

で与えられている。 R は爆源からの距離で、 W は半球形 TNT の薬量である。空気では Mach 数を M とすると P_1 は

$$P_1/P_0 = 1 + \frac{7}{6}(M^2 - 1) \quad (2)$$

で与えられる。したがって、(1)式よりピーク過圧を求め、次に(2)式より Mach 数を求めると爆源からの距離に対する衝撃波速度 U_1 が概算できる。このようにして求めた U_1 より OBQ コードの初期メッシュ間隔 ΔR は、衝撃波が 10cycle で 1メッシュ進むように $\Delta R = 10U_1 \Delta t$ とした。 Δt は時間メッシュで解析の安定条件を満足するように計算の実行中に変化しており、その最大と最小の比は 2 程度である。OBQ コードによる TNT 25~70kg の爆風の解析のメッシュ総数 900、 Δt を 20 μ s、またはそれ以下として約 150ms まで行った。この場合、 ΔR は爆源付近で約 1m、遠方では約 8cm である。解析誤差は Δt 、 ΔR を変えた場合の結果よりピーク過圧に対して 2~3% と推定される。

解析において空気は理想気体とし解離は無視した。空気の圧力、温度は、Gordon-McBride³⁾の温度の多項式で表された内部エネルギーと理想気体の式より求めた。初圧 P_0 は 1.013 bar である。

TNT の爆轟ガスの状態式は、田中⁹⁾の KHT (Kihara-Hikita-Tanaka) コードにより Mader の HOM 型に変換したものを使った。爆轟ガスの状態式のパラメータのうち、爆発エネルギーが爆風解析に最も大きな影響を与える事が知られている。TNT では、KHT による計算で求められる爆発エネルギーは初期密度の低下に伴い減少する。TNT の密度は昭和 59 年度の 70kg の鋳造 TNT の形状より 1.53g/cm³ としたが、実験に使用した TNT の密度は、必ずしも一定ではない。密度 1.53g/cm³ 爆轟ガスの KHT-HOM 状態式を Table 1 に示す。解析においては TNT は瞬間的に等容積のガスになるとした等容爆発モデルを用い、爆轟伝播は考慮しなかった。また起爆に使用したペントライトブースターは TNT におきかえ、導爆線は無視した。また、

Table 1 KHT-HOM parameters for TNT of an initial density of 1.53g/cm³. Numbers in parentheses indicate powers of 10.

| | | | | |
|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| A | B | C | D | E |
| -3.70437 (+0) | -2.37410 (+0) | 3.26803 (-1) | -3.51708 (-2) | -1.31669 (-3) |
| L | M | N | O | P |
| -1.51574 (+0) | 4.72530 (-1) | 7.83987 (-2) | 6.11902 (-3) | 1.73243 (-4) |

$$\ln P_1 = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + Ex^4 \quad (P_1: \text{Mbar}),$$

$$\ln (E_1 + 0.1) = L + My + Ny^2 + Oy^3 + Py^4 \quad (E_1: \text{Mbar} \cdot \text{cc/g}),$$

where $x = \ln V$ (cc/g) and $y = \ln P_1$.

解析では地表爆発は全て地面を剛体と仮定し、薬量が 2 倍の空中爆発とした。

TNT の薬量 W を 70.66kg とし、 $2W$ の薬量の空中爆発による爆風圧力と換算距離 ($R/W^{1/3}$) の解析結果を Fig. 1 に示す。薬量 W が 26.12kg、42.1kg についても解析したが爆風圧力と換算距離の関係は爆源近傍を除いて区別できないので省略した。なお、大気圧を実験条件の 0.954 bar とした場合、解析により求められた爆風の静水過圧は、同一距離で 2% 程度低くなる。Fig. 1 には昭和 59 年度のこれらの薬量の TNT 爆発実験⁷⁾と昭和 60 年度の TNT 100kg の爆発実験⁸⁾の結果及び Kingery の実験式⁴⁾も比較のため示してある。爆風のピークの過圧は Kingery の実験値に比べて約 20% 高いが、距離による減衰の傾向はよく似ている。吉田等⁹⁾の報告にあるように爆発実験で測定された爆風圧力は爆源近傍で Kingery の実験値に近いが、もしくはそれを上回っているが、遠方では Kingery の実験値より低い傾向にある。Fig. 2(a) 及び (b) に TNT 70.66kg の地表爆発におけるピエゾによる爆風圧の波

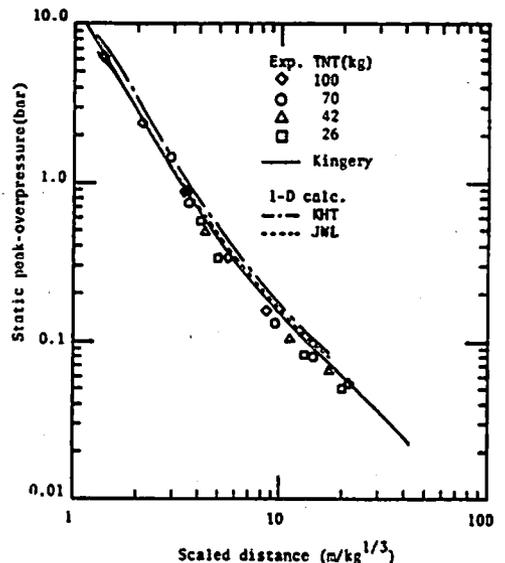
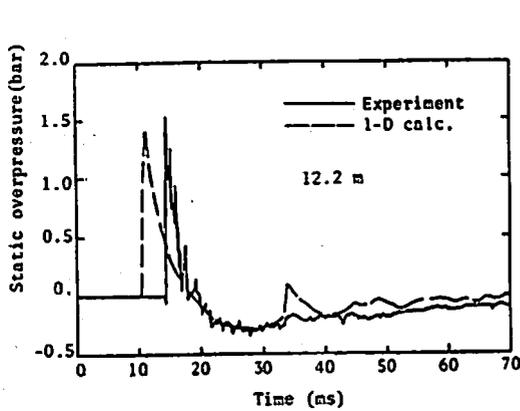
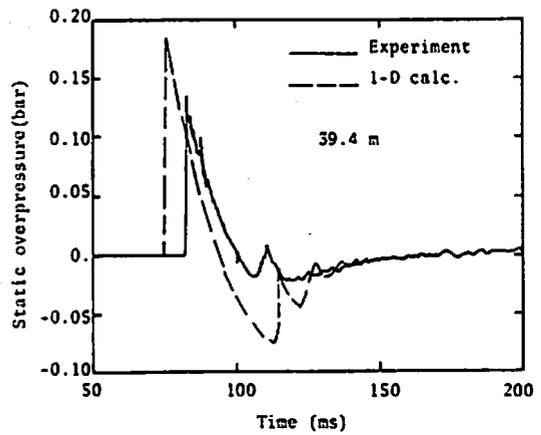


Fig. 1 Static peak-overpressure for the blast wave of a cast TNT as a function of scaled distance.



(a)



(b)

Fig. 2 Comparison of experimental overpressure-time histories with those calculated using OBQ-KHT for TNT 70.6kg. Experimental records include the initiation delay of 2ms approximately.

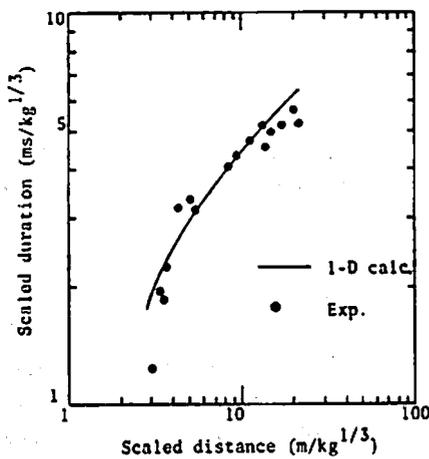


Fig. 3 Comparison of experimentally measured scaled duration of positive overpressure-scaled distance with calculated results using OBQ-KHT for a cast TNT.

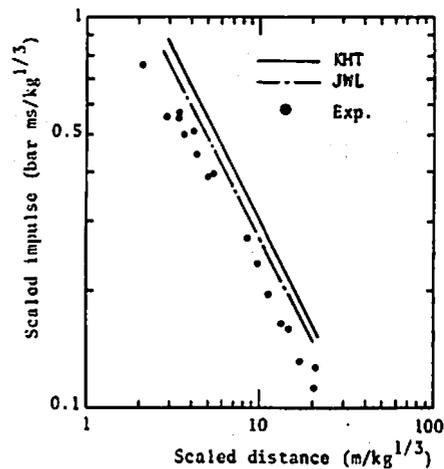


Fig. 4 Comparison of measured scaled impulse of positive overpressure-scaled distance with calculated results using OBQ-KHT for a cast TNT.

形とこれに対応する2倍の薬量の空中爆発の解析結果の比較を示す。Fig. 3には実験及び解析で得られた正圧の持続時間と距離の関係を示す。爆源近傍の12.2 mではFig. 2(a)に示すようにピーク過圧は概略一致しているが、衝撃波の到達時間は解析では爆発後11msであるのに対し、実験では約14msとやや遅い。但し、ここで使用した全ての実験値には約2msの起爆遅れが含まれている。解析による正圧の持続時間は実験値の約1.5倍となっている。また、負圧の最大値は実験結果と解析結果で一致しているようだが、Peteと呼ばれる水中爆発におけるパルパルスに相当する二次衝撃

波は実験では観測されていない。遠方ではFig. 2(b)の40m付近の結果に示されるように解析結果に比べて実験値はピーク過圧が低く到達時間も82ms程度で解析値に比べて7ms、起爆遅れを考慮しても5ms程度遅い。解析により求めた正圧の持続時間は実験値に近いやや長い。また、負圧の絶対値は実験値の方が低く、二次衝撃波が形成される時間も実験値の方が短い。

Fig. 4に正圧のインパルス ($I = \int (P - P_0) dt / W^{1/3}$) の実験と解析の結果を示したが、解析結果の方が爆風圧が高く持続時間も長いいため高くなっている。

3. 考 察

解析で得られたピーク過圧、インパルス等の実験値との違いについては

- (1) 空気を理想気体とし、解離を無視した。
- (2) 等容爆発を仮定、爆轟伝播を考慮しなかった。
- (3) KHTによる爆轟ガスの状態式が不適当であった。
- (4) 実験で生じた爆風が球面波ではなく、またクレータの形成や地表の乱れによるエネルギー損失が大きかった。

等の理由が考えられる。

(1)については空気にKH式(木原一正田式)を適用して解析した結果と比較しても結果はほとんど同じであった。空気の解離については考慮していないが、爆源から12.2mのところでの70.7kgのTNTの地表爆発による温度上昇は約100度で、解離は爆源近傍でのみ起こると思われる。

(2)については球面爆轟波による解析を行って比較したところ、爆源近傍でのピーク過圧が大きくなったが、遠方ではほとんど同じ結果であった。

(3)についてはJWL(Jones, Wilkins, Lee)式による解析結果と比較した。JWL式はシリンダーテストによる実験で求められたものでMie-Grüneisen式の形をしている。JWL式は圧力 P を比体積 $V(=v/v_0)$ と初期単位体積当たりの内部エネルギー E より

$$P = P_i(V) + \frac{\omega}{V} (E - E_i)$$

で与える。ここで P_i は等エントロピー膨張の圧力で

$$P_i(V) = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + C/V^\omega$$

$$E_i(V) = \int_V^\infty -P_i dV - E_0$$

で与えられる。 $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ は定数である。JWL式は爆轟ガスの状態式の標準として広く利用されているが、爆薬ごとに実験を行って定数を決定する必要がある。TNTは密度が 1.63g/cm^3 のものしか公表されていないので、これを使用した。 E_0 は $0.06\text{Mbar} \cdot \text{cm}^3/\text{cm}^3$ で、 880cal/g の爆発エネルギーに相当する。KHTでは密度 1.53g/cm^3 のTNTは 1090cal/g の爆発エネルギーを与えておりJWLより約20%高い。JWL式を用いて解析したピーク過圧と換算距離の関係をFig.1に示したが、KHT式による解析結果とKingery等の実験結果の中間にあり、遠方では爆発実験の結果よりやや高い。JWL式を用いた結果をFig.2に示したKHTを用いた爆風圧力の時間変化と比較するとピーク圧のごく近傍のみ異なるだけでほとんど区別できない。したがって、持続時間もほとんど

と同じである。正圧のインパルスはFig.4に示すようにJWL式を用いた結果の方がやや低いが、爆発実験の結果よりは高い。

以上(1), (2), (3)の理由についての考察は、Sternberg等¹¹⁾の解析結果から見ても妥当なものと考えられる。

(4)については爆薬の形状及び爆源の地表面からの高さ(以下HOB, Height of Burst)、起爆の方法、地表や土質の影響を考慮する必要がある。昭和59年度のTNTの地表爆発におけるクレータの大きさは報告書には記載されていないが、同時に行った100kgの含水爆薬の実験で生じた直径2~3m、深さ約1m程度のクレータと同程度であったと思われる。この程度のクレータの形成に要した爆薬のエネルギーは不明である。しかし、クレータの容積と地表面に作用した圧力から推定すると、地面に吸収されたエネルギーはこの場合爆薬の全エネルギーの高々2~3%もしくはそれ以下と考えられる。

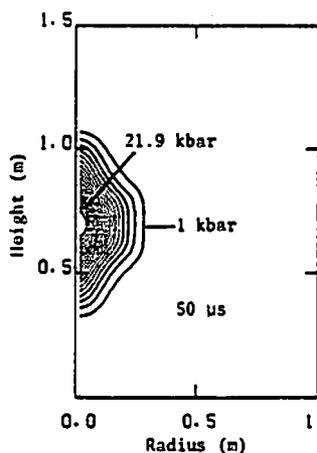
爆薬の形状やHOBの影響を検討するため、二次元Euler流体力学コードDAME2を使用した。

DAME2は複数の物質を含む流体力学解析を行うもので、擬似粘性法とDonor-Acceptor法を併用した差分法により衝撃波を解析する。解析においては爆轟ガスと空気が混合しているメッシュ点を生ずる。混合メッシュ点の圧力は混合物質の圧力が平衡になるとして求めた。

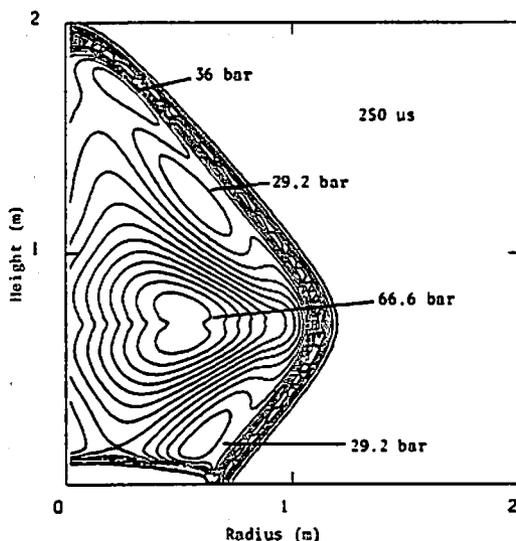
爆薬の形状及びHOBは報告書⁷⁾及び文献⁹⁾に記載されている。TNT 70.66kg (TNT 69.3+ベントライト 1.36kg)を使用した実験では高さ518mmの木製装薬台上に直径375mm、長さ418mmの円筒状の鋳造TNTを設置し、ベントライトブースターを導爆線で起爆した。計測に使用したピエゾは地表から約1mの高さに設置されているが、地表は平坦ではないため爆源からみた高さはピエゾにより異なっていたと思われる。

解析は軸対称の円筒座標系で行った。メッシュは軸方向(Z)、径方向(R)を各200に等分割した正方形である。解析は最初メッシュ幅を2cmとして行い、次の計算では2倍の4cmに再分割して解析を続行し、メッシュ幅16cmの場合まで4段階に解析を分けて半径32mまでの爆風の解析を行った。初期条件及び状態式はOBQに使用したものと同じで爆轟ガスにはKHT-HOMが用いられている。地表は剛体とした。

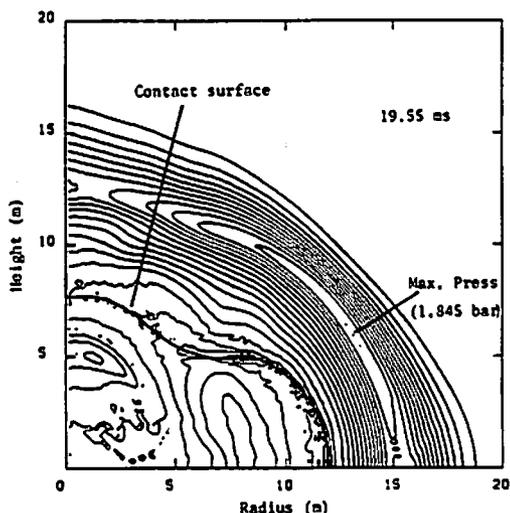
解析結果をFig.5に示す。Fig.5(a)の等圧線に示すように最初は球面波とかなり異なる。ここで、接触面は衝撃波面にほとんど密着している。次にFig.5(b)に示すように爆轟ガスが膨張して地表まで衝撃波が到達すると最大約1kbarの反射波を生ずる。ある距離まで衝撃波がひろがるとMach反射を生じ、三重点が最



(a) 0.95 kbar interval



(b) 3.4 bar interval



(c) 0.0644 bar interval

Fig. 5 Isobars calculated using DAME 2-KHT for the blast wave of a cast TNT 70.66 kg.

大の圧力となる。

三重点の位置は衝撃波の伝播とともに上昇する。また、地表からの反射波が上方へ伝播していく。その結果 Fig. 5(c)に示すように衝撃波面における圧力は位置により異なり、最大圧力点は上方へ移動していく。Fig. 5(c)では衝撃波面の立ち上がりが擬似粘性によりゆるやかになっている。Fig. 5に示した解析結果の誤差の検討は行っていないが、DAME 2による他の解析結果から圧力に対しても約5%程度の誤差があると考えられる。

DAME 2で解析した範囲内に設置されたピエゾによる爆風圧の計測値と比べると Table 2に示すように

一次元計算のOBQと比べて実験値に近くなる。特に近傍での正圧の持続時間が実験値とよく一致する。ここで、最大圧力点はピエゾの設置位置よりかなり高い所にある。しかし、二次元解析における負圧部の波形はOBQに近く、完全には実験値と一致していない。

以上より、もし解析に爆轟伝播やクレータの形成、地形の影響を考慮すればもう少し違った結果になるかもしれないが、二次元解析の結果から一次元解析の結果と爆発実験による測定結果との違いは吉田等⁹⁾が指摘しているように、主として爆薬の形状及びHOBの影響によるものと考えられる。

4. 結論

Table 2 Comparison of the calculated results with blast wave measurements for TNT.

| Distance (m) | ΔP_s a) (bar) | θ , b) (ms) | I , c) (bar·ms) | t_a d) (ms) |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| 12.2, exp't. | 1.434 | 5.16 | 2.38 | 14.4 |
| 1—D calc. | 1.428 | 7.54 | 3.58 | 11.0 |
| 2—D calc. | 1.40 | 5.5 | 2.6 | 11.5 |
| 14.9, exp't. | 0.749 | 9.41 | 2.07 | 19.8 |
| 1—D calc. | 0.948 | 9.16 | 3.07 | 16.5 |
| 2—D calc. | 0.82 | 9.5 | 2.3 | 17.5 |

a) Static peak-overpressure.

b) Duration of positive static overpressure.

c) Impulse of positive static overpressure.

d) Time of arrival of shock wave.

* Experimental data include the initiation delay of about 2 ms.

一次元の球面波モデルによる爆風圧力は、実験値と比べてピーク過圧が近傍では一致しているが、遠方では約25%高い結果を与える。正圧のインパルスは全体的に解析値の方が30%以上高い。持続時間は爆源近傍で解析値が実験値の約1.5倍となっており、衝撃波の到達時間は解析値の方が早い。以上の一次元解析と実験との違いは爆轟ガスの状態式をJWL式に変えても完全には説明できない。一方、二次元流体力学解析の結果は実験結果と概略一致することから爆発実験において測定されたTNTの爆風圧力は、爆源に近いほど爆薬の形状及び爆源の地表面から高さによる影響を受けていると考えられる。

文 献

- 1) Tanaka, K., 'One dimensional Lagrangian hydrodynamic program for the blast wave', National Chem. Lab. Ind., unpublished (1982)
- 2) Tanaka, K., 'Multi component two dimensional Eulerian hydrodynamic program', *ibid*, unpublished (1984)
- 3) Mader C. L., 'Numerical Modeling of Detonation', Univ. Calif. Press (1979)
- 4) Kingery, C. N. and Pannil, B. F., BRL Memorandum Report No. 1518 (1964)
- 5) Gordon, S. and McBride, B. J., NASA SP-273 (1971)
- 6) Tanaka, K., 'Detonation properties of condensed explosives computed using the Kihara-Hikita-Tanaka equation of state', National Chem. Lab. Report, (1983)
- 7) 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, 昭和59年度火薬類の保安技術実験報告書, (1985)
- 8) 同上, 昭和60年度報告書, (1986)
- 9) 吉田正典, 工火誌, 48, 245 (1985)
- 10) Lee, E. L., Hornig, H. C. and Kury, J. W. 'adiabatic expansion of high explosive detonation products', Lawrence Radiation Lab. Report UCRL 50422 (1968)
- 11) Sternberg, H. M. and Hurwitz, H., Sixth Symp. (International) on Detonation ACR-221, Dept. Navy, U. S., (1976)

**Numerical Study on the Blast Wave of TNT Explosion
with Low Height of Burst.**

**Katsumi*, TANAKA*, Masatake YOSHIDA*, Yozo KAKUDATE*,
Mitsuaki IIDA*, Yoshio NAKAYAMA*, Katsutoshi AOKI*,
Noboru ISHIKAWA* and Shuzo FUJIWARA***

Experimental results of field experiments for the blast wave of a cast TNT are compared with numerical analysis by using KHT equation for detonation products and ideal gas equation for the air. One dimensional Lagrangian hydrodynamic calculations by a finite difference method using artificial viscosity have shown that at the distance far from explosion source, the predicted static peak-overpressures are 25 to 30% higher than those of experimental results for the blast waves of TNT charges of about 25 to 100kg which were initiated near the surface of ground with scaled height of burst of $0.18 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$.

JWL equation of state for detonation products also does not reproduce the experimental results.

Numerical results of 2-D Eulerian hydrodynamic analysis have been favorably compared with experimental results.

It is concluded that the complicated reflections of shock waves generated near the explosion of cylindrical charge give significant effects to blast waves.

(*National Chemical Laboratory for Industry, Tsukuba Research
Center, Tsukuba, Ibaraki-305)