

Fig. 1 Longitudinal cross section and cross sectional view of model underground magazines.

量/貯蔵室体積)などを変化させて、出口からの距離および方位角、特に $\theta=180^\circ$ に対する爆風圧を計測し、火薬庫周囲の爆風伝播について検討した。

2. 実験方法

2.1 小型模擬地中式火薬庫

実際の地中式火薬庫の構造は複雑なので、Fig. 1に示すような単純化した火薬庫を使用した。すなわち、火薬庫は実験毎に破壊されない剛体構造とするために、金属製(軟鋼SS20)とし、また壁の厚さは10mm以上とした。実際の地中式火薬庫の外部の地形に関しては、覆土の厚さ、傾斜面の角度、山全体の形状が爆風圧に

影響を与えると予想される。本実験においては覆土の影響を無視することとし、覆土がない場合を検討した。地表面については、剛体に近い条件とするため、砂の上に3mm厚の鉄板を敷いた。3種類の小型模擬地中式火薬庫の貯蔵室、通路の大きさをTable 1に示す。6号電気雷管1本の薬量(0.6g)が現行火薬庫の貯蔵基準限度(18.1kg/m³)にほぼ相当する。小型模擬地中式火薬庫は地表面(鉄板)にフランジを通して2ヶ所で固定した。

2.2 使用爆薬

爆源として使用した3種類の電気雷管をTable 2に示す。6号および0号雷管の場合には、爆発時に管体先端からノイマンジェットが形成され、そのジェットによる火薬庫壁の貫通・破壊が発生した。このため雷管先端にSEP爆薬50mgを固着してジェットの発生を防いだ。雷管の薬量はTNT当量を用いた。TNT当量は、ある爆薬の爆発熱とTNT爆薬の爆発熱の比とその爆薬の薬量の積とした。複数の爆薬を含む場合には、各爆薬のTNT当量の和とした。すなわち、

$$W_{EQ} = \sum W_i \times (Q_i / Q_{TNT}) \quad (1)$$

ここに、 W_{EQ} は雷管のTNT当量(g)、 W_i は爆薬*i*の薬量(g)、 Q_i は爆薬*i*の爆発熱(J/g)、 Q_{TNT} はTNT爆薬の爆発熱(J/g)である。

爆薬の爆発熱は、爆轟生成物の状態式としてKHT式を使用し¹⁰⁾、チャップマンジュゲ- (CJ) 点から大

Table 1 Dimensions of model underground magazines

Model	Chamber				Passageway			
	Length mm	Width mm	Height mm	Volume cm ³	Length mm	Width mm	Height mm	Volume cm ³
No. 1	30	30	30	27.0	60	17	17	17.3
No. 2	30	30	30	27.0	150	17	17	43.4
No. 3	30	30	30	27.0	150	17	17	18.2

Table 2 TNT equivalence for the detonators

Detonator	Composition, weight	TNT equivalence g
No.6 detonator*	Tetryl/DDNP/SEP=0.4 g / 0.2 g / 0.05 g	0.626
No.0 detonator**	DDNP/SEP=0.2 g / 0.05 g	0.172
Small detonator***	PbN ₆ =0.05 g	0.0158

* : NOF Co.,Ltd.

** : Nippon Kayaku Co.,Ltd.

*** : Hosoya Kako Co.,Ltd.

SEP : PETN base plastic bonded explosive, Asahi Chemical Industry Co.,Ltd.

Table 3 Heat of explosion calculated by KHT equation of state

Name of explosive	Heat of explosion (calculated value) J/g	Density g/cm ³
Tetryl (N-methyl-N, 2, 4, 6-tetranitroaniline)	5220	1.4
DDNP (diazodinitrophenol)	2930	1.2
PbN ₆ (lead azide)	1460	1.2
SEP	4120	1.0
TNT (2, 4, 6-trinitrotoluene)	4600	1.5

気圧まで等エントロピー膨張した時に放出する爆発エネルギーとして求めた。この結果をTable 3に示す。

2.3 測定

測定距離は、30cm~1.4m(換算距離で5~55m/kg^{1/3})、方位角 $\theta = 0, 90$ および 180° である。実験は物質工学工業技術研究所内の小型爆発ピット(直径2.5m)内で行った。使用したピエゾ圧力素子は、PCB PIEZOTRONICS社製モデル101A(感度40mV/psi, 共振周波数300kHz)または同社製高感度型モデル106B(同300mV/psi, 60kHz)である(ここに1psi=6.897kPa)。圧力素子は、直径10cmの整流板に取り付け、受圧面が地面と直角になるように支柱を通して地面に固定した。圧力計の中心は、地表面から約5cmの高さに設置し、爆風の側圧を測定した。なお、圧力素子および整流板は、野外実験で使用したものと同一の形式である。整流板およびその支柱の形状等は文献¹¹⁾に示されている。ピエゾ圧力素子用アンプはPCB PIEZOTRONICS社製モデル482A(ゲイン×1)を使用した。測定波形はオートニクス社製波形記憶装置S210(AD変換の分解能12bit, 1 μ s/word)に記憶し、エプソン社製パーソナルコンピュータPC-286LSにより計測の制御を行った。爆風の到達時間を求めるために、三菱レイヨン社製プラスチック光ファイバーSH4001(コア径1mm)を火薬庫に挿入して爆発光を観測した。光信号はTIK社製光電変換器(PINフォトダイオード, 立ち上がり時間100ns以下)により電気信号に変換し、岩通電子製デジタルストレージスコープDS-6612(AD変換の分解能8bit, 50ns/word)により測定した。

3. 結果

爆風波形の測定例をFig. 2に示す。これはモデル1, 0号雷管, 測定距離1.4mにおける3方向の爆風波形であり、各波形は別々の実験で測定されたものである。時間軸の原点は爆発光の立ち上がり時刻としている。ピーク過圧は $\theta = 0, 90, 180^\circ$ の順に小さくなってい

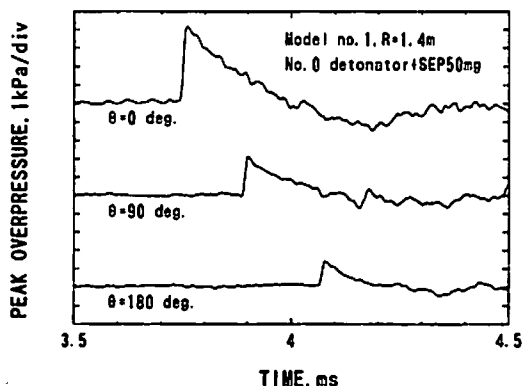


Fig. 2 History of static overpressure (model No. 1) No. 0 detonator + SEP50mg, θ ; azimuth angle

る。到達時間についても、同じ順に長くなっている。これは、衝撃波が出口において回折するためである。圧力波形に関しては、特に火薬庫に近い距離で、不規則に振動する波形が多く得られた。これは火薬庫内部での衝撃波の多重反射によるものと考えられる¹²⁾。測定結果をスプライン関数により補間して、ピーク過圧(複数パルスの場合には、最大ピーク過圧)、正相圧の時間積分(インパルス)、到達時間、持続時間を求めた。各小型模擬地中式火薬庫に対して得られたピーク過圧を換算距離について整理した結果をFigs. 3~5に示す。記号は○; $\theta = 0^\circ$, Δ ; $\theta = 90^\circ$, \square ; $\theta = 180^\circ$ であり、記号の寸法が薬量に対応する。すなわち、一番大きい記号は6号雷管の結果であり、一番小さいそれは小型雷管の結果である。比較のために、半球形TNT爆薬の地表面爆発の結果を点線で示す¹³⁾。これらの測定結果を各方向別に最小2乗法により近似した結果をTable 4に示す。使用した実験式を次に示す。

$$\Delta p = k(R/W^{1/3})^n \quad (2)$$

ここに、 Δp はピーク過圧(100kPa)、 R は火薬庫出口

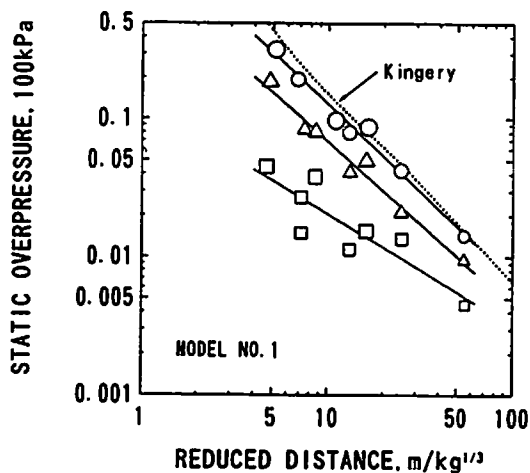


Fig. 3 Maximum static overpressure versus scaled distance for model No. 1. ○: 0deg., △: 90deg., □: 180deg.

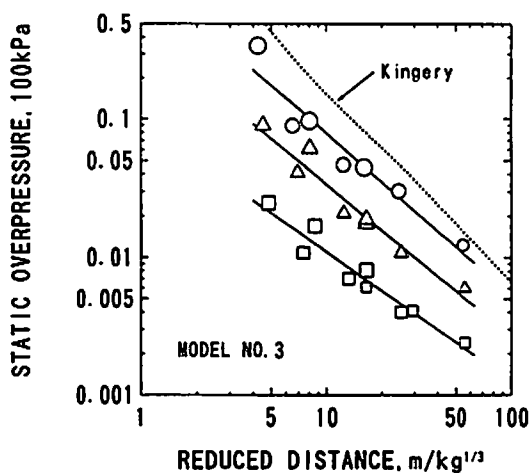


Fig. 5 Maximum static overpressure versus scaled distance for model No. 3. ○: 0deg., △: 90deg., □: 180deg.

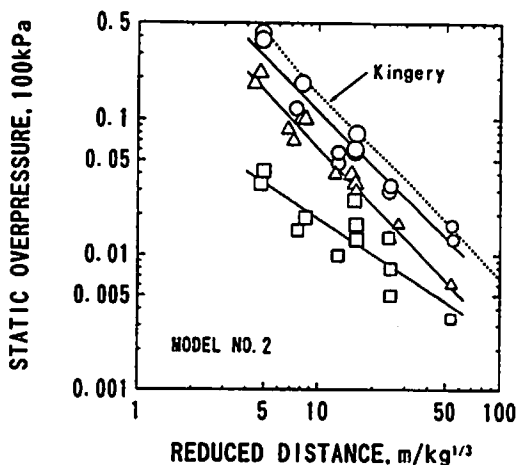


Fig. 4 Maximum static overpressure versus scaled distance for model No. 2. ○: 0deg., △: 90deg., □: 180deg.

からの距離 (m), W は薬量 (kg), k は圧力の減衰定数, n は距離減衰のべき指数である。これらの結果を Figs. 3 ~ 5 中の実線で示す。

ピーク過圧の指向性を調べるために, $\theta = 0^\circ$ のピーク過圧に対する各方向 (90° , 180°) のピーク過圧の比を Table 5 に示す。本実験結果の圧力比は距離により変化しているの、換算距離 $18.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ における実験式 (2) からピーク過圧比を評価している。これは、住居建築物に対して許容できる損害を与えるピーク過圧の基準値が米国 8.6 kPa , 欧州 5 kPa であり、これに対応する換算距離は, Kingery¹³⁾ によると、それぞれ $15.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ および $23.6 \text{ m/kg}^{1/3}$ である。本報告では米国と欧州のピーク過圧の基準値の平均値を便宜的に採用しており、ピーク過圧 6.8 kPa を与える換算距離は, Kingery¹⁴⁾ によると、 $18.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ に

Table 4 Pressure decay constant (k) and power decay index (n)

Model	Constant k 100kPa			Index n		
	Azimuth angle			Azimuth angle		
	0°	90°	180°	0°	90°	180°
No. 1	2.3	1.0	0.13	-1.26	-1.19	-0.806
No. 2	2.4	1.5	0.14	-1.33	-1.34	-0.877
No. 3	1.2	0.42	0.095	-1.17	-1.10	-0.937

$$\Delta p = k (R/W^{1/3})^n$$

Δp : static peak overpressure (100kPa)

R : distance from magazine exit (m)

W : explosive weight (kg)

Table 5 Overpressure ratio of the present results and various analyses

Method	L/D*	Pressure ratio	
		$\Delta p(90^\circ)/\Delta p(0^\circ)$	$\Delta p(180^\circ)/\Delta p(0^\circ)$
Model No. 1	3.1	0.53	0.21
Model No. 2	7.8	0.60	0.22
Model No. 3	12	0.44	0.16
Nakahara**	6.7	0.37	0.30
Hasue***	11~44	0.42	—
Skjeltrope****	86	0.28	0.09
Millington*****	5.7~23	0.32	—

* : L=length of passageway, D=equivalent diameter of passageway

** : Ref. 3

*** : Ref. 4

**** : Ref. 5

***** : Ref. 6

なる。同表に、中原ら(最大300kg, コンクリート製)³⁾、蓮江ら(6号雷管の添装薬0.4~0.8g, 金属製)⁴⁾、Skjeltropeら(最大152g, 金属製)⁵⁾およびMillingtonら(1.76~3.52kg, 金属製)⁶⁾によるピーク過圧比、および通路の長さLと通路の等価直径D(断面積が等しくなる円の直径)の比L/Dを示す。

4. 考 察

小型模擬地中式火薬庫の実験結果を考察するためにSkjeltropeらが提案している実験式を以下に示す^{5), 7) ~ 9)}。

$$\Delta p/P_w = 1.24 (R/D)^{-1.35} [1 + (\theta/56)^2] \quad (3)$$

$$P_w = 12.1 (W/V_i)^{0.607} (A_p/A_r)^{0.19} \quad (4)$$

ここに、 Δp はピーク過圧(100kPa)、 P_w は火薬庫出口での圧力(100kPa)、 R は火薬庫出口からの距離(m)、 D は通路の直径(m)、 θ は火薬庫の中心軸からの方位角($^\circ$)、 W は薬量(kg)、 V_i は貯蔵室と通路を含めた全体積(m^3)、 A_r は貯蔵室断面積(m^2)、 A_p は通路断面積(m^2)である。(3)および(4)式より無次元距離 R/D 、方位角 θ 、薬量 W が同じ場合、ピーク過圧は火薬庫の全体積および貯蔵室と通路の断面積の比に依存する。すなわち、

$$\Delta p \sim V_i^{-0.607} (A_p/A_r)^{0.19} \quad (5)$$

4.1 ピーク過圧

Figs. 3~5より、モデル1~3の $\theta=0^\circ$ 方向のピーク過圧は地表面爆発の結果より低くなっている。その理由として、1) 火薬庫の貯蔵室および通路での爆風の減衰、2) 換算距離として火薬庫出口からの距離と

しているため、火薬庫の全長だけ長くなっている、3) 雷管を爆発源としたため、管体の破壊のためのエネルギー損失が無視できない。この場合、爆風に寄与する薬量は計算から求めたTNT当量より小さくなる、ことが考えられる。1)および2)の理由は火薬庫の形状によるものであり、本実験における考察の対象である。一方、3)の理由は雷管を使用する実験室規模の爆発実験の問題点であり、ピーク過圧の絶対値を検討するには管体を含めた雷管のTNT当量を求める必要がある。なお、ピーク過圧の比に関しては相対値であるため以下の議論の問題とはならないと考えられる。

モデル1および2では通路の断面積が等しく通路長さが2.5倍異なるため、両者の比較から通路長さの影響を検討できる。モデル1とモデル2の $\theta=0^\circ$ におけるピーク過圧の比較から、ピーク過圧比(モデル2/モデル1)は、換算距離 $18.5\text{ m/kg}^{1/3}$ で0.86となった。(5)式による圧力比の予測値は0.75となるので、本実験結果は約10%減衰が小さい結果となった。これは、本実験では $L/D=3.1\sim 12$ であるが、(5)式では $L/D=86$ と長い通路を持つ模擬地中式火薬庫での実験であるためと考えられる。

次に、通路断面積が減少した場合のピーク過圧への影響を検討する。モデル2とモデル3より、通路長さが同一で通路断面積が約42%に減少した場合を考察できる。本実験では $\theta=0^\circ$ 、換算距離 $18.5\text{ m/kg}^{1/3}$ におけるピーク過圧比(モデル3/モデル2)は0.78となった。(5)式による予測値は1.1となり、本実験結果では通路断面積の42%の減少に対しピーク過圧の減衰が約1.4倍大きくなった。また、モデル1とモ

デル 3 では火薬庫の全体的積 V_1 がほぼ同じであるため、 V_1 一定の条件での通路断面積の影響を考察できる。 $\theta = 0^\circ$ 、換算距離 $18.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ におけるピーク過圧比 (モデル 3/モデル 1) は 0.67、(5) 式による予測値は 0.84 となった。これより、本実験結果では通路断面積の約 42% の減少に対しピーク過圧の減衰が予測値より約 1.3 倍大きくなった。上述の 2 種類の比較より、本実験結果では、通路断面積の減少によるピーク過圧の減衰は (5) 式で予想される値より大きくなった。減衰がより大きくなる理由として、貯蔵室断面積と通路断面積の比 A_p/A_c が関係しているのではないかと思われる。Kingery の¹⁾ では A_p/A_c の値として 0.23 が示されているが、本実験のモデル 3 では $A_p/A_c = 0.13$ と小さく、(5) 式の適用範囲を超えているものと考えられる。

4.2 ピーク過圧の距離減衰特性

ピーク過圧の距離減衰特性は、(2) 式の指数 n により評価される。各モデルとも、正面方向で $n = -1.3 \sim -1.2$ 、 90° 方向で $n = -1.3 \sim -1.1$ 、 180° 方向で $n = -0.94 \sim -0.81$ となった。Skjeltrope の実験式⁵⁾ では、方位角 θ によらず一律に $n = -1.35$ としている。本実験では、指数 n は方位角 θ に依存する結果となった。爆風は減衰すると音波に漸近し、 $n = -1$ となる。 $\theta = 90^\circ$ および 180° の方向では、爆風は音波に漸近していると考えられる。 180° 方向で n の絶対値が 1 より小さい理由として、使用した高感度型ピエゾ圧力素子の周波数特性 (60kHz) が低く、ピーク過圧の高い領域で低めになっていることが考えられる。

4.3 ピーク過圧の指向性

Table 5 から方位角に対するピーク過圧の比は、 $\theta = 90^\circ$ でモデル 1, 2, および 3 に対し、それぞれ 0.53, 0.60, および 0.44、平均値で 0.52 となった。また、 180° ではそれぞれ 0.21, 0.22, 0.16、平均値で 0.20 となった。

文献値との比較より、 90° 方向ではモデル 3 の結果で考えると、蓮江の結果⁴⁾ とほぼ等しく、中原³⁾、Skjeltrope⁴⁾ および Millington⁵⁾ の結果より大きくなった。蓮江の結果⁴⁾ では爆源が 6 号電気雷管程度であり、本実験と同じ規模であるが、その他の文献^{3), 5), 6)} では薬量が 150 g 以上と大きいことが理由として考えられる。

180° 方向では、本実験は Skjeltrope の⁵⁾ のそれより大きい、中原の結果³⁾ より小さい。Skjeltrope の結果⁵⁾ では $L/D = 86$ であり、高圧気体による衝撃波管の結果と良い相関関係があることから、通路内の衝撃波は 1 次元の平面波に近い状態となり、爆風の指向性が強く現れたと考えられる。本実験では

$L/D = 3 \sim 12$ であり、Skjeltrope の結果⁵⁾ と比較して 10 分の 1 程度小さいことから、1 次元の平面波が形成されずに庫外に伝播し、そのため衝撃波のピーク過圧の指向性が弱くなったと考えられる。本実験結果が中原の結果³⁾ より低くなっているのは、薬量が 6 号雷管程度であること、および覆土がない等の構造の違いによるためと考えられる。また、同表から $L/D = 3 \sim 40$ の範囲では、 L/D とピーク過圧の指向性についての相関関係は明確でないことがわかった。

5. まとめ

地中式火薬庫周囲の爆風伝播を検討するために、実験室規模の爆発実験を行った。3 種類の小型模擬地中式火薬庫を使用して、薬量 0.05~0.65 g、測定距離 0.4~1.4 m、出口正面方向からの方位角 (0° , 90° および 180°) に対する爆風圧をピエゾ圧力計により測定した。結果は次の通りである。

- 1) 地表面爆発の Kingery の結果との比較より、方位角 0° 方向のピーク過圧は、3 種類のモデルのいずれも地表面爆発のそれより低くなった。これは雷管の管体の破壊に使われるエネルギーが存在し、爆風に寄与するエネルギーが減少したためと考えられる。ピーク過圧の指向性は相対値であるため問題とならないが、ピーク過圧の絶対値を検討する際には管体を含めた雷管の TNT 当量を求める必要がある。
- 2) 3 種類の小型模擬地中式火薬庫の比較より、火薬庫の通路長さが 2.5 倍長くなるとピーク過圧は 86% に減衰し、Skjeltrope の実験式から求めた値より減衰が小さくなった。これは、通路の断面積に対する通路長さの比が Skjeltrope の実験式より小さいためと考えられる。同様の比較より、通路の断面積が 42% に減少するとピーク過圧は 78% および 84% に減衰し、Skjeltrope の実験式から求めた値より減衰が大きくなった。これは、貯蔵室と通路の断面積の比が、Skjeltrope の実験式では 0.23 であるが、本実験では 0.13 と小さいためと考えられる。
- 3) ピーク過圧の距離減衰特性については、距離の減衰指数は各モデルとも、正面方向で $n = -1.3 \sim -1.2$ 、 90° 方向で $n = -1.3 \sim -1.1$ 、 180° 方向で $n = -0.94 \sim -0.81$ となり、指数 n は方位角 θ に依存する結果となった。 90° および 180° の方向では、 n は 1 に近いことから、爆風は音波に漸近していると考えられる。
- 4) 爆風の指向性については、換算距離 $18.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ において方位角 0° に対する 90° のピーク過圧の比はモデル 1, 2, および 3 の平均値で 0.52、同

様に180°のピーク過圧比は平均値で0.20となった。文献値との比較より、90°方向のピーク過圧比は、薬量が本実験に近い文献値とはほぼ一致し、薬量が150g以上の文献値よりは大きくなった。また、180°方向でのピーク過圧比については、通路の長さで通路の等価直径の比がほぼ同じ文献値と比較すると、本実験は小さいピーク過圧比となった。これらの爆風の指向性は、薬量の規模、覆土などの火薬庫の構造の違いが理由として考えられる。

文 献

- 1) C. N. Kingery, Technical Report BRL-TR-3012, June(1989).
- 2) 飯田光明, 中山良男, 松永猛裕, 蒔葉州, 角館洋三, 吉田正典, 田中克己, 藤原修三, 化学技術研究所報告, 85, 187 (1990).
- 3) 中原正二, 元場昭夫, 加藤慎一, 工業火薬, 46, 219 (1985).
- 4) 蓮江和夫, 宗正邦彦, 足立哲彦, 加藤清志, 中原正二, 工業火薬, 51, 16 (1990).
- 5) A. Skjeltrope, T. Hegdahl and R. Jenssen, Proceedings of the Fifth International Symposium on Military Application of Blast Simulators", Stockholm, May(1977).
- 6) C. F. Millington, Minutes of the Twenties Explosives Safety Seminar", p1285 (1982).
- 7) A. Skjeltrope, T. Hegdahl, and R. Jenssen, NDCS Report 80/72, September(1975).
- 8) A. Skjeltrope, T. Hegdahl and R. Jenssen, NDRC Report 79/72, September(1975).
- 9) A. Skjeltrope, T. Hegdahl, and R. Jenssen, NDCS Report 81/72, June(1975).
- 10) K. Tanaka, 8th Symp. on Detonation, NSW MP 86-194, pp.548 (1985).
- 11) 吉田正典, 角館洋三, 飯田光明, 石川昇, 藤原修三, 日下部正夫, 工業火薬, 46, 245 (1985).
- 12) 田中克己, 化学技術研究所報告, 85, 209 (1990).
- 13) C. N. Kingery and B. F. Pannill, BRL Report No. 1518, Aberdeen Proving Ground(1964).

**Study on blast propagation from underground magazine models (I)
laboratory scale explosion experiments**

by **Yoshio NAKAYAMA***, **Takehiro MATSUNAGA***, **Mitsuaki IIDA***
and **Katsumi TANAKA***

The behaviour of blast propagation from underground magazine models was studied experimentally. Electrical detonators in three types of magazine models, composed of a chamber room with a passageway were detonated to obtain the static overpressure at various distances and azimuth angles from the passageway exit. The results of three different models showed the attenuation effects by both length and cross sectional area of the passageway. Comparisons were made with Skjeltrope's empirical data to show that attenuation depended on both the length to diameter ratio of the passageway and the ratio of chamber cross sectional area to that of the passageway. The decay index of peak overpressure with distance suggested that the blast wave asymptotically became a sound wave along the 90° and 180° axes. The averaged ratios of overpressure along the 90° and 180° axes to those on the 0° axis at the reduced distance of 18.5 m/kg^{1/3} were 0.52 and 0.20, respectively. It seems that the directionality of the blast wave was dependant on charge weight and structure of the underground magazine.

(*Energetic Materials Lab., Dept. of Advanced Chemical Technology, National Institute of Materials and Chemical Research, AIST, MITI, Higashi 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan)
