



硝安の非理想爆轟に関する研究（第2報）

—マイクロプリルの爆速に及ぼす密閉・薬径効果—

三宅淳巳*, 小川輝繁*, 齋藤修二**, 吉田信生***

マイクロプリル硝安について肉厚と内径の異なる種々の鋼管中で爆速を測定し、密閉強度と薬径の効果について検討した。その結果、密閉強度、薬径の増加とともに爆速は上昇するが、密閉強度よりも薬径の方が爆速値への影響は大であることがわかった。

また、実験結果の外挿により無限大薬径を想定した理想爆速値として $V_{ob}(\infty) = 3.83 \text{ km/s}$ が得られたが、これはWinningの測定値による外挿値と良好な一致を示した。

さらに、各種の爆轟特性計算結果と比較したところJCZ3状態方程式を用いた場合のTIGERコードによる計算値はマイクロプリル硝安の爆速に関し良好な予測値を与えることがわかった。

1. 緒言

凝縮系爆発性物質の爆轟伝播に関しては、爆速値等の爆轟パラメータが試験条件に依存して理想値以下の異なる値をとり、非理想爆轟を呈することが知られている。非理想爆轟状態での爆轟パラメータを決定する条件としては、薬径、密閉強度等があげられる。純理論的に理想爆轟のパラメータを決定する方法が確立されていない現在、理想爆速を推定する方法として一般的に用いられているのは、異なる有限薬径で測定した爆速を無限大薬径に外挿する方法である。爆轟伝播の際の薬径効果については、Jones, Eyringらを始め、Cook, Wood-Kirkwood, Bdzil等により理論的取扱いがなされ、実験値との比較によりモデルの妥当性が検討されてきた^{1)~5)}。一方、試料を拘束する密閉容器の効果についても同様の理論の拡張によりいくつかのモデルが提案されており、その効果を系統的に促えて産業爆薬に適用した報告がある^{6)~8)}。

硝安は非理想爆轟領域が広く、容易に理想爆轟に達しないが、その取扱の安全及び爆発力の制御や有効利用のためには、爆轟限界や試験条件への依存性など爆

轟特性を把握することが不可欠である。特に硝安の場合には大量に貯蔵、輸送される場合が多く、スケールアップ時の爆轟挙動を的確に把握することが重要である。従来、硝安単体の爆轟に関しては、薬径効果についての報告は少なくないが^{9)~12)}、密閉強度の効果を定量的に述べたものはほとんど無い¹²⁾。

本報では、肉厚及び薬径の異なる鋼管中でのマイクロプリル硝安の爆速を測定し、同一試料が試験条件の相違によって示す密閉強度及び薬径の効果について調べ、これをもとに硝安の非理想爆轟挙動について検討を行ったので報告する。

2. 試料

本試験で用いた試料は、前報¹³⁾で報告した5種類の硝安の内、試料Eにあたるもので、一般にANFO用に用いられるマイクロプリルである。試料の物性をTable 1に示す。

Table 1 Physical properties of used ammonium nitrate

Loading density [kg/m ³]	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

1990年9月5日受理

*横浜国立大学工学部物質工学科

〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156

TEL 045-335-1451

**神岡鉱業㈱

〒506-11 岐阜県吉城郡神岡町大字鹿間 1-1

TEL 0578-2-5385

***日本化学㈱姫路工場

〒679-21 姫路市豊富町豊富3903-39

TEL 0792-64-3001

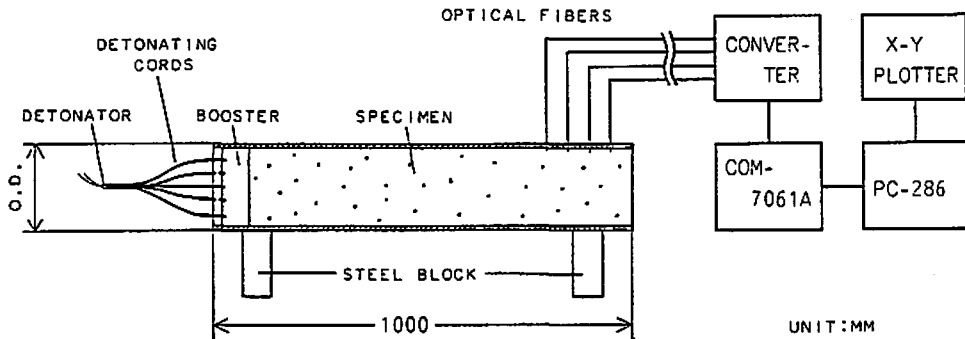


Fig. 1 Experimental set-up of steel tube test

3. 試験方法

試験方法をFig. 1に示す。一端を厚さ5mmのポリカーボネート樹脂板で密閉した鉄管中に試料を装填し、その上に起爆薬である水中発破用GX-1ダイナマイト(ニトログル55%, 装填比重: 1600kg/m³, 爆速: 7.0km/s)を鋼管の断面全体に薬長50mmにわたり装填する。鉄管はJIS G 3445で定めるSTKM13A相当のシームレス炭素鋼管で、内径は50~300mm, 肉厚は5~30mmの中から選択し、管長はいずれも1000mmである。

起爆薬として用いたGX-1は起爆感度が充分に高いので6号電気雷管1本で起爆したが、薬径が200mm以上の場合には試料硝安への平面爆轟波の入射を期待して、導爆線7本を用いたマルチポイント起爆法を採用した。マルチポイント起爆の際の導爆線はおよそECの方法に準拠しており¹⁴⁾、断面の中心と、中心から半径の2/3の円周上に中心との角度が各々60°となるように6点選択して木枠に孔を明け、導爆線をGX-1の中に10mm挿入した後、エポキシ樹脂で固定した。

爆速は、起爆源とは反対側に50mm間隔で鉄管に垂直に挿入した4点の光ファイバーにより測定した。光ファイバー(三菱レイヨン製エスカSH-4001)からの爆発光を光电変換用シリコンフォトダイオード(浜松ホトニクス製S1190)を組み込んだパルス発生回路を介してトランジェントレコーダ(菊水電子工業製COM-7061A)に導き、爆発光の到達時間差とファイバー設置間距離から爆速を算出した¹⁵⁾。

4. 試験結果及び考察

試験は、鉄管の内径を一定(100mm)とし、肉厚を増加させることにより密閉強度の効果を見る一連の試験と、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。

試験結果の一覧をTable 2に示す。前報同様、爆速測定値を V_{ob} 、JCZ3状態方程式を用いた場合のTIGERコードによる計算値を V_{cal} で表わし、両者の

比である無次元爆速(V_{ob} / V_{cal})を爆轟の非理想性を表わす指標とした。表中、装填比重、爆速測定値及び計算値は各々10kg/m³, 0.05km/s, 0.01km/s単位で表示した。

Fig. 2に、試験結果を示す。横軸は各々鉄管の肉厚(a)及び薬径(b)、縦軸は爆速実測値である。先ず密閉強度の効果については、肉厚の増加に伴い爆速値の上昇が見られるが、15mmを超えたあたりから爆速の上昇は緩やかになり、3.30km/s前後に収束している。これは、鉄管の肉厚がある程度以上になると密閉強度は充分大きくなり、管壁の変形や破壊に伴って侵入する希薄波は反応帯に影響を及ぼさなくなり、従って爆速値は薬径のみに依存し、その薬径における収束値を示すようになるためである⁸⁾。逆にいえば、密閉強度の効果には限界があり、ある程度薬径が大きくなれば爆速に及ぼす密閉効果は見られなくなり、密閉強度は薬径に比べ爆速への影響がなくなると考えられる。このことは、無限大肉厚即ち発破作業における穿孔径の設計や爆薬の選択に重要な知見であると考えられる。但しここで、鉄管の音速は硝安の爆速よりも早く、プースターの起爆により生じた衝撃波が硝安の爆轟波よりも先に鉄管中を伝播することによる鉄管の力学的特性に及ぼす影響と、それに基づく爆轟波の伝播への影響については、弾塑性破壊力学に基づく解釈が必要である。

一方、薬径効果については、Fig. 2 (b)に見られるように、薬径の増加とともに爆速の上昇がみられ、今回の試験条件での最大薬径299mmでは3.70km/sが得られた。これは無次元爆速で表わせば0.95となり、最大肉厚時の0.85を上回っている。また、薬径が200mm以上においてもわずかではあるが爆速の上昇がみられ、さらに薬径を大きくすることにより、より高い爆速が得られると推定される。

Fig. 3, 4に、肉厚の逆数及び薬径の逆数に対してプロットした無次元爆速を示す。両者がいずれも爆速と直線関係にあると仮定すると、それらの関係は

Table 2 Detonation velocities of micro-prill AN

I. D.	O. D.	Wall thickness	Tube length	Booster *	Loading density	V _{ob.} **	V _{cal.}	V _{ob.} /V _{cal.}
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(g)	(kg/m ³)	(km/s)	(km/s)	(-)
100	110	5	1000	600	810	2.85	3.88	0.73
			1000	600	820	2.80	3.91	0.72
			1000	600	830	2.70	3.94	0.69
			1000	600	830	2.85	3.94	0.72
98	114	8	1000	600	830	2.90	3.94	0.74
			1000	600	840	2.90	3.98	0.73
100	120	10	1000	600	830	2.85	3.94	0.72
			1000	600	830	2.90	3.94	0.74
			1000	600	830	3.10	3.94	0.79
			1000	600	840	2.80	3.98	0.70
			1000	600	840	3.00	3.98	0.75
			1000	600	840	3.00	3.98	0.75
			1000	600	840	3.00	3.98	0.75
100	130	15	1000	600	810	3.20	3.88	0.82
			1000	600	810	3.20	3.88	0.82
			1000	600	820	3.20	3.91	0.82
			1000	600	820	3.20	3.91	0.82
			1000	600	830	3.10	3.94	0.79
			1000	600	830	3.20	3.94	0.81
100	140	20	1000	600	790	3.15	3.81	0.83
			1000	600	790	3.15	3.85	0.82
			1000	600	810	3.20	3.88	0.82
			1000	600	810	3.35	3.88	0.86
			1000	600	830	3.30	3.94	0.84
			1000	600	850	3.25	4.01	0.81
100	160	30	1000	600	800	3.20	3.85	0.83
			1000	600	800	3.40	3.85	0.88
			1000	600	810	3.30	3.88	0.85
			1000	600	810	3.30	3.88	0.85
50	70	10	1000	150	790	2.20	3.81	0.58
			1000	150	810	2.35	3.88	0.61
			1000	150	810	2.45	3.88	0.63
			1000	150	840	2.35	3.98	0.59
100	120	10	1000	600	830	2.85	3.94	0.72
			1000	600	830	2.90	3.94	0.74
			1000	600	830	3.10	3.94	0.79
			1000	600	840	2.80	3.98	0.70
			1000	600	840	3.00	3.98	0.75
			1000	600	840	3.00	3.98	0.75
			1000	600	840	3.00	3.98	0.75
148	168	10	1000	1350	820	3.25	3.91	0.83
			1000	1350	820	3.40	3.91	0.87

199	219	10	1000	2400	810	3.35	3.88	0.86
			1000	2400	820	3.45	3.91	0.88
			1000	2400	820	3.50	3.91	0.90
			1000	2400	820	3.60	3.91	0.92
247	267	10	1000	3650	800	3.45	3.85	0.90
			1000	3650	800	3.45	3.85	0.90
			1000	3650	810	3.50	3.88	0.90
299	319	10	1000	5400	820	3.55	3.91	0.91
			1000	5400	820	3.55	3.91	0.91
			1000	5400	820	3.60	3.91	0.92
			1000	5400	820	3.70	3.91	0.95

*GX-1 Dynamite was used to initiate AN

**Theoretically predicted value calculated by the TIGER code with the JCZ3 EOS

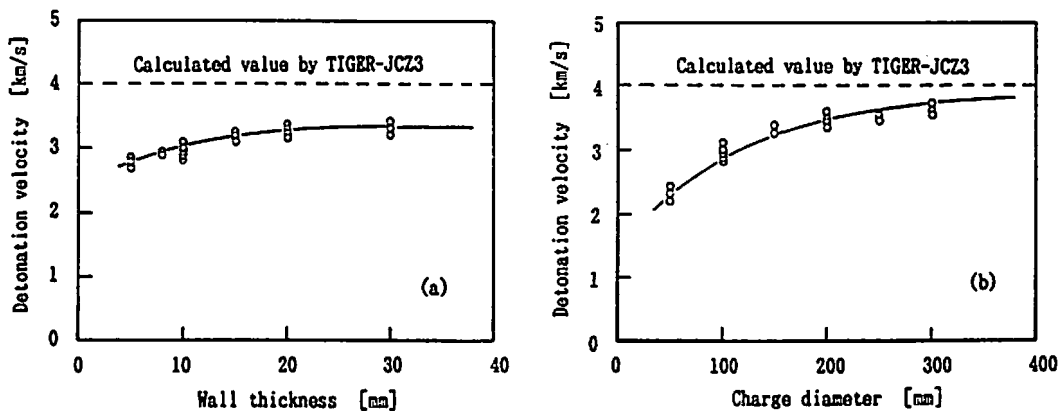


Fig. 2 Detonation velocity of micro-prill AN as a function of (a) wall thickness (charge diameter is 100mm) and (b) charge diameter (wall thickness is 10mm). The dotted line indicates the theoretically predicted value by the TIGER code with the JCZ3 EOS.

$$V_{ob}/V_{crit} = 0.864 - 0.869(1/th) \quad (1)$$

(相関係数 $r=0.847$)

$$V_{ob}/V_{crit} = 0.971 - 9.72(1/R) \quad (2)$$

(相関係数 $r=0.969$)

但し、 th : 鉄管の肉厚 (mm), R : 試料の薬径 (mm) となり、無限大肉厚及び無限大薬径を想定した場合の無次元爆速は各々0.86, 0.97と得られる。この場合、上述したように肉厚と爆速の関係はある一定値以上では成立しないので無限大肉厚の計算値はあまり意味が無い。実際に実験で用いた試料の平均的な装填比重である830kg/m³のときのTIGERコード (JCZ3状態式使用) による計算値: 3.94km/sを考慮すると、実験値から求めた無限大爆速値として $V_{ob}(\infty) = 3.83\text{km/s}$ が得られた。

薬径即ち薬量の増加に伴い爆轟特性が変化し、爆速の上昇がみられるということから、爆発時の威力は小

規模試験からの単純なスケールアップによる予測を上回り、条件次第では理想爆轟に達する可能性が示唆された。また逆に、(1), (2)式より、任意の爆速を得るための試験条件の決定が可能となり、爆発力の制御や有効利用を図る場合の基礎データが得られたといえる。

硝安単体の爆速の薬径効果に関する研究としては Paterson, Cook, Winningの報告があるが^{9)~11)}、彼らのデータから無限大薬径での爆速を算出すると各々、2.37km/s, 3.18km/s, 3.94km/sと得られる¹⁶⁾。前二者は低すぎるように思われるが、装填比重が820kg/m³前後のプリル硝安について行なったWinningの値はTIGERコードによる値及び本実験による値と良好な一致を示している。尚、無限大薬径へ爆速を外挿して理想爆速とする場合の直線関係については試験条件によって必ずしも適切でないという報告もあるが¹⁷⁾、本実験の場合、測定誤差等を考慮すれば容認されるもの

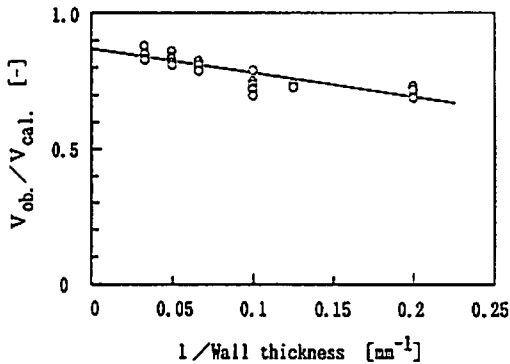


Fig. 3 Effect of variation of the wall thickness of the detonation velocity of micro-prill AN. (charge diameter is 100mm)

考えて処理を行った。

筆者らはさきに、前報で示した試料D (ANFO用ブリル) について本報と同様の一連の鋼管試験を行なっているが¹²⁾、その結果によると、密閉強度、薬径効果ともに本報と同様の傾向を示しているが、無限大肉厚における収束爆速値として3.0km/sを得ている。また、内径50mmでは不爆、100mmでは2.60km/sであるのに、内径300mmでは3.95km/sを得ており、薬径効果が著しい。このように、硝安の非理想爆轟挙動はその試料の形状や粒径、表面状態等の物理的因子にも大きく左右され、一般化することは容易でない。起爆、伝爆機構の解明のためには物理的及び化学的因子について、特に反応帯内部に関する圧力、温度分布等の詳細な検討が必要であろう。

最後に、前報で示した他の爆轟特性値計算結果と比較してみると、 $DETONATE < V_{ob.}(\infty) < TIGER (JCZ3) < KHT < TIGER (BKW)$ のようになった。特にTIGER (JCZ3) による値は本実験から得られる理想爆速値と近い値を示し、マイクロブリル硝安に関して良好な予測値を与えることがわかった。爆薬の爆轟特性値計算や爆轟波伝播挙動のシミュレーションには、用いる状態方程式中の各種定数、未反応状態でのウゴニオや反応速度定数等が不可欠であるが、従来の計算ではPETNやRDXといった高性能爆薬の爆速実測値に適合するように定数が定められているため、硝安のような非理想爆轟挙動の計算には必ずしも適当ではなかった。またそれらの定数は硝安の場合にはいずれも十分に得られておらず、定量的な把握を困難にしている。故に実験値から求めた爆轟パラメータを利用して計算に必要な定数の決定を行うことができれば、より信頼性の高い計算が可能になると思われる。

5. 結 言

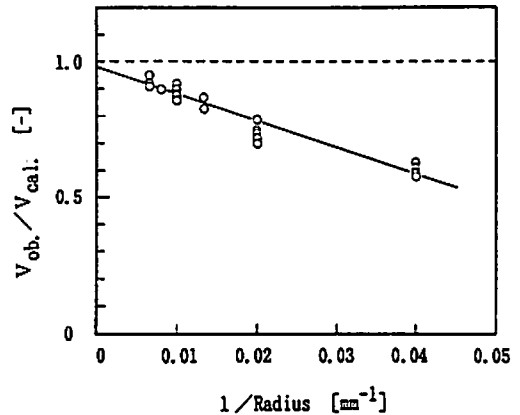


Fig. 4 Effect of variation of the charge diameter on the detonation velocity of micro-prill AN. (charge diameter is 10mm)

硝安の非理想爆轟領域における爆轟特性評価として、肉厚及び薬径の異なる種々の鋼管中で起爆したマイクロブリル硝安の爆速を測定し、以下の事項を得た。

- [1] 爆速の増加については密閉強度よりも薬径の方が効果的である。
- [2] 鉄管の肉厚の増加に伴い爆速は上昇するが、一定値を越えるともはや爆速は上昇せず内径100mmの鉄管では3.30km/s前後に収束した。
- [3] 薬径の増加に伴い爆速は上昇し、内径299mmにおいて最高3.70km/sを得た。
- [4] 実験値の外挿により、無限大薬径での爆速として3.83km/sを得た。これはWinningの報告による値の外挿値3.94km/sと良好な一致を得た。
- [5] JCZ3状態式を用いたTIGERコード計算値はマイクロブリル硝安の爆速に関し良好な予測値を与えた。

周知のように硝安の爆轟特性はその物性に大きく依存するため、ここで示した値は今回用いた試料についてのみ言えることである。また、硝安に限らず、推進薬や他の爆発危険性物質の爆轟特性評価のための方法としては本報のような系統的な試験を実施し、その結果をもとに保安対策や取扱方法、数量等について検討する必要があると考える。

謝 辞

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補助金の助成により行ないました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) H. Jones: Proc. Roy. Soc., Vol.189 A, p415(1947)
- 2) H. Eyring, R. E. Powell, G.H. Duffey and R. B. Parlin: Chem.Rev., Vol. 45, p69(1949)

- 3) M. A. Cook : The science of high explosives,Reihold(1958)
- 4) W. W. Wood and J. G. Kirkwod : J. Chem. Phys. ,Vol. 22, p1920(1954)
- 5) J. B. Bdzil : J. Fluid Mech. ,Vol. 108, p195(1981)
- 6) S. R. Brinkley and W. E. Gordon : Proc. 31th Int. Cong. of Ind. Chem. ,p231, Liege(1958)
- 7) I. J. Kirby and G. A. Leiper : Proc. 8th Symp. on Detonation, p176, Albuquerque(1985)
- 8) 松為宏幸, 森谷明満, 米田罔昭 : 工業火薬協会誌, Vol. 46, p312(1985)
- 9) S. Paterson and J. M. Davidson : Nature, Vol. 195, No. 4838, p277(1962)
- 10) M. A. Cook, E. B. Mayfield and W. S. Partridge : J. Phys. Chem., Vol. 59, p675(1955)
- 11) C. H. Winning : Fire Technology, Vol. 1, p 23 (1965)
- 12) A. Miyake, A. C. van der Steen and H. H. Kodde : Propellants. Explosives. Pyrotechnics, Vol. 15, p58(1990)
- 13) 三宅淳巳, 小川輝繁, A. C. van der Steen, H. H. Kodde : 工業火薬,Vol.52, p285(1991)
- 14) Commision Directive of 8 December 1986(87/94 EEC), Official Journal of European Communities, No L 38(1987)
- 15) 吉田信生, 木村 歩, 空知公二, 西田 佑 : 工業火薬, Vol. 48, p211(1987)
- 16) 三宅淳巳 : 工業火薬,Vol. 52, p131(1991)
- 17) A. W. Campbell : Propellants, Explosives, Pyrotechnics,Vol. 9, p183(1984)



Non-Ideal Detonation Properties of Ammonium Nitrate (II)

—Influence of confinement/diameter effect
on Detonation velocity of micro-prill AN—

Atsumi MIYAKE*, Terushige OGAWA*

Shuji SAITOH**, Nobuo YOSHIDA***

In order to obtain a better understanding of the non-ideal detonation behaviour of ammonium nitrate (AN), the detonation velocities of micro-prill AN were measured in steel tubes with different wall thicknesses and inner diameters.

It was found that the tube diameter has a much larger influence on the detonation velocity than the confinement. The extrapolated detonation velocity to the infinite diameter (3.83 km/s) shows a good agreement with that of Winning's data (3.94 km/s), and it also coincides with the calculated detonation velocity predicted by the TIGER code with the JCZ3 equation of state.

(*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, Yoshiki-gun, Gifu 506-11, Japan

***Himeji Factory, Nippon Kayaku Co. Ltd.

3903-39, Toyotomi, Himeji, Hyougo 679-21, Japan)
