

水中圧力波による魚類の損傷 (第4報)

内部器官の力学的応答

小川輝繁*, 福山郁生*, 伊藤一郎**

水中爆破等に伴う水中圧力波を受けた魚類に生ずる損傷について魚体の力学的応答の観点から検討した。模型魚を用いて腹腔内圧力波ならびに内臓部に生ずるひずみの性状を調べるとともに実魚を用いて腹腔内圧力波を測定して、魚体内の力学的応答と魚の内部器官に生ずる損傷の程度との関係について考察した。魚体内に作用する水中圧力波のエネルギー密度、腹腔内圧力波のピーク圧および内臓部に生ずるひずみの大きさの3者の間には相関性があること、また魚の内部器官の損傷程度がそのひずみの大きさに依存すると考えれば、実魚を用いた実験の解析結果と模型魚実験の測定結果はきわめてよく対応することが確認された。

1. 緒言

水中爆破等による水中圧力波を受けてへい死した魚は、心臓、肝臓、腎臓、うきぶくろ等の内臓器官に著しい損傷を受けている^{1),2),3)}。魚の内部器官が水中圧力波によって受ける損傷の程度はその波形や内部器官の構造によって大きく左右される^{1),3)}。この現象は水中圧力波を受けた魚の腹腔内部の力学的応答に深い関係があるものと考えられる。

そこで、本研究では高分子材料で作った模型魚および実魚を用いて腹腔内の圧力や内部器官に生ずるひずみ等を測定し、水中圧力波の性状と魚体内に生ずる力学的応答との関係について考察した。さらに、この研究により得た結果をもとにして水中圧力波を受ける魚の内部器官にどのようなメカニズムによって損傷が生ずるかについて検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 模型魚

模型魚はポリエチレンおよび塩化ビニルを原料とし、力学的性質が実魚とできるだけ類似した材料を使って製作した。今回使用した材料の主な特性は Table 1 に示すとおりである。その形を実魚に近いものにするために、体長 250mm のハマチから頭および背骨、身ならびに内臓部の型をとり、模型魚の各部分を製作した。内臓部は腎臓に相当するA部と肝臓、消化器等腎臓以外の臓器に相当するB部の2種類を製作した

が、A部については実魚から型をとることが困難であったため、型を作らないで製作した。Fig. 1 にはその模型魚を示した。

2.2 実験方法

2.2.1 模型魚実験

実験水槽(縦 3m×横 5m×深さ 3.5m)内に爆源、模型魚および圧力計を設置し、水中圧力波による模型魚腹腔内の圧力応答およびひずみ応答を測定した。

水中圧力波および腹腔内圧力波の測定は、それぞれ第1報¹⁾および第3報³⁾の方法によって行った。腹腔内センサーは模型魚の内臓B部の側面と内部に取りつけた。ひずみゲージは、Fig. 2 に示すように、内臓A部の下面と内臓B部の側面に貼りつけた。内臓A部は背骨とうきぶくろに挟まれた位置にある腎臓に対する影響を検討するためのものである。そのひずみを測定する場合は内臓B部を取り除き、うきぶくろの代用としてゴム風船を挿入した。一方、内臓B部のひずみを測定する場合は内臓A部を取り除いた状態で行った。ひずみゲージ S₁ および S₃ は1軸ゲージ(共和電業社製 KFC-2-C-11)で、S₂, S₃, S₄ および S₆, S₇, S₈ は3軸ゲージ(共和電業社製 KFC-2-D-17-11)である。ひずみゲージよりの信号は新興通信社製 DS6/MTY 動ひずみ計を通して Ampex FR-1300 データレコーダに記録した。これらの測定結果は NO VA-01 ミニコンピュータにより処理した。

爆源には6号電気雷管ならびにコンクリート破砕器(CCR 旭2号、薬量 30g)を使用した。後者は直径 12.5cm、厚さ 31cm のモルタルブロックに埋め込み、

昭和53年10月31日 受理

* 横浜国立大学工学部: 〒232 横浜南区大岡2-31-1

** 京都大学 工学部: 〒606 京都市左京区吉田本町

Table 1 The viscoelastic properties of materials for model fish.

Materials	Thickness of sample (mm)	Temperature (°C)	δ (degree)	G' (dyne/cm ²)	η' (poise)
Hard rubber (Bone)	0.76	5	46.5	7.708×10^9	1.164×10^7
		10	45.0	7.508×10^9	1.195×10^7
		15	46.5	7.688×10^9	1.161×10^7
		20	46.0	7.607×10^9	1.170×10^7
Soft rubber (Body)	0.59	5	23.0	1.548×10^6	1.046×10^3
		10	18.5	1.473×10^6	7.84×10^2
		15	14.5	1.406×10^6	5.37×10^2
		20	13.0	1.314×10^6	4.83×10^2
Supersoft rubber (Internal organs)	1.08	5	31.0	1.687×10^5	1.61×10^2
		10	29.5	1.525×10^5	1.37×10^2
		15	27.5	1.397×10^5	1.16×10^2
		20	26.0	1.326×10^5	1.03×10^2

Note 1) Frequency of strain in tests : 100Hz

2) G' : Dynamic elastic constant

η' : Dynamic coefficient of viscosity

δ : Phase difference between strain applied and force measured



Fig. 1 Model fish.

Table 2 Duration of first pressure pulse (Unit : mS)

			E. D.**	CCR**
Pressure wave in the abdominal cavity	Model fish	Surface*	ca. 0.6	ca. 1.3
		Inside*	ca. 0.7	ca. 1.3
	Actual fish	Kidney	ca. 2.6	ca. 2.6
		Liver	ca. 1.4	ca. 2.0
Underwater pressure wave	—	water	0.05—0.1	0.8—2.0

* Surface : Surface of viscera, Inside : Inside of viscera

** E. D. : Electric detonator, CCR : Concrete cracker

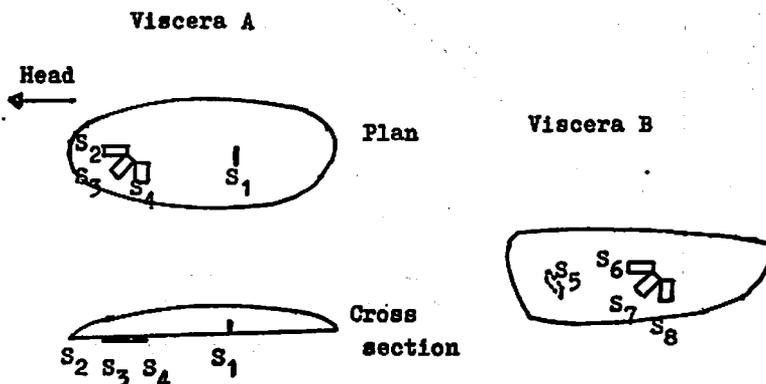


Fig. 2 Arrangement of strain gauges.

その点火には点火管もしくは6号電気雷管を用いた。

2.2.2 実魚実験

上述の模型魚の場合と同様の方法により実魚の腹腔内の圧力応答を測定した。試料には体長49.5cmのハマチで、肝臓の両側面と腎臓の下面に圧力センサーを取りつけた。

3. 結果および考察

3.1 腹腔内圧力波

電気雷管の場合の実魚腹腔内圧力波形は前報¹⁾に示したが、それと模型魚の腹腔内圧力波は類似している。魚体に作用した水中圧力波と腹腔内圧力波の最初のパルスの幅をTable 2に示す。コンクリート破砕器と電気雷管とで圧力波のパルス幅を比較すると、水中圧力波では前者が後者の8~40倍になっているにもかかわらず、腹腔内圧力波では大きな差がないことが示されている。これは魚体の緩衝効果によるものと考えられる。また、実魚の結果から腹腔内での圧力計の位

置による波形の違いはあまり大きくないことが明らかとなった。腹腔内の圧力波形は実魚と模型魚とで類似しており、模型魚を使って魚体内の力学的応答を検討してもほぼ妥当な結果が得られるものと考えられる。

Fig. 3に実魚(ハマチ)の腎臓の下面および肝臓側面の圧力波のピーク値と魚体に作用した水中圧力波のピーク値との関係を、Fig. 4に模型魚の腹腔内圧力波のピーク値とそれに作用した水中圧力波のピーク値との関係を示す。Fig. 3以下に示す図ではコンクリート破砕器を使った結果を「CCR」と表現した。Fig. 3およびFig. 4には、水中圧力波のピーク圧と腹腔内圧力波のピーク値との関係が水中圧力波の波形により異なることを示す。一方、第1報¹⁾において、魚の内部器官の損傷の程度は水中圧力波のエネルギー密度と良い相関関係を有することを明らかにした。そこで、水中圧力波のエネルギー密度と腹腔内圧力波の諸特性値との関係について検討する。圧力波の諸特性値として

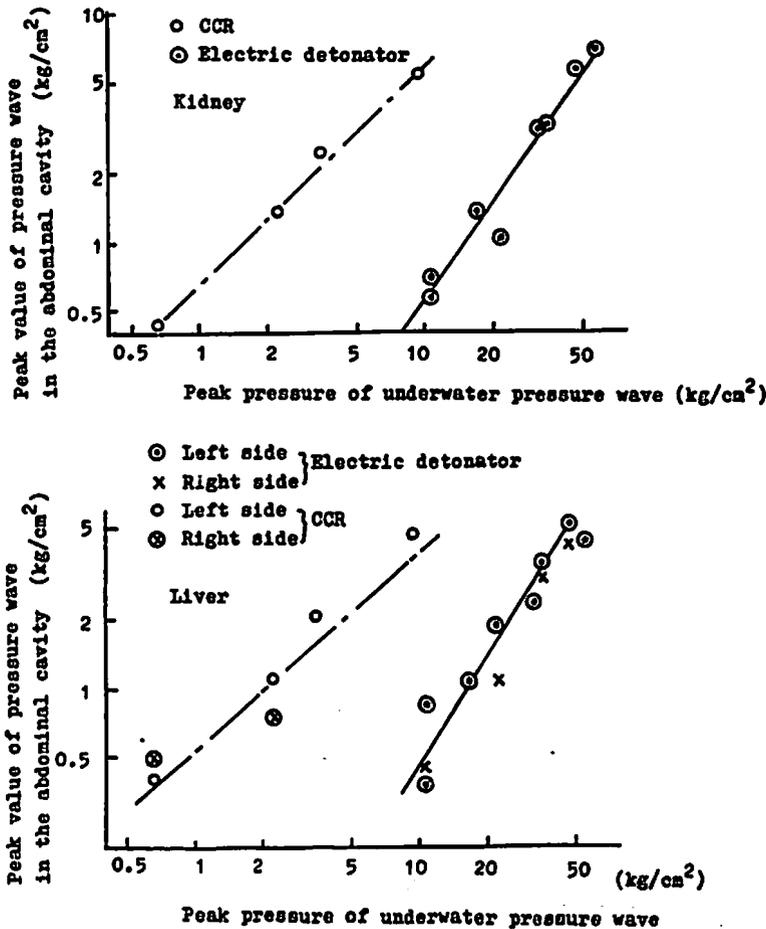


Fig. 3 Relation between peak value of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of young yellowtail.

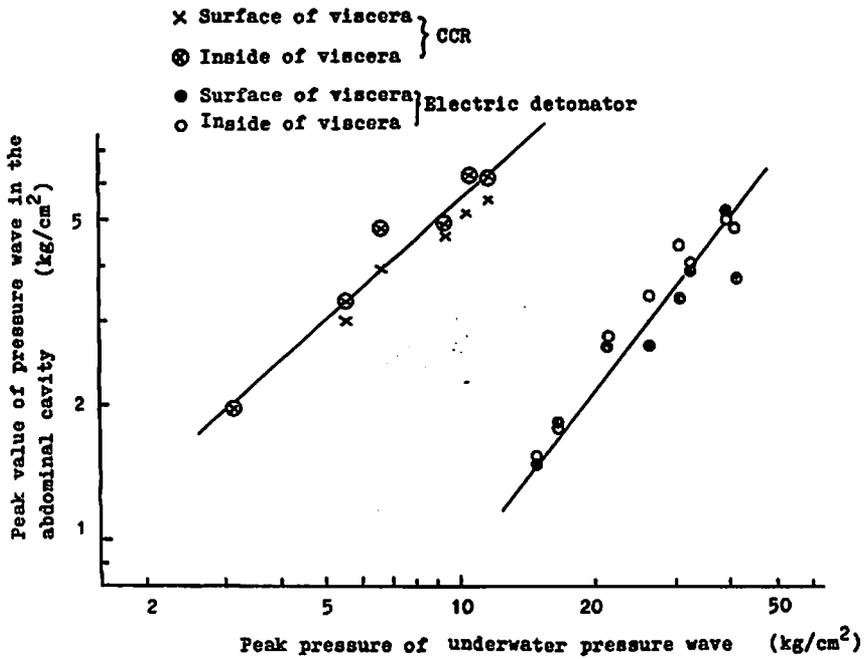


Fig. 4 Relation between peak value of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

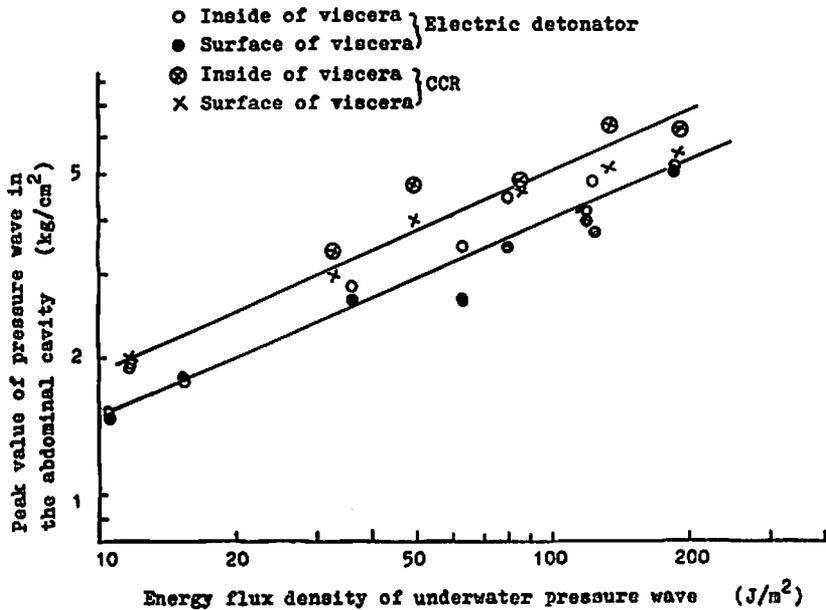


Fig. 5 Relation between energy flux density of underwater pressure wave and peak value of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

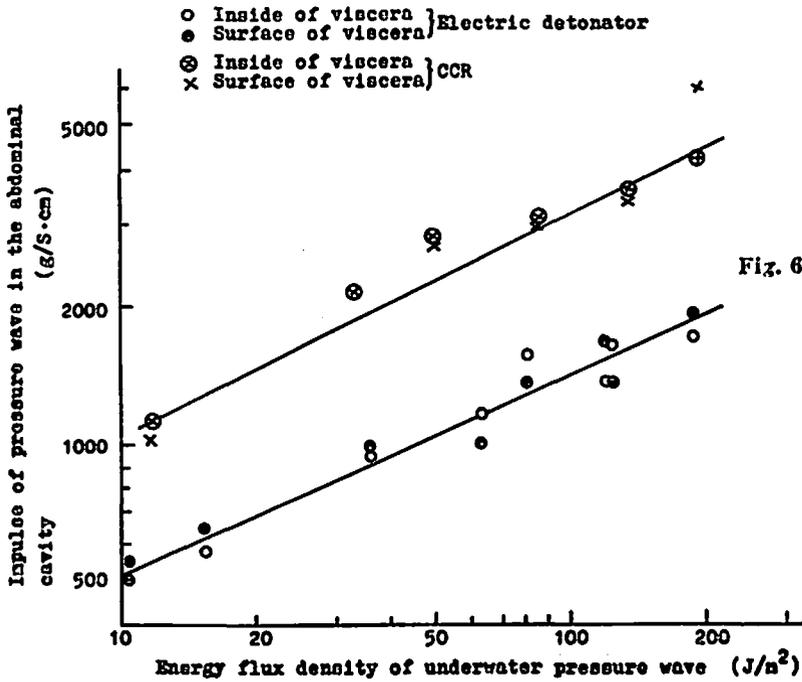


Fig. 6 Relation between energy flux density of underwater pressure wave and impulse of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

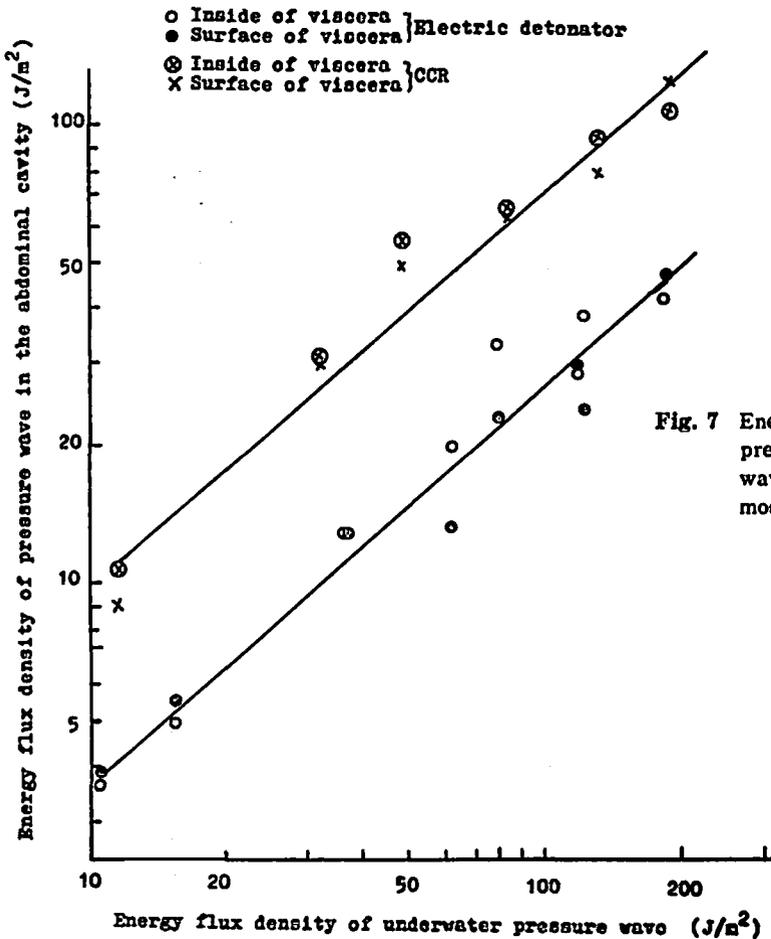


Fig. 7 Energy flux density of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

ピーク圧、インパルスおよびエネルギー密度をとり、これらの値と作用した水中圧力波のエネルギー密度との関係（模型魚）を示した。内臓諸器官の密度と音速は不明のため、腹腔内圧力波のエネルギー密度は便宜上水の密度と音速を使って計算した。したがって、この値は比較のための相対値である。Fig. 5～Fig. 7より、腹腔内圧力波の特性値と水中圧力波のエネルギー密度との関係は爆源別に整理すると良い相関性があるが、異なる爆源のものに対しては相関性が悪いことがわかる。しかし、Fig. 5のみは爆源別に整理した両者

の直線が非常に接近している。これは、作用する水中圧力波のエネルギー密度が同一であれば、その波形が異っていても腹腔内圧力波のピーク圧はほぼ同じ大きさであることを示す。一方、実魚について測定した腹腔内圧力波の諸特性と水中圧力波のエネルギー密度との関係についても、ここに述べた模型魚の場合と同様の傾向が認められた。

3.2 腹腔内に生ずるひずみ

3.2.1 ひずみ波形

模型魚の腹腔内内臓部のひずみの波形の一測定例を

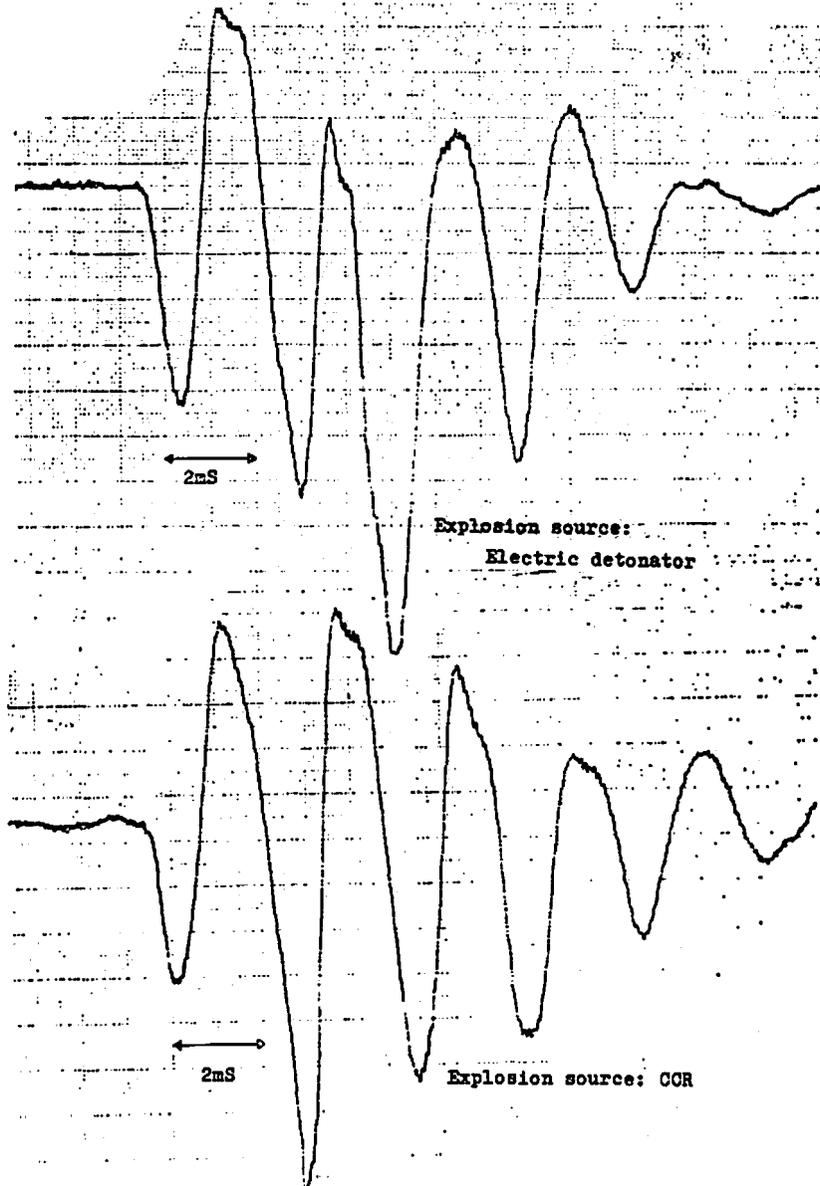


Fig. 8 Examples of wave form of strain wave measured at an angle of 45 degree to major axis of model fish on the surface of its viscera A.

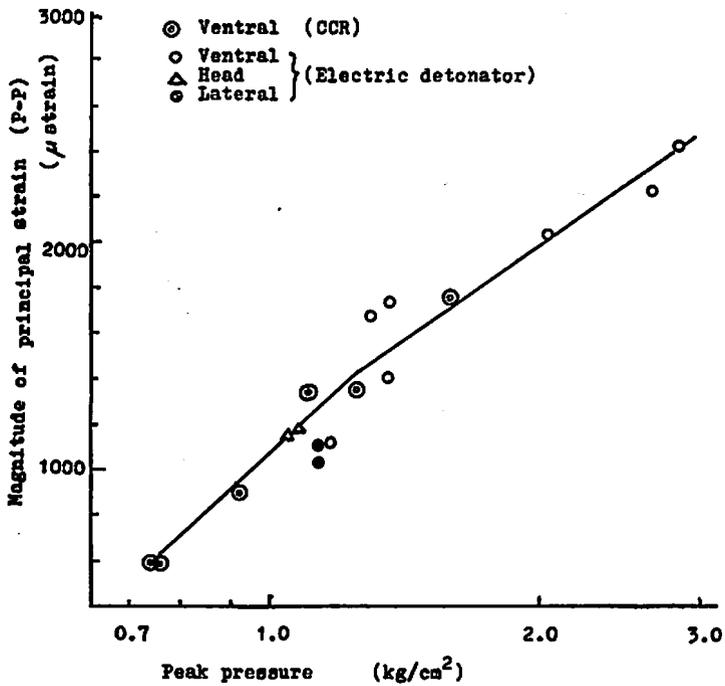


Fig. 9 Relation between peak value of pressure wave in the abdominal cavity of model fish and magnitude of principal strain on the surface of its viscera A.

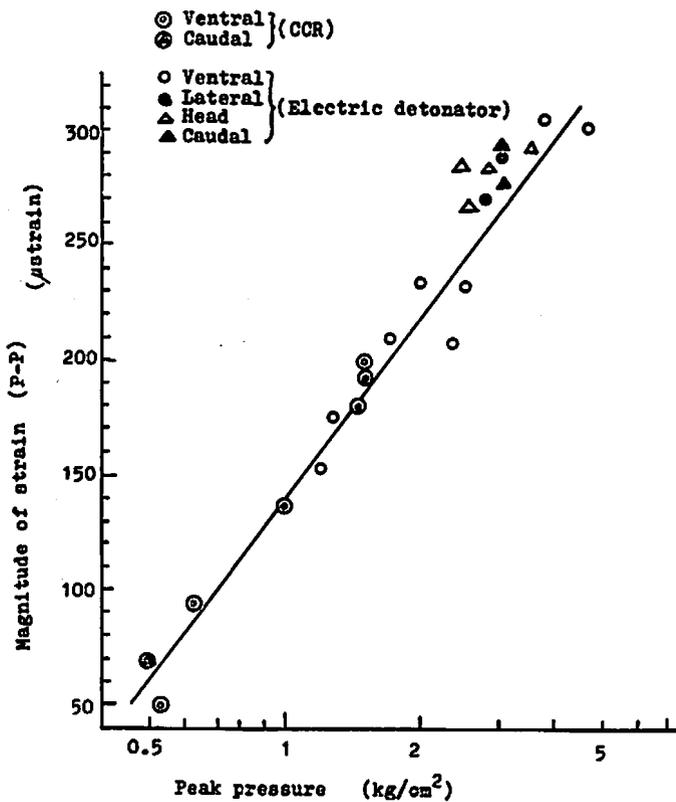


Fig. 10 Relation between peak value of pressure wave in the abdominal cavity of model fish and magnitude of strain on the inside of its viscera A.

Fig. 8 に示す。S₁~S₃ のいずれも Fig. 8 に示すような振動波形であり、また爆源が電気雷管、コンクリート破砕器のいずれであってもよく似た波形を得た。このことより、模型魚に入射する水中圧力波の波形の違いは内臓部に生ずるひずみの波形にほとんど影響を与えないことがわかる。

3.2.2 ひずみの大きさ

前項までの検討結果より、水中圧力波により魚類に生ずる損傷の程度ならびにその腹腔内圧力波のピーク圧は水中圧力波のエネルギー密度との間に良い相関性があることが明らかになった。したがって、水中圧力波による魚類の損傷は腹腔内圧力波のピーク圧と相関性があるものと考えられる。そこで、模型魚の腹腔内ひずみと腹腔内圧力波のピーク圧との関係について考察する。今回の実験では、模型魚の腹腔内に圧力計とひずみゲージを同時に取りつけることは困難であったので、圧力とひずみを別々に測定した結果を使って両者の関係を求めた。Fig. 5 の関係を最小自乗法で整理すると、次式に示す関係となる。

$$\left. \begin{aligned} FP_m &= 0.708 E_f^{0.423} (\text{爆源: 電気雷管}) \\ FP_m &= 0.558 E_f^{0.420} (\text{爆源: コンクリート破砕器}) \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 FP_m : 腹腔内圧力波のピーク圧 (kg/cm²)

E_f : 水中圧力波のエネルギー密度 (J/m²)

腹腔内ひずみ測定時の水中圧力波のエネルギー密度値を(1)式に代入することにより腹腔内圧力波のピーク圧を求め、その値とひずみの大きさ (Peak to Peak) との関係を図. 9 および Fig. 10 に示した。Fig. 9 には内臓A部の表面に取りつけた3軸ゲージの測定結果から平面ひずみ解析によって求めた主ひずみについて、また Fig. 10 には内臓A部の内部に生じたひずみについての関係を示した。これらの図において模型魚が水中圧力波を受けた方向を Ventral(腹部), Lateral(腹側部), Head(頭部), Caudal(尾部)として示した。Fig. 9, Fig. 10 は、腹腔内圧力波のピーク圧と内臓A部のひずみとに相関性があることならびにこの関係は模型魚に作用する圧力波の波形の影響を受けないことが示されている。また、図には示さなかったが、内臓B部のひずみについても同様な結果が得られた。ひずみの振幅の最大値 ϵ (μ strain) と腹腔内圧力波のピーク圧 FP_m (kg/cm²) との関係を最小自乗法によって整理すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \text{内臓A部の内部におけるひずみ:} \\ \epsilon &= 139 + 113 \ln FP_m \\ \text{内臓A部の表面における主ひずみ:} \\ \epsilon &= 1140 + 1200 \ln FP_m \\ \text{内臓B部の内部におけるひずみ:} \\ \epsilon &= 46.5 + 26.2 \ln FP_m \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{内臓B部の表面における主ひずみ:} \\ \epsilon &= 1000 + 227 \ln FP_m \end{aligned} \right\} (2)$$

(2)式より、腹腔内に生じた圧力の対数値の増分に対するひずみの振幅の増加率 $d\epsilon/d(\ln FP_m)$ の値は、内臓B部より内臓A部の方が大きいことがわかる。一方、水中圧力波のエネルギー密度が 200 J/m² を越えると重態魚が多く出現する^{2),3)}。そこで、電気雷管を爆源とした場合についてエネルギー密度 200 J/m² の水中圧力波による模型魚内臓部のひずみを(1)式および(2)式によって求め Table 3 に示す。これより、内臓内部に比べて表面の方がはるかに大きなひずみが生ずることがわかる。

Table 3 Magnitude of strain on the viscera of model fish brought underwater pressure wave (Energy flux density = 200 J/m²).

Position	Strain (10 ⁻⁶ strain)
In. of visc. A	353
Sur. of visc. A	3420
In. of visc. B	96.2
Sur. of visc. B	1430

In. : Inside, Sur. : Surface, Vics. : Viscera

3.3.3 内部器官損傷と力学的応答との関係の考察

水中圧力波により損傷を受けた内部器官の組織の顕微鏡写真の一例を図. 11 に示す。この図は、臓器内部の組織には異常がなく、表面の組織が剝離していることを示している。一般に、水中圧力波を受けた魚の臓器は内部の組織に比べて表面の損傷がはるかに大きい。一方、模型魚実験では、内臓部のひずみは内部より表面の方がはるかに大きいことを示している。

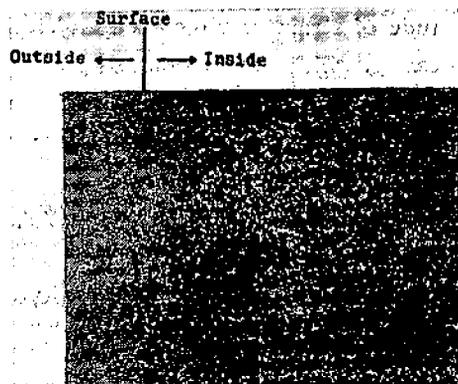


Fig. 11 Microphotograph of tissue of viscera of fish injured due to underwater pressure wave.

前報^{2),3)}で述べたように、実魚を対象とした実験では、水中圧力波の強さの増分に対する内臓器官の損傷程度増加率は、腎臓での値よりも肝臓での値の方が大きいという結果が得られたが、模型魚実験では、腹腔内圧力対数値の増分に対する内臓部のひずみの増加率が、肝臓や消化器（内臓B部）に比べて腎臓（A部）の方が大きいことを示している。

また、第1報¹⁾では、実魚の内臓器官の損傷指数は魚に作用する水中圧力波のエネルギー密度と良い相関関係にあることを示したが、模型魚実験では、水中圧力波のエネルギー密度、腹腔内圧力波のピーク圧ならびに内臓部のひずみの3者の間に比較的良い相関性が見られた。

以上のように、実魚内臓器官の損傷解析結果と模型魚内臓部の力学的応答測定結果を比較すると、内臓器官の損傷程度がそのひずみの大きさに依存すると考えれば、両者の結果はきわめてよく類似している。

4. 結 言

力学的性質が魚体と類似している模型魚を作り、これを用いて水中圧力波を受けた魚の体内を伝播する圧

力波ならびに内臓部に生ずるひずみの性状を調べ、実魚を用いて腹腔内圧力波を測定し、水中圧力波を受けた際の魚体内の力学的応答を検討した。そして、魚体内の力学的応答と魚の内臓器官損傷との関係について考察した。

その結果、魚体に作用する水中圧力波のエネルギー密度、腹腔内圧力波のピーク圧および内臓部のひずみの大きさの3者の間には相関性があることが明らかになった。また、内臓器管の損傷程度がそのひずみの大きさに依存すると考えれば、実魚を用いた実験の解析結果と模型魚実験の測定結果はきわめてよく対応していることがわかった。

最後に、本研究を行うにあたり多大の御助力を頂いた水産庁南西海区水産研究所阪口清次博士、淡水区水産研究所藤谷超博士ならびに本州四国連絡橋公団の関係者各位に感謝する。

参考文献

- 1) 小川, 福山, 伊藤: 工業火災, 37, p.291 (1976)
- 2) 小川, 福山, 阪口: 工業火災, 38, p.349 (1977)
- 3) 小川, 福山, 阪口: 工業火災, 39, p.195 (1978)

A study on injury to fish due to underwater pressure wave (IV)

by Terushige Ogawa*, Ikuo Fukuyama* and Ichiro Ito**

Injury to fish due to underwater pressure wave is discussed based on the dynamic response of fish body. Pressure wave in the abdominal cavity of actual and model fish and strain wave in viscera of model fish were measured. Magnitude of strain of viscera depends on peak value of pressure wave in the abdominal cavity, which nearly depends on the energy flux density of underwater pressure wave. And an injury degree of internal organs of fish is thought dependent on the magnitude of strain of viscera in the fish.

(*Faculty of Engineering, Yokohama National University, 2-3-11, Ooka, Minami-ku, Yokohama, Japan.

**Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, Japan)