

水中圧力波による魚類の損傷 (第3報)

一魚種による損傷の差異一

小川輝繁*, 福山郁生*, 阪口清次**, 奈良平俊彦***

水中爆破に伴う水中圧力波による魚の損傷が魚種すなわち魚の形や内部器官の構造の違いによって、どのような差があるかについて、水槽実験および現場実験によって得られた実験結果を整理するとともに腹腔内圧力波を測定することによって検討した。供試魚として、コイ、タケノコメバル、マダイ、カレイ、アイナメ、カサゴ、メバル、スズキ、アナゴ、ウナギおよびウマヅラハギを使って調べた結果、水中圧力波による魚の損傷にはうきぶくろおよび腎臓の形態が重要な役割を果していることが明らかとなった。すなわち、立派なうきぶくろをもち、腎臓が埋没型の魚は、それが欠除した魚にくらべて水中圧力波に対する抵抗力が非常に弱い。これは前者の腎臓やうきぶくろが水中圧力波により損傷を受けやすいことによるものである。

1. 緒言

水中爆破に起因する水中圧力波を受けた魚の内部器官の損傷について、圧力波形の影響¹⁾、魚の内部器官別の損傷の程度の差異²⁾について検討した。一方、魚の形態、内部構造はその種類によってかなり大きな差があり、水中圧力波による損傷も魚類によって差が見られる。

本研究では、魚種すなわち魚の形態や内部構造の違いが水中圧力波による魚の損傷にどのように影響するかについて検討した、その手法としては、前二報で述べた水槽実験のほかに、魚種および条件の異なるものとして本州四国連絡橋公団が愛媛県の大三島ならびに香川県の坂出沖で実施した現地実験で得られた魚の損傷のデータを加えて整理するとともにあらたに魚の腹腔内圧力波を測定することによった。

なお、本報告では水中圧力波のエネルギー密度の単位 Joule/m^2 を J/m^2 と表わした。

また、本研究で使用した魚種は次のとおりである。

ハマチ	Young yellowtail
	<i>Seriola quinqueradiata</i>
アイナメ	Rock trout
	<i>Hexagrammos otakii</i>
カサゴ	Comon rockfish
	<i>Sebasticus marmoratus</i>

メバル	Black rockfish <i>Sebastes inermis</i>
カレイ	Flat fish <i>Pleuronichtys cornutus</i>
スズキ	Common sea bass
	<i>Lateolabrax japonicus</i>
マアナゴ	Conger <i>Conger myriaster</i>
ウナギ	Eel <i>Anguill japonica</i>
マダイ	Red sea bream <i>Pagrus major</i>
コイ	Carp <i>Cyprinus carpio</i>
ウマヅラハギ	Filefish <i>Navodon modestus</i>
タケノコメバル	<i>Sebastes oblongus</i>

2. 実験方法

2.1 大三島における実験

昭和47年3月～6月の間には合計8回の試験爆破を実施した。その際、イケースに収容した魚を数ヶ所に配置して、水中爆破による魚の損傷について調べた。

試験爆破の詳細については実験報告書³⁾に記載されているので、ここでは本研究に関連ある事項について簡単に述べておく。8回の実験のうち魚を設置したのは、第1回、第2回、第4回および第5回の計4回である。供試魚にはタケノコメバル、ハマチおよびアイナメの3種類の魚を使用し、これらの魚を直径1m、高さ0.7mの円筒型の網いけすに収容して、爆源から5～100mの範囲の数点に配置した。魚を設置した位置に圧力計を据えて、水中圧力波を測定した。

爆破はGX-1⁴⁾ダイナイトを使って、薬量18.75kg～74.25kgの一自由面爆破とした。

爆破後、供試魚は直ちに取り上げ、遊泳状態を観察

昭和53年2月27日受理

*横浜国立大学工学部安全工学科 〒105 横浜市南区大岡2-31-1

**水産庁南海海区水産研究所 〒739-04 広島県佐伯郡大野町丸石

***本州四国連絡橋公団 〒105 東京都港区芝西久保城山町

した後、冷凍して南西海区水産研究所へ輸送した。研究所に送られた供試魚はX線撮影して骨格の異常を観察した後、解剖して内部器官の損傷状態を観察した。

2.2 坂出沖における実験

昭和50年2月～3月の間に合計8回の試験爆破を実施したが、その際、水中爆破による魚の損傷について調べた。この試験爆破の詳細については実験報告書⁹⁾に記載されているので、ここでは本研究に関連ある事項について簡単に述べておく。

実験は一自由面せん孔爆破4回と無自由面せん孔爆破4回実施したが、一自由面爆破の際に魚の損傷について詳しく調査した。そこで、ここでは一自由面爆破の実験によって得られた実験結果を整理した。一自由面爆破の爆源には、薬量 240kg～1,520kg の GX-1 ダイナマイトを使用した。

供試魚には、カサゴ、メバル、カレイ、アイナメ、スズキ、アナゴおよびウナギを使い、これらの魚を直径 1m、高さ 0.6m の網いけすに収容して、爆源からの距離が 17m～1,000m の間の7測点に配置した。魚を設置した点には圧力計をセットして、水中圧力波を同時に測定した。

爆破後直ちに供試魚を取り上げ、遊泳状態を観察した。その後冷蔵して南西海区水産研究所へ運び、X線撮影と解剖観察を行った。

2.3 水槽実験

第1報¹⁾および第2報²⁾で述べた水槽実験の結果を整理した。

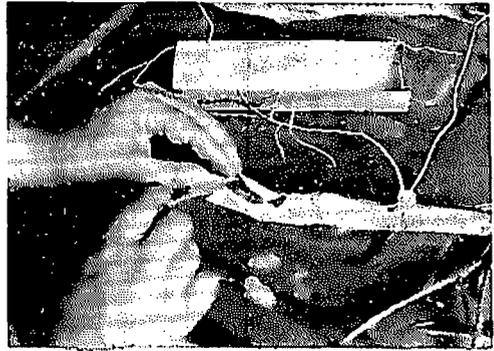
2.4 腹腔内圧力波の測定

供試魚の肝臓の左側面に小型圧力計を取りつけ、腹腔内圧力波の計測を行った。供試魚にはハマチ、アイナメ、カサゴ、ウマヅラハギ、マアナゴおよびマダイの6種類の魚を使用した。Table 1には、この実験に使った魚の大きさを示した。供試魚は冷凍して実験場へ搬入し、そこで解凍して実験に供した。

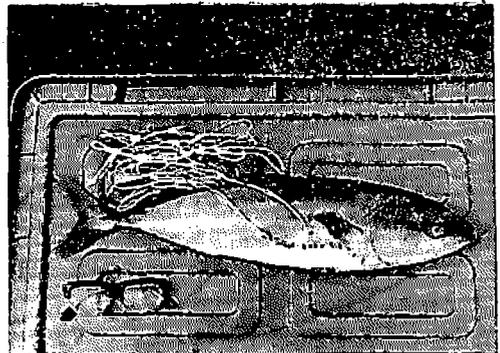
腹腔内圧力測定用のピックアップにはひずみゲージ型圧力計である共和電業社製 PS-10 型圧力センサーを用いた。ピックアップの出力信号は新興通信社製

Table 1 Length of fish used for experiments

Fish	Length (cm)
Young yellowtail	49.5
Rock trout	19.5
Conger	19.5
Red sea bream	24.0
Common rockfish	19.2
Filefish	21.0



(a)



(b)

Fig. 1 Fish showing the set up of pressure gauge

DS6/MTY 動ひずみ計を通して Biomation 802型トランジェントレコーダに記憶し、X-Y レコーダにより波形を記録するとともに、NOVA-01 ミニコンピュータを使ってデータ処理を行った。

Fig. 1 (a) は圧力センサーをアナゴに取りつけている図である。圧力センサーを魚に取りつけた後、開腹部は接着剤をつけた上で適合した (Fig. 1 (b))。圧力センサーを内蔵した供試魚は段ごとに固定して、供試魚の左側面が爆源の方向に向くようにして水槽内に設置した。

供試魚を設置した位置には、水中圧力波を測定するための圧力計を取りつけた。水中圧力波の測定にはトルマリンゲージを用い、圧力測定方法は第1報¹⁾で述べた方法に従った。

爆源には電気雷管3本を束にしたものを用い、これを水中に宙吊りにして爆発させた。また、爆源と供試魚の距離は 1m した。

3. 実験結果および考察

3.1 重態魚の出現率

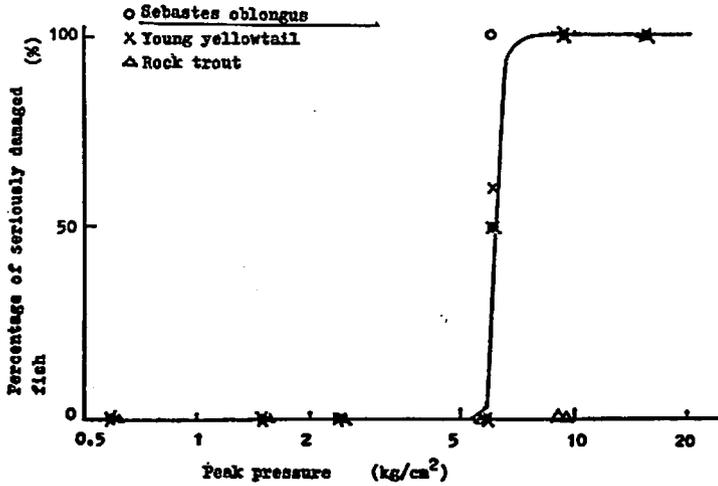


Fig. 2 Relation between percentage of seriously damaged fish and peak pressure of pressure wave

大三島での実験において、爆源からの水平距離が20 m以内に置いた魚は、その損傷程度にエアバブルカーテンの影響が見られるので、これ以遠に設置した魚について整理した。大三島実験では各測点における水中圧力波の圧力最高値を求めている。そこで、Fig. 2には、この実験で得られた水中圧力波の圧力最高値と重鰹魚の出現率との関係を魚種別に示した。なお、こ

で求めた重鰹魚の出現率は魚の供試尾数が4尾~11尾のものについて得られたものである。なお、重鰹魚の定義は第2報²⁾に示したとおりである。タケノコメバルおよびハマチの場合には、水中圧力波の圧力最高値が5kg/cm²を越えると重鰹魚があらわれ、6~7kg/cm²を越えるとほぼ100%が重鰹魚となる。一方、アイナメの場合には、ほぼ10kg/cm²の圧力最高値をもった

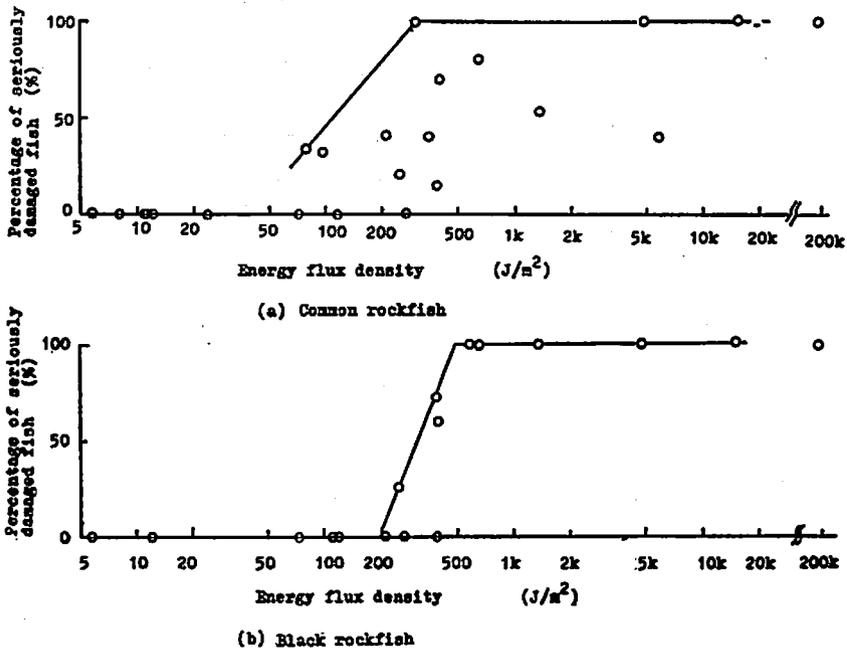


Fig. 3 (1) Relation between percentage of seriously damaged fish and energy flux density of pressure wave

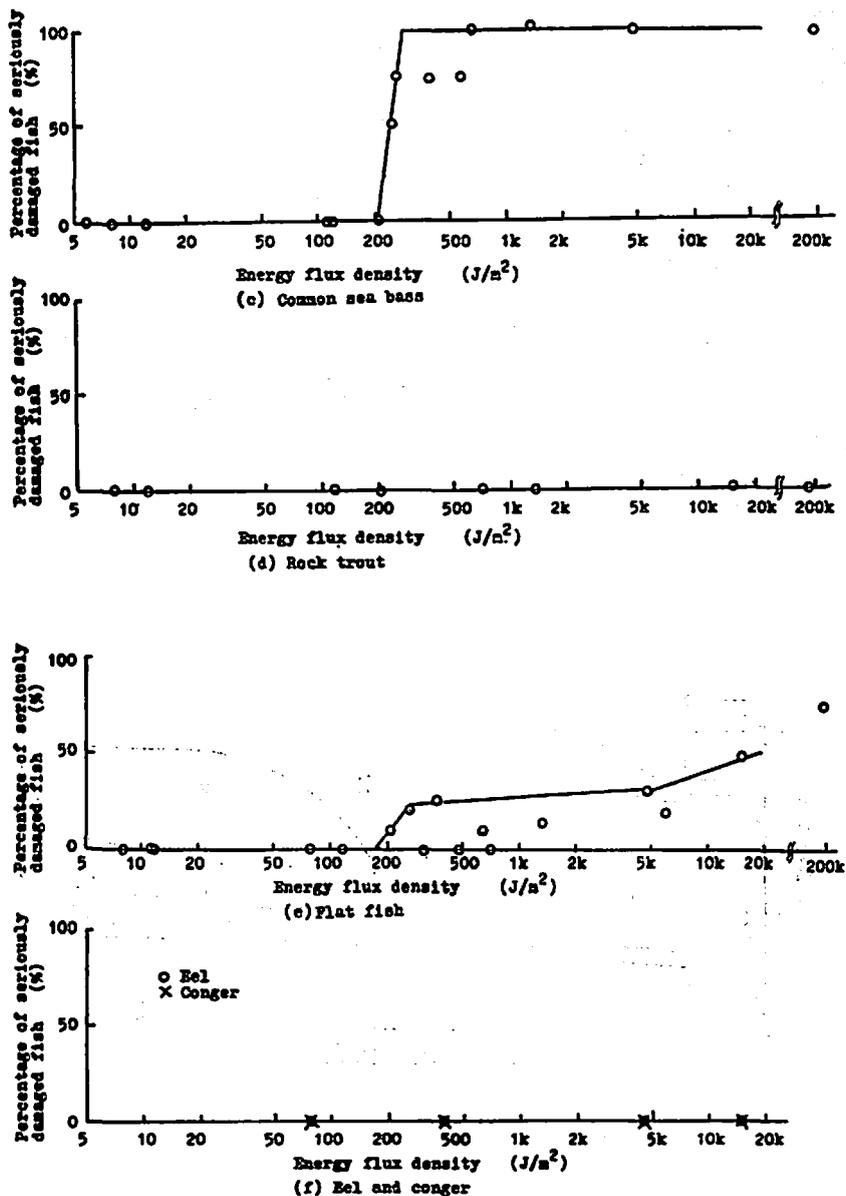


Fig. 3 (2) Continued

圧力波を受けても重傷魚は見られない。さらに、Fig. 2には示していないが、エアバブルカーテンの影響を受けたデータによれば、圧力最高値がほぼ $100kg/cm^2$ の圧力を受けてもアイナメの重傷魚は見られなかった。このように、水中圧力波に対する魚の抵抗力は魚種によって大きな差が見られる。そこで、さらに多くの魚種について検討するために、坂出沖での実験および水槽実験の結果を整理した。

第1報¹⁾で述べたように水中圧力波による魚の内部器官の損傷は圧力波のエネルギー密度との間により相

関が見られるので、Fig. 3にはカサゴ、メバル、スズキ、アイナメ、カレイ、ウナギおよびマアナゴについて、水中圧力波のエネルギー密度と重傷魚の出現率との関係を示した。Fig. 3にプロットした重傷魚の出現率は魚の供試数が4尾~11尾のものについて求めたものである。Fig. 3より、カサゴ、メバルおよびスズキは圧力波の強さが $50\sim 200J/m^2$ を越えると、重傷魚が見られるようになる。また、第2報²⁾のFig. 3からマダイ2才魚やコイの場合も圧力波の強さが $50\sim 200J/m^2$ を越えると、重傷魚が見られるようになる。一方、

うきぶくろが非常に小さい魚であるウナギやアナゴおよびそれが存在しない魚であるアイナメの場合は圧力波の強さがそれぞれ 15kJ/m^2 および 200kJ/m^2 となっても重態魚は見られない。カレイもうきぶくろをもたない魚であるが、この場合には、 200J/m^2 を越える水中圧力波を受けると重態魚が出現する。しかし、その出現率はよく発達したうきぶくろをもった魚にくらべてはるかに少ない。これらのことから強靱なうきぶくろをもった魚は、うきぶくろを欠除し、腎臓が埋没型の魚にくらべて水中圧力波に対する抵抗力がはるかに弱いことがわかる。

3.2 各内部器管の損傷程度

魚の肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓の損傷の程度を第1報¹⁾の Table 2 に示した基準にしたがって数値化した損傷程度で表わし、魚に加えられた水中圧力波の強さ別に求めた各魚種ごとの損傷程度の平均値と水中圧力波のエネルギー密度との関係を、それぞれ Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 および Fig. 7 に示した。これら

のデータは坂出沖で実施した実験の結果を整理したものであるが、カサゴについては第2報²⁾で述べた水槽実験により得られたデータも含めた。これらの図にプロットされた損傷程度はいずれも魚の供試数が 4~11 尾のものを平均したものである。

Fig. 2~Fig. 7 および第2報²⁾の Fig. 2 および Fig. 3 を見ると、水中圧力波の強さと内部器官の損傷程度との関係には、各魚種それぞれに個性的な特徴が見られる。たとえば、メバルは水中圧力波の強さが 200J/m^2 以下では肝臓とうきぶくろに若干の損傷が見られる程度であるが、 $200\text{J/m}^2 \sim 500\text{J/m}^2$ の間でうきぶくろ、腎臓、心臓および肝臓の損傷程度が急激に増加して、これ以上の強さの圧力を受けると、内部器官全体の損傷が著しくなる。そのため、メバルの重態魚の出現率は、圧力波の強が 200J/m^2 を越えると増加を始め、 500J/m^2 を越えると 100% となっている。また、カサゴ、スズキおよびマダイ 2 才魚の場合、圧力波の強さが $50 \sim 200\text{J/m}^2$ を越えると重態魚があらわれる

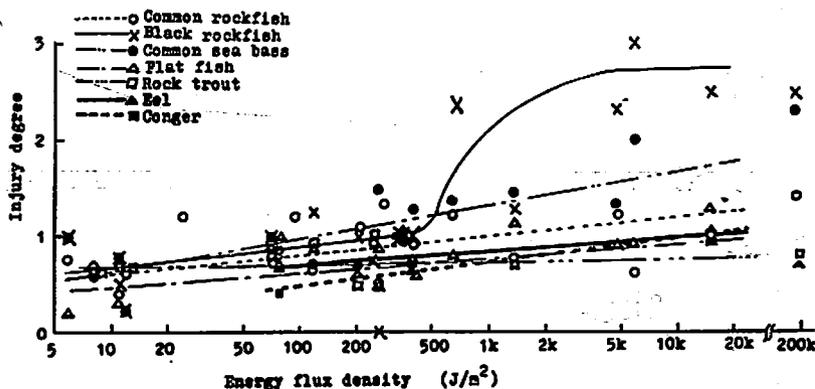


Fig. 4 Relation between injury degree of liver of fish and energy flux density of pressure wave

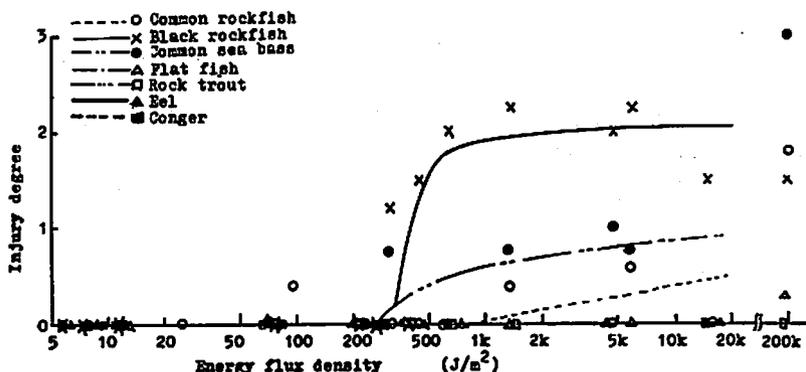


Fig. 5 Relation between injury degree of heart of fish and energy flux density of pressure wave

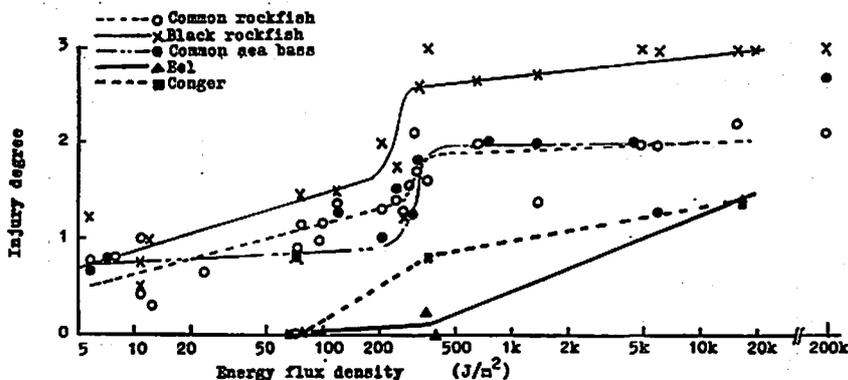


Fig. 6 Relation between injury degree of air bladder of fish and energy flux density of pressure wave

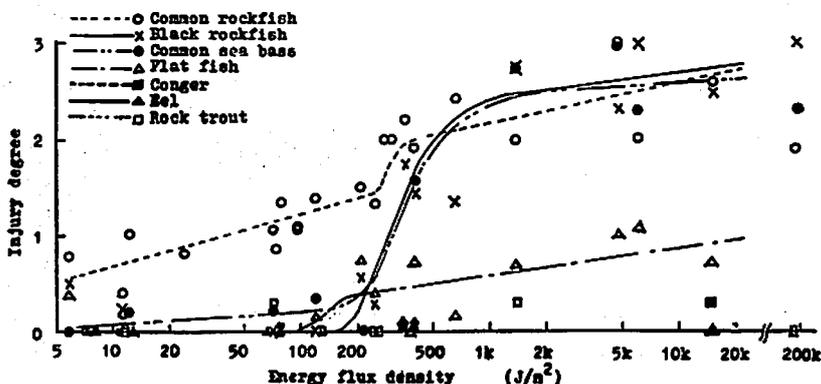


Fig. 7 Relation between injury degree of kidney of fish and energy flux density of pressure wave

よくなるが、この付近の強さの圧力波を受けると腎臓とうきぶくろの損傷が急激に増加している。そのため、これらの魚の場合には、腎臓やうきぶくろの損傷程度の増加が重態魚の出現に大きな役割を果たしているものと見なすことができる。コイの場合は、圧力波の強さが $50\text{J}/\text{m}^2$ を越えると、うきぶくろや腎臓の損傷が増加する。しかし、重態魚があらわれるのは $200\text{J}/\text{m}^2$ を越えてからであり、これは心臓の損傷程度が増加を始めるところと一致している。以上のように、よく発達したうきぶくろと腎臓をもった魚種では、水中圧力波の強さがある値を越えとうきぶくろや腎臓の損傷程度が急激に増加するが、これを興味ある現象である。

一方、うきぶくろが欠除し、腎臓が埋没型の魚の場合、肝臓の損傷程度にはカサゴ、マダイ2才魚、スズキ、コイのような立派なうきぶくろをもった魚の場合とほとんど差は見られないが、腎臓の損傷程度が小さいという特徴が見られる。カレイの場合には、圧力

の強さが $200\text{J}/\text{m}^2$ を越えると、腎臓に少し損傷が見られる。他の魚種では腎臓にこの程度の損傷を受けても重態魚は見られないが、カレイの場合は重態魚があらわれており、この魚にとって腎臓の損傷はへい死に結びつきやすいと考えられる。また、ウナギやマアナゴのうきぶくろの損傷は圧力波の強さが $200\text{J}/\text{m}^2$ を越えると少し見られるが、致命傷となる程のものではない。

以上のように、重態魚の出現率と各内部器の損傷との関係にはいくつかのパターンが見られるが、全体的には次のようなことがいえる。よく発達したうきぶくろと腎臓をもった魚は水中圧力波の強さがある値を越えると腎臓やうきぶくろの損傷が急激に増加し、そのために重態魚があらわれるようになる。一方、うきぶくろが痕跡しかみられないもの、またはそれを欠除した魚は、腎臓やうきぶくろが損傷を受けにくいので、水中圧力波に対する抵抗力が強く、アイナメの場合は約 $200\text{kJ}/\text{m}^2$ 、マアナゴやウナギの場合は約 $15\text{kJ}/\text{m}^2$

の強さを圧力波を受けても重症魚は見られない。また、メバルのような大きな肝臓をもった魚種は例外として、大部分の魚種においては、肝臓の損傷程度に魚種による差はほとんど見られない。

以上の結果、魚のうきぶくろは水中圧力波による腎臓の損傷に対して重要な役割を果していることがわかる。

3.3 腹腔内圧力波

測定された腹腔内圧力波の圧力形例を Fig.8に示す。供試魚に加わる水中圧力波の波形にくらべて、腹腔内圧力波では、立ち上がり時間、パルス幅ともに増加した波形となっており、腹壁や内臓によって圧力波が緩衝されていることがわかる。また、腹腔内圧力波の波形は魚種によって多少差が認められる。そこで、Table 2には Fig. 8 に示した波形から求めた初動の立ち上り

Table 2 Rise time and pulses width of pressure waves measured on the left side of livers of fish

Fish	Rise time (μ S)	Pulse width (μ S)
Red sea bream	450	1370
Rock trout	420	1340
Common rockfish	480	870
Filefish	290	630
Conger	400	790
Young yellowtail	400	1400

時間とパルス幅を示した。立ち上がり時間やパルス幅は腹壁の厚さや内臓部分の大きさにより影響されると考えられ、ウマヅラハギのように体幅の薄い魚は腹腔内圧力波の立ち上がり時間、パルス幅ともに短いという

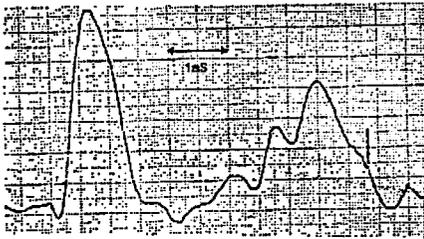


Fig. 8 (1) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of red sea bream



Fig. 8 (4) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of filefish



Fig. 8 (2) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of rock trout



Fig. 8 (5) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of conger

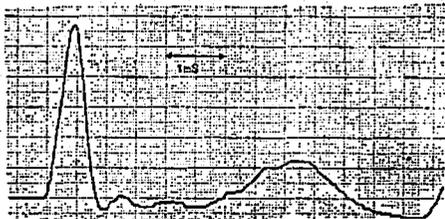


Fig. 8 (3) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of common rockfish



Fig. 8 (6) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of young yellowtail

Table 3. Properties of underwater pressure wave applied to fish and of pressure wave in their abdominal cavity

Fish	Underwater pressure wave			Pressure wave in abdominal cavity		
	P_m (kg/cm ²)	I (g/S·cm)	E_f (J/m ²)	P_m (kg/cm ²)	I (g/S·cm)	E_f (J/m ²)
Red sea bream	39.8	1950	149	3.93	3076	62.0
	35.2	1770	141	4.53	3310	74.1
Rock trout	39.8	1950	149	3.76	2098	34.4
	35.2	1770	141	4.20	2319	45.0
Common rockfish	39.8	1950	149	4.56	2064	45.5
	35.2	1770	141	3.80	1930	35.5
Conger	38.4	2100	138	4.31	1876	36.5
	38.3	2360	140	3.76	1945	28.3
Filefish	38.4	2100	138	3.82	1669	27.5
Young yellowtail	35.0	1130	141	3.46	2160	33.3

Note P_m : Peak pressure
 I : Impulse
 E_f : Energy flux density

特徴が見られる。水中圧力波に対して抵抗力が強い魚類と弱い魚種との間には、腹腔内圧力波の波形に特徴的な差は認められない。

Table 3には、供試魚に加えた水中圧力波の特性値と供試魚の腹腔内圧力波の特性値を示した。ここで、インパルスおよびエネルギー密度は第1報¹⁾で述べた方法によって求めたものである。ただし、供試魚の内臓の音速と密度が明らかでないため、腹腔内圧力波のエネルギー密度を求める際には水の密度と音速を使って計算したので、この値は相対値として取り扱うべきものである。

Table 2より、肝臓の側面における圧力波の圧力最高値には、うきぶくろの有無による差は見られないことがわかる。このことは、魚の肝臓の損傷程度にうきぶくろの有無による差は見られないという事実とよく一致している。

4. 結 言

水中圧力波による魚の損傷が魚種すなわち魚の体形や内部器官の構造の違いによって、どのような差があるかについて、水槽実験および現場実験によって得られたデータを整理するとともに腹腔内圧力波を測定することによって検討した結果、次のような点が明らかになった。

よく発達したうきぶくろと腎臓をもった魚は、水中圧力波の強さがある値を越えると急激に腎臓やうきぶ

くろの損傷程度が増加し、そのために重傷魚があらわれる。一方、うきぶくろを欠除し、腎臓が埋没型の魚種の場合は、腎臓やうきぶくろが損傷受けにくいので、水中圧力波に対する抵抗力が強く、アйнаメの場合には約 200kJ/m²、アナゴやウナギの場合は約 15 kJ/m² の強さの圧力波を受けても重傷魚は見られない。また、メバルのような肝臓の大きな魚は例外として、大部分の魚種において肝臓の損傷程度には魚種による差はほとんど見られない。また、肝臓側面で測定した圧力波の圧力最高値にはうきぶくろの有無による差は見られない。さらに、肝臓側面での圧力波の立ち上り時間やパルス幅にもうきぶくろの有無による差は全く見られない。

最後に本研究を行うにあたり、御指導いただいた京都大学工学部伊藤一郎教授および水産庁淡水区水産研究所水質病理部藤谷超部長に深く感謝する。

文 献

- 1) 小川輝繁, 福山郁生, 伊藤一郎: 工業火災, 37, p. 291 (1976)
- 2) 小川輝繁, 福山郁生, 阪口清次: 工業火災, 38, p. 349 (1977)
- 3) 本州四国連絡橋公団, 土木工業協会: 「本四連絡橋, 基礎工調査実験」(1972)
- 4) 本州四国連絡橋公団, 安全工学協会: 「水中発破による衝撃波等報告書」(1972)

5) 本州四国'連絡橋公団：「南化備讃瀬戸掘削 試験工事報告書」(1975)

6) 本州四国連絡橋公団，総合安全工学研究所：「水中発破の安全性の検討（その3）報告書」(1976)

A study on injuries to fish due to underwater pressure wave (III)

by Terushige Ogawa*, Ikuo Fukuyama*, Seiji Sakaguchi**
and Toshihiko Narahira***

The differences in damage to the intrrenal organs of fish caused by underwater pressure waves due to the differences in structure of the internal organs were studied.

That is to say, the study was made by arranging the results of water tank tests and site tests on the conditions of damages caused to the internal organs of fish and measuring the pressure waves in the abdominal cavity of fish.

The fish with evolved air bladders, such as red sea breams and common sea basses, were less resistant to underwater pressure waves than the fish, in which their air bladders are atrophied or do not exist, such as eels and rock trouts, owing to the fact that the air bladders or kidneys in the former group were more easily injured by the pressure waves.

(*Faculty of Engineering, Yokohama National University, 2-31-1, Ooka, Minami-ku, Yokohama, Japan.

**The Nansei Regional Fishers Research Laboratory, Maruishi, Oono-cho, Saeki-gun, Hiroshima, Japan.

***Honshu-Shikoku Bridge Authority, Shiba Nishikubo Shiroyama-cho, Minato-ku, Tokyo, Japan.)