

水中圧力波による魚類の損傷（第2報）

内部器官の損傷

小川 輝繁*, 福山 郁生*, 阪口 清次**

水中爆破に伴なう水中圧力波による魚の主な内部器官の損傷について検討した。淡水魚のコイおよび海産魚のマダイおよびカサゴを使って水槽実験を行った。

魚にとって肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓は重要器官であり、これが著しい損傷を受けると致命傷となる。圧力波の強さが小さいと、心臓、うきぶくろおよび腎臓の損傷はほとんど見られないが、肝臓の損傷は少し見られる。圧力波の強さがある値を越えると腎臓、うきぶくろの損傷が急激に増加し、その結果重態魚の出現率が增加する。心臓や骨格は圧力波に対しては他の内臓器官より強い抵抗力を持っている。腎臓の損傷は腹部から受圧すると著しく、肝臓やうきぶくろの損傷は腹部や腹側部から受圧すると、頭部や尾部から受圧する場合より著しい傾向がある。

1. 緒言

水中圧力波を受けて、へい死あるいはけいれん状態となった魚はその内部器官に著しい損傷が見られる。この問題に関する研究として古いところでは、稲村¹⁾が水中爆破による圧力波を受けた魚の内部器官の特に聴器の損傷を詳しく調べている。その他水中圧力波を受けた魚の内部器官の損傷を観察した研究報告はいくつか見られるが²⁾、各内部器官の損傷を水中圧力波の圧力の大きさあるいはへい死率などの関係で詳しく検討されたものは見当たらない。前報³⁾では魚の損傷程度を損傷指数なる量を用いて数値化しているが、これは主要な内部器官の損傷をマクロにとらえたものであり、魚の損傷を全体として把握するには便利な数値である。しかし、それとは別に、個々の内部器官の損傷について十分検討しておく必要がある。

本研究は魚の各重要器官の損傷程度と水中圧力波の圧力最高値および魚のへい死率との関係を明らかにするために行ったものであるが、その結果、2、3の知見が得られたので報告する。

2. 実験方法

実験水槽内に固定した供試魚に水中圧力を加え、供試魚の内部器官の損傷と魚のへい死率を調べた。供試魚を麻酔薬（MS-222）で処理した後、ガーゼで軽く包み、段ごとに収容した水槽内に設置した（前報³⁾の

Fig.1 参照）。供試魚には淡水魚のコイと海産魚のマダイ、カサゴを使用した。

水中圧力波の波源には6号電気雷管の爆発を利用し、電気雷管の数および爆源から供試魚までの距離を調節することにより、供試魚に加わる圧力波の強さをコントロールした。供試魚が受ける水中圧力波の強さを実測するために、供試魚の近傍に水中圧力波計測用の電気石ゲージを設置した。圧力ゲージの出力信号はインピーダンス変換増幅器を通してトランジエントレコーダに収録した後、X-Yレコーダあるいはシンクロスコープを使って再生するとともに、トランジエントレコーダとON-LINEで接続されたミニコンピュータを使ってデータ処理を行った。

受圧した供試魚は直ちに取り上げ、小型水槽に入れ、麻酔の切れるのを待って遊泳状態および外見上の損傷状態を観察した。さらに、X線撮影を行い、骨格の異常を調べた上で、解剖して重要な内部器官（肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓）の損傷を観察した。前報³⁾で述べたように、水中圧力波を受けた魚の内部器官は充血や組織の破裂などの損傷が見られ、心臓では静脈洞が破裂しているものもある。また、ひどい場合には骨格の異常も認められ、頭骨、堆体の破裂や分離あるいは肋骨脱離などが見られた。そこで内部器官の損傷の観察では次のような点を調べた。

- (1) 肝臓：組織破裂と血管充血の程度
- (2) 心臓：静脈洞破裂による出血の有無
- (3) うきぶくろ：被膜破裂と血管充血の程度

昭和52年9月26日受理

*横浜国立大学工学部 〒232 横浜南区大岡2-31-1

**水産庁南四国区水産研究所 〒739-04 広島県佐伯郡大野町丸石

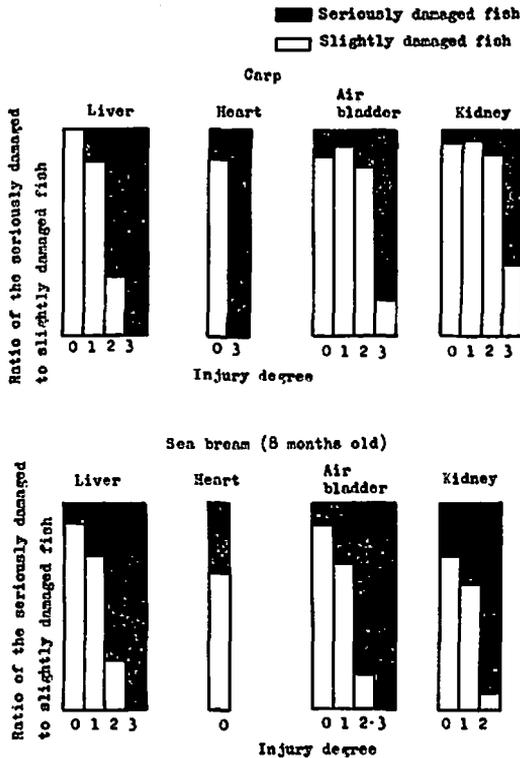


Fig. 1(a) Relation between injury degree and ratio of the seriously damaged to slightly damaged fish.

(4) 腎臓：組織破裂と血管充血の程度

(6) 骨格：椎体分離，肋骨脱離の有無

3. 実験結果および考察

3-1 各内部器官の損傷程度と外見上の観察結果との関係

内部器官の剖検結果を前報²⁾の Table 3 に示した基準に従って定量化した数値である「損傷程度」を個々の魚について各器官毎に求めた。なお、骨格の損傷の数量化に対する基準は前報で触れていないので、次に示しておく。

損傷程度 3：椎体分離+1 以上または肋骨脱離+3

損傷程度 2：肋骨脱離+2

損傷程度 1：肋骨脱離+1

損傷程度 0：異常なし

一方、取り上げ時の供試魚の遊泳状態を観察すると、水槽の底に横臥したもの（へい死）、横転して遊泳不可能なもの（極度のけいれん）、一時的に横転するがしばらくすると遊泳するもの（軽度の異常）および正常に遊泳するもの（生存）が見られる。前報²⁾で明らかにしたように、へい死および極度のけいれんと判定されたものは回復しないので、これらを重態魚と

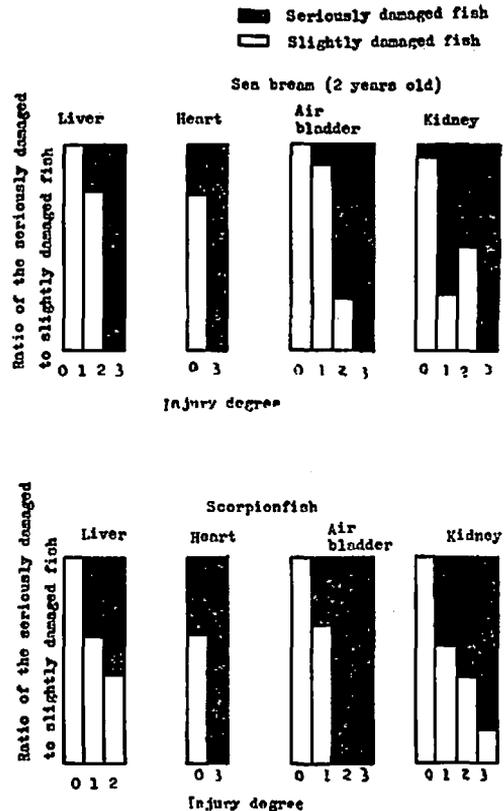


Fig. 1(b) Relation between injury degree and ratio of the seriously damaged to slightly damaged fish.

呼ぶ。一方、軽度のけいれんおよび生存と判定されたものはその後しばらく飼育し、観察したがとくに異常は認められなかったため、これらを軽傷魚と呼ぶ。Table 1~4 には各内部器官の損傷程度別に軽傷魚と重態魚の尾数を示した。また、軽傷魚と重態魚の比率と各内部器官の損傷程度との関係を Fig. 1 に表わした。心臓は魚種に関係なく静脈洞が破裂したものはすべて重態魚となっている。これは静脈洞破裂が魚にとって致命的な損傷であることを示している。他の器官でも損傷程度 3 となっているものは大部分重態魚であり、コイの肝臓、マダイ当才魚の肝臓とうきぶくろ、マダイ 2 才魚のうきぶくろと腎臓、カサゴのうきぶくろの損傷程度が 3 のものは 100% 重態魚となっている。この結果、肝臓、心臓、うきぶくろあるいは腎臓の著しい損傷は魚にとってほとんど致命傷となっており、これらの器官は重要器官であることがわかる。ただし、コイの腎臓は例外で損傷程度が 3 でも約 35% が軽傷魚である。このように魚種による差も考りよしなければならぬことがわかる。骨格はかなり強い圧力波を受けないと損傷は見られない。今回の実験で、骨

Table 1 Number of the slightly damaged and seriously damaged fish in the injury degrees of carp

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
533	Liver	0	21	21	0
		1	456	382	74
		2	48	18	30
		3	8	0	8
	Heart	0	488	421	67
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	45	0	45
	Air bladder	0	229	200	29
		1	156	145	11
		2	77	63	14
		3	71	13	58
	Kidney	0	71	67	4
		1	122	117	5
		2	221	195	26
		3	119	42	77

Table 2 Number of the slightly damaged and seriously damaged fish in the injury degrees of sea bream (8 months old)

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
157	Liver	0	20	18	2
		1	113	84	29
		2	21	5	16
		3	3	0	3
	Heart	0	157	107	50
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	0	0	0
	Air bladder	0	90	80	10
		1	35	24	11
		2	23	3	20
		3	9	0	9
	Kidney	0	122	91	31
		1	24	15	9
		2	11	1	10
		3	0	0	0

Table 3 Number of the slightly damaged and seriously damaged fish
in the injury degrees of sea bream (2 years old)

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
48	Liver	0	18	18	0
		1	22	16	6
		2	8	0	8
		3	0	0	0
	Heart	0	45	34	11
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	3	0	3
	Air bladder	0	24	24	0
		1	11	9	2
		2	4	1	3
		3	9	0	9
	Kidney	0	32	30	2
		1	11	2	9
		2	4	2	2
		3	1	0	1

Table 4 Number of the slightly damaged and seriously damaged
fish in the injury degrees of scorpionfish

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
48	Liver	0	3	3	0
		1	31	19	12
		2	14	6	8
		3	0	0	0
	Heart	0	46	28	18
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	2	0	2
	Air bladder	0	12	12	0
		1	24	16	8
		2	11	0	11
		3	1	0	1
	Kidney	0	12	12	0
		1	16	9	7
		2	14	6	8
		3	6	1	5

格の損傷が見られたのはマダイ2才魚で2尾、カサゴ2尾であり、いずれも損傷程度1であった。

3.2 圧力波の強さと各内部器官の損傷程度との関係

Table 5 には各内部器官の損傷程度を与えた圧力波の強さ別に平均した値とその標準偏差を示した。なお、この実験ではマダイの2才魚以外は、供試魚の受圧方向を腹部、腹側部、頭部および尾部とした場合についてデータを得たので、これらすべてのデータを平均したものを Table 5 に示した。ただし、マダイの2才魚については腹側部から圧力波を与えた場合のデータしか得ていないので、Table 5 のマダイ2才魚の値は腹側部から受圧したものの平均値である。なお、魚の損傷は波動のエネルギー密度との相関性が強いので¹⁾、圧力波の強さはエネルギー密度で表わした。Table 5 をもとにして、波動のエネルギー密度と各内

部器官の損傷程度との関係を Fig. 2 に示した。

水中圧力波の強さと魚の各内部器官の損傷程度との関係は魚種によって差が見られる。たとえば、コイやカサゴではうきぶくろに比べ腎臓の損傷が大きい、マダイでは腎臓に比べうきぶくろの損傷が大きい。一方、魚種が違っても次のような点は共通している。その1つは圧力波の強さの増加に対する肝臓の損傷程度の増加率は小さいが、うきぶくろや腎臓は増加率が大きいことである。そのため受ける圧力波の強さが小さい場合は肝臓の損傷が他の器官のものに比べ大きい、圧力波の強さが大きくなると腎臓やうきぶくろの損傷が大きくなる。共通点のもう1つは心臓の損傷程度が極めて小さいことである。Fig. 3 を見ると、圧力波の強さがコイでは 100~300J/m²、マダイの当才魚では、8~20J/m²、2才魚では 40~70J/m²、カサゴでは 50~100J/m² を超えると、急激に重態魚の出現

Table 5 Injury degree of the main internal organs

Species of fish	E. D.* (J/m ²)	N. F.**	Injury degree							
			Liver		Heart		Air bladder		Kidney	
			Mean	S. D.***	Mean	S. D.***	Mean	S. D.***	Mean	S. D.***
Carp	16.8	40	0.73	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.46
	30.1	40	0.95	0.22	0.00	0.00	0.20	0.41	0.47	0.51
	45.2	40	1.03	0.16	0.00	0.00	0.65	0.48	1.00	0.72
	80.7	40	1.08	0.27	0.00	0.00	1.13	0.46	1.68	0.62
	137	40	1.03	0.16	0.08	0.47	1.38	0.67	2.05	0.60
	267	40	1.03	0.16	0.08	0.47	2.03	0.83	2.38	0.74
	325	40	1.18	0.39	0.68	1.27	2.28	0.85	2.23	0.48
Sea bream (8 months old)	1.30	38	0.76	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6.52	40	0.93	0.42	0.00	0.00	0.25	0.54	0.10	0.38
	20.5	39	1.13	0.57	0.00	0.00	1.10	0.91	0.36	0.67
	46.0	40	1.28	0.55	0.00	0.00	1.48	1.01	0.55	0.75
Sea bream (2 years old)	51.0	5	1.00	0.71	0.00	0.00	1.00	1.41	0.00	0.00
	70.3	10	1.10	0.57	0.30	0.95	1.20	0.92	0.70	1.16
	203	8	1.63	0.52	0.38	1.06	2.88	0.35	1.00	0.00
Scorpionfish	23.3	16	1.19	0.54	0.00	0.00	0.63	0.50	0.81	0.98
	92.5	16	1.19	0.54	0.38	1.03	0.88	0.81	1.06	0.77
	278	16	1.31	0.60	0.00	0.00	1.56	0.63	2.00	0.82

*E. D.; Energy flux density of pressure wave.

**N. F.; Number of fish.

***S. D.; Standard deviation

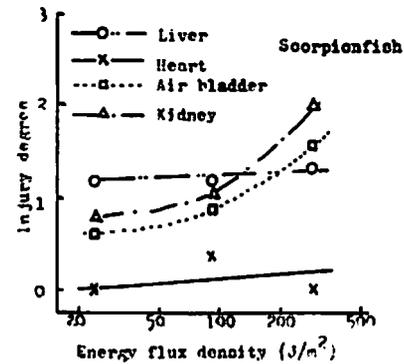
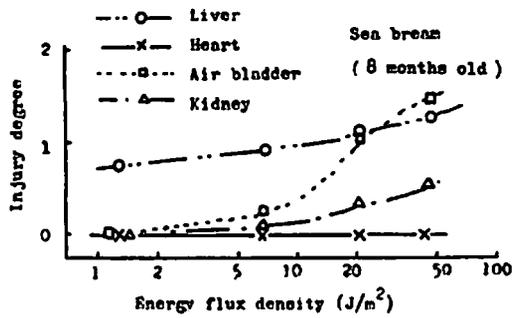
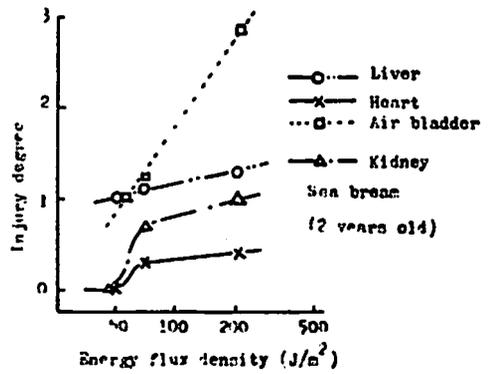
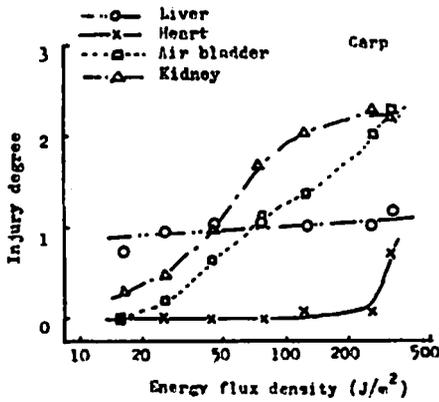


Fig. 2(a) Relation between injury degree and energy flux density of pressure wave.

Fig. 2(b) Relation between injury degree and energy flux density of pressure wave.

率が増加するが、今回の実験結果はこの付近の強さの圧力波を供試魚に加えることによって得られたものである。そこで、上記の特徴は魚が生きるか死ぬかの境界付近の強さの圧力波を加えた場合に成り立つものであることに注意しなければならない。

以上の結果を整理すると、加える圧力波の強さが比較的小さい時は心臓、うきぶくろ、腎臓および骨格の損傷はなく、肝臓の損傷は多少見られるが、致命的な

Table 6 Injury degree of internal organs of fish by the difference of fish direction against explosion source.

Species	Direction*	Number of fish	Injury degree							
			Liver		Heart		Air bladder		Kidney	
			Mean	S. D. **	Mean	S. D. **	Mean	S. D. **	Mean	S. D. **
Carp	Lateral	70	1.09	0.28	0.00	0.00	1.24	1.07	1.56	0.88
	Ventral	70	1.07	0.26	0.00	0.00	1.30	0.95	1.84	0.93
	Head	70	0.90	0.39	0.43	1.06	0.97	1.06	1.21	1.06
	Caudal	70	0.94	0.23	0.04	0.36	0.86	0.84	1.10	0.84
Sea bream (8 months old)	Lateral	37	1.27	0.61	0.00	0.00	0.73	0.87	0.16	0.44
	Ventral	40	1.23	0.62	0.00	0.00	1.10	1.11	0.65	0.83
	Head	40	0.93	0.62	0.00	0.00	0.53	0.85	0.08	0.27
	Caudal	40	0.80	0.41	0.00	0.00	0.45	0.82	0.15	0.43

Species	Direction*	Number of fish	Injury degree							
			Liver		Heart		Air bladder		Kidney	
			Mean	S. D. **	Mean	S. D. **	Mean	S. D. **	Mean	S. D. **
Scorpionfish	Lateral	12	1.75	0.45	0.00	0.00	1.33	0.78	0.92	0.79
	Ventral	12	1.17	0.39	0.50	1.17	1.17	0.58	2.17	0.94
	Head	12	1.00	0.60	0.00	0.00	0.33	0.49	0.83	0.72
	Caudal	12	1.00	0.43	0.00	0.00	1.00	0.60	1.25	0.97

*Direction against explosion source.

**Standard deviation.

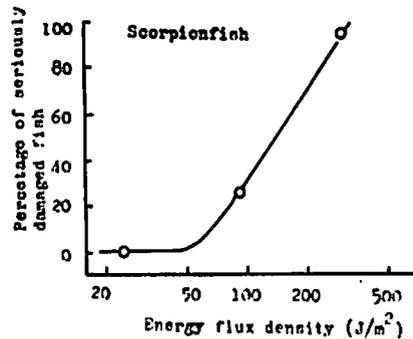
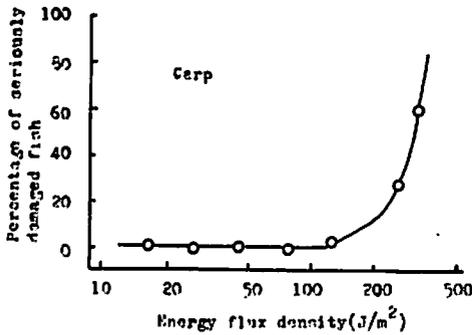


Fig. 3(b) Relation between percentage of seriously damaged fish and energy flux density of pressure wave.

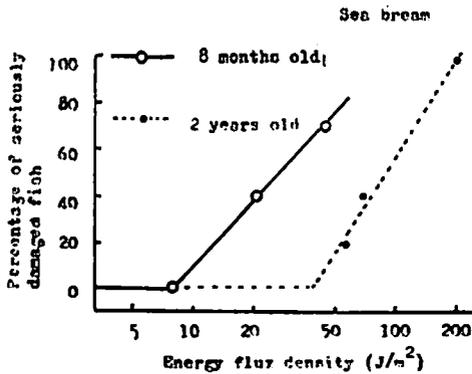


Fig. 3(a) Relation between percentage of seriously damaged fish and energy flux density of pressure wave.

ものではない。圧力波の強さがある値を越えると、うきぶくろおよび腎臓の損傷が急激に増加し、これが致命傷となって重態魚の出現率が増加することがわかる。さらに、圧力波の強さが増加すると、心臓および骨格の損傷が増加する。

3.3 受圧方向の影響

受圧方向によって各内部器官の損傷程度に差が見られる。この点を明らかにするために、Table 6 には供試魚の内部器官の損傷程度を受圧方向別に平均した値およびその標準偏差を示した。なお、ここでは圧力波

の強さが特定のもののデータのみを使用したのではなく、Table 5 に示した圧力値に対するものすべてを平均した値を Table 6 に示した。そのため、圧力値の増分に対する損傷程度の変化率が大きいものは偏差値が大きくなっている。

どの魚種においても、腎臓は腹部から受圧すると他の方向から受圧するより損傷が著しくなる傾向が見られる。この理由として、腎臓がうきぶくろと背骨にはさまれていることから、腹部から圧力波を受けることの両者によって強く圧迫されることが考えられる。肝臓とうきぶくろの損傷は腹側部や腹部から受圧した場合、頭部や尾部から受圧した時より著しい。以上のような共通した傾向以外に個々の魚種特有の特徴も見られる。たとえば、コイでは心臓の損傷が頭部から受圧した場合に著しい。カサゴの場合には、肝臓の損傷が腹側部から受圧すると大きく、また心臓は腹部から受圧すると損傷が大きくなる傾向が見られる。

水中圧力波による魚の内部器官の損傷は魚の内部構造に影響され、魚種によって差が見られる。とくに骨格やうきぶくろは比重や力学的性質が他の器官と非常に異なるので、これらが内部器官の損傷に重要な役割

を果しているような兆候が認められるが、この点についてはさらに詳細な検討を加える必要がある。

4. 結言

魚にとって肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓は重要器官であり、水中圧力波によりこれらの器官が著しい損傷を受けることは魚にとって致命的である。

与えた水中圧力波が比較的小さい時には心臓、うきぶくろ、腎臓ならびに骨格の損傷は見られないが肝臓の損傷は見られる。圧力波の強さが大きくなり、ある値を越えるときぶくろや腎臓の損傷程度が急激に増加し、その結果重態魚の出現率が増す。さらに強い圧力波を受けると心臓や骨格の損傷があらわれる。

受圧方向の影響では、腎臓の損傷は腹部から受圧すると著しく、うきぶくろや肝臓は腹側部や腹部から受

圧した方が頭部や尾部より受圧するより損傷が著しい傾向が今回の実験に用いた魚種に共通して見られた。その他個々の魚種特有の特徴も見られた。

終りに、本研究を行なうに当たり、御指導をいただいた京都大学伊藤一郎教授および水産庁淡水区水産研究所藤谷超部長に深く感謝する。また、御協力をいただいた本州四国連絡橋公団坂出工事事務所の各位に感謝する。

文 献

- 1) 稲村兵助：東北医学雑誌，31，3，p.227 (1942)
- 2) たとえば、黒木敏郎，九万田一己：北大水産彙報 12，(1)，p.16 (1961)
- 3) 小川輝繁，福山郁生，伊藤一郎…工業火薬，37，p.291 (1976)

A study on injuries to fish due to underwater pressure waves (II)

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

Damages caused to the main internal organs of fish due to the underwater pressure resulting from underwater blasting were studied. Freshwater and marine fishes including carps, sea breams and scorpionfish were used in the pilot scale test.

Since liver, heart, air bladder and kidney are important organs for fish, serious damages caused to these organs will prove fatal to fish. When pressure waves of rather low intensity are exerted on a fish, little damages are caused to its heart, air bladder and kidney, while a slight damage is caused to its liver.

When the intensity of pressure waves exceeds a certain value, a sharp increase is observed in the degree of damages caused to its kidney and air bladder, with subsequent increase in the percentage of seriously damaged fish. Heart and bones have higher resistance to pressure waves than other main visceral organs.

In the case of kidney, conspicuous damages are observed when pressure waves are received from the ventral side. On the other hand, in the case of kidney and air bladder, rather higher degree of damages are observed when pressure waves are received from the ventral or lateral side than when they are received from the direction head or caudal.

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

**The Nansei Regional Fisheries Research Laboratory, Maruishi, Oono-cho, Saeki-gun, Hiroshima, Japan)