

爆発に関する研究

(第1報) 硝安の爆発性に関する基礎的研究

若園吉一・北尾盛功

STUDIES ON THE EXPLOSION (PART 1) : ON THE PRILLED AMMONIUM NITRATE

By Yoshikazu WAKAZONO and Shigetaka KITAO

Synopsis

We observed prilled ammonium nitrate by the electron and optical microscopes. We also measured its bulk density, ratio of oil absorption and the detonation velocity of ammonium nitrate fuel oil blasting agents, i. e. the mixture of the prilled AN and FO. We further made the cap sensitivity tests and the drop hammer tests.

Through these measurements and testings, we concluded that the prilled AN which had the following properties was the most suitable for ANFO blasting agents; bulk density: 0.75~0.85 g/cc, ratio of oil absorption: 10~20g/ 100 g AN, water content: 0.5% or below, detonation velocity: 2,500~3,300m/sec, cap sensitivity: unable to be detonated by a No.8 cap.

1. 緒言

最近、硝安（硝酸アンモニウム）と燃料油のみを混合し、火薬類を全く含まない爆発物（爆薬）が開発され、鉱山・土木現場などでダイナマイトの代りに使用されつゝある。この爆発物は Ammonium Nitrate Fuel Oil Agents または略して ANFO といわれ、わが国では硝安油剤爆薬、または ANFO（アンホ）爆薬と呼ばれている。ANFO 爆薬（以下 ANFO と略称する）は燃料油 5~6% 以外はすべて硝安よりなるものであるから、硝安の爆発性が ANFO の性能を左右するものである。

硝安には高比重粒状硝安、高比重粉状硝安および低比重粉状硝安の 3 種類がある。高比重粒状硝安は直径 0.5~1.0 mm の球型の硝安で肥料用であり、高比重および低比重粉状硝安はいずれも粉状でダイナマイト、カーリットなどの爆発原料に使用されている。特に低比重粉状硝安は鋭感性硝安¹⁾ともいわれ、爆発性のすぐれたものである。しかしながら、これらの硝安は ANFO としては粒状の場合には、燃料油との混合が悪く、粉状の場合には吸湿が激しく、いずれも不適当である。ANFO に使用される硝安は、近年開発されたプリル硝安（以下プリルと略称）Prilled ammonium nitrate といわれるもので直径 0.5~1.0 mm の粒状で、しかも低比重である。

ANFO の性能上のようなプリルが好ましいかを検討するため、まずプリルについて観察し、次に燃料油と混合した場合の爆発威力、安全性などを測定したので、ここに報告する。

2. プリル硝安

プリル 1 粒子の中央部から切片をつくり、それを光学顕微鏡で検討すると **Photo. 1** のように粒子内部には多数の空隙が認められる。**Photo. 2** はさらに詳細に観察するため、切片の一部を拡大したものである。

これらの写真より、プリルは球型粒子の結晶（一次粒子または単一粒子）が多数集まって、始めて形成された粒状硝安（二次粒子または凝集粒子）であることが明らかである²⁾。

またプリルの表面状況を観察するため、電子顕微鏡によりその表面を撮影した（カーボンシャドウ、レプリカ法³⁾）。その結果は **Photo. 3** である。

これによると表面には隆起があり、また各所に点々と凹部の存在が認められる。なお黒色部分は固化防止剤である。**Photo. 4** は比較のために高比重粒状硝安の表面の一部を、同一方法で撮影した電子顕微鏡写真であるが、表面は非常に滑らかで凹部の存在は認められない。以上の写真から分るように、プリル（二次粒子）の内部には多数の大きな空洞が分布しているばかりでなく、一次粒子相互間にも小さな空隙が存在し、さらに一次粒子表面にも各所に凹部があって滑らかでなく多孔性である。したがって硝安の真比重が1.73であるにもかかわらず、プリルの見掛比重（仮比重）は、1.0以下の小さなものになる。それでわれわれは **Prilled ammonium nitrate** を多孔性、低比重、粒状硝安と解釈している。

いうまでもなく **ANFO** の爆発反応は硝安（固相）と燃料油（液相）との反応であって、燃料油の硝安表面におけるいわゆる表面反応であると考えられる。プリルは普通の高比重硝安と比較して比表面積が大きく、燃料油の滲透および吸着が円滑に行なわれ、したがって反応面積が従来の高比重硝安に比較して急速に進行し、爆発 **detonation** を起しやすいものと考えられる。このような観点からも反応の基剤となるプリルについて考察した。

3. 吸油率および見掛比重

すでに述べたように、プリルとしては多孔性であることが必要である。この多孔性の度合いを判断する一つの目安として、次に述べるような方法を考案し、吸油率を測定した。**Fig. 1** に示すような測定用ガラス管に試料硝安 100 g を入れ、さらに **JIS** 規格 3号軽油（**ANFO** 用燃料油）100 cc を混入して、一定時間放



Photo. 1. Slice of prilled AN by optical microscope.

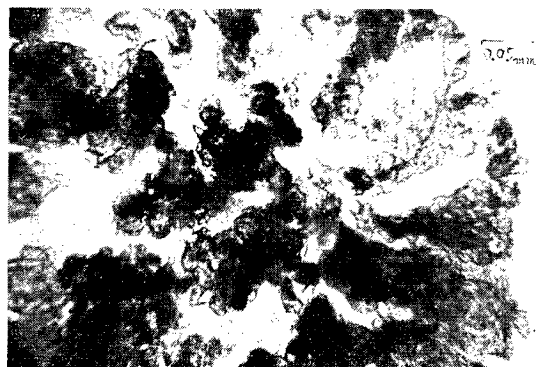


Photo. 2. Slice of prilled AN by optical microscope.

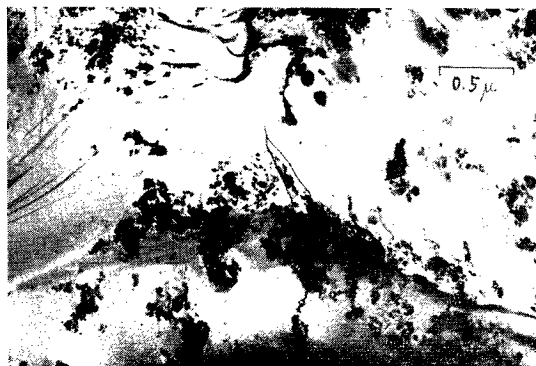


Photo. 3. Surface of prilled AN by electron microscope.

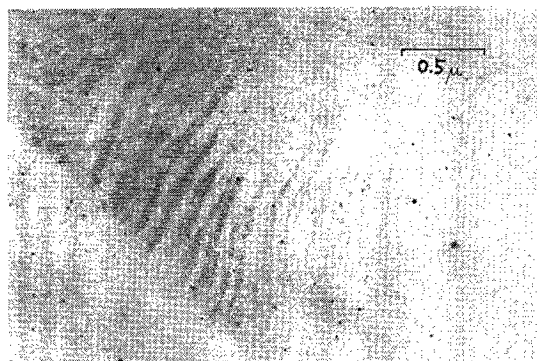


Photo. 4. Surface of dense AN by electron microscope.

置する。その後ガラス管下部から怪油を抜き、真空ポンプで残存する怪油を吸引除去する。最後に全重量を測定し吸油率 (g/100 g AN) を算出した。

見掛比重についてはメスシリンダーを用いて、一定重量の試料硝安の見掛の体積を測定して算出した。

4. 爆 速

爆発威力は一応爆速をもって表わすことにした。爆速測定としてはドートリッリュ法⁴⁾を採用した。すなわち Fig. 2 に示すような鉄管 (35 mm 径, 250 mm 長, 3 mm 肉厚) の中に試験爆薬 (ANFO) A および伝爆薬* (テトリル 10 g) D を装填して 8 号電気雷管 C₁ により爆発させる。

爆発波は爆薬中を伝わり 6 号雷管 C₂ を経て導爆線 E (爆速既知) に分岐して進む。一方 6 号雷管 C₃ に爆発波が到達すれば C₃ を経て F に分岐して進む。C₂, C₃ より導爆線を進んだ爆発波は P 点で衝突して鉛板上に刻印を残す。試験爆薬の爆速を V m/sec, 導爆線の爆速を v m/sec とすれば, $V = vl/2x$ によって ANFO の爆速は算出される。今回の実験においては 3 回の平均値をもって爆速値とした。また ANFO の装填は装填密度が約 0.95 になるよう手装填で行なった。

* 伝爆薬 (ブースター Booster) とは爆薬が大容積の場合, 雷管だけで起爆しにくい場合などに完全に起爆させるために用いる爆薬であって, 伝爆薬の起爆は一般に雷管で行なう。

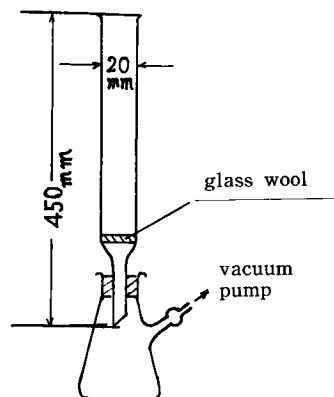


Fig. 1. Measurement of oil absorption.

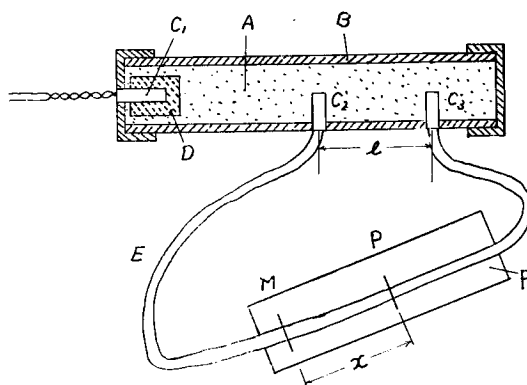


Fig. 2. Measurement of detonation velocity.

- A : Sample
- B : Iron pipe
- C₁ : Electric blasting cap (No. 8)
- C₂, C₃ : Blasting caps (No. 6)
- D : Booster (tetryl)
- E : Detonating cord
- F : Lead plate
- M : Middle of detonating cord
- P : Meeting point of detonation waves.

5. 試 料

試料プリルは見掛比重 1.0, 0.9, 0.8, 0.7 附近のものを試作し, 粒度を $-6 \sim +20$ mesh, 水分 0.3% 以下にした。

固化防止剤のないものを標準として, 無機固化防止剤 (珪藻土), 有機固化防止剤 (アルキルアミン酢酸塩) を添加したものの 3 種類としたので, 試料数は 12 である。なお比較のため低比重粉状硝安および Spencer 社プリルも加えた。(Table 2 参照)

6. 燃 料 油

各試料についての実験を行なうに際し, 燃料油の添加量を決定するために爆速測定を行なった。燃料油には JIS 規格 3 号軽油を用いた。プリルとの混合比は Table 1 に示す通りである。なおプリルとの混合はホーロー引容器内で木棒により 5 分間攪拌した。使用したプリルは Table 2 の Coated AN with surfactant である。結果は Table 1 に示す通りであり, 燃料油と爆速の関係を図示すれば Fig. 3 のようになる。

Table 1. Oil content and detonation velocity.

Oil content (%)	Prilled AN (%)	Detonation velocity (m/s)
4	96	3080
5	95	3094
5.5	94.5	3120
6	94	3076
8	92	2840

以上の結果から燃料油 5.5% 附近が爆速値の最高を示しており, これより燃料油が増加しても減少しても爆速値は低下する傾向にある。それ故今回の実験ではすべて燃料油の添加量を 5.5% とし, プリルとの混合は重量で常に AN:FO=94.5:5.5 とすることにした。

7. 実 験 結 果

実験結果を一括したものは Table 2 である。

7.1 仮比重と爆速

見掛比重と爆速の関係は Fig. 4 である。

これより見掛比重が小さくなるほど, 爆速は大きくなる。また同一見掛比重のものでも固化防止剤の種類により爆速値は異なる。

7.2 吸油率と爆速

吸油率と爆速の関係は Fig. 5 である。

吸油率の大きいプリルほど爆速値は大きくこのことは多孔性のものほど, 硝安と燃料油の反応面積が大き

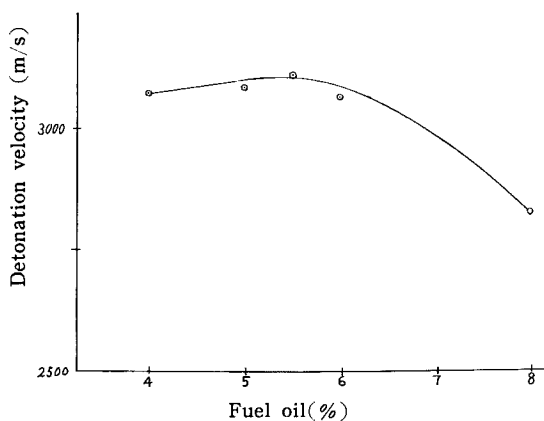


Fig. 3 Influence of oil content on detonation velocity

Table 2. Experimental results.

Samples (prilled AN)	Bulk density (g/cc)	Ratio of oil absorption (g/100 g AN)	Detonation velocity (m/s)
Uncoated AN	0.717	17.2	3200
	0.840	9.6	2820
	0.918	8.0	2610
	1.010	4.6	2340
Coated AN with kieselguhr	0.736	20.9	3370
	0.838	15.3	2650
	0.874	13.0	2380
	0.944	10.0	
Coated AN with surfactant	0.747	22.4	3480
	0.848	16.3	3120
	0.926	11.8	2980
	1.038	6.3	2560
Low density AN	0.500	42.9	3790
Spencer (N-IV)	0.758 (0.833)	14.0 (11.6)	2820 (2500)

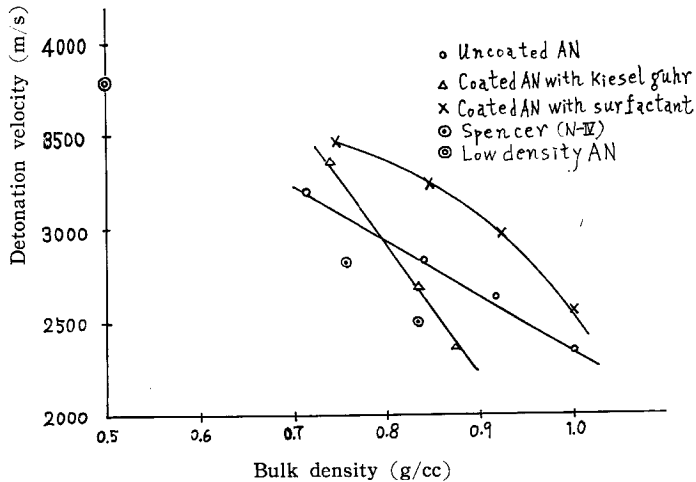


Fig. 4. Influence of bulk density on detonation velocity.

くなることを意味する。また同じ吸油率のものでも固化防止剤の種類により爆速値は異なり、7.1の関係と同じ傾向を示す。

7.3 吸油率と見掛比重の関係は Fig. 6 である。

見掛比重と吸油量の関係は一次直線的であり、見掛比重が小さくなるほど吸油率は大きくなる。すなわち仮比重の小さいものはプリルの空洞の割合が増大し、多孔性になることを意味している。固化防止剤を添加

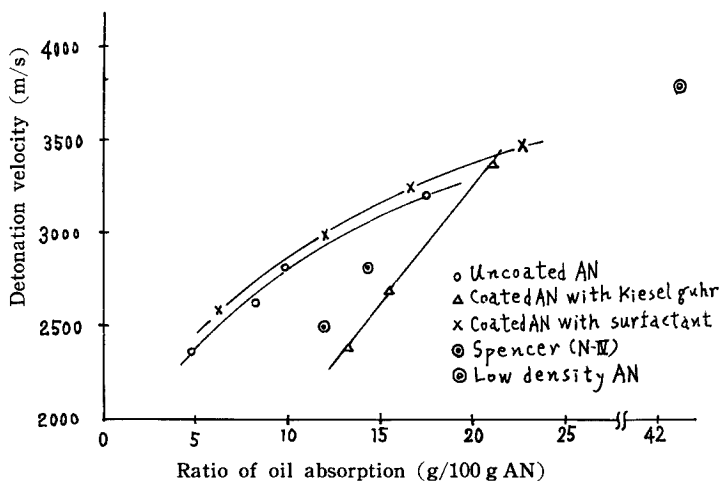


Fig. 5. Influence of ratio of oil absorption on detonation velocity.

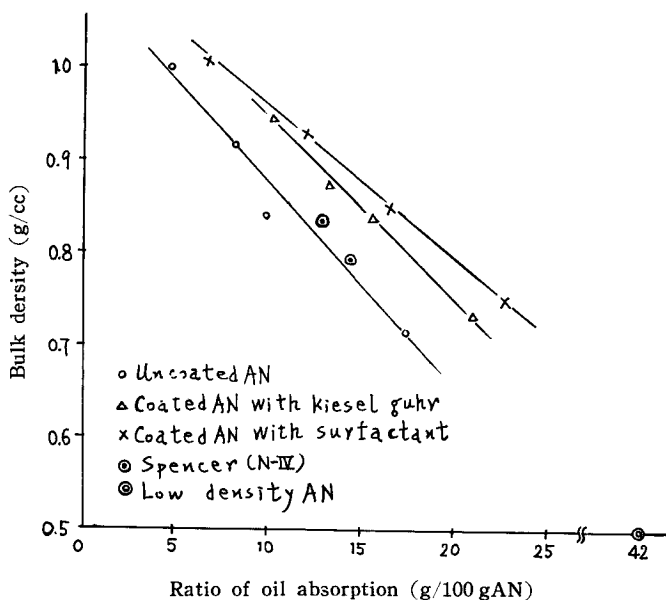


Fig. 6. Relation of bulk density and ratio of oil absorption.

したものは、同一見掛比重の無添加のものと比較して吸油率が大きい。これは適当な固化防止剤あるいは表面活性剤の添加により吸油率を大きくし、爆力を増加させ得ることを示唆している。

8. 粒 度

粒度と爆速の関係を求めるために、粒度がそれぞれ +10, 10~14, 14~20, 20~32 mesh の4種類のプリルにつき爆速を測定した。これらのプリルはすべて見掛比重約0.8, 有機固化防止剤を添加したもので、水分は0.25%以下のものである。爆速測定結果は **Table 3** に示す通りである。

Table 3. Particle size and detonation velocity.

Sample	Particle size (mesh)	Detonation velocity (m/s)
1	+10	2600
2	-10~+14	2780
3	-14~+20	3000
4	-20~+32	3480

これより粒子径と爆速の関係を **Fig. 7** に示した。

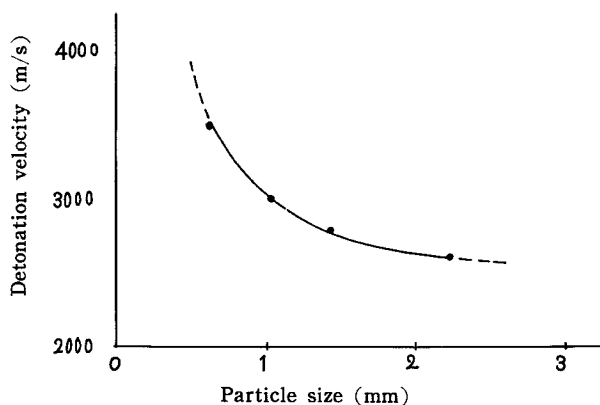


Fig. 7. Influence of particle size on detonation velocity.

プリルの粒子径が小さくなるほど爆速値は大きくなる。すなわちこれはプリルの粒子が小さくなるほど、燃料油との反応面積が大きくなることを意味し、**Table 2** の低比重粉状硝安が大きな爆速値を示していることとも一致している。これらの結果からプリルの粒度は **ANFO** の爆速を決定する一つの重要な因子であることが認められる。

9. 安 全 性

プリルは以上のように爆発物と考えられる。したがって取扱上、安全性を考慮する必要があるから、次に述べるような感度試験を行ない **ANFO** としての危険性の程度を検討した。

9.1 鉄管感度試験

ANFO の感度は、かならずしも爆速と相関するものではないので、5で述べた試料および粒状 **TNT** (水分7%)* について鉄管感度試験⁵⁾を行なった。

* 粒状 **TNT** は水孔の場合、**ANFO** 爆薬の代わりに使用するために製造したものである。

各試料を 35 mm 径, 250 mm 長, 3 mm 肉厚の鉄管に装填し (装填密度約 0.95), 8 号, 6 号, 3 号の 3 種の電気雷管によって起爆し, それぞれの鉄片を採取した。試験結果を **Photo. 5~Photo. 9** および **Table 4** に示した。

Table 4 の完爆, 不完爆, 不爆の判定は定量的なものではない。われわれは残留薬が認められる場合は不爆, 残留薬は認められないが採取鉄片がもとの鉄管の全長をとどめている場合は半爆, それよりも採取鉄片が細かく碎かれている場合は完爆と判定した。

この結果から, 同一固化防止剤添加のプリルについては, 見掛比重が大きいほど鈍感であり, また同一見掛比重のプリルについては, 雷管の号数が小さいものほど鈍感である。固化防止剤の種類によっても感度は異なることが認められる。

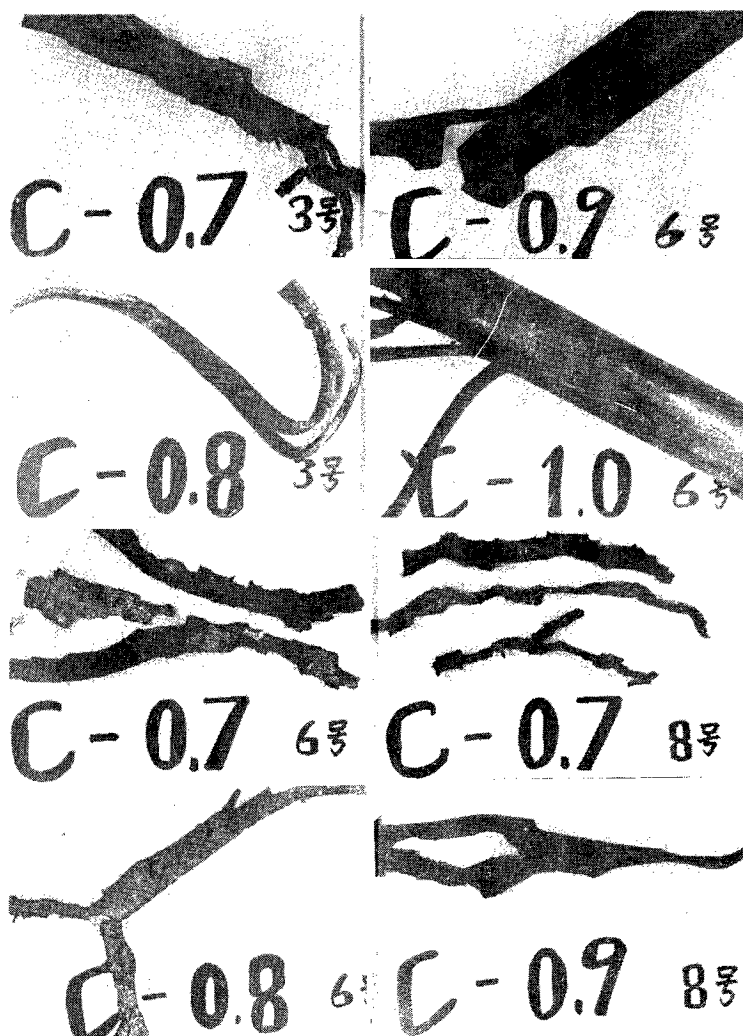


Photo. 5. Sensitivity tests on AN (with surfactant)-FO in iron pipes.

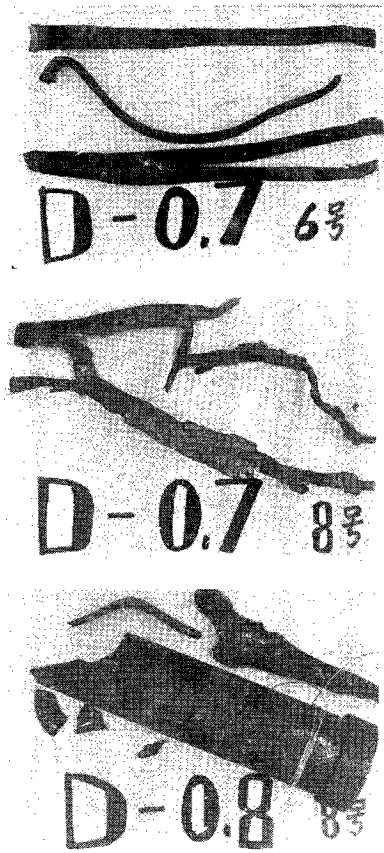


Photo. 6

Sensitivity tests on AN(with kieselguhr)-FO in iron pipes.

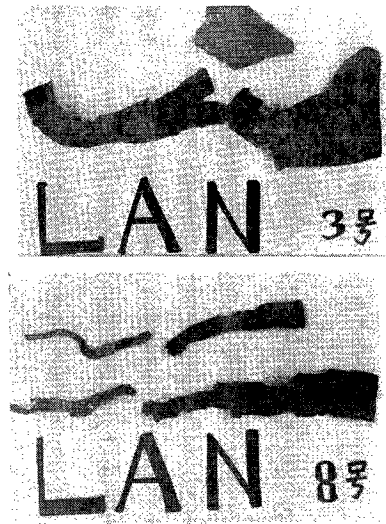


Photo. 7. Sensitivity tests on low density AN-FO in iron pipes.

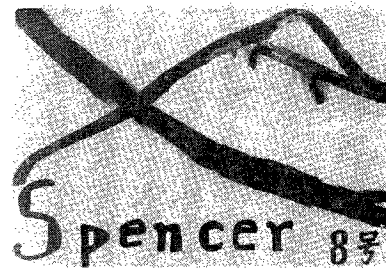


Photo. 8. Sensitivity test on AN (Spencer N-IV)-FO in iron pipes.

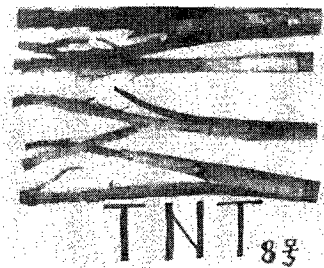


Photo. 9. Sensitivity test pipes on granular TNT in iron pipes.

9.2 落槌感度試験

鉄管感度試験では、有機固化防止剤添加の見掛比重0.7のプリルおよび低比重粉状硝安を使用したANFOは水分7%の粒状TNTより鋭感であるという結果を得たので、さらにこれを確かめるために、これら2種のANFOおよび粒状TNT(水分7%)について落槌感度試験⁴⁾を行なった。

Table 4. Sensitivity tests.

Samples	Bulk density (g/cc)	Detonating caps		
		No. 8	No. 6	No. 3
Coated AN with surfactant	0.747	○	△	△
	0.848		△	△
	0.926	△	×	
	1.038		×	
Coated AN with kiesel guhr	0.736	△	△	
	0.838	×		
Low density AN	0.500	○		△
Spencer (N-IV)	0.758	△	△	
Granular TNT		×		

(Note) ○ : Detonation △ : Half detonation × : Non-detonation

結果は Table 5 に示すようなものである。いずれの場合も完爆は認められなかった。表中、半爆とは ANFO の爆発後、残留薬が認められた場合をいう。

Table 5. Drop hammer tests.

Samples	Sensitivity
Low density AN-FO	4/10
Prilled AN-FO	2/10
Granular TNT*	0/10

(Note) Hammer weight : 5 kg, Height : 60 cm
*Water content : 7%

落槌試験の結果から、粒状 TNT (水分 7%) よりむしろ見掛比重の小さいプリルを使用した ANFO の方が鋭敏であることが確かめられた。

9.3 塩化ビニル管試験

これは、1964年(昭和38年8月)日本産業火薬会で決定された ANFO の起爆感度試験方法であって、Fig. 8 に示すような塩化ビニル管に ANFO を装填して、6号雷管で起爆する。爆発の有無は管尾に装填した導爆線の爆発の有無によって判定する。

これにより Table 4 中の各試料について行なった結果は低比重粉状を除いていずれも爆発に至らなかった。この方法によると見掛比重 0.7 附近までのプリルは安全であるが、粉状になると危険性が增大することを示している。

10. 考察および結言

以上の結果から、プリルの爆発威力を左右するものは見掛比重、吸油率、粒度、添加剤(固化防止剤、表面活性剤)などである。すなわち爆発威力の大きい ANFO 用プリルとしては見掛比重が小さく、吸油率が大きく、粒子径の小さいものが好ましい。しかしながら 8, 9 で述べたように爆発威力の大きいプリルは感度が高く、取扱上注意を必要とする。このプリルはダイナマイトに比べてはるかに安全ではあるが、高比重粒

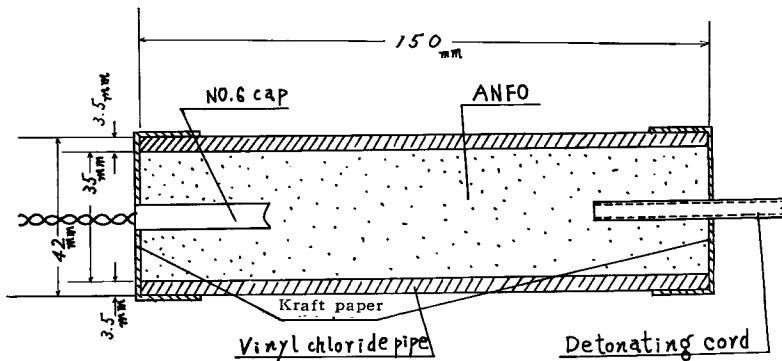


Fig. 8. Sensitivity test of ANFO in vinyl chloride pipe.

状硝安(肥料用)よりは危険であり、添加する固化防止剤あるいは表面活性剤の種類および量の如何により、さらに危険性を増し、硝安系爆薬に近いものとなり得る。

外国製プリルの見掛比重が0.75以上であり、爆速値が約2800 m/sec以下であることから、外国では取扱を厳重にする代り、プリルの感度を押えて安全性を計するという方針ではないかと推定される^{6,7)}。

そこで第2報で述べる現場実験の結果をも考慮して、プリルの性能に上限を設けて、感度を押さえ安全を計ることにした。なお下限はANFO用としての性能を失わない限度をもって決めた。この範囲からTable 6に示すような規準を設けた。なお参考のためにSpencer社プリルの値を掲げておく。

Table 6. Standard of prilled AN.

Details	Prilled AN	Spencer (N-IV)
Bulk density (g/cc)	0.75~0.85	0.758 (0.833)
Ratio of oil absorption(g/100g AN)	10~20	14.0 (11.6)
Particle size (mesh)	6~22	8~20 (8~16)
Water content (%)	0.5 or below	0.22 (0.09)
Detonation velocity (m/s)	2500~3300	2820 (2500)
Sensitivity test in iron pipe	Unable to be detonated by a No. 8 cap	Unable to be detonated by a No. 8 cap

水分と爆速の関係については目下検討中であるが、外国製品の調査結果⁸⁾およびわが国硝安メーカーの現状から、水分0.5%以下が妥当であると考えられる。

最後に各種の援助を得た日本化薬KK、昭和化成品KK、住友化学KKの各メーカーならびに種々の指導を受けた京都大学工学部伊藤一郎教授、鹿島建設KK土木工務部佐藤忠五郎博士に御礼申上げる。また顕微鏡写真について教示を得た京都大学化学研究所荒川正文博士に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 福山郁生：硝酸アンモニアの物性（第4報），工業火薬協会誌，第16巻第4冊，昭31.1，119頁。
- 2) 久保輝一郎，水渡英二，中川有三，早川宗八郎：粉体，昭37.12，丸善。
- 3) 深見章：実験化学講座1，基礎技術1(下)，昭32.8，373頁，丸善。
- 4) 若園吉一，佐藤忠五郎：爆破1，土木学会誌，第48巻，第4号，昭38.8，94頁

- 5) 大久保正八郎, 飯田稔: 危険物質の鉄管試験法, 工業火薬協会誌, 第24巻, 昭38. 329頁
- 6) Bureau of Mines: Safety Recommendations for Sensitized Ammonium Nitrate Blasting Agents, No. 8179, Jan. 1963.
- 7) National Fire Protection Association: NFPA, No. 495, May 1962.
- 8) 若園吉一, 佐藤忠五郎, 安健比古, 梅田貞夫: 粒状爆薬の使用について, 土木学会誌投稿中.