

内部構造の異なる単体魚模型の三軸方向に おける標的強度について

松 野 保 久*・山 中 有 一*

Target Strength Measurements of Model Fish which have
Different Internal Structures in Pitch, Yaw and Roll

Yasuhisa MATSUNO*, Yuichi YAMANAKA*

Abstract

The target strength measurements of model fish were conducted in a 30 tons octagonal sea water tank at Nagashima Marine Laboratory for Fisheries Science of Kagoshima University.

A mold of *tracurus japonicus* was made of silicone rubber and three models taken the very same form externally, which have different internal structures were made of silicone rubber by it, namely these three kinds of model fish which have only rubber i.e. homogeneity, only bones and an only air bladder respectively.

This time, authors measured the target strength of these three kinds of model fish every 1° in pitch, yaw and roll respectively and used frequencies were 50 kHz and 200 kHz.

From the measurement results of the aspect variation of each individual model fish target strength, we obtained each polar diagram, maximum value and average value. The consideration of these results were very complicated, so that we could not set forth in detail, especially in regard to each polar diagram. Taking a wide view of things, in general we could make the following statement. The maximum values, the mean values and the aspects of maximum value were influenced considerably of the air bladder, but it could be considered that there was little effect of the bones.

単体魚の標的強度の測定は魚群探知機の設計及び魚群量・魚種の判定の最も基礎的な資料となり、過去にもいくつかの発表がみられる¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。これらは死亡直後の魚体か、あるいは麻酔をかけた魚体を細糸で懸垂して測定が行なわれている。今回筆者らは魚体の内部構造が標的強度にどのような影響を及ぼすか、その基礎的な実験を試みた。生体魚を解剖し浮き袋、内臓、骨格等を取り除く方法⁶⁾もあるが、魚体の外形がくずれるか、あるいは変形する可能性が強く、その弊害を除くため外形は全く同一で内部構造のみ異なる3種類のシリコンラバー模型魚を作製し、その各々について 50kHz, 200kHz の2周波で三軸方向における標的強度を測定し、2~3の知見を得たのでここに報告する。

* 鹿児島大学水産学部 漁船航海学講座 (Chair of Fishing Vessel Navigation, Faculty of Fisheries, Kagoshima University)

測 定 方 法

実験水槽は鹿児島大学水産学部附属長島水産実験所のコンクリート製30トン八角水槽に海水を揚水し、その後海水中に混入している気泡を抜くため二昼夜放置した。水槽内の送受波器、標的の位置関係及び測定機器の作動系統図を図1に示した。送受波器の位置は水槽側

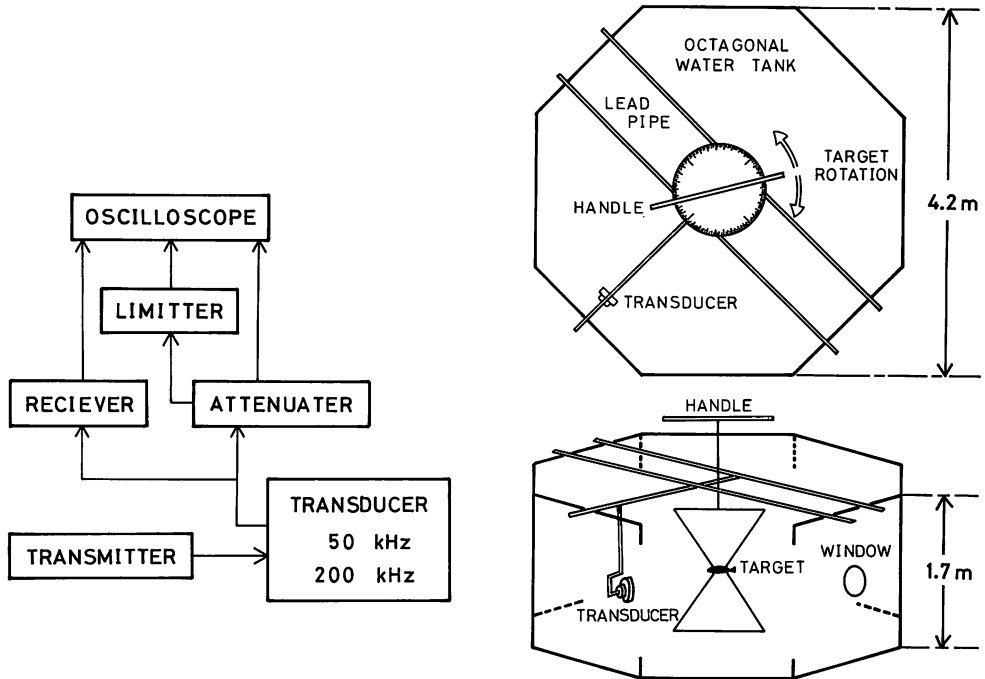


Fig. 1. Experimental setup and electronic block diagram for target strength measurements.

壁近く水深の $\frac{1}{2}$ に固定し、標的は水槽中央付近送受波器指向性中心軸線上に設置し360度回転可能とした。その回転角度は大型分度器によって0.5度まで充分読み得る精度であった。使用計器は次に示す通りである。

送 受 信 器：	日本無線株式会社	NJA-280KU 改良型
	周 波 数	28kHz 50kHz 200kHz
	送信出力 3 段切換	
オシロスコープ：	岩崎通信株式会社	SS-5215

図2に標的の支持方法を示した。上部は1辺の長さ70cmの木製の、下部は1辺の長さ50cmのアルミニウム管の正方形枠である。各頂点より0.4号（直径0.104mm）のテグス上下8本を使用し、木製枠に取りつけた微調整用プーリーによって各テグスの長さを調整する

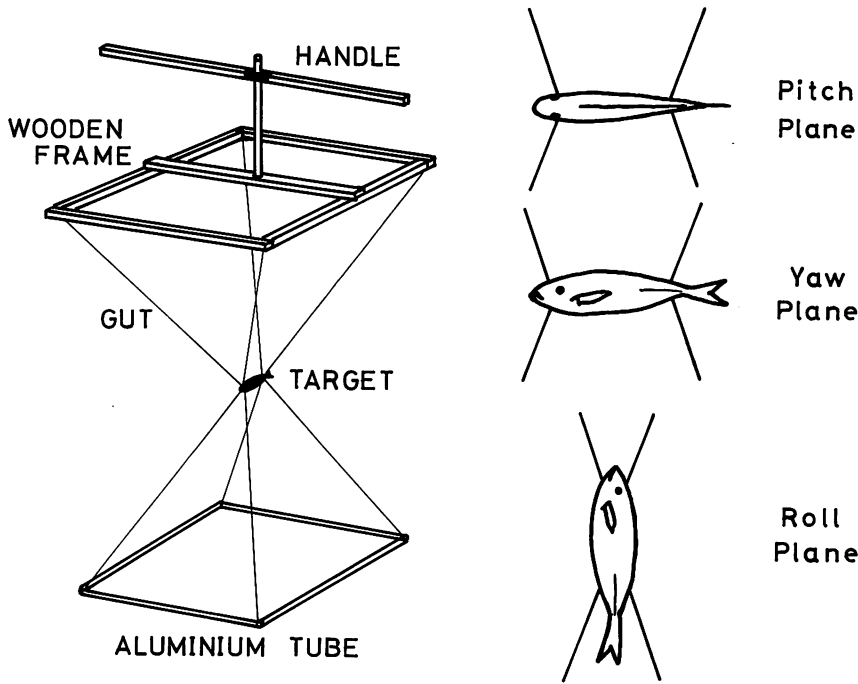


Fig. 2. The way of the target support.

ことにより Pitch plane, Yaw plane, Roll plane それぞれの標的の姿勢を制御した。この場合特に各 plane とも 3 種の標的の位置は送受波器に対して 3 次元的に全く同一でなければならず、精確を期するため、あらかじめ陸上で姿勢制御を行ない、その後水槽内に移動させた。その確認は水面上及び水槽側面の窓を通して行なった。下部のアルミ管枠は底面より 2～3 cm 浮上しており、標的を回転させた時、その水中重量及び水との摩擦抵抗により制振作用が働き、送受波器に対する角度制御は安定した状態であった。

標的となる対象魚マアジの模型作製は次のように行なった。①シリコンラバーでマアジの型取り。②同マアジより浮き袋摘出し、浮き袋の型取り。③同マアジを水酸化ナトリウム溶液で煮た後骨格のみ取り出し接着剤で骨格再現。④、①の型によりシリコンラバーのみの均質模型魚、骨格のみ挿入した模型魚、浮き袋のみ挿入した模型魚の 3 種類作製した。これら模型魚作製にあたって、シリコンラバーの脱泡処理には真空ポンプ及びデシケータを使用し十分脱泡を行ない、かつ模型魚ができるだけ生体魚の弾性度に一致するようシリコンラバー、シリコンオイル、加硫剤の配合に留意した⁷⁾。

図 3 に模型魚の写真及び線図を示した。体長 15.3cm, 体高 3.5cm, 体幅 1.8cm の 3 種の模型魚を標的として Pitch, Yaw, Roll 各 plane 3 軸方向 5° おきに 50kHz, 200kHz の 2 周波、パルス幅 0.1msec. で計 1,296 点測定を行なった。この時水槽内で音響測定を行なう場合問題となる制限事項、①送受波器と標的間の距離と送信パルス幅。②水槽側面反射と標的の反射が重ならないこと。③上水面、底面からの反射による制限。④送信周波数とパルス幅の制限。

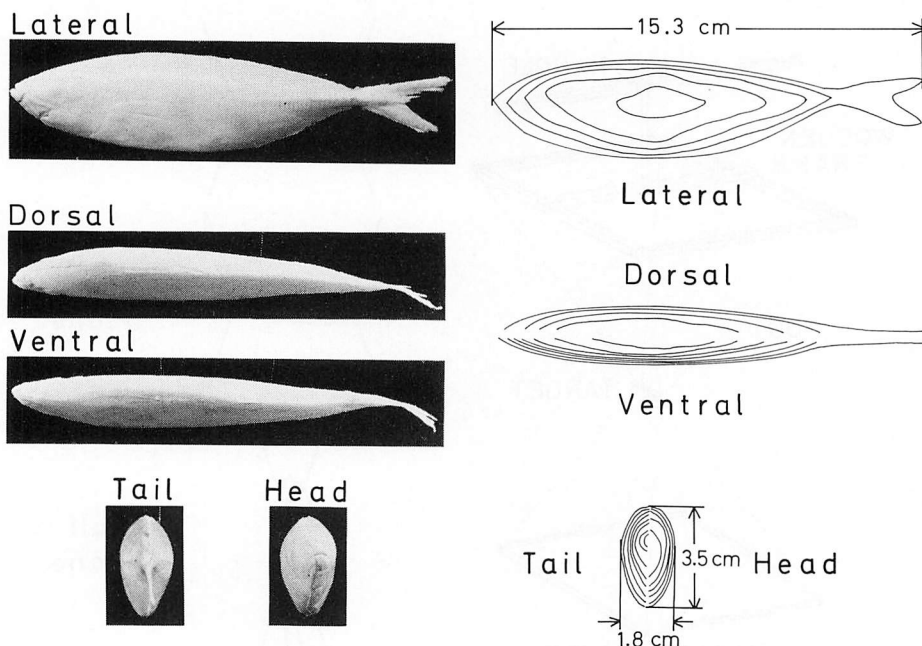


Fig. 3. The model fish and its lines.

⑤フレネルゾーンによる制限. これらについて検討した結果全て支障のないことが確認された.

各測定 of 標的強度の測定はオシロスコープにより読み取ったピーク電圧値 $V(i)$ と, 模型魚と同一場所に設置した高精度高炭素クロム鋼ボールベアリング (標的強度 -32.7dB) のピーク電圧 V_0 との比を求める次式の置換法によった. 標的強度の単位は dB である. 以下標的強度は TS で表わす.

$$\text{TS}(i) = 20 \log \frac{V(i)}{V_0} - 32.7$$

結果及び考察

周波数 50kHz によるシリコンラバーのみの均質模型魚, 骨格のみ挿入されたシリコンラバー模型魚, 浮き袋のみ挿入されたシリコンラバー模型魚の各 plane 3 軸方向における TS の測定結果を極座標で図 4 に, 同じく周波数 200kHz のそれぞれの結果を図 5 に示した. 3 種の模型のうち最も基本となると推定されるシリコンラバー均質模型魚と他の 2 種の模型魚の特徴を比較することにより, 浮き袋及び骨格の影響が推察されると思われる.

垂直あるいは水平魚群探知機の別にかかわらず, 海洋中に遊泳する単体魚・魚群の運動, 密度の変化等そして船体の航走, 動揺等により船体に装備された送受波器から発射される超音波の指向性中心軸線の入射方向は相対的に常時変化しているとするのが一般的であろう.

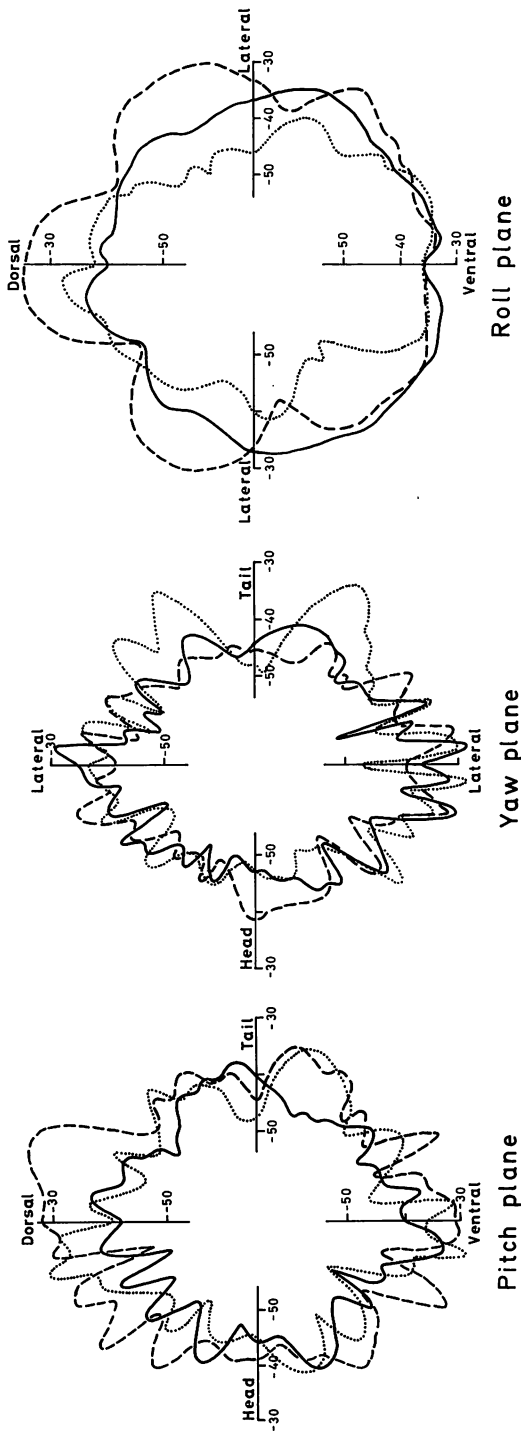


Fig. 4 Acoustic back-scattering polar diagrams of model fish. Used frequency was 50 kHz.

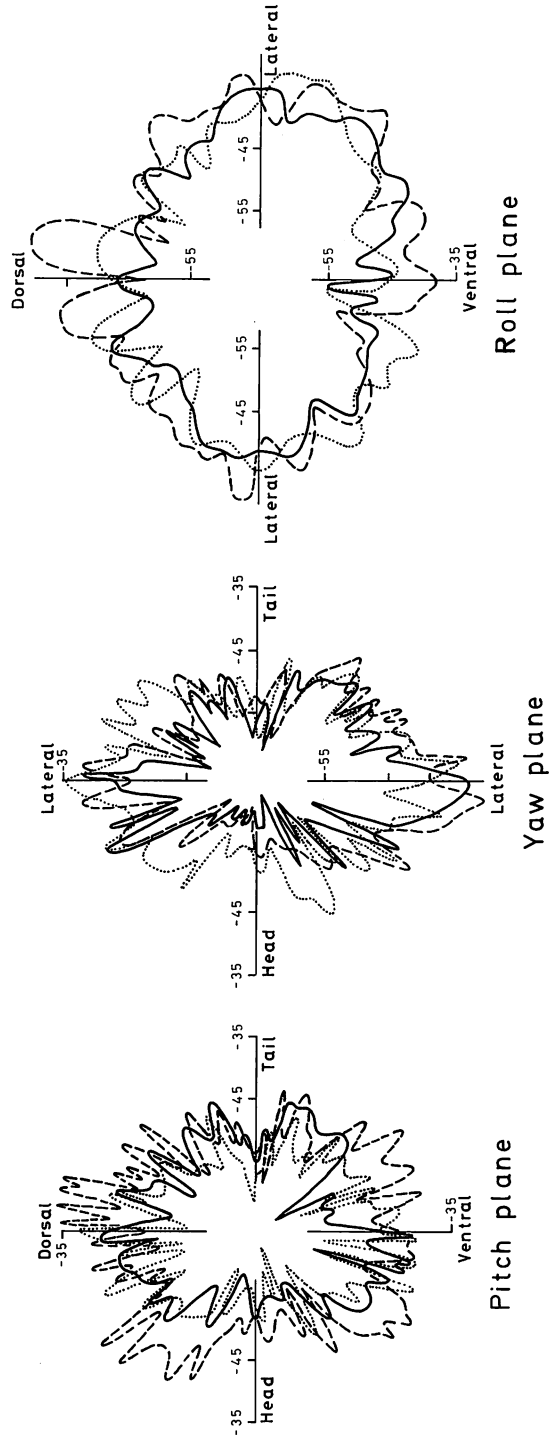


Fig. 5 Acoustic back-scattering polar diagrams of model fish. Used frequency was 200 kHz.

Table 1. Mean values of the target strength of model fish.

	50 kHz			
	Pitch plane	Yaw plane	Roll plane	Three planes
Homogeneity	-40.8dB	-40.0dB	-34.7dB	-38.1dB
Bones	-39.0dB	-38.0dB	-38.4dB	-38.5dB
Air-bladder	-34.6dB	-40.0dB	-31.4dB	-34.6dB
	200 kHz			
	Pitch plane	Yaw plane	Roll plane	Three planes
Homogeneity	-48.5dB	-48.9dB	-41.4dB	-45.5dB
Bones	-49.0dB	-45.4dB	-40.6dB	-44.3dB
Air-bladder	-44.8dB	-45.6dB	-38.0dB	-42.1dB

Table 2. Mean values of the target strength of model fish in dorsal, ventral, head and tail aspects.

	Pitch plane					
	50kHz			200kHz		
	Dorsal	Ventral	Difference	Dorsal	Ventral	Difference
Homogeneity	-41.0dB	-40.6dB	-0.4dB	-48.2dB	-48.7dB	+0.5dB
Bones	-39.5dB	-38.4dB	-1.1dB	-49.3dB	-48.5dB	-0.8dB
Air-bladder	-33.2dB	-35.8dB	+2.6dB	-45.2dB	-44.1dB	-1.1dB
	Roll plane					
	50Hz			200kHz		
	Dorsal	Ventral	Difference	Dorsal	Ventral	Difference
Homogeneity	-38.0dB	-32.4dB	-5.6dB	-42.6dB	-40.6dB	-2.0dB
Bones	-39.4dB	-37.4dB	-2.0dB	-41.3dB	-40.2dB	-1.1dB
Air-bladder	-29.8dB	-33.5dB	+3.7dB	-36.8dB	-39.3dB	+2.5dB
	Yaw plane					
	50kHz			200kHz		
	Head	Tail	Difference	Head	Tail	Difference
Homogeneity	-40.5dB	-39.9dB	-0.6dB	-49.9dB	-49.5dB	-0.4dB
Bones	-39.9dB	-36.4dB	-3.5dB	-45.7dB	-45.8dB	+0.1dB
Air-bladder	-39.7dB	-40.3dB	+0.6dB	-45.8dB	-45.8dB	0 dB

よって TS の大略を把握する一つの方法として各 plane の平均値の比較を最初に試みた。表 1 に 3 軸方向それぞれ 360° の TS の平均値を示した。また実際の魚群探知機による超音波指向角範囲内に入るであろうと推定される魚体の 180° の範囲、すなわち、Pitch plane, Roll plane は背面、腹面各 180°, Yaw plane は頭部、尾部各 180° の TS の平均値を表 2 に示した。TS の平均値の差は Pitch plane, Roll plane は（差＝背面－腹面）、Yaw plane は（差＝頭部－尾部）とした。よって⊕値は背面または頭部からの反射が強く、⊖値は腹面または尾部からの反射が強いことを示している。これらのことより表 1 から(1), (2), 表 2 から(3), (4), (5)の結果を得た。

(1) 浮き袋挿入模型魚の TS が最も大きく両周波とも均質模型魚より約 3.5dB 大きい。このことにより浮き袋は魚体の TS の平均値を大きくすることが確かめられた。

(2) 骨格挿入模型魚の TS は均質模型魚より約 1.5dB 大きい。しかしこの値は 50kHz Roll plane のみ異状がみられたので除外したがこの原因はよくわからない。また Pitch plane, Roll plane の TS は 50kHz, 200kHz それぞれ大小逆の結果となり周波数の違いによる影響も推察され、骨格が単に TS を大きくすると推察するには問題がある。今後の問題としてさらに精密な測定を続けたい。

(3) 均質模型魚は Pitch plane では両周波とも背面、腹面からの TS の差はほとんどなかったが、Roll plane では特に腹面からの TS が 5.6dB も大きく現われた。Yaw plane では頭部、尾部ほとんど差がなかった。

(4) 骨格挿入模型魚は Pitch plane, Roll plane では両周波とも腹面からの TS が大きい傾向にあった。Yaw plane では 200kHz は頭部、尾部の差はなかったが、50kHz では尾部側からの TS が大きく現われた。

(5) 浮き袋挿入模型魚は Pitch plane 50kHz では背面からの TS が 2.6dB 大きく、200kHz では腹面からの TS が 1.1dB 大きくその値は異なるが反対の結果となった。Roll plane は両周波とも背面からの TS が 3.7dB, 2.7dB と大きく現われた。Yaw plane では頭部、尾部からの TS にはほとんど差がなかった。

以上いくつかの結果を得たが、次に 3 軸方向における両周波の極座標パターンの特徴について検討したい。図 4, 図 5 にみられるように指向性中心軸と模型魚の相対方位がわずかに変化するだけで TS は大きく変化する極大点（以下単に極で表わす）が幾つか現われる。これは魚体長 L と超音波の波長 λ との比 L/λ が大きくなると極の数も増加する。よってその細部に至るパターンの特徴を精確に把握するのは困難であるので以下その概略について記す。

I 均質模型魚

(A) Pitch plane

(1) 50kHz

頭部を中心として背面・腹面両方向え、それぞれ 20°, 45°～50°, 60°, 80°, 100°, 120°～130° と TS の大きさは異なるが、約 20° の間隔で規則的に極がみられる。ただし背面・腹面直上付近では約 10° 間隔になっている。尾部より背面方向 5°～30° にかけてなめらかな極がみられるが腹面方向約 40° までは TS はむしろ小さな傾向にあり、そのパターンは乱れている。極の位置は頭部より背面・腹面とも尾部方向約 120° まではほぼ対称とみてよい。

(2) 200kHz

頭部を中心として背面・腹面両方向え尾部までそれぞれ, 20°~25°, 40°~45°, 55°, 70°~75°, 85°, 105°, 115°~125°, 140°~145°, 160°, 175° と 50kHz 同様 TS の大きさは異なるが約 10°~20° の間隔で規則的に極がみられる。ただし 50kHz 同様背面・腹面直上付近では約 10° 間隔になっている。腹部方向 105°~115° の TS が小さすぎる理由はよくわからない。極の位置は背面・腹面ほぼ対称とみてよい。

(B) Yaw plane

(1) 50kHz

頭部を中心として左右側面尾部両方向え, 20°, 35°, 50°, 60°~75°, 85°, 95°, 105°, 110°~115°, 125°~130°, 155° と TS の大きさは異なるが約 10°~30° の間隔で極がみられる。極の位置はほぼ左右対称とみてよい。

(2) 200kHz

“蝶々形” パターンを示し, 極の数も増加し, かつ左側面の TS が全般的に大きく現われている。頭部を中心として左右側面尾部両方向えそれぞれ12個ずつの極がみられるが, それぞれ左右対称となるべき極の位置がほとんど 5°~10° ずれている。

(C) Roll plane

(1) 50kHz

大略円形パターンを示し極の数も少ない。

(2) 200kHz

背面直上左右約 20° に, 腹面左右約 5° に極がみられる。50kHz より扁平なパターンとなっている。

II 骨格挿入模型魚

(A) Pitch plane

(1) 50kHz

頭部を中心として背面・腹面両方向えそれぞれ, 20°, 40°, 70°~75°, 80°~85°, 90°, 120°, 140°, 160° と TS の大きさは異なるが約 10°~20° 間隔で規則的に極がみられる。また背面・腹面直上付近からやや頭部方向にかけて極が約 10° 間隔で現われている点など, 腹部から尾部の一部を除いて均質模型魚のパターンと似かよっている。

(2) 200kHz

頭部を中心として背面・腹面両方向え均質模型魚より極の数が増加し, かつ 50kHz の場合にみられたように背面直上及び腹面から尾部付近では極が約 5°~10° 間隔で現われており腹面から尾部の一部を除いて均質模型魚のパターンと似かよっている。

(B) Yaw plane

(1) 50kHz

頭部を中心として左右側面尾部方向え, 15°~20°, 50°, 65°~75°, 85°~90°, 100°, 110°~115°, 130°, 150° と TS の大きさは異なる極がみられ, その位置は均質模型魚と似かよっているが頭部より尾部方向え約 150° にある 2 つの極は 8~10dB 大きな TS であり大きな特徴となっている。

(2) 200kHz

“蝶々形”パターンを示し均質模型魚に似かよっている。しかし頭部左側約 30° 及び右側約 50° 以内の範囲で 8~12dB, また頭部より右側面尾部方向へ約 110°~130° の範囲で 10~15dB 大きくなっている。

(C) Roll plane

(1) 50kHz

この測定値は表 1 に示したように TS 平均値が均質模型魚より小さく、かつ極座標パターンも変型しており Pitch plane, Yaw plane における骨格の影響について比較検討すれば、このようなパターンになるとは推察しにくく、むしろこの時の測定に限り何らかの原因による誤差が混入したものと推察する。

(2) 200kHz

背面上より左右約 15°, 40°~45° に極がみられる。他はほぼ均質模型魚と似かよっている。

Ⅲ 浮き袋挿入模型魚

(A) Pitch plane

(1) 50kHz

頭部を中心として背面から尾部方向え, 35°, 50°, 65°, 80°, 105°~110°, 140°, 155°, 170°, 腹面方向え, 35°, 65°, 90°, 115°, 135°, 150°, 165° に極がみられ均質模型魚のように極の位置は背面・腹面对称とはならない。特に顕著な特徴として背面尾部方向 105°~110° に TS-24dB の最大値, 腹面方向 65°, 115° に TS-30dB がみられる。

(2) 200kHz

頭部を中心として背面から尾部方向に, 20°~50°, 90°~115°, 腹面方向え, 45°~65°, 115°~130°, ではそれぞれ 10~12dB, 10~18dB, 5~7dB, 12~14dB 大きく, 均質模型魚のパターンとは異なっている。

(B) Yaw plane

(1) 50kHz

頭部を中心として左右側面尾部方向え, 25°~30°, 40°~60°, 75°, 100°, 115°~120°, 145° と側面より尾部の範囲は極の位置が対称になっているが, 頭部より側面までが非対称である。

(2) 200kHz

“蝶々形”パターンを示し均質模型魚とほぼ似かよっている。しかし側面直上では TS は極小値を示し, 左右とも各 5° 方向が異なるところに極が現われ, その TS の差は約 8dB である。

(C) Roll plane

50kHz

極は背面直上, 背面より左右約 60°~70°, 腹面より左右約 50°~60° に 5 個みられる。

(2) 200kHz

極は背面直上左右約 10° に均質模型魚より約 14~18dB, また腹面上約 10dB 大きな極がみられる。パターンは骨格挿入模型魚と似かよっている。

以上 TS の大きさ, 極の位置ならびに数などについて極座標パターンの特徴を述べた。これらの結果と 3 種の模型魚の内部構造との関連を推察するため, それぞれの側面, 背面からの SOFTEX 写真を図 6 に示した。骨格は頭骨, 肋骨, 内臓骨 (顎骨, 懸垂骨等) そして脊

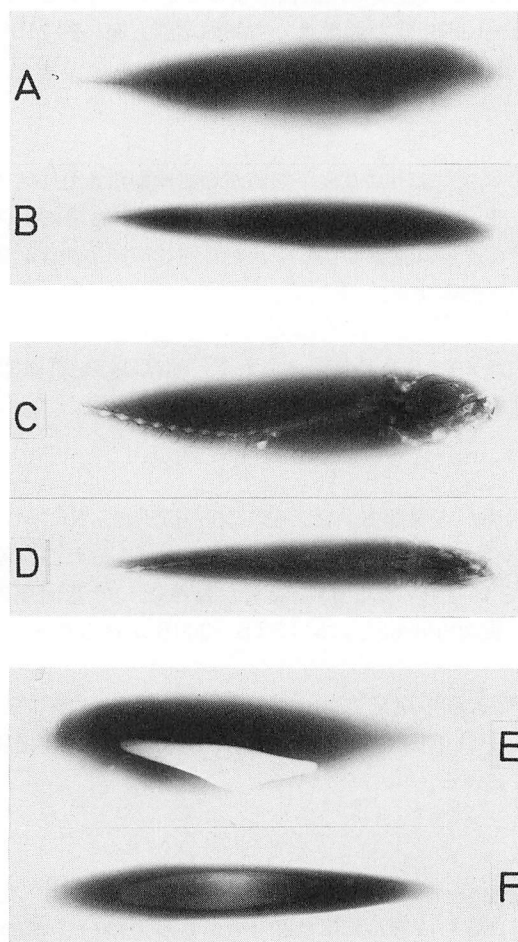


Fig. 6. SOFTEX photographs of model fish.

A : homogeneity — lateral
C : bones — lateral
E : air-bladder — lateral

B : homogeneity — dorsal
D : bones — dorsal
F : air-bladder — dorsal

椎骨を挿入したが模型作製時、脊椎骨がCに示したようにほぼ中央付近で約 20° 屈折し、作製技術の問題が残った。またEに示したように浮き袋の外形を形どる線は側面から見た主軸に対し上部は 5° 、下部は 18° 、尾部側は 15° の傾きがあったが、Fに示したように背面から見た主軸に対しての傾きはなかった。模型魚の容積は 36.2cm^3 、浮き袋の容積は 2.0cm^3 で浮き袋は全容積の5.5%であった。また図3の写真、背面、腹面に示したように右側面の曲率がわずかに大きくなっている。水中で模型魚を吊した場合は尾部は水平であった。

以上考察の結果、均質模型魚との極座標パターンの大きな相違はおよそ次のようであった。
骨格挿入模型魚：パターンに大きな相違はなかったので、骨格による影響はあまりないも

のと推察する。しかし 50kHz, 200kHz 両周波の Yaw plane でみられたように尾部から左右 30°~60° 付近に強い反射があることに特徴があった。特にこの傾向は 50kHz で顕著であり、筆者らがほぼ同じ大きさのマアジの実物単体魚で行なった測定結果とも同様の傾向を示した。

浮き袋挿入模型魚：Pitch plane と Roll plane に均質模型魚と特に異なったパターンが現われた。Pitch plane でみられたように側面からみた主軸に対する浮き袋の傾斜角にほぼ直角方向に超音波の指向性中心軸がある場合反射が強く現われた。今回の測定では 50kHz の場合、腹面より背面方向から超音波が入射した方が 5dB 大きかったが、200kHz の場合は全く同じ値であった。また Roll plane でみられたように 50kHz と 200kHz ではそのパターンは異なるが、浮き袋の影響により両周波とも背面を中心として左右に 1 個ずつの極が大きく現われた。その極の位置は 50kHz は 50°~60°、200kHz は 10° であった。Pitch plane では背面、腹面からの TS の大きさに違いがみられたこと及び Roll plane におけるこの極の位置の違いは、シリコンラバーの厚み及び浮き袋の形状による共振周波数の違い等によるものと推察するが今後のさらに精密な測定を実施し検討したい。また 3 種の模型魚とも Yow plane で左右各側面の TS の値が異なり、あたかも蝶々の左羽根が大きくなったパターンになったこと及び均質模型魚 200kHz で極の位置が左右対称とならず 5°~10° ずれたこと等は右側面の曲率が少こし大きかったことが原因であると推察する。これら 2 つの傾向は 50kHz より 200kHz の方が影響を大きく受けた。

今回の測定はオシロスコープによる標的からの反射ピーク電圧値をそれぞれ読み取ったのであるが、図 4、図 5 に示したように送受波器と単体魚模型との相対方位がごくわずかに変化するだけでその TS は大きく変化した。5° 間隔の測定であったが、その間でも TS が大きく変化する場合がしばしば起こり、その場合は特に 0.5° あるいは 1° 間隔で測定した。また反射波形も両者相対方位の変化により微妙にまたは著しく変形する傾向がみられた。今後標的の TS の測定に加えて、この反射波形の変化の起因もよりくわしく追究し単体魚の反射特性の検討を重ねたい。

最後に本実験を行なうにあたり施設提供及び諸準備に力添え下さった長島水産実験所所長はじめ職員の皆様、SOFTEX 写真撮影に協力下さった本学海洋生物学講座の四宮明彦講師、実験装置作製に従事下された本学機械工場高岡勝義氏そして資料整理をされた本学学生内村義雄氏に併せて謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) MATSUNO Y and Y YAMANAKA (1980): Measurment of the Target Strength of an Individual Fish in Roll, Poll, Pitch and Yaw. Min. Rev. Data File Fish., 1. 47-51.
- 2) RICHARD H. LOVE (1971): Dorsal-Aspect Target Strebgth of an Individual Fish. J. Acoust. Soc. Am., 49, 816-823.
- 3) RICHARD H. LOVE (1969): Maximum Side-Aspect Target Strength of an Individual Fish., J. Acoust. Soc. Am., 46, 756-752.
- 4) R. W. G. HASLET (1962): Determination of the acoustic back-scattering patterns and cross section of

fish. Brit. J. APPL. PHYS., 13, 349-357.

- 5) CUSING, D. H. (1973): The Detection of Fish., 78-88. Pergamon Press.
- 6) 橋本富寿, 間庭愛信 (1958): 魚体の反射損失の研究 (鰐の影響について), 漁船研究技報 11, 143-155.
- 7) 奈良迫嘉一 (1976): 遊泳魚体の低抵抗性に関する基礎的研究, 本誌 25-2, 56-60.