mm程度を検知する必要があり、今回の実験では、超音波の波長1.5mm(周波数1MHz)で魚から反射波を良く受信できた。Table2に水中での超音波の周波数と波長の関係を示す。

Table 2 Wave length of ultrasonic wave in water

frequency(kHz)	Wave length(mm)
100	15.0
400	3.75
500	3.00
1000	1.5
2000	0.75

(velocity of ultrasonic wave in the underwater is 1500m/s)

#### 2.3.2 超音波センサーの大きさと軸上の音圧分布

超音波発生に用いる電気音響変換器は、Fig.4に示すように半径a、面積Sの円形平面の振動面をピストンのように全面同速度(V<sub>1</sub>)同位相で振動させて音波を放射するものとする。球面進行波の速度

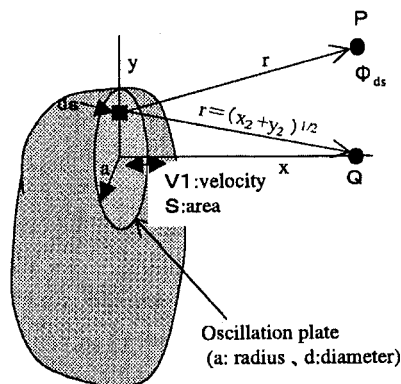


Fig.4 Ultrasonic sensor (electric sound conversion section)

ポテンシャルをΦと定義し、振動面の微小部分dSだけが速度V<sub>1</sub>で振動して、他の部分は静止しているものとする、dSによる点Pにおける音場ΦdSは次式から求まる。ここで、rを振動面上のdSから問題とする点までの距離とする。

$$\Phi_{ds} = (\dot{V}_1 / 2\pi \cdot e^{-jkr} / r) dS \quad (1)$$

ここに、k=波長定数、Φ、V<sub>1</sub>=複素数実効値である。

つぎに全体の面積Sにわたって積分する。

$$\Phi = \dot{V}_1 / 2\pi \int \int e^{-jkr} / rdS \quad (2)$$

任意の点 P における (2) 式の積分は、複雑であるので、積分の比較的容易な有用なケース（中心軸上の値）について計算する。距離が近くなると、振動面上の dS の位置による距離差がかえって大きくなり無視できなくなる。この場合、振動面を半径 a の円形として、

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \tag{3}$$

$$dS = 2\pi y dy \text{ (この } dS \text{ はドーナツ状)} \tag{4}$$

とおき、式 2 を  $y=0, a$  間で積分計算して

$$\dot{\Phi} = j\dot{V}_1(e^{-jkr_0} - e^{-jkx})/k \tag{5}$$

ここに、  $r_0 = (x^2 + a^2)^{1/2}$

従って、

$$\dot{P} = -\omega\rho\dot{V}_1\{\{\cos(kr_0) - \cos(kx)\} - J\{\sin(kr_0) - \sin(kx)\}\}/k \tag{6}$$

ここに、  $\omega$  = 超音波角速度、  
 $\rho$  = 水の密度

これを整理し絶対値を求めると

$$|\dot{P}| = \rho c |\dot{V}_1| |2 \sin(\pi(r_0 - x)/\lambda)| \tag{7}$$

ここに、  $c$  = 超音波伝達速度、 $\lambda$  = 波長  
式 (7) から、 $r_0 - x = n\lambda$  ( $n$ : 整数) すなわち中心からの距離と周辺からの距離の差が波長の整数倍になる位置では、音圧が 0 となる。

距離  $x$  がセンサ半径に比べて大きくなると式 (7) において、

$$\begin{aligned} \sin(\pi(r_0 - x)/\lambda) &\approx \pi((x^2 + a^2)^{1/2} - x)/\lambda \\ &\approx \pi x(1 + a^2/2x^2 - 1)/\lambda = \pi a^2/2\lambda x \end{aligned} \tag{8}$$

を代入すると遠距離での音圧の式が得られる。

$$|\dot{P}| = \rho c |\dot{V}_1| |\pi a^2/\lambda x = f\rho S |\dot{V}_1| / x \tag{9}$$

ここに、  $f$  = 超音波周波数。

中心からの距離  $r$  が振動板寸法より十分大きければ、面上のどの点からの距離もほとんど等しく、その距離差による位相差は無視できるので式 (2) は、簡単に計算されて

$$\dot{\Phi} = \dot{V}_1/2\pi \cdot e^{-jkr}/r \cdot S \tag{10}$$

$$\dot{P} = j\omega\rho\dot{\Phi} \tag{11}$$

$$|\dot{P}| = f\rho S/r \cdot |\dot{V}_1| \tag{12}$$

同様の結果が得られる。

式 (12) は、中心からの距離  $r$  が振動板寸法に比較し十分大きな時の音圧を示す。この場合、音圧の絶対値は、周波数、面積、速度に比例し、距離に反比例する。Fig. 5 は、超音波の周波数を 1 MHz とした場合、振動板直径を種々変えた場合の音圧の変化を示す。太線部は、今回適用した半径 5mm の場合の例である。半径  $r$  が小さいときには、近接部での不感帯（音圧のゼロとなる）に対しては、有利であるが、音圧の絶対値が小さく問題であることがわかる。

### 2.3.3 超音波センサの大きさと指向性

遠距離では、方向が中心からずれると式 (2) の積分において位相差が大きくなって積分された速度ポテンシャルは、中心軸方向より小さくなる。これが指向性を生ずる理由である。Fig. 6 に示すように中心軸から  $r$  の方向で中心から  $r_p$  である P 点の速度ポテンシャルを求める。座標系を Fig. 6 のようにと

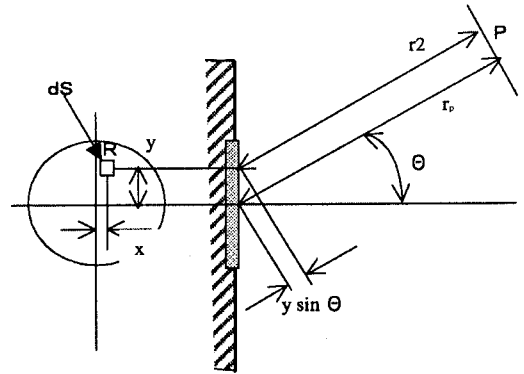


Fig.6 Figure for directivity calculation

る。振動面上の R 点 ( $x, y$ ) にある微少面  $dS$  から P 点までの距離は、

$$r_2 = r_p - y \sin \theta \tag{13}$$

であるから式 (2) は

$$\dot{\Phi}_{r_2} = \dot{V}_1 e^{-jkr_p} / 2\pi r_p \iint e^{jk y \sin \theta} dx dy \tag{14}$$

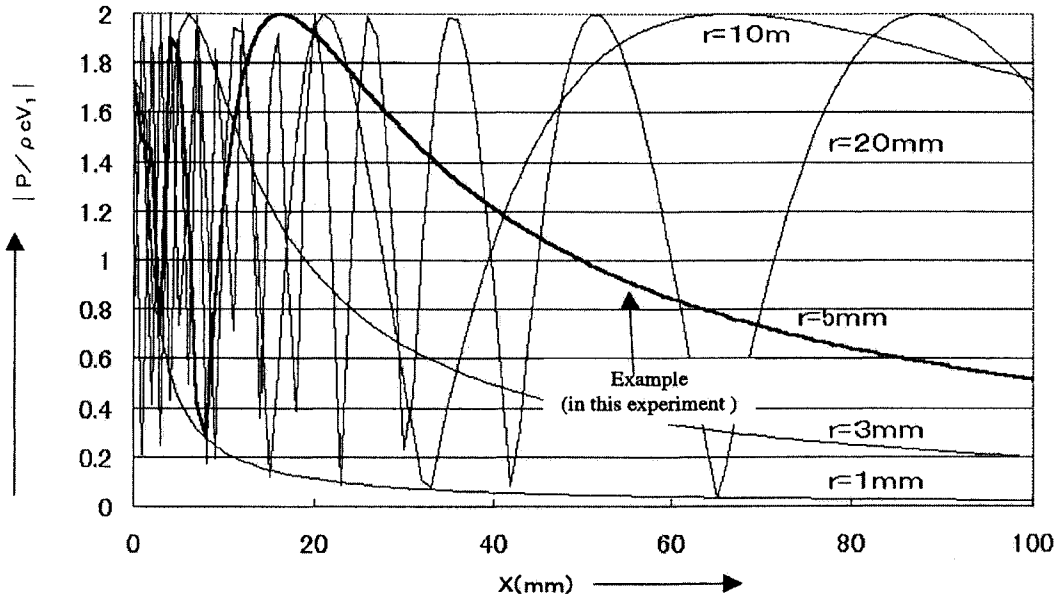


Fig.5 Sound pressure distribution on a center axis at the front side of a sensor (f=1MHz, in case of changing the sensor radius)

ここで、変数  $r$  を  $r_p \gg a$  であるから  $r \approx r_p$  として積分の外に出した。積分の結果は、

$$|\dot{\Phi}_r| = |\dot{V}_1| a^2/r_p |J_1(Z)/Z| \quad (15)$$

ここで

$a$  : 振動板の半径

$$Z = k a \sin \theta = \pi d / \lambda \sin \theta = \pi d f / c \sin \theta \quad (16)$$

$J_1$ : ベッセル関数<sup>2)</sup>である。

一方、中心軸上の同距離の点の速度ポテンシャルは、式(10)より、

$$\begin{aligned} |\dot{\Phi}_0| &= |\dot{V}_1| S / 2\pi r_p \\ &= |\dot{V}_1| a^2 / 2r_p \end{aligned} \quad (17)$$

これを比較の基準として、任意の方向  $r$  の速度ポテンシャルを指向関数  $R$  で示す。

$$\begin{aligned} R &= |\dot{\Phi}_r| / |\dot{\Phi}_0| \\ &= |2J_1(Z)/Z| \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)を  $Z$  の関数としてグラフで示すと Fig. 7 のようになる。Fig. 8 は、各種の  $d/\lambda$  の値に対する  $r$  の関数として指向関数を極座標で表示したものである。Fig. 8 (b) は今回の実験装置の例であり指向

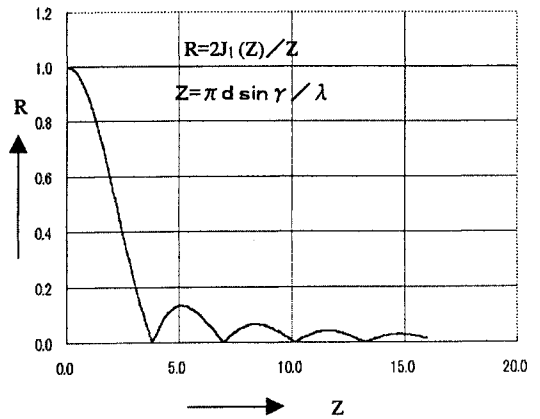


Fig.7 Directivity function R

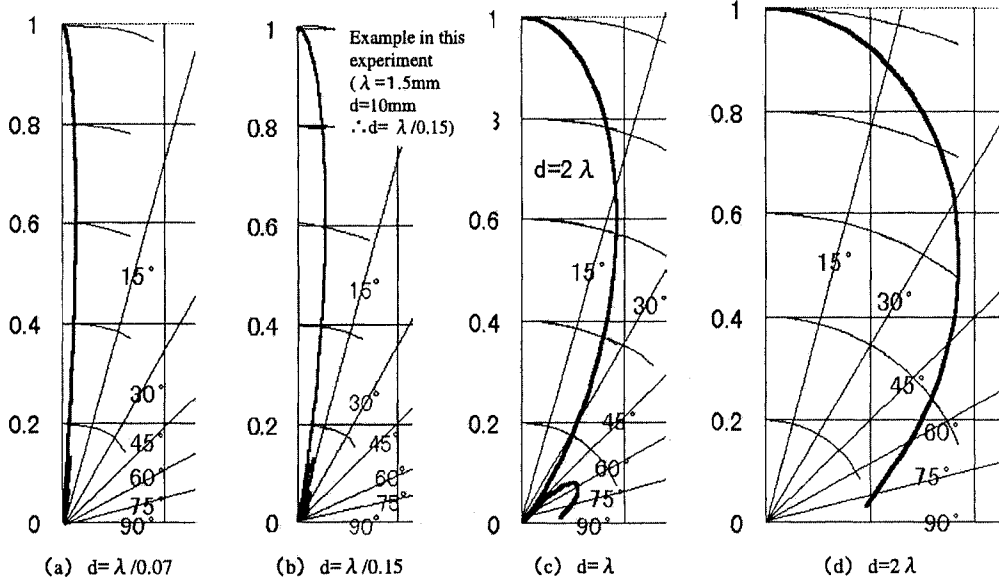


Fig.8 Polar coordinate indication of directivity function R (Directivity function R is displayed as a polar coordinate for direction angle r)

性は良好であることがわかる。

### 2.4 超音波反射波のデータ処理

超音波発生部は超音波を 1/240 秒毎に 1 回パルスを発生し、128 個の各センサ部から超音波パルスを水中に発射する。各センサ毎に魚からの反射波の有無を調べる。4 回のパルス発射に対して 1 回でも魚からの反射波が有るときはそのセンサのデータ値をオンとする。各センサのデータ値は、1/60 秒ごとに 1 ラインの画像データとして蓄積する。このようにして蓄積された画像（本稿では以下この画像を超音波画像と称呼する）の構造を Fig. 9 に示す。超音波画像は 60 分の 1 秒毎に新しいセンサーデータを最下の 1 ラインに追加し画面全体を更新する。超音波画像は画像メモリ上に格納し、且つ映像信号として出力できる。

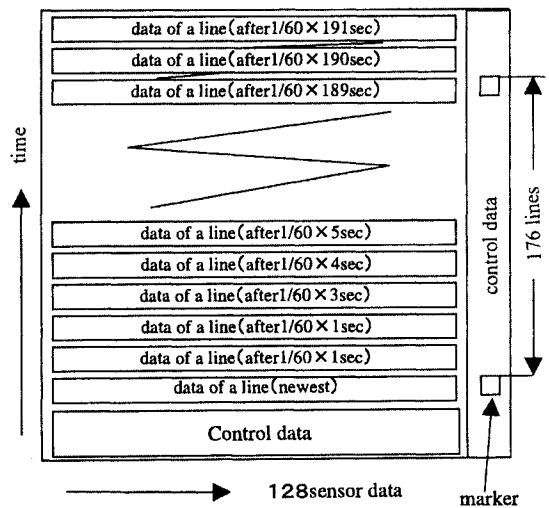


Fig.9 Structure of ultrasonic image

## 2.5 魚影解析部の処理<sup>3)-5)</sup>

### 2.5.1 概要

魚影解析部では超音波制御部で作成された超音波画像の映像信号を受信し、画像解析により魚数を推定する。処理の概要を列記すると以下のようである。

- (1) 176ライン毎(約2.933秒)に1回、映像を取り込む(マークの位置が一定位置にきた時)
- (2) 取り込んだ画像から今回処理対象部(176ライン間)のみを処理する
- (3) 今回処理対象画像中で前回処理画像との境界部の前回計数済みの対象を除き真の今回の処理対象を抽出する
- (4) 処理対象に対して隣接魚影との合併分離処理を行う
- (5) 最終的に独立魚影数をカウントする

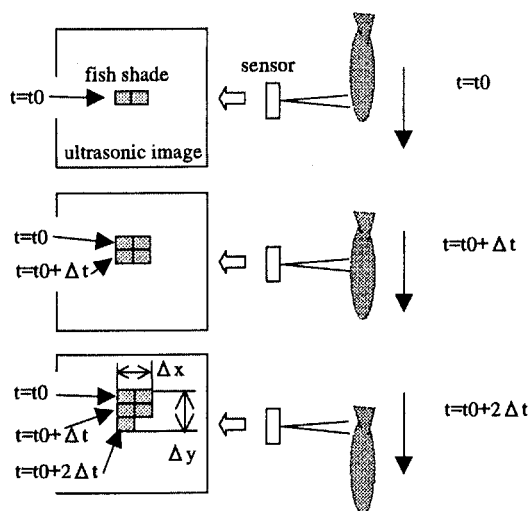


Fig.10 Fish in ultrasonic image

### 2.5.2 魚影

超音波画像中のセンサーデータがオンとなっている島の部分が重要である(本稿ではこの島の部分を以下魚影と称呼する)。超音波センサ前を魚が通過した場合の魚影の作成される状況を Fig.10 に示す。これから魚影の縦方向の大きさ( $\Delta y$ )は、魚が連続してセンサにセンスされた時間の長さを示し、魚影の横方向の大きさ( $\Delta x$ )は同時に検知されたセンサの数であり、センサが上下に並べられている場合には、魚高に相当する。

### 2.5.3 隣接シーン間境界の処理

連続したシーンの境界部では、魚影が2つのシーンにまたがることがあるので重複を避けるための処理を行う。

### 2.5.4 有効魚影の処理

2つ以上の魚影が隣接して現れた場合の処理は重要であるが、隣接魚影を1個とみるか2個とみるかは今回の実験では試行錯誤の結果、Table 3のようなルールを決めて処理できるようにした。

## 3 実験結果と検討

Fig. 11 は超音波画像中の魚影の例である。

Table3 ケース3で  $m = 6$ 、 $n = 3$  とした時の計測実験結果を Table 4 に示す。通過実数に対して装置の計測率は約70%である。Fig. 12 に通過実数と計測結果の相関をグラフで示す。超音波を側方から水平に発射する方式での実験であり、複数の魚の魚影が重なるためこの程度の検知率となる。今回実験を行わなかったが、超音波を垂直に発射する方式では更に検知率は向上するものと推定される。

## 4 おわりに

超音波と画像処理技術を使用して小型魚を自動計測する技術の研究開発をおこなった。夜間、濁水時にも計測できることや通過魚に対して影響を与えない等のメリットが多い計測方法である。本実験での計測率は、約70%であった。

謝辞：本研究に対して実験試料の使用を許可していただいた水資源開発公団殿及びダム水源地環境整備センター殿の関係者に感謝の意を表します。

Table 3 Rule of separation and gathering of fish





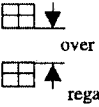

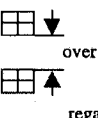
case	details
case1	<p>Regard as 2 fish when the distance between 2 fish shades is over 1 pixel.</p> <p>Example 1  regard as 1 fish</p> <p>Example 2  over 1 pixel regard as 2 fish</p> <p>Example 3  over 1 line regard as 2fish</p>
case2	<p>Regard as 2 fish when distances are over n lines or n pixels</p> <p>Example 1  over n pixels regard as 2 fish</p> <p>Example 2  over n lines regard as 2 fish</p>
case3	<p>Regard as 2 fish when distances are over n lines or m pixels</p> <p>Example 1  over m pixels regard as 2 fish</p> <p>Example 2  over n lines regard as 2 fish</p>

Table 4 Number of fish passing through and counting result

count by visual observation	number of scenes	total			count at sensorpart			count at image processing			
		number of passing fishes	count	count rate	less than number of passing fishes	similar to number of passing fishes	more than number of passing fishes	less than number of passing fishes	similar to number of passing fishes	more than number of passing fishes	
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	(J)	(K)	
0	343										
over 0	1	87	87	102	117.2	0	66	21	3	72	12
	2	33	66	63	95.0	0	18	15	6	24	3
	3	33	99	97	98.0	2	15	16	8	21	4
	4	22	88	82	93.2	3	7	12	11	6	5
	5	29	145	129	89.0	9	3	17	13	9	7
	6	14	84	72	85.7	2	6	6	7	6	1
	7	13	91	64	70.3	8	4	1	12	1	0
	8	9	72	58	80.6	3	2	4	8	0	1
	9	6	54	39	72.2	2	1	3	5	1	0
	10	10	100	66	66.0	8	0	2	9	1	0
	11	15	165	109	66.1	10	1	4	15	0	0
	12	7	84	57	67.9	4	1	2	7	0	0
	13	3	39	26	66.7	2	0	1	3	0	0
	14	2	28	13	46.4	2	0	0	2	0	0
	15	2	30	28	93.3	1	0	1	1	0	1
	17	1	17	11	64.7	1	0	0	1	0	0
	18	3	54	24	44.4	2	0	1	3	0	0
	19	2	38	21	55.3	1	0	1	2	0	0
	20	1	20	15	75.0	1	0	0	1	0	0
	21	1	21	11	52.4	1	0	0	1	0	0
	22	2	44	22	50.0	2	0	0	2	0	0
	23	4	82	43	48.7	4	0	0	4	0	0
	24	1	24	11	45.8	1	0	0	1	0	0
	29	1	29	12	41.4	1	0	0	1	0	0
34	1	34	4	11.8	1	0	0	1	0	0	
42	1	42	11	26.2	1	0	0	1	0	0	
Total	303	1647	1190	72.3	72	124	107	128	141	34	



参考文献

- 1) 実吉純一他監修：「超音波技術便覧」日刊工業新聞社、P. 9~26 (1960)
- 2) 無線工学ハンドブック編纂委員会：「無線工学ハンドブック」オーム社、第1・10表(1),(2), p. 1-54, 1-55(1964)
- 3) ダム水源地環境整備センター及び日立製作所特許第2589046号 魚数計測方法及装置及び移動物体計数方法
- 4) 日立製作所米国特許 No.5,692,064, Method and Apparatus for Counting Mobile Objects
- 5) 日立製作所カナダ特許 No.2,134,486, Method and Apparatus for Counting Mobile Objects

(受付 2000. 5. 27)

(受理 2000. 7. 11)

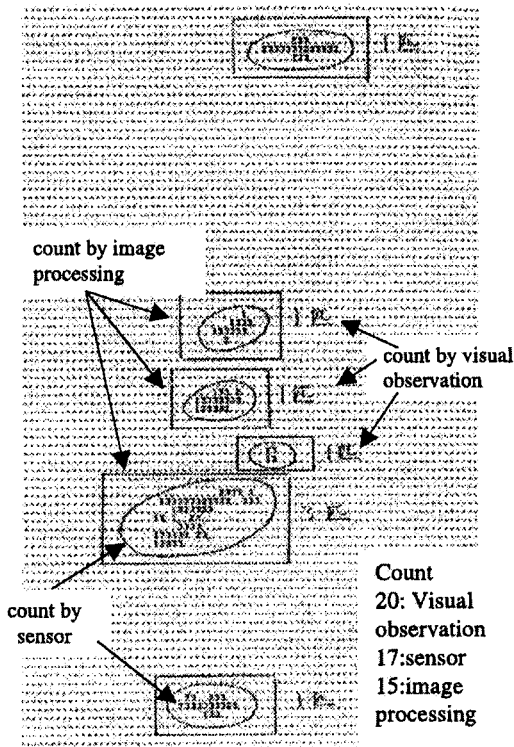


Fig.11 Example of ultrasonic data output

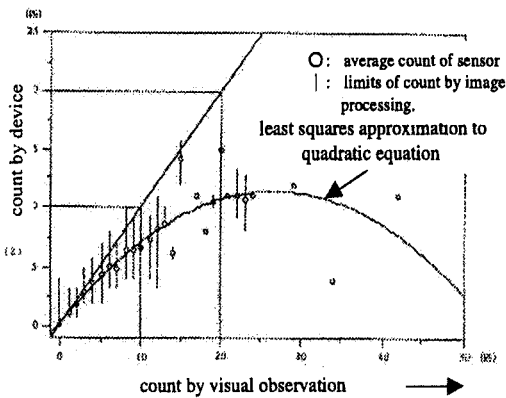


Fig.12 Correlation in fish counting

