

野外実験における爆薬の地表爆発による生成気体の膨張

中山良男*, 吉田正典*, 藤原修三*

野外実験において実施された地表爆発の撮影結果を整理し、爆発生成気体の高さおよび半径の時間変化を検討した。その結果、新桐ダイナマイト、ANFOおよびTNTに関しては、薬量の3乗根をパラメータとする相似則が成立することを確認した。また、爆発生成気体の半径に対する高さの比(H/R)は、時間に対しほぼ $H/R=1$ であること、データには分散が存在するが、それは換算爆発高さあるいは起爆位置の影響によることが明らかになった。一次元ラグランジュ流体力学計算コードによる解析を行い、衝撃波が爆発生成気体から分離する時刻は、一次元解析による結果とほぼ一致することを明らかにした。また、一次元解析からは爆発生成ガス球の脈動が示されたが、実験結果では爆発生成気体は単調に膨張し、脈動現象は観察されなかった。

1. はじめに

爆薬の爆発により生じる生成物は爆薬の組成により変化する。爆発生成物の多くは、窒素、炭酸ガス、水蒸気などの無害な気体であるが、組成によっては、CO、NO_xなどの有害気体や金属酸化物、塩化物などの固体生成物も発生する。さらに、爆発により地面の一部である土砂などの固形物も飛散するため、広義の意味で爆発生成物であると考えられる。また、現在、廃棄処理が問題になっている化学剤を含む砲弾などでは毒性ガス(ミスト)成分が大気へ放出される。このように爆発生成物が人および環境に対して影響を与える場合には、その上昇、拡散、風による移流により生成物が降下する範囲を事前に予測する必要がある。一般的な汚染物質の大気拡散あるいは環境影響評価は気象および原子力関連分野を中心に様々な研究が進められており、大気中の移流・拡散モデルは極めて多数存在する¹⁾。しかしながら、それらの大気拡散モデルは爆薬の爆ごう伝播、および爆発生成気体の高速膨張挙動を考慮できない。

また、核爆発、高性能爆薬の野外実験による爆発雲の観察は多数行われている²⁾。例えば、Churchは、爆発雲が爆発後2分で上昇が終わること、および爆発

雲高さはTNT換算薬量の4分の1乗に比例することを仮定して、地表爆発による無風状態での最終爆発雲高さの実験式を提案している³⁾。しかしながら、その実験式は、風の影響(風向、風速)、地形、経過時間を考慮できない。大気拡散の精密な予測(大気汚染シミュレーション)のためには、風、および浮力の影響が現れない爆発直後の爆発生成気体の状態(速度、温度、圧力等)を初期条件として大気拡散モデルに入力する必要がある。

一方、通商産業省が主催した火薬類の保安技術実験(以下、野外実験と略記する)において爆発状況を低速度および高速度カメラにより撮影した結果が多数存在している⁴⁾⁻¹⁵⁾。そのうち、土堤内地表爆発の場合の爆炎・煙の膨張、進展に関してはデータが整理されており、その結果、火薬庫の有無にかかわらず3乗根則が成立すると報告されている¹⁶⁾。しかしながら、土堤が無い場合の地表爆発の撮影結果は未整理状態にある。

ここでは、火薬類の爆発生成物が大気拡散するメカニズムを解明するための基礎データを収集することを目的に、野外実験において野積み状態あるいは地面上方に設置された爆薬の爆ごうにより発生した爆発生成気体を低速度および高速度撮影した結果を総括的に整理し、地表爆発による生成気体の膨張挙動を検討した。このうち、TNTに関しては、一次元数値シミュレーションを行い、衝撃波面および接触面(爆発生成気体と空気の境界面)の軌跡を解析し、これを実験結果と比較することにより、爆発生成気体の膨張状況を考察した。以下においてそれらの結果を報告する。

2001年8月7日受付

2001年9月10日受理

*独立行政法人産業技術総合研究所

〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1

つくば中央第5

TEL 0298-61-4793

FAX 0298-61-4783

E-mail y-nakayama@aist.go.jp

2. 実験方法

Table 1 に野外実験の実施年、場所、実験番号、薬種、薬量、薬形状(縦×横×高さ、または直径×高さ)、爆発高さ(爆薬の中心から地面までの高さ)(height of burst, *HOB*)、換算爆発高さ(*HOB*を薬量の三乗根で除した値)、起爆点の位置(薬高に対する高さの割合で表示)、および撮影速度(1秒間のコマ数、frame per second, fps)などを示す。1960年代の実験では新桐ダイナマイトが多用され、70年代はANFO および含水爆薬が使用された。TNT爆薬は1962年に粉状のものが使用され、80年代に鑄造タイプで実験が行われた。今回解析した爆薬は、150~3000kgの新桐ダイナマイト(密度1400-1440kg・m⁻³、爆速6.0-6.5km・s⁻¹)、150~600kgの硝安爆薬(1050kg・m⁻³、3.8km・s⁻¹)、150~600kgの黒カーリット(1050kg・m⁻³、4.62km・s⁻¹)、2.1~600kgのTNT(粉状で1060-1070kg・m⁻³、鑄造タイプで1550kg・m⁻³、粉状の爆速5.1~5.6km・s⁻¹)、100~500kgのANFO(830-860kg・m⁻³、3.5km・s⁻¹)、50~100kgの含水爆薬A(1100kg・m⁻³、4.46km・s⁻¹)、50~100kgの含水爆薬B(1100kg・m⁻³、3.86km・s⁻¹)、および50~100kgの含水爆薬C(1100kg・m⁻³、3.97km・s⁻¹)である。

爆発生成気体の撮影は、2つの速度領域のカメラを使い分けて、毎秒64~5400駒の速度で実施された。低速度の場合(代表的撮影速度64駒毎秒、時間分解能16ms)は、16mm低速度カメラ(Bolex, H16)により爆発後1秒以内の爆発生成気体の高さを計測した。高速度の場合はWellensack社製Fastax、あるいはナック社製高速度カメラE-10により爆発後から100ms程度まで爆発生成気体の水平および鉛直方向の大きさを計測した。解析のため、撮影ネガフィルムを解析用モノクロポジフィルムに反転したフィルム、あるいはリバーサルフィルムをそのままBell and Howell解析用映写機(173型)などにセットし、スクリーン上での像の大きさを経過時間とともに読みとり、実寸法に換算した。撮影成績は天候により大きく左右され、露光不足で解析困難な場合も少なくなかった。

3. 数値解析手法

衝撃波面および接触面の時間変化を理解するために、ラグランジュ流体力学式の有限差分コードによる一次元球面波の数値シミュレーションを行った^{17,18)}。解析において、爆発生成気体の膨張により周囲の空気は最大6分の1まで圧縮される。このため、空気に対し等間隔メッシュを使用すると、爆源近傍で解析が不安定になることが知られている¹⁷⁾。このため、中心部に等間隔で爆薬を配置し、その周囲に不等間隔メ

ッシュで空気を配置した。今回の解析では爆薬および空気のメッシュ数は500および4500とした。空気の状態式は、比熱比1.4の理想気体を仮定し、その初期密度1.225kg・m⁻³、初期圧力1.013×10⁵Paとした。また、実験では様々な爆薬が使用されているが、TNT以外の爆薬の組成は不明であるため、解析においてはTNTの場合を検討した。TNT爆薬の爆発生成気体の状態方程式は、JWL(Jones-Wilkins-Lee)式による等エントロピー膨張式を適用した。初期密度1630kg・m⁻³の場合は(1)式となる。

$$P_g(\text{Pa}) = 6.306 \times 10^{11} \exp(-4.834 V) + 6.834 \times 10^9 \exp(-1.017 V) + 1.021 \times 10^9 / V^{1.253} \quad (1)$$

ここに、各数値パラメータは熱力学平衡計算コードCHEETAH¹⁹⁾の中で最も良く使われているBKWC(リバモアライブラリー)を使用して理論的に求めたJWLパラメータであり、*V*は爆発生成気体の体積と初期体積との比、*P_g*の単位はPaである。TNTの燃焼は、等容量爆発モデルを使用した。地表爆発の場合、地表が完全剛体であれば地表はエネルギーを全く吸収しないため、衝撃波および爆発生成気体は2個の等しい爆源より発生したかのように合成され伝播する。このため、一次元球面波の解析では地表が完全剛体であり爆発は完全に空気中に反射される状態、すなわち薬量は実験の2倍薬量であると仮定して解析を行った。

4. 実験結果

Fig. 1 に TNT 300kg の爆発状況を示す。一般に、爆発生成気体の形は、爆発前の爆薬の各面を垂直に押し出した形となる。Fig. 2 (上)は、爆発生成気体の地面からの高さおよび半径(幅の1/2の長さ)の時間変化を示す。爆発直後に、高さおよび半径は急激に増加するが、それに続く部分では緩やかに変化する。また、Fig. 2 (下)に各方向の速度の時間変化を示す。爆源近傍では3~4km・s⁻¹の速度で膨張するが、時間の経過とともに急激に低下し、100m・s⁻¹程度に落ち着くことがわかる。

野外実験報告書においては、時間に対する爆発生成気体の高さ及び半径の関係が主に図、一部表の形で整理されている。本報告では、それらの図をスキャナー(EPSON ES-2000、光学解像度1600dpi×1600dpi)によりデジタル画像化し、1曲線につき20点程度のデータサンプリングを行い、デジタルデータとした。それらのデータの補間は、(2)式に示す関数により行われた。

Table 1 Experimental conditions

Year	Cite	Exp. No.	Charge*	Mass (kg)	Booster Explosives	Size W × D × H (m)	HOB** (m)	Scaled HOB (m · kg ^{-1/3})	Camera speed (F.P.S.)	Ratio of initiation height***
1961	Eniwa	1	SKD	1500	—	H0.925	0.463	0.0404	2900, 3360	0.17
1961	Eniwa	4	SKD	750	—	H1.11	0.555	0.0611	2450, 2860	0.3
1961	Eniwa	5	SKD	3000	—	H1.48	0.740	0.0513	2220, 2650	0.13
1962	Aebano	4	SKD	150	—	0.73 × 0.665 × 0.41	0.205	0.0386	4125	0.25
1962	Aebano	10	SKD	300	—	0.74 × 0.67 × 0.62	0.31	0.0463	4035	0.33
1962	Aebano	14	SKD	600	—	1.85 × 1.36 × 0.19	0.095	0.0113	3940	0.5
1967	Aebano	A1	SKD	1000	—	0.97 × 0.84 × 1.20	0.60	0.0600	5500	0.42
1967	Aebano	A2	SKD	1225	—	0.84 × 1.115 × 1.4	0.70	0.0654	5900	0.42
1962	Aebano	5	AN	300	—	0.985 × 0.88 × 0.6	0.3	0.0448	4225	0.33
1962	Aebano	11	AN	600	—	1.60 × 1.42 × 0.31	0.155	0.0184	3638	0.5
1962	Aebano	7	BC	300	—	0.77 × 0.765 × 0.75	0.375	0.0560	3980	0.33
1962	Aebano	12	BC	600	—	1.64 × 1.63 × 0.23	0.115	0.0136	4870	0.5
1971	Kamifurano	6-1	ANFO	100	No. 3 Kiri 2.5kg	0.9 × 0.44 × 0.61	1.1	0.2370	4607	0.4
1972	Hijudai	5-1	ANFO	300	Sin-kiri 2.5kg	0.85 × 0.6 × 0.96	0.82	0.1225	3714	0.39
1972	Hijudai	5-2	ANFO	500	Sin-kiri 2.5kg	1.160 × 0.87 × 0.82	0.71	0.0895	5400	0.38
1973	Iwatesan	3-1	ANFO	100	Sinkiri 0.5kg	0.9 × 0.44 × 0.61	0.605	0.1303	3269	0.2, 0.4, 0.6, 0.8
1973	Iwatesan	3-2	ANFO	100	Sin-kiri 1.0kg	0.9 × 0.44 × 0.61	0.605	0.1303	2810	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
1973	Iwatesan	3-3	ANFO	100	Sinkiri 3.0kg	0.9 × 0.44 × 0.61	0.605	0.1303	3000	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
1962	Aebano	8	TNT	300	—	0.92 × 0.83 × 0.67	0.335	0.0500	3975	0.33
1985	Iwatesan	1-2-1	TNT	100	PL 2.06kg	φ 0.43 × H0.457	0.839	0.1808	1000	0.88
1985	Iwatesan	1-2-2	TNT	2.1	PL 0.041kg	φ 0.12 × H0.122	0.222	0.1734	500	0.86
1986	Hijudai	3	TNT	192	PL 3.89kg	φ 0.555 × H0.566	1.08	0.1872	1000	0.90

Table 1 Experimental conditions (Contd.)

Year	Cite	Exp. No.	Charge*	Mass (kg)	Size W × D × H (m)	HOB** (m)	Scaled HOB (m · kg ^{-1/3})	Camera speed (F.P.S.)	Ratio of initiation height (number of initiation point)***	Type of wrapping****
1975	Hijudai	1-1-1	A	50	0.38 × 0.38 × 0.38	0.62	0.168	64, 1500	Top (1)	Blocks (2)
1976	Kamifurano	1-1-1	A	50	0.39 × 0.39 × 0.37	0.685	0.186	64	Top (1)	Blocks (2)
1976	Kamifurano	1-4-2	A	100	0.56 × 0.49 × 0.67	0.835	0.180	64, 1450	0.33, 0.67, 1.0 (5)	Cartridge (φ 50)
1976	Kamifurano	1-4-1	A	100	0.51 × 0.49 × 0.67	0.835	0.180	64	0.33, 0.67, 1.0 (5)	Cartridge (φ 50)
1975	Hijudai	1-3-1	B	50	0.38 × 0.38 × 0.38	0.62	0.168	64	Top (1)	Blocks (2)
1976	Kamifurano	1-5-3	B	100	0.77 × 0.38 × 0.36	0.835	0.180	64, 3200	Top (2)	Blocks (4)
1976	Kamifurano	1-2-1	B	50	0.40 × 0.40 × 0.36	0.68	0.185	64, 3450	Top (1)	Blocks (2)
1976	Kamifurano	1-5-1	B	100	0.54 × 0.49 × 0.58	0.79	0.170	64, 3550	0.33, 0.67, 1.0 (5)	Cartridge (φ 50)
1976	Kamifurano	1-5-2	B	100	0.55 × 0.49 × 0.58	0.79	0.170	64	0.33, 0.67, 1.0 (5)	Cartridge (φ 50)
1976	Kamifurano	1-2-2	B	50	0.38 × 0.36 × 0.36	0.68	0.185	3300	Top (1)	Blocks (2)
1975	Hijudai	1-2-2	C	50	0.38 × 0.38 × 0.38	0.62	0.220	64, 1500	Top (1)	Blocks (2)
1975	Hijudai	1-2-1	C	100	0.48 × 0.57 × 0.705	0.733	0.158	64	Top (1)	Cartridge (φ 50)
1976	Kamifurano	1-6-1	C	100	0.77 × 0.38 × 0.4	0.70	0.151	64	Top (2)	Blocks (4)
1976	Kamifurano	1-3-1	C	50	0.385 × 0.375 × 0.38	0.69	0.187	64	Top (1)	Blocks (2)
1976	Kamifurano	1-3-2	C	50	0.39 × 0.38 × 0.4	0.70	0.190	64	Top (1)	Blocks (2)
1976	Kamifurano	1-6-2	C	100	0.58 × 0.48 × 0.7	0.85	0.183	64	0.33, 0.67, 1.0 (5)	Cartridge (φ 50)
1985	Iwatesan	1-1-2	H	100	φ 0.535 × H 0.478	0.80	0.172	1000	0.82 (1)	Cartridge (φ 50)
1986	Hijudai	2-1	I	100	φ 0.542 × H 0.507	0.809	0.174	1000	0.75 (1)	Cartridge (φ 50)
1986	Hijudai	2-2	J	100	φ 0.542 × H 0.521	0.816	0.176	1000	0.75 (1)	Cartridge (φ 50)

*: SKD; Sin-kiri dynamite, AN; ammonium nitrate explosive, BC; black carlit, ANFO; ammonium nitrate fuel oil, TNT; trinitrotoluene, No.3 Kiri; No.3 Kiri-dynamite, PL; pentolite (TNT/PETN=50:50 wt.%), A, B, C, H, I, and J; watergel explosive

** : height of burst

*** : The figures mean the ratio of the initiation point height to charge height from bottom of the charge.

**** : The figure in the parenthesis next to "Blocks" denotes the number of explosive block.

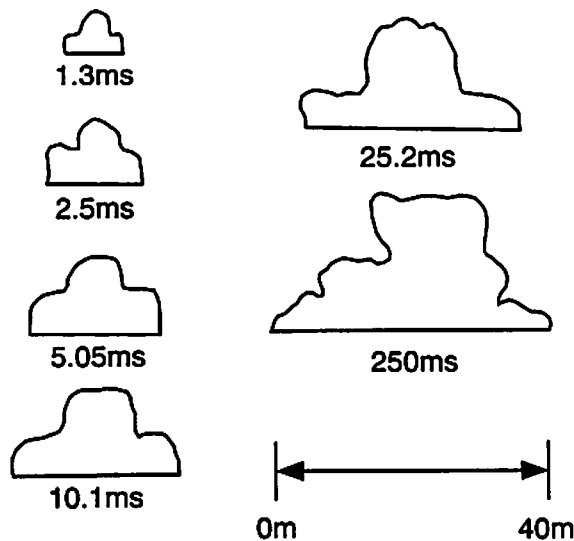


Fig. 1 Dynamics of explosion products for TNT 300kg

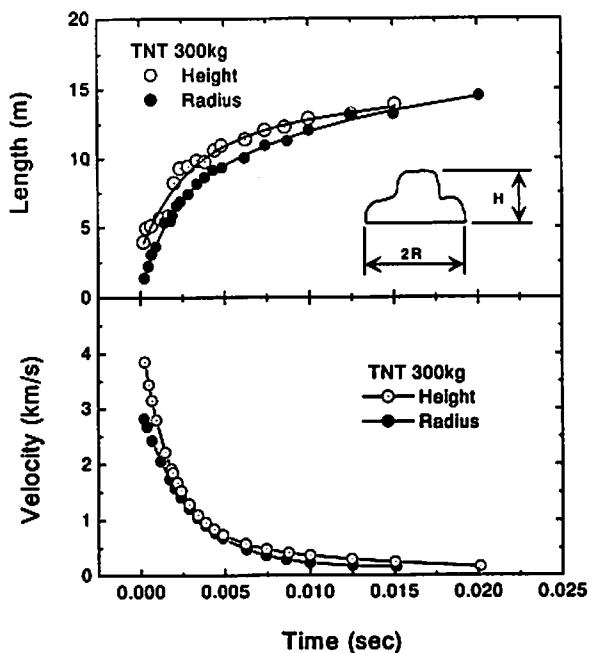


Fig. 2 Time histories of explosion products as a function of time for TNT 300kg. Upper is the height and radius and lower is the velocities for vertical and horizontal directions.

$$y = \frac{P_1}{P_2} \{ \exp(P_2 t) - 1 \} + \frac{P_3}{P_1} \{ \exp(P_1 t) - 1 \} + P_5 t + P_6 \quad (2)$$

ここに、 t =起爆からの経過時間(sec.)、 y =爆発生成気体の高さまたは半径(m)、 $P_1 \sim P_6$ は補間パラメータである。高速度カメラのデータと低速度カメラの両者のデータが存在する場合には、両者を統合して補間を行った。補間の拘束条件は、 $P_1(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) > 0$ 、 $P_2(\text{s}^{-1}) < 0$ 、 $P_3(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) > 0$ 、 $P_4(\text{s}^{-1}) < 0$ 、 $P_5(\text{s}^{-1})$

> 0 、 $P_6(\text{m})$ は高さ方向の場合は地面から爆薬の上部までの距離、半径方向の場合は半径(角形の場合は面積が等価の円の半径)である。Fig. 2(上)の実線は、生データを(2)式により滑らかに補間した結果、Fig. 2(下)の実線は各方向の速度であり、(2)式を微分した(3)式により算出した結果である。

$$v = P_1 \exp(P_2 t) + P_3 \exp(P_1 t) + P_5 \quad (3)$$

ここに、 v =爆発生成気体の高さまたは半径方向の速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)である。Table 2に $P_1 \sim P_6$ のパラメータを示す。 t_{max} は撮影時間であり、この時間を越える外挿は避けるべきである。 R^2 は、補間の良さを示す変数であり、その値より比較的良好な補間結果を得ていると考えられる。以下においては3個以上のデータが存在する薬種を対象に考察した。

5. 考 察

5. 1 爆発生成気体の膨張における相似関係

最初に、爆発生成気体の膨張における相似関係を検討する。ダイナマイトの土堤内地表爆発の場合、爆炎あるいは煙の膨張に関しては、相似関係が成立すると報告されている¹⁰⁾。土堤が無い場合の地表爆発においても、当然の事ながら、同様の結果が予想される。新桐ダイナマイト、ANFOおよびTNTの換算時間に対する換算高さの結果をFig. 3に、含水爆薬A、B、およびCの結果をFig. 4に示す。実線は(2)式による補間結果を示す。図中に薬量が表示されているが、その順番はTable 2のそれと対応しているため、図中に実験番号は記載しなかった。

新桐ダイナマイトの場合は、薬量が最大で20倍異なるが、傾向として、相似関係が成立すると思われる。分散がかなり大きくなっているが、これは爆薬の形状、起爆位置などの効果と考えられる。1961年度の結果は1962年および1967年のそれと比較すると低めになっている。これは起爆点高さが低いこと、あるいは実験場の地質状態の差異によると考えられる。ANFOの場合は、薬量500kgのデータを除くと、極めて良い相似関係が成立した。特に1973年に実施された3回の実験は薬量、薬形、および起爆位置が同一であるため、非常に再現性が高い。一方、500kgの結果はそれ以外の結果との差が大きくなった。この理由として、爆薬を設置した地盤が軟らかいこと、伝爆薬量が足りないことなどが考えられる¹¹⁾。TNTの場合は、薬量、装薬状況が異なるため、爆発の初期には分散が大きいが時間が経過すると差は小さくなった。傾向としては、相似関係が成立すると考えられる。

含水爆薬A、BおよびCの結果は、新桐ダイナマイ

Table 2 Results of curve fitting parameters

Year Exp. No.	Explos. W(kg)	H or R*	t_{max} (s)	R^2	P_1 ($m \cdot s^{-1}$)	P_2 (s^{-1})	P_3 ($m \cdot s^{-1}$)	P_4 (s^{-1})	P_5 ($m \cdot s^{-1}$)	P_6 (m)
1961 1	SKD 1500	H	0.014	0.9998	2.17E4	-2.20E4	3.56E3	-3.35E2	2.28E2	0.926
		R	0.012	0.9996	3.29E3	-6.94E2	1.40E3	-1.89E2	5.79E2	0.5
1961 4	SKD 750	H	0.013	0.9933	2.04E3	-2.82E2	1.82E3	-2.82E2	1.67E2	1.11
		R	0.013	0.9931	3.98E3	-2.06E2	-	-	0	0.5
1961 5	SKD 3000	H	0.014	0.9941	1.72E3	-1.79E2	1.71E3	-1.79E2	0	1.48
		R	0.014	0.9844	1.84E3	-1.50E2	1.79E3	-1.51E2	0	0.5
1962 4	SKD 150	H	0.020	0.9905	1.65E3	-1.56E2	1.62E4	-3.63E3	0	0.5
		R	0.020	0.9985	4.82E3	-2.35E3	2.42E3	-2.22E2	4.84E1	0.41
1962 10	SKD 300	H	0.017	0.9554	8.31E3	-1.41E3	1.82E3	-4.67E2	3.82E2	0.62
		R	0.020	0.9959	4.33E3	-3.47E2	1.23E2	-1.69E-8	1.46E2	0.352
1962 14	SKD 600	H	0.015	0.9915	1.84E3	-6.32E1	1.33E4	-2.20E3	0	0.19
		R	0.018	0.9770	4.59E3	-2.24E3	1.97E3	-1.41E2	0	0.895
1967 A1	SKD 1000	H	0.029	0.9998	4.67E3	-5.74E2	1.46E3	-7.15E1	0	1.2
		R	0.010	0.9995	2.26E3	-3.94E2	2.26E3	-3.94E2	8.01E2	0.509
1967 A2	SKD 1225	H	0.033	0.9997	6.00E3	-7.54E2	1.88E3	-7.73E1	0	1.4
		R	0.023	1.0000	5.92E3	-1.23E3	1.81E3	-9.51E1	4.83E2	0.546
1962 5	AN 300	H	0.019	0.9839	2.05E4	-5.45E3	9.96E2	-7.70E1	0	0.6
		R	0.019	0.9850	1.64E3	-5.89E2	1.45E3	-1.48E2	2.08E2	0.525
1962 11	AN 600	H	0.016	0.9678	1.41E4	-2.75E3	1.76E3	-1.02E2	0	0.31
		R	0.019	0.9968	1.76E3	-9.11E2	1.58E3	-1.41E2	2.40E2	0.851
1962 7	BC 300	H	0.017	0.9919	3.16E4	-8.67E3	2.83E3	-4.23E2	2.05E2	0.75
		R	0.018	0.9976	1.11E4	-8.92E3	2.56E3	-2.86E2	3.94E2	0.433
1962 12	BC 600	H	0.012	0.9993	4.83E3	-1.58E4	3.53E3	-1.88E2	2.53E2	0.23
		R	0.008	0.9878	1.57E3	-1.87E2	1.57E3	-1.87E2	0	0.923
1971 6-1	ANFO 100	H	0.006	0.9876	6.24E2	-4.33E-11	3.65E1	-3.63E-7	4.75E2	1.41
		R	0.006	0.9998	1.84E3	-5.53E2	1.75E3	-5.54E2	2.08E2	0.355
1972 5-1	ANFO 300	H	0.009	0.9864	9.71E2	-1.39E2	9.30E2	-1.74E2	8.86E-1	1.3
		R	0.009	0.9998	2.30E3	-2.98E2	5.16E2	-8.17E1	2.61E2	0.403
1972 5-2	ANFO 500	H	0.007	0.9603	3.87E2	-6.96E1	3.67E2	-6.97E1	0	1.12
		R	0.007	0.9982	1.42E3	-2.09E2	1.97E1	-1.17E3	0	0.502
1973 3-1	ANFO 100	H	0.003	0.9620	5.47E2	-1.68E-11	1.97E2	-1.53E-1	5.10E2	0.91
		R	0.005	0.9972	7.67E2	-4.38E2	7.67E2	-4.36E2	5.99E2	0.355
1973 3-2	ANFO 100	H	0.002	0.9947	5.86E2	-5.08E1	5.87E2	-4.85E1	3.90E2	0.91
		R	0.004	0.9999	1.30E3	-7.04E2	1.30E3	-7.04E2	5.86E2	0.355
1973 3-3	ANFO 100	H	0.003	0.9997	5.59E2	-2.06E2	5.59E2	-1.30E2	4.00E2	0.91
		R	0.005	0.9999	1.16E3	-4.56E2	9.63E2	-4.56E2	4.10E2	0.355
1962 8	TNT 300	H	0.015	0.9738	3.34E5	-1.26E5	2.88E3	-3.41E2	1.36E2	0.670
		R	0.020	0.9979	3.56E3	-5.79E2	7.72E2	-7.74E1	1.16E-1	0.493
1985 1-2-1	TNT 100	H	0.036	0.9984	1.05E3	-1.82E2	1.05E3	-1.80E2	0	1.07
		R	0.036	0.9927	2.83E3	-3.52E2	7.52E1	-4.64E2	9.64E1	0.215
1985 1-2-2	TNT 2.1	H	0.040	1.000	8.11E2	-4.89E2	8.11E2	-4.89E2	1.24E1	0.283
		R	0.040	1.000	5.03E2	-3.32E2	5.03E2	-3.32E2	2.02E1	0.061
1986 3	TNT 192	H	0.100	0.9968	5.66E2	-9.13E1	5.61E2	-6.41E1	1.03E0	1.363
		R	0.100	1.000	1.39E3	-3.21E2	4.99E2	-5.31E1	8.59E0	0.278

Table 2 Results of curve fitting parameters (Contd.)

Year Exp. No.	Explos. W(kg)	H or R*	t_{max} (s)	R^2	P_1 ($m \cdot s^{-1}$)	P_2 (s^{-1})	P_3 ($m \cdot s^{-1}$)	P_4 (s^{-1})	P_5 ($m \cdot s^{-1}$)	P_6 (m)
1975 1-1-1	A 50	H R	0.186 0.022	0.9932 0.9996	5.05E3 4.67E3	-1.06E3 -1.98E3	2.69E2 8.30E2	-1.38E2 -1.09E2	8.90E-1 0.	0.81 0.214
1976 1-1-1	A 50	H	0.462	0.9984	1.51E4	-2.44E3	4.19E1	-1.19E1	6.19E-1	0.87
1976 1-4-2	A 100	H R	0.462 0.035	0.9894 0.9916	3.04E3 6.26E3	-2.00E3 -2.97E3	6.04E2 6.14E2	-1.75E2 -1.10E2	6.69E0 1.27E1	1.17 0.296
1976 1-4-1	A 100	H	0.084	0.9982	3.03E3	-7.28E2	4.34E1	-4.81E1	0.	1.17
1975 1-3-1	B 50	H	0.189	0.9991	1.31E4	-2.52E3	2.55E2	-9.98E1	1.53E0	0.81
1976 1-5-3	B 100	H H R	0.031 0.252 0.031	0.9297 0.9996 0.9853	1.13E3 5.52E3 5.74E2	-9.00E2 -9.30E2 -2.44E2	1.41E2 9.04E1 2.78E2	-1.29E2 -5.83E1 -1.56E2	0. 1.55E1 0.	1.02 1.02 0.305
1976 1-2-1	B 50	H R	0.457 0.029	0.9693 0.9751	6.18E3 4.49E3	-1.34E3 -1.95E3	1.96E2 1.01E3	-1.20E2 -1.80E2	9.42E0 0.	0.86 0.226
1976 1-5-1	B 100	H R	0.462 0.056	0.9609 0.9945	2.68E3 2.20E3	-6.39E2 -8.43E2	1.96E2 1.42E3	-1.23E2 -2.08E2	4.96E0 4.24E1	1.08 0.29
1976 1-5-2	B 100	H	0.126	0.9911	1.08E4	-3.17E3	6.11E1	-7.26E1	0.	1.08
1976 1-2-2	B 50	H R	0.091 0.017	0.9932 0.9838	5.50E3 9.92E3	-1.84E3 -3.41E3	2.31E2 6.72E2	-4.33E1 -9.90E1	0. 0.	0.86 0.209
1975 1-2-2	C 50	H R	0.189 0.023	0.9285 0.9995	1.30E4 1.37E3	-3.29E3 -3.11E2	2.78E2 1.04E5	-8.67E1 -9.90E4	4.59E-1 3.43E1	0.81 0.214
1975 1-2-1	C 100	H	0.189	0.9997	1.52E4	-2.99E3	3.51E2	-1.38E2	4.32E0	1.09
1976 1-3-1	C 50	H	0.123	0.9972	1.72E4	-1.21E3	7.61E1	-5.07E1	1.36E1	0.88
1976 1-3-2	C 50	H	0.465	0.9976	2.34E4	-1.79E3	3.83E1	-1.29E1	1.84E0	0.9
1976 1-6-1	C 100	H	0.169	0.9979	8.51E3	-5.36E2	1.60E2	-5.06E1	9.99E0	0.9
1976 1-6-2	C 100	H	0.127	0.9975	2.42E4	-1.73E3	6.22E1	-4.24E1	0.	1.2
1985 1-1-2	H 100	H R	0.012 0.012	0.9593 0.9872	3.10E3 1.78E3	-3.83E2 -1.48E2	— —	— —	0. 0.	1.04 0.239
1986 2-1	I 100	H R	0.062 0.062	1. 0.9976	1.84E3 2.60E3	-2.39E2 -4.45E2	— —	— —	5.40E1 1.03E2	1.06 0.271
1986 2-2	J 100	H R	0.038 0.038	1. 0.9515	1.36E3 1.29E3	-1.48E2 -1.52E2	— —	— —	1.77 0.	1.08 0.271

*H: horizontal direction, R: radial direction

ト, ANFO, TNT の場合と比較して, いずれも分散が非常に大きい。これは, Table 1 に示すように, 薬

形がブロック状(25kg)あるいは直径50mmの薬包であること, 起爆位置, および起爆点数が違うこと, さ

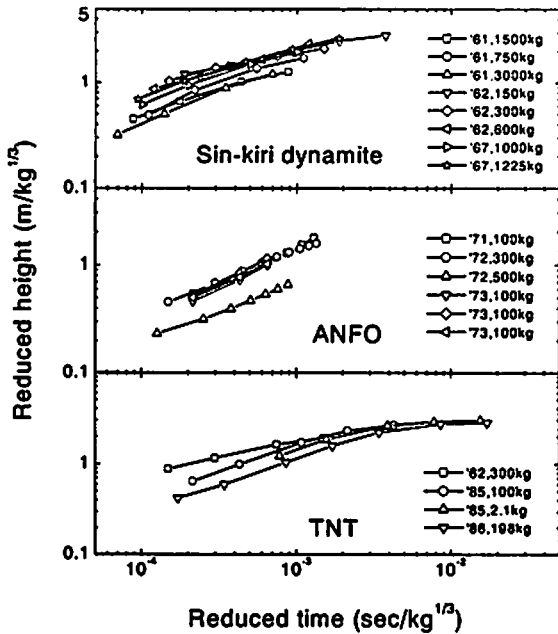


Fig. 3 Reduced height as a function of reduced time for sin-kiri dynamite, ANFO and TNT

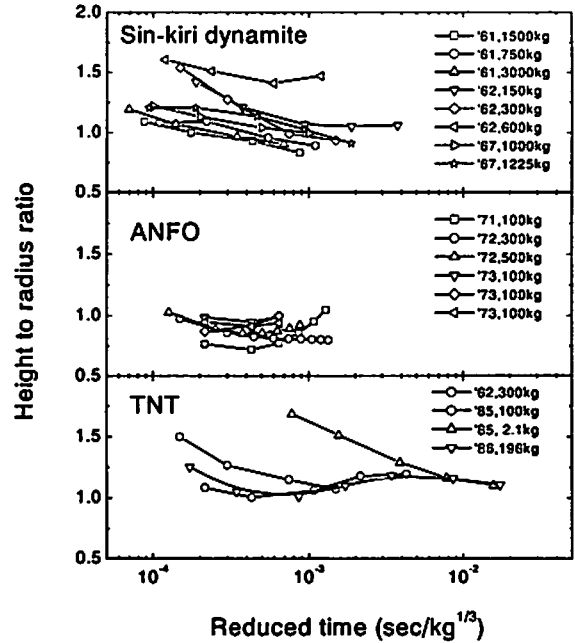


Fig. 5 Ratio of height to radius (H/R) as a function of reduced time for sin-kiri dynamite, ANFO and TNT

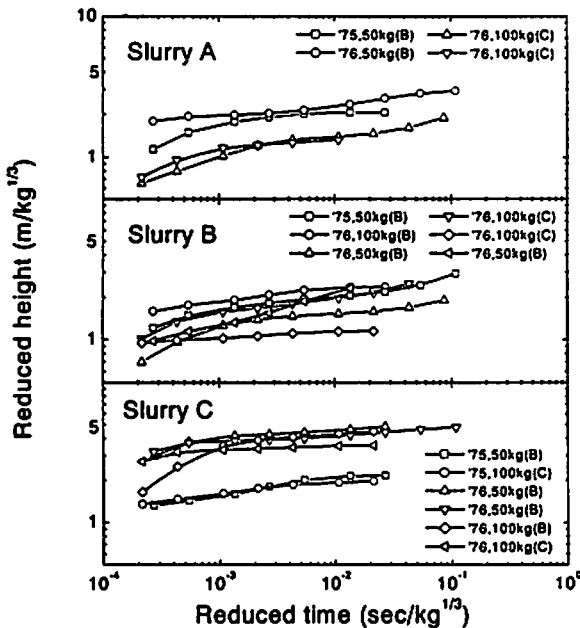


Fig. 4 Reduced height as a function of reduced time for A, B and C slurry explosives. B in parenthesis denotes that the explosive is block shape and C denotes that the explosive is cartridge type of 50 mm in diameter.

らに製造後1年程度経時した物品なども使用していることなどが関係していると思われる。どの要因が支配的なパラメータであるかについては、Fig. 4より明確な結論を見いだすことは困難である。また、含水爆薬の撮影は、TNTなどより10倍長い時間領域まで撮影が行われているが、時間に対する変化の傾向に、他の

爆薬と大きな変化は認められない。

5. 2 爆発生成気体の形状変化

次に、爆発生成気体の全体の形状変化を示す変数として、半径に対する高さの比(H/R)を定義し、Fig. 5に換算時間に対する H/R の関係を示す。傾向として、時間に対しほぼ一定であり、多くの場合 H/R はほぼ1となった。これは、爆源の多くが、1)段ボール詰めの場合は爆薬を立方体に近く積み上げた形状であるため、2)直円筒形ファイバードラムに装薬した形状であるため、あるいは3)直円柱形に铸造した形状であるため、その薬形状が爆発生成気体の形状に反映したものと考えられる。

新桐ダイナマイト600kgの場合は、 $H/R=1.5$ 程度にある。この換算爆発高さはTable 1より $SHOB=0.01 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ であり、他の場合の結果と比較すると、相対的にかなり小さい。図示していないが、 $SHOB$ が同程度の硝安爆薬600kg('62, No. 11)および黒カーリット600kg('62, No. 12)の場合も H/R は1より大きくなった。報告書においても、「(爆源が)立方体の時は(生成気体は)凸字形、平たく積むとつばの浅い帽子型で、この傾向は煙になっても残る。炎の進出速度は立方体積みのとき上方向と横方向とは殆ど等しい。平たく積んである時は、横方向は上方向の60~70%である。」とあり²⁰⁾、 $SHOB$ が小さい場合に観察される爆発生成気体の膨張特性と考えられる。

ANFOの場合、 H/R は1よりやや小さい。報告書

では、「他の爆薬類の地上爆発とは少しく様子が違い、横方向への膨張が強く、したがって、ガス形状は他の爆薬類の場合よりも扁平な形で膨張した。これは1つには薬の集積形状の差によるものとも考えられよう。」との記述がある²¹⁾。Table 1に示したように、ANFOのSHOBは、新桐ダイナマイトのそれと比較すると、高めである。また、1973年度に実施したANFO 100kgの実験結果は、既に述べたように非常に再現性が高い。したがって、ANFOの生成気体の膨張特性は、高いSHOBに起因すると考えられる。

TNTの場合はH/Rはほぼ1である。1985年および1986年に実施したTNTのSHOBは比較的高めであるため、ANFOと同様にH/Rは1より小さくなるはずである。この違いの原因として、起爆位置の相違が考えられる。鑄造TNTの伝爆薬はTNTの一番上に設置されており、爆ごう波の進行方向は上から下である。一方、ANFOの場合、伝爆薬(新桐ダイナマイト)はANFOのほぼ中心に位置している。爆発生成気体の膨張には、起爆位置の影響が認められる。

5.3 一次元コードによる解析結果との比較

換算時間に対する衝撃波面および接触面の換算距離の関係をFig. 6に示す。同図には、Kinney&GrahamのTNT²¹⁾の地表爆発(空中爆発の2倍薬量と仮定)の文献値(◇印)を示す。衝撃波面に関しては、文献値と一次元解析結果は良く一致した。これより、解析結果の妥当性が確認できる。次に、衝撃波面と接触面の関係であるが、両者は $t=1 \times 10^{-4} (\text{s} \cdot \text{kg}^{-1/3})$ までは、ほ

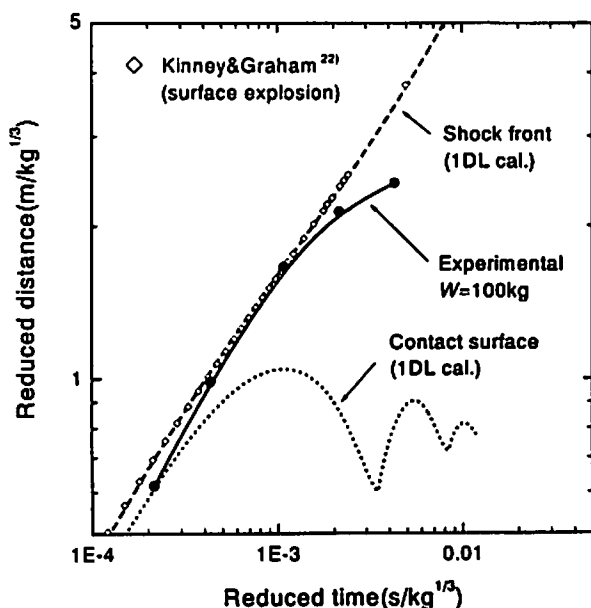


Fig. 6 Calculated reduced distances of shock front and contact surface as a function of reduced time for TNT

ぼ同様に進展するが、時間の経過とともに両者の差は広がる。その後、接触面は脈動を繰り返す、衝撃波面はさらに遠方へ伝播する。

次に本実験結果と解析結果との比較を行う。野外実験においては大量薬量(~100kg)のため、衝撃波が撮影される場合がある。それによると、爆発後数ミリ秒の間、衝撃波面は爆発生成気体に密着して伝播する。既に述べたようにTNTの結果では爆発初期のデータ相互の分散はかなり大きい。そのため、ここでは、衝撃波面とほぼ同様の時間変化を示した1985年度の薬量100kgの実験結果をFig. 6に示した。なお、実験結果の半径は、一次元解析結果と比較することを考慮して、生成気体の高さと同様の幾何平均値を使用した。

Fig. 6より衝撃波面(計算値および文献値)と爆発生成気体(TNT 100kgの撮影結果)が分離する換算時間は約 $1 \text{ ms} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ となった。一方、TNT 300kgの撮影結果より、衝撃波が爆発生成気体と分離する時間は $t \approx 6 \text{ ms}$ と報告されている²²⁾。したがって、衝撃波が爆発生成気体から分離する換算時間に関して、両者はほぼ一致することが明らかになった。また、大変興味深い事であるが、衝撃波が生成気体から分離する時刻は、一次元解析によると、生成気体の最大膨張時に対応し、これ以降ガス球は収縮する。すなわち、衝撃波は外向きに伝播するが、ガス球は中心に向かって収縮する。このため、両者の差が大きくなったと解釈することもできる。さらに、Fig. 6より生成気体は一次元解析結果から予想されるガス球の最大半径を越えて膨張していることがわかる。これは、生成気体の形状が、Fig. 1に示すように地表爆発では比較的長時間にわたり凸型であり、半球形と仮定できないためと考えられる。

また、一次元解析からガス球の脈動が確認されたが、実験結果から生成気体は緩やかに膨張を続けることが示された。水中爆発の場合には、高速度写真撮影から生成ガス球の脈動現象が観察される。そして、生成ガス球の再膨張時に2次衝撃波(水中爆発では気泡パルスとも呼ばれる)が発生するが、これは水中衝撃波の計測より容易に確認できる。野外実験におけるTNT地表爆発では、圧力計による爆風圧計測より2次衝撃波が認められる場合があることから²³⁾、爆発生成気体の脈動現象は間接的に示唆される。しかしながら、本実験結果では確認できなかった。今後、地表爆発による爆発生成気体の膨張状況および脈動現象について実験および数値解析の両面からの検討が必要である。実験面では衝撃波面も含めて精度良く爆発生成気体の境界面を可視化しデータを収集すること、数値解析面では2次元コードを用いて解析を実施して実験

結果と比較検討することなどが必要であると考えられる。

6. まとめ

野外実験において実施された地表爆発の撮影結果を整理し、爆発生成気体の高さおよび半径の時間変化を実験式により補間し、実験毎に高さおよび半径方向の補間パラメータを算出した。実験点数が3点以上存在する薬種に関し、薬種毎にデータをまとめ、それぞれの膨張特性を考察した。新桐ダイナマイト、ANFOおよびTNTに関してはデータの分散が存在するものの生成気体の換算高さと換算時間において相似則がほぼ成立することが確認された。また、爆発生成気体の半径に対する高さの比(H/R)は、時間に対しほぼ一定であり、多くの場合 $H/R=1$ であった。これは爆発薬の形状を反映していると考えられる。生成気体の高さおよび H/R に見られるデータの分散は、換算爆発高さおよび起爆位置に依存することが考察された。含水爆薬A、BおよびCに関しては、装薬状態、起爆条件などが一定でないため、非常に大きな分散が存在し、相似関係を確認することは困難であった。一次元ラグランジュ流体力学計算コードにより衝撃波面および接触面の時間変化を解析し、TNT 100kgの実験結果と比較した。その結果、衝撃波が爆発生成気体から分離する時刻は、一次元解析による結果とほぼ一致することを明らかにした。また、一次元解析からは爆発生成ガス球の脈動が示されたが、実験結果では爆発生成気体は単調に増加し、脈動現象は観察されなかった。今後精密な実験データの収集および2次元数値解析により膨張状況および脈動現象を考察することが必要である。

文 献

- 1) 例えば、F. パスキルおよびF. B. スミス著、横山長之翻訳、「大気拡散(原著第3版)」, 近代科学社(1995), および浅田忠一, 他監修「原子力ハンドブック」, オーム社(1989)の第IX編, 5章環境.
- 2) K. E. Gould, "High explosive field tests - explosion phenomena and their environmental impact", DNA 6187F, Director, Defense Nuclear Agency, Washington, D. C. (1981)のp. 33-43.
- 3) H. W. Church, "Cloud rise from high-explosives detonations", SC-RR-68-903, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico, June (1969).

- 4) 通商産業省・工業技術院, 北海道における多量爆薬爆発実験報告(1962).
- 5) 水島容二郎, 「高速度写真による爆発の解析」, 北海道における多量爆薬爆発実験報告別冊第1(1962).
- 6) 通商産業省・工業技術院, 滋賀県(饗庭野)における爆発実験報告(1963).
- 7) 水島容二郎, 「高速度写真による爆発の解析」, 滋賀県(饗庭野)における爆発実験報告(別冊報告)(1963).
- 8) 通商産業省・工業技術院, 昭和42年滋賀県(饗庭野)における爆発実験報告(1968).
- 9) 同上, 昭和46年度上富良野(北海道)爆発実験報告書(1972).
- 10) 同上, 昭和47年度日出生台(大分県)爆発実験報告(1973).
- 11) 同上, 昭和48年度岩手山(岩手県)爆発実験報告書(1974).
- 12) 同上, 昭和50年度日出生台(大分県)爆発実験報告書(1976).
- 13) 同上, 昭和51年度上富良野(北海道)爆発実験報告書(1977).
- 14) 同上, 昭和60年度岩手山(岩手県)火薬類の保安技術実験報告書(1986).
- 15) 同上, 昭和61年度日出生台(大分県)火薬類の保安技術実験報告書(1987).
- 16) 水島容二郎, 工業火薬協会誌, 35, 78(1974).
- 17) 田中克己, 化学技術研究所報告, 85, 209(1990).
- 18) C. L. Mader, "Numerical modeling of explosives and propellants, second edition", CRC Press LLC(1998).
- 19) L. E. Fried, W. M. Howard, and P. C. Souers, Cheetah 2.0 User's Manual, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-MA-117541 Rev. 5(1998).
- 20) 文献7)のp. 15.
- 21) 文献11)のp. 126.
- 22) G. F. Kinney and K. J. Graham, "Explosive shocks in air", p. 254, Table XI, Springer-Verlag(1985).
- 23) 文献5)のp. 30.
- 24) 吉田正典, 角館洋三, 飯田光明, 石川昇, 藤原修三, 日下部正夫, 工業火薬協会誌, 46, 245(1985)のFig. 3を参照のこと.

Expansion of explosion products by the surface burst of explosives in the field tests

Yoshio NAKAYAMA*, Masatake YOSHIDA*, and Syuzo FUJIWARA*

Results of high-speed photographs of surface burst of many kinds of explosives in the field experiments were summarized and the time histories of height and radius of the explosion products were examined. As a result, a cubic root similarity was recognized in the data for sin-kiri dynamite, ANFO and TNT. The height to radius ratio of explosion products (H/R) were found to be almost constant value of unity and the variation in the data was considered to be due to the effects of the reduced height of burst or the initiation positions. A numerical calculation by the one-dimensional Lagrange code was conducted and it was found that the calculated separation time of shock wave from the explosion products agreed well with the observed data. Furthermore, pulsation of explosion products was shown in the one-dimensional calculation. However the explosion product was monotonically expanded and no pulsation was observed in the experimental results.

(*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Higashi 1-1-1 Tsukuba Central Five, Tsukuba, Ibaraki 305-8565, JAPAN)