

水中衝撃圧の魚類に及ぼす損傷機構 に関する研究—I.

魚体腹腔内における衝撃波の特性

梅 沢 敏・阪 口 清 次・福 原 修
藤 谷 超*・小 川 輝 繁**

Studies on the Damage Formation Mechanisms of Submerge Explosion on Fish-I.

Characteristics of Pressure Wave in Body Cavity of Fish

Satoshi UMEZAWA, Seiji SAKAGUCHI, Osamu FUKUHARA,
Masaru FUJIYA and Terushige OGAWA

It was shown in a previous paper (SAKAGUCHI et al. 1976) that the harmful effects of underwater explosions to several fishes was correlated to energy flux density of underwater pressure waves, even if the pressure wave form of the explosion was different.

In the present paper, some experiments were carried out to investigate the dynamic responses of underwater explosion in the abdominal cavities of the marine fishes, *Seriola quinqueradiata*, yellowtail, red sea bream, *Chrysophrys major*, rock fish, *Sebasticus marmoratus*, greenlings, *Hexagrammos otakii*, sea eel, *Astroconger myriaster* and file fish, *Navodon modestus*. Electric detonator and concrete crackers (CCR) were used as explosion sources. The following results were obtained:

- 1) Electric detonator and CCR show quite different forms of underwater pressure wave, but are a similar form in the abdominal cavity, and those on both lobes of the liver and kidney also show a similar trend.
- 2) The peak pressure of pressure wave in the abdominal cavity decreased to about 10% of the underwater pressure wave for the electric detonator, and about 50% for CCR.
- 3) Different forms of the underwater pressure waves were observed for electric detonator and CCR, however, the peak pressure in the abdominal cavity is correlated to energy flux density in the underwater pressure wave.
- 4) The reduction in the peak pressure of the underwater pressure wave found in the abdominal cavity did not differ greatly between the species of fishes examined.

阪口ら¹⁾は、水中圧力波が魚類の内部器官に及ぼす影響を検討した。その結果、水中圧力波の波形特性と魚体損傷影響との関係は、同じ圧力最高値でも波長の長い圧力波のほうが魚類に対してより大きな損傷を与えること、および波形が著しく異なる圧力波であっても水中圧力波のエネルギー密度と魚体の損傷程度との間に正の相関がみられることを明らかにした。

本報では、上記事項をさらに検討するために、魚類の腹腔内に圧力計を埋め込み、水中圧力波に対する魚体内の力学的応答と、内部器官の損傷機構について考察した。

稿を草するにあたり、水中発破問題検討委員会委員長として終始御指導いただいた南西海区水産研究所長、花村宣彦博士ならびに実験に際して水中圧力波の測定解析について御指導いただいた横浜国立大学教授、福山郁生博士に心から感謝の意を表す。

また、本実験は水産資源保護協会の中発破問題検討委員会と連携して行なわれたものであり、試験実施のうえで有益な助言と協力をいただいた庄野五一郎会長ならびに吉田修二郎参事に深謝する。

材 料 お よ び 方 法

実験には、ハマチ、マダイ、アイナメ、カサゴ、ウマズラハギおよびアナゴの6種の形態の異なる海産魚を供試した。供試魚は生きたものを取り上げ、直ちに凍結し、実験直前に解凍した。実験は1977年8月6日から10日まで、東京大学工学部安全工学科実験場内の実験水槽（5×3×3.5m）を使用して実施した。

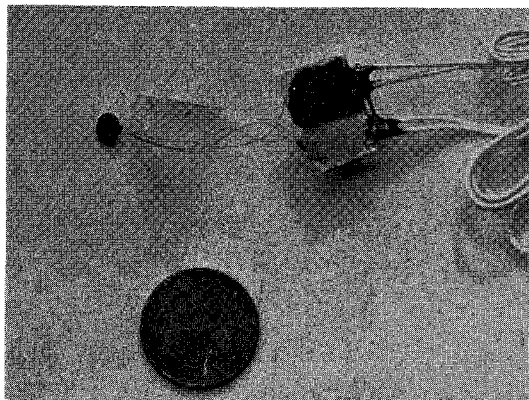


Fig. 1. The pressure gauge used in this experiment.

腹腔内の圧力測定には歪ゲージ型圧力計（Fig. 1 共和電業社製PS-10型）を用いた。圧力計の大きさは、直径6mm、厚さ0.6mmである。圧力計の魚体内装填部位は、ハマチでは肝臓の左右両葉の表面および腎臓部表面で、ハマチ以外の魚種は肝臓左葉表面である。装填方法は、それぞれの部位に接着剤で接着させ、リード線を筋肉内に埋め込んで縫合し、さらに接着剤で密着した（Fig. 2）。

実験魚はガーゼで軽く包み、真珠養殖用段籠を改良した保持籠に入れて水中に吊り下げた。受圧方向は左腹側部とした。

爆源としては、6号電気雷管とコンクリート破砕器（旭化成社製CCR2号 薬量30g 以下CCRと略す）を用いた。ハマチについては両爆源を用いて、異なる水中圧力波に対する腹腔内の力学的応答および腹腔内の位置によるその違いについて、その他の魚種については電気雷管を使用して、腹腔内の力学的応答の魚種間の差異について観察した。

魚体外の水中圧力波の測定にはトルマリンゲージを用いた。測定系統は阪口ら¹⁾と同様である。腹腔内圧

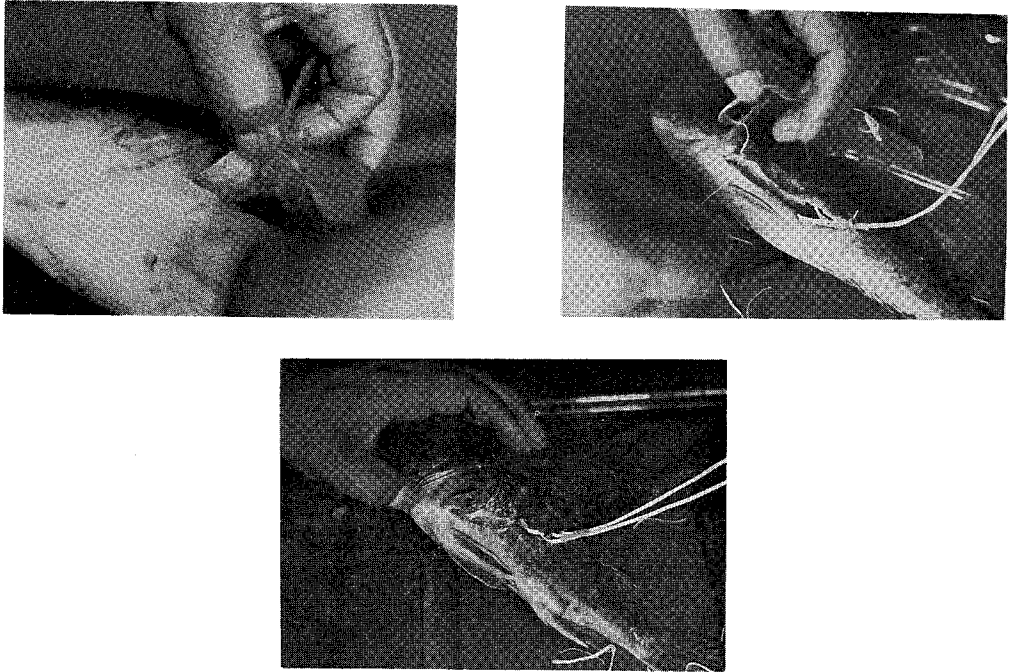


Fig. 2. Operational procedure to insert the pressure gauge to abdominal inside of the examined fishes.

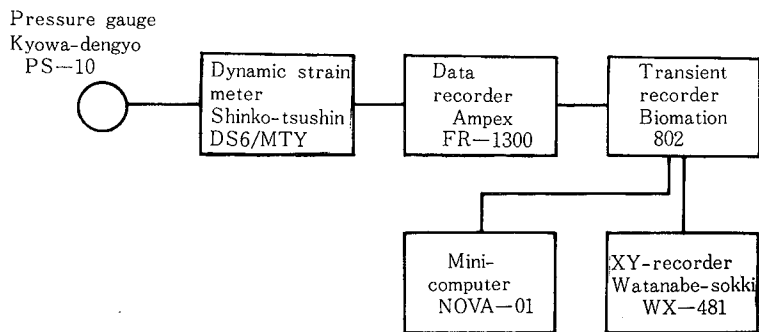


Fig. 3. Block diagram of pressure measurement system.

力波の測定系統は Fig. 3 に示したように、圧力計から動歪計（新興通信社製 DY6/MTY）を通してデータレコーダー（Ampex 製 FR-1300）およびトランジェントレコーダー（Biomation 802）に記録させた。また、別に X-Y レコーダー（渡辺渡器 WX-481）を使って再生し、小型電子計算機（NOVA-01）を用いてデータ処理を行なった。

結 果

1) 腹腔内圧力波形について

電気雷管と CCR の水中圧力波形およびハマチ腹腔内における圧力波形の 1 例を Fig. 4 に示した。腹腔

内の腎臓と肝臓における圧力波形と魚体入射前の水中圧力波形は著しく異なっている。すなわち、電気雷管を用いた場合、水中圧力波の立上り時間は数 μs 以下、正圧部の持続時間（パルス幅）は約 $50\mu\text{s}$ であるが、腹腔内圧力波は腎臓部表面では波動の立上り時間約 $750\mu\text{s}$ 、パルス幅 2ms となっている。一方CCRでは水中圧力波の立ち上り時間は $20\sim 600\mu\text{s}$ 、パルス幅は約 2ms であるが、腎臓部表面の圧力波の立ち上り時間は約

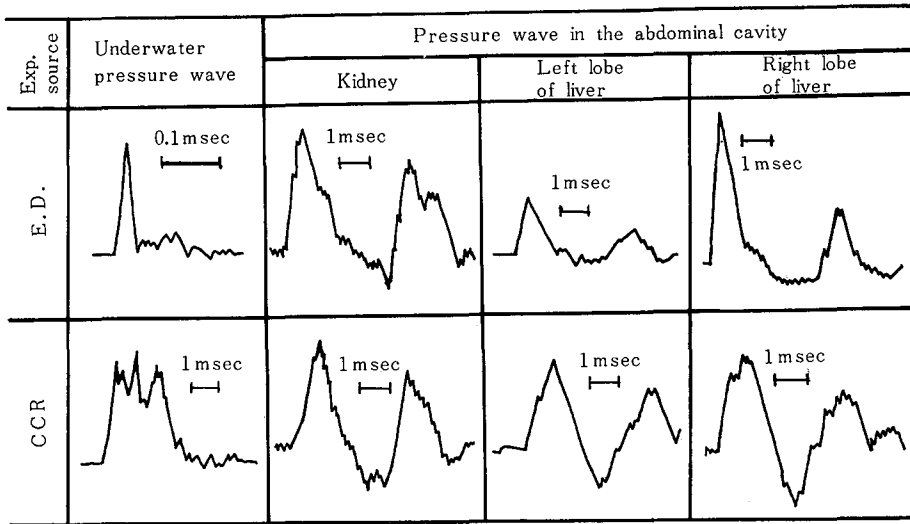


Fig. 4. Examples of wave form of underwater explosion both in the water and in abdominal cavity, the kidney and liver observed in the yellowtail.

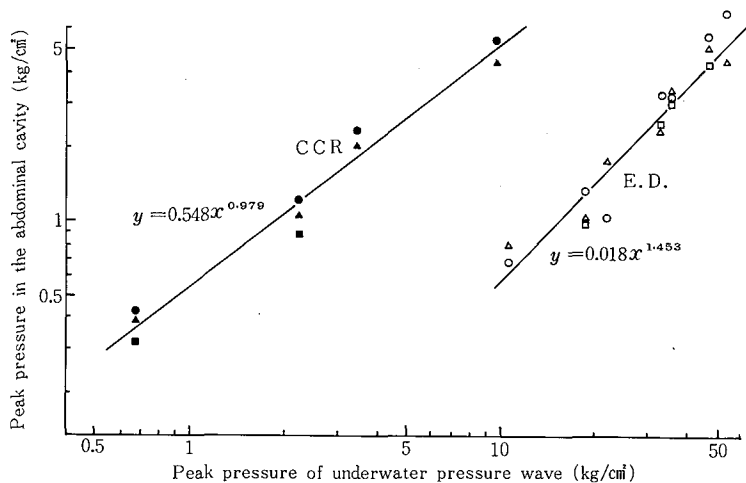


Fig. 5. Relationship between peak pressure of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of the yellowtail. The values shown as the open and closed circles are measured on the kidney, those of squares are on the left lobe of liver and triangles for the right. CCR, concrete cracker; E.D., electric detonator.

Table 1. The records of measurement of underwater pressure wave and those in the abdominal cavity.
P, peak pressure(kg/cm²); I, impulse(g/cm·S); Ef, energy flux density(J/m²); Numbers in parentheses show percentage of peak pressure in the abdominal cavity to that of underwater pressure wave.

Exp source	Underwater pressure wave			Pressure wave in the abdominal cavity											
				Kidney				Left lobe of the liver				Right lobe of the liver			
	P'	I'	Ef'	P	I	Ef	P	I	Ef	P	I	Ef	P	I	Ef
E.D.	10.4	380	11.2	0.69 (6.6)	606	1.82	0.83 (8.0)	593	2.09	—	—	—	—	—	—
	18.9	605	45.2	1.34 (7.1)	1,420	8.88	1.05 (5.6)	1,262	6.17	1.04 (5.5)	1,330	7.04	—	—	—
	21.8	795	42.5	1.03 (4.7)	1,000	4.63	1.84 (8.4)	1,400	10.3	—	—	—	—	—	—
	32.4	912	131	3.14 (9.7)	2,540	35.9	2.35 (7.3)	2,500	28.0	2.40 (7.4)	2,560	29.3	—	—	—
	35.0	1,130	141	3.24 (9.3)	3,180	41.9	3.46 (9.9)	2,160	33.0	3.80 (8.8)	1,920	26.1	—	—	—
	46.3	1,300	183	5.62 (12.1)	3,840	101	5.07 (11.0)	5,820	130	4.32 (9.3)	3,880	76.4	—	—	—
53.8	2,340	287	6.87 (12.8)	4,000	128	4.35 (8.1)	3,310	76.4	—	—	—	—	—	—	
CCR	0.68	768	2.23	0.42 (62.4)	564	1.19	0.93 (58.5)	620	1.21	0.31 (46.0)	460	0.72	—	—	—
	2.24	1,100	5.31	1.32 (58.9)	1,130	6.83	1.08 (48.2)	1,210	6.01	0.87 (39.6)	997	4.45	—	—	—
	3.50	1,910	14.0	2.45 (70.0)	2,210	24.7	2.00 (57.7)	2,780	29.5	—	—	—	—	—	—
	9.62	6,190	112	5.50 (57.2)	5,200	130	4.45 (47.3)	6,200	140	—	—	—	—	—	—

700 μ s, パルス幅は約2.6msとなっている。

このように電気雷管と CCR による水中圧力波では, パルス幅に顕著な差が認められるが, ハマチの腹腔内の腎臓部表面における両者の圧力波形にはほとんど差がみられない。また, 肝臓左右両葉表面における両者の圧力波形には多少の差がみられるものの, 水中圧力波の違いに比べれば著しく小さい。

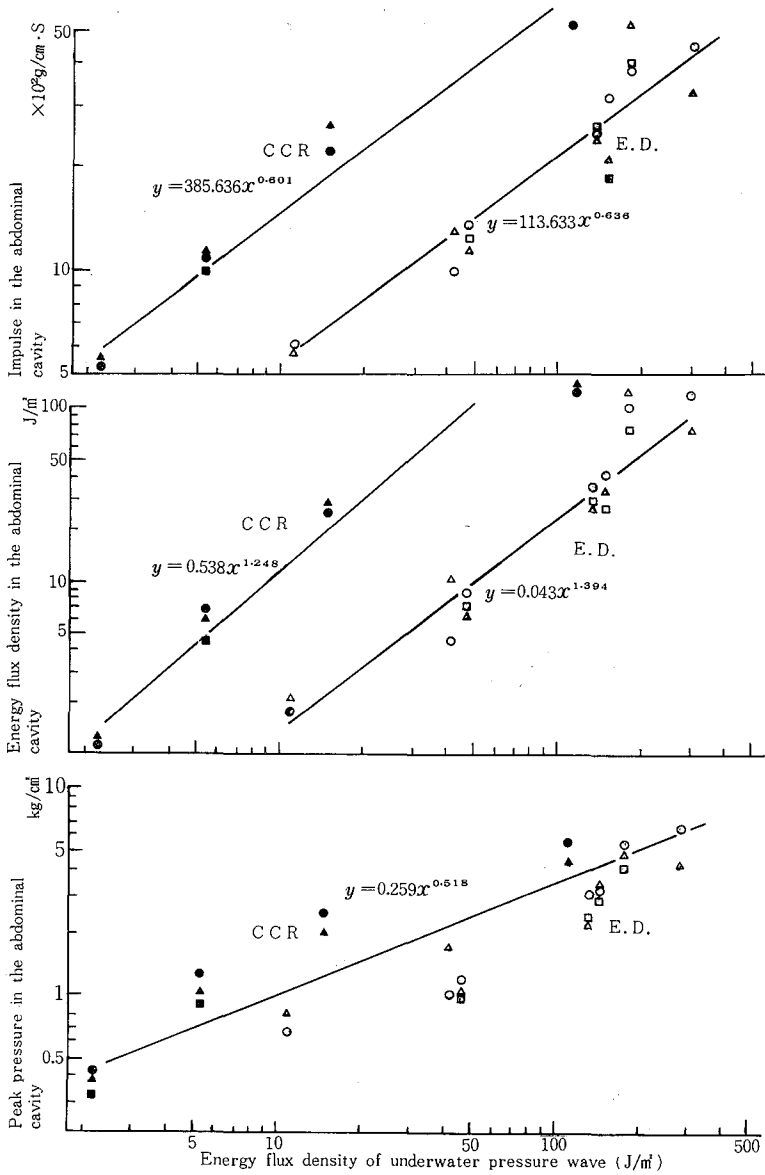


Fig. 6. Relationship between energy flux density of underwater pressure wave and peak pressure, impulse and energy flux density in the abdominal cavity of the yellowtail. Symbols in the figure are same as the Figure 5.

2) 腹腔内圧力波の大きさについて

電気雷管および CCR の爆発による水中圧力波のピーク圧と、ハマチ腹腔内圧力波のピーク圧の関係を Fig. 5 に示した。爆源の種類が同一であれば、水中と魚体内のピーク圧の間には相関が認められる。両爆源の腹腔内における圧力波と、水中圧力波のピーク圧を比べると、電気雷管で 95~90%、CCR で約 50% が減衰している。すなわち、パルス幅の短い電気雷管ではピーク圧の減衰が大きいものに対して、パルス幅の長い CCR ではピーク圧の減衰は小さく、水中圧力波がかなり強い状態で腹腔内へ伝わることを示している。

Fig. 6 に水中圧力波のエネルギー密度と腹腔内圧力波の諸特性との関係を示した。水中圧力波のエネルギー密度と、腹腔内圧力波のインパルスおよびエネルギー密度の関係では、電気雷管と CCR では異なったものであるが、ピーク圧との関係では両者は同一直線式によって表わされる。このことから、水中圧力波の波形の異なる両爆発であっても腹腔内のピーク圧で比較すれば、魚の損傷状態を同じ基盤の上で論ずることができる。

3) 各魚種における腹腔内圧力波について

ハマチのほか、マダイ、カサゴ、アイナメ、ウマズラハギおよびアナゴの肝臓左葉表面に圧力計を取りつ

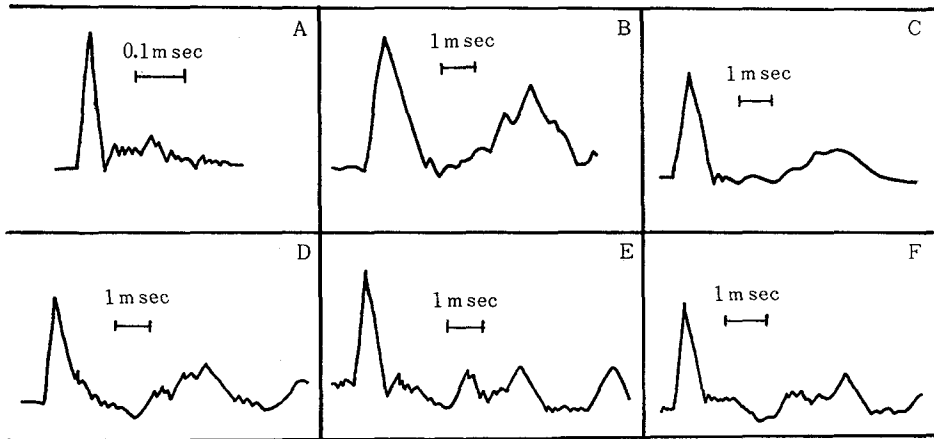


Fig. 7. Examples of wave form of underwater wave and pressure waves in the abdominal cavity, left lobe of liver in various fishes; A, underwater; B, *C. major*; C, *S. marmoratus*; D, *H. otakii*; E, *N. modestus*; F, *A. myriaster*.

Table 2. Rise time and pulse width of pressure wave in abdominal cavity by electric detonator.

Species	Rise time (μ s)	Pulse width (μ s)	Species	Rise time (μ s)	Pulse width (μ s)
Red sea bream	450	1,370	File fish	290	630
Greenlings	420	1,340	Sea eel	400	790
Rock fish	480	870			

け、左腹側部から受圧させた場合に得られた圧力波形を Fig. 7 に、圧力波の立ち上がり時間とパルス幅を Table 2 にそれぞれ示した。

腹腔内の肝臓部における圧力波の立上り時間は、ウマズラハギを除く各魚種では約400~500 μ sの範囲である。また、パルス幅は魚種によってかなりの差があるが、これを形態的にみると体幅の厚い魚種ほど持続時間が長くなる傾向がみられた。

水中圧力波と腹腔内圧力波のそれぞれのピーク圧を Table 3 に示したが、その減衰率は87~91%であり、魚種間の差はほとんどみられなかった。

Table 3. The records of measurement of peak pressure and energy flux density in the abdominal cavity and that of underwater pressure wave for various fishes.

Species	Underwater pressure wave		Pressure wave in the abdominal cavity (left lobe of liver)	
	P'	Ef'	P (P/P'×100)	Ef
Red sea bream	39.8	149	3.93 (9.7)	62.0
	35.2	141	4.53 (12.9)	74.1
Greenlings	39.8	149	3.76 (9.4)	34.4
	35.2	141	4.20 (11.9)	45.0
Rock fish	39.8	149	4.56 (11.5)	45.5
	35.2	141	3.80 (10.8)	35.5
File fish	33.4	138	3.82 (9.9)	27.5
Sea eel	38.4	138	4.31 (11.2)	36.5
	38.3	140	3.76 (9.8)	28.3

考 察

被爆による魚類の内部器官の損傷は、魚体に加わる水中圧力波のエネルギー密度と相関があることはすでに明らかにした。本実験では水中圧力波に対する生鮮魚の腹腔内での圧力を測定し検討した結果、腹腔内圧力波のピーク圧が水中圧力波のエネルギー密度とよく相関していることが判った。このことから、魚類の内部器官の損傷については、腹腔内圧力波のピーク圧が深く関与していると考えられる。

また、体形の異なる魚種での腹腔内圧力波のピーク圧には大きな違いがないことが明らかになった。しかし、実際の被爆による損傷には大きな差異がみられる。この点に関しては内部器官の位置関係、組織の粗密また受圧方向などによる損傷の受けかたの相違が関与しているものと推考される。

摘 要

水中圧力波の魚類に及ぼす影響の機構を明らかにするため、魚体内に伝播する圧力波の様相を、電気雷管とCCRを爆源として数種の高産魚を用いて検討した。

得られた結果はつぎのとおりである。

- 1) 電気雷管とCCRの水中圧力波形は大きく異なっているにもかかわらず、実験魚の腹腔内における圧力波形にはほとんど差がみられない。また、肝臓左右両葉、腎臓部の表面での位置による相違も小さい。

- 2) 水中圧力波のピーク圧と、腹腔内圧力波のピーク圧の関係をみると、パルス幅の短い電気雷管でピーク圧の減衰は大きい、パルス幅の長い CCR ではその減衰は小さく、水中圧力波が強い状態で腹腔内へ伝わる。
- 3) 爆源が異なる電気雷管と CCR においても、腹腔内圧力波は両者とも類似した波形を示す。すでに明らかにしたように損傷状態は水中圧力波のピーク圧との関連で論ずることができる。このことは異なる工法の発破であっても、腹腔内圧力波のピーク圧をもってすれば水中圧力波の魚類への損傷影響を同一の基盤で論議できることを意味している。さらに、水中圧力波のエネルギー密度と腹腔内圧力波のピーク圧の関係を検討した結果、両者の間には相関が認められた。
- 4) マダイ、カサゴ、アイナメ、ウマズラハギ、アナゴにおいても、水中圧力波に対する腹腔内圧力波の減衰はほぼ同じで、魚種による差はほとんどみられなかった。

文 献

- 1) 阪口清次・福原修・梅沢敏・藤谷超・小川輝繁, 1976: 水中発破の水産生物に及ぼす影響. 本誌(9), 33-65.