

## 水中圧力波による魚類の損傷

小川輝繁, 福山郁生, 伊藤一郎

水中爆発や爆破に起因する圧力波による魚類の損傷について検討した。魚類の内部器官の損傷は受圧方向によって差が認められ、一般的には腹部や腹側部から受圧した場合、より損傷がひどく、腹部から受圧すると腎臓が、腹側部から受圧すると肝臓が損傷を受けやすい。圧力パルスがくり返し加わる場合はパルス間隔が 100mS 以内の時はくり返し効果は認められない。また、損傷の大きさは圧力波のエネルギー密度と相関性がある。

### 1. 緒言

水中爆発や水中爆破に伴って生ずる水中圧力波により魚類は損傷を受けるが、この問題に関する検討は従来からも断片的には実施されている<sup>1)</sup>。しかし、その機構についてはいまだ十分な研究はなされていない。従来の研究では、魚の損傷はすべて圧力最高値との関係で論じられているが、魚の生死の限界圧力値は文献によってかなりの差が見られる。たとえば、若園らの研究<sup>2)</sup>では、圧力最高値が 14kg/cm<sup>2</sup> の圧力波をスズキに加えてもへい死は見られなかったが、C.L. Hubbs らの研究<sup>3)</sup>では、圧力最高値が 5.5kg/cm<sup>2</sup> の圧力波がカタクチイワシやアジ類に加わった場合にはほとんどへい死している。この差が生ずる理由としては次のことが考えられる。

- (1) 魚種による違い
- (2) 受圧方向による差異
- (3) 圧力波形による影響

(1) について従来の研究をまとめると、魚の生死の限界圧力値は魚種によってかなり差があり、一般的には紡錘型の魚や骨格が比較的柔軟な構造からなっている魚、うきぶくろが欠除している魚は、圧力波に対して強い抵抗力を持っている<sup>4)</sup>。しかしながら、(2)および(3)に関しては検討されていない。そこで、本研究はこれらの点を明らかにする目的で行なった。

### 2. 圧力の受感方向の影響について

#### 2.1 実験方法

試験魚には淡水魚として水産庁淡水区水産研究所で養成した 2 年生コイを、海産魚としてマダイ(当才魚)およびカサゴを用いた。淡水魚の実験は東京大学工学

部安全工学実験所の実験水槽 (5m×3m×3.5m) で、海産魚の実験は水産庁南海海区水産研究所の水槽 (4m×4m×2m) で行なった。

供試魚は麻酔薬 (MS-222) で処理し、ガーゼで軽く包み、Fig. 1 に示す六段かごに収容して固定したものを、供試魚の頭部、腹部、腹側部、尾部あるいは背部が爆源の方向に向くように水槽に配置して、それぞれの方向から圧力を受けた場合の損傷の程度を比較した。

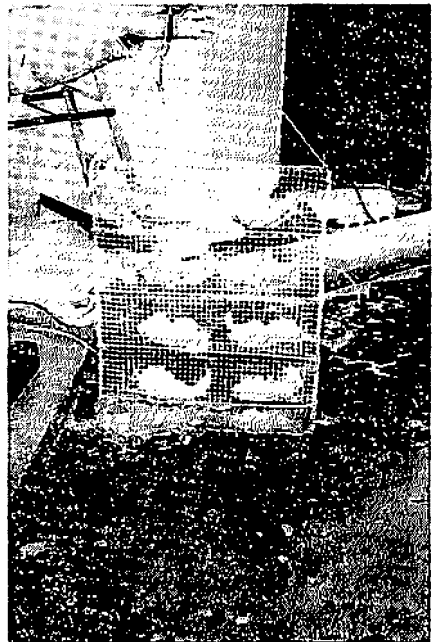


Fig. 1 Fish paralysed in mesh creel

供試魚を配置した位置に電気石ゲージ (圧電型圧力センサー) を取付けて、圧力の時間的变化を測定し

昭和51年9月7日受理

\*横浜国立大学工学部安全工学科 〒233 横浜市南区大岡 2-31-1

\*\*京都大学工学部資源工学科 〒606 京都市左京区吉田本町

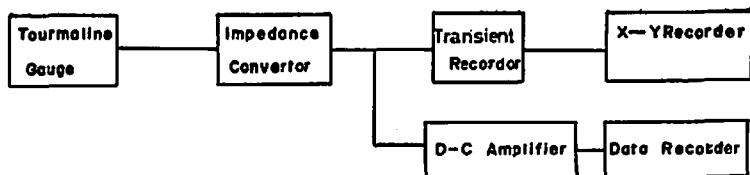


Fig. 2 Pressure measuring system

た。なお、圧力測定系の要点は Fig. 2 に示す。

本実験において供試魚に加える圧力波はピーク圧が  $3\text{kg/cm}^2$  から  $80\text{kg/cm}^2$  までのものとした。そのため、爆源には 6 号電気雷管 1 本あるいは 2~4 本束ねたものおよび Fig. 3 に示すように、電気雷管を発泡

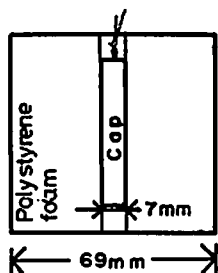


Fig. 3 Structure of an explosion source which produces weak pressure wave

スチロールで包んだものを用い、爆源と供試魚の距離を変えることにより圧力波の強さをコントロールした。

爆発後、直ちに受圧方向群毎に供試魚を取り出し、小型水槽に入れて生死を判別し、即死以外の魚は遊泳状態を観察するとともに必要に応じて 1 週間にわたって飼育観察した。以上の観察後、外見上の損傷状態を調べた上で、内部諸器官（肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓）を剖検した。

## 2.2 実験結果および考察

発泡スチロールで包んだ電気雷管と裸の電気雷管の爆発による圧力波の波形を Fig. 4 に示すが、両者の波形はほとんど一致しているの、圧力波形に対しては発泡スチロールの影響はないことがわかる。

水中圧力波を受けた魚を、小型水槽に入れると、底に横臥するもの、けいれん状態で横転するもの、直ちに遊泳するものが見られるが、このうち、底に横臥したものをへい死と判定した。一方、けいれん状態のものについては、重度のものは横転したままで遊泳不可能であるが、軽度のものはしばらくすると遊泳を始める。そこで、けいれん状態のもの後遺症について明

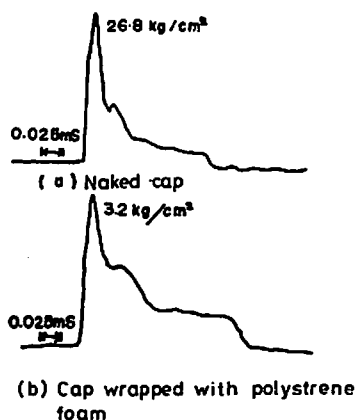


Fig. 4 Typical pressure-time curve of pressure wave caused by underwater explosions of a naked cap and a cap wrapped with polystyrene foam

らかにするための予備実験を行なった。コイについては軽度のけいれん状態であった 10 尾を 2 ケ月間飼育観察したが、全て正常となり、マダイのけいれん状態のもの 15 尾を 1 週間飼育観察したが、重度のけいれんと判定したものはすべて期間中にへい死し、軽度のけいれんと判定したものはすべて正常となった。

内臓諸器官の剖検の一例を Table 1 に示す。損傷程度を定量的にあらわすために、従来水産関係の研究者は「損傷指数」なる量を使用している<sup>9)</sup>。「損傷指数」は肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓の 4 種の臓器の損傷程度を Table 2 に従って、0, 1, 2, 3 の 4 段階に数量化したものの和をもって示す。ここで、0 は損傷が見られぬもの、3 は最もひどく損傷を受けたもので、その間に 1, 2 がある。

損傷指数を各実験条件毎に平均した値と受圧方向および与えられた圧力波のピーク圧との関係を Fig. 5 に示す。これより、この関係は魚種によって異なることがわかる。

コイではピーク圧が  $20\text{kg/cm}^2$  前後の比較的低い圧力波を受けた場合、頭部、背部あるいは尾部から受圧したものはほとんど損傷がないが、腹部や腹側部か

Table 1 Example of symptoms observed on internal organs  
(Carp receiving pressure from head)  
(Peak pressure : 27.9kg/cm<sup>2</sup>)

Test fish No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Body length (cm)		20.0	21.2	22.2	23.0	20.5	23.5	21.5	23.5	22.0	21.0	
Body weight (g)		225	300	300	320	250	300	280	310	310	270	
Symptom observed	Liver	Destruction of tissue	+	+	++	++	++	+	+	+	+	+
		Congestion										
	Heart	Rupture of sinus venosus	--	+	+	+	+	+	+	+	-	-
		Air bladder	Destruction of tissue	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Internal haemorrhage		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Congestion		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kidney	Destruction of tissue	-	+	-	+	+	+	++	+	+	+
		Congestion	++		-							
	Initial observation just after explosion		S	F	F	F	F	F	F	F	C	F
	Injury index		3	7	6	8	8	7	8	7	4	7

Note : F : death on first inspection  
C : Serious injury  
S : normal in appearance

Table 2 Conversion rule of injury degree from symptoms observed in main organs

Injury degree	3	2	1	0
Liver	Destruction of tissue ++ or +++	Destruction of tissue +	Congestion +++~+	Abnormality not observed
Heart	Rupture of sinus venosus +++~+	Blank	Blank	Abnormality not observed
Air bladder	Destruction of tissue +++~+	Internal haemorrhage +++~+	Congestion +++~+	Abnormality not observed
Kidney	Destruction of tissue ++ or +++	Destruction of tissue +	Congestion +++~+	Abnormality not observed

ら受圧したものは腎臓の損傷が大きいので損傷指数が比較的大きく、ピーク圧が 25~30kg/cm<sup>2</sup> 程度の圧力波を頭部から受けると静脈洞破裂が起るため損傷指数が大きい。ピーク圧が 37kg/cm<sup>2</sup> 程度となると、いずれの方向から受圧しても内臓器官全般にわたって著しい損傷を受けるので、損傷指数が大きい。

当才魚のマダイの場合、腹部から受圧すると、腎臓の損傷が大きく、腹側部から受圧した場合は肝臓が最も著しい損傷を受け、ついでうきぶくろの損傷が大きい。今回の実験では静脈洞の破裂したものは見られな

かった。損傷指数は腹部から受圧すると最も大きく、腹側部、頭部、尾部の順に小さくなる。

カサゴの場合、肝臓の損傷は腹部から受圧すると大きく、腎臓は腹側部から受圧すると損傷が大きい。また、静脈洞の破裂したものは今回の実験では見られなかった。うきぶくろの損傷はピーク圧 10kg/cm<sup>2</sup> 程度の圧力波を受けた時はほとんどないが、22kg/cm<sup>2</sup> 程度のものを腹部あるいは腹側部から受けると大きくなる。さらに、ピーク圧が 35kg/cm<sup>2</sup> 程度になると、いずれの方向から受圧してもうきぶくろの損傷は大き

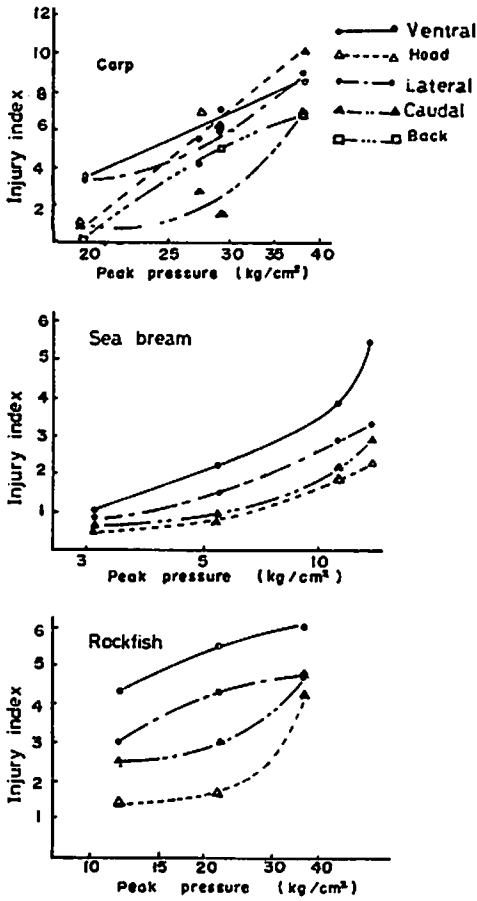


Fig. 5 Relation between peak pressure and injury index for direction of pressure exerted on fish

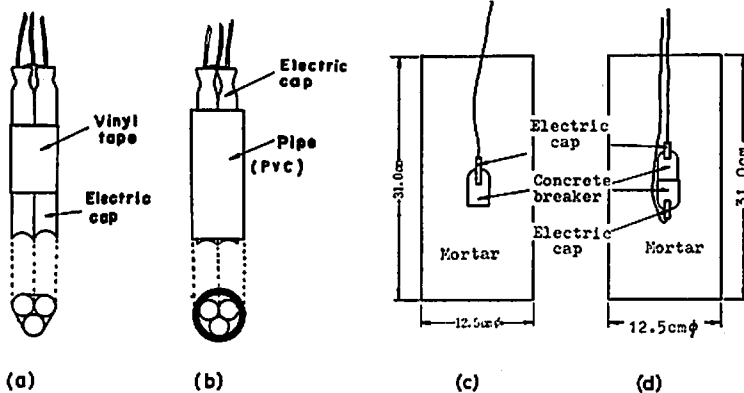


Fig. 6 Explosion sources for the experiment of wave-form difference

波形を Fig. 8(a) に示す。この実験結果を Table 3 に示した。表の I.R. の欄には回復不能の損傷を受けた魚(受圧後、へい死あるいは重度のけいれん状態と

い。損傷指数は受圧方向が尾部、頭部、腹部、腹側部の順に大きくなる。

このように、損傷を受けやすい臓器は受圧方向により異なり、今回用いた魚に共通しているのは、腹部から受圧した時腎臓の損傷が大きく、腹側部から受圧すると肝臓の損傷が大きいことである。

### 3. 圧力波形による影響

#### 3.1 実験方法

ここでは、圧力パルスがくり返し加わった場合の影響と圧力パルスのパルス幅の影響の点について検討した。

くり返しパルスの実験では、パルス源として瞬発および遅発電気雷管を組み合わせた。たとえば、3個のパルスが 25ms 間隔で生ずるような圧力波形をつくる時は、瞬発、MS 2 段および MS 3 段の電気雷管をそれぞれ 3 本をつ東ねて Fig. 6 (b) のように加工したものを水槽内の同一水平面内に 30cm 間隔で並べ、しかも供試魚のある位置からどの雷管も 1.2m の距離となるように配置した。ただし、パルス間隔が 1 秒近くの際は瞬発雷管を 1 秒おきに点火する方法をとった。

パルス幅に関する実験では、電気雷管とコンクリー破砕器 (CCR 旭 2 号、薬量 30g) の 2 種類の火薬類を Fig. 6 に示すように加工して 4 種類の爆源をつくり、圧力源とした。

いずれの実験も供試魚には水産庁淡水区水産研究所で養成した一年生コイを用いた。その他は 2.1 項と同様である。

#### 3.2 実験結果および考察

くり返しパルス実験で供試魚に加わる圧力パルスの

なったもの) の出現率を示した。パルスのくり返しのある場合とない場合の損傷指数を比較するために、後者の損傷指数を以下に示す方法で推算し、Table 3 の

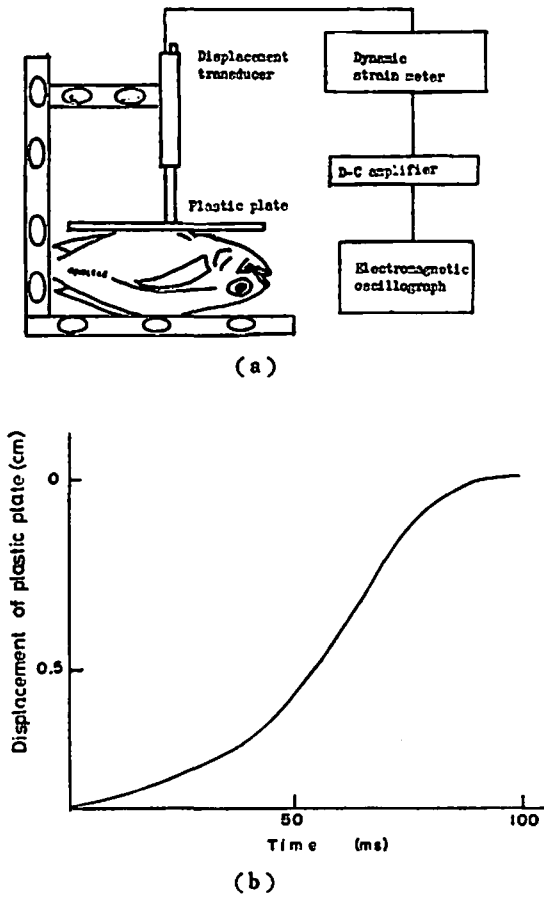


Fig. 7 Restoring time of deformed fish body

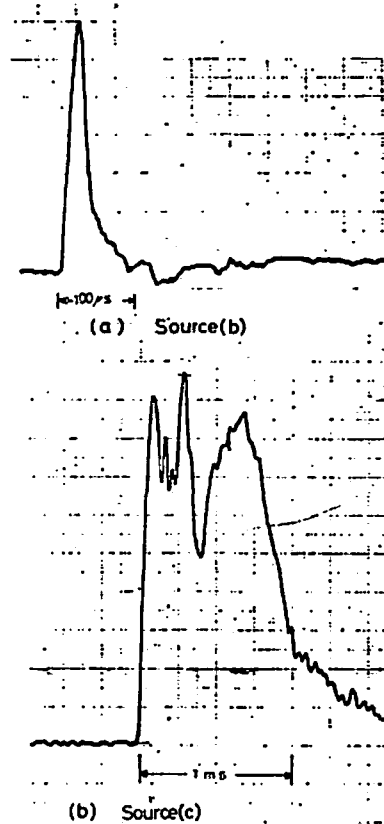


Fig. 8 Typical pressure wave-form obtained by explosions of explosion source (b) and (c)

Table 3 Relation between extent of injury and time interval of pressure pulses

No.	Peak pressure (kg/cm <sup>2</sup> )			Time interval (ms)		I.R.	I.I.
	<i>Pm</i> 1	<i>Pm</i> 2	<i>Pm</i> 3	<i>T</i> 12	<i>T</i> 23		
1	22.1	17.2	-	35.7	-	10	3.50(3.93)
2	23.2	20.6	-	77.6	-	10	3.70(4.16)
3	23.1	20.0	-	197.2	-	30	4.30(4.14)
4	22.9	21.4	-	491.4	-	40	5.20(4.10)
5	26.1	18.7	22.2	14.8	18.8	10	4.10(4.70)
6	21.5	20.6	22.4	15.0	473.0	10	4.20(3.99)
7	26.2	22.5	23.6	227.1	324.3	30	5.20(4.73)
8	24.1	25.1	23.4	898.7	961.2	70	6.10(4.53)

*Pm* 1 : Peak of the first pressure pulse

*Pm* 2 : Peak of the second pressure pulse

*Pm* 3 : Peak of the third pressure pulse

*T* 12 : Interval between the first and the second pulse

*T* 23 : Interval between the second and the third pulse

I.R. : Percentage of seriously damaged fish

I.I. : Injury index

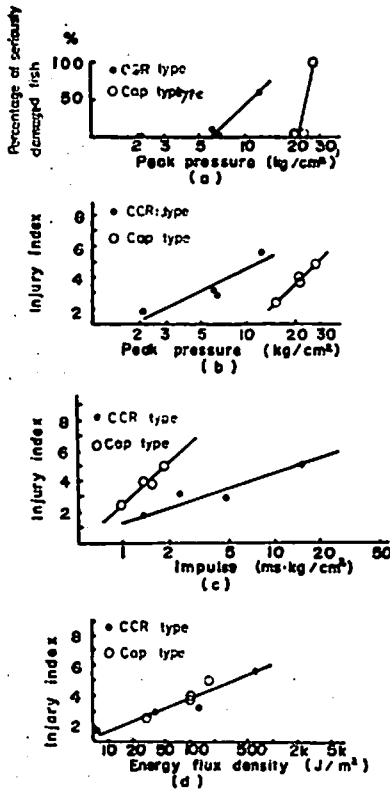


Fig. 9 Relations between the extent of injuries and peak pressure, impulse or energy flux density

I.I.の欄の( )内に示した。くり返しのない場合のコイの損傷指数 I.I. とピーク圧  $P_m$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) との関係を図.9(b)の白丸で示したが、これを最小自乗法で整理すると次の関係式が得られるが、この式の  $P_m$  に  $P_{m1}$ ,  $P_{m2}$  および  $P_{m3}$  のうちの最大値を代入して得られる I.I. がくり返しのない場合の損傷指数に相当するとする。

$$I.I. = 10.86 \log P_m - 10.67$$

くり返しのある場合とない場合の損傷指数を比較すると、No.1, No.2 および No.5 では圧力パルスのくり返しによる損傷の増加はないが、No.4 と No.8 ではデータのバラツキを考りよしてもくり返しの効果でコイの損傷は増加している(くり返しのない場合の損傷指数の幅は信頼性 90% とした時、ピーク圧が No.4 の圧力最高値の時 3.02~5.18 で、No.8 の圧力最高値の時 3.45~5.61 となる)。No.3, No.6 および No.7 では両者の差は誤差範囲内であり、くり返しの影響については判定できない。

ここで、魚体の圧力に対する応答時間に関する簡単な実験を行なった。Fig.7(a)にその実験装置を示

した。供試魚(あじ)の上のプラスチック板を押えることによりあらかじめ魚体を圧縮しておき、この圧縮力を急激に取り除いて魚の形を復原させ、プラスチック板の変位の時間的変化を測定した。Fig.7(b)は記録の1例であるが、この復原時間はあらかじめ魚体に与えた変形量にほとんど影響されず、魚体の圧力に対する応答時間は 100ms のオーダーであることがわかる。圧力パルスのくり返し実験では、パルス間隔が 100ms 以内の時くり返しによる魚の損傷の増大は見られないが、数 100ms 以上になると、くり返しの効果が認められる。この効果があらわれるか否かの境のパルス間隔は魚体の応答時間と同じオーダーであるので、くり返しパルスの効果は魚体の応答時間と相関性があると推察される。

パルス幅の影響に関する実験で、供試魚に与える圧力波の波形の1例を図.8に示す。爆源(a)による圧力波のパルス幅は爆源(b)によるものに類似しているの、前2者の波形を雷管型、後者のものをCCR型と称することにする。

水中圧力波の大きさを表わす物理量には、ピーク圧  $P_m$ 、インパルス  $I$  およびエネルギー密度  $E_f$  の3つが考えられ、 $I$  および  $E_f$  は次式によって与えられる。

$$I = \int [P(t) - P_0] dt \quad \text{インパルス}$$

$$E_f = \frac{1}{\rho_0 C_0} \int [P(t)^2 - P_0^2] dt \quad (\text{エネルギー密度})$$

ここで、 $P(t)$ : 時間関数としての圧力値、 $P_0$ : 初圧  $\rho_0$ : 媒質の密度、 $C_0$ : 媒質の音速  
これらの物理量とコイの損傷状態との関係を図.9に示す。ピーク圧やインパルスを横軸とした場合、CCR型の直線と雷管型の直線は一致しないが、エネルギー密度を横軸にとると、両者はよく一致する。これより、水中圧力波によるコイの損傷程度はピーク圧やインパルスよりもむしろエネルギー密度と相関性があることがわかる。

本四公団<sup>11)</sup>では昭和50年2月~3月に香川県坂出沖で、海底爆破実験(薬量 180kg~1,520kg)を行ない、水中圧力波の測定、魚類の被害調査などを実施した。その際得られた水中圧力波の波形例を図.10に示す。この実験の供試魚のうち、カサゴについては電気雷管、スズキについてはダイナマイト5kgの水中爆発による被害を検討する実験を以前に行なっているの<sup>12)</sup>、これらの結果と本四公団の結果を整理して、Fig.11に図示した。ただし、穿孔爆破における圧力

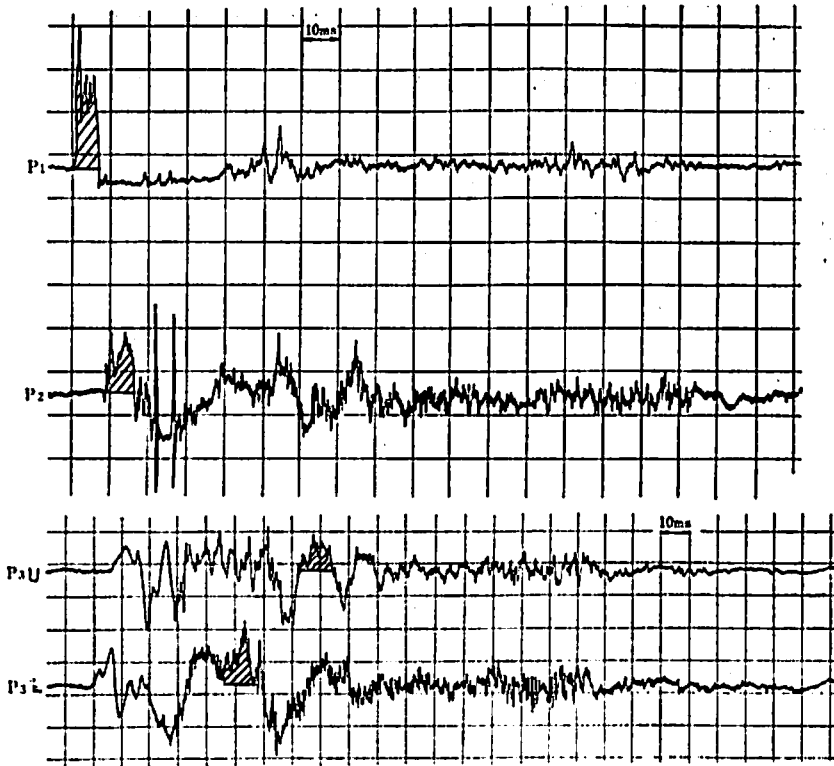


Fig. 10 Example of pressure wave-form generated by underwater borehole blastings at the Bisan strait

波形は振動波形となることがあるが、この場合は圧力パルスがくり返し作用していると見なすことができる。また、この振動波の主要部の持続時間は 100mS 以内であるので、損傷に対しパルスのくり返し効果はないと考えられる。そこで、Fig. 11 のインパルスやエネルギー密度は波動の全区間に対して求めたものではなく、圧力-時間曲線  $P=P(t)$  と  $P=P_0(P_0$ :初圧)の交点を始めより  $t_0, t_1, t_2 \dots t_i$  (擾乱開始点を  $t_0$ ) とし、 $t_i \sim t_{i+1}$  の区間で  $P(t) > P_0$  であるようなすべての  $i$  に対して、この区間のインパルスおよびエネルギー密度を求め、それぞれが最大値となる区間 (Fig. 10における斜線部) のものを用いた。現場実験のデータでも、ピーク圧やインパルスを横軸にとると、穿孔爆破と水中爆発では一致しないが、エネルギー密度を横軸とすると両者はよく一致する。

#### 4. 結 言

本研究では水中爆発あるいは水中爆破に起因する圧力波による魚類の被害について、圧力波形および受圧方向について検討し、次の点を明らかにした。

(1) 圧力波による内部器官の損傷は圧力の受感方向により差があり、一般的には腹部や腹側部から受圧す

るとよりひどい被害を受け、腹部から受圧すると腎臓の損傷がまた腹側部から受圧すると肝臓の損傷が大きくなる。

(2) 圧力パルスがくり返し加えられる場合、約 100 mS 以内のパルス間隔ならば、くり返しの効果は認められない。

(3) 圧力波による損傷の大きさは波動のエネルギー密度との間に相関性が見られる。

最後に、本研究を行なうに当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室長ならびに淡水区水産研究所の藤谷超部長に厚く御礼申し上げる。また、データの提供その他の御協力を頂いた本四公団の関係者に感謝する。

#### 文 献

- 1) たとえば、黒田、九万田：北大水産彙報，12，1，16 (1967)
- 2) 若岡，小川，沢田，阪口：工業火災，31，81 (1970)
- 3) C. L. Hubbs, A. B. Rechnitzer: Calf. Fish and Game, 38, 333 (1952)
- 4) 本四公団，財団法人総合安全工学研究所：「水中

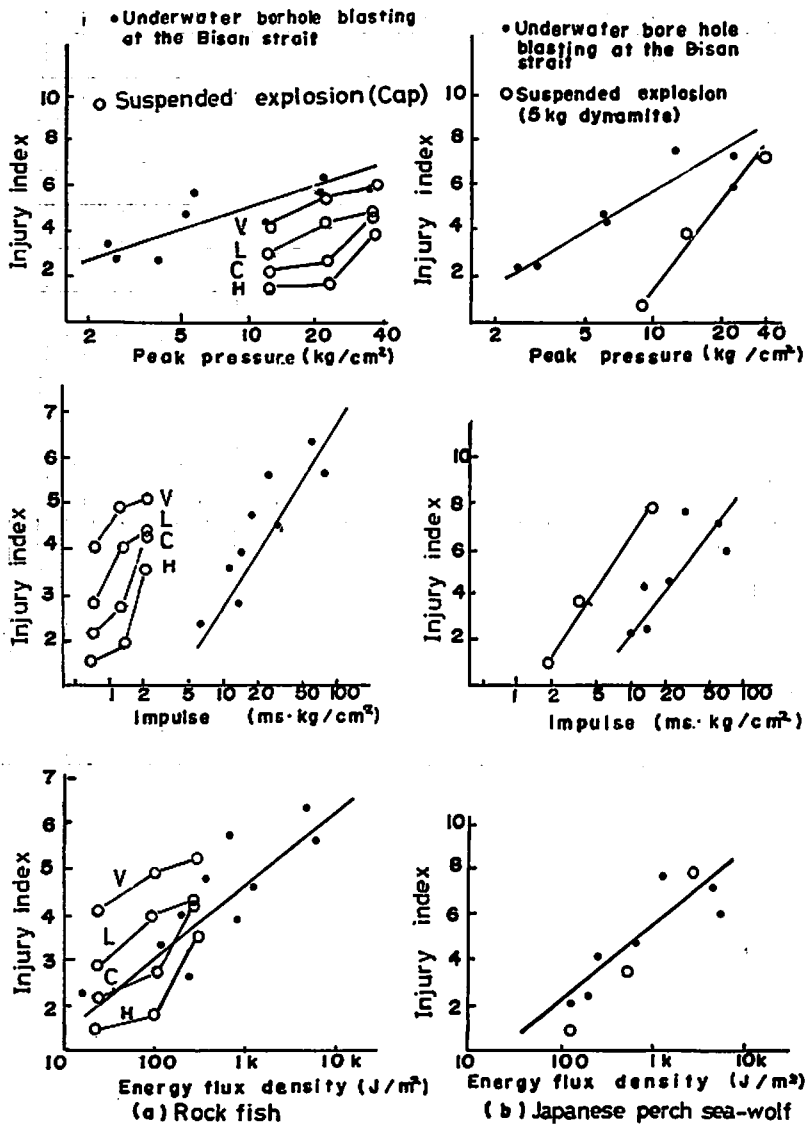


Fig. 11 Relations between index and peak pressure, impulse or energy flux density  
(V; Ventral, L; Lateral, C; Caudal, H; Head)

発破の安全性の検討 (その3)], p 58 (1976)

(1975)

5) 日本水産資源保護協会水中発破問題検討委員会:  
「水中発破問題検討委員会報告 (第1号)」 p 64

6) 本四公団, 安全工学協会:「水中発破による衝撃  
圧等報告書」 p 160 (1972)



## The study on injuries to fish due to underwater pressure wave

by Terushige Ogawa\*, Ikuo Fukuyama\*, Ichiro Itoh\*\*

Injuries to fish due to pressure wave have the following features.

- (a) Injuries to fish vary with the direction of pressure exerted on them.
- (b) Generally, a fish receiving pressure from its ventral side has its kidney injured more than other organs but a fish receiving pressure from lateral side has its liver injured most.
- (c) Injuries to fish seem to have correlation with energy flux density of pressure wave rather than peak pressure or impulse.
- (d) Injuries to fish vary with species.

(\*Faculty of Engineering, Yokohama National University 2—31—1, Ooka, Minami-ku, Yokohama \*\*Faculty of Engineering, Kyoto University Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto)

### ニュース



#### 振動規制スタート

振動公害は公害対策基本法に定められた7種のうち規制のなかった唯一の公害。今回の環境庁告示と総理府令によって具体的基準値が決まり、本格的振動公害規制が昭和51年12月1日から実施される。

規制の対象となるのは「工場」「建設作業」「道路交通」の各振動で、苦情の最も多い工場振動については住居地域の昼間規制値を60~65dBとした。建設作業については深夜と日曜、祝日の作業を禁止し、「75dB」までを基準として区域ごとに作業時間や期間を定めた。道路交通振動の限度は昼間65~70dB、夜間60~65dBである。

注) dB (デシベル)=振動の強さを示す単位。最大振幅時の加速度を対数で表わした。地震の震度で見ると、人体に振動を感じない「震度ゼロ」は55dB以下、55~65dBが震度1(微震)、65~75dBが震度2(軽震)に相当する。

読売 51.11.9 (黒田)

#### 1975年末日現在の米国認可爆薬の現用リスト

米国の認可爆薬の現用リストには、ゼラチン状品種、粒状品種およびスラリー爆薬8品種、合計70品種が含まれている。特に硝安を基剤とした比較的新しいタイプの認可スラリー爆薬(1972年に初めて4品種が認可された)が注目され、一般爆薬に比べて後ガス良好、ストレングスも大で破壊効果がよく、安全度も十分で、さらに貯蔵、輸送、取扱、使用に対しても安全であることがUS鉱山局で確かめられている。

粒状爆薬は乾燥した炭鉱で使用され爆速範囲は1,700~3,500m/sec、ゼラチン状爆薬は主として炭鉱での岩石発破に使用され、湿った炭鉱でも使用でき、爆速は3,200~5,600m/secであり、スラリー爆薬は乾燥孔でも湿ったところでも使用でき、爆速は3,400~3,800m/secである。なおICI Americaの認可爆薬は、本報告では全てAtlas社の名前になっている。

Bureau of Mines IC 8597 (1976) (黒田)

#### マッハの水流で材料切断

ノズルから噴射された超高速の水流で非金属材料の切断を行なう「ジェットカッティング」技術は、既に航空機製造分野で合成樹脂積層材の加工に応用されているが、この他にもほとんどあらゆる種類の非金属材料の切断を行なえ、さらに食品加工にも導入され、多くの工業分野で関心が急速に高まっている。この技術は水を使うにもかかわらず工作物の水ぬれがない、発熱が小さく熱に敏感な材料の切断が行なえ、冷却不要、切断精度が高くきれいな切断面が得られる等多くの長所をもつ。水圧は従来800気圧程度、石の切断4,000気圧、実験的特殊加工用は14,000気圧、ノズル口径は0.1~0.5ミリ、切り口はこれより若干広くなる程度、切断速度は毎分350メートルにも達する。水流速度は音速の数倍になり、水流の吸引力のため切り子やほこりは水流に引き込まれ、作業現場を衛生的に保てる。

日経産業 51.11.10 (黒田)