

爆発チャンパー内における爆風圧計測実験

松永猛裕*, 青地忠浩*, 田名網 潔**, 飯田光明*
 宮本健一*, 三宅淳巳**, 小川輝繁**

本報告では、物質研内にある爆発チャンパーを用いて、常時、小規模の爆風圧を計測できるような体制を整備することを目的として、基準となる爆風圧計測実験を行った。その結果、爆発チャンパー内で適正な爆風圧計測を行うための技術指針が得られた。また、ペントライトおよび雷管の爆風パラメータから、ピーク過圧と換算インパルスに関する基準曲線を得た。更に、得られた基準曲線を含む爆薬に適用し、その有効性を検討した。

1. はじめに

爆発からの被害を調べる実験として爆風圧計測実験は有用である。筆者らは昭和36年からはじまった通産省主催の火薬類の野外大爆発実験において、様々な爆発源から発生する爆風を計測する実験を行ってきた¹⁾。こうした実規模に近い実験は、爆発被害の理論的な予測ができない以上、重要である。しかしながら、実験場・人員の確保、費用等を考えると、実験回数は限定され、火薬類の種類や実験条件等を変えた詳細な検討はできない。特に、煙火原料のように、その種類が非常に多く、すべてを大量に実験できない場合や、発生する爆風圧が、密閉度などの条件により変化する場合には、少量での詳細な実験は不可欠と思われる。

ここでは、物質研内にある爆発チャンパーを用いて、常時、小規模の爆風圧を計測できるような体制を整備することを目的として、基準となる爆風圧計測実験を行った結果を報告する。

2. 実 験

2.1 実験方法

実験は、工業技術院物質工学工業技術研究所内にある爆発チャンパー(通称、大ピット)にて行った。この爆発チャンパーは、Fig. 1に示すように縦に細長い球

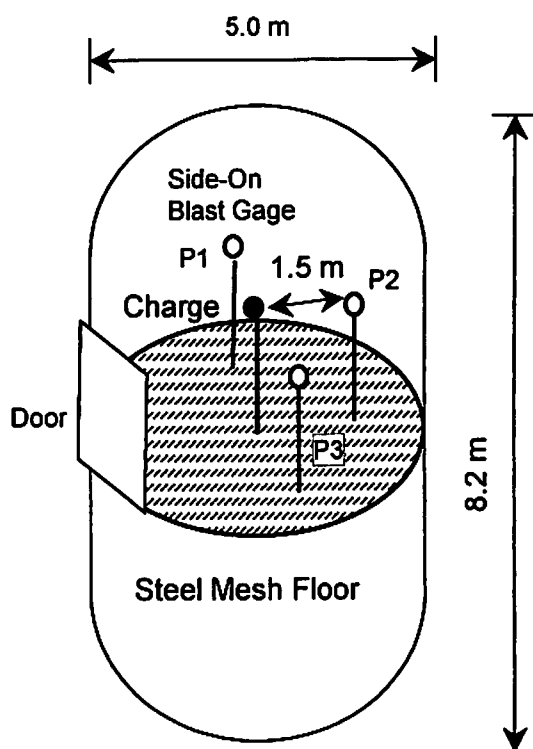


Fig. 1 The experimental lay-out for the blast pressure measurement at the NIMC explosion chamber

形であり、直径は5 m、高さは8.2 mである。また、高さの半分の位置に作業のための網目状の鉄製床板が敷かれている。

この爆発チャンパー内で、Fig. 1に示すような配置で爆薬と圧力センサーをセットした。爆薬は、中央の床から1.0 mの高さにセットした。このために、床にアングル材を組み、そこから塩ビ管(VP-20)を支柱として立てる。この塩ビ管に爆薬を布粘着テープで貼り

1999年11月2日受理

*物質工学工業技術研究所極限反応部
 〒305-8565 茨城県つくば市東1-1
 TEL 0298-61-4785
 FAX 0298-61-4783

**横浜国立大学工学部物質工学科
 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
 TEL 045-339-3992
 FAX 045-339-4011

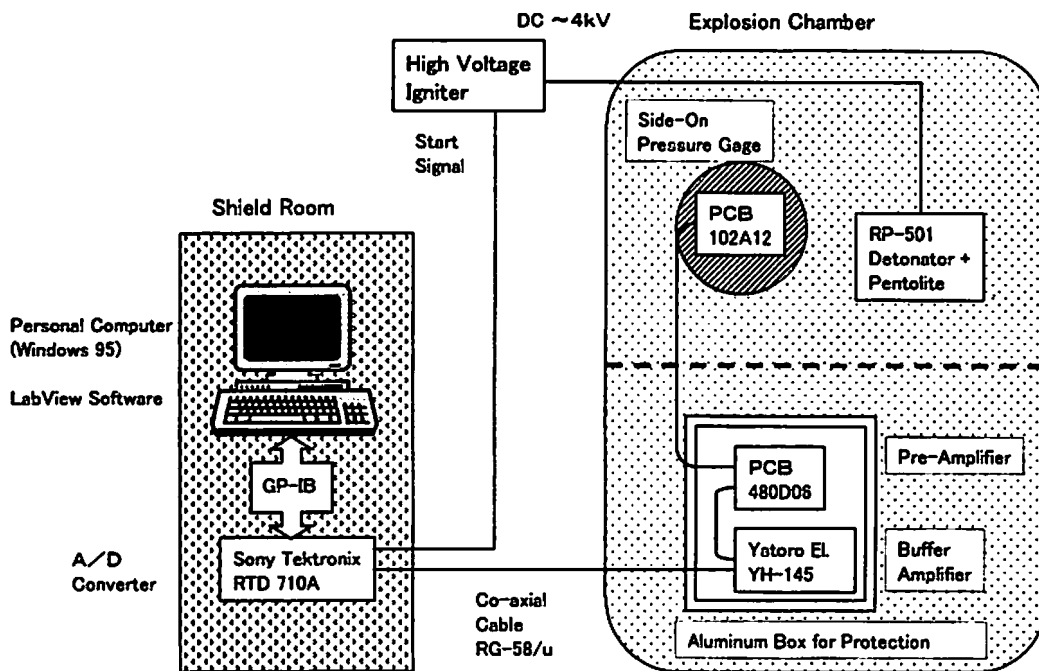


Fig. 2 Block diagram of blast pressure recording system

付けることにより、位置を固定した。

圧力センサーは、爆薬からなるべく同じ距離(約1.5 m)になるように3方向に設置した。これは、爆風圧力の方向性を調べるためである。爆薬と圧力センサーとの距離は、爆薬の大きさのため、正確には決められない。ここでは、爆薬の中心と圧力センサーの受圧面の中心との距離を計測した。圧力計測は、圧力センサーを直径10cmの整流板中央に取り付けた上で、側圧を計測した。

Fig. 2に計測システム図を示す。まず、圧力センサー(PCB社製、102A12)からの信号を定電流電源(PCB社製、480D06)で電圧信号に変換し、長距離転送するためにバッファアンプ(ヤトロ電子製YH-145)を介する。そして、変換された電圧信号は、電磁ノイズから守られたシールドルーム内でA/D変換器により、デジタル信号に変換した後、コンピュータに取り込んだ。また、予め、ケーブル長による電圧減衰などの効果を補正するために、圧力センサーの代わりにセンサーシミュレーター(PCB社製、492B)を用いて基準電圧を入力することにより、電圧値の校正を行った。時間の基準には、雷管に通電した信号を分岐して用いた。

2. 2 用いた爆薬

爆風圧計測により得ようとする爆発威力は通常、TNTと比較する値、すなわち、TNT換算値である。しかしながら、TNTは1 kg以下の少量では、完全に爆ごうせず、本来、有している爆発威力を示さな

い²⁾。粉状TNTのプレス成型品を用いた予備実験においても信頼性の高い爆風圧力は得られなかった。そこで、基準となる爆薬には、TNTより爆発性の高いペントライト(TNT/PETN=50/50wt.%)を用いた。また、雷管のみの爆風圧も計測した。ペントライト試料量は10g~500gとした。形状は、なるべく葉径/葉長比が等しくなるように調整した。起爆は、線爆発タイプの雷管(RISI製、RP-501)を用い、4 kV以上を通電することにより起爆した。

ペントライトおよび雷管から得られる換算式の性質を調べるために、含水爆薬の爆風圧計測も行った。

2. 3 爆風パラメータの基準値への変換

爆風パラメータは、Sachsのスケール則により、整理した³⁾。この場合、実験場の空気密度、圧力、音速は、雰囲気温度、大気圧により変化する。従って、実測された爆風圧データを一定の基準に従って標準化する必要がある。ここでは、広く用いられている海拔0 mでの大気圧 p_0 (1013 hPa)、および、標準温度 T_0 (15°C)における値へ換算した。換算式は以下の通りである。

- ・換算距離[m/kg^{1/3}]

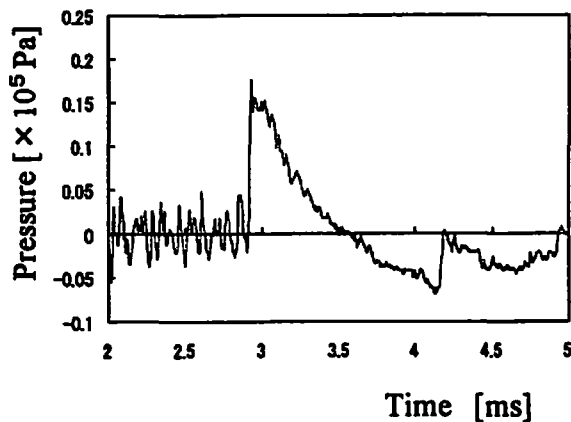
$$Z = R / \{ W^{1/3} (p_0 / p_a)^{1/3} \} \quad (1)$$

- ・ピーク過圧[Pa]

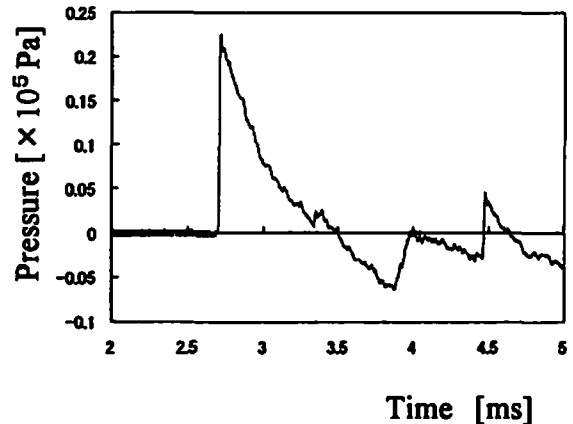
$$P = P_{max} / (p_a / p_0) \quad (2)$$

- ・換算インパルス[Pa·s/kg^{1/3}]

$$\zeta = I / \{ (W^{1/3} (p_0 / p_a)^{2/3} (T_0 / T_a)^{1/2} \} \quad (3)$$



(a) Pentolite with a PVC tube
(Sample weight: 10.21g)



(b) Pentolite without vessel
(Sample weight: 10.90g)

Fig. 3 Pressure-time histories of the blast wave from pentolite charges

ここで、用いた記号は以下の通りである。

- R : 爆源からの距離[m],
- W : 爆薬量(雷管分も含めて)[kg]
- p_a : 実験場での大気圧[Pa],
- p_0 : 海拔0mでの大気圧(1.013×10^5 Pa),
- P_{max} : ピーク過圧[Pa],
- I' : 正相インパルス[Pa·s],
- T_a : 実験場での雰囲気温度,
- T_0 : 標準温度(288.15K)

3. 結果と考察

3.1 爆発に伴うノイズの除去について

爆風圧を計測する上で、技術的にもっとも難しかったのは、ノイズの除去であった。金属製の床をはじめとし、ほとんどの計測器具類は金属でできているため、爆発による振動が伝わりやすい。また、線爆発型雷管は4kVという高電圧で起爆するため、それからのノイズも考えられる。このため、実験初期にはS/N比の悪い圧力波形しか得られなかった。そこで、圧力センサー取り付け部をはじめとし、考えられる限りの箇所に、スポンジや硬質発泡材を施し、振動を軽減した。また、起爆ラインは、金属テープによりシールドした。これにより、ノイズのほとんどを除去することができた。しかし、裸薬状の爆薬ではノイズの少ない爆風波形が得られるのに対し、Fig. 3 (a)に示すように塩ビ管に入ったペントライトの波形はノイズが多く、また、ピーク付近が乱れた波形であることが多かった。そこで、塩ビ管などの容器のないペントライトで実験したところ、Fig. 3 (b)に示すように良好な波形を得ることができた。爆風到達以前のノイズは塩ビ管だけの要因とは考えられないが、ピーク付近の乱れは塩ビ管に詰められたことによるものと思われる。

これらの検討により、基準爆薬として用いるペントライトは製造が容易な塩ビ管入りではなく、塩ビ管に溶填した後、その塩ビ管を外した裸薬を用いるのが望ましいことがわかった。

3.2 ペントライト基準曲線の導出

Table 1にペントライト裸薬についての結果をまとめた。これらの結果から、ピーク過圧、および、換算インパルスを換算距離の関数として近似することにより、基準曲線を得ることができる。よく用いられているKingeryの基準曲線は、ピーク過圧、および、換算インパルスの対数を換算距離の対数の多項式として表している⁴⁾。また、筆者らがこれまで用いてきた基準曲線は、実測値を平滑化スプラインフィットして得られたものである⁵⁾。本実験で得られた実測値を、いくつかの近似式でフィットした結果、2次式で十分に近似できることがわかった。以下にその近似式を示す。

・ピーク圧力について

$$\log(P) = 0.68432 \{\log(Z)\}^2 - 2.8745 \log(Z) + 3.1977 \quad (R=0.9966) \quad (4)$$

・換算インパルスについて

$$\log(\zeta') = -0.26893 \{\log(Z)\}^2 - 0.61238 \log(Z) + 2.1156 \quad (R=0.9916) \quad (5)$$

2次式で近似できたことは、ペントライト換算率を得るために都合がよい。ピーク過圧、あるいは、換算インパルスから、解析的に換算距離を求めることができるからである。適用範囲は、換算距離で0.2~1.2程度であり、外挿はしない方がよい。筆者らが、今後、本爆発チャンパー内で適用を予定している煙火組成物や爆発性危険物の最大実験量は1kg程度であり、この適用範囲内であると考えている。

Table 1 The blast parameters for pentolite and detonator (RP-501)

Sample weight W [g]	Distance R [m]	Scaled distance Z [m/kg ^{1/3}]	Peak overpressure P [kPa]	Impulse I' [Pa·s]	Scaled impulse ζ' [Pa·s/kg ^{1/3}]
RP-501	1.391	18.34	4.46	0.622	8.72
	1.574	20.76	4.20	0.592	8.30
	1.439	18.99	3.64	0.629	8.81
RP-501	1.433	18.90	4.25	0.546	7.65
	1.549	20.44	4.51	0.525	7.36
10.88	1.366	6.097	25.5	6.72	30.0
	1.496	6.677	20.9	5.95	26.6
10.90	1.431	6.385	21.8	5.97	26.6
	1.436	6.407	22.1	6.24	27.8
11.19	1.439	6.365	20.3	5.53	24.5
	1.435	6.347	24.2	5.73	25.4
	1.435	6.347	21.3	5.67	25.1
30.05	1.376	4.408	39.6	13.7	43.9
	1.485	4.757	34.2	12.0	38.5
30.11	1.434	4.592	38.5	12.0	38.4
	1.422	4.553	39.7	12.6	40.2
	1.434	4.592	38.3	13.1	41.9
30.32	1.435	4.583	41.8	12.5	39.8
	1.441	4.603	41.7	12.1	38.6
	1.440	4.599	42.0	11.8	37.7
100.55	1.413	3.035	86.3	29.4	63.2
	1.569	3.369	72.9	26.9	57.9
	1.448	3.110	77.8	30.7	65.8
100.84	1.434	3.078	85.7	27.8	59.7
	1.422	3.052	83.0	27.6	59.1
	1.435	3.080	80.0	27.0	58.0
100.94	1.445	3.100	85.1	26.5	56.8
	1.434	3.076	94.0	26.5	56.9
	1.437	3.082	92.2	24.7	53.1
301.40	1.439	2.145	242	55.0	82.0
	1.441	2.148	220	50.1	74.7
	1.440	2.147	242	47.0	70.0
498.67	1.445	1.822	325	70.3	88.7
	1.437	1.812	305	68.0	85.7
	1.444	1.820	305	61.7	77.8
498.80	1.440	1.815	328	70.9	89.3
	1.430	1.803	316	66.4	83.8
	1.441	1.816	300	64.3	81.1

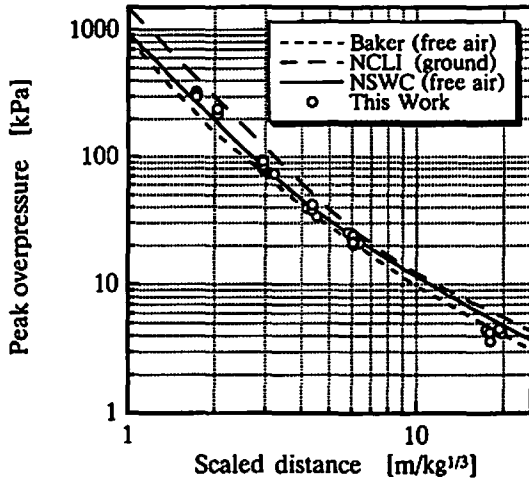


Fig. 4 Peak overpressure vs. scaled distance

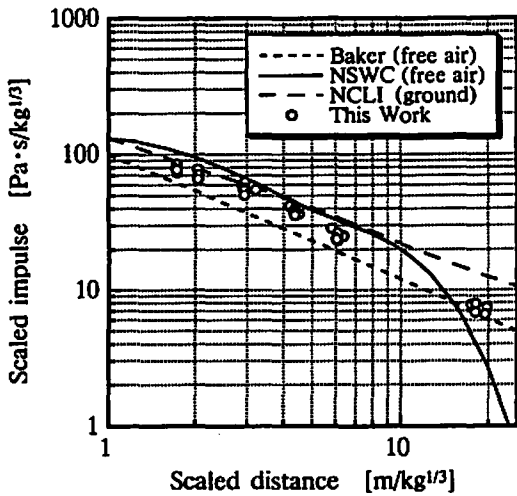


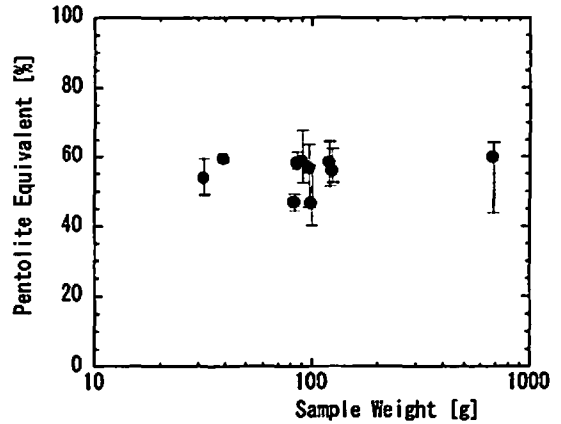
Fig. 5 Scaled impulse vs. scaled distance

3. 3 ペントライト換算からTNT換算への変換について

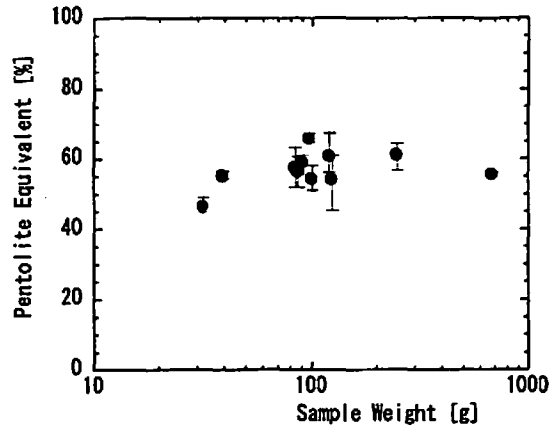
2. 2に記したように、本実験では直接、比較できるようなTNTの実験を行うことができなかった。しかし、爆発威力の基準としてはTNT換算量が広く用いられる。したがって、従来の結果と比較する場合には、何らかの基準でTNTに換算しなければならない。

爆発威力は、評価する試験法により異なる。爆風圧に関する実測のデータでは、ペントライトのTNT比は、116% (Kinney⁶⁾、113% (Baker⁷⁾、111% (ピーク過圧, 米国陸軍⁸⁾)、および、107% (インパルス, 米国陸軍⁸⁾)という値が報告されている。

爆風圧計測以外のペントライトのTNT比に関しては、Kinneyらがまとめており、弾動白砲試験で126%、トラウズル鉛筒試験で122%、デント試験で108%、および、計算値で156%という値である⁶⁾。



(a) Obtained from peak overpressure



(b) Obtained from scaled impulse

Fig. 6 Pentolite equivalent of slurry explosive vs. sample weight

いずれのペントライト比もTNTより大きい、その値には差がある。ここでは、今後、行う爆発チャンパー内の爆風圧実験における爆発威力を以下のように取り扱うことにしたい。すなわち、爆発チャンパー内の爆風圧実験に関する限り、爆発威力は今回のペントライト基準曲線に基づいてペントライト比に換算する。また、従来のTNTとの比較を行う場合には、暫定的にKinneyらが示す116%という値でペントライト比からTNT比に換算し直す。もちろん、今後、爆発チャンパー内で信頼性の高いTNTの爆風圧を計測できれば、TNT比の算出方法を再検討する。

Fig. 4に今回、得られたデータと、これまでに良く知られているTNTの換算距離とピーク過圧との関係を示す。また、Fig. 5に、換算インパルスに関する同様のプロットを示す。今回、得られた爆風データは、従来の関係式の傾向と良く一致している。

3. 4 含水爆薬への適用

Fig. 6 (a)に含水爆薬試料量とピーク過圧値から得られたペントライト換算率とのプロットを示す。ま

た、Fig. 6 (b)に、換算インパルスに関する同様のプロットを示す。図中の点は、Fig. 1のように3方向の測定点で得られた値の平均値であり、エラーバーは、3点での最大値と最小値を示している。

得られた含水爆薬のペントライト換算率は、ピーク過圧からの算出では45~60%である。これは、これまでに試料量500kgの野外実験⁹⁾で得られた値(60~85%)に比べて低い。この差が有意であるか、試料量の違いによるか、あるいは、実験条件の違いであるかは今後の検討を要する。また、実験した試料量の範囲内で、得られたペントライト換算率は試料量に依らず、ほぼ一定の値になった。このことは、ペントライト基準曲線が妥当であり、かつ、実験した範囲内で、含水爆薬が一定の爆発威力であったことを示している。

各実験におけるペントライト換算率平均値のばらつきは、ピーク過圧から求めた値とインパルスからの値とで差はあまりなかった。一方、一回の実験で3方向の圧力波形から得られるペントライト換算率のばらつき、すなわち、図中のエラーバーはピーク過圧からの方が大きかった。これは、爆源から計測点までの距離(約1.5m)が近いため、爆風の伝播に方向性が生じるためと考えられる。また、センサーの応答性、ノイズ等により、ピーク過圧の値が不正確になり易いことも、ばらつきの原因と思われる。

これより、ペントライト換算率は、3点の算出結果の平均値とすること、および、ピーク過圧とインパルスの両方から算出して検討することが望ましい。

4. 結 言

本研究では、物質研内にある爆発チャンバーを用いて、常時、小規模の爆風圧を計測できるような体制を整備することを目的として、基準となる爆風圧計測実験を行った。その結果、以下に示す知見が得られた。

- 爆発チャンバー内での爆風圧計測はノイズが発生し易いため、徹底したノイズ除去対策が必要である。また、ペントライトは裸薬を用いるのが良い。
- ペントライトおよび雷管の爆風パラメータから、ピーク過圧と換算インパルスに関する基準曲線を得た。
- 本実験で算出する爆発威力はペントライト比とすること、また、TNT比に換算する場合には、暫定的にKinneyらの116%を用いることにすることが望ましい。
- ペントライト換算率は、3方向での爆風計測から得られる値の算出結果の平均値とすること、および、ピーク過圧とインパルスの両方から算出して検討することが望ましい。

文 献

- 1) 石川昇, 「火薬類の保安技術実験」, 化学工業資料, 22(2), 10, (1987)
- 2) 全国火薬類保安協会, 「国際化対応火薬類分類体系等検討報告書」, p. 336(1995)
- 3) Sachs, P. G., BRL Report, No. 466(1944)
- 4) Kingery, C. N. & Pannill B. F., BRL Memorandum Report, No. 1518(1964)
- 5) 中山良男他, 工業火薬, 50, 88(1987)
- 6) Kinney G. F. & Graham, K. J., "Explosive Shocks in air 2nd Ed.", Springer-Verlag, Berlin, 1985
- 7) Baker W. F., "Explosions in Air", Univ. of Texas Press, Austin, 1973
- 8) NTIS Report, AD-A123340, 1982
- 9) 通商産業省編, 「昭和55~62年度 火薬類の保安技術実験概要」, 1989

Blast wave measurements in a closed explosion chamber

Takehiro MATSUNAGA^{*}, Tadahiro AOCHI^{*}, Kiyoshi TANAAMI^{**}
Mitsuaki IIDA^{*}, Ken-ichi MIYAMOTO^{*}, Atsumi MIYAKE^{**}
and Terushige OGAWA^{**}

Basic experiments to measure blast pressures were carried out in a closed explosion chamber at NIMC. As a result, several technical findings on pressure-time profile measurements and evaluation method of a TNT-equivalent were found out. Moreover, standard equations for blast parameters were established from a series of pentolite detonations. Finally, the validity of the standard equations was examined by applying to evaluation of explosive strength of a slurry explosive.

(^{*}National Institute of Materials and Chemical Research, 1-1 Higashi, Tukuba, IBARAKI, 305-8565, JAPAN

^{**}Department of Safety Engineering, Yokohama National University, 79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501, JAPAN)