

TNT及び産業用爆薬の地上爆発による爆風圧計測

新井裕之*†, 日吉玲子*

*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 FAX: 04-7133-9169

†Corresponding address: arai@nrips.go.jp

2010年3月12日受付 2011年1月7日受理

要旨

火薬類やエネルギー物質の関わる爆発事件や爆発事故では、地表面だけでなく地上から有限の高さで爆発することも多く、その際に発生する爆風挙動の詳細を把握することは爆発影響の評価をする上で重要となる。本報告では、地上高0.6mで0.8~50kg(爆薬中心の換算高さ0.22~0.70m \cdot kg $^{-1/3}$)のTNTが爆発した際のピーク過圧及び換算正相インパルスを計測し、得られた結果から換算距離に対する3次回帰近似式を得た。また、爆薬には立方体の容器を用いたが、容器形状の影響は今回の測定条件下での爆風圧に関しては見られなかった。更に、産業用爆薬のうち、エマルジョン爆薬では薬量効果が認められなかったが、硝安油剤爆薬では薬量効果が現れ、特に換算正相インパルスで顕著となった。

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ものであり、そのため従来より多数の研究が為されてきた。TNTを基準爆薬として多くの爆風パラメータが発表されており、スケール則に基づくピーク圧及び換算正相インパルスについて、空中爆発時はBakerやNSWCが、地表面爆発はKingeryやMITI87が知られている¹⁾。また最近では火薬庫から放出される爆風圧の計測²⁾⁻⁴⁾や砂や防爆壁、生分解性緩衝材による爆風圧の軽減効果⁵⁾⁻⁷⁾など、実際の事故を想定した爆風挙動に関する報告もなされており、模擬した状況での爆風圧を詳細に解析することで、より現実に即した爆発威力の評価や被害の予測が可能となる。

爆発物を用いたテロ事件や工場等におけるエネルギー物質の爆発事故を考えた場合、地表面で爆発するだけでなく、MITI87⁸⁾での設定のように地上から有限の高さで爆発することも多いことから、そのような状況で爆発した際に発生する爆風挙動を把握し、空中爆発あるいは地表面爆発での爆風パラメータとの差異を把握することは重要であると考えられる。本報告では実際に起こり得る事件・事故に応用することを目的とし、地上高0.6mでTNTが爆発した際の爆風パラメータを野外実験より求めた。また、同条件下での産業用爆薬のTNT換算率を求め、産業用爆薬のスケール効果を確認した。

2. 実験方法

実験はいずれも、屋外の比較的なだらかで植物の生えていない土表面を持つ実験場で行った。

基準爆薬に粉状TNT(中国化薬製、装填密度800kg \cdot

m $^{-3}$ 、爆速4.5km \cdot s $^{-1}$)を用い、さらに産業用爆薬としてエマルジョン爆薬(中国化薬製、装填密度1100kg \cdot m $^{-3}$ 、爆速3.6km \cdot s $^{-1}$)及び硝安油剤爆薬(中国化薬製、装填密度850kg \cdot m $^{-3}$ 、薬量12.5kg使用時の爆速2.0km \cdot s $^{-1}$ 、以下ANFOと略記)を使用した。爆速は本実験条件下でのイオンギャップ法による実測値を示した。薬量は、TNTは0.80~50.0kg、エマルジョン爆薬は0.80~6.3kg、ANFOは0.80~12.5kgを用いた。容器は段ボール製の立方体とし、木製台を用いて底面が地上から0.60mの高さになるように設置した。起爆には瞬発電気雷管を1本、さらにTNTの場合はペントライト16g(中国化薬製、装填密度1610kg \cdot m $^{-3}$)、ANFOの場合はエマルジョン爆薬25g(中国化薬製、装填密度1100kg \cdot m $^{-3}$)をブースタとして用い、立方体容器の上面中心で起爆した。ブースタを除いた爆薬中心の地表面からの換算高さはTNTでは0.22~0.70m \cdot kg $^{-1/3}$ 、エマルジョン爆薬では0.36~0.69m \cdot kg $^{-1/3}$ 、ANFOでは0.31~0.69m \cdot kg $^{-1/3}$ となった。用いた爆薬の諸元をTable 1に示す。

各実験での爆風圧を、容器底面中心から6, 8, 12, 20m離れた地点に地上から0.6mの高さで設置したICP空中爆風圧センサ(PCB Piezotronics社製137A23あるいは137A22)で計測した。爆薬量が25.0kg以下の場合にはさらに4mの地点に、また6.3kg以下の場合にはさらに30mの位置にもセンサを設置した。このうち、爆薬から8m以下の地点では立方体容器の側面に垂直な方向(以降、0°方向と記す)、容器の上面からみて起爆中心から対角線への方向(以降、45°方向と記す)、さらに0°方向となる容器側面の隣接する側面に垂直な方向(以降、90°方向と記す)に各1本、さらに12m以遠では0°方向に1本、セ

Table 1 Specification of test explosives and position of sensors.

Explosives	Mass of charge (kg)	Height edge length of charge (m)	Density of charge (kg m^{-3})	Booster	Scaled height of center of charge ($\text{m kg}^{-1/3}$)	Distance of blast wave sensors to charge (m)
TNT	0.80	0.10	800	Pentolite 16g	0.70	4, 6, 8, 12, 20, 30
	1.5	0.12			0.57	
	6.3	0.18			0.37	
	12.5	0.25			0.31	4, 6, 8, 12, 20
	25.0	0.31			0.26	
	50.0	0.40			0.22	
Emulsion explosive	0.80	0.076	1100	None	0.69	4, 6, 8, 12, 20, 30
	1.5	0.085			0.56	
	6.3	0.14			0.36	
ANFO	0.80	0.092	850	Emulsion 25g	0.69	4, 6, 8, 12, 20, 30
	1.5	0.12			0.57	
	6.3	0.18			0.37	
	12.5	0.24			0.31	

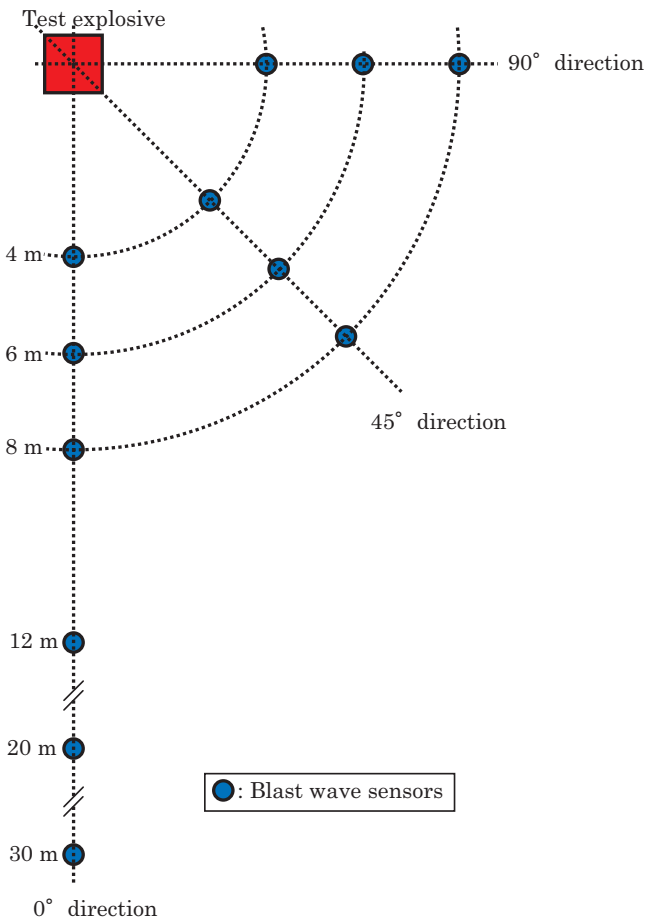


Fig. 1 Schematic layout of blast wave sensors setup used in the field test.

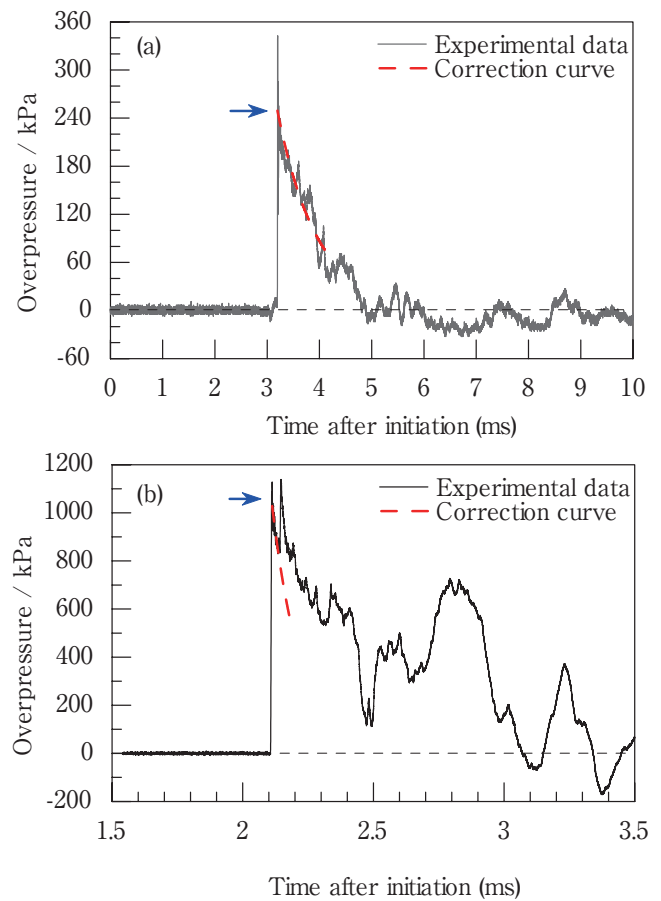


Fig. 2 Examples of convert data conformed to scale law. Peak overpressure was determined by correction curve with exponential function, and the correction value was shown with allows.
 (a) Explosive ; TNT 6.3 kg.
 Sensor position ; 4 m from charge at 0° direction.
 (b) Explosive ; TNT 25.0 kg.
 Sensor position ; 4 m from charge at 90° direction.

ンサを設置した。センサ設置図及び設置方向をFig. 1に示す。ただし、0°方向と90°方向は同じ0°方向としてデータをまとめた。センサを設置した地点の換算距離は、最小値が $1.35 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ (25.0kg起爆時に4m位置)、最大値が $31.6 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ (0.8kg起爆時に30m位置)であった。

得られた信号はSachsのスケール則⁹⁾により松永ら¹⁰⁾が整理した条件と同条件である海拔0m, 101.325kPa, 288.15Kにおける値に換算し、ピーク過圧と換算正圧インパルスを求めた。本報告では、ピーク過圧に関しては、ピーク直後は指数的に減衰するとみなして指数関数で近似し圧力の立ち上がりとの交点を求め、その値(補正值と称す)をピーク過圧とした。一方、換算正圧インパルスに関しては圧力減衰部分を関数で近似せず、仮に反射波等による二次ピークが減衰直後にあってもそれも含めて正圧部分を積分し、換算正圧インパルスとした。なお、ブースタ薬量は全薬量に対し最大でも3%であるため、主爆薬に含め合

計薬量で整理した。

3. 結果

計測例をFig. 2に示す。ピーク過圧の指数関数による補正值は、補正前の値に対し-31.7% (補正值が補正前の生データより低い) ~ +10.1%, 7割以上のデータが $\pm 10\%$ の範囲であったが、いくつかのデータではFig. 2 (a)で示すように、ピークの立ち上がり時が $10 \mu\text{s}$ 以下の周期のスパイク状のデータが得られ、このようなデータでは補正が-20%を越えることとなった。例えば、Fig. 2 (a)では補正值は生データの値に対し27.1%低くなった。以降、ピーク過圧に関しては補正值を用いて検討を行った。

TNTを起爆した際の換算距離に対するピーク過圧及び換算正相インパルスの測定結果をFig. 3に、エマルジョン爆薬の結果をFig. 4に、ANFOの結果をFig. 5に示す。

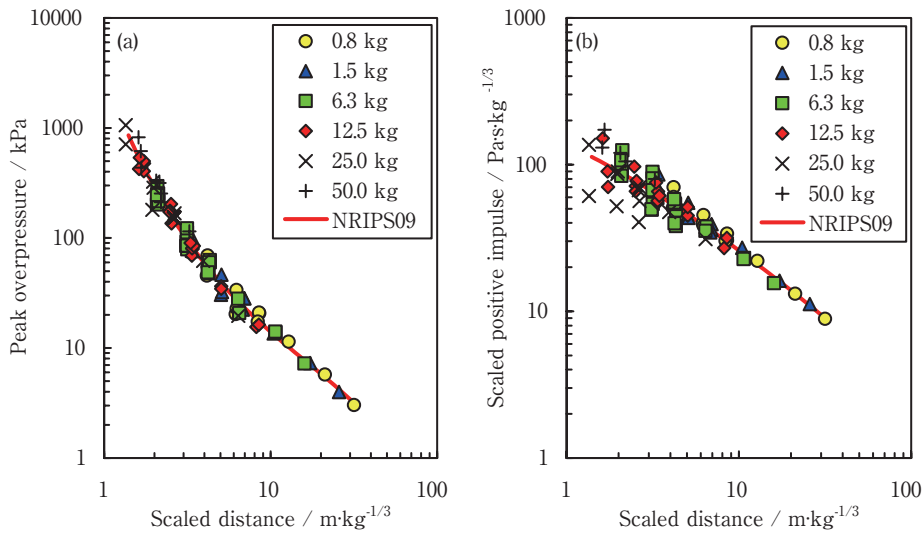


Fig. 3 Experimental results of blast waves of TNT. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase. NRIPS09: third order regression approximation line.

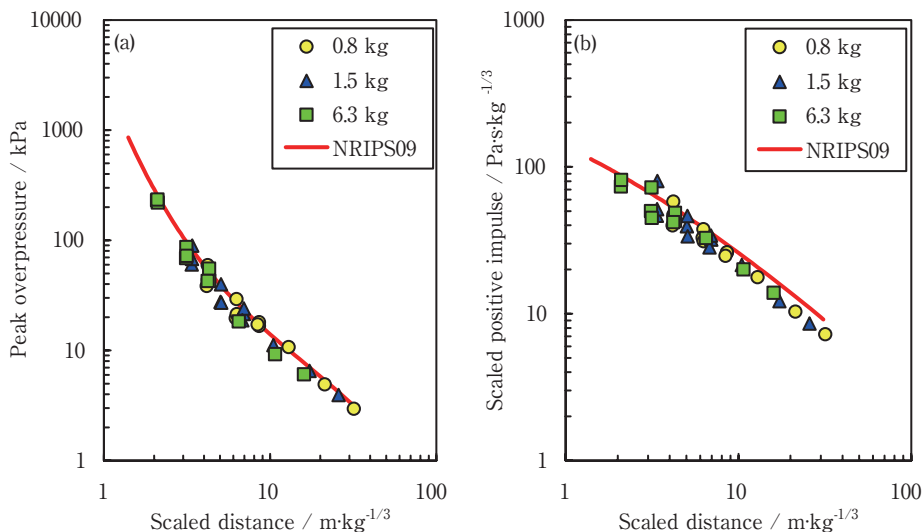


Fig. 4 Experimental results of blast waves of emulsion explosive. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase. NRIPS09: third order regression approximation line of TNT results.

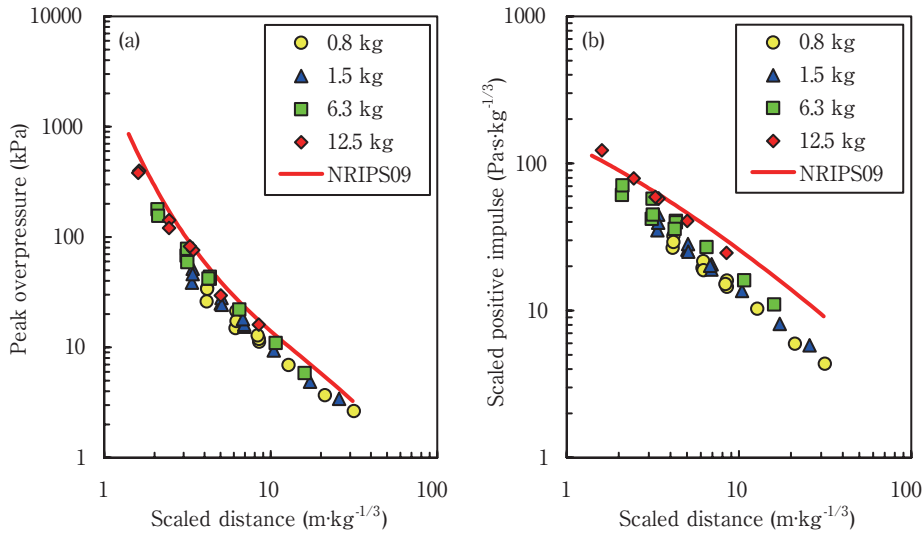


Fig. 5 Experimental results of blast waves of ANFO explosive. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase. NRIPS09 : third order regression approximation line of TNT results.

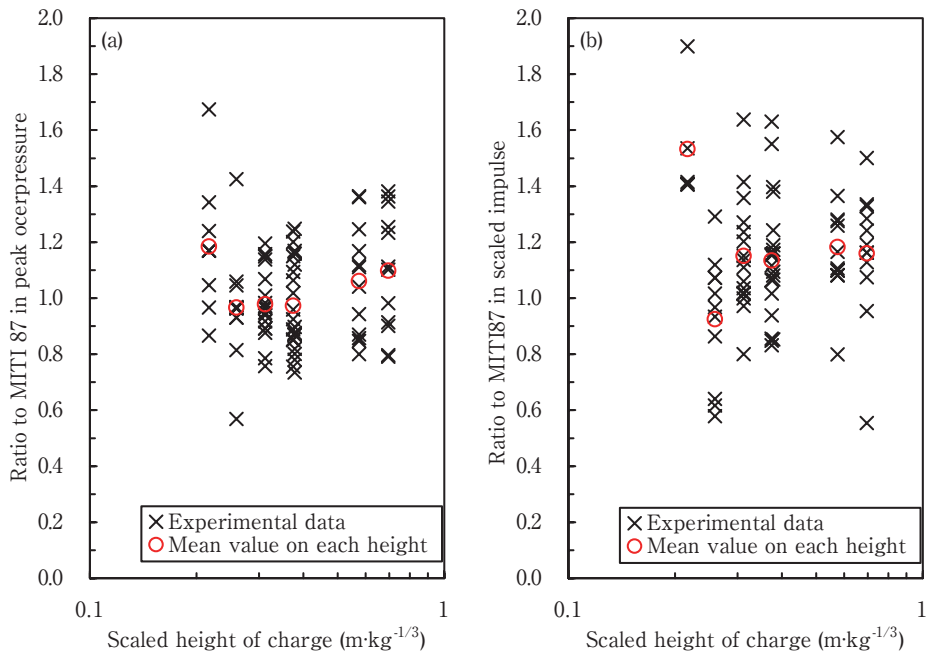


Fig. 6 Influence of scaled height of charge on the ratio of TNT data to MITI87. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase.

4. 考察

4.1 爆薬の換算高さの影響

スケール則に基づけば、爆薬の重量と地表面からの高さから求められる換算高さは重要なパラメータとなる。本実験では爆薬の設置位置が薬量に寄らず0.6mと固定したため、爆薬中心の換算高さがTNTを用いた実験では0.22~0.70m・kg^{-1/3}と薬量により異なる値をとっており、すなわち、薬量が多くなるにつれ換算高さが低くなるため、薬量が多くなるほど地表面の影響をより大きく受けることになる。そこで、TNTのデータにおいて、爆薬中心の換算高さが0.16m・kg^{-1/3}で統一されているMITI87との値と比較し、換算高さの影響を検討した。TNTの各データそれぞれの、同じ換算距離でのMITI87との値の比をFig.6に示す。ピーク過圧に関しては、測定点中2点を除く点

でのMITI87との比が1.09±0.37の範囲に入っており、各換算距離での平均値は0.97~1.18の間でほぼ一定となった。一方、換算正相インパルスに関しては、測定点中1点を除く点でのMITI87との比は1.10±0.54の範囲となり、換算距離0.16m・kg^{-1/3}(薬量50.0kg)と0.21m・kg^{-1/3}(薬量25.0kg)では若干外れるもののそれ以外の各換算距離での比の平均値は1.13~1.18と一定となり、いずれも、換算高さによる傾向は得られなかった。このことから、本実験条件内に限れば、換算高さの影響は少ないと考えられたため、換算高さに関しては考慮せず以降整理した。

4.2 TNT換算曲線の算出

Fig.3で示したTNTによるピーク過圧及び換算正相イ

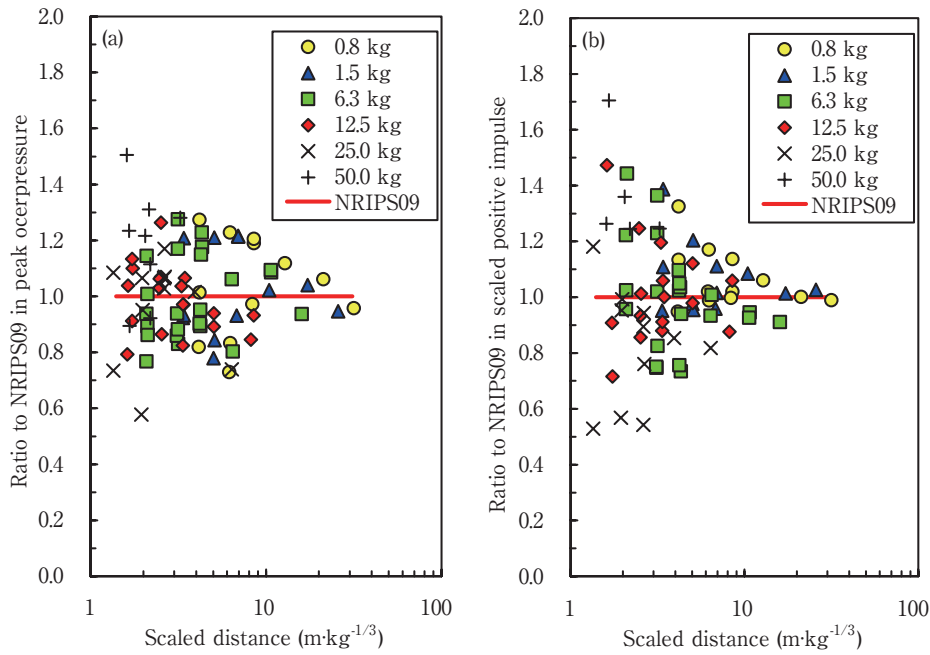


Fig. 7 Ratio of experimental data of TNT to approximation line NRIPS09. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase.

ンパルスの換算距離に対する両対数軸プロット上で 3 次回帰近似を行ったところ、以下の式が得られた。

$$\log_{10}(\Delta P) = -0.6208x^3 + 2.2357x^2 - 3.9304x + 3.4622 \quad (r^2 = 0.9837)$$

$$\log_{10}(I) = 0.0195x^3 - 0.1812x^2 - 0.5627x + 2.1389 \quad (r^2 = 0.8736)$$

$$x = \log_{10}(Z) \quad (1.4 < Z < 31)$$

但し、 ΔP はピーク過圧 (kPa)、 I は換算正相インパルス ($\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)、 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。ここで得られたTNTの換算高さ 0.16~0.64 $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ での近似式を、以下NRIPS 09と称す。また、Fig. 3~Fig. 5にNRIPS 09も示した。

TNTによる実験値のばらつきを検討するため、各実験値のNRIPS 09から得られる値に対する比をFig. 7に示す。ピーク過圧では換算距離が 2 $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 未満の2点を除いて73~131%の範囲内に分布しているのに対し、換算正相インパルスでは換算距離が小さくなるに従ってばらつきが大きくなる傾向が顕著に得られた。25.0kgのTNTを起爆した際に、爆薬より4m離れた地点での爆風圧の先頭到達時間は起爆後2.11ms、その後大気圧に最初に戻る時間は起爆後3.07msであった (Fig. 2(b))が、Fig. 8に示すように爆発により生成したファイヤーボールは起爆後2.62msの時点で既に半径4m以上になっていた。Fig. 2(b)で示した爆風圧の出力では2.45msあたりで急激に圧力が下がる信号が得られており、この時点で熱の影響を受け、さらに、2.7ms以降、なだらかに上昇している信号が得られており、ファイヤーボールの中に入って以降は、正確に圧力を出力していない可能性があると考えられた。換算距離の小さい地点での計測データはばらつきの一因に、薬量が多い場合、換算距離の短い地点では爆風到達後直ぐにセンサがファイヤーボールの中に入ってしまい、そのため計測中にセンサが過熱された影響があると考えら

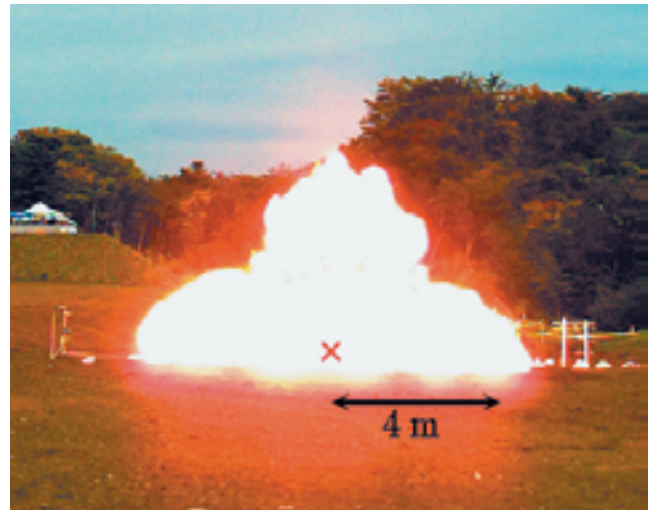


Fig. 8 High speed photograph of 25 kg of TNT explosion at 2.62 ms after initiation. X: initiation point. Exposure time: 50 μs

れる。

得られた近似式を、Baker¹¹⁾、Kingery (ピーク過圧のみ)¹²⁾、MITI 87による爆風パラメータと比較したものをFig. 9に示す。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KHT 2003による計算結果の 4118 $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ を用いた。また、Bakerは空中爆発のパラメータであるため、地表を剛体として仮定すれば地表面爆発はその2倍薬量の空中爆発に相当するため¹⁾、2倍薬量を用いて地表面爆発に換算したもの(2W)もFig. 9に示した。ピーク過圧は地表面爆発のデータであるBaker (2W)、Kingery、MITI 87に近い値をとった。一方、換算正相インパルスでは他のデータより全体に高い傾向となった。これは、地表面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ものと考えられる。すなわち、実際の爆弾事件や爆発事故において、従来の方法

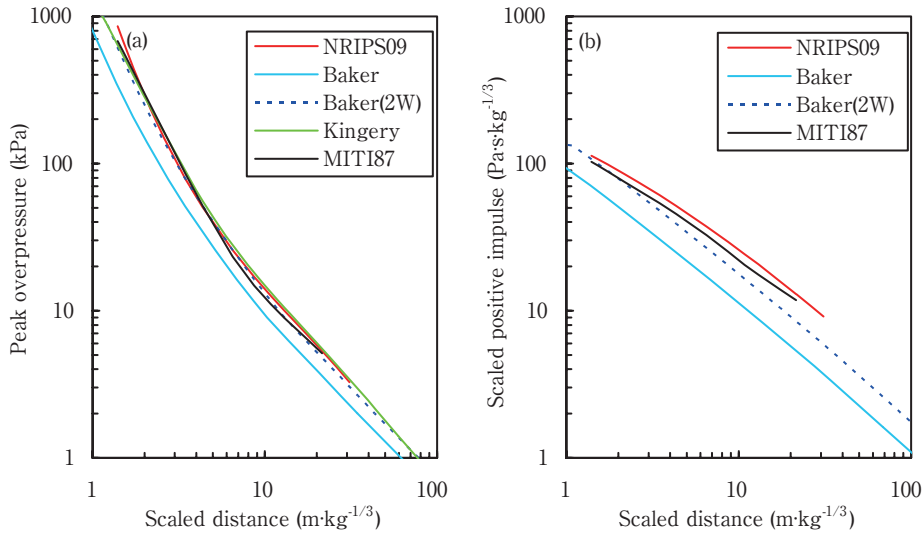


Fig. 9 Comparison of blast wave parameters by NRIPS09, Baker, Kingery, and MITI87. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase. 2W : double weight used for simulation as surface explosion.

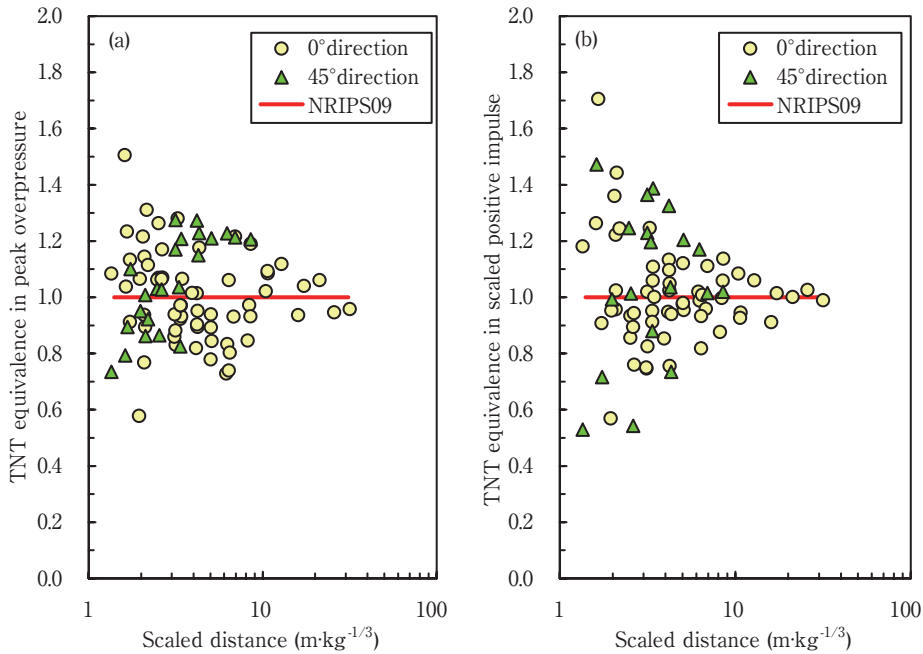


Fig.10 Influence of the shape of the explosive case on blast waves in TNT experiments. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase. NRIPS 09 : third order regression approximation line of all results.

で予想される値よりも大きなインパルスが生じる可能性があることを示している。

4.3 爆風圧に対する爆薬形状の影響

爆風圧計測に関する従来の報告では方向性による影響を避けるため、爆薬形状を球状^{5), 12)}や円筒形^{3), 4), 6), 8)}とすることが多い。しかし、実際の爆弾事件では円筒形でない爆発物が用いられることも少なくないと考えられることから、本報告では爆薬形状を立方体にし、その0°方向へ伝播する爆風と45°方向への爆風とを比較することで、爆風圧の方向性への影響を検討した。

TNTを用いた際のピーク過圧及び換算正相インパルスの、それぞれに方向毎にまとめたものをFig. 10に示す。ピーク過圧及び換算正相インパルスのNRIPS 09に対する

0°方向の平均は1.00, 1.01に対し、45°方向の平均は1.05, 1.06となり、平均した数値と比較すると僅かに45°方向が大きい。Fig. 10のプロット及び各データ間のばらつきから考えると有意差はなく、爆薬形状による影響は本実験条件下での爆風圧パラメータに対しては見られなかった。

4.4 エマルション爆薬及びANFOの薬量効果

硝酸アンモニウムを主とする爆薬はスケール効果をはじめとする非理想爆ごう性を呈しやすいことが知られている。そこで、エマルション爆薬による実験結果のTNT比をFig. 11に、ANFOをFig. 12に示す。また、それぞれの薬量でのTNT比の平均値をTable 2に示す。エマルション爆薬ではいずれの薬量でもピーク過圧、換算正相インパ

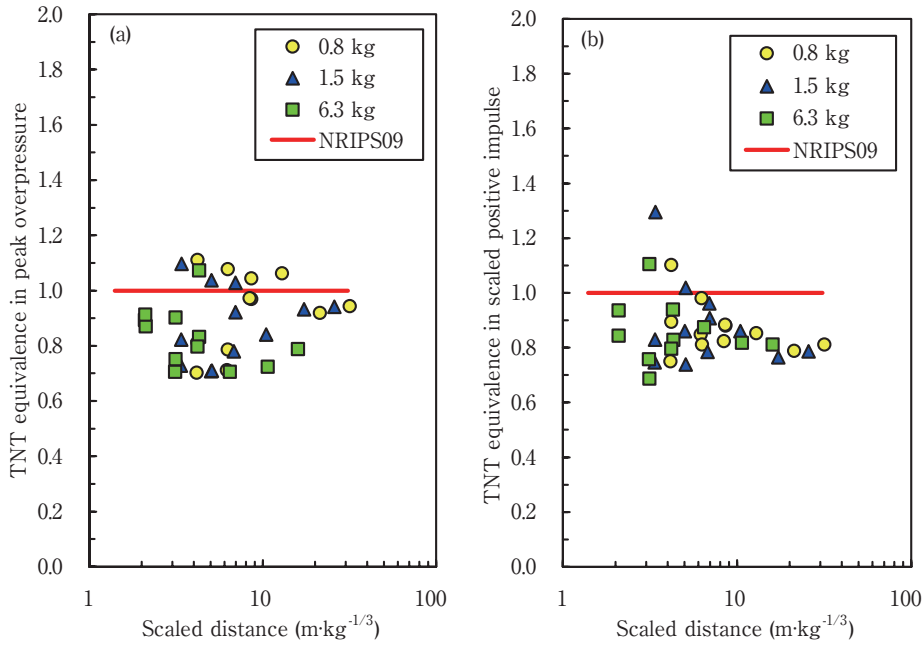


Fig.11 Scale effect on TNT equivalence of emulsion explosive. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase.

Table 2 TNT equivalence of emulsion explosive and ANFO in blast wave parameters.

Mass of charge /kg	Emulsion explosive		ANFO	
	Peak overpressure	Scaled impulse of positive phase	Peak overpressure	Scaled impulse of positive phase
0.8	0.93	0.87	0.66	0.52
1.5	0.88	0.88	0.66	0.58
6.3	0.83	0.85	0.76	0.73
12.5	N/A	N/A	0.81	0.96

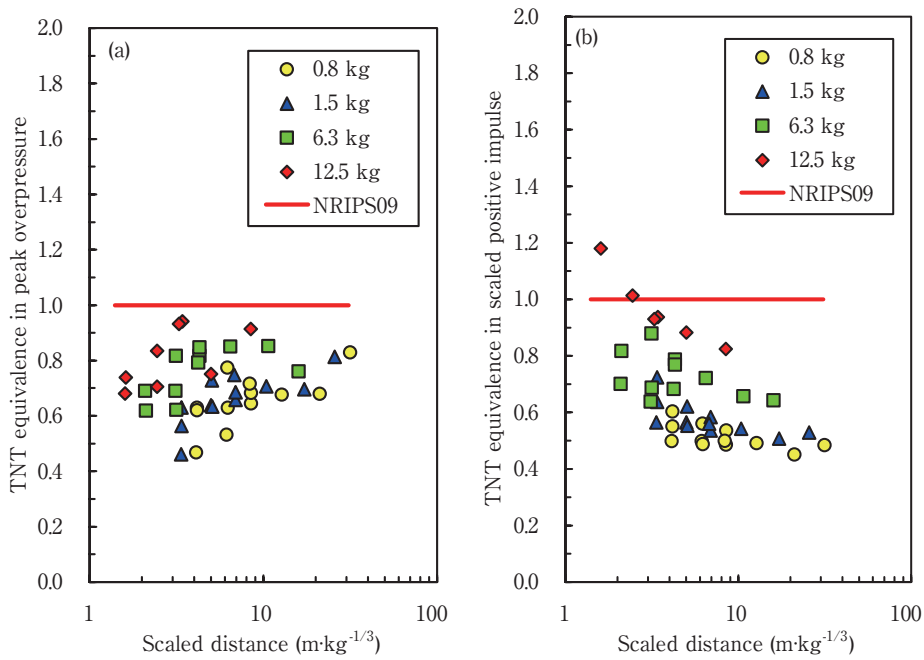


Fig.12 Scale effect on TNT equivalence of ANFO. (a) Peak overpressure. (b) Scaled impulse of positive phase.

ルスともほぼ同じ値を取り、今回実験した薬量の範囲では薬量効果が現れなかったが、ANFOでは薬量が多くなるにつれTNT比が大きくなり、その傾向は換算正相インパルスで顕著であった。すなわち、ANFOは今回計測した薬量の範囲でも非理想爆ごうを呈していることが判った。

5. 結論

実際に起こり得る爆弾事件や爆発事故時に周囲に伝播する爆風を評価するため、地上高0.6mで0.8~50.0kg(爆薬中心の換算高さ0.22~0.70m \cdot kg $^{-1/3}$)の立方体のTNTが爆発した際のピーク過圧及び換算正相インパルスを計測し、得られた値から換算距離1.4~31m \cdot kg $^{-1/3}$ に対する3次回帰近似式を得た。このうち、ピーク過圧の近似式は過去に報告のあった地表面爆発のデータと近いものとなったが、換算正相インパルスの近似式は過去のデータより高い値となった。本報告では立方体の容器を用いたが、形状の影響は爆風圧に関しては見られなかった。産業用爆薬のうち、エマルジョン爆薬では薬量効果は認められなかったが、ANFOでは12.5kgでも薬量効果が現れ、その影響は特に換算正相インパルスで顕著となった。

6. 謝辞

実験の実施にあたり警察庁、警視庁をはじめとする警察関係各位の支援を得た。また、実験実施及びデータ解析手法に関し独立行政法人産業技術総合研究所爆発安全研究コアの協力、助言を得た。データ換算作業については宮尾茂氏の協力を得た。ご支援ご協力に対し、ここに謝意を表します。

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).
- 5) T. Homae, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, Sci. Tech. Energetic Materials, 68, 90 (2007).
- 6) T. Homae, T. Matsumura, K. Wakabayashi, and Y. Nakayama, Sci. Tech. Energetic Materials, 69, 92 (2008).
- 7) T. Homae, T. Saburi, K. Wakabayashi, T. Matsumura, and Y. Nakayama, Sci. Tech. Energetic Materials, 70, 76 (2009).
- 8) 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).
- 9) P. G. Sachs, BRL Report No.466 (1944).
- 10) 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).
- 11) W. E. Baker, "Explosion in Air", University of Texas, Austin (1973).
- 12) C. N. Kingery and B. F. Pannill, BRL Memorandum Report No.1518 (1964).

Blast pressure measurement of TNT and commercial explosives above the ground

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

It is important to evaluate the blast wave parameters when the explosives or energetic materials explode above the ground in order to estimate the explosion effect in actual cases. In this paper, the peak overpressure and scaled impulse of positive phase, as the blast wave parameters, were measured when 0.8 to 50 kg of TNT exploded at 0.6 m height above the ground, and third order regression approximation lines were derived from these results. Each explosive was loaded in a cubic case in this paper, but there was no influence of the shape of the case on the blast wave parameters. The scale effect was not observed on emulsion explosive, but ANFO exhibited the scale effect, especially on the scaled impulse of positive phase.

Keywords : blast wave, peak overpressure, scaled impulse of positive phase, scale effect

^{*}National Research Institute of Police Science (NRIPS), 6-3-1 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-0882, JAPAN
TEL +81-4-7135-8001 FAX +81-4-7133-9169

[†]Corresponding address : arai@nrrips.go.jp