

水中爆破に伴う水中衝撃波軽減法 (1)

若園吉一*・小川輝繁*・沢田保夫**・阪口清次***

1. 緒 言

水中爆破は岩礁の爆破として古くより行なわれているが、最近では大型船の出現により航路の整備、港湾の拡張などに必要となつてきた。しかし水中爆破を行なうに当り最も障害となつてゐることは漁業保障の問題であつて、これは水中を伝播する水中衝撃波が魚貝類に損傷を与えるためである。従つて水中衝撃波を遮断あるいは軽減しない限り水中で火薬類を使用して掘削するような作業は望めない。

われわれは数年前より三重県英虞湾¹⁾あるいは瀬戸内海の来島海峡²⁾において水中爆破の実験を行なつてきた結果、この問題を何らかの方法で解決しなければならないと考えている。水中衝撃波の軽減法としてはエアバブルカーテンを設置することが効果的であるといわれている^{3),4),5),6),7)}。それ故われわれは第1段階としてバブルカーテンの有効性について衝撃波(圧力値および波形)および魚類の被害の両観点から検討したのでここに報告する。

2. 実験方法

2.1 圧力測定方法

圧力測定法は受圧素子としてトルマリンゲージ⁸⁾(米国クリスタルリサーチ社製)を用い、トルマリンゲージの圧電効果により発生する電気量を電圧としてシンクロスコープによつて測定するものである。圧力

測定系の概略図はFig. 1に示す。トルマリンゲージは3次元の圧力を受感し、その上耐圧性であるので水中衝撃波のような高圧がくり返し加わつてもその特性は変化しない故水中衝撃波の測定には適している。また測定ケーブルに圧力(水中衝撃波)が加わると電荷が発生するため、本測定法のように高インピーダンス回路ではケーブルシグナルと呼ばれるノイズが発生する⁹⁾。それ故本実験ではケーブルシグナルを防止するためにクリスタルリサーチ社製のアンチマイクロホニックケーブルを用いた。

圧力計の校正はトルマリンゲージおよび測定回路のそれぞれについて行なつた。すなわちトルマリンゲージの校正は圧力計付属の校正装置(クリスタルリサーチ社製)を用いた。その原理はあらかじめ油圧でゲージに圧力を加えておき、その圧力を解放する時の圧力変化によつて発生する電気量をマイクロクロンメータで測定してその感度を求めたものである。一方測定

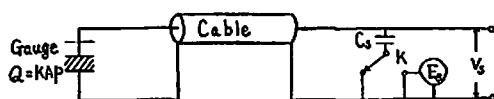


Fig. 2 "Q-step" calibration circuit

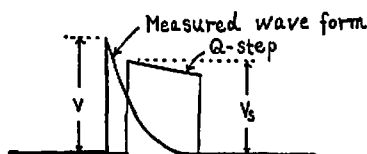


Fig. 3 "Q-step" calibration

回路の校正はいわゆる Q-step 法と呼ばれるものである。すなわちFig. 2に示した回路を用い、スイッチKを切り変えることによりステップ状の電圧変化 V_s (Fig. 3) が生じ、この値と測定値 V から次式によつて圧力 P が求められる。

$$P = \frac{C_s \times E_s}{KA} \cdot \frac{V}{V_s}$$

但し P : 圧力, C_s : 標準コンデンサーの容量
 E_s : 標準電圧, V : 衝撃圧の測定電圧
 V_s : 校正電圧, KA : ゲージの感度

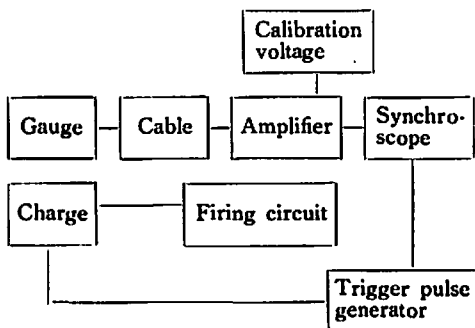


Fig. 1 Block diagram of pressure measurement system

昭和45年2月2日受理

* 横浜国立大学工学部安全工学科 横浜市南区大岡2-31-1

** 水産庁東海区水産研究所 東京都中央区勝どき5-5-1

*** 水産庁真珠研究所 三重県志摩郡阿児町賢島

2.2 バブルカーテン

長さ 2.5m の 2" 鋼管の測面に径 2mm の細孔を 10cm の間隔に明け、この鋼管を 3 本継ぎ、長さ 7.5m の気泡の噴出管とした (Fig. 4)。これを海底に沈め、窒素

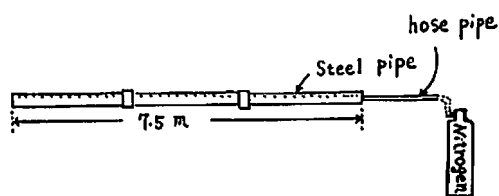


Fig. 4 Bubble generator

ポンプより窒素ガスを送入し、細孔より気泡を噴出させてバブルカーテンを作った。なお気泡の発生量の制御は窒素ポンプに取り付けた減圧弁を用いて行なった。

2.3 試験魚

試験魚には体長約 24~30cm、体重 210~450g のスズキを用い、これを直径および高さが 1m の円筒型の網イケス (目合七節のナイロン網) に収容した。なおこの試験魚は実験場で捕獲し、陸上の水槽中で 1 日静養したもので爆破直前に各測点に配置した。

2.4 実験条件の概要

実験場は三重県度会郡南勢町五ヶ所船越浦でその地形図は Fig. 5 に示す。実験場の水深は約 10m である。

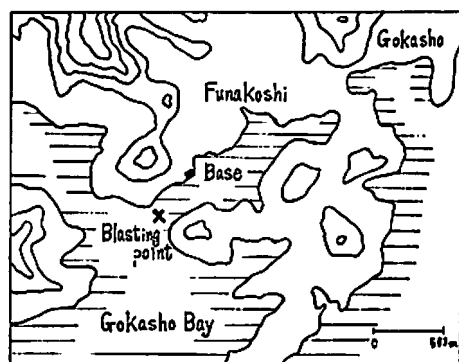


Fig. 5 Map of Experiment Station

第 1 の実験は魚を使用せず、バブルカーテンの衝撃圧軽減効果を測定した。爆薬、圧力計およびバブルカーテンの配置は Fig. 6 に示す。すなわち水深 3m の位置に爆薬を吊り、爆源より測線に沿って 30m および 35m の位置にバブルカーテンを設置し、爆源と第 1 カーテン (30m 地点) の間に圧力計 P_1 および P_2 、第 1 カーテンと第 2 カーテン (35m 地点) の間に圧力計 P_3 、第 2 カーテンより遠方に圧力計 P_4 の計 4 個の

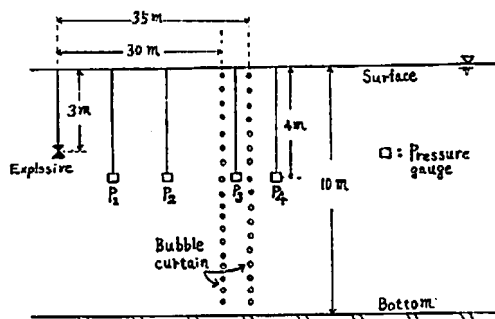


Fig. 6 Arrangement of explosive, pressure gauge and bubble curtain

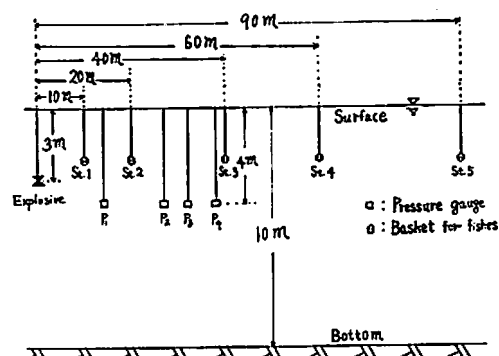


Fig. 7 Arrangement of explosive, pressure gauge and fishes (No bubble curtain)

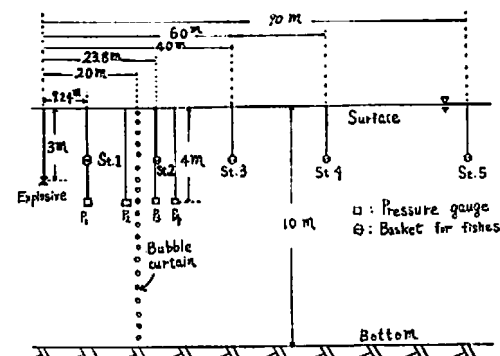


Fig. 8 Arrangement of explosive, pressure gauge, fishes and bubble curtain (Single bubble curtain)

圧力計を配置した。なお圧力計の設置点の水深はすべて 4m である。

第 2 の実験は試験魚を用いてバブルカーテンを設置した場合と設置しない場合について魚の被害を比較した。爆薬、圧力計、バブルカーテンおよび試験魚の配置は Fig. 7 (バブルカーテンのない場合) および Fig. 8 (バブルカーテンのある場合) にそれぞれ示す。

なお、いずれの実験においても爆薬は新桐ダイナマ

イト 5 kg を集中装薬として用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 バブルカーテンの水中衝撃波におよぼす影響

バブルカーテンのない場合、シングルバブルカーテンを通過させた場合およびダブルバブルカーテンを通過させた場合について水中衝撃波を比較検討した。得られた圧力波形は Fig. 9 に示す。この結果バブルカー

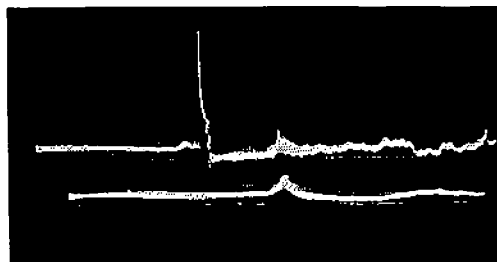


Fig. 9 Example of wave form (Run 8)

Upper beam—Before passing through bubble curtain

Lower beam—After passing through bubble curtain

Sweep velocity : 5ms./div.

テンを通過しない場合は鋭い立ち上がりをもつ衝撃波形を示しているが、バブルカーテンを通過した後はいわゆるバブルパルス（水中爆発において生成ガスの運動によつて生ずる圧力波）のような波形となり、圧力持続時間もカーテンを通過しない場合に比べて約4倍となつていくことがわかる。また得られたピーク圧力値は Table 1 に示す。このピーク圧と爆源からの距離の関係を図示すると Fig. 10（バブルカーテンのない場合）、Fig. 11（シングルバブルカーテンの場合）および Fig. 12（ダブルバブルカーテンの場合）のようになる。この結果バブルカーテンを通過するとピーク圧力が急激に低下することがわかる。なおバブルの密度がピーク圧の減少率に関係があり、密度が高いほどピーク値の減少は大きい。またダブルバブルカーテンを通過すると圧力の減衰はさらに大きくなり、その効果が認められる。ピーク圧の減衰量を定量的に比較するために次のようなパラメータを導入する。すなわち一般に水中衝撃波のピーク圧力値は次式で示される⁹⁾。

$$P = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13}$$

但し W : 薬量 (kg), R : 爆源からの距離 (m),

P : ピーク圧力 (kg/cm²), K : 常数

ここでKは爆薬と水の境界面における境界条件によつて決まる常数であるが、一般には薬種によつて決まる

Table 1 圧力測定結果

Run	測点	ピーク圧 (kg/cm ²)	爆源からの距離 (m)	K	バブルの密度 (l/min./m)	バブルカーテンの有無
1	P ₁	48.0	13.6	533	—	無
	P ₂	21.9	27.3	534		
	P ₃	18.7	32.4	550		
	P ₄	—	—	—		
2	P ₁	33.2	19.7	553	—	無
	P ₂	22.6	26.7	533		
	P ₃	18.5	32.3	540		
	P ₄	15.1	37.6	522		
3	P ₁	45.8	13.5	505	57.3	有
	P ₂	22.0	27.4	530		
	P ₃	6.13*	33.2	183		
	P ₄	6.03*	36.7	201		
4	P ₁	42.3	13.9	481	30m地点のバブルの密度 66.6 35m地点のバブルの密度 66.5	ダブルバブルカーテン
	P ₂	19.8	26.9	472		
	P ₃	6.41*	32.3	186		
	P ₄	2.61**	37.2	89.5		
5	P ₁	31.7	19.1	512	66.5	有
	P ₂	21.2	27.0	508		
	P ₃	5.75*	32.9	170		
	P ₄	5.13*	38.8	183		
6	P ₁	31.4	20.0	536	66.5	有
	P ₂	21.0	26.9	500		
	P ₃	4.93*	33.0	147		
	P ₄	4.12*	39.2	150		
7	P ₁	47.0	13.8	511	114	有
	P ₂	21.4	27.3	524		
	P ₃	2.58*	32.6	79.2		
	P ₄	2.41*	37.1	81.6		
8	P ₁	31.0	20.0	503	123	有
	P ₂	21.2	26.6	498		
	P ₃	3.68*	32.9	110		
	P ₄	3.48*	38.5	124		

注 1. * バブルカーテンを通過したもの。

** ダブルバブルカーテンを通過したもの。

注 2. バブルの密度とはバブルカーテン 1m 当りのバブルの流量である。

と考えて差支えない。ところがバブルカーテンを通過することにより圧力値が減衰すると当然この値も減少し、かつKの減衰比は圧力値の減衰比に等しい。そこで、Kの値を比較することによりバブルカーテンの効果を判定することができる。それ故Kの値を計算して Table 1 に記した。この結果バブル密度を約 60 l/min./m とすると圧力の減衰比は約 1/3 となり、バブル密度 120 l/min./m とすると圧力減衰比は約 1/4.5~1/6.5 となる。またダブルバブルカーテンにするとシングルバブルカーテンの場合に比べて圧力減衰比はさらに 1/2 となることがわかる。しかしながらシングルバブルカーテンの場合のデータからわかるようにバブル密度が一定であっても、圧力の減衰比にはかなりバラ

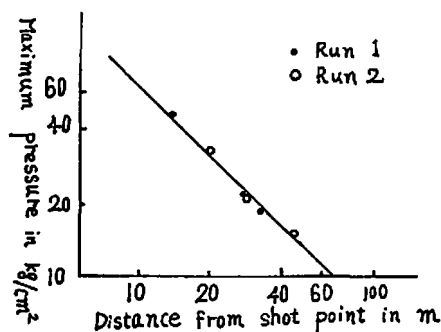


Fig. 10 Logarithmic plot of maximum pressure against distance from shot point (No bubble curtain)

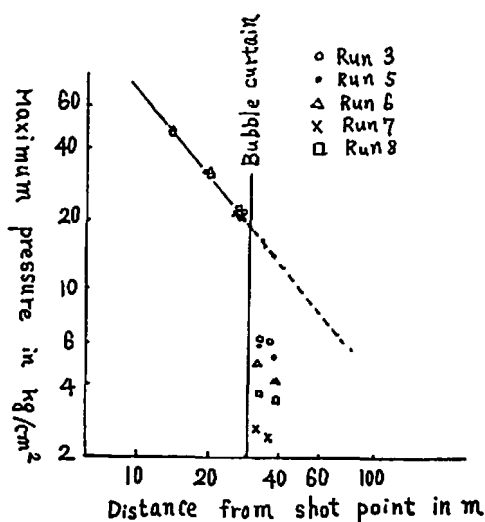


Fig. 11 Logarithmic plot of maximum pressure against distance from shot point (Single bubble curtain)

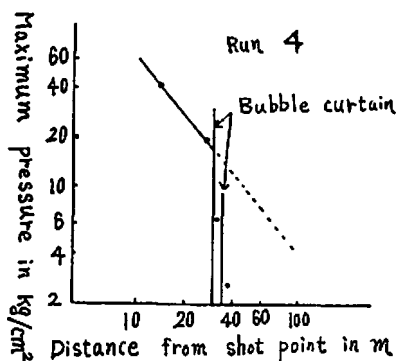


Fig. 12 Logarithmic plot of maximum pressure against distance from shot point (Double bubble curtain)

ツキが見られ、バブルカーテン設計にはこの点を考慮しなければならない。

3.2 魚の被害の軽減

以上の結果バブルカーテンが効果的であることが明らかとなつたので、さらに魚に対しての影響を検討した。第1回目はバブルカーテンのない場合、第2回目はバブルカーテンのある場合について実験した。Table 2 には各ステーションにおける魚の収容数を示した。Table 3 はピーク圧力の測定結果であり、それを Fig. 13 に図示した。また Fig. 14 は得られた圧力波形である。

Table 2 試験魚の収容尾数

Run	地点 項目	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5
9	爆源からの距離 (m)	10	20	40	60	90
	収容尾数	3	5	5	4	3
10	爆源からの距離 (m)	9.24	23.8	40	60	90
	収容尾数	3	5	5	4	3

Table 3 圧力測定結果

Run	区分	測点	ピーク圧 (kg/cm ²)	爆源からの距離 (m)	K	バブルの 密度 (l/min./m)
9	バブルカーテン無設置	P ₁	45.9	14.2	534	—
		P ₂	20.8	27.2	504	
		P ₃	18.7	32.2	542	
		P ₄	14.6	37.8	503	
10	バブルカーテン設置	P ₁	71.5	9.24	510	123
		P ₂	35.2	17.4	510	
		P ₃	5.75*	23.6	117	
		P ₄	4.73*	28.0	118	

注. * バブルカーテンを通過したもの。

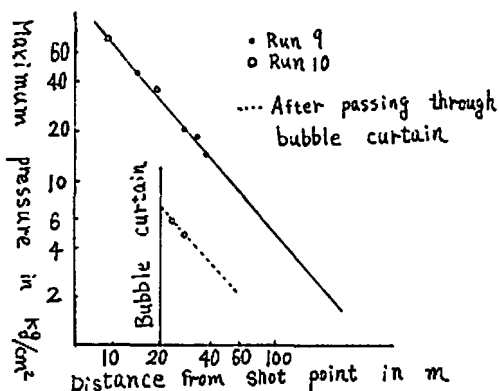


Fig. 13 Logarithmic plot of maximum pressure against distance from shot point

Table 4 内部諸器官の損傷とその程度（バブルカーテン無設置）

地 点 St.		1			2					3					4				5		
試 験 魚 番 号		1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3
体 長 cm		26.0	27.0	27.5	24.5	26.5	26.0	27.5	28.0	25.5	26.0	26.0	27.0	30.5	27.0	26.5	28.0	29.5	25.0	27.5	30.0
体 重 g		260	260	300	210	280	250	340	310	240	290	270	340	450	300	280	330	390	205	265	380
内 臓 の 損 傷 程 度	消化器	胃 充 血	++	+	+	+	-	-	+	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		中 腸 充 血	+	++	+	+	-	+	+	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		直 腸 充 血	++	++	+	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
		胆 嚢 破 裂	++	+	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-
		幽門垂充血	++	++	++	+	+	+	++	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
	肝 臓	組 織 破 裂*	+++	+++	++	+	+	++	++	+++	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-
		血 管 充 血									+		+		+	+	-	+	+	-	±
	循環器	心耳の破裂	±	++	++	-	+	-	-	-	±	±	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	脾 臓	組 織 破 裂	+++	+	+++	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		う つ 血					-	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	鰓	被 膜 破 裂	+++	++	+++	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		血 管 充 血				+	+	++		+++	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	腎 臓	組 織 破 裂	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		血 管 充 血									+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
	骨 格	背 椎 分 離	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		肋骨基部脱離	+++	+	+++	+	+	+	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	腹部筋肉の断裂		+++	+	+++	+	+	+	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
生 死 の 状 態		収容尾数3尾のすべてが即死			収容尾数5尾のうちで、即死2尾、遊泳状態のもの3尾					収容尾数5尾で、斃死魚はみられなかった。					収容尾数5尾で、斃死魚はみられなかった。				斃死魚はみられなかった。		

* 組織破裂のものは、当然出血および充血がみられるので血管充血の項については記入していない。脾臓、鰓、腎臓についても同様に処理した。
+ 損傷の程度。

Table 5 内部諸器官の損傷とその程度 (バブルカーテン設置)

地 点			St.	1			2					3					4				5		
試 験 魚 番 号				1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3
体 長			cm	28.0	29.0	29.5	24.0	25.5	26.5	28.5	28.5	25.0	26.5	27.0	26.5	31.5	27.5	26.5	27.5	29.5	27.0	28.5	29.0
体 重			g	240	360	370	190	240	260	320	380	260	270	280	290	410	280	300	330	380	260	280	360
内 臓 の 損 傷 程 度	消化器	胃 充 血	++	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		中腸充血	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		直腸充血	+	++	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		胆嚢破裂	+	++	++	+	+	++	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	±	±	-	-	
		幽門垂充血	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	肝 臓	組織破裂	+	++	++	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		血管充血				++	+	++	++	+		+	+	+	±	+	-	-	+	±	-	-	
	循環器	心耳の破裂	+++	+++	+++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	脾 臓	組織破裂	++	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		う つ 血				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	鰓	被膜破裂	++	+++	+++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		血管充血				+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	腎 臓	組織破裂	+++	+++	+++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		血管充血				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	骨 格	脊椎分離	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		肋骨基部脱離	+++	+++	+++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	腹部筋肉の断裂			+++	+++	+++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
生 死 の 状 態			収容尾数3尾のすべてが即死				収容尾数5尾で弊社魚はみられず異常な遊泳状態のものは認められなかった。					収容尾数5尾で、弊社魚はみられなかった。					収容尾数4尾で弊社魚はみられなかった。				弊社魚はみられなかった。		

+ 損傷の程度 St. 1 と St. 2 の間にバブルカーテンを設置した。

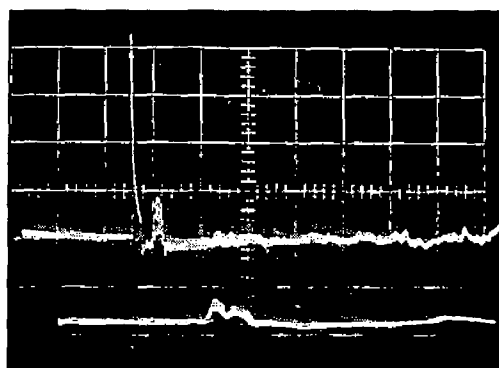


Fig. 14 Wave form

Upper beam—Before passing through bubble curtain

Lower beam—After passing through bubble curtain

Sweep velocity : 5ms./div.

試験魚は爆破後直ちに生死を判別し、即死以外の魚については遊泳状態を観察した後、解剖して内臓の諸器官の損傷状態を観察した。魚の被害状況は Table 4 および Table 5 に示す。この Table から明らかなように魚の被害はバブルカーテンによりかなり軽減されており、特に St. 2 においてはその効果は顕著に認められる。

なおバブルカーテンを通過した場合の P₃ 地点 (St. 2) ではピーク圧力が 5.7kg/cm² となつているが、バブルカーテンを通過しない衝撃波については Fig. 13 の実線から外挿すると約 90 m 地点 (St. 5) のピーク圧力がこの圧力値となつている。すなわちバブルカーテンがない場合の St. 5 とバブルカーテンのある場合の St. 2 はピーク圧力がほぼ等しいと考えてよい。そこで、これらの魚の損傷状態を比較すると魚に与える損傷は明らかにバブルカーテンを通過した衝撃波の方が大きくなつている。すなわちピーク圧力が等しくてもバブルカーテンを通過しない衝撃波の方が魚に与える損傷が少ない傾向が認められる。この理由としてはバブルカーテンを通過した衝撃波はピーク値は小さいが圧力持続時間は長いのでインパルスとしてはピーク値ほど減衰していないことが考えられる。また今回の実験の場合バブルカーテンの長さが比較的短かく、その上実験場の地形が川のように細長い湾の奥であるため、バブルカーテンを通過しない圧力波が兩岸や海底の岩に反射して魚に影響を与えているものと思われる。これらのことについては今後検討する予定である。

いずれにしてもバブルカーテンは水中衝撃波による魚の被害の軽減に対して非常に効果があることが認められた。

4. 結 言

水中爆破においてバブルカーテンを使用すると水中衝撃波のピーク圧力の軽減に対しては非常に効果があることが認められた。すなわちバブルの密度が 60~120 l/min/m の場合、圧力の減衰比は約 1/3~1/6.5 程度となる。それに伴ない魚の被害も非常に減少することが明らかとなった。今後他の軽減方法についても研究していく方針である。

最後に本研究において多大な援助を受けた京都大学工学部伊藤研究室、横浜国立大学工学部北川研究室および日本油脂 K. K. 武豊工場の各位に感謝する。

文 献

- 1) 国立真珠研究所, 京都大学 工学部 資源工学 教室 (沢田, 阪口, 若園, 小川, 中野), 真珠養殖漁場における水中障害物の爆破除去に関する研究 (第 1 報), 国立真珠研究所報告, 12, 1967
- 2) 運輸省第 3 港湾建設局, 米島海峡地質調査報告書—水中爆破による施工法 (中間報告), 1968
- 3) A. T. Edwards, Reduction of Hydraulic shock-Performance of Air Curtain, Report 61-84, The Hydro-Electric Power Commission of Ontario, 1961
- 4) R. C. Jacobsen, Air-Bubble Curtain to Cushion Blasting, Ontario Hydro Research News, 6, 1954
- 5) R. C. Jacobsen, The Use of Air Bubble Curtain to Reduce Hydraulic Shock from Blasting, The Hydro-Electric Power Commission of Ontario, Research Division Report No. 54-166, 1954
- 6) M. Graves, Air Curtain in Sub-Aqueous Blasting at Muddy Run, Civil Engineering-ASCE, June, 1968
- 7) 若園吉一, 最近における爆破の問題点について, 工業火薬, 29, 289, 1968
- 8) A. B. Arons and R. H. Cole, Design and Use of Piezoelectric Gauges for Measurement of Large Transient Pressures, The Review of Scientific Instrument, 21, 31-38, 1950
- 9) R. H. Cole, Underwater Explosions, Princeton University Press, 1948

The Method of Reduction of Hydraulic Shock on Underwater Blasting I

by Y. Wakazono*, T. Ogawa*, Y. Sawada**
and S. Sakaguchi***

We examine effect of bubble curtain for attenuation of hydraulic shock wave and reduction of injuries to fishes caused by underwater blasting. Bubble curtain was made of nitrogen gas. The results obtained are briefly shown below.

1) Using 60~120 l/min. of nitrogen gas per lineal meter of bubble curtain, 3~6.5-fold reductions is obtained in maximum pressure of hydraulic shock wave and about 4-fold increase, in duration of pressure.

2) The yellowtail (*Lateolabrax japonica*) was used as testing fish in tests on injuries to fishes. Bubble curtain is highly effective to reduce injuries to fishes.

* Dep. of Safety Eng., Fac. of Eng., Yokohama
National Univ., Yokohama

** Tokai Regional Fisheries Laboratory, Tokyo

*** The National Pearl Research Laboratory,
Kashikojima, Mie.