

水中発破の水産生物に及ぼす影響

阪口 清次・福原 修・梅沢 敏・藤谷 超*・小川 輝繁**

The Influence of Underwater Explosion on Fishes

Seiji SAKAGUCHI, Osamu FUKUHARA, Satoshi UMEZAWA,

Masaru FUJIYA* and Terushige OGAWA**

The constructions of bridges across the Seto Inland Sea are planned, and the underwater explosion techniques will be applied for excavation of sea bottom.

The harmful effects of explosion are seriously concerned about fisheries organisms of the construction sites and the surrounding areas.

It is a main purpose for this study to investigate the influences of the explosion to fish anatomically.

Freshwater and marine fishes, common carp, *Cyprinus carpio*, and rock fish, *Sebastes marmoratus*, were used to observe the harmful effects on external and internal organs in pilot scale and actual field test, and the symptoms were inspected. The difference of damages due to the fish direction against explosion source was also studied. Consequently, sinus venosus, liver and kidney were damaged excessively among the main visceral organs, and rupture of sinus venosus was the most serious fatal damage. Damages by explosion pressure on ventral side were more serious than those on other sides, and those on caudal side was relatively slight.

These phenomena indicated that difference of fish direction against explosion source should be important in observing the symptoms on the influence to fish.

The peak pressure would be apt to be estimated as the indicator of explosion strength. Different influences on fish, however, were often found out in the case of same pressure. It may be depended upon the difference of wave form and other explosive conditions. It is suggested from the results of this experiment that the energy flux density should be suitable to compare the influences of explosion to fish and more accurate evaluation can be expected with this method.

海中土木工事や港湾構築工事では海底掘削や岩礁破砕の目的で水中発破が行われることが多い。このような場合に、その周辺域の環境や水産生物に対して影響を及ぼすことが懸念される。水中発破にともなう物理化学的な諸現象についての工学的知見はかなり多く明らかにされている。しかし、水産生物に対する影響解明を目的とする水中発破実験は作業施工のうえでの規制などから、生物研究者側が独自の立場で実施することは容易でないので、多くのばあい発破現場での影響調査の範囲に終始している傾向が強く、それ

1976年8月18日受理 南西海区水産研究所業績58号

* 淡水区水産研究所, Freshwater Fisheries Research Laboratory.

** 横浜国立大学, Yokohama National University.

らの現象の水産生物に及ぼす影響の本質的な機構については充分明らかにされていないのが現状である。

最近に至り、本州四国連絡橋公団は本四架橋の基礎工事に水中発破工法を利用するについて、多くの水中発破工法を検討してきた。筆者らは水産資源保護の立場から、水中衝撃波による魚介類の損傷被害調査を実施した。その結果、模型実験水槽内での被爆試験や比較的多くの現地発破試験の際の被爆実験を経て、魚介類に対する被害機構の一端を明らかにすることができたのでここに報告する。

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指導を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発破実験にさいして水中衝撃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る。

本試験は水産資源保護協会の水中発破問題検討委員会と連携して行われたものであり、試験実施のうえで有益な助言と協力をいただいた藤村弘毅会長ならびに吉田修二郎参事に深謝する。

I. 水中衝撃波の受圧方向による損傷の差異

水中発破では、水中に棲息している魚は衝撃波のために、非圧縮性の水の壁との間で瞬間的なはげしい圧力変化を受けて、内部器官は圧迫破裂するような損傷を受ける。このばあい、堅い器官に接している柔らかい組織ほど損傷を受け易い傾向がみられることから爆心に対する魚の方向によって、損傷の程度が異なることが予測される。実際の現地発破実験では、自由游泳の状態では供試生物は被爆するので、魚の爆心に対する位置関係は必ずしも同一方向とは限らず、個体による損傷の種類と程度に差異が生ずる要因となり易い。これは発破実験での魚の損傷を比較する場合には、魚の爆心に対する向きを考慮しての資料の整理が必要であることを示唆している。このような考えから、まず、衝撃波の受け方で損傷状態がどのように異なるかを把握するため、淡水魚と海産魚について電気雷管を爆源として損傷試験を実施した。

材料および方法

淡水魚については養成した2歳コイ *Cyprinus carpio* を用い、1974年7月15日から17日まで東京大学工学部安全工学実験場内の模型実験水槽（5 m × 3 m × 3.5 m）を使用し、海産魚についてはカサゴ *Sebastes marmoratus* を材料として1975年2月17日から23日まで、南西海区水産研究所の屋外コンクリート水槽（4 m × 4 m × 2 m）を使用して試験を実施した。実験魚は改良した真珠養殖用の六段籠を用いて、爆心に対して、腹部、腹側部、頭部、尾部が向くように並べて設置した。その際に、必要に応じてMS-222で麻酔し、ガーゼで作った袋に軽く包んで安定させた。爆源には電気雷管を用い、水中での宙吊り状態で爆発させた。爆発後、供試魚はただちに籠から取り出し小型の水槽に入れて被爆による生死を判別し、即死以外の魚については游泳状態を観察した。観察を終えた魚は外見上の損傷状態を調べたうえで解剖して内部諸器官の損傷程度を観察した。

圧力測定は、横浜国立大学安全工学科の測定グループによって実施された。圧力測定方法の系統は Fig. 1 に示すとおりである。ピックアップは圧電変換素子を用いたトルマリンゲージを使用した。これは電気石の圧電効果を利用したものであり、この電気信号をインピーダンス変換増幅器を通してトランジェントレコー

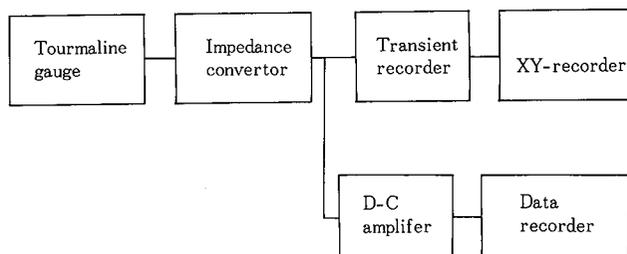


Fig. 1 Block diagram of pressure measurement system.

ダーで測定した。トランジェントレコーダーは電気信号を記憶するメモリー装置を内蔵し、これによって測定信号を記憶させ、記憶された信号はX-Yレコーダーで再生させた。また、これと並行して、データーレコーダーに信号を記録しておき、トランジェントレコーダーで記憶されていない部分の圧力波のチェックなどを行った。

実験結果

1. 淡水魚のコイによる実験

被爆後の取りあげ時に即死と判定した魚は、すべて水槽の底に横臥し(斃死)、極度の痙攣状態のものは横転し游泳不可能であったが(極度の損傷)、軽度のものはしばらくの観察の間に游泳しはじめるものが多かった(軽度の損傷及び生存)。最大衝撃圧 37.6kg/cm^2 までの実験の範囲内では、外見上の損傷としては肛門周辺表皮の充血がみられるものがあったが、著しい被害を示しているものはなかった。内部諸器官の解剖観察では、消化器では胃、腸などに充血がみられたが、胆嚢の破裂したものは全くなかった。肝臓、腎臓など柔らかい組織は破裂出血しているものが多く、循環器では静脈洞の破裂にともなる出血および脊椎動脈溢血などが多く認められた。予備実験を含めて、供試した全個体について斃死および横転状態などを呈していた魚に共通してみられた顕著な所見は、静脈洞、うきぶくろの破裂および腎臓、肝臓の組織破裂などの損傷であった。解剖時において主な内臓器官に極度の損傷を受けた個体が、取りあげ時の状態とどう対応しているかを示したのが Table 1. である。これらから、被爆によるコイの特徴的な損傷は、循環系、特に静脈洞の破裂による出血がその主体をしめ、うきぶくろの被膜破裂や腎臓および肝臓の組織破裂がこれにともなって起り、致命的な障害であると言える。

被爆によるコイの損傷の特徴ならびに電気雷管の爆発に対する影響範囲を把握したうえで、雷管3本の爆発の際に爆心から1mの位置(ピーク圧、 27.8kg/cm^2)において腹部、腹側部、頭部、尾部の各方向にむけて設置した10尾あてのコイに対して被爆実験を行った。供試魚の設置位置における圧力波形は Fig. 2 に示

Table 1. Occurrence of the degrees of the internal organ damage in the injury classes of common carp.

Injury class	Organ damage	Heart	Air bladder	Liver	Kidney	Number of fish
		Rupture of sinus venosus + or more	Destruction of tissue + or more	Destruction of tissue ++ or more	Destruction of tissue ++ or more	
Death		87.5%	31.3%	43.8%	41.2%	16
Serious convulsion		40.0	33.3	5.9	40.0	15
Minor damage and survivor		4.0	8.0	0	24.0	25

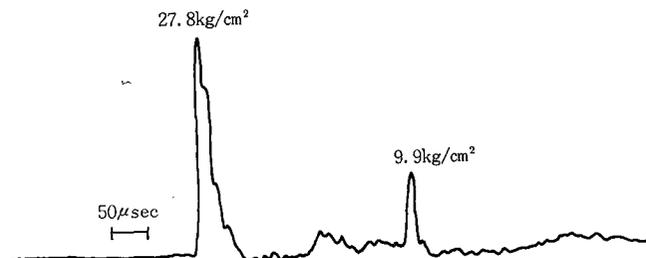


Fig. 2. Example of pressure wave form by underwater explosion of instantaneous cap.

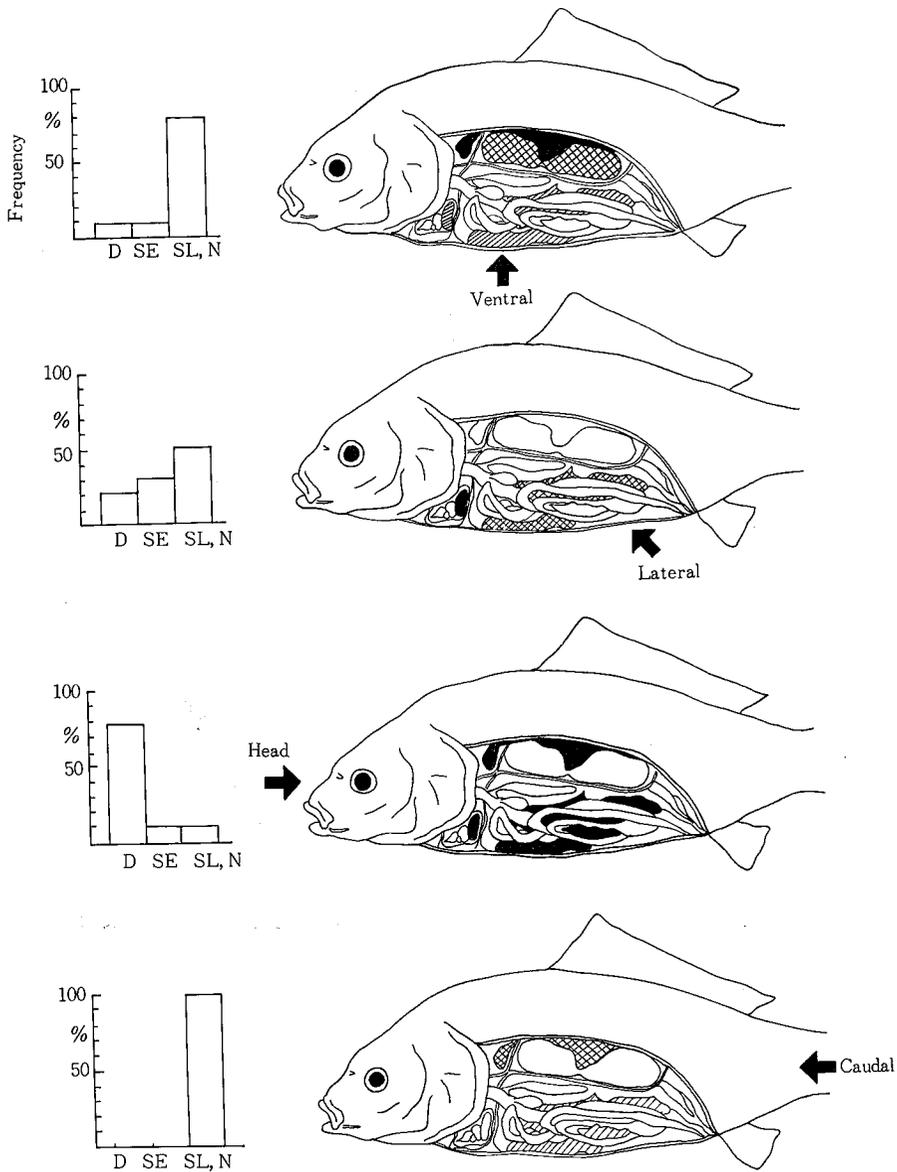


Fig. 3. Semidiagrammatic drawing of damages of external observation and internal organs of common carp by the difference of direction against explosion source (27.8kg/cm^2). D, death on the first inspection; SE, seriously injured; SL, slightly injured; N, normal in appearance. , seriously, damage index averaged over 1.5; , tolerably, damage index averaged 1.0~; , slightly, damage index averaged 0.5~; , none, damage index averaged under 0.5.

したが、雷管爆発によって生ずる正圧部の持続時間は約 50 μ sec である。取りあげ時の状態ならびに解剖による損傷観察の結果は Appendix table 1. に示した。

取りあげ時に斃死および横転状態を呈したものの出現率をみると、頭部からの受圧のばあいが最も高く 90% を示し、腹側部 50%、腹部 20%、尾部からのばあいは全くみられなかった。解剖による内部諸器官の損傷部位は、頭部からのばあいは、ほとんどの魚が静脈洞の破裂による出血が主体であるが、顕著な肝臓、腎臓の組織破裂もこれにもなっていた。腹部からでは脊椎に接している腎臓の損傷が著しく、腹側部では静脈洞の破裂が半数以上のものにみられた。尾部からのばあいには、とくに著しい損傷はみられなかった。

ここで、損傷の程度を数量化するため、解剖による観察結果に Table 2. に示す数値を与え比較検討を試みた。これらの数値を与えることによって、損傷の度合を求め、それらの総計を仮に損傷指数* とよび検討してみることにした。

Table 2. Conversion rule of damage index from symptoms observed in the main organs.

Damage index Organ	3	2	1	0
Liver	Destruction of tissue ++ or more	Destruction of tissue +	Congestion +++~+	No effect
Heart	Rupture of sinus venosus + or more			—
Air bladder	Destruction of tissue + or more	Internal haemorrhage +++~+	Congestion +++~+	—
Kidney	Destruction of tissue ++ or more	Destruction of tissue +	Congestion +++~+	—

内臓諸器官の観察結果に、これらの数値を適用して、各個体の損傷程度を総計しその平均値を基として、損傷状態を示したのが Fig. 3 である。全般的にみると、損傷を受け易い器官の位置関係では受圧面に近い柔らかい器官の肝臓、また受圧に対して圧迫され易い器官、たとえば腹部からの受圧に際しては堅い脊椎と強靱なうきぶくろにはさまれている腎臓などが特徴的に著しい損傷を受けており、器官の損傷は水中衝撃波の受圧方向と深い関連がみられることが明らかに認められた。

なお、受圧方向別の異なるピーク圧に対する被爆実験を予備的に上記の実験を含めて、19.7~37.6 kg/cm² について 4 回実施した。この場合にみられた特徴としては、頭部からの受圧はある限界までは強い抵抗性を示すが、その限界を超えると急に損傷程度が大きくなる傾向がうかがわれた。

2. 海産魚のカサゴによる実験

受圧方向別の内部諸器官の損傷程度は Appendix table 2. に示したように、腹側部からの受圧の場合は殆どどの個体に肝臓組織の破裂がみられ、腹部からでは脊椎に接し強靱なうきぶくろにはさまれている腎臓が著しく特徴的な損傷を受けている。頭部からでは著しい損傷はみられないが、尾部からでは多くの器官が一般的な損傷を受けている。

損傷状態を模式的に示すため、解剖観察結果にコイで試みた前項の損傷指数の数値を与え、各器官ごとに平均した値を基として、ピーク圧 21.9 kg/cm² の場合の被爆実験に適用したのが Fig. 4 である。全般的にみると損傷を受け易い器官の位置関係では受圧面に近い柔らかい肝臓、また、受圧に際して堅い脊椎と強靱なうきぶくろにはさまれている腎臓などが著しい特徴的な損傷を受けており、コイの場合と同様に器官の損傷は水中衝撃波の受圧方向と深い関連がみられた。

*観察項目が 4 器官であるので、全項目について影響が特に著しいと仮定した場合の損傷指数は 12 となる。

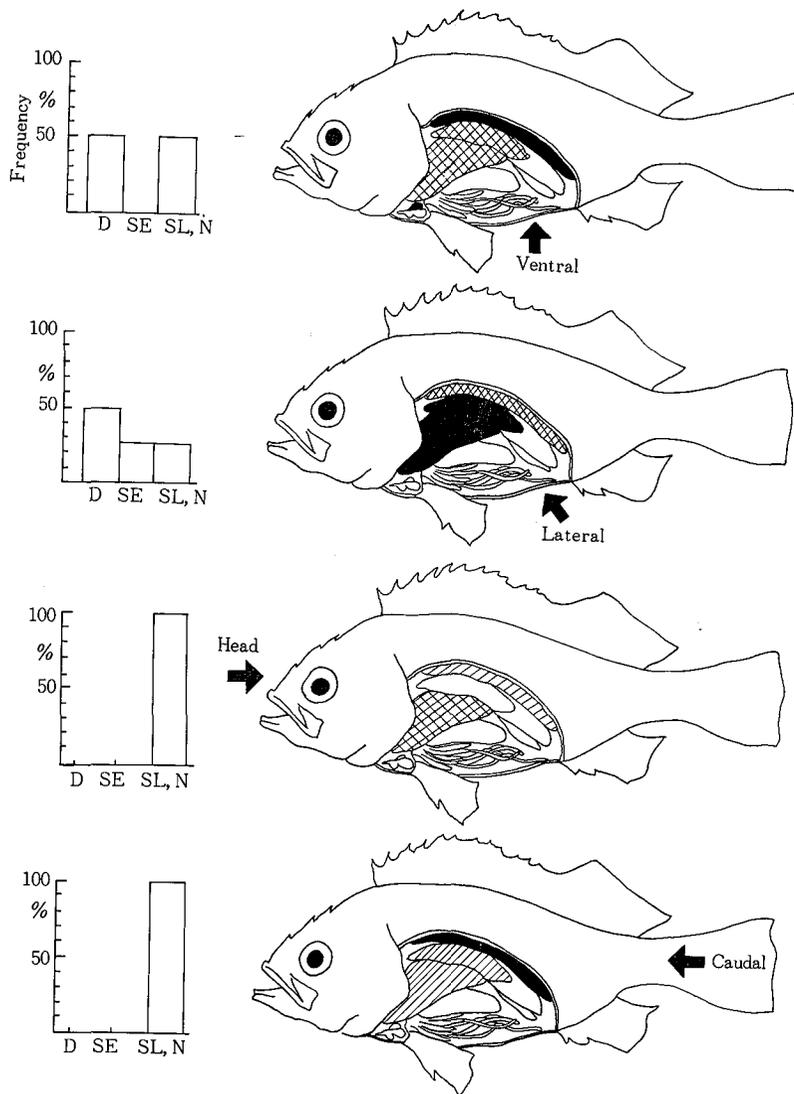


Fig.4 Semidiagrammatic drawing of damages of external observation and internal organs of rock fish by the difference of direction against explosion source (21.9kg/cm²). D, SE, SL and N and symbols in the figure are same as the Fig.3.

なお、受圧方向別の異なるピーク圧に対する被爆実験を、上記の実験を含めて、12.1~36.6kg/cm²について3回行った。いずれの場合も屋外コンクリート水槽内における雷管爆発によって生ずる圧力波形は、コイの被爆実験の場合の波形と殆んど同様な特徴を示し、正圧部の持続時間は約50μsecであった。取りあげ時に斃死状態を呈したものの出現率をみると、腹部および腹側部からの場合それぞれ50%を示し、頭部、尾部からでは全くみられなかった。受圧方向別に、ピーク圧の違いによる損傷指数との関係をあらわしたのがFig.5である。受圧方向としては腹部からが最も被害が大きく、頭部および尾部からの場合はある限界を超えると急に損傷程度が大きくなる傾向がうかがわれた。

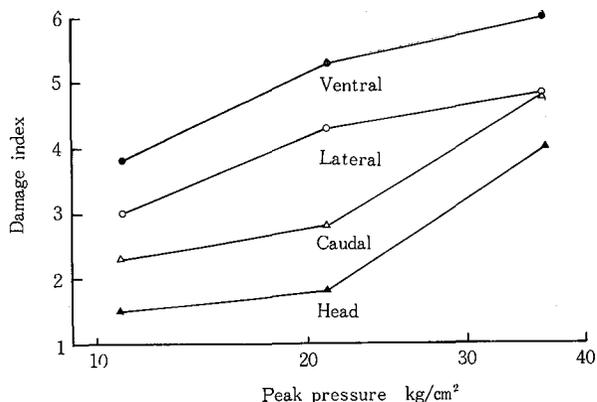


Fig. 5. Relation between damage index and peak pressure with the difference of direction against explosion source.

考 察

水槽内での被爆実験では比較的多くの供試生物も設置し易く、損傷影響も死亡率などとして数量化し検討できる。しかし、現地での発破実験では供試魚の入手や実験用籠の設置などの都合で期待どおりの尾数を配置することが容易でないことが多く、解剖観察結果の数量化についての工夫検討が望まれる。一般に解剖観察によって得られる結果は観察者の主観に影響され易く、必ずしも正確な量的比較とはならない。しかし、同一観察者による観察結果に基づき、さらに多くの供試魚について被爆後の継続飼育試験と内部器官の損傷程度を組織学的に検討、吟味した結果である場合にはかなりの精度をもって比較し得るものと考えられる。

内部器官の損傷は水中衝撃波の受圧方向と深い関連が認められたが、コイでは尾部からの受圧の場合が最も損傷程度が少なかったが、カサゴでは尾部からは比較的大きな損傷を受けた。供試時のカサゴは産卵期であったために腹部が膨満しており、このことが比較的外側に接した器官の損傷を大きくしたものと考えられた。なお、頭部からの受圧の場合には、ある限界のピーク圧まではかなり強い抵抗性を示すが、その限界を超えると急に損傷程度が大きくなる傾向がみられたが、これらのことから、魚種の体形、骨格の形態、孕卵期などによる内臓の位置関係などでも損傷の程度は異なることが予察されるので、今後とも検討していきたい。

Ⅱ. 水中衝撃波の波形特性と損傷の差異

従来の研究では、水中発破にともなう水産生物への損傷吟味は、衝撃波の圧力最高値との関連で検討されてきたものが多い。しかし、最近の研究によって、爆薬の種類、発破工法などが異なると、同じ薬量の爆発で同じピーク圧であっても、同一の魚種に対しても著しく異なった損傷を与えることが明らかとなった。魚類の損傷状態は単に衝撃波のピーク圧との関連だけでは論じ難いことがわかり、圧力波形の違いが魚類の損傷状態に差異を与える要因になっているようである。

本項では、従来から使用薬量、ピーク圧あるいは爆源からの距離などの視点から考察されていた被爆損傷状態を、異なる仕様の発破で生ずる異なった条件の圧力波形であっても、魚類の損傷状態を統一的に検討できる衝撃波特性の指標を見出そうとした。

実験方法

実験は1975年10月13日から17日まで、前述の東京大学工学部安全工学実験場内の模型実験水槽を使用し、養成した1歳コイを用いて行った。供試魚の被爆方法ならびに観察、処理は前項とおおむね同様であるが、

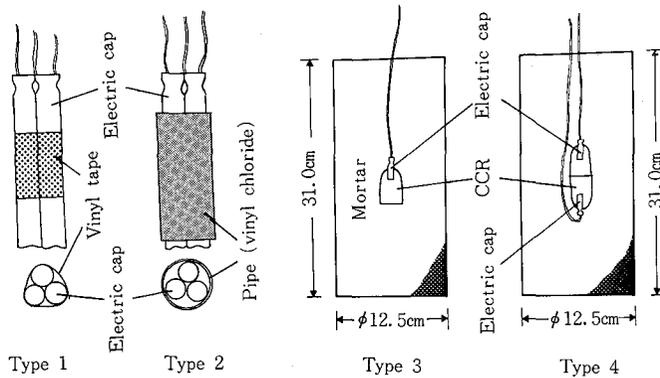


Fig. 6. Type of explosion source used in the experiment.

前項の実験で受圧方向のちがいによる内部器官の損傷程度は大きく異なることが明らかになったので、実験はすべて腹側部からの受圧になるよう供試魚を設置した。

爆源には異なる波圧波形を発生させるために、電気雷管およびコンクリート破砕器（CCR旭2号、以下CCRと呼ぶ）を使用した。CCR旭2号はCCR用火薬30gを塩ビ製容器に詰めたものであるが、CCRはそれのみでは完全燃焼しないので Fig. 6 の3、4型に示すように、モルタル内に埋め込み電気雷管1～2本を起爆源として使用し爆発させた。

なお、2個あるいは3個の電気雷管を段差をつけて爆発させて繰り返しの圧力パルスを加え、加える圧力パルスの時間間隔のちがいによる損傷程度の差異についても調べた。この場合、段差の時間間隔を変えるためには瞬発電気雷管および点火から爆発に至るまでの経過時間の異なるMS 2段～5段、DS 2段～3段などの電気雷管を組み合わせた。1秒間隔で三つの圧力パルスを得る場合は瞬発電気雷管を用い、1秒間隔に点火スイッチを入れる方法をとった。

実験結果

今回の実験は、内部器官への影響が現れはじめてから、斃死に至るまでの比較的せまい範囲について、損傷程度と衝撃波の波形特徴との関連を把握することを目的として、予備実験を行った。その結果、瞬発電気雷管の爆発による影響はピーク圧で表示すると20～30kg/cm²、CCRによるそれは6～15kg/cm²であることが明らかになったので、本実験はこれらの範囲についてそれぞれ4回実施した。被爆後の取りあげ時の外見上の観察および内部諸器官の解剖観察結果については Appendix table 3. に示した。これらの数量化の試みについては前項の方式に準じて整理した。

予備実験も含めて供試した全個体（n=168）について、取りあげ時の状態と損傷指数を対応させた場合の分布状態を Table 3. に示した。取りあげ時に斃死している個体は損傷指数で8以上、横転して間もなく斃死することが確実と思われる極度のけいれん状態のものは5～10（平均値で6.7）を示している。軽

Table 3. Injury classes of examined fish and damage index immediately after explosion.

Injury class	Distribution of damage index (Number of fish)	Average of damage index
Death	Over 8 (6)	9.8
Serious convulsion	5～10 (34)	6.7
Minor damage	4～7 (5)	5.2
Survivor	under 5 (123)	—

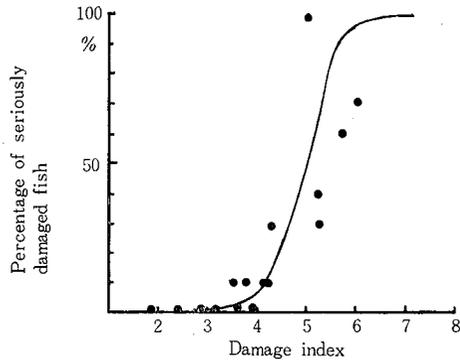


Fig.7. Relation between percentage of seriously damaged fish and damage index immediately after explosion.

度の異状個体は分布で4~7, 平均値で5.2, 游泳状態にも異状が認められない生存個体は5以下の損傷指数を示していた。さらに、これらの分布状態を実験群としての損傷指数の平均値と極度のけいれん個体以上の出現率の関係を示したのが Fig.7 である。被爆によって全く影響を受けないか、ある程度の損傷を受け

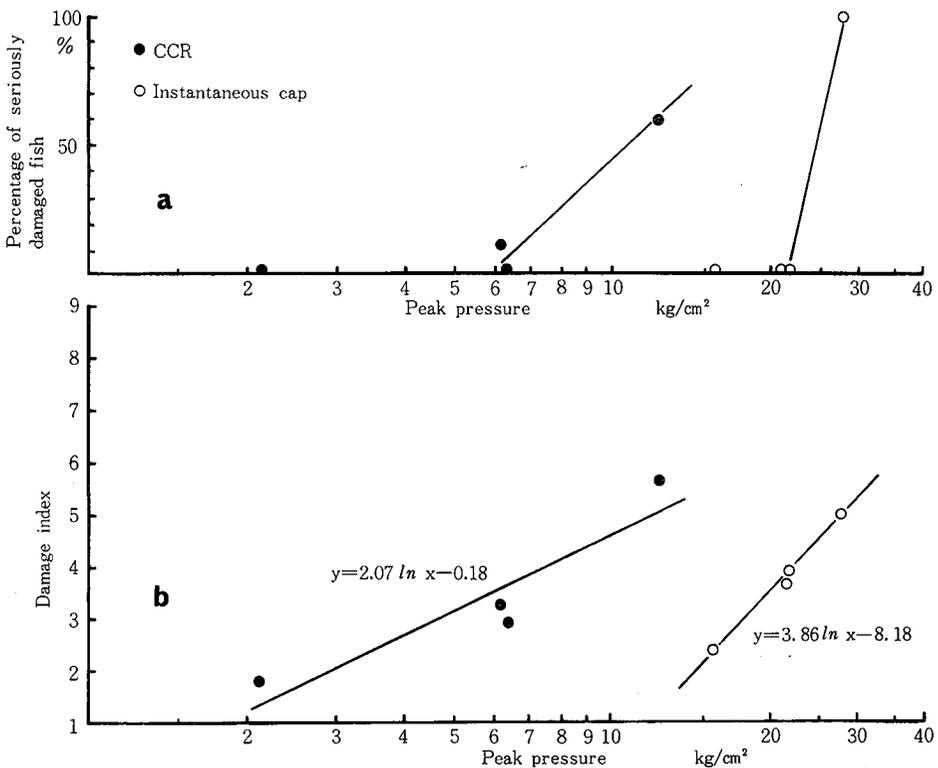


Fig.8. Relation between the influence to fish and peak pressure by underwater explosion of CCR and instantaneous cap. Seriously damaged fish includes both those of death and those of seriously injured on initial observation after explosion.

たととしてもその後の生存には影響が少なく治癒するような損傷指数の安全限界は、被爆後の飼育試験などをも吟味し、3~4程度に目安をおくのが妥当と判断された。

瞬発電気雷管及びCCRを用いた爆発の衝撃波のピーク圧と極度のけいれん個体の出現率、損傷指数との関係を示したのが Fig. 8 である。a 図により、極度のけいれん個体が出現しはじめるピーク圧は、CCR では 6 kg/cm^2 前後であるのに対し瞬発雷管では 20 kg/cm^2 程度で、同程度の影響を与えるピーク圧には大きなひらきがあることがわかる。なお、損傷指数とピーク圧との関係を圧力波形の異なる電気雷管とCCRの爆発について示したb 図について、さきに安全限界の目安として考えた損傷指数3~4に対応するピーク圧をみるとCCRでは 6 kg/cm^2 程度、電気雷管では 20 kg/cm^2 となっている。a 図との関係からみても解剖観察から得た損傷程度に数値を与えて数量化した損傷指数は、この種の検討の方法の一つとして妥当なものと認められた。

Fig. 8 から明らかなように、波形の異なる衝撃波については、同じ程度の損傷を示すピーク圧は爆発の種類によって異なっており、ピーク圧だけの表示では供試魚に対する損傷影響を同じ基盤のうえでは論じ得ないことがわかる。電気雷管とCCRによる爆発のさいに生ずる衝撃波の特徴を Fig. 9 の数例について比較

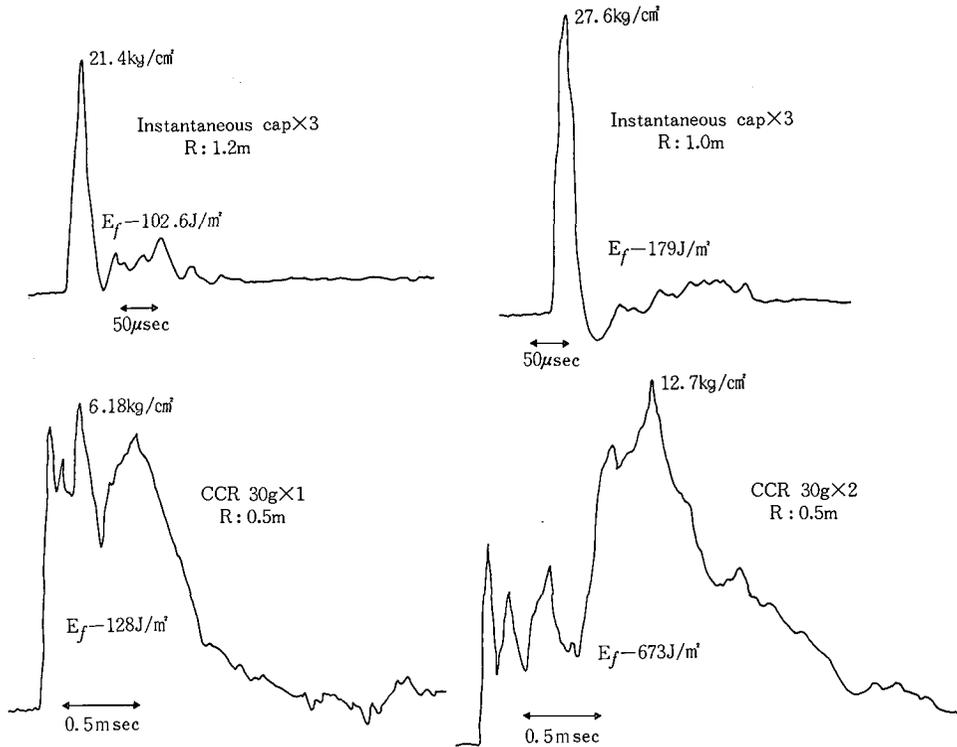


Fig. 9. Examples of pressure wave form by underwater explosion of CCR and instantaneous cap. R, distance from explosion point.

すると、その大きなちがいは前者では波圧の正圧部分の持続時間がほぼ $50 \mu \text{ sec}$ であるのに対して、後者では $1 \sim 2 \text{ m sec}$ であり20~40倍の持続時間の差がみられる。ここで、内部器官に与える損傷は、圧力波動の波長が長くなるCCRの爆発の方が電気雷管の場合より同じピーク圧でもより大きな影響を与えていることから、内部器官の損傷に関与する要因として圧力最高値以外に持続時間も考慮する必要があると思われる。圧力の持続時間によって表わされる物理量としてはインパルスとエネルギーがあるが、物理的に考

えた場合、内部器官が損傷を受けるということは、外部からなんらかの仕事量が与えられることと理解され、エネルギー密度が大きいほど内部器官に与える損傷が大きいものと推論される。波動のもつエネルギー密度は、次式によって与えられる。

$$E_f = \frac{1}{\rho_0 C_0} \int \{P(t)\}^2 dt$$

E_f : エネルギー密度, ρ_0 : 媒質の密度

C_0 : 媒質の音速, $P(t)$: 圧力値

エネルギー密度の算出については、本来、波動の始まりから最後までを計算する必要がある。とくに、現地での穿孔発破の場合などでは、幾つかの波形が発生するのが通常であるので、遅発電気雷管を用いて、段差間隔をかえて、くり返しの圧力パルスを加える実験を行い、段差の時間間隔のちがいと損傷程度について

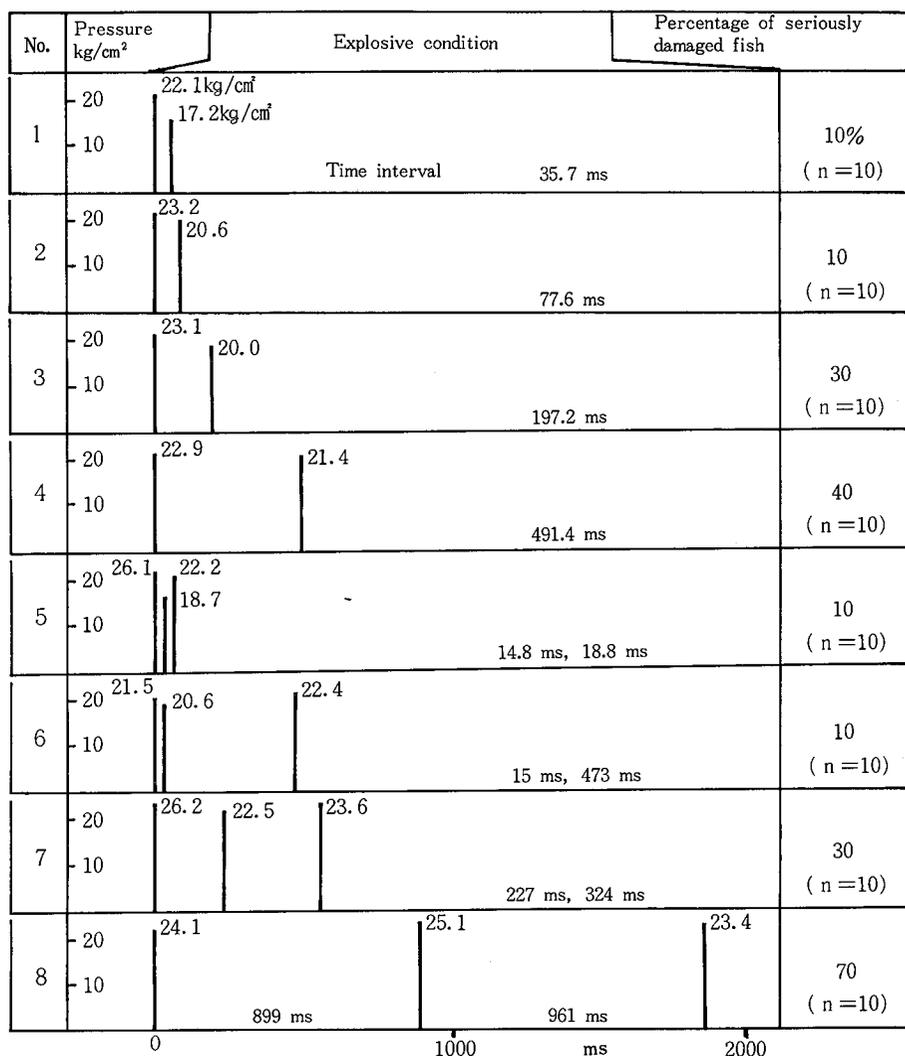


Fig. 10. Frequency of the percentage of seriously damaged fish by the difference of explosive conditions.

検討した。この結果、波動の持続時間が 100m sec 以下の場合には、その間に 2 発、3 発と繰り返しの圧力パルスが加わっても、瞬発電気雷管による 1 発の爆発の場合とほとんど変わらない損傷程度を示すことが Fig. 10 からうかがわれる。

したがって本報では、くり返しあらわれる正圧部のそれぞれのエネルギー密度を計算し、中でもっとも大きなエネルギー密度をその波動のエネルギー密度とした。これにより算出したエネルギー密度は、付表のそれぞれの最下欄に示した。

算出したエネルギー密度と損傷指数の関連を、CCR 及び瞬発電気雷管の爆発について表わしたのが Fig. 11 である。損傷指数(y)とエネルギー密度(x)との関係は、圧力波形の異なる CCR と瞬発電気雷管の爆発いずれの場合も、 $y = 0.99 \ln x - 0.65$ の関係式で表わされ、同じ基盤のうえで統一的に論ずることの可能性が示唆された。これから、被爆に対するコイの損傷指数で表示される安全限界 3 ~ 4 に対応するエネルギー密度を計算すると 40 ~ 100 J/m² となる。

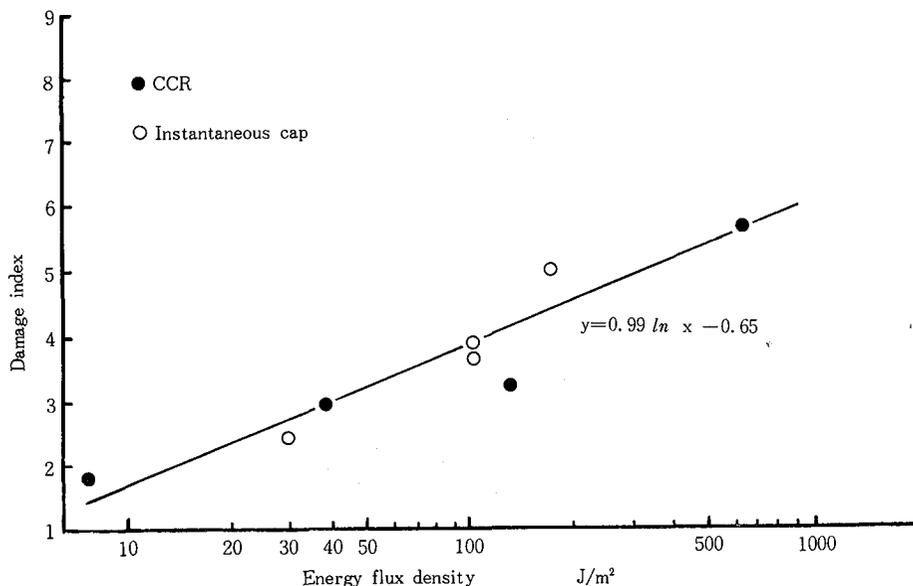


Fig. 11. Relation between damage index and energy flux density by underwater explosion and instantaneous cap.

考 察

コイについては被爆による損傷程度をエネルギー密度で関連づけることで、圧力波形の異なる爆発でも同じ基盤のうえで論議できることが示唆された。このような検討方法が、発破工法、薬量、地盤などのちがいにより衝撃波の波形に著しい相違があった場合についてもあてはめられるかどうかを同一魚種で、異なる発破工法を用いて行われた既往の実験資料に基づいて検討する。

1) カサゴ (穿孔発破と瞬発電気雷管爆発)

電気雷管による水槽内実験は受圧方向による損傷影響を検討した実験資料 (Appendix table 2.) を使用した。穿孔発破資料は南北備讃瀬戸現地穿孔発破¹⁾のさいの三ツ子島周辺における実験 (4 A) のうち、地点 1 ~ 3 (爆心から 20 ~ 100m) についてエネルギー密度を算出した。この場合、著しく高いピーク圧とエネルギー密度を示した爆心近くの地点は、ここでの目的が安全限界付近の比較的せまい範囲についての整理であることから除いた。なお、内部器官の損傷程度についても、著しい影響を受けた場合に認められるような

骨格損傷などは除き、肝臓、循環器、うきぶくろ、腎臓の比較的損傷を受け易く、かつ主要な4器官にしぼって整理し、この結果を Appendix table 4. に示した。

瞬発電気雷管の圧力波形は前項でも述べたように、正圧部は単純で持続時間はほぼ $50\mu\text{sec}$ であるのに対し、現地穿孔発破では Fig. 12 にその数例を示したように、波形はかなり複雑となり、持続時間も多くのばあい $5\sim 8\text{msec}$ となり、電気雷管の爆発の場合にくらべると $100\sim 160$ 倍の持続時間を示している。

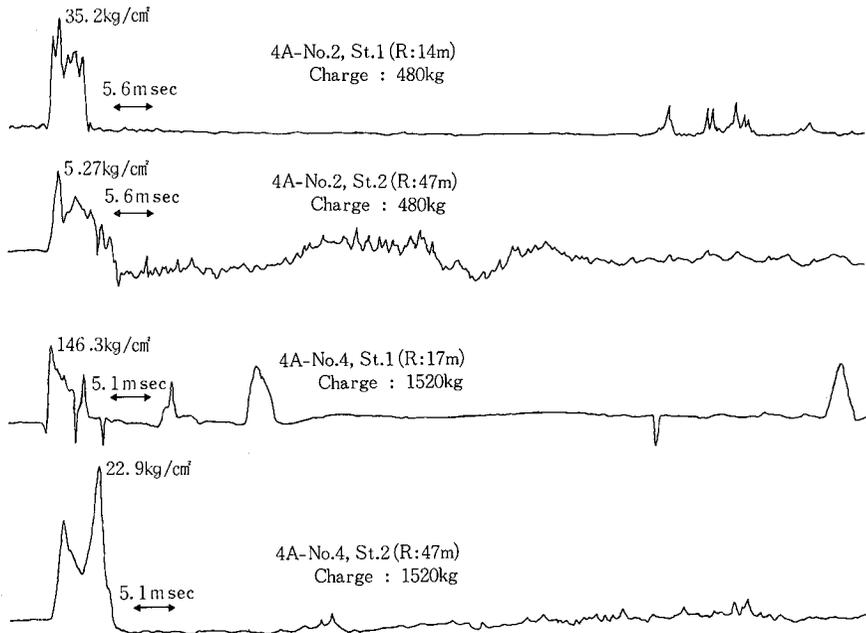


Fig. 12. Examples of pressure wave form by borehole blasting at Bisan strait (1975)¹⁾.

電気雷管爆発と現地穿孔発破におけるピーク圧およびエネルギー密度と損傷状態との関係を Fig. 13 に示した。この場合、現地穿孔発破では、各点のばらつきが大きくみられるが、これは供試魚の自由游泳による受圧方向のちがいにともづく損傷程度の差異と考えられる。さらに、実験時期がカサゴの産卵期にあたっていたことから、個体によっては受精卵が体内に充満していたことが損傷程度にむらを生じさせた原因であり、このことは解剖観察でもうかがわれた。

損傷の程度を、極度のけいれん以上の個体の出現率あるいは損傷指数として表わし、これとピーク圧との関係を示した a および b 図をみると、波形の大きく異なる両爆発では、同じ損傷程度を示すピーク圧の値はそれぞれ大きくかけ離れている。

ここで、コイの場合と同じようにエネルギー密度との関連で示すと c 図となるが、ばらつきはやや大きいが一応同じ基盤のうえで論議できる傾向がうかがわれる。

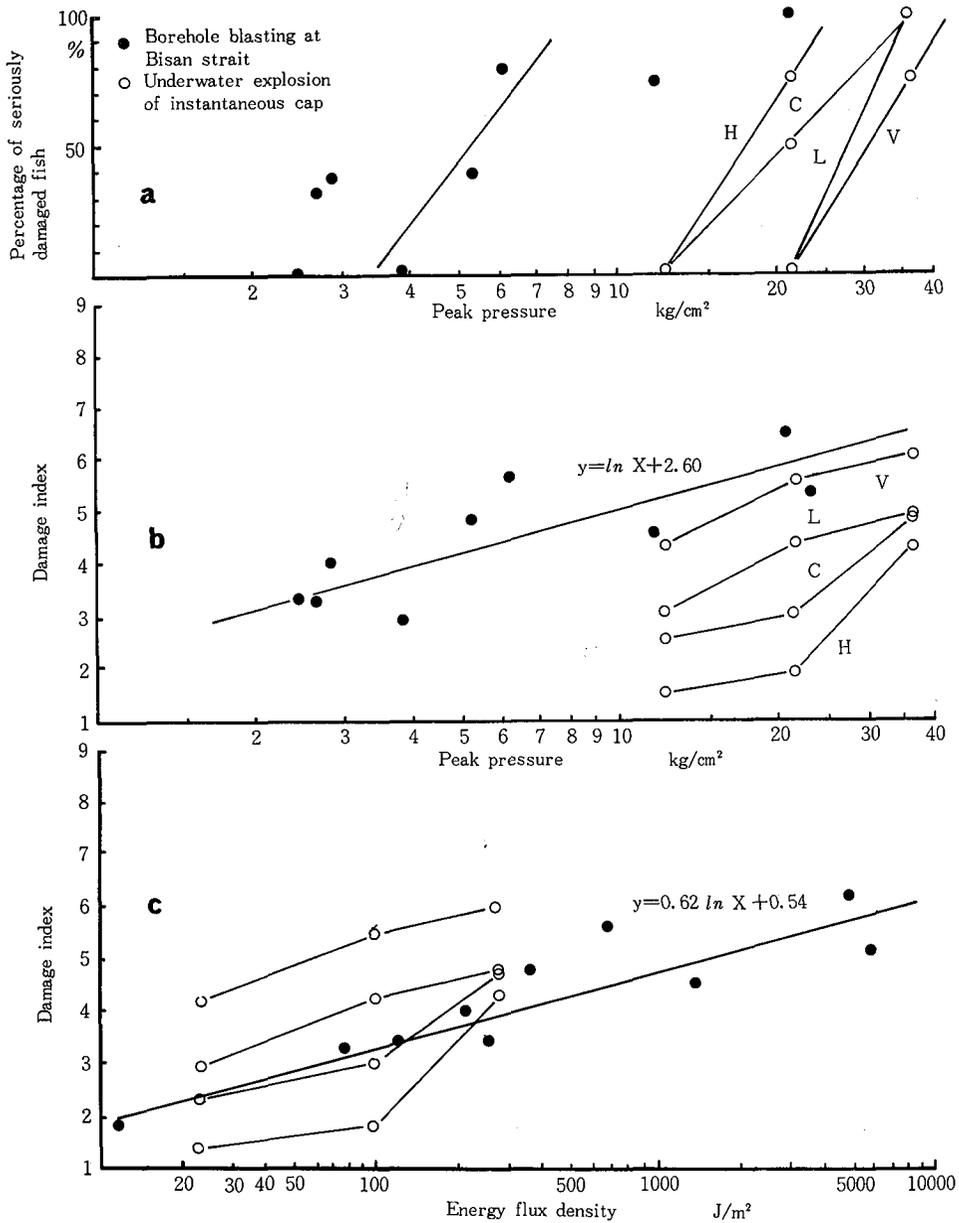


Fig. 13. Relation between the influence to fishes and strength of explosion by underwater explosion of instantaneous cap and borehole blasting at Bisan strait (1975)¹⁾. V, L, C, and H in the figure show the direction of fishes against explosion source. V; ventral, L; lateral, C; caudal, H; head

2) スズキ (穿孔発破と水中宙吊り爆発)

穿孔発破は前述資料¹⁾を用い、宙吊り爆発は三重県五ヶ所湾で行われた“水中爆破に伴う水中衝撃波軽減法”での第9回目実験²⁾の資料を用いた。使用した整理資料は Appendix table 5. に示した。宙吊り爆発は薬量 5 kg の新桐ダイナマイトによる爆発であるが、正圧部の持続時間は約 1 m sec で、現地穿孔発破の 5

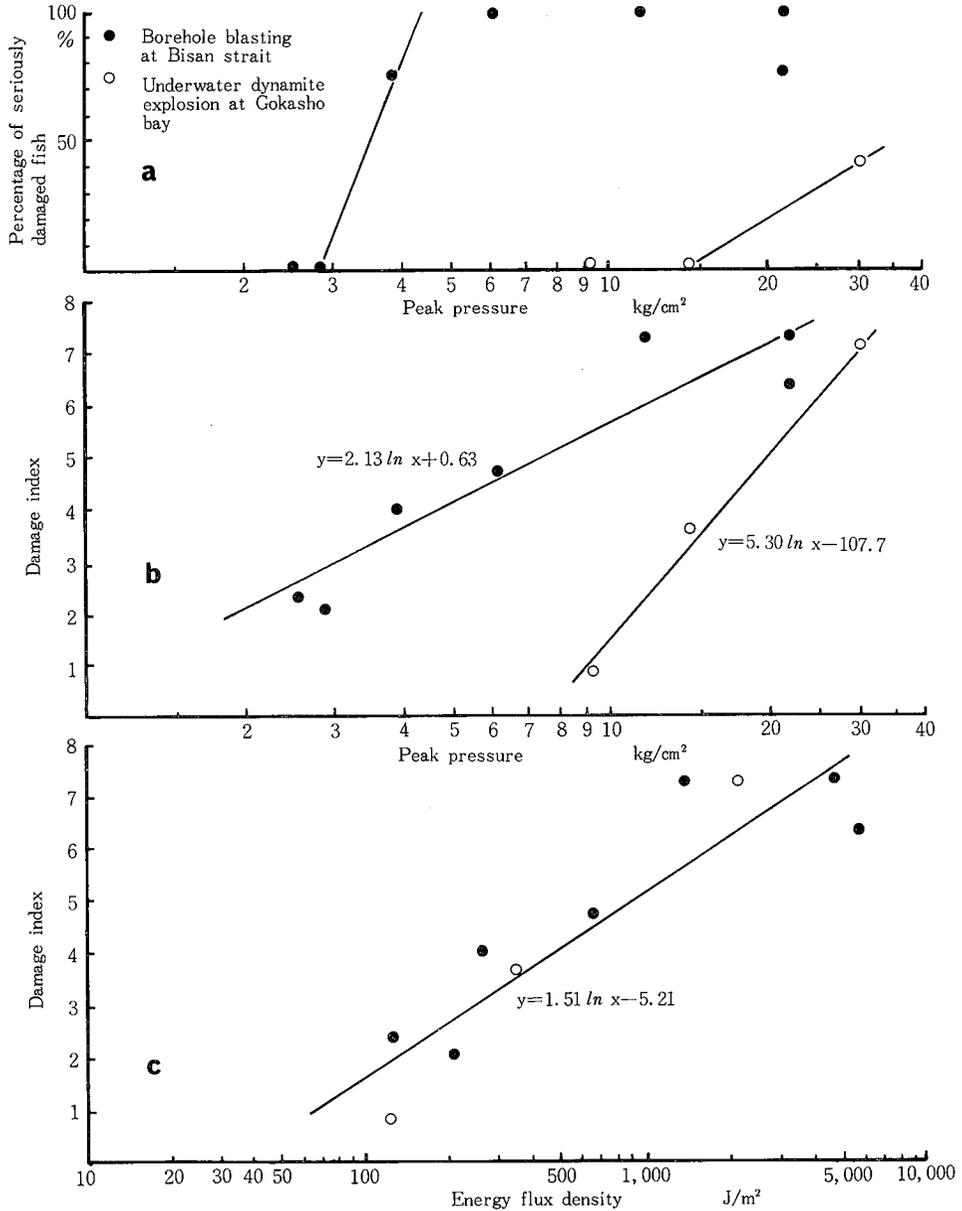


Fig. 14. Relation between the influence to fishes and strength of explosion by underwater dynamite explosion at Gokasho bay (1970)²⁾ and borehole blasting at Bisan strait (1975)¹⁾.

～8 m sec にくらべると $1\frac{1}{5}$ ～ $1\frac{1}{8}$ 倍となっている。なお、宙吊り爆発では波圧測定器と供試魚の設置場所が距離的にずれていたため、供試魚の地点におけるピーク圧及びエネルギー密度は関係式から算出した。

宙吊り爆発と現地穿孔発破におけるピーク圧及びエネルギー密度と損傷状態との関係を Fig. 14 に示した。ここでピーク圧との極度のけいれん以上の損傷を示した個体の出現率あるいは損傷指数との関係をみると、波形の異なる両爆発を同じ基盤のうえで論議できないことは、コイ、カサゴでのばあいと同様である。

ここで、損傷指数とエネルギー密度との関連において両爆発を検討すると関連式は $Y = 1.51 \ln x - 5.21$ で表わされ、同じ基盤のうえで統一的に論議できる可能性がうかがわれる。

水中爆発にもなって生ずる衝撃波の水産生物に及ぼす影響の吟味を、従来から一般に用いられてきたピーク圧のかわりに、衝撃波のもつエネルギー密度との関連で検討した結果、異なる波形をもつ衝撃波であっても、同じ基盤のうえで検討できることがほづうかがわれた。水中発破にもなって生ずる物理化学的な諸現象についての工学的知見は多く、発破工法、爆薬、岩盤特性などの事前調査によって、圧力波形やピーク圧などもかなりの精度で予察することができる。このことから、内部諸器官の損傷にかかわりあっている衝撃波要因が、より適確に解明されるならば、予定される発破工事の水産生物に及ぼす影響の様態と程度が予測でき、有用水産資源の保護を目的とした適正な施行計画策定のための、より精度の高い基礎資料が得られるものと期待される。

要 約

- 1) 水中発破を実施するさいに生ずる水中衝撃波の受圧方向による損傷の差異を、コイおよびカサゴを材料として模型実験水槽で爆発実験を行って検討した。
- 2) 被爆によって損傷を受け易い器官は静脈洞破裂、腎臓、肝臓の組織破裂などで、とくに静脈洞破裂は斃死に直接的に結びつく。
- 3) 内部器官の損傷は、水中衝撃波の受圧方向と深い関連がみられた。一般的には、腹部からの受圧では脊椎に接している腎臓の損傷が著しく、腹側部からの受圧では肝臓組織の破裂が認められ、尾部からのばあいは比較的抵抗性が強い傾向がみられた。頭部からのばあいは、ある限界のピーク圧までは抵抗性が強いが、その限界を超えると急に損傷程度が大きくなる特徴がみられた。これらのことは、発破実験で魚の損傷を比較するばあいには魚の爆心に対する向きを考慮して資料解析をする必要があることを示唆している。
- 4) 水中衝撃波の水産生物に及ぼす影響について、衝撃波の波形特性と損傷状態との関係をみると、圧力波動の波長が長い衝撃波は、同じピーク圧でもより大きな影響を与えることが明らかになった。
- 5) 内部器官の損傷程度を、波動のもつエネルギー密度との関連で検討した結果、衝撃波の波形のいちじるしく異なるCCRと電気雷管爆発でも同じ関係式で表わすことができた。
- 6) 既往の実験資料について、水中衝撃波のいちじるしく異なる各種の爆発について、損傷状態をエネルギー密度との関連で検討することによって、異なる衝撃波によるものであってもかなり同じ基盤のうえで論議できることがわかった。

文 献

- 1) 水中発破問題検討委員会，1975：水中発破問題検討委員会 報告第1号．日本水産資源保護協会，15—154．
- 2) 若園吉一・小川輝繁・沢田保夫・阪口清次，1970：水中爆破に伴う水中衝撃波軽減法(1)．工業火薬協会誌，31(2)，81—88．

Appendix table 1. Symptoms observed on major internal organs (*Cyprinus carpio*)
Underwater explosion by instantaneous cap

Direction against explosion source			Head									
Number of fish			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Body Length (cm)			20.0	21.0	22.0	23.0	20.5	23.5	21.5	23.0	22.0	21.0
Body Weigth (gr)			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*			N	D	D	D	D	D	D	D	SE	D
Damage index			3	7	6	8	8	7	8	7	4	7
Peak pressure (P)			P : 27.2 Kg/cm ²									

* D, death on first inspection; SE, seriously injury; SL, slightly injury; N, normal in appearance.

(continued)

Direction against explosion source			Ventral									
Number of fish			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Body Length (cm)			19.5	18.0	18.0	20.0	18.5	20.0	-	-	-	-
Body Weigth (gr)			240	180	160	230	180	200	-	-	-	-
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*			N	N	N	SE	D	N	N	N	N	N
Damage index			7	4	4	7	7	4				
Peak pressure (P)			P : 27.2 Kg/cm ²									

(continued)

Direction against explosion source			Lateral									
Number of fish			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Body Length (cm)			21.0	22.0	21.5	21.5	22.0	21.5	21.0	21.5	-	-
Body Weighth (gr)			235	285	290	250	265	295	270	255	-	-
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*			SE	N	N	D	SE	D	N	SE	N	N
Damage index			5	1	4	5	3	6	1	6		
Peak pressure (P)			P : 27.2 Kg/cm ²									

(continued)

Direction against explosion source			Caudal									
Number of fish			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Body Length (cm)			20.5	18.6	19.3	20.0	17.7	-	-	-	-	-
Body Weighth (gr)			230	221	216	220	135	-	-	-	-	-
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*			N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Damage index:			4	2	2	3	2					
Peak pressure (P)			P : 27.2 Kg/cm ²									

Appendix table 2. Symptoms observed on major internal organs (*Sebastiscus marmoratus*)

1. Underwater explosion by instantaneous cap

Direction against explosion source		Lateral				Ventral				
Number of fish		1	2	3	4	1	2	3	4	
Body Length (cm)		19.5	18.0	15.0	11.5	11.5	12.5	15.5	17.5	
Body Weighth (gr)		330	210	160	65	70	80	180	210	
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 L	N	N	N	N	N	N	N	
Damage index		5	2	2	3	5	4	3	3	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 12.1 Kg/cm ² , Ef : 23.3 J/m ²								

* D, death on first inspection; SE, seriously injury; SL, slightly injury; N, normal in appearance.

(continued)

Direction against explosion source		Head				Caudal				
Number of fish		1	2	3	4	1	2	3	4	
Body Length (cm)		16.5	14.5	14.5	12.0	11.5	12.5	14.5	13.5	
Body Weighth (gr)		165	145	165	75	70	95	105	100	
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*		N	N	N	N	S L	S L	N	N	
Damage index		1	2	2	1	2	3	2	3	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 12.1 Kg/cm ² , Ef : 23.3 J/m ²								

(continued)

Direction against explosion source		Lateral				Ventral				
Number of fish		1	2	3	4	1	2	3	4	
Body Length (cm)		21.0	18.0	18.5	18.0	18.5	18.0	16.5	15.5	
Body Weight (gr)		300	270	240	210	270	270	200	150	
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*		D	D	SE	N	D	N	D	N	
Damage index		5	5	4	3	8	4	7	2	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 21.9 Kg/cm ² , Ef : 99.4 J/m ²								

(continued)

Direction against explosion source		Head				Caudal				
Number of fish		1	2	3	4	1	2	3	4	
Body Length (cm)		22.0	19.0	18.0	17.0	17.0	18.0	17.0	14.0	
Body Weight (gr)		360	280	220	210	190	205	230	115	
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*		N	N	N	N	N	N	N	N	
Damage index		2	2	2	1	2	3	4	2	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 21.9 Kg/cm ² , Ef : 99.4 J/m ²								

(continued)

Direction against explosion source			Lateral				Ventral				
Number of fish			1	2	3	4	1	2	3	4	
Body Length (cm)			13.0	13.5	18.0	20.0	18.5	17.5	13.5	13.0	
Body Weighth (gr)			90	95	230	270	280	215	110	75	
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*			D	SE	D	D	D	D	D	D
	Damage index			5	4	5	5	6	6	6	6
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)			P : 36.6 Kg/cm ² , Ef : 278 J/m ²								

(continued)

Direction against explosion source			Head				Caudal				
Number of fish			1	2	3	4	1	2	3	4	
Body Length (cm)			12.5	14.0	12.5	18.0	12.5	14.5	19.0	19.5	
Body Weighth (gr)			90	100	85	210	75	110	280	350	
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*			D	SL	SE	SE	D	SE	D	SE
	Damage index			6	2	5	3	6	4	5	4
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)			P : 36.6 Kg/cm ² , Ef : 278 J/m ²								

Appendix table 3. Symptoms observed on major internal organs (*Cyprinus carpio*)

1. Underwater explosion by instantaneous cap

(Direction against explosion source is lateral side)

Type of explosion source and distance from explosion point		Instantaneous cap—1.2m										
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Body Length (cm)		16.6	16.6	16.4	14.5	17.7	15.3	16.6	17.0	15.2	14.4	
Body Weigh (gr)		125	112	122	82	128	80	119	133	89	92	
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*		N	N	N	N	N	N	N	N	N	S L	
Damage index		3	3	5	4	4	3	4	4	3	6	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 21.4 Kg/cm ² , Ef : 102.6 J/m ²										

* D, death on first inspection; SE, seriously injury; SL, slightly injury; N, normal in appearance.

(continued)

Type of explosion source and distance from explosion point		Instantaneous cap—1.5m					Instantaneous cap—1.0m					
Number of fish		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Body Length (cm)		15.5	14.8	15.8	15.8	15.2	16.6	16.4	15.3	17.0	14.4	
Body Weigh (gr)		96	90	106	106	94	130	121	82	123	93	
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*		N	N	N	N	N	SE	SE	SE	SE	SE	
Damage index		2	2	2	4	2	5	6	4	5	5	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 15.9 Kg/cm ² , Ef : 29.1 J/m ²					P : 27.6 Kg/cm ² , Ef : 179 J/m ²					

(continued)

Type of explosion source and distance from explosion point		Instantaneous cap—1.3m									
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Body Length (cm)		14.5	15.5	15.0	16.1	16.6	16.2	16.2	17.3	15.6	14.5
Body Weigth (gr)		80	100	103	106	113	105	120	129	95	78
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*		N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Damage index		4	2	5	3	3	4	3	3	5	4
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 21.3 Kg/cm ² , Ef : 102 J/m ²									

2. Underwater explosion by CCR

(continued)

Type of explosion source and distance from explosion point		CCR × 1—1.5m									
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Body Length (cm)		15.1	15.3	16.1	14.8	14.0	15.1	17.5	14.1	15.6	
Body Weigth (gr)		82	102	110	85	80	106	140	80	118	
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*		N	N	N	N	N	N	N	N	N	
Damage index		2	1	2	2	2	2	1	2	2	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 2.12 Kg/cm ² , Ef : 7.5 J/m ²									

(continued)

Type of explosion source and distance from explosion point			CCR × 2—1.5m								
Number of fish			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Body Length (cm)			14.8	15.8	16.8	16.0	13.6	14.2	14.5	16.1	13.4
Body Weigth (gr)			90	118	130	120	72	80	86	110	64
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*			N	N	N	N	N	N	N	N	N
Damage index			3	3	3	3	2	3	3	3	3
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)			P : 6.21 Kg/cm, Ef : 39.1 J/m ²								

(continued)

Type of explosion source and distance from explosion point			CCR × 1—1.5m								
Number of fish			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Body Length (cm)			15.8	13.8	14.5	14.8	14.8	13.0	16.0	13.0	13.4
Body Weigth (gr)			104	82	86	120	94	70	120	70	62
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*			N	N	N	N	N	N	N	N	SE
Damage index			3	2	3	3	3	4	3	3	5
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)			P : 6.18 Kg/cm ² , Ef : 128 J/m ²								

(continued)

Type of explosion source and distance from explosion point		CCR × 2—0.5m										
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Body Length (cm)		14.0	15.1	16.1	18.2	14.5	16.7	14.0	14.5	13.0	14.5	
Body Weighth (gr)		71	90	106	152	81	128	68	80	66	85	
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 E	S E	S E	S E	S E	S E	N	N	N	N
	Damage index		7	7	7	6	7	7	4	4	4	4
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 12.7 Kg/cm ² , Ef : 673 J/m ²										

Appendix table 4. Symptoms observed on major internal organs (*Sebastiscus marmoratus*)

I. Borehole blasting at Bisan strait (1975)

Exp. number and distance from explosion point		4A-1 (Charge : 240Kg), 28m (St.1)							
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8
Body Length (cm)		20.0	20.5	13.5	17.0	11.5	15.0	15.0	20.0
Body Weigth (gr)		400	300	100	210	200	120	180	400
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*		D	SL	SL	SL	SE	SE	SE	SE
Damage index		7	4	4	3	4	5	5	4
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 11.7 Kg/cm ² , Ef : 1340 J/m ²							

* D, death on first inspection; SE, seriously injury; SL, slightly injury; N, normal in appearance.

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-1 (Charge : 240Kg), 51m (St.2)								
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	
Body Length (cm)		20.0	17.0	16.0	16.0	15.5	18.0	16.0	16.5	
Body Weigth (gr)		380	270	150	180	170	190	170	180	
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*		N	N	N	N	N	N	N	N	
Damage index		1	4	4	3	4	5	2	4	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 2.47 Kg/cm ² , Ef : 118 J/m ²								

(continued)

Exp. number and distance from explosion point			4A-1 (Charge : 240Kg), 98m (St.3)									
Number of fish			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Body Length (cm)			14.5	14.5	14.0	14.5	17.0	17.0	18.0	16.5	17.0	17.5
Body Weigth (gr)			115	120	130	160	200	220	220	220	300	280
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*			N	N	N	N	N	N	N	N	S L	N
Damage index			1	1	4	2	3	1	3	0	3	2
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)			P : 0.55 Kg/cm ² , Ef : 11.9 J/m ²									

(continued)

Exp. number and distance from explosion point			4A-2 (Charge : 480Kg), 47m (St.2)									
Number of fish			1	2	3	4	5					
Body Length (cm)			18.0	18.0	15.0	14.0	15.0					
Body Weigth (gr)			230	270	140	120	130					
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 L	S E	S E	N	N					
Damage index			6	5	5	4	4					
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)			P : 5.27 Kg/cm ² , Ef : 352 J/m ²									

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-2 (Charge : 480Kg), 94m (St. 3)									
Number of fish		1	2	3	4	5	6				
Body Length (cm)		15.5	15.0	14.5	15.5	17.5	17.5				
Body Weigth (gr)		140	130	130	165	170	210				
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*		N	SE	SE	SL	N	N				
Damage index		3	4	4	4	3	2				
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 2.63 Kg/cm ² , Ef : 77.4 J/m ²									

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-3 (Charge : 720Kg), 29m (St. 1)					4A-3 (Charge : 720Kg), 59m (St. 2)					
Number of fish		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Body Length (cm)		20.0	18.5	18.5	15.0	14.0	12.5	17.5	18.0	11.0	15.0	
Body Weigth (gr)		350	250	250	140	125	220	200	205	180	170	
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*		D	D	D	D	D	D	SL	D	D	D	
Damage index		6	7	6	6	6	6	5	6	6	6	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 22.2 Kg/cm ² , Ef : 4790 J/m ²					P : 6.05 Kg/cm ² , Ef : 652 J/m ²					

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-3 (Charge : 720Kg) 101m (St.3)										
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Body Length (cm)		22.0	19.0	18.5	16.0	16.0	16.5	16.0	15.0	14.0	14.0	
Body Weigth (gr)		400	400	320	190	180	170	190	120	110	100	
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 L	N	S L	N	N	S L	N	N	N	S L	
Damage index		4	1	3	3	2	3	3	1	4	5	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 3.94 Kg/cm ² , Ef : 263 J/m ²										

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-4 (Charge : 1,520Kg), 48m (St.2)										
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Body Length (cm)		19.5	18.5	16.5	16.5	16.5	18.0	18.0	15.5	15.5	16.0	
Body Weigth (gr)		370	230	205	180	180	170	185	130	130	160	
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*		D	N	D	S L	S L	S E	N	D	N	N	
Damage index		8	5	6	4	5	4	5	7	4	4	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 22.9 Kg/cm ² , Ef : 5910 J/m ²										

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-4 (Charge : 1,520Kg), 94m (St.3)										
Number of fish		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Body Length (cm)		14.5	15.0	16.0	17.0	16.0	16.0	16.5	17.0	20.0	20.5	
Body Weigth (gr)		110	120	150	160	150	175	175	200	400	440	
Symptom observed	Liver	Destruction of tissue	-	-	+	+	-	-	-	-	-	
		Congestion	+	++			++	-	++	+	+	++
	Heart	Rupture of sinus venosus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Destruction of tissue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Air-bladder	Internal haemorrhage	-	+	-	-	-	-	++	+++	+	-
		Congestion	++		++	+	+	++				++
		Destruction of tissue	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-
	Kidney	Congestion				+	-	++				++
		Initial observation just after explosion*	S L	S L	D	S L	N	N	N	D	S E	S E
	Damage index		4	5	5	4	2	2	5	5	5	3
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 2.84 Kg/cm ² , Ef : 204 J/m ²										

Appendix table 5. Symptoms observed on major internal organs (*Lateolabrax japonicus*)

1. Underwater dynamite explosion at Gokasho bay (1970)

Exp. number and distance from explosion point		Run 9 (Charge : 5Kg), 20m (St. 2)					Run 9 (Charge : 5Kg), 40m (St. 3)					
Number of fish		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
Body Length (cm)		24.5	26.5	26.0	27.5	28.5	25.5	26.0	26.0	27.0	30.5	
Body Weighth (gr)		210	280	250	340	310	240	290	270	340	450	
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*		Death rate: 2/5					Death rate: 0/5					
Damage index		6	9	7	8	6	2	3	6	4	3	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 30.2 Kg/cm ² , Ef : 2155 J/m ²					P : 14.2 Kg/cm ² , Ef : 350 J/m ²					

* D, death on first inspection; SE, seriously injury; SL, slightly injury; N, normal in appearance.

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		Run 9 (Charge : 5Kg) 60m (St. 4)									
Number of fish		1	2	3	4						
Body Length (cm)		27.0	26.5	28.0	29.5						
Body Weighth (gr)		300	280	330	390						
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*		Death rate: 0/4									
Damage index		1	0	1	1						
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 9.2 Kg/cm ² , Ef : 123 J/m ²									

2. Borehole blasting at Bisan strait (1975)

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-1 (Charge : 240Kg) 28m (St.1)				4A-1 (Charge : 240Kg) 51m (St.2)			4A-3 (Charge : 720Kg) 29m (St.1)			
Number of fish		1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	
Body Length (cm)		33.0	35.0	40.0	26.0	33.0	33.0	36.0	28.0	33.0	32.0	
Body Weigth (gr)		580	560	900	-	620	580	720	310	420	420	
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 E	S E	S E	D	N	N	N	D	D	D	
Damage index		5	6	8	10	2	4	1	6	9	7	
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 11.7 Kg/cm ² , Ef : 1340 J/m ²				P : 2.5 Kg/cm ² , Ef : 118 J/m ²			P : 22.2 Kg/cm ² , Ef : 4790 J/m ²			

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-3 (Charge : 720Kg) 59m (St.2)			4A-3 (Charge : 720Kg) 101m (St.3)							
Number of fish		1	2	3	1	2	3	4				
Body Length (cm)		35.0	30.0	33.0	30.5	28.0	35.0	40.0				
Body Weigth (gr)		710	450	460	370	390	560	780				
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 E	S E	S E	S E	S E	S E	S L				
Damage index		5	6	4	4	6	4	2				
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 6.05 Kg/cm ² , Ef : 652 J/m ²				P : 3.94 Kg/cm ² , Ef : 263J/m ²						

(continued)

Exp. number and distance from explosion point		4A-4 (Charge : 1,520Kg) 48m (St. 2)				4A-4 (Charge : 1,520Kg) 94m (St. 3)					
Number of fish		1	2	3	4	1	2	3			
Body Length (cm)		41.0	41.0	35.5	38.0	36.0	39.5	34.0			
Body Weighth (gr)		815	905	580	515	770	750	530			
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 E	S L	S E	D	N	S L	N			
Damage index		6	5	4	10	3	2	1			
Peak pressure (P) and energy flux density (Ef)		P : 22.9 Kg/cm ² , Ef : 5910 J/m ²				P : 2.84 Kg/cm ² , Ef : 204 J/m ²					