

Fig. 1 Plane and side view of the model underground magazine (unit of length: mm)

Table 1 Explosives

Exp. No.	Cast TNT			Pentolite booster*			Detonator
	Weight kg	Diameter mm	Height mm	Weight kg	Diameter mm	Height mm	
1-1	0.205	56.2	58.2	0.010	20.5	24.2	No. 6×2
1-2	0.507	77.1	71.4	0.010	20.0	24.4	No. 6×2
1-3	1.018	100.1	85.7	0.021	25.4	29.2	No. 6×2
1-4	1.017	100.5	85.6	0.021	25.3	28.9	No. 6×2

\*PETN/TNT=50/50 wt.%

PETN: pentaerythritol tetranitrate

る直円筒形であり、伝爆薬にはペントライト (PETN/TNT=50/50) (中国化薬製) を用いた。TNTは、その中心高さが火薬庫前室高さの約1/2になるように木製装薬台上に設置した。Fig. 2に実験No. 1-2 (TNT 0.5kg) の装薬状況を示す。伝爆薬に6号瞬発電気雷管 (日本油脂製) 2個を取り付け、薬室まで爆源全体を移動させた後、6号瞬発電気雷管に通電し、爆源を起爆した。今回の実験では火薬庫の装填密度 (薬室容積に対する薬量の比) は最大で18.2 kg/m<sup>3</sup>程度になる。

### 2.3 測定

圧力計測は、Fig. 3に示すように、庫口からの距離 R=5, 7, 12および20mの4カ所、方位角  $\theta=0^\circ$ ,  $90^\circ$ および $180^\circ$ の3方向、計12点で行った (換算距離で5~34 m/kg<sup>1/3</sup>)。使用した圧力計はPCB PIEZOTRONICS社製モデル101A型 (感度40 mV/psi, 共振周波数300 kHz), 同社製モデル137A11型 (10mV/psi, 250kHz) およびKULITE社製モデルXCQ-062型 (4mV/psi, 500kHz) である。地

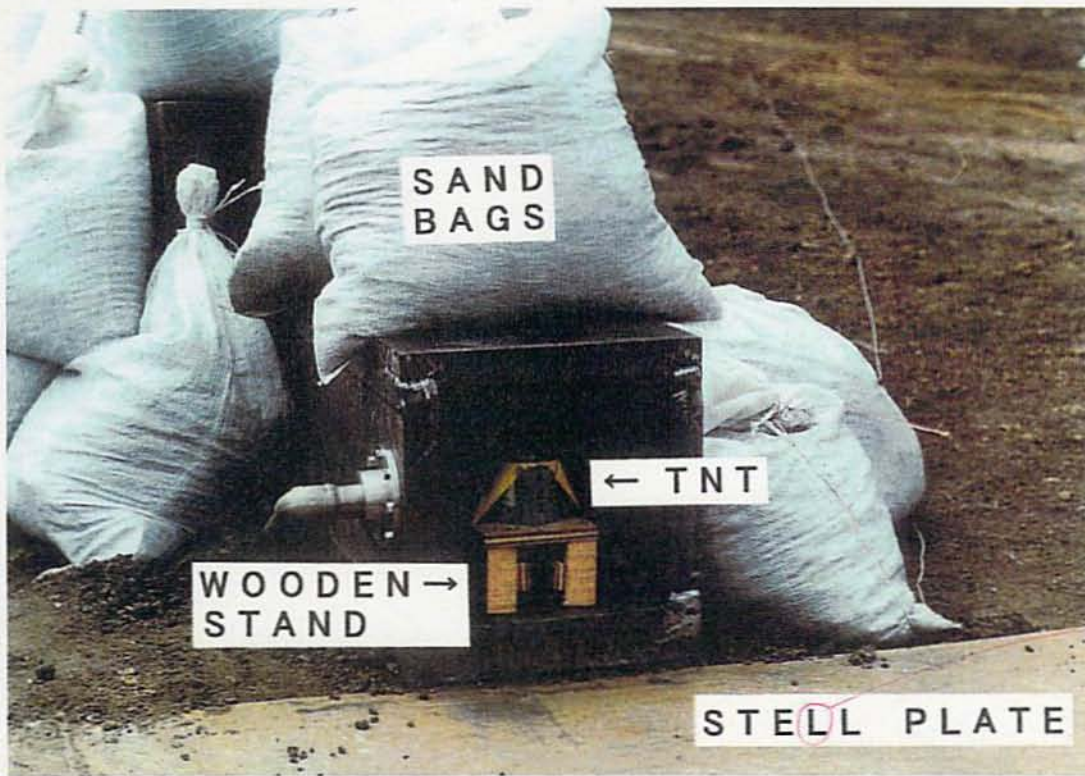


Fig.2 Setup for No.1-2, TNT 0.5kg

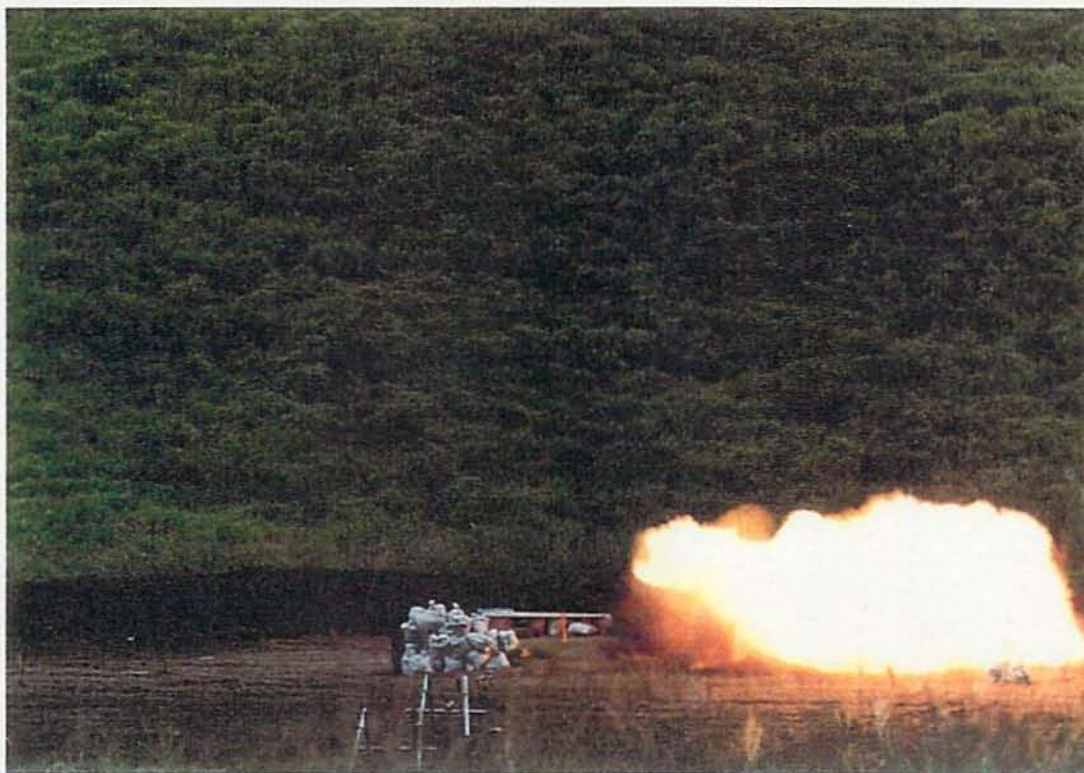


Fig.4 The model underground magazine of No.1-2, TNT 0.5kg at explosion event

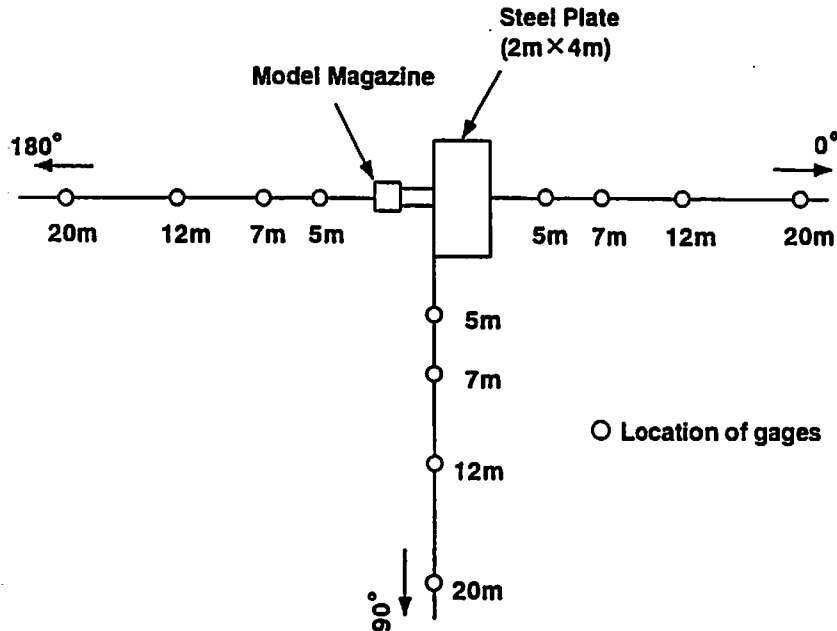


Fig. 3 Location of pressure gages along three azimuth angles

表面での圧力波の反射の影響を少なくするため、全ての圧力計の中心は地面から約30cmの高さとし、爆風の側圧を測定した。なお、庫口圧の計測も試みたが(使用した圧力計はPCB PIEZOTRONICS社製モデル109A02型(0.1mV/psi, 500kHz)), 火薬庫本体の振動、飛散物の衝突などによる雑音信号がひどく計測できなかった。庫口圧の計測には圧力素子の設置方法の検討が必要である。

圧力計からの信号は増巾器、パッファ増巾器を介して、爆点から約150m離れた観測所まで同軸ケーブルにより延長し、TEAC社製データレコーダXR-9000(28チャンネル, 周波数特性DC~40KHz)に記録した。VTR, スチルカメラ等により爆発状況を撮影し、また各実験毎に火薬庫の破損状況などを検査した。

### 3. 結果

#### 3.1 爆発状況

Fig. 4に実験No.1-2(TNT 0.5kg)の爆発時の状況を示す。爆発生成気体は、正面方向に指向性を持って庫口から吹き出している。このため、爆風は正面方向に強くなるのが予想できる。爆発により、火薬庫は実験No.1-1で約20mm, 実験No.1-2で約50mm後方に移動していたが、火薬庫の変形、破壊などは認められなかった。一方、実験No.1-3(TNT 1kg)の場合、火薬庫薬室部に大きな破壊が発生した。具体的に述べると、1) 薬室の後部の壁(Fig. 1の薬室左側の部分)が破壊され、破片となって吹き飛んでいた、2) 薬室の天板および底板の溶接部が剥離していた、3) 火薬庫本体は約27度回転し、最大約280mm後方に移動していた。溶接部分から破断が生じていることから、

溶接部の残留歪、および角の部分での応力集中等が破壊の原因と考えられる(焼鈍などの熱処理により残留歪みを除去することが可能であろうが、今回は実施していなかった)。

#### 3.2 火薬庫内爆発による爆風圧

Fig. 5に実験No.1-2(TNT 0.5kg), 測定距離20mにおける3方向の爆風波形を示す(横軸の時間は雷管の起爆遅れ約1msを含む)。ピーク過圧は $\theta = 0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ の順に小さくなり、到達時間も同様に長くなっている。衝撃波は庫口において回折する。このため、ピーク過圧は減衰し、衝撃波速度は小さくなるので到達時間は長くなる。

図には示さないが、実験No.1-3,  $\theta = 180^\circ$ の場合には衝撃波は複数の波に分かれていた<sup>2)</sup>。場合によっては、最初の波より第2番目以降の波の方が高い過圧となった。これは、爆発により火薬庫薬室部が破壊され、庫口だけでなくその部分からも爆発生成気体が噴出し、爆風を生成したためと考えられる。

波形の解析に際し、データレコーダからの出力波形はオートニクス社製波形記憶装置S210(アナログ/デジタル(A/D)変換の分解能12bit,  $1\mu\text{s}/\text{word}$ )によりA/D変換され、EPSON社製パーソナルコンピュータPC-286LSによりフロッピーディスクに保存された。測定結果はスプライン関数により補間され、ピーク過圧、正相圧の時間積分(インパルス)、到達時間、持続時間が求められた。これらの爆風特性値のうち、ピーク過圧を換算距離について整理した結果をFig. 6に示す。記号は○;  $\theta = 0^\circ$ , △;  $\theta = 90^\circ$ , □;  $\theta = 180^\circ$ であり、記号の大きさが薬量に対応する。すな

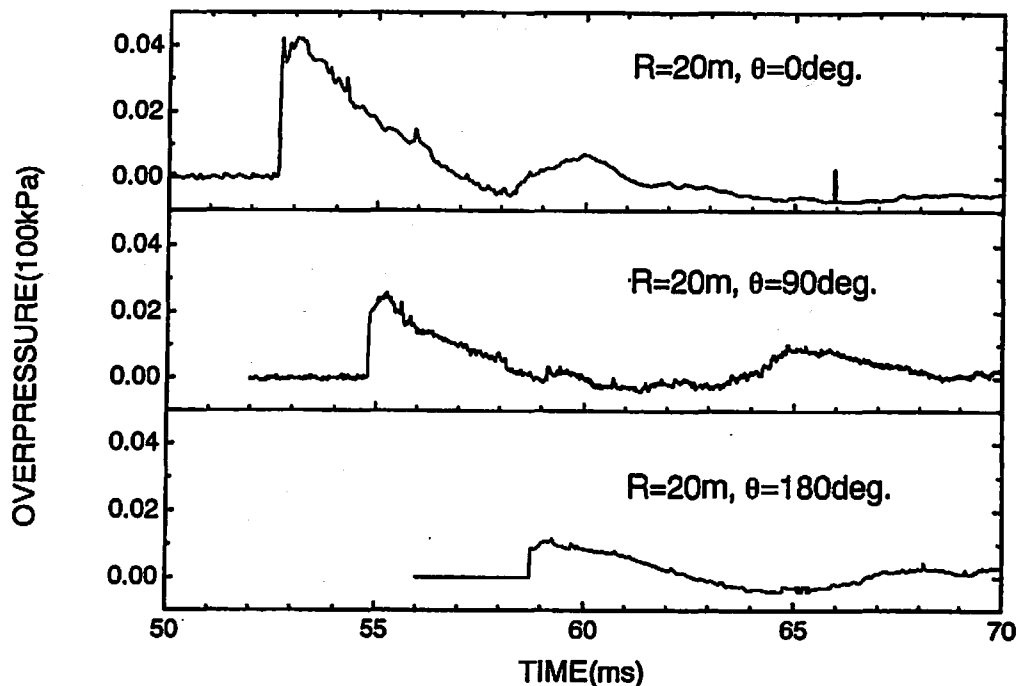


Fig. 5 Histories of static overpressure for three azimuth angles; No.1-2, TNT 0.5kg, R=20m

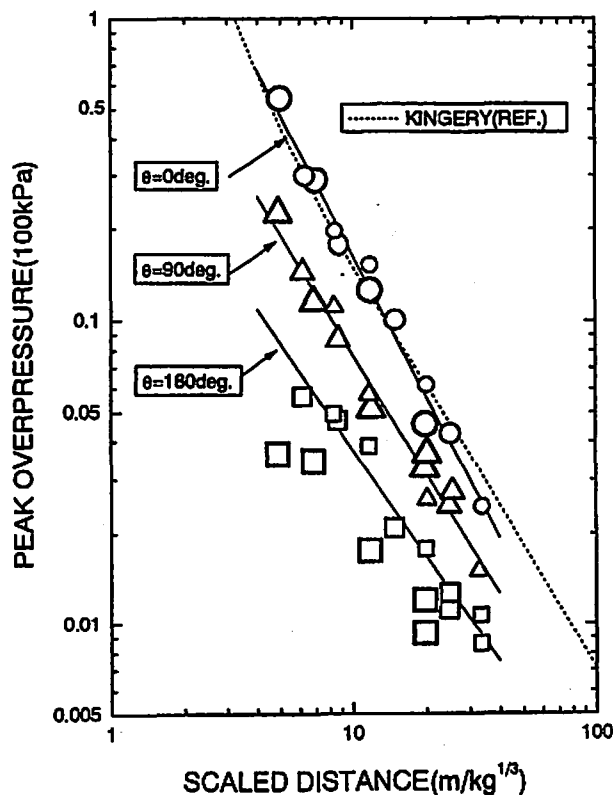


Fig. 6 Static peak overpressure versus scaled distance for the model underground magazine

うち、一番小さい記号は実験No.1-1を、一番大きい記号は実験No.1-3の結果を示す。比較のために、Kingeryによる半球形TNT爆薬の地表面爆発による

Table 2 Pressure decay constant(k) and power decay index(n)

Azimuth angle	Number of data	Constant 100kPa k	Index n
0°	12	5.76	-1.544
90°	13	1.57	-1.308
180°	10	0.544	-1.162

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

$\Delta p$ : static peak overpressure(100kPa)

$R$ : distance from magazine exit(m)

$W$ : explosive weight(kg)

実験データ<sup>3)</sup>を同図に点線で示す。

Table 2に各方向別に最小2乗法によりデータを近似した結果を示す(複数ピークが出現した実験No.1-3の180°方向のデータは、実験No.1-1, 1-2と比較すると低めであったため、用いていない)。使用した実験式を次に示す。

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

ここに、 $\Delta p$ はピーク過圧(100kPa)、 $R$ は庫口からの距離(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Fig. 6に実線で示す。

本実験結果の圧力比は距離により変化しているので、ピーク過圧の指向性を検討するためには、換算

Table 3 Overpressure ratio of the present result and various analyses

Method	L/D*	Pressure ratio	
		$\Delta p(90^\circ)/\Delta p(0^\circ)$	$\Delta p(180^\circ)/\Delta p(0^\circ)$
Present result	3.13	0.52**	0.27**
Nakayama (Model 1)***	3.13	0.53**	0.20**
Nakayama (Model 2)***	7.82	0.62**	0.20**
Nakayama (Model 3)***	12.1	0.43**	0.15**
Hasue****	5.6~22	0.42	—
Nakahara*****	~6.7	0.37	0.30
Millington*****	16.0	0.32	—
Skjeltorp*****	86	0.28	0.09

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

\*\* : estimated at scaled distance=16 m/kg<sup>1/3</sup>

\*\*\* : Ref. 1

\*\*\*\* : Ref. 4

\*\*\*\*\* : Ref. 5

\*\*\*\*\* : Ref. 6

\*\*\*\*\* : Ref. 7

距離を定める必要がある。前報では、換算距離18.5 m/kg<sup>1/3</sup>における過圧比を便宜的に採用した(欧米では、ピーク過圧により保安距離が定められており、両者の基準ピーク過圧の平均値に対応する換算距離とした)。本報告では火薬類取締法との関連を考えて、火薬類取締法における第1種保安物件に対する保安距離の係数(K値)が16 m/kg<sup>1/3</sup>であることから、換算距離16 m/kg<sup>1/3</sup>におけるピーク過圧、そして過圧比を算出した。前報で報告した小型モデルの場合のピーク過圧も(1)式と同様の実験式で整理されているので、換算距離16 m/kg<sup>1/3</sup>における値を再計算した。Table 3に $\theta=0^\circ$ でのピーク過圧に対する $90^\circ$ および $180^\circ$ 方向のピーク過圧の比 $\Delta p(90^\circ)/\Delta p(0^\circ)$ および $\Delta p(180^\circ)/\Delta p(0^\circ)$ を示す。同表には、小型モデルの結果(薬量は~0.6 g, 金属製の火薬庫<sup>1)</sup>、蓮江ら(同TNT換算0.513g, 同金属製)<sup>4)</sup>、中原ら(同~100kg, 同コンクリート製)<sup>5)</sup>、Millingtonら(同0.8および1.6kg, 同金属製(原著では“overstrong model single magazine”となっている))<sup>6)</sup>およびSkjeltorpら(同9.5~151.5 g, 同金属製)<sup>7)</sup>の文献値も示す。同表のL/Dは、前室の等価直径に対する長さの比である。ここに、Lは前室長さ、Dは前室の等価直径(断面積が同じ値となる円の直径)である。

#### 4. 考察

##### 4.1 $\theta=0^\circ$ のピーク過圧

Fig. 6より、 $\theta=0^\circ$ のピーク過圧は火薬庫近傍の距離においてKingeryのそれよりやや高くなった。この理由として、1)本火薬庫では薬室と前室の断面積の変化が小さく、前室が短い。このため、庫内での爆風

の減衰が弱くなった、および2)爆発生成気体が $\theta=0^\circ$ 方向に強く吹き出すため、この方向の正味距離が短くなった、などが考えられる。

本報告の火薬庫の幾何学的形状は、前報の小型モデル1にほぼ相似である。両者の比較より、爆風の相似則について検討できる。小型モデル1では、正面方向のピーク過圧はKingeryのデータより低くなり、本実験と一致しない結果となった。この理由として、小型モデルでは爆源に6号電気雷管を使用したから、管体の破壊にエネルギーの一部が使われることから、薬量に相当する爆風圧を発生していないことが考えられる。小型モデルによる小規模実験の結果(ピーク過圧の絶対値など)は、本実験程度の薬量規模の実験により確認する必要があることが明らかになった。

##### 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、(1)式の指数nにより評価される。Table 2より本実験では、 $\theta=0^\circ$ で減衰が最も強く、 $\theta=90^\circ$ では緩やかになり、 $180^\circ$ では、音の減衰特性 $n=-1$ に漸近する傾向を示した。この結果は前報の小型モデルによる実験と一致した。一方、SkjeltorpらおよびMillingtonの結果では、距離の減衰指数nは方位角 $\theta$ に依存しない形で整理されており、それぞれ $n=-1.35$ および $n=-4/3$ となった。本実験ではnは $\theta$ に依存する結果となったが、これは衝撃波が減衰すると音波になることを反映していると考えられる。

##### 4.3 ピーク過圧比の指向性

Table 3から方位角に対するピーク過圧の比は、本報告では換算距離16 m/kg<sup>1/3</sup>において $\Delta p(90^\circ)/$

$\Delta p(0^\circ) = 0.52$ ,  $\Delta p(180^\circ) / \Delta p(0^\circ) = 0.27$ となった。小型モデル1では、 $90^\circ$ 方向の過圧比0.53,  $180^\circ$ 方向の過圧比0.20となった。 $90^\circ$ 方向の過圧比は両者でほぼ等しく、 $180^\circ$ 方向のそれは本報告の結果が小型モデル1よりやや大きくなった。

次に、他の研究者の結果との比較を行う。Table 3はL/Dの小さい順に整理されている。Skjeltopらの結果は同表中一番小さいが、彼らの結果は一端開放型の衝撃波管により発生した爆風の結果と高い相関があると報告されている。衝撃波管による爆風は、L/Dが大きい場合次元平面的な爆風となり、爆風の指向性が高くなると考えられる。また、中原らの結果と本報告を比較すると、 $90^\circ$ 方向の過圧比は本報告が高くなり、 $180^\circ$ 方向のそれは中原らの結果が高くなった。Table 3に示す様々な研究結果の相互比較より、本実験結果と前報の小型モデル1の結果は、比較的良好一致を示していると判断される。すなわち、両者において、相似則が成立していると考えられる。以上のことより、薬室の長さで13分の1、薬量にして1600分の1の条件に渡り爆風の過圧比に関する相似則はほぼ成立していることを確認した。

#### 4.4 過圧比と方位角の実験式

次に、過圧比と方位角の実験式を検討する。まず、Skjeltopらの提案している実験式を以下に示す<sup>7,8)</sup>。

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

$$P_w = 12.1 (W/V_t)^{0.607} (A_p/A_c)^{0.19} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta p$ はピーク過圧(100kPa)、 $P_w$ は庫口での圧力(100kPa)、 $R$ は庫口からの距離(m)、 $D$ は通路の等価円直径(m)、 $\theta$ は火薬庫の中心軸からの方位角、 $W$ は薬量(kg)、 $V_t$ は薬室と前室を含めた全体積(m<sup>3</sup>)、 $A_c$ は薬室断面積(m<sup>2</sup>)、 $A_p$ は前室断面積(m<sup>2</sup>)である。(2)式より方位角 $0^\circ$ のピーク過圧に対するある方位角 $\theta$ のピーク過圧の比は( $P_w$ ,  $R$ , および $D$ は変わらないので)次のようになる。

$$\Delta p(\theta) / \Delta p(0^\circ) = 1 / [1 + (\theta/a)^2] \quad (4)$$

ここに、 $a$ は実験により定まる係数であり、(2)式の場合は $a = 56$ である。(4)式より方位角 $\theta = a^\circ$ の時にピーク過圧比は0.5になる。本実験では、任意の方位角における過圧比は(4)式と同様の関数関係にあると仮定し、Table 3のピーク過圧比の値より係数 $a$ を非線形最小二乗フィットして求めた。

$$\Delta p(\theta) / \Delta p(0^\circ) = 1 / [1 + (\theta/a)^2], a = 99.7 \pm 5.3 \quad (5)$$

Fig. 7にこの関数を示す。薬室と通路の断面積比 $A_p/A_c = 0.32$ 、前室のL/D=3.1に近い形状の火薬庫

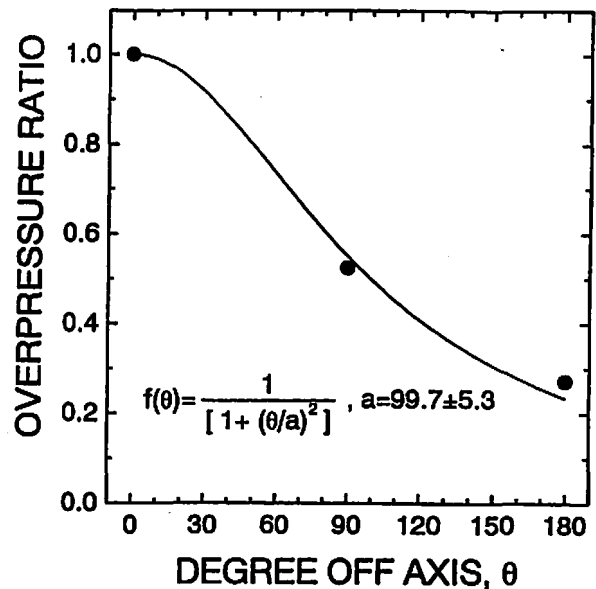


Fig. 7 Overpressure ratio as a function of azimuth angle

に対しては、(5)式によりピーク過圧の比の予測が可能と考えられる。また、本式では覆土は考慮していないが、覆土があれば $\theta = 180^\circ$ 方向での爆風は覆土が無い場合より減衰すると考えられるので、本実験式はより安全な結果を与えると考えられる。本実験と比較して、1) 薬室あるいは前室のL/Dが非常に大きい、2) 爆薬が分布している、および3) 火薬庫の構造材質等に相違がある場合には、改めて雷管程度の薬量による小型モデル実験、あるいはより大きな薬量規模の実験を実施し、(5)式の係数 $a$ を推定する必要がある。

#### 5. まとめ

金属製の模擬地中式火薬庫を野外に構築して、TNT 0.2~1.0kg、測定距離5~20m、庫口正面方向からの方位角 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ に対する爆風の特徴値を求めた。以下に結果をまとめる。

- (1) 正面方向に対する $90^\circ$ および $180^\circ$ のピーク過圧の比は、換算距離16m/kg<sup>1/3</sup>においてそれぞれ0.52および0.27となった。
- (2) 実験室規模の爆発実験(長さで13分の1、薬量で1600分の1)の結果と比較した。その結果、 $\theta = 0^\circ$ 方向のピーク過圧に関して、本報告の結果は小型モデルによる結果より高くなった。この理由として、小型モデル実験で使用した雷管管体の影響が考えられた。小型モデルによる実験室規模の実験結果は、本実験程度の薬量規模の実験により確認する必要がある。
- (3) 本実験と小型モデルによる実験結果の結果から、両者の実験結果において爆風の過圧比については相似則がほぼ成立していることを確認した。

(4) 本実験における過圧比と方位角の関係を表現する実験式として、次式を得た。

$$\Delta p(\theta)/\Delta p(0^\circ) = 1/[1+(\theta/a)^2], a=99.7 \pm 5.3$$

#### 謝 辞

本実験は1992年9月7日～8日に陸上自衛隊日出生台演習場(大分県玖珠郡玖珠町所在)において「平成4年度火薬類の保安技術実験」の一部として各火薬関係団体の協力により実施された。ここに厚く謝意を表します。

#### 文 献

- 1) 中山良男, 松永猛裕, 飯田光明, 田中克己, 火薬学会, 56, 254(1995)
- 2) 中山良男, 松永猛裕, 横井裕之, 平成4年度火薬類の保安技術実験報告書, p.9(1993)
- 3) C. N. Kingery and B. F. Pannill, BRL Report No.1518, Aberdeen Proving Ground(1964)
- 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)のFig.5
- 5) 中原正二, 元場昭夫, 加藤慎一, 工業火薬, 46, 219(1985)のFig.9
- 6) C. F. Millington, Minutes of the Twentieth Explosives Safety Seminar, p.1285(1982)のFig.7
- 7) A. Skjeltorp, T. Hegdahl and R. Jenssen, Proceedings of the Fifth International Symposium on Military Application of Blast Simulators, p.6:7:1, Stockholm, May(1977)
- 8) C. N. Kingery, Technical Report BRL-TR-3012, June(1989)

---

## Study on blast propagation from underground magazine models(II)

### —Field explosion experiments—

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

Field explosion experiments of a model underground magazine were conducted to investigate the behaviour of blast wave propagation around the model magazine. The static overpressure-distance relations along three azimuth angles, 0°, 90° and 180° were obtained. The ratios of overpressure along 90° and 180° to those on 0° were found to be 0.52 and 0.27 respectively. A comparison of the present results with the previous smaller model experiments shows good agreement. This result shows the similarity rule of blast waves. From the present results, the equation for predicting the peak overpressure ratio as a function of azimuth angle was approximated by

$$\Delta p(\theta)/\Delta p(0^\circ) = 1/[1+(\theta/a)^2], a=99.7 \pm 5.3$$

(\*Dept. of Advanced Chemical Technology, National Institute of Materials and Chemical Research, AIST, MITI, Higashi 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, Japan)