

雷薬の爆風圧

飯田光明*, 中山良男*, 松永猛裕*, 田中克己*
吉田正典*, 角館洋三*, 薄葉 州*, 藤原修三*

煙火原料用火薬類の一種である雷薬の1kgから50kgを空中あるいは地表面上で爆発させ、その爆風圧をビエソ圧力素子及び鉛板ブラストメータにより換算距離1~15m/kg^{1/3}の範囲で測定した。雷薬の組成は、過塩素酸カリウム70wt%, アルミニウム粉15wt%, チタン粉15wt%である。爆風測定の結果、ピーク圧基準のTNT換算率は平均52%, 標準誤差8%であったが、換算距離が遠くなるほどTNT換算率は増大することがわかった。

1. はじめに

雷薬は、発音薬とも呼ばれ、信号雷等に使用される煙火原料用火薬類の一種である。主要成分は過塩素酸カリウムとアルミニウム粉で、チタン粉を配合したものの、および少量のイオウを配合したものの等が代表的な組成として知られている。

雷薬は、火花、着火、落つい、摩擦感度ともに高く、点火するだけで容易に爆燃あるいは爆轟する。このため、雷薬は煙火原料用火薬類の中でも最も危険度が高くしかも爆発威力の大きいものとされており、製造または消費中の事故例も多い。しかし、雷薬の爆風圧特性、特にTNT換算率についての研究は少なく、不明な点が多い^{1)~5)}。

本報告では、雷薬のTNT換算率を求めめるため、大量の雷薬(~50kg)を爆発させた時の爆風圧をビ

エソ圧力素子及び鉛板ブラストメータを用いて測定した。TNT換算率を知ることは、爆風被害の程度の手測、保安距離等の設定において重要であると考えられる。

2. 実験方法

使用した雷薬の組成は、過塩素酸カリウム70wt%, アルミニウム粉15wt%, チタン粉15wt%である。Table 1に、ショット番号、雷薬の装薬量、装薬方法、使用した点火玉の数を示す。ショット番号1, 2の場合は、布テープで補強したプラスチックボトルに雷薬を装填し、化学技術研究所内の爆発室内で空中に吊り下げて起爆した。ショット番号3, 4の場合は、雷薬各5kgを入れた紙袋6個または10個を、地表面上に設置した装薬台上のファイバードラム中に積み上げて爆源とした。

Table 1 Experimental conditions

Shot No.	Explosive	Weight (kg)	Electric squib	HOB**) (m/kg ^{1/3})	Atmospheric pressure (mbar)	Confinement
1	'Raiyaku'*)	1	3	(in air)	1022	plastic bottle
2	'Raiyaku'	1	3	(in air)	1008	plastic bottle
3	'Raiyaku'	30	5	0.19	931	paper bag & fibreboard drum
4	'Raiyaku'	50	5	0.20	931	paper bag & fibreboard drum

*) A mixture of 70wt% potassium perchlorate, 15wt% aluminum powder and 15wt% titanium powder

** Scaled height of burst from the ground surface

1991年2月6日受理

*化学技術研究所

〒305 つくば市東 1-1

TEL 0298-54-4793

点火は、装薬量の0.1%の雷薬中に点火玉を束ねて入れ、これを紙で包んだものを雷薬中央に挿入して、通電着火させた。

爆風圧の計測はビエソ圧力素子、鉛板ブラストメー

Table 2 Peak Overpressure measured by lead-plate blastmeter

Shot. No.	Distance (m)	Scaled distance (m/kg ^{1/3})	Depth of dent (mm)	Peak Overpressure (bar)
3	9.87	3.176	6.21	0.545
	12.02	3.868	4.66	0.388
	14.96	4.815	3.47	0.278
	17.98	5.787	2.71	0.207
	23.07	7.425	2.07	0.147
4	12.02	3.263	6.74	0.603
	14.96	4.061	4.30	0.354
	17.98	4.881	3.67	0.296
	23.07	6.262	2.49	0.186
	27.95	7.587	1.94	0.136

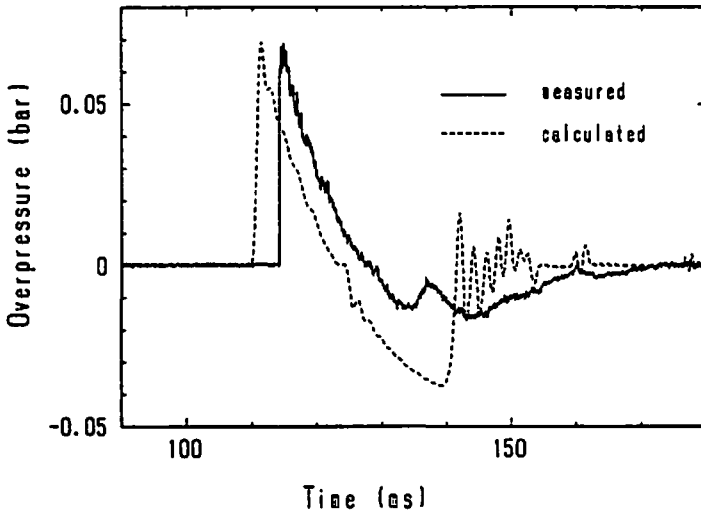


Fig. 1 Measured and calculated(KHT-OBUQ)blast waves for surface burst of 'Raiyaku' 30kg at distance 45m.

タを用いて行った。

鉛板ブラストメータは、換算距離で約3, 4, 5, 6, 7.5 m/kg^{1/3}の位置に打ち込んだ杭の平坦面に、爆源方向に正対させて各4個を設置した。ブラストメータ4個の取り付け位置の地表面からの高さは、上から約134, 122, 111, 100cmであった。使用した鉛板の厚さは0.5mmである。

ピエゾ圧力素子は、PCB101A及びPCB102A12を用い、換算距離で約1~15 m/kg^{1/3}の範囲で爆風圧を測定した。ショット番号3, 4の場合、近距離では地上高30cm, 遠方では地上高1mに設置した。各圧力素子は側圧を測定するように整流板を架台に固定した。圧力素子からの信号は、プリアンプ(PCB480D06)及びバッファアンプを介して波形記憶装置に入力し、A/D

変換したデータはGP-IBバスを通じてコンピュータに転送し保存、解析した。

3. 実験結果

鉛板ブラストメータによる爆風圧測定結果をTable 2に示す。鉛板凹量のピーク静水過圧への換算は工業火薬協会爆発衝撃部会編「鉛板ブラストメータの校正」(1985)によった。Table 2に示した値はそれぞれ4個の平均値であり、測定値のバラツキの範囲は平均値の約7%以内であった。

ピエゾ圧力素子を用いて得られた爆風圧波形の例をFig. 1に示す。また、Fig. 1には一次元ラグランジュ流体力学式に爆発生成ガスの状態式としてKHTを適用した数値解析コードKHT-OBUQ[®]により計算した波形を併記した。測定、記録された波形は、衝撃波

Table 3 Blast characteristics measured by piezoelectric gauge

Shot. No.	Distance (m)	Scaled Distance (m/kg ^{1/3})	Peak Overpressure (bar)	Time of Arrival (ms)	Duration ^{*)} (ms)	Impulse ^{**)} (bar·ms)
1	2.07	2.07	0.967	2.8	1.07	0.428
	3.26	3.26	0.407	5.7	1.88	0.253
2	1.19	1.19	3.56	1.2	0.672	0.993
	2.05	2.05	1.04	2.9	1.01	0.445
	3.22	3.22	0.440	5.6	1.58	0.243
3	7.00	2.25	1.25	13.5	1.46	0.714
	45.20	14.6	0.0642	114.3	13.5	0.369
4	7.00	1.90	2.06	14.3	1.26	1.056
	45.20	12.3	0.0796	112.8	15.4	0.515

*) Duration of positive static overpressure.

**) Impulse of positive static overpressure.

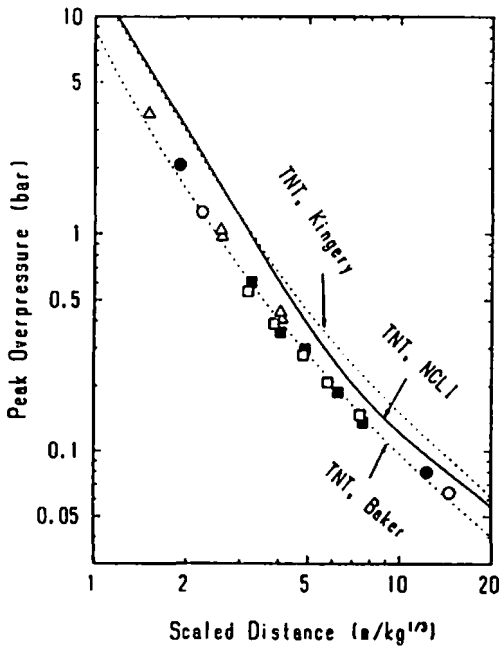


Fig. 2 Measured peak overpressures of blast waves for 'Raiyaku' explosion. Δ ; shot No.1,2 by piezoelectric gauge, \circ ; shot No.3 by piezoelectric gauge, \square ; shot No.3 by blastmeter, \bullet ; shot No.4 by piezoelectric gauge, \blacksquare ; shot No.4 by blastmeter.

の立ち上がり第1節点、第2衝撃波の直前を第10節点とする3次の自然スプライン関数でフィットし、このフィット式からピーク静水過圧、持続時間、正相圧

の時間積分(インパルス)、および到達時間を求めた。これらの結果をTable 3に示す。

また、Fig. 2に鉛板ブラストメータ、ピエゾ圧力素子の両者で得られたピーク静水過圧を換算距離に対してプロットした。ここで、ショット番号1, 2の場合は、空中爆発の場合の測定結果であり、他との比較のために、地表面を完全剛体と仮定し、半分の薬量の地表面爆発と考えてプロットしてある。Fig. 2に併記した曲線は、昭和59~61年度の通商産業省主催「火薬類の保安技術実験」において実施したTNTの爆風圧測定結果をまとめた曲線(NCLI)⁷⁾、Kingeryのデータ(TNTの地上爆発)⁸⁾、およびBakerのデータ(TNTの空中爆発)⁹⁾である。

4. 考察

鉛板ブラストメータの測定結果から、最小自乗法により爆風圧減衰式を求めると次式となった。

$$\Delta P = 3.589 (R/W^{1/3})^{-1.612} \quad (3 < R/W^{1/3} < 9)$$

ここで ΔP はピーク過圧(bar)、 $R/W^{1/3}$ は換算距離(m/kg^{1/3})である。計算に用いたデータ数は39で、相関係数は0.992であった。爆風圧減衰式の減衰指数は-1.61で、同条件で測定したTNT 50kgの場合の減衰指数-1.89に比べると小さい。

ピエゾ圧力素子で得られた爆風圧波形は、TNT等の圧力波形とはほぼ同じであり、雷薬独自の特徴は見いだせない。特に、薬量で換算した持続時間、インパルスは、De Yongら⁵⁾の結果と異なりTNTよりも小さい。ショット番号4の距離45mでの測定値との比較で、同位置、同計測系で測定されたTNT 50kgの測定結果を示せば、ピーク圧、持続時間、インパルスがそれぞれ

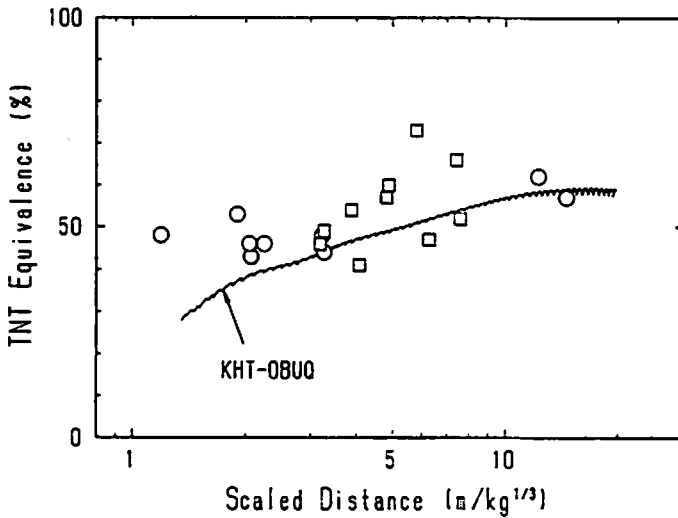


Fig. 3 TNT equivalence of 'Raiyaku' on the basis of peak overpressures. ○; measured by piezoelectric gauge, □; measured by blastmeter, solid line; calculated TNT equivalence by KHT-OBUQ.

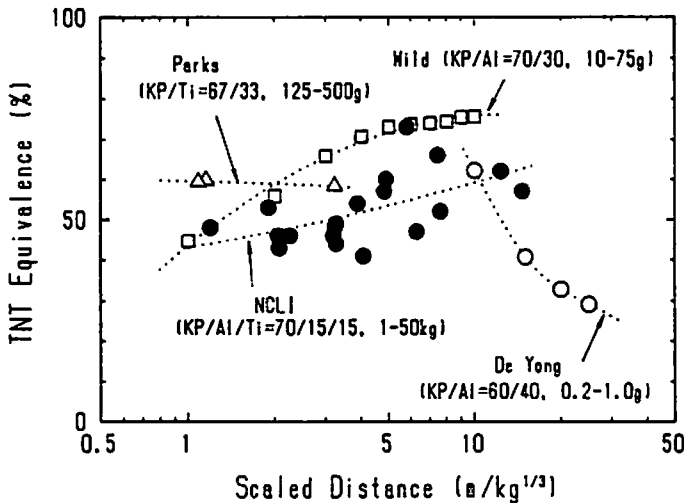


Fig. 4 TNT equivalence of firework mixtures. ●; this work (NCLI), △; Parks (see ref 3), □; Wild(ref 4), ○; De Yong (ref 5) and 'KP'; potassium perchlorate.

れ0.106bar, 17.1ms, 0.774bar·msであった。また、Fig. 1に示したようにKHT-OBUQによる計算結果は到達時間を除いて実験値とよく一致した。雷薬のようにアルミニウムを含有する爆薬は、爆轟波面でアルミニウムが反応に寄与しているかが問題になるが、爆風圧波形はアルミニウムが波面あるいは波面後方で反応しているかにかかわらず、完全に燃焼しているとして計算した場合に実験値とよく一致した。

次に、昭和59~61年度の火薬類保安技術実験におい

てピエゾ圧力素子で測定されたTNTの爆風圧(NCLI)を基準値とし、爆風圧の特性値としてピーク静水過圧を選んでTNT換算率を求めた。その結果を換算距離に対してプロットしたのがFig. 3である。得られたTNT換算率の全体の平均は52.2%、標準誤差(不偏分散の平方根)8.4%であった。

Fig. 3からTNT換算率は換算距離が大きくなるにつれて増大する傾向があるように思われる。回帰線の傾きが0(換算距離がTNT換算率に影響しない)とい

う仮説は95%の信頼率で棄却できる。したがって、雷薬のTNT換算率は換算距離により増加すると考えるのが妥当であろう。KHT-OBUQによる計算でも、この結果を支持する結果が得られている。即ち、KHT-OBUQによりTNT、雷薬他の爆薬の爆風のピーク圧の距離減衰を計算して最小自乗法近似し、これによりTNT換算率を求めるとFig. 3に実線で示したようになる。計算結果は実験値と概略一致している。KHT-OBUQによればTNT等の高性能爆薬のTNT換算率は換算距離によらず一定で、これが増大する傾向を示すのは計算した爆薬の範囲内で雷薬に特有のことである⁶⁾。雷薬は、爆発熱1.83kcal/g(TNTの170%)、爆発温度約7200Kと極めて高いものの、爆轟圧力は10kbar程度と低く、また発生ガス量は2.80mol/kg(TNTの6%)と極めて少ない。これから、雷薬の場合はTNT等の高性能爆薬と比べて、爆源付近での空気のエン트로ピー増加が小さく、空気に与えられるエネルギーが小さいこと、初圧が低いことが影響してスケール則が適用できなくなったために、この傾向が出るものと考えられる。

同じような組成の雷薬についての文献値をFig.4に引用した。Parks³⁾、Wild⁴⁾の結果は我々の結果と同じ傾向を示している。Wildが得たTNT換算率が我々の結果よりも大きいのは、爆発熱が大きい(2.23kcal/g、122%)ためと考えられる。De Yongら⁹⁾の結果は、等距離において薬量を0.2gから1gの範囲で変えて測定したもので、薬量効果のためにTNT換算率が小さくなったものと思われる。Wildの結果からみると、これらと似たような組成の雷薬は少なくとも数十グラム程度から爆轟性物質に近い特性を示すものと考えられる。

5. 結 論

雷薬1~50kgの爆発による爆風圧を、ピエゾ圧力素子および鉛板プラストメータで測定した結果、TNT換算率(ピーク圧基準)平均52%、標準誤差8%を得た。また、換算距離が1m/kg^{1/3}から15m/kg^{1/3}へ増加するにつれて、TNT換算率も約40%から60%へ増加することがわかった。

本報告の実験の一部は、通商産業省主催平成元年度火薬類の保安技術実験で行ったものである。詳細な実験内容は同報告書¹⁰⁾を参照されたい。

実験の実施にあたっては、防衛庁、煙火業界、産業火薬業界、その他関係各位の支援を受けた。ここに、感謝の意を表します。

文 献

- 1) 田中(一)、清水、田中(克)、疋田、工業火薬、36、76(1975)
- 2) 清水、工業火薬、47、334(1986)
- 3) R. L. Parks, J. Hazardous Mater., 5, 359(1982)
- 4) R. Wild, J. Hazardous Mater., 7, 75(1982)
- 5) L. V. De Yong and G. Campanella, J. Hazardous Mater., 21, 125(1989)
- 6) 田中、化学技術研究所報告、85、209(1990)
- 7) 中山、吉田、角館、飯田他、日本熱流体工学会論文集、5、52(1990)
- 8) C. N. Kingery and B. F. Pannill, BRL Memorandum Report No. 1518(1964)
- 9) W. E. Baker, "Explosion in Air", University of Texas Press, Austin(1973)
- 10) 化学技術研究所、化学技術研究所報告(平成元年度火薬類の保安技術実験)、Vol 85, No. 6(1990)

Blast Characteristics of Firework Mixture, 'Raiyaku'

by Mitsuaki IIDA*, Yoshio NAKAYAMA*, Takehiro MATSUNAGA*
Katsumi TANAKA*, Masatake YOSHIDA*, Yoza KAKUDATE*
Shu USUBA* and Shuzo FUJIWARA*.

Blast characteristics of firework mixture, 'Raiyaku', with charge of 1kg to 50kg in weight were studied at range in scaled distance from 1 to 15m/kg^{1/3} using piezoelectric gauges and lead-plate blastmeters. Used 'Raiyaku' is a mixture of 70wt% potassium perchlorate, 15wt% aluminum powder and 15wt% titanium powder. TNT equivalence of 'Raiyaku' was determined on the basis of measured peak overpressures. The resulted equivalence was likely to increase with scaled distance and was 52% on the average.

(*Safety Chemistry Division, National Chemical Laboratory for Industry, 1-1, Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305)
