

爆発チャンバー内での小薬量粉状TNTの爆風圧計測

新井裕之*†, 日吉玲子*, 中村順*

*科学警察研究所 爆発研究室 〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 6-3-1
TEL: 04-7135-8001

†Corresponding address: arai@nrips.go.jp

2011年3月31日受付 2011年6月8日受理

要旨

爆発チャンバー内での爆風圧計測では、薬量が少量になる制限がある。そこで、TNTを基準爆薬として利用するために、小薬量でのTNTの完爆性を爆風圧により検討した。

ガラス容器の有無による密閉強度の違い、あるいはブースタの有無による起爆圧力の違いで爆風圧に差は認められず、また、ピーク過圧及び換算到達時間は大薬量での報告値とほぼ一致したことから、装薬密度約 $800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の粉状TNTは50gでも電気雷管起爆で完爆していると考えられた。爆発チャンバー内での爆風パラメータの基準曲線を得るために、ピーク過圧、換算正相インパルス、換算到達時間それぞれの、換算薬量 $2\sim 6\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ における2次回帰近似式を算出した。

1. 緒言

爆風圧の伝播挙動は火薬類やエネルギー物質の爆発影響評価に欠かせないため¹⁾、最近でも火薬庫から放出される爆風圧²⁾⁻⁴⁾や爆風圧の軽減効果⁵⁾など、爆風圧計測に関する報告がなされている。これらの実験は野外で行われることが多いが、実験の費用、繰り返しや条件の変更の容易さ、外的影響の排除などの観点では、爆発チャンバー内での実験に優位性があるため、爆発チャンバー内での実験により詳細に爆風圧を検討した報告も少なくない^{6),7)}。しかし、爆発チャンバー内では、構造強度及び構造壁の計測系に対する影響から薬量が限られるのに対し、TNTは1kg以下の薬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との報告^{6),8)}があるため、爆発チャンバー内では、従来より基準爆薬として用いられてきたTNTで得られる実測値が基準とならない恐れがある。しかし、産業用爆薬⁹⁾⁻¹¹⁾や煙火原料¹²⁾など、様々なエネルギー物質に関してTNT当量が報告されており、このような報告などと比較する上でも、爆発チャンバー内で計測した小薬量のTNTの値を基準値として用いることができれば、エネルギー物質の爆発影響評価に非常に有用である。そこで本報告では、爆発チャンバー内で約50g及び100gのTNTを起爆させた際の爆風圧を測定することでその完爆性を検討するとともに、測定した範囲内での換算距離とピーク過圧、換算正相インパルス、換算到達時間の近似曲線の算出を試みたので報告する。

2. 実験方法

実験は科学警察研究所内にある爆発チャンバー（耐圧

ピット）内で行った。本チャンバーは直径7m、高さ9.4mのカプセル型であり、壁面は厚さ約25mmの鋼板で覆われているとともに、底部から約3.5mの高さまで砂が充填されているため、チャンバー内の有効高さは約6mである。

爆薬は完爆性及び再現性を考慮し、粉状TNT（防衛省規格K4301B等級2、中国化薬製、爆速約 $4.5\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ）を用いた。容器は球形ガラス製容器を用いたが、一部の実験ではポリ塩化ビニリデンフィルム（平均厚み約11 μm 、以下、PVDCと称す）を用いて球状に包むことで、ガラス容器による密閉強度¹³⁾の影響について検討した。起爆には瞬発電気雷管を1本用いたが、一部の実験ではさらにコンポジションC-4を1g用いることでブースタの影響を検討した。TNTの装薬密度は $785\sim 862\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ になるように調整した。PVDCを用いて包んだ場合はその形状を一定に保ちにくかったため、正確な容積が測れず装薬密度は不明であるが、加圧などの操作は行わず装薬した。中心起爆に近い状況になるように、雷管底面を爆薬中心の位置になるように設置した。爆薬を装填した容器はチャンバー底面中心に垂直に立てた、高さ1.0mの木製棒上に設置した。行った実験条件をTable 1に示す。

爆風圧を計測するため、ICP空中爆風圧センサ（PCB Piezotronics社製137A23及び137A22）を爆薬から1~2mの距離に、各センサと爆薬を結ぶ線が直交するように4箇所、静圧を計測できるよう設置した。各センサの受圧面の高さは爆薬中心と同じ高さにした。圧力センサの信号は絶縁ツイストペアケーブル（H-TECH社製）、光絶縁型シグナルコンディショナ（H-TECH社製）、ラインドラ

Table 1 Specification of test explosives and position of sensors.

Mass of charge [g]	Density of charge [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Scaled height of charge [$\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$]	Case of charge	Booster	Scaled distance of sensors [$\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$]
46.0	785	2.79			4.01~4.40
49.0	785	2.73			3.76~4.48
49.0	785	2.73			3.90~4.33
49.2	799	2.73			3.67~6.19
49.3	796	2.73			3.94~4.26
53.5	862	2.65	Glass	None	3.58~4.43
85.1	785	2.27			3.25~3.59
89.8	785	2.23			3.05~3.69
90.9	785	2.22			3.21~3.49
93.7	791	2.20			3.17~3.46
96.3	800	2.18			2.01~2.16
49.0	N/A	2.73	PVDC	None	3.77~4.48
89.8	N/A	2.23			3.05~3.67
47.7	800	2.76	Glass	Comp. C-4 1.0 g	3.48~3.74

イバ (PCB Piezotronics社製) を介して取得した。また、容器外側に光ファイバを取り付け、発光した時を起爆時刻とした。

得られた信号から、爆風パラメータとして、ピーク過圧、換算正相インパルス、換算到達時間を求めた。到達時間は起爆時刻からピークの立ち上がり開始時刻までとし、ピーク過圧は得られた信号で最も高いものを用いた。正圧インパルスは仮に二つ目のピークが減衰直後にあってもそれも含めて正圧部分を全て積分した。各爆風パラメータは、Sachsのスケール則¹⁴⁾により松永ら⁶⁾が整理した条件と同条件である海拔 0 m, 101.325 kPa, 288.15 Kにおける値に換算して整理した。ブースタを用いた場合は、その薬量は TNT に対し約 2% と少量であるため同一薬種と見なし、両方を含めた薬量を TNT の薬量として整理した。

3. 結果と考察

3.1 密閉強度及び起爆圧力の影響

伝爆性の低い爆薬は、密閉強度や起爆圧力が低いと、小薬量では爆ごうが安定しないことが知られている。そこで、密閉強度及び起爆圧力の爆風圧への影響を、容器及びブースタの有無で検討した。

爆風圧の計測には、センサに対する容器破片の影響を防ぐために、硬質の容器を用いないことが多いが、密閉強度により威力が変化する可能性があること、硬質容器を用いることで球の形状を保ちやすいことから、ガラス及び PVDC を用いて、小薬量での TNT における密閉強度の影響を検討した。ガラス容器及び PVDC の測定結果の一例を Fig. 1 に示す。ガラス容器 (Fig. 1 (a)) では PVDC (Fig. 1 (b)) の結果に比べ、ガラス破片のセンサへの衝突によると思われる細かい信号が爆風到達前に現れている違いがあったが、ピーク形状の違いは見られなかった。

ガラス容器及び PVDC を用いたとき、及びブースタを用いたときの計測結果を Fig. 2~4 に示す。容器の違いによ

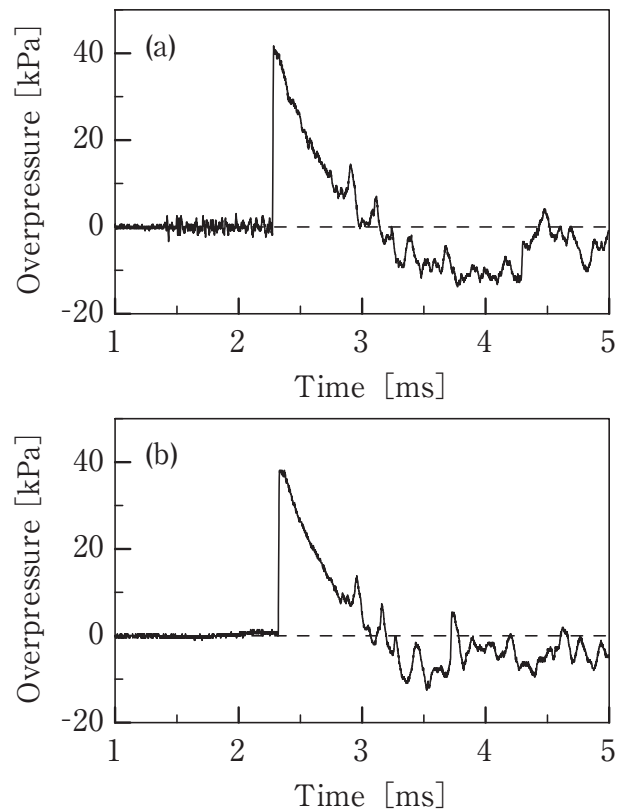


Fig. 1 Examples of pressure profiles for 49 g of TNT. (a) In a spherical glass container without booster. (b) Wrapped with PVDC film without booster.

る爆風圧パラメータの有意差はいずれも認められず、密閉強度の影響はないと考えられた。さらに、ブースタとしてコンポジション C-4 を用いた場合も有意差は認められず、ブースタの有無による起爆圧力の違いによる影響もないと考えられた。

以上のことより、今回の実験条件下ではいずれの場合も粉状 TNT は同じ反応をしており、50 g 程度の小薬量でも安定した爆ごうを呈していると考えられる。

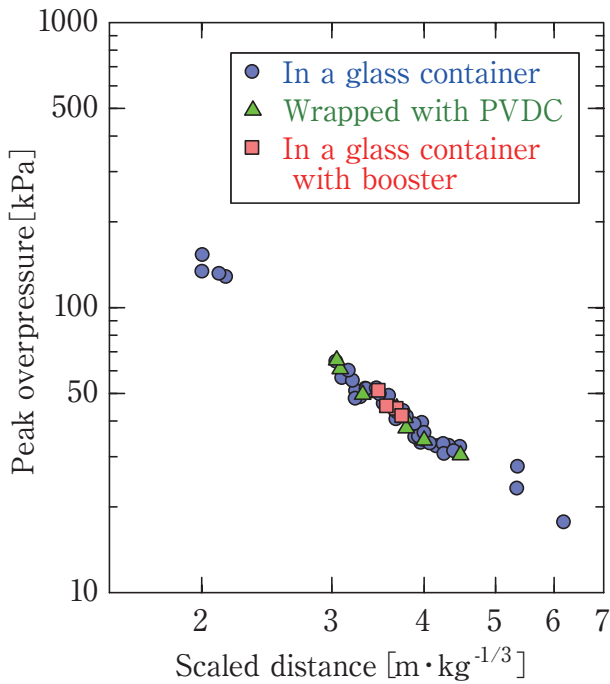


Fig. 2 Influences of the confinement and the booster to the peak overpressure of powder TNT.

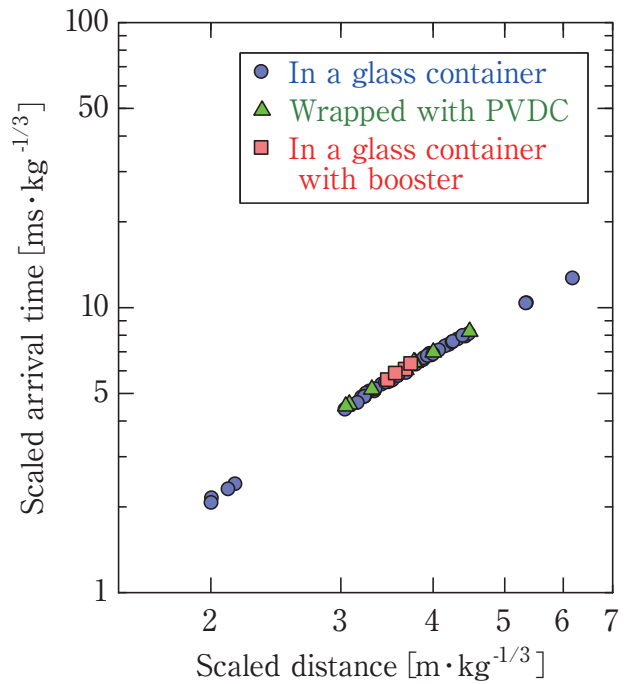


Fig. 4 Influences of the confinement and the booster to the scaled arrival time of powder TNT.

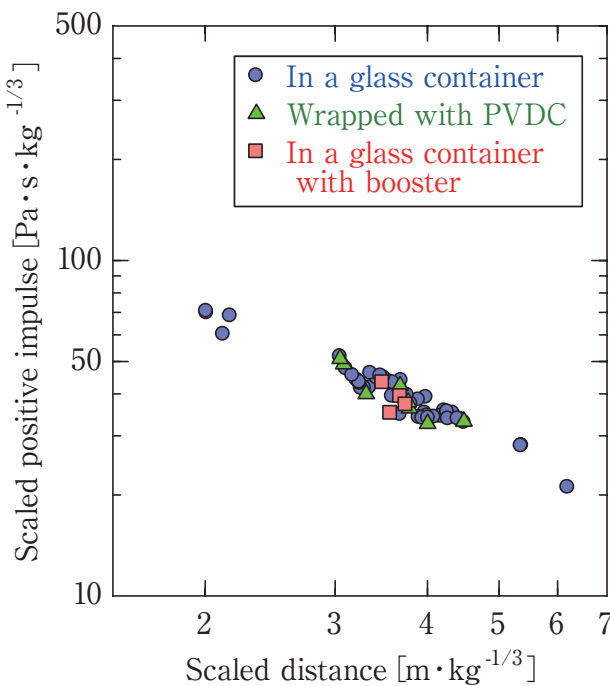


Fig. 3 Influences of the confinement and the booster to the scaled positive impulse of powder TNT.

3.2 既報の実験結果との比較

大薬量のTNTの基準曲線として、空中爆発についてはBaker¹⁵⁾やKinney¹⁶⁾, NSWC¹⁷⁾などが、地表面爆発はKingery¹⁸⁾やMITI87¹⁹⁾, NRIPS09²⁰⁾などが報告されている。また、爆発チャンパー内での基準曲線として、松永らがペントライトでの値とTNT比への換算手法を提案している⁶⁾。そこで今回得られた結果のうち、電気雷管のみでガラス容器内で起爆した結果を、空中爆発のBaker, Kinney, NSWC, 地表面爆発のNRIPS09, 爆発チャンパー内の松永らの関係式と比較した。Bakerのパラメータを算出する

に当たり、密度 $800\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ でのTNTの爆発エネルギーとしてKHT2003による計算結果の $4118\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ を用いた。また、Kinneyは1 ton, NSWCは1 lbでの報告値を用い、288.15Kにおける値に換算した。松永らについてはペントライトでの値の $100/116$ を用いた。結果をFig. 5~7に示す。

ピーク過圧は空中爆発であるBaker及びKinneyによる算出値に近い値を取り、換算到達時間はKinneyにほぼ一致した。これは、本実験条件である約50gの粉状TNTを雷管で起爆した場合、Baker及びKHT2003, あるいはKinneyで想定している大薬量のTNTが爆風として放出するエネルギーと同じ程度のエネルギーを、今回の実験条件である小薬量かつ低密度のTNTでも爆風として放出していることを意味すると考えられ、今回用いた粉状TNTは50gでも完爆していると考えても差し支えない。なお、換算到達時間がBaker及びNSWCの値と異なることに関しては、工藤らによるコンポジションC-4による結果でも同様の傾向が報告されており⁷⁾, 少なくとも爆発チャンパー内での小薬量による実験では、換算到達時間はKinneyの値が基準になる可能性が高いと考えられる。

一方、換算インパルスは松永らによる値に近い値となったことから、自由空間内でなく、爆発チャンパー内で行ったことによる影響の可能性が高い。また、地表面あるいはセンサの支柱からの反射波等を除外せずデータ処理していることによる影響も、空中爆発との結果と異なった要因の一つと考えられる。

3.3 近似式の算出

同条件で他のエネルギー物質を起爆した際のTNT換算比を求める目的で、Fig. 4で示した換算距離に対するピーク過圧、換算正相インパルス、換算到達時間の結果について

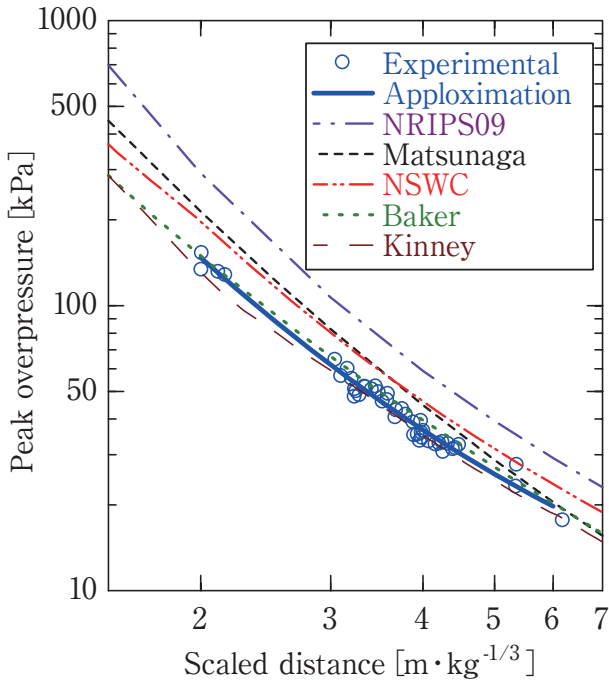


Fig. 5 Comparison of peak overpressure with the referred TNT standard data.

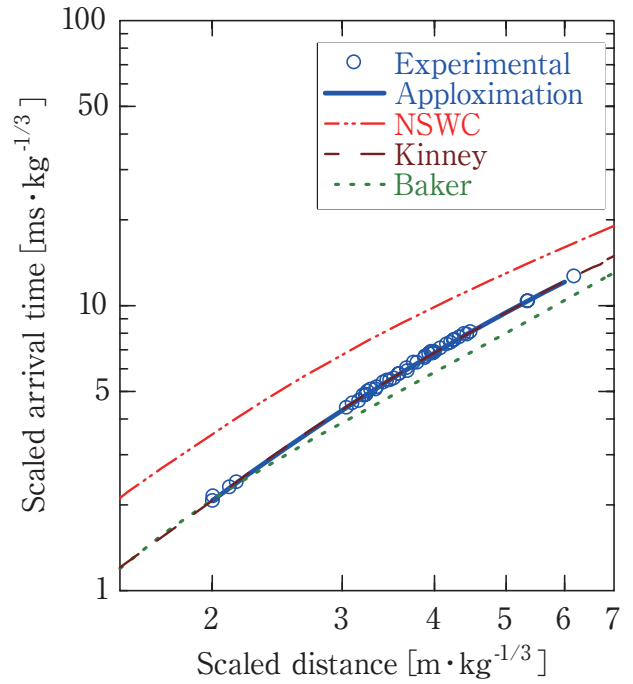


Fig. 7 Comparison of scaled arrival time with the referred TNT standard data.

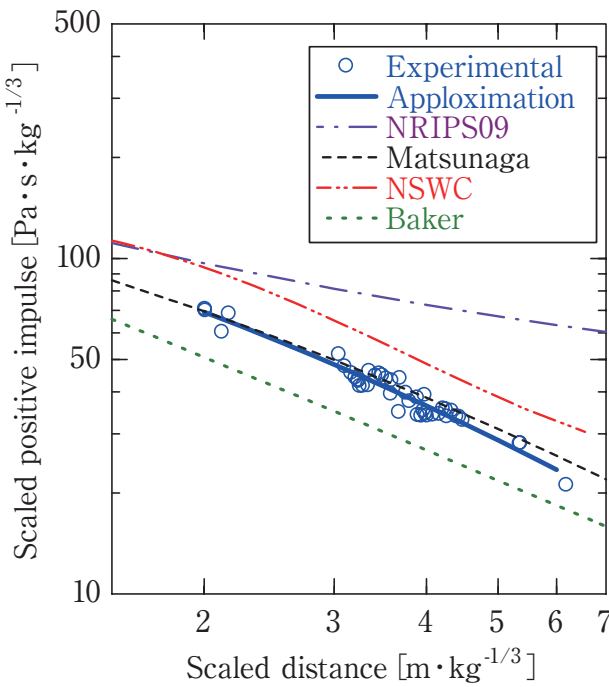


Fig. 6 Comparison of scaled positive impulse with the referred TNT standard data.

て、両対数軸プロット上で多項式近似を行った。プロットへの適合具合から、いずれも 2 次の多項式を採用した。

$$\begin{aligned} \log_{10}(\Delta P) &= 1.0273x^2 - 2.9371x + 2.9595 & (r^2 = 0.9797) \\ \log_{10}(SI) &= -0.3173x^2 - 0.6430x + 2.0628 & (r^2 = 0.9400) \\ \log_{10}(SAT) &= -0.6406x^2 - 2.3001x + 0.3186 & (r^2 = 0.9993) \\ x &= \log_{10}(Z) & (2 < Z < 6) \end{aligned}$$

但し、 ΔP はピーク過圧 [kPa], SI は換算正相インパルス [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1/3}$], SAT は換算到達時間 [$\text{ms} \cdot \text{kg}^{-1/3}$], Z は換算距離 [$\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$], r は各近似式における重相関係数である。また、Fig. 5~7 に算出した近似曲線も示し

た。得られた近似式の妥当性を検討するため、各実験値の近似式から算出される値に対する比を求めた。結果をFig. 8 に示す。ピーク過圧では+19.4%の1点を除き $\pm 11\%$ 、換算正相インパルスでは $\pm 12\%$ 、換算到達時間では $\pm 2.4\%$ の範囲内に分布しており、ピーク過圧及び換算正相インパルスについて本近似式を用いる場合は、この誤差に留意する必要がある。

4. 結言

爆発チャンバー内でTNTを基準爆薬として利用するために、50g及び100gのTNTを起爆させた際の爆風圧を測定することで、小薬量での完爆性を検討した。

ガラス容器の有無による密閉強度の違い、あるいはブースタの有無による起爆圧力の違いによる爆風圧の違いは認められず、また、ピーク過圧及び換算到達時間は大薬量での報告値とほぼ一致したことから、装薬密度約 $800\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ の粉状TNTは50gでも電気雷管起爆で完爆していると考えられた。

ピーク過圧、換算正相インパルス、換算到達時間を計測し、得られた値から、換算薬量 $2 \sim 6 \text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ におけるそれぞれの回帰近似式の算出を行ったところ、2次の多項式近似曲線を得た。

引用文献

- 1) M. Yoshida and Y. Nakayama, EXPLOSION, 17, 2 (2007) (in Japanese).
- 2) Y. Nakayama, D. J. Kim, K. Ishikawa, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and M. Iida, Sci. Tech. Energetic Materials, 69, 123 (2008).
- 3) H. Ichino, T. Ohno, K. Hasue, and S. Date, Sci. Tech. Energetic Materials, 70, 38 (2009) (in Japanese).
- 4) H. Ichino, T. Ohno, K. Hasue, and S. Date, Sci. Tech. Energetic Materials, 71, 51 (2010) (in Japanese).

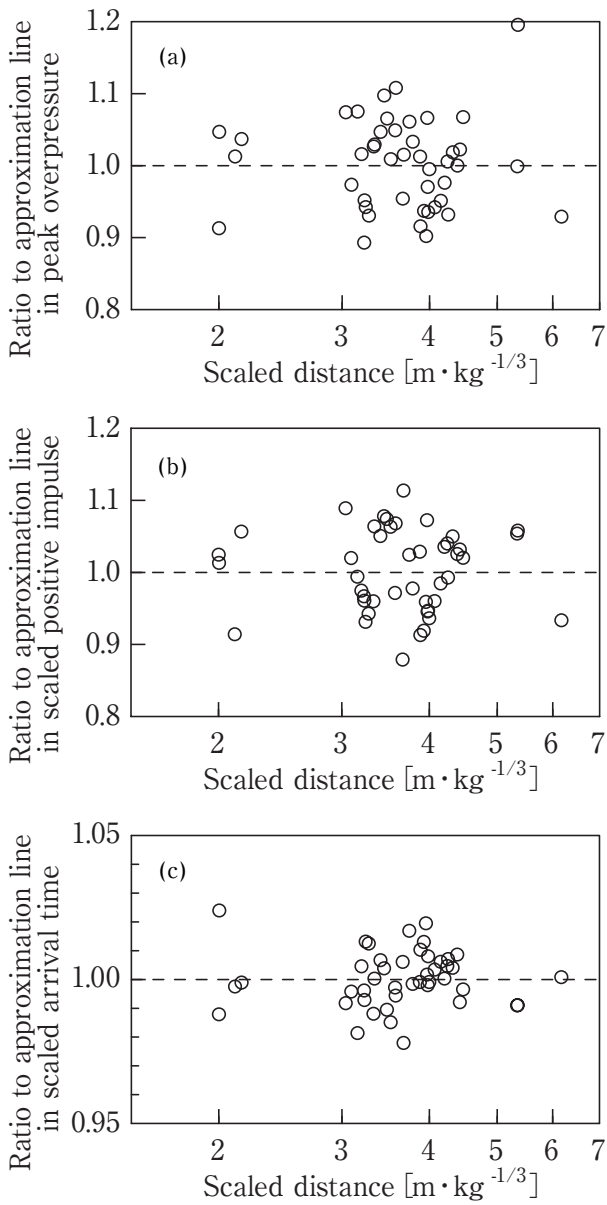


Fig. 8 Ratio of experimental data to approximation line.
 (a) Peak overpressure.
 (b) Scaled impulse of positive phase.
 (c) Scaled arrival time.

- 5) T. Homae, T. Saburi, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, *Sci. Tech. Energetic Materials*, 70, 76 (2009).
- 6) T. Matsunaga, T. Aochi, K. Tanaami, M. Iida, K. Miyamoto, A. Miyake, and T. Ogawa, *Kayaku Gakkaishi (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 61, 134 (2000) (in Japanese).
- 7) M. Kudo, T. Yamada, and M. Kazama, *Jpn. J. Sci. Tech. Iden.*, 8, 49 (2003) (in Japanese).
- 8) J. Nakamura, *Research on Disasters*, 33, 231 (2002).
- 9) S. A. Formby and R. K. Wharton, *J. Hazard. Mater.*, 50, 183 (1996).
- 10) R. K. Wharton, S. A. Formby, and R. Merrifield, *J. Hazard. Mater.*, 79, 31 (2000).
- 11) A. M. Monsfield, M. Marshall, C. L. Walker, and P. Hubbard, *J. Forensic Sci.*, 46, 535 (2001).
- 12) L. V. De Young and G. Campanella, *J. Hazard. Mater.*, 21, 125 (1989).
- 13) F. Volk, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 21, 155 (1996).
- 14) P. G. Sachs, BRL Report No.466 (1944).
- 15) W. E. Baker, "Explosion in Air", pp.150-163, University of Texas, Austin (1973).
- 16) G. F. Kinney, "Explosive Shocks in Air", p.188, The Macmillan Company, NY (1962).
- 17) M. M. Swisdak, Jr., "Explosion Effects and Properties Part I - Explosion Effects in Air", P.36, NSWC/WOL/TR75-116 (1975).
- 18) C. N. Kingery and B. F. Pannill, "Peak Overpressure vs Scaled Distance for TNT Surface Bursts (Hemispherical Charges)", BRL Memorandum Report No.1518 (1964).
- 19) Y. Nakayama, M. Yoshida, Y. Kakudate, M. Iida, N. Ishikawa, K. Kato, H. Sakai, S. Usuba, K. Aoki, N. Kuwabara, K. Tanaka, K. Tanaka, and S. Fujiwara, *Kogyo Kayaku (Sci. Tech. Energetic Materials)*, 50, 88 (1989) (in Japanese).
- 20) H. Arai and R. I. Hiyoshi, *Sci. Tech. Energetic Materials*, 72, 1 (2011) (in Japanese).

Blast pressure measurement of small charged powder TNT in a closed explosion chamber

Hiroyuki Arai^{*†}, Reiko I. Hiyoshi^{*}, and Jun Nakamura^{*}

Under experiments in a closed explosion chamber, the mass of charge is restricted to a small amount. In order to utilize TNT as a standard explosive in the chamber, the detonation of small amount of TNT was evaluated by measurement of blast pressure. Since the confinement and initiation pressure had no effect on the blast pressure and the experimental values of the peak overpressure and the scaled arrival time were in good agreement with the reference, it was recognized that 50 g of powder TNT (the charge density : ca. $800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) detonated completely. The second order regression approximation lines of the peak overpressure, the scaled impulse of positive phase, and the scaled arrival time were derived as the TNT standard equations of the blast parameters in the chamber.

Keywords : blast wave, peak overpressure, scaled impulse of positive phase, scaled arrival time, TNT

*National Research Institute of Police Science (NRIPS),
6-3-1 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-0882, JAPAN
TEL : +81-4-7135-8001

† Corresponding address : arai@nrrips.go.jp