# 硝安の非理想爆轟に関する研究(第3報)

## マイクロブリルの爆轟圧力に及ぼす密閉・薬径効果

三宅淳巳\*,小川輝繁\*, 齋藤修二\*\*, 吉田信生\*\*\*

肉厚と内径の異なる種々の鋼管中でマイクロブリル硝安を起爆し、マンガニンゲージを用い た計測システムによって**爆癌時**の圧力波形を測定した。

その結果、爆速同様密閉強度、薬径の増加とともにピーク圧力は上昇するが、密閉強度よりも薬径の方が爆轟圧力への影響は大であることがわかった。また爆轟圧力が薬径の逆数と直線関係にあると仮定し、実験結果の外挿により無限大薬径を想定した場合のピーク圧力を求めたところ P = 3.1 GPaが得られた。

次に各試験条件における爆速と爆轟圧力から爆轟ガスの7値を算出したところ、密閉強度を変えても7値は変わないのに対し、薬径効果は顕著にみられ、無限大薬径における7値は2.90と得られ、TIGERコードによる爆轟特性計算結果と良好な一致を示した。

#### 1. 緒 質

研安はそれ自身単体で他の有機物と混合しない状態であっても、特定の条件が満たされた場合には爆轟を生じ爆薬に匹敵する成力を呈することは明らかである。 しかし高性能爆薬とは異なり、通常の状態では容易に理想爆轟には遠せず、多くの場合非理想爆轟を生ずることが知られている。

研安の非理想爆轟に関しては、その物性や試験条件によって爆速が変化すること、また密閉強度及び薬径の増加に伴って爆速は上昇するが、前者に比べ後者の方が爆速に及ぼす影響が大きいことを前報までに報告した<sup>1333</sup>。

本報では、爆轟パラメータのうち爆轟圧力に着目し、その直接測定を試みた。従来軽縮系爆発性物質の爆轟圧力の測定には適当なセンサーがなく、自由面速度等の測定によりウゴニオ関係式を用いて間接的に算出するのが一般的であったが、近年高感度のピエゾ抵抗薬子を用いることにより、爆轟波における衝撃波圧力を直接的に測定する試みが為され、比較的精度の良いデータが報告されるようになった()。しかし硝安の場

1991年9月6日受理

\*横浜国立大学工学部物質工学科 〒240 横浜市保土,谷区常盤台 156 TEL 045-335-1451

\*\*神岡鉱漿㈱

〒506-11 岐阜県吉城郡神岡町大字鹿間 1-1 TEL 0578-2-5385

\*\*\*日本化薬㈱姫路工場 〒679-21 姫路市豊宮町豊富 3903—39 TEL 0792-64-3001 合には定常爆轟を得るのに密閉強度や大薬量を必要とするため精密な測定が困難で、爆轟圧力に関する報告例は皆無である。そこでここでは肉厚及び内径の異なる鋼管中で起爆したマイクロブリル硝安の爆轟圧力をマンガニンゲージを用いた圧力計測システムにより測定し、鋼管の密閉強度及び薬径が爆轟圧力に及ぼす影響について系統的に検討した。さらに測定結果をTIGERコードによる計算結果と比較し、硝安の爆轟の非理想性について検討を行なったので報告する。

### 2. 試 车

本試験で用いた試料は、一般にANFO用に用いられるマイクロブリル硝安である。試料の物性をTable Iに示す。

## 3. 試験方法

## 3.1 マンガニンゲージの較正

マンガニンは、銅、マンガン、ニッケルより成る合金で、比抵抗が高く、抵抗値の温度係数が小さいため理想的な抵抗体であると共に、加えられる圧力値と抵抗変化率が広範囲にわたって直線関係を示すなど、高圧力下での測定に適したピエゾ抵抗索子である。こでは、硝安の爆轟圧力が高々5GPa程度であると予想されることから<sup>21</sup>この圧力範囲をカバーするゲージとして米国 Dynasen社のマンガニンゲージ(Model:MN 4-50-EK)を用いた。本品は抵抗が約50Qのマンガニン細線が約目状に成形され、フォトエッチングによりベース材であるポリイミド系のカード線に接続されている。受圧面の寸法は3.8×3.8mm、厚さは約10μm

で、ベース材を含めたゲージの厚さは約60µmである。 尚、本品の立ち上がり時間は50 nsec 以下であるとされている5。ゲージには瞬入時にメーカーから抵抗変化率対圧力の較正曲線が旅付されてくるが、本研究で対象とする圧力範囲の正確なデータが不明なため両者の関係を再較正した。10 GPa 以下の圧力領域では両者の関係は1次式で表わし得ることから6、ベントライトと PMMA (Polymethyl methacrylate) 樹脂を用いたカードギャップテストによって任意の衝撃波圧力を発生させ7、その際の抵抗変化率を測定することにより、5 GPa 以下の圧力範囲において以下の関係式を得た。尚ここで用いた PMMA は住友化学工業㈱製スミ

Table 1 Physical properties of used ammonium nitrate.

Loading density [kg/m²]	800 - 850
Purity [wt. %]	>99.0
Water content [wt. %]	0.09
Nitrogen content [wt.%]	33.8
Particle distribution [wt. %]	
< 350 μm	1
350 - 600	13
600 - 850	32
850 - 1000	52
> 1000	2

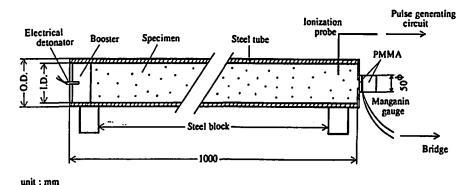


Fig. 1 Experimental set-up for pressure measuring system using the piezo-resistive manganin gauge.

ベックス(JIS K6718相当)で、その初期密度は1185kg *伝*である。

$$P = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R} \tag{1}$$

ここで.

P: 衝壁波圧力(GPa)

K: ピエソ抵抗係数(=1.82×10<sup>-2</sup> GPa<sup>-1</sup>)

 $\Delta R$ : 抵抗変化量(Q) R.: 初期抵抗値(Q)

#### 3.2 圧力測定系

試験装置及び圧力測定系の概略をFig.1に示す。前報において爆速測定に用いたものと同等の鋼管に試料を装填した。即ち肉厚5~30mm,内径50~300mmで,管長は1000mmである。ブースターには水中発破用のGX-1ダイナマイトを用い,6号電気雷管1本または内径が200mm以上の場合には7本の再爆線によりこれを起爆したが。

研安の起爆によって発生した爆轟波の圧力は、起爆 源とは反対側の管端に設置したマンガニンゲージによ って測定する。予備実験により、圧力測定が完了する 以前に受圧素子やリード線が変形または破損したり、ゲージを含めた測定回路の一部が爆高波との接触により短絡した場合には適切な針測が行なわれないことが明らかになっているり。そこで試料とゲージの間に、衝撃波域衰特性が既知であり、かつその初期密度が試料の装填比重に比較的近いPMMA樹脂のギャップを狭み込んで両者を絶縁し、PMMAギャップを通過してきた衝撃波の圧力を測定することとした。ここでは、厚さ10mのギャップを試料とゲージの間に、さらにPMMAと空気との衝撃インピーダンスの相違による希薄波の影響を除くために厚さ30mmのギャップをゲージの後方に置いて、両者でゲージを固定した。

衝撃波の到達によりマンガニンゲージの抵抗が変化し、ゲージとその他の抵抗で構成されたホイートストンブリッジのバランスが崩れて回路内に電流が生じる。このときの抵抗変化量を測定し、(1)式により圧力値を算出する。尚長時間の通電は抵抗体であるゲージの温度上昇を招き、抵抗値の変化や実験開始以前のバランスの乱れ、さらにはゲージ自身に損傷を与える可能性もあるため、ゲージを含むブリッジ回路への通電時間

は100µsec とし、イオンギャップを用いたパルス発生回路により爆轟波到達直前(実際には約10µsec 前)にブリッジをトリガーした。ブリッジからの出力はトランジェントレコーダ(Panasonic:VP-5742A)に導かれ、パソコン(EPSON:PC-286LS)によりデータを処理した。

一方、以上の測定で得られる圧力値は硝安自身の爆 臨圧力ではなく、PMMAギャップを通過してくる衝 撃波の圧力であるためPMMA 10m分の圧力減衰の補 正を行なう必要がある。そこで内径100mm、肉厚20mm、 管長1000mの鉄管中に装填した試料を本試験同様に起 爆し、他端に試料に接して固定した直径、長さともに 100cmのPMMA円柱中を通過する衝撃波をストリー クカメラで攝影し、衝撃波破寂特性について検討した。 その結果、試料とPMMAの接触面から25mm付近まで は衝撃波速度には殆ど変化が認められず(=3.9㎞/s)。 故にこれ以下の厚さのPMMAであれば、実際上接触 面における圧力値と等しいとみなせることがわかった 8)。これは硝安の分解反応速度が遅く,また反応帯長 が長いため圧力ピーク以降の圧力減衰が小さいという 非理想爆轟の特徴のひとつと考えられるが、詳細は現 時点では明らかではない。しかしこれにより、試料と PMMA の境界面においてインピーダンス・マッチン グ法を適用することにより、以下の式を用いて硝安の 爆轟圧力の算出が可能となった<sup>9)</sup>。

$$\frac{P_{AN}}{P_P} = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_o D}{\rho_P U_P} + 1 \right) \tag{2}$$

ここで

P<sub>AN</sub>, P<sub>P</sub>: 硝安及びPMMA中の衝撃波圧力(GPa)

ρ。, ρ<sub>P</sub>: 硝安及びPMMAの初期密度(kg/ ㎡)

D:硝安の爆速測定値(km/s)

Up: PMMA中の衝撃波速度(las/s)

## 4. 試験結果及び考察

試験は爆速同様、鋼管の内径を一定(100mm)とし、 肉厚を変化させることにより密閉強度の効果を見る試 験と、肉厚を一定(10mm)として薬径の効果を見る試験 の2通りに大別して行なった。

マンガニンゲージによる出力電圧-時間曲線を(1). (2)式によって描き直した圧力-時間波形例をFig.2に示す。衝撃波の到達により圧力が急上昇し、約150 nsecでピーク圧力(2.6GPa)に達している。その後級やかに減衰し、案子の変形に起因すると考えられる抵抗増加により再び上昇がみられた後、ゲージの破壊または測定回路の切断と考えられる突然のスケールオーバーにより測定は終了する。衝撃波の到達から破断までの時間は3~8 µsecであった。尚案子の変形(ひずみ)に基づく抵抗変化分を除去し、衝撃圧力のみを分

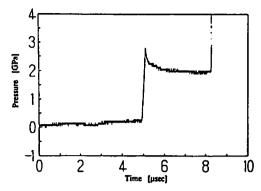


Fig. 2 Typical pressure profile of the detonating micro-prill ammonium nitrate.

離して測定する方法として、コンスタンタンの様なひずみのみに応答する素子を用いて補償する測定法もあるが、ピーク圧の決定には本法で問題無いと考えられる<sup>(0)</sup>。

試験結果の一覧を Table 2に示す。測定された圧力 波形のピーク値を  $P_{col.}$  JCZ 3状態方程式使用時の TIGER コードによる C-J 圧力計算値を  $P_{col.}$  で表わし、両者の比である無次元爆轟圧力  $(P_{col.}/P_{col.})$  を右端に表示した。 表中,装填比低,圧力測定値及び計算値は各  $410 \log/m^2$  , 0.1 GPa , 0.01 GPa 単位で示した。

Fig.3に試験結果を示す。 微軸は各々鉄管の肉厚(a) 及び薬堡(b), 縦軸は測定されたピーク圧力値である。 密閉強度及び薬径の効果については、前報で示した爆速と同様の傾向がみられた。即ち、肉厚及び内径の増加に伴いいずれも圧力値の上昇が見られるが、密閉強度については鉄管の肉厚が20㎜以上では圧力値の上昇が見られなくなり2.8 GPa前後に収束した。一方薬径効果は顕著で、内径299㎜では最高3.1 GPaが得られた。また内径250~300㎜でも圧力の上昇が認められ、薬径を増すことによってさらに高い圧力値が得られる可能性が示された。

得られた圧力値の精度に関しては、マンガニンゲージを含めた計測システムの精度に加え、試料自体の粒度分布や装填比重の不均一等を考慮する必要がある。また(2)式によって実測された圧力値から确安の圧力を算出する際に、Upの値を一定値(3.9km/s)とおいて計算を行ったが、これは本来ピーク圧に対応した衝撃波速度を用いるべきである。実験設備上の制約により内径100mm、肉厚20mmという条件でしかPMMA中の衝撃波伝播挙動を観察することはできず、やむを得ずUpの値を一定としたが、この場合Upを一定とみなすと、上記の鉄管中での硝安の爆速(3.0km/s)よりも高爆速が得られる試験条件の時にはUpも3.9km/s以上

Table 2 Peak pressures of micro-prill ammonium nitrate.

Corner   C			lable 2	Peak press	sures of micro	o – prili ammo	nium nit	rate.	
1000	I.D. (mm)	O.D. (mm)	thickness	length		density	Pob. (GPa)	P** (GPa)	$P_{\text{ob}}./P_{\text{cal}}.$
1000	100	110	5	1000	600	810	2.0	3.11	0.64
1000   600   840   1.8   3.36   0.54				1000	600	820	1.8	3. 19	0.56
98         114         8         1000         600         830         2.1         3.28         0.65           100         120         10         1000         600         840         2.2         3.36         0.65           100         120         10         1000         600         840         2.1         3.36         0.63           1000         600         840         2.2         3.36         0.63         0.65           1000         600         840         2.2         3.36         0.65           1000         600         840         2.2         3.36         0.63           1000         600         840         2.2         3.36         0.63           1000         600         820         2.3         3.19         0.72           1000         600         820         2.6         3.19         0.82           1000         600         820         2.6         3.19         0.89           1000         600         820         2.7         3.02         0.89           1000         600         800         2.7         3.02         0.89           1000         600 <t< td=""><td></td><td></td><td></td><td>1000</td><td>600</td><td>830</td><td>1.9</td><td>3.28</td><td>0.58</td></t<>				1000	600	830	1.9	3.28	0.58
1000   1000   6000   840   2.2   3.36   0.65		ļ		1000	600	840	1.8	3.36	0.54
1000   1000   6000   840   2.2   3.36   0.65	98	114	8	1000	600	830	2.1	3.28	0.65
1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.2   3.36   0.65     1000   600   840   2.3   3.36   0.65     1000   600   870   2.3   3.36   0.63     1000   130   15   1000   600   820   2.6   3.19   0.82     1000   600   820   2.8   3.19   0.82     1000   600   820   2.8   3.19   0.82     1000   600   830   2.7   3.28   0.82     1001   140   20   1000   600   820   2.6   2.93   0.89     1000   600   820   2.7   3.02   0.89     1000   600   820   2.8   3.19   0.85     1000   600   820   2.8   3.19   0.85     1000   600   820   2.8   3.19   0.85     1000   600   820   2.8   3.19   0.85     1000   600   820   2.8   3.11   0.90     1000   600   800   2.7   3.02   0.89     1000   600   800   2.8   3.11   0.90     1000   150   810   1.4   3.11   0.43     1000   150   840   1.5   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.65     1000   600   840   2.2   3.36   0.65     1000   600   840   2.3   3.36   0.65     1000   600   840   2.2   3.36   0.65     1000   600   840   2.3   3.36   0.65     1000   600   870   2.3   3.60   0.65     1000   600   870   2.3   3.60   0.65     1000   1350   820   2.1   3.19   0.72     1001   1350   820   2.5   3.11   0.80     1002   2400   820   2.6   3.19   0.82     247   267   10   1000   3650   800   2.7   3.02   0.89     1000   3650   800   2.7   3.02   0.89     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.11   0.90     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.11   0.90     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.11   0.90     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.19   0.88				1000	600	840	1	3.36	0.65
1000   600   840   2.2   3.36   0.65     1000   600   840   2.3   3.36   0.68     1000   600   870   2.3   3.36   0.68     1000   600   870   2.3   3.36   0.68     1000   600   820   2.6   3.19   0.82     1000   600   820   2.6   3.19   0.88     1000   600   820   2.8   3.19   0.88     1000   600   830   2.7   3.28   0.82     1001   140   20   1000   600   800   2.7   3.02   0.89     1000   600   820   2.8   3.19   0.88     1000   600   820   2.8   3.19   0.85     1000   600   820   2.8   3.19   0.85     1000   600   820   2.7   3.02   0.89     1000   600   820   2.8   3.19   0.85     1000   600   800   2.7   3.02   0.89     1000   600   800   2.8   3.02   0.93     1000   600   810   2.8   3.11   0.90     50   70   10   1000   150   790   1.4   2.93   0.46     1000   150   840   1.5   3.36   0.45     1000   150   840   1.5   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     148   168   10   1000   1350   820   2.3   3.19   0.72     1000   1350   820   2.3   3.19   0.78     199   219   10   1000   2400   820   2.6   3.19   0.82     247   267   10   1000   3650   800   2.7   3.02   0.86     1000   3650   800   2.7   3.02   0.86     1000   3650   800   2.7   3.02   0.86     1000   3650   800   2.7   3.02   0.88     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.11   0.90     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.11   0.90     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.19   0.88	100	120	10	1000	600	840	2.1	3.36	0.63
1000				1000	600	840	2.1	3.36	0.63
100				1000	600	840	2.2	3.36	0.65
100				1000	600	840	2.3	3.36	0.68
1000   600   820   2.6   3.19   0.82				1000	600		2.3	3.63	0.63
1000	100	130	15	1000	600	820	2.3	3. 19	0.72
100				1000	600	820	2.6	3. 19	0.82
100         140         20         1000         600         790         2.6         2.93         0.89           1000         600         800         2.7         3.02         0.89           1000         600         820         2.7         3.19         0.85           100         160         30         1000         600         800         2.7         3.02         0.89           1000         600         800         2.8         3.02         0.93         0.93           1000         600         810         2.8         3.11         0.90           50         70         10         1000         150         790         1.4         2.93         0.46           1000         150         810         1.4         3.11         0.43         0.45           100         120         10         1000         600         840         2.1         3.36         0.63           1000         600         840         2.1         3.36         0.65           1000         600         840         2.2         3.36         0.65           1000         600         840         2.3         3.63 <t< td=""><td></td><td></td><td></td><td>1000</td><td>600</td><td>820</td><td>2.8</td><td>3. 19</td><td>0.88</td></t<>				1000	600	820	2.8	3. 19	0.88
1000   600   800   2.7   3.02   0.89     1000   600   820   2.7   3.19   0.85     1000   160   30   1000   600   800   2.8   3.19   0.88     100   160   30   1000   600   800   2.8   3.02   0.93     1000   600   810   2.8   3.11   0.90     50   70   10   1000   150   790   1.4   2.93   0.46     1000   150   810   1.4   3.11   0.43     1000   150   840   1.5   3.36   0.45     100   120   10   1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.1   3.36   0.63     1000   600   840   2.2   3.36   0.65     1000   600   840   2.2   3.36   0.65     1000   600   840   2.3   3.36   0.66     1000   600   840   2.3   3.36   0.63     148   168   10   1000   1350   820   2.3   3.19   0.72     1000   1350   820   2.5   3.19   0.78     199   219   10   1000   2400   810   2.5   3.11   0.80     1000   2400   820   2.6   3.19   0.82     247   267   10   1000   3650   800   2.7   3.02   0.89     1000   3650   800   2.7   3.02   0.89     1000   3650   810   2.8   3.11   0.90     299   319   10   1000   5400   820   2.8   3.19   0.88				1000	600	830	2.7	3. 28	0.82
1000   600   820   2.7   3.19   0.85	100	140	20	1000	600	790	2.6	2.93	0.89
100				1000	600	800	2.7	3.02	0.89
100         160         30         1000         600         800         2.7         3.02         0.89           1000         600         800         2.8         3.02         0.93           50         70         10         1000         150         790         1.4         2.93         0.46           1000         150         810         1.4         3.11         0.43         0.43           1000         150         840         1.5         3.36         0.45           100         120         10         1000         600         840         2.1         3.36         0.63           1000         600         840         2.1         3.36         0.63           1000         600         840         2.3         3.36         0.63           1000         600         840         2.3         3.36         0.63           1000         600         840         2.3         3.36         0.65           1000         600         840         2.3         3.36         0.63           148         168         10         1000         1350         820         2.1         3.19         0.72				1000	600	820	2.7	3. 19	0.85
1000   600   800   2.8   3.02   0.93				1000	600	820	2.8	3. 19	0.88
50         70         10         1000         150         790         1.4         2.93         0.46           1000         1500         150         810         1.4         2.93         0.46           1000         1500         810         1.4         3.11         0.43           100         120         10         1000         600         840         2.1         3.36         0.63           1000         600         840         2.1         3.36         0.63         0.65           1000         600         840         2.2         3.36         0.65         0.65           1000         600         840         2.2         3.36         0.65         0.65           1000         600         840         2.2         3.36         0.65         0.65           1000         600         840         2.3         3.36         0.68         0.68           148         168         10         1000         1350         820         2.1         3.19         0.72           1000         1350         820         2.5         3.19         0.78           199         219         10         1000	100	160	30	1000	600	800	2.7	3.02	0.89
50         70         10         1000         150         790         1.4         2.93         0.46           1000         150         810         1.4         3.11         0.43           100         120         10         1000         600         840         2.1         3.36         0.63           1000         600         840         2.1         3.36         0.63         0.63           1000         600         840         2.2         3.36         0.65         0.65           1000         600         840         2.3         3.36         0.65         0.65           1000         600         840         2.3         3.63         0.63         0.63           148         168         10         1000         1350         820         2.1         3.19         0.66           1000         1350         820         2.3         3.19         0.72         100         1350         820         2.5         3.19         0.78           199         219         10         1000         2400         810         2.5         3.11         0.80           1000         2400         820         2.6				1000	600	800	2.8	3.02	0.93
1000				1000	600	810	2.8	3.11	0.90
100         150         840         1.5         3.36         0.45           100         120         10         1000         600         840         2.1         3.36         0.63           1000         600         840         2.1         3.36         0.63         0.65           1000         600         840         2.2         3.36         0.65         0.65           1000         600         840         2.3         3.36         0.68         0.68           1000         600         870         2.3         3.63         0.63         0.63           148         168         10         1000         1350         820         2.1         3.19         0.66           1000         1350         820         2.3         3.19         0.72         0.72           1000         1350         820         2.5         3.19         0.78           199         219         10         1000         2400         810         2.5         3.11         0.80           1000         2400         820         2.6         3.19         0.82           247         267         10         1000         3650	50	70	10	1000	150	790	1.4	2.93	0.46
100       120       10       1000       600       840       2.1       3.36       0.63         1000       600       840       2.1       3.36       0.63         1000       600       840       2.2       3.36       0.65         1000       600       840       2.3       3.36       0.68         1000       600       870       2.3       3.63       0.63         148       168       10       1000       1350       820       2.1       3.19       0.66         1000       1350       820       2.3       3.19       0.72         1000       1350       820       2.5       3.19       0.78         199       219       10       1000       2400       810       2.5       3.11       0.80         199       219       10       1000       2400       820       2.6       3.19       0.82         247       267       10       1000       3650       800       2.6       3.02       0.86         1000       3650       800       2.7       3.02       0.89         1000       3650       810       2.8       3.11 <t< td=""><td></td><td></td><td></td><td>1000</td><td>150</td><td>810</td><td>1.4</td><td>3.11</td><td>0.43</td></t<>				1000	150	810	1.4	3.11	0.43
1000       600       840       2.1       3.36       0.63         1000       600       840       2.2       3.36       0.65         1000       600       840       2.3       3.36       0.68         1000       600       870       2.3       3.63       0.63         148       168       10       1000       1350       820       2.1       3.19       0.66         1000       1350       820       2.3       3.19       0.72         199       219       10       1000       2400       810       2.5       3.11       0.80         1000       2400       820       2.6       3.19       0.82         247       267       10       1000       3650       800       2.6       3.02       0.86         1000       3650       800       2.7       3.02       0.89         1000       3650       810       2.8       3.11       0.90         299       319       10       1000       5400       820       2.8       3.19       0.88				1000	150	840	1.5	3.36	0.45
1000       600       840       2.2       3.36       0.65         1000       600       840       2.3       3.36       0.68         1000       600       870       2.3       3.63       0.63         148       168       10       1000       1350       820       2.1       3.19       0.66         1000       1350       820       2.3       3.19       0.72         1000       1350       820       2.5       3.19       0.78         199       219       10       1000       2400       810       2.5       3.11       0.80         1000       2400       820       2.6       3.19       0.82         247       267       10       1000       3650       800       2.6       3.02       0.86         1000       3650       800       2.7       3.02       0.89         1000       3650       810       2.8       3.11       0.90         299       319       10       1000       5400       820       2.8       3.19       0.88	100	120	10	1000	600	840	2.1	3.36	0.63
1000       600       840       2.3       3.36       0.68         1000       600       870       2.3       3.63       0.63         148       168       10       1000       1350       820       2.1       3.19       0.66         1000       1350       820       2.3       3.19       0.72         199       219       10       1000       2400       810       2.5       3.11       0.80         1000       2400       820       2.6       3.19       0.82         1000       2400       820       2.6       3.19       0.82         247       267       10       1000       3650       800       2.6       3.02       0.86         1000       3650       800       2.7       3.02       0.89         1000       3650       810       2.8       3.11       0.90         299       319       10       1000       5400       820       2.8       3.19       0.88				1000	600	840	2.1	3.36	0.63
148     168     10     1000     1350     820     2.1     3.19     0.66       1000     1350     820     2.3     3.19     0.72       1000     1350     820     2.5     3.19     0.72       199     219     10     1000     2400     810     2.5     3.11     0.80       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       247     267     10     1000     3650     800     2.6     3.02     0.86       1000     3650     800     2.7     3.02     0.89       1000     3650     810     2.8     3.11     0.90       299     319     10     1000     5400     820     2.8     3.19     0.88				1000	600	840	2.2	3.36	0.65
148       168       10       1000       1350       820       2.1       3.19       0.66         1000       1350       820       2.3       3.19       0.72         199       219       10       1000       2400       810       2.5       3.11       0.80         1000       2400       820       2.6       3.19       0.82         1000       2400       820       2.6       3.19       0.82         247       267       10       1000       3650       800       2.6       3.02       0.86         1000       3650       800       2.7       3.02       0.89         1000       3650       810       2.8       3.11       0.90         299       319       10       1000       5400       820       2.8       3.19       0.88				1000	600	840	2.3	3.36	0.68
1000     1350     820     2.3     3.19     0.72       199     219     10     1000     2400     810     2.5     3.11     0.80       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       247     267     10     1000     3650     800     2.6     3.02     0.86       1000     3650     800     2.7     3.02     0.89       1000     3650     810     2.8     3.11     0.90       299     319     10     1000     5400     820     2.8     3.19     0.88				1000	600	870	2.3	3.63	0.63
199     219     10     1000     2400     810     2.5     3.11     0.80       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       247     267     10     1000     3650     800     2.6     3.02     0.86       1000     3650     800     2.7     3.02     0.89       1000     3650     810     2.8     3.11     0.90       299     319     10     1000     5400     820     2.8     3.19     0.88	148	168	10	1000	1350	820	2.1	3. 19	0.66
199     219     10     1000     2400     810     2.5     3.11     0.80       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       247     267     10     1000     3650     800     2.6     3.02     0.86       1000     3650     800     2.7     3.02     0.89       1000     3650     810     2.8     3.11     0.90       299     319     10     1000     5400     820     2.8     3.19     0.88				1000	1350	820	2.3	3. 19	0.72
1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       1000     2400     820     2.6     3.19     0.82       247     267     10     1000     3650     800     2.6     3.02     0.86       1000     3650     800     2.7     3.02     0.89       1000     3650     810     2.8     3.11     0.90       299     319     10     1000     5400     820     2.8     3.19     0.88				1000	1350	820	2.5	3. 19	0.78
247         267         10         1000         3650         800         2.6         3.19         0.82           247         267         10         1000         3650         800         2.6         3.02         0.86           1000         3650         800         2.7         3.02         0.89           1000         3650         810         2.8         3.11         0.90           299         319         10         1000         5400         820         2.8         3.19         0.88	199	219	10	1000	2400	810	2.5	3.11	0.80
247     267     10     1000     3650     800     2.6     3.02     0.86       1000     3650     800     2.7     3.02     0.89       1000     3650     810     2.8     3.11     0.90       299     319     10     1000     5400     820     2.8     3.19     0.88				1000	2400	820	2.6	3. 19	0.82
1000     3650     800     2.7     3.02     0.89       1000     3650     810     2.8     3.11     0.90       299     319     10     1000     5400     820     2.8     3.19     0.88				1000	2400	820	2.6	3. 19	0.82
1000         3650         810         2.8         3.11         0.90           299         319         10         1000         5400         820         2.8         3.19         0.88	247	267	10	1000		800	2.6	3.02	0.86
299 319 10 1000 5400 820 2.8 3.19 0.88				1000	3650	800	2.7	3.02	0.89
0.00				1000	3650	810	2.8	3. 11	1
	299	319	10	1000	5400	820	2.8	3. 19	0.88
				1000	5400	820	3.1	3. 19	0.97

<sup>\*</sup>GX—1 Dynamite was used to initiate AN
\*\*theoretically predicted values calculated by the TIGER code with the JCZ3 EOS

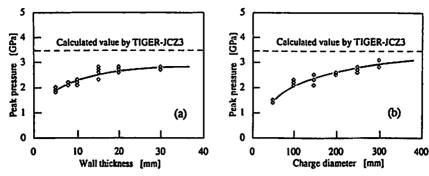


Fig. 3 Peak pressures of micro-prill AN as a function of (a) wall thickness (charge diameter is 100mm) and (b) charge diameter (wall thickness is 10mm). The dotted line indicates the theoretically predicted value by TIGER-JCZ3 at a density of 850 kg/m³.

になると考えられるためP<sub>AN</sub>を真の値よりも大きく見 被ってしまうことになり、誤差を生じる原因となる。 これについてはPMMA中を伝播する衝撃波波変挙動 の解釈と共に、試験方法の改良が必要であるが、これ らにより本法により得られる硝安のピーク圧力値は少 なくとも10%程度の幅をもつものと推定される。

さて、前報で報告した爆速の場合、薬径の逆数に対して爆速値をプロットし、これを無限大薬径に外挿して理想爆速を求める方法は一般に認知された方法である3。 爆轟理論によれば、爆轟生成ガスの特性に関しては(3)式に示すような関係が成り立つ。

$$P = \frac{\rho_o D^2}{\gamma + 1} \tag{3}$$

但し、P: 爆轟圧力、D: 爆轟速度、ρ<sub>o</sub>: 初期密度。 τ: 爆轟生成ガスの断熱指数

この式によれば爆轟圧力は爆速の2乗に比例するため 薬径の逆数に対しては爆轟圧力の平方根が直線関係を 示すと考えられるが、硝安の非理想爆轟領域においては同一試料であっても試験条件によって爆轟状態が変化し、それと共に7値も変化するため、各試験条件での爆轟圧力と爆速をブロットした場合、両者の間にはむしろ直線に近い関係が存在することが報告されているが。そこでここでも同様の考えに基づいて、鉄管の肉厚及び薬径の逆数が圧力と直線関係にあると仮定して実験データを整理するとFig.4の様になり、それらの関係は以下のようになる。

$$P_{ob.}/P_{cal.} = 0.935 - 2.02(1/th)$$
 (4) (相関係数 $r = 0.874$ )

$$P_{ob.}/P_{col.} = 0.952 - 13.5(1/R)$$
 (5) (相関係数 $r = 0.963$ )

ここで、th: 鉄管の肉厚(m)。 R:試料の半径(m) 但し爆速の場合同様、密閉強度の効果は肉厚20mm以上で はもはや有効でないため(4)式の直線関係は意味が無い。 一方薬径効果については広範囲にわたって良好な直線

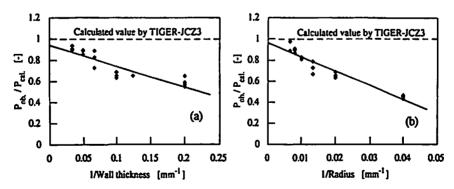


Fig. 4 Dimensionless peak pressures of micro-prill AN as a function of (a) wall thickness (charge diameter is 100mm) and (b) charge diameter (wall thickness is 10mm). The dotted line indicates the theoretically predicted value by TIGER-JCZ3 at a density of 850kg/m³.

 $V_{cd}$ ,  $/V_{cd}$  = 0.971 - 9.72(1/R)

関係が認められ、これより無限大薬径を想定した場合 の無次元爆轟圧力として0.95が得られた。 実際に実験 で用いた試料の平均的な装填比頂である830kg/㎡を 初期密度としたときのTIGERコード(JCZ3状態式使 用)による計算値:3.28GPaを考慮すると、実験値を 外挿して求めた無限大薬径でのピーク圧力値はPage (∞)=3.1GPaと得られた。以上の計算はいくつかの 仮定をおいたものではあるが、実験値の外挿によって 得られたPot.(∞)の値がTIGER-JCZ3によるC-J圧 力計算値と比較的良好な一致を見せたことは興味深い 結果である。JCZ3式はC-J圧力計算値に関しては他 の計算値よりも若干低めの値を示す傾向が指摘されて いるが!!)、得られた結果を前報2)で示した各種の爆轟 特性計算結果と比べてみると、

DTONATE  $\langle P_{ab} \mid (\infty) \langle \text{TIGER}(\text{JCZ } 3) \langle \text{KHT} \rangle$ <TIGER(BKW)

の様になり、爆速の場合と同様な序列となった。

さて、爆速と爆轟圧力がわかれば(3)式を用いて各試 験条件における7の値を算出することが可能である。 各試験条件における爆速とピーク圧力はいずれも肉厚 及び薬径の逆数に対しし次に近似し得るとし、爆轟圧 力に関しては(4)。(5)式、爆速に関しては既に報告した 以下の2式31を用いて算出した結果をTable 3に示す。

$$V_{cb.}/V_{cal.} = 0.864 - 0.869(1/th)$$
 (6

(相関係数r=0.847)

(相関係数r = 0.969)

これによると、鉄管の肉厚を増して爆速や圧力を大き くしても7値はあまり変化せず、およそ2.2程度の値を 示すのに対し、薬径を大きくした場合には薬径の増加。 即ち爆速、圧力の増加に伴ってr値も2.22から2.76へ 上昇した。即ち爆轟状態が非理想的であるときにはア は小さな値をとるが、爆轟が理想状態に近づき、爆速、 圧力が大きくるにつれても徐々に大きな値をとるよう になる。これによりアの値は初期密度が一定の場合で も、その爆轟状態により異なる値を示し、爆轟の非理 想性を表わす指標となり得ることがわかった。また同 等の爆速を示す場合であっても鉄管の肉厚や薬径が異 なる場合には異なる爆轟圧力を示すことから、肉厚を 増して密閉強度を高めただけでは爆速、爆轟圧力は上 昇し大きな値をとるようになるものの、薬径を大きく した場合と同様な効果は得られず、理想的な爆魔状態 が達成されないことがわかった。

これまで硝安の爆轟圧力に関する測定報告例が無い ため他の測定データと比較することはできないが、 FingerらがANFOについて爆速、爆轟圧力を測定し たデータでは7=2.1を与えており12)、硝安の非理想爆 **轟時の値と同等であることがわかった。また実測値を** 無限大薬径に外挿して得たr値は2.90となったが、 TIGER コードによる爆轟特性計算の結果は、 $\rho_o = 830$ 

Table 3 7 values for detonation gases of micro - prill ammonium nitrate determined by linear approximation of experimental values.

Wall thickness [mm]	Charge diameter [mm]	VoD* [km/s]	PoD** [GPa]	[ <del>*</del> ]
5	100	2.72	1.34	2.53
10	100	3.06	2.40	2.24
15	100	3. 18	2.63	2. 19
20	100	3. 23	2.74	2. 16
25	100	3. 27	2.80	2. 17
30	100	3.29	2.85	2. 15
infinite	100	3.40	3.07	2.13
10	50	2.29	1.35	2.22
10	100	3.06	2.24	2.47
10	150	3.32	2.53	2.62
10	200	3.45	2.68	2.69
10	250	3.52	2.77	2.71
10	300	3.58	2.83	2.76
10	infinite	3.83	3.12	2.90

<sup>\*:</sup> Velocity of detonation

<sup>\*\*:</sup> Pressure of detonation

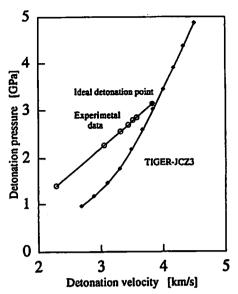


Fig. 5 Relation between the non-ideal detonation velocity and pressure (varying density).

kg/㎡のときに7=2.94(JCZ3状態式使用)を与えており<sup>(3)</sup>. 良好な一致を示した。

Fig.5に爆速と爆轟圧力の関係を示す。(3)式において7値を一定とすれば、爆轟圧力は爆速の2乗に比例するため、両者の関係は2次曲線で表わされるグラフになるはずである。実際、初期密度を変化させた場合のTIGERコード(JCZ3状態式使用)による計算値は、7~3でほぼ一定であるため図に示されるような2次曲線となっている。これに対し薬怪効果を設わす実験データのブロットは、初期密度は一定であるが7値が試験条件によって変化し、爆速と圧力の間の直線関係は

の様に変わされた。尚、実験値を無限大薬怪に外挿して得られる理想爆轟の点を◎印で示したが、これはおよそρ。=830kg/㎡におけるTIGERコードによる計算値と同じ点となり、この点が実験、計算のいずれをも満足する理想爆轟状態を示す点であると考えられた。

研安の爆轟については未だ不明な点が多く、今後は 爆轟波の内部構造を知るためにもピーク圧力のみなら ず圧力プロファイルについても検討を加え、より詳細 な計測とともに反応速度論を考慮したシミュレーショ ンとの比較も行っていく必要があると思われる。また 爆轟特性を表わす7則は、研安のように低比重で炭素 を含有しない物質には適用できないとされているが 1015)。同一初期密度で爆轟パラメータの異なる非理想 <mark>保</mark>路領域における7則についても今後検討すべき課題 であると思われる。

#### 5. 結 食

マンガニンゲージを用いた圧力測定法は、いくつかの仮定をおいたものであるが実用上問題は少なく、比較的容易に爆高時の圧力プロファイルを計測可能であることがわかった。また、本法によりマイクロブリル硝安の爆轟圧力を測定した結果、以下の事項が明らかになった。

- (i) マイクロブリル硝安の爆轟圧力に関しては密閉 強度よりも薬径効果の方が影響が大である。
- (2) 鉄管の肉厚の増加に伴いピーク圧力は上昇する が、一定値を越えるともはや上昇せず、内径100 mmの鉄管では2.8GPa前後に収束した。
- (3) 薬径の増加に伴いピーク圧力は上昇し、内径 299mにおいて最高値3.1GPaを得た。
- (4) 実験値の外挿により、無限大薬径でのピーク圧 力として3.1GPaを得た。
- (5) 爆速と爆高圧力の測定値から算出した7値は、 密閉強度を増した場合、約2.2で大きな変化は見 られないが、薬径を増した場合には2.22から2.76 に上昇し、さらに無限大薬径に外挿した場合2.90 となり、TIGERコードによる爆高特性計算結果 と良好な一致を示した。

## 雑 糕

本研究の一部は(財)火薬工業技術奨励会及び文部省科 学研究費の助成により行いました。ここに記して謝意 を表します。

#### 女 献

- 1) 三宅淳巳:工業火薬, 52,131 (1991)
- 2) 三宅淳巳, 小川郷繁, A. C. van der Steen, H. H. Kodde: 工築火薬, 52, 285 (1991)
- 三宅淳巳,小川輝繁,齋藤修二,吉田俗生:工業 火薬,52,336 (1991)
- 4) 例えば
  - A. N. Dremin et al.: Combust. Explos. Shock Waves, 10, 120 (1974)
  - C. M. Tarver et al.: Proc. 8th (Int.) Symposium on Detonation p951, Albuquerque (1985)
  - J. J. Dick: Combust. Flame, 69, 257 (1987)
- Shock pressure sensors and impact facilities,
   Dynasen Inc. (1985)
- 6) R. A. Graham and J. R. Asay: High Temperatures – High Pressures, 10,355 (1978)
- 7) 三宅淳巳, 小川輝繁, 福山郁生:工業火薬, 48, 14 (1987)
- 8) A. Miyake, A. C. van der Steen and H. H. Kodde:

- Proc. 9th (Int.) Symposium on Detonation, Vol. 1, p560, Portland (1989)
- R. E. Duff and E. Houston: J. Chem. Phys., 27, 796 (1957)
- V. M. Titov, S. M. Karakhanov, S. A. Bordzilovsky: Proc. 8th (Int.) Symposium on Detonation, p143, Albuquerque (1985)
- F. J. Zerili, R. M. Doherty, J. M. Short, R. R. McGuire and M. J. Kamlet: Combust. Flame, 74 , 295 (1988)
- 12) M. Finger, F. Helm, E. Lee, R. Boat, H. Cheung,

- J. Walton, B. Hayes and L. Penn: Proc. 6th (Int.) Symposium on Detonation, p729, White Oak (1976)
- 13) A. Miyake and A. C. van der Steen: Detonation properties of ammonium nitrate as calculated by the TIGER code, Paper presented at OECD-IGUS Meeting, BAM, Berlin (1987)
- 14) D. Price: Chem, Rev., 59, 801 (1959)
- M. J. Kamlet and J. M. Short: Combust. Flame, 38, 221 (1980)

Non-ideal detonation properties of Ammonium nitrate (III)

Influence of confinement/diameter effect on detonation pressure of micro-prill AN

by Atsumi MIYAKE\*, Terushige OGAWA\*, Shuji SAITOH\*\* and Nobuo YOSHIDA\*\*\*

In order to obtain a better understanding of the non-ideal detonation behaviour of Ammonium nitrate (AN), the detonation pressures of micro-prill AN in steel tubes with different wall thicknesses and inner diameters were measured by using the piezo-resistive manganin gauge system.

It was found that the charge diameter has a much larger influence on the detonation pressure than the confinement. The extrapolated peak pressure to the infinite diameter was calculated as 3.1GPa.

Based on the experimental results of the detonation velocity and pressure the adiabatic exponents of the detonation gas products  $(\gamma)$  were calculated in each conditions. Although the  $\gamma$  value remained constant ( $\sim$ 2.2) when the confinement became heavier, it showed a remarkable change with the increase of the charge diameter. The extrapolated  $\gamma$  value to the infinite diameter was obtained as 2.90 and it coincided with  $\gamma$  calculated with the TIGER code with the JCZ3 EOS.

- ( \*Department of Safety Engineering, Yokohama National University, 156, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240, Japan
  - \*\*Mining Division, Kamioka Mining & Smelting, Co. Ltd.,
    - 1-1, Oaza Shikama, Kamioka-cho, Yoshki-gun, Gifu 506-11, Japan
- \*\*\*Himeji Factory, Nippon Kayaku Co. Ltd.,
  3903-39, Toyotomi, Himeji, Hyougo 679—21, Japan)