

TNT爆薬の爆発によるクレーター

中山良男*, 松永猛裕*, 飯田光明*, 吉田正典*

1983年から1991年にかけて火薬類の保安技術実験において実施されたTNT爆薬の地表面爆発によるクレーターの実験データを実験式により整理した結果について報告した。

1. はじめに 通商産業省は火薬類取締法施行上の保安基準を作成するための資料収集を目的として、1961年以降野外的の大規模な火薬類の保安技術実験(以下野外実験と略記する)を実施し、実験結果を各年度毎に火薬類の保安技術実験報告書にまとめてきた。1982年からはTNT爆薬を基準爆薬として、その爆発による爆風圧、爆発音、およびクレーター形状などのデータ収集が行われてきている¹⁾。本報告は、TNT爆薬によるクレーターの実験結果を有効活用できることを目的に、使いやすい形に整理された実験式を検討した結果について報告する。

2. 実験 Table 1に実験の実施年度、実施場所、TNT爆薬の薬量、および爆発高さ(爆薬の中心から地表面までの距離、地表面から地中方向をマイナスにとる)を示す。爆源は、高さ、直径がほぼ同寸法の直円柱形の铸造TNT(密度約1640 kg/m³)の上面中央に薬量がTNTの約2%の円柱形铸造ベントライト(TNT/PETN=50/50)を伝爆薬として埋め込み、木製装薬台上に設置されたものである。爆発高さを薬量の3乗根で除した換算爆発高さは、平均で約0.18 m/kg^{1/3}である。起爆に6号電気雷管と導爆線を使用した。実験方法の詳細については、各年度の野外実験報告書を参照いただきたい²⁻⁶⁾。

3. 結果および考察

3.1 クレーターの直径、深さと体積の関係

Table 1にクレーターの代表長さとして、爆発後に地表面に形成されたクレーターの短径(a)、長径(b)および深さ(D_{depth})の結果を示す。クレーターの形状は土質の不均一を反映して、単純な幾何学的形状をし

ていない場合もあったが、本報告では、クレーターを楕円錐形と仮定して次式によりクレーター体積V_a(m³)を求めた。

$$V_a = 3.14 \times a \times b \times \text{Depth} / 12 \quad (1)$$

次に、Fig. 1にV_aに対するa、bおよびD_{depth}の関係を示す。同図にはCooperらによる次の実験式⁷⁾を実線で示す。

$$\text{Diameter} = 2.4 \cdot V_a^{1/3} \quad (2)$$

$$\text{Depth} = 0.5 \cdot V_a^{1/3} \quad (3)$$

ここに、Diameter(m)は、クレーターを円錐と仮定したときの直径であり、Diameter=(a+b)^{1/2}の関係がある。(2)式および(3)式は高性能爆薬および低エネルギー密度の核爆発実験からの実験式であり、V_a ≤ 10⁵ m³の範囲で適用できると報告されている。Fig. 1から本実験のようにクレーター体積が比較的小さな領域でもその妥当性が確認された。

3.2 単位爆薬量当たりのクレーター体積

形成されたクレーターの大きさは、様々な因子に依存することが知られているが、最も大きな影響を与える因子は爆発源のTNT換算薬量、爆発高さ、および土または岩の種類と水分含有量である。爆発高さ、地質によりクレーター体積は一倍以上変化することが報告されている^{7,8)}。

本実験では換算爆発高さがほぼ一定であるため、単位爆薬量当たりのクレーター体積V_a/W(m³/ton)により、相対的ではあるが、各実験場の地質に対するクレーターの生成効率を知ることができる。Table 1に各実験のV_a/Wを示す。また、V_aとWの関係を最小2乗法により補間して求めた実験式を次に示す(上富良野(1990)および王城寺原(1991)のデータを除く)。

$$V_a = 0.0178 W^{1.10} \quad (4)$$

但し、2 ≤ W(kg) ≤ 500

1997年6月23日受理

*物質工学工業技術研究所極限反応部

〒305 茨城県つくば市東1-1

TEL 0298-54-4793

FAX 0298-54-4783

Table 1 Experimental results of crater dimensions and cratering efficiencies from cylindrical TNT charges for the field experiment of explosives for safety conducted by MITI

Year	Place	W (kg)	H (m)	a × b × Depth (m × m × m)	V _a (m ³)	V _a ^{1/3} (m)	H/V _a ^{1/3}	V _a /W (m ³ /ton)	V ₀ (m ³ /ton)
1983	Iwatesan	50.67	0.645	2.6 × 2.7 × 0.68	1.25	1.08	0.599	24.7	560
1983	Iwatesan	99.33	0.802	3.4 × 3.55 × 0.89	2.81	1.41	0.568	28.3	540
1984	Hijudai	26.12	0.536	2.2 × 2.7 × 0.755	1.17	1.05	0.509	44.8	630
1984	Hijudai	42.10	0.622	2.9 × 3.1 × 0.775	1.83	1.22	0.509	43.5	610
1984	Hijudai	70.66	0.737	3.3 × 3.6 × 0.945	2.94	1.43	0.514	41.6	600
1985	Iwatesan	102.40	0.839	2.9 × 2.9 × 0.84	1.85	1.23	0.683	18.1	630
1985	Iwatesan	2.15	0.222	0.6 × 0.6 × 0.28	0.0264	0.298	0.745	12.3	590
1986	Hijudai	196.40	1.08	4.35 × 4.5 × 1.44	7.39	1.95	0.554	37.6	670
1987	Yausubetsu	508.50	1.309	6.0 × 6.2 × 1.14	11.1	2.23	0.587	21.8	460
1989	Hijudai	51.00	0.66	1.65 × 2.4 × 1.03	1.07	1.02	0.645	21.0	600
1990	Kamifurano	25.30	0.534	1.32 × 1.8 × 0.34	0.212	0.596	0.896	8.38	880
1990	Kamifurano	102.00	0.84	2.28 × 2.9 × 0.42	0.728	0.900	0.934	7.14	920
1991	Ojojihara	25.65	0.53	0.5 × 0.56 × 0.48* 1.68 × 1.91 × 0.12**	0.136	0.514	1.031	5.30	1130

W : charge weight, H : height-of-burst, a : minor diameter of crater, b : major diameter of crater, Depth : depth of crater, V_a : apparant crater volume, V₀ : cratering efficiency

* : upper part of crater, ** : lower part of crater

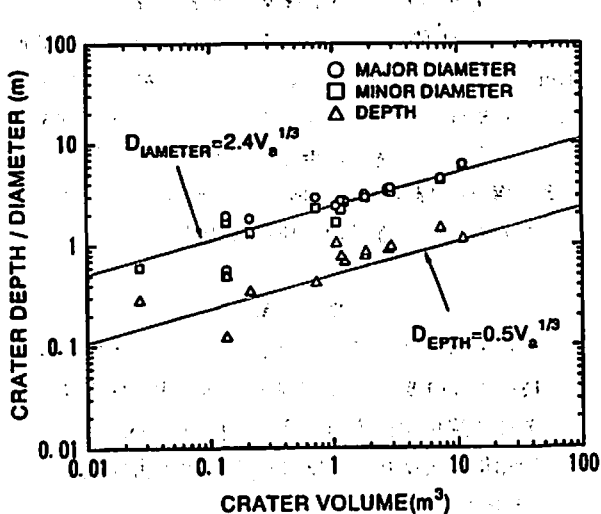


Fig. 1 Crater radii and depths as a function of crater volume for the field experiment of explosives for safety conducted by MITI. (Solid lines are adapted from reference 7)

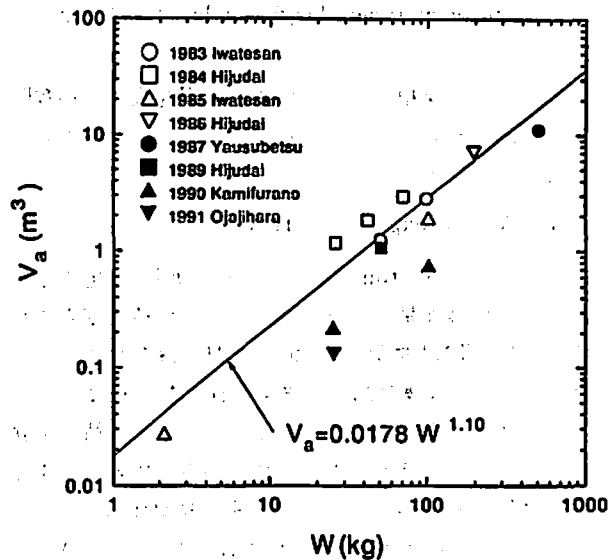


Fig. 2 Crater volmes as a function of charge weight for the field experiment of explosives for safety conducted by MITI.

Fig. 2に Table 1 の V_a, W 値および(4)式を示す。上富良野(1990)の V_a, W 値が平均で 7.76 (m³/ton), 王城寺原(1991)のそれが 5.30 (m³/ton)となり, その他の実験場の平均値 29.4 (m³/ton)と比較してかなり小さくなっている。これは両実験場の地盤が硬いことを示していると考ええる。特に, 王城寺原実験場は砂利を敷き詰めた非常に硬い状態であったことが原因と考えられる⁶⁾。一方, 日出生台, 岩手山などの実験場は, 火

山灰などを含む柔らかい地質であったため, V_a/W 値が大きくなったと考えられる。

3.3 クレーター体積と爆薬量, 爆発高さの関係

(4)式では換算爆発高さが 0.18 m/kg^{1/3}以外の場合には使用できない。次に, 爆発高さを変数に含む汎用性のある実験式について検討する。Cooperらは, クレーター体積が地質状態を示す V₀, 爆薬種および薬量を示す TNT 換算薬量, および爆発高さ(クレー

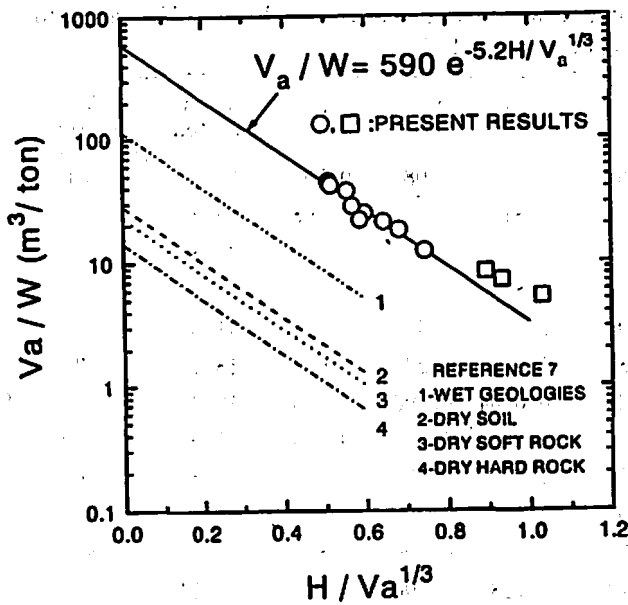


Fig. 3 Near-surface cratering efficiencies, as a function of dimensionless height-of-burst for the field experiment of explosives for safety conducted by MITI. (four kinds of lines are adapted from reference 7) V_a =apparent crater volume(m^3) H =height-of-burst(m) W =weight of TNT charge V_0 =cratering efficiency at zero height-of-burst (m^3/ton)

ター体積の3乗根で無次元化された爆発高さの指数関数)の積で整理できることを見だして、次の実験式を提案している⁷⁾。

$$V_a = V_0 \cdot W \cdot \exp(-5.2 \cdot H/V_a^{1/3}) \quad (5)$$

ここに、 V_0 (m^3/ton)はクレーター効率(爆発高さゼロでの単位爆薬量当たりのクレーター体積と定義される)、 W はTNT換算薬量(ton)、 H は爆発高さ(m)である。(5)式は爆発高さが爆薬直径の数倍程度、すなわち地表付近での爆発によるクレーター体積の実験式として適当であると考えられている。代表的な4種類の地質に対するクレーター効率の推奨値は、1. 水分を含む地質(土および粘土状頁岩を含む): $V_0 = 113.3$ (m^3/ton)、2. 乾燥した土: 同28.32 (m^3/ton)、3. 乾燥した柔らかい岩石: 同22.66 (m^3/ton)、4. 乾燥した固い岩: 同14.16 (m^3/ton)である⁷⁾。

本報告でも(5)式を採用することとし、Table 1に本実験結果の V_0 を示す。また、変数 $H/V_a^{1/3}$ に対する V_a/W の関係をFig. 3に○印および□印で示す。□印は、本実験の中では比較的硬い地質状態である上富良野(1990)および王城寺原(1991)のデータを意味する。

Table 1より上富良野(1990)および王城寺原(1991)のデータ以外のクレーター効率 V_0 の平均は $V_0 = 590$ (m^3/ton)になった。したがって、本実験におけ

るTNT爆薬のクレーターの体積と爆薬量、爆発高さの関係を示す実験式は次のようになる。

$$V_a/W = 590 \cdot \exp(-5.2 \cdot H/V_a^{1/3}) \quad (6)$$

(6)式をFig. 3に実線で示す。また、代表的な4種類の地質のクレーター効率を使用した結果もFig. 3に示す。

(5)式は、 $|H/V_a^{1/3}| < 0.4$ の範囲で適用可能であると言われているが、Fig. 3より本実験結果は $H/V_a^{1/3} \sim 0.65$ までは適用可能であることがわかった。また、上富良野(1990)および王城寺原(1991)のデータは(6)式からのずれが大きいが、この原因は変数 $H/V_a^{1/3}$ が適用範囲を超える1前後の値であるためと考えられる。

また、代表的な4種類の地質と比較すると、本実験が行われた野外実験場の土質は比較的柔らかいことが分かる。クレーター体積はクレーター効率 V_0 により大きく変化するので、野外実験場の地質と異なる場合には、適切な V_0 値を検討する必要がある。

5. まとめ

1983年から1991年にかけて火薬類の保安技術実験において実施されたTNT爆薬の地表面爆発によるクレーターの体積は、クレーター効率を $V_0 = 590$ m^3/ton とすれば、爆薬量、爆発高さを変数とした実験式により整理できることを示した。クレーター効率、および爆発高さが適切に推定できれば、同実験式より火薬、爆薬の爆発により地表面に形成されたクレーターの大きさから爆発の規模を評価することが可能である。

文 献

- 1) 松田幹雄, 中山良男, 飯田光明, “火薬類の保安技術実験概要”, 通商産業省立地公害局保安課・工業技術院化学技術研究所, p. 9 (1989)
- 2) 1983年度火薬類の保安技術実験報告書作成委員会 (未発表データ)
- 3) 1984年度火薬類の保安技術実験報告書作成委員会 (未発表データ)
- 4) 中山良男, 飯田光明, 松永猛裕, 薄葉州, 角館洋三, 吉田正典, 田中克己, 藤原修三, 化学技術研究所報告, 85, 177(1990)
- 5) 飯田光明, 松永猛裕, 中山良男, 山脇浩, 田中克己, 化学技術研究所報告, 87, 73(1992)
- 6) 飯田光明, 松永猛裕, 中山良男, 生沼仙三, 石川昇, 田中克己, 河村光隆, 小林直太, 化学技術研究所報告, 87, 383(1992)
- 7) Cooper, H. F., Jr., RDA-TR-2604-001, September(1976)
- 8) K. E. Gould, DNA 6187F, October(1981)

Ground cratering by explosions of cylindrical TNT charges

by Yoshio NAKAYAMA*, Takehiro MATSUNAGA*, Mitsuaki IIDA*
and Masatake YOSHIDA*

The objective of this paper is to present an empirical equation expressing the crater dimensions from near-surface TNT explosions as functions of charge weight, height-of-burst, and geologic medium in the field experiment of explosives for safety conducted by MITI.

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