

Table 1 Performances of sample explosives A.

Sample Explosives	Detonation Velocity 50mmφ (m/s)	Shock wave Energy (MJ/kg)	Bubble Energy (MJ/kg)	Ballistic Mortar Value (%TNT)
A-1	4190	0.80	1.95	110
A-2	4170	0.90	2.10	120
A-3	4140	1.08	3.30	135
A-4	3860	1.19	3.90	130
A-5	3750	1.09	4.35	98
A-6	3610	0.87	4.32	87

Table 2 Performances of sample explosives B.

Sample Explosives	Detonation Velocity 50mmφ (m/s)	Shock wave Energy (MJ/kg)	Bubble Energy (MJ/kg)	Ballistic Mortar Value (%TNT)
B-1	5320	0.78	1.68	109
B-2	4690	0.80	1.85	109
B-3	4190	0.80	1.95	110
B-4	2790	0.79	1.98	110
B-5	2520	0.82	2.00	110

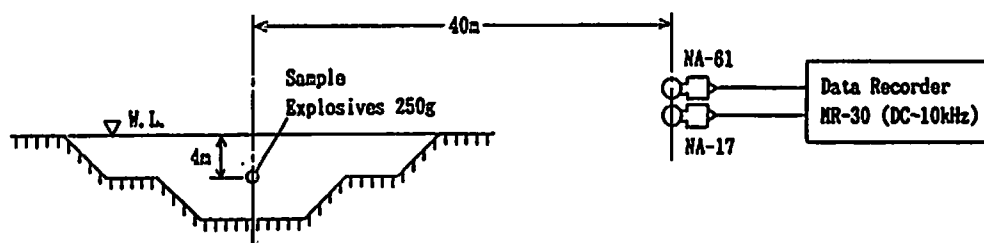


Fig. 1 Schematic diagram of blast noise measurements.

SPL特性とLSL特性をリオン社製レベルレコーダLR-20に記録した。動特性は全てFast特性である。又、アドバンテスト社製デジタルスペクトラムアナライザTR9402を用いて音圧波形の周波数分析を行った。なお、便宜上騒音と低周波音を合わせて発破音と称する。

3. 実験結果

3.1 試料爆薬A

試料爆薬Aのうちバブルエネルギーが最小の爆薬A-1と最大の爆薬A-5の低周波音の音圧波形及びその周波数分析波形をFig.2に示す。バブルエネルギーの増加に伴って音圧の上昇がみられる。周波数分析結果では、A-1の卓越周波数が8.5Hzであるのに対しA-5は6Hzでありバブルエネルギーの大きいものがわ

ずかに低周波成分が多くなっている。

バブルエネルギーと発破音の関係をFig.3に示す。騒音計のFLAT特性、A特性及び低周波音レベル計のSPL特性、LSL特性の全てがバブルエネルギーの増加に従ってほぼ直線的に増加する傾向がみられ、水中発破音とバブルエネルギーの相関が示された。その増加量はバブルエネルギーが1.95MJ/kgから4.35MJ/kgまで2.2倍増加した場合、騒音計ではFLAT特性で3.7dB、A特性すなわち騒音レベルで1.0dB増加し、低周波音レベル計ではSPL特性で4.2dB、LSL特性で2.6dB増加した。しかしながら、前報の砂上発破音の場合には騒音計で9.5dB(FLAT)、5.8dB(A)、低周波音レベル計で9.7dB(SPL)、7.9dB(LSL)の増加であったのに比較してその増加量は小さい。特に周波

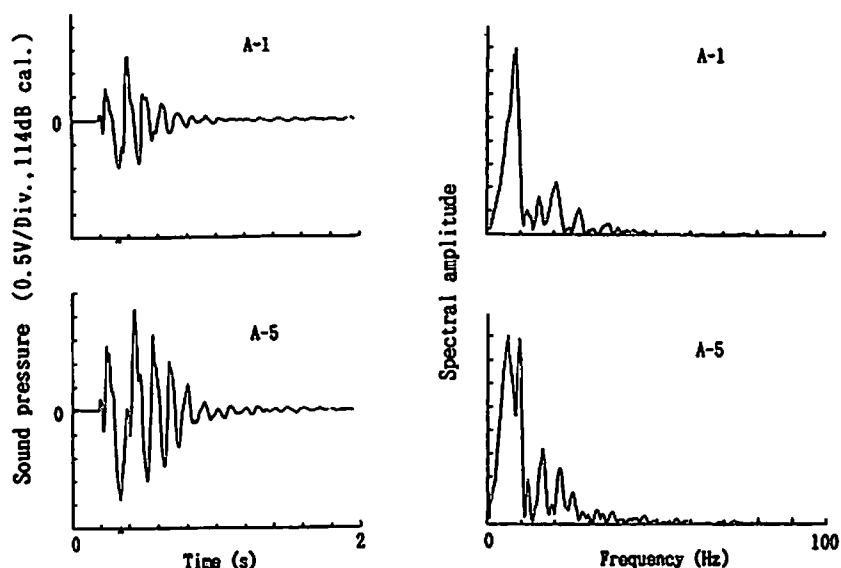


Fig. 2 Typical waveforms of sound pressure and frequency spectrum of low frequency blast noise for sample explosive A.

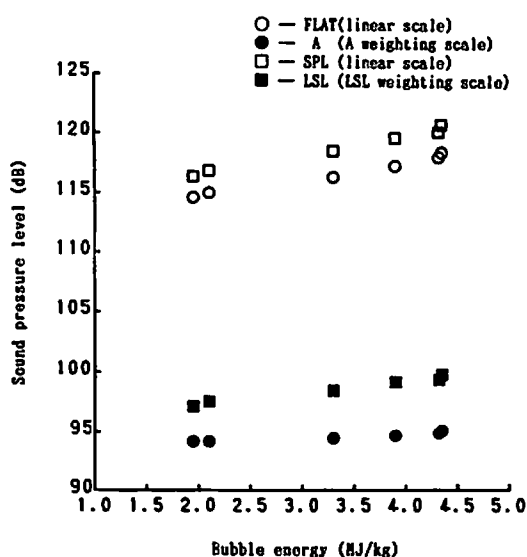


Fig. 3 Correlation between sound pressure level and bubble energy for sample explosives A.

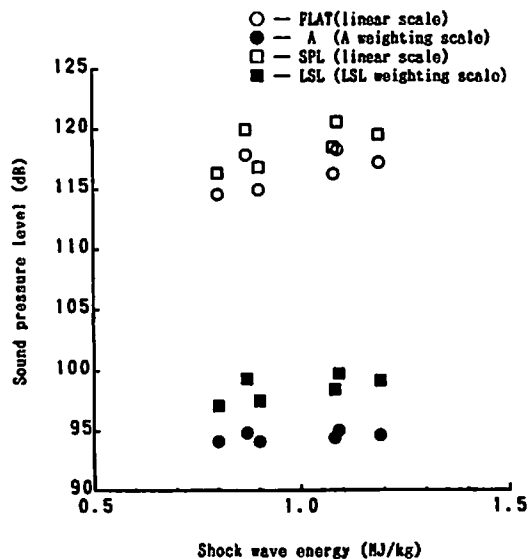


Fig. 4 Correlation between sound pressure level and shock wave energy for sample explosives A.

数補正特性の騒音レベルではわずか1.0dBの増加である。両実験(砂上発破と水中発破)において薬量(100gと250g)、距離(36mと40m)、伝搬経路等の条件が異なるため一概には論じられないが、傾向的にはバブルエネルギーの増加に伴う発破音の増加量は砂上発破より水中発破の方が小さいと考えられる。

衝撃波エネルギーと発破音の関係をFig. 4に示す。衝撃波エネルギーの変化はバブルエネルギーと比べて

小さい変化範囲である。全体的な相関として衝撃波エネルギーの増加に伴って発破音は増加しているようにも見えるが、衝撃波エネルギーが大きくなっても衝撃波エネルギーの小さいものより発破音が小さい場合もあることから水中発破音と衝撃波エネルギーには相関がみられないと考えられる。詳細は多変量解析により検討する。

3.2 試料爆薬 B

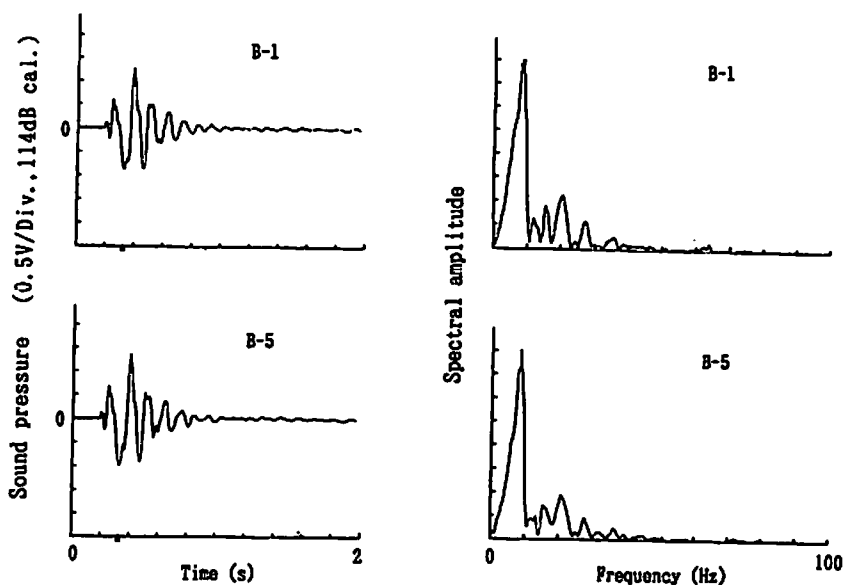


Fig. 5 Typical waveforms of sound pressure and frequency spectrum of low frequency blast noise for sample explosive B.

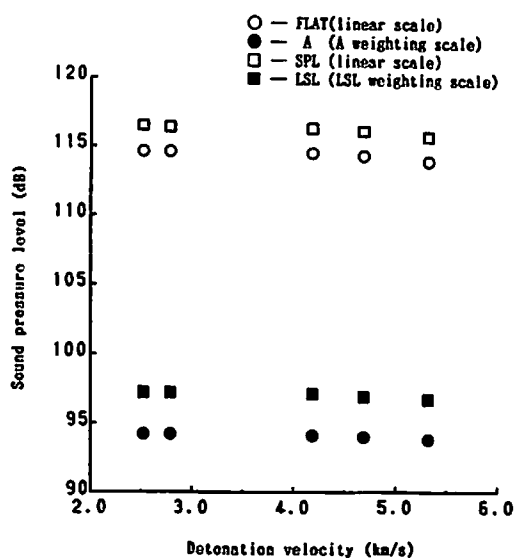


Fig. 6 Correlation between sound pressure level and detonation velocity for sample explosives B.

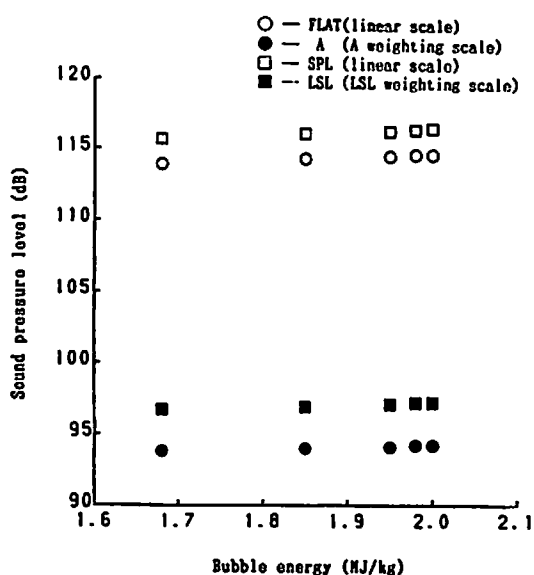


Fig. 7 Correlation between sound pressure level and bubble energy for sample explosives B.

試料爆薬Bのうち爆速が最大の爆薬 B-1 と最小の爆薬 B-5 の低周波音の音圧波形及びその周波数分析波形を Fig.5 に示す。爆速が大きく変化しているにも関わらず音圧の変化はほとんどみられない。周波数分析結果でも卓越周波数が B-1, B-5 共に 8 Hz であり明確な差はみられない。

爆速と発破音の関係を Fig.6 に示す。爆速が 2520m/s から 5320m/s まで 2.1 倍増加しているにも関

わらず騒音、低周波音共にほとんど変化がみられず、むしろ爆速の増加に伴ってわずかに減少する傾向がみられる。この傾向は試料爆薬Bの特性値として、爆速が 2520m/s から 5320m/s まで大幅に増加するのに伴いバブルエネルギーは 2.00MJ/kg から 1.68MJ/kg にわずかに減少していることに起因しているとも考えられる。そこで、試料爆薬Bのバブルエネルギーと発破音の関係を Fig.7 に示す。Fig.7 に示したようにバブルエネ

Table 3(a) Multiple regression analysis(blast noise).

Predictor variables	Partial regression coefficient	standard partial regression coefficient	t value
Eb	1.4393	0.9984	15.931 ^{※※}
Es	-0.1477	-0.0141	-0.228
Dv	-0.0755	-0.0394	-0.967

Table 3(b) Variance analysis(blast noise)

Fluctuations	Sum of squares	Degree of freedom	Unbiased variance	Variance ratio
Regression	22.277	3	7.425	210.23 ^{※※}
Residual	0.212	6	0.03532	
total	22.489	9		

Table 3(c) Correlation coefficient(blast noise)

Multiple correlation coefficient	0.9953
Coefficient of determination	0.9906
Multiple correlation coefficient adjusted for the degree of freedom	0.9929

ルギーが1.68MJ/kgから2.00MJ/kgまで増加するのに伴って発破音もわずかに増加する傾向がみられる。即ち水中発破音と爆速の間には相関がみられず、試料爆薬Bにおいてもバブルエネルギーが影響を及ぼしていると考えられる。又、これらの相関関係は爆薬の諸特性と水中発破による地盤振動の相関関係²⁾と酷似している。

4. 考 察

以上の実験結果では、試料爆薬AとBを区別して考察し、いずれもバブルエネルギーが大きく影響していることが示された。試料爆薬Aはバブルエネルギーを広範囲に変化させ衝撃波エネルギーと爆速はできるだけ一定にコントロールした試料であるが、バブルエネルギーの2.2倍の増加に伴い爆速は0.89倍に減少し、衝撃波エネルギーは、0.80MJ/kgから1.19MJ/kgの範囲で変化している。一方、試料爆薬Bは爆速を広範囲に変化させバブルエネルギーと衝撃波エネルギーはできるだけ一定にコントロールした試料であるが、爆速の2.1倍の増加に伴いバブルエネルギーは0.84倍に減少し、衝撃波エネルギーは0.78MJ/kgから0.82MJ/kgの範囲で変化している。そこで、それらのわずかな変化の影響も含め爆薬の各々の特性値が発破音にどの程度

寄与しているかを考察するため試料爆薬A、Bをあわせて重回帰分析による多変量解析³⁾を行った。

重回帰分析には発破音のもつ物理的特性を検討するため平坦な周波数特性である騒音計のFLAT特性及び低周波音レベル計のSPL特性の結果を用いた。目的変数の騒音計のFLAT特性[FLAT(dB)]、低周波音レベル計のSPL特性[SPL(dB)]に対する説明変数としては気象条件や地形条件等様々なものが考えられるが、本実験ではこれらの条件はできるだけ一定にし、ここでは純粋に爆薬の諸特性と発破音の相関関係を分析するため爆速 $[Dv(m/s)]$ 、バブルエネルギー $[Eb(MJ/kg)]$ 、衝撃波エネルギー $[Eb(MJ/kg)]$ の3特性のみを説明変数とした。重回帰式の推定は発破音がこれら3特性に制御され直線的に増加するものと仮定し、次の(1)、(2)式に示すものとした。

$$FLAT = a \cdot Eb + b \cdot Es + c \cdot Dv + d \quad (1)$$

$$SPL = i \cdot Eb + j \cdot Es + k \cdot Dv + l \quad (2)$$

FLAT特性の分析結果をTable 3, SPL特性の分析結果をTable 4, 分析により得られた回帰式を次の(3)、(4)式に示す。

$$FLAT = 1.44 \cdot Eb - 0.15 \cdot Es - 0.08 \cdot Dv + 112.09 \quad (3)$$

Table 4(a) Multiple regression analysis (low frequency blast noise).

Predictor variables	Partial regression coefficient	standard partial regression coefficient	t value
Eb	1.5325	0.9457	17.211 ^高
Es	0.6637	0.0564	1.040
Dv	-0.0838	-0.0388	-1.089

Table 4(b) Variance analysis (low frequency blast noise)

Fluctuations	Sum of squares	Degree of freedom	Unbiased variance	Variance ratio
Regression	28.214	3	9.405	274.13 ^高
Residual	0.206	6	0.03431	
total	28.420	9		

Table 4(c) Correlation coefficient (low frequency blast noise)

Multiple correlation coefficient	0.9964
Coefficient of determination	0.9928
Multiple correlation coefficient adjusted for the degree of freedom	0.9946

$$\text{SPL} = 1.53 \cdot \text{Eb} + 0.66 \cdot \text{Es} - 0.08 \cdot \text{Dv} + 113.12 \quad (4)$$

Table 3(a)より、標準偏回帰係数の比率はEb:Es:Dv=100:1:4でありEbが極めてFLAT特性への寄与度が高く、Es、Dvはほとんど寄与していないことが示された。又、t値による検定の結果、Ebは1%水準で高度に有意であったのに対し、Es、Dvは5%水準でも有意でなかった。即ちEbはFLAT特性に大きく影響を与えているが、Es、Dvは標準偏回帰係数が小さいことからみてもFLAT特性にはほとんど影響を与えていないといえる。

分散分析におけるF検定の結果、Table 3(b)に示したように1%水準で高度に有意であり、(3)式の右辺と左辺の直線関係が明確に示された。

重相関係数、寄与率、自由度調整済重相関係数はTable 3(c)に示したようにいずれも0.99以上の値が得られていることから(3)式が妥当であるといえる。

Table 4の低周波音レベル計のSPL特性の重回帰分析結果についてもFLAT特性とはほぼ同様な結果が得られ標準偏回帰係数の比率はEb:Es:Dv=95:6:4であり、Evのみが大きく寄与しておりEs、Dvはほとんど寄与していないことが示された。

以上の考察から、水中発破に伴い発生する発破音はバブルエネルギーのみに相関し、爆速及び衝撃波エネルギーには相関しないことが重回帰分析においても確認された。

水中発破による発破音がバブルエネルギーのみに強く相関し、爆速、衝撃波エネルギーには相関しない理由として水中発破では爆薬の爆発に伴い発生したガスの膨張、収縮により水面が移動し、それによって生じる空気振動が水中発破音の主体をなしており、特に薬量250g、水深4mでの今回の水中発破のように爆発によるエネルギーの大部分が水中に閉じこめられた形態の発破では、動的エネルギーである衝撃波エネルギー及び爆速の発破音に及ぼす影響度合いが弱まるためであると考えられる。

5. 結 言

爆薬の諸特性が発破音に与える影響を検討するためバブルエネルギーと爆速を広範囲に変化させ、その他の特性値をほぼ一定にコントロールした爆薬を使用して水中発破の形態で検討した。その結果、第1報の砂上発破による発破音はバブルエネルギーと爆速に強く相関し、その影響度合いはバブルエネルギーの方が大きかったのに対し、水中発破による発破音はバブルエネ

ルギーのみに強く相関しており、爆速及び衝撃波エネルギーには相関関係が見られないことがわかった。

発破形態の違いにより異なった相関関係であり、今後は砂上発破と水中発破の間に位置する形態と考えられる通常の岩掘削発破についても検討していきたい。

文 献

- 1) 黒川孝一, 橋本賢二, 川村 実, 加藤幸夫, 爆薬の諸特性が発破音に及ぼす影響 第1報(砂上発破による発破音)工業火薬投稿中
- 2) 黒川孝一, 橋本賢二, 川村 実, 加藤幸夫, 工業火薬, 52(1), 35(1991)
- 3) 奥野忠一他, 「多変量解析法」(1989), 日科技連

Correlation between blast noise and performances of explosives

Blast noise by underwater explosion—

by Koichi KUROKAWA*, Kenji HASHIMOTO*
and Yukio KATO*

We studied the correlation between blast noise and performances of explosives. We used two types of sample explosives. One is an aluminized emulsion explosive whose bubble energy is varied from 1.95 to 4.35 MJ/kg and other performances are maintained nearly constant. The other is an emulsion explosive with microballoons of different size whose detonation velocity is varied from 2520 to 5320 m/s and other performances are maintained nearly constant.

Correlation between blast noise caused by plaster shooting and performances of explosives was discussed in the previous report. In this report, we measured the blast noise caused by underwater explosion of sample explosives, and investigated the correlation between blast noise and performances of explosives.

It is shown that blast noise has the strong correlation with only bubble energy. Blast noise increases proportionally with the increase of bubble energy. For example, noise level (FLAT) is increased 3.7 dB and noise level (SPL) is increased 4.2 dB when bubble energy is increased from 1.95 to 4.35 MJ/kg. Blast noise has no correlation with detonation velocity and shock wave energy. For example, blast noise are maintained nearly constant when detonation velocity is increased from 2520 to 5320 m/s.

The results of multiple regression analysis also show that blast noise has the strong correlation with bubble energy, and has no correlation with detonation velocity and shock wave energy.

(*Chemicals & Explosives Laboratory, Nippon Oil & Fats Co., Ltd.
82 Nishimon, Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi-ken 470-23)