

爆発に関する研究(第4報)

スラリー爆薬について(爆速測定)

若園吉一・中野雅司・小川輝繁

THE STUDIES ON EXPLOSION IV ON THE SLURRY EXPLOSIVES

By *Yoshikazu WAKAZONO, Masashi NAKANO and Terushige OGAWA*

Synopsis

Lately, in our country, the studies on slurry explosives which are the mixture of ammonium nitrate, water, gum and sensitizer have greatly developed.

The authors had measured the detonation velocity of these explosives by using the unique resistance probe which was explored by them, and had investigated the capacity of these explosives.

The data set forth that the slurry explosives have the same tendency as ANFO whose detonation velocity decreases in the midst of detonating reaction in bore hole.

1. 緒 言

現在わが国においては、ベンチカット用耐水性爆薬として適当な爆薬は少ない。コストが安く、取扱いの簡単な ANFO 爆薬にしても水孔においては、そのままでは使用不可能である(わが国では、ベンチカットを行なう場合、5 m 以上の長孔では一応水孔を考慮におかねばならない)。したがって、現在では粒状 TNT 爆薬をそのまま使用するか、ダイナマイトまたはカーリットを缶に入れたものが使われており¹⁾²⁾、湧水のない孔(かれ孔)の場合には、ANFO 爆薬が使用されている。ところが、上に述べたダイナマイトまたはカーリットを入れた缶入り丸型爆薬とか粒状 TNT 爆薬などは、コストがかなり高くつくため、最近これらに代るものとして新しく耐水用爆薬としてスラリー爆薬の研究が、わが国においても盛んになってきた。そこでわれわれも、このスラリー爆薬の研究を行ない、長野ダム、多賀鉱山などの現場においてスラリー爆薬、粒状 TNT 爆薬、ANFO 爆薬などの爆速を抵抗線法により測定し、スラリー爆薬の検討を行なった。

2. スラリー爆薬

スラリーとは所謂おかゆ状のものをいい、したがってスラリー爆薬とはおかゆ状のどろどろした形態の爆薬であり、流動性があるため ANFO 爆薬のように縦孔に直接流し込み装填ができる爆薬である。この爆薬は、始めユタ大学の M. A. Cook³⁾ が開発し 1960年に特許をとったものである。

スラリー爆薬は硝安に水を混ぜることによりまずどろどろの状態とし、ここに鋭感剤としてアルミニウム粉末、TNT あるいは硝酸澱粉のようなものを混入して、これらが分離しないようにのり剤を溶かし込んだものである。現在では、スラリー爆薬は主として、TNT を主成分とする TNT 系スラリー爆薬とアルミニウム粉末を主成分とする Al 系スラリー爆薬の 2 種類に分けられ、その性状および組成は Table 1 に示すとおりであるが、現在わが国では、主として TNT 系のスラリー爆薬が使用されている。

スラリー爆薬の生命とするところは、流動性および耐水性であるが、これを保持する役目を果しているの

Table 1 Composition and properties of slurry explosive.

	Composition and properties \ Type	TNT base	Al base
	Composition (%)	AN	45 ~ 60
TNT		25 ~ 35	—
Al		—	7 ~ 10
H ₂ O		10 ~ 20	20 ~ 25
gum		0.5 ~ 1	3 ~ 5
Properties	state	slurry state	slurry state
	color	yellow brown	silver
	density (g/cc)	1.44	1.22
	detonation velocity (m/s)	5,000 ~ 5,500	4,000 ~ 4,500
	initiator	primer	detonating cap
	influence of time lapse	small	large

が Table 1 に示すところののり剤である。のり剤は、厳密に言えば流動阻害剤といわれ、ゲル形成物である。こののり剤のためにスラリー爆薬中の水が分離せず、またスラリー爆薬以外の水とも混合しない。現在使用されている流動阻害剤は、グアガム、ボラックス、CMC、アクリルアミドなどである。いずれにしても、硝安一水一鋭感剤という3成分混合物の概念は、火薬は禁水性であるという従来の思想とは異なった、画期的なものである。

スラリー爆薬は、以上に述べたように流動性と耐水性を兼備しているの、従来の火薬とは異なった次のような種々の特徴をもっている。

- a) 耐水性である。したがって水孔に対しそのまま使用できる。
- b) 取扱い上安全である。鋭感剤は入っているが、水が充分入っているの、ANFO よりもさらに安全性がある。
- c) 縦孔に装填しやすい。流動性があるどろどろした状態であるから、流し込みが自由で、直接落とし込んでも危険性は皆無である。
- d) 伝爆薬が必要である。きわめて鈍感であるので起爆性も悪く、強力な伝爆薬を使用する必要がある。
- e) 密装填が可能である。穿孔一杯に充滿できるので、発破効果は大である。したがって穿孔間隔を大きくとることもできて、穿孔数が少なくてすむ。

以上のような特徴があるが、ただ鋭感剤として Al とか TNT のようなものを相当量使用するの、ANFO に比してコストは高くなる欠点がある。しかしながら、従来の爆薬 (TNT, ダイナマイト, カーリットなど) に比較すれば、かなり安くなるものである。

3. 爆速測定法

各種爆薬の爆速測定は一般にドートリッシュ法による⁵⁾。しかしこの方法は内径 34mm, 肉厚約 3mm の引抜鋼管に装填した爆薬を大気中で起爆した場合の爆速を求める方法であって、この爆速値は爆薬自体の性能を比較検討するには充分であるが、爆破孔内で直接爆薬の爆速を測定することは不可能である。そこで、近年装薬孔内における爆薬の爆速測定が検討されるようになった⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。われわれは、当研究室で開発した

抵抗プローブを使用して、スラリー爆薬を始めとして一連の爆速測定を実施し種々の検討を行なった。

その測定方法の原理は次のようなものである。すなわち、爆薬が起爆されると爆轟波が生じ、これが爆発反応を伴いながら爆薬内を伝播していく（この伝播速度が爆速である）。この爆轟波面は高温高压のガス体でイオン化しているために、その比抵抗は非常に低く、一般に $10\Omega\text{-cm}$ 程度である⁹⁾。これに対して爆薬の比抵抗は高いので、未反応爆薬と爆轟波面との比抵抗との差を検出することにより、爆速を電氣的に測定することが可能になる。

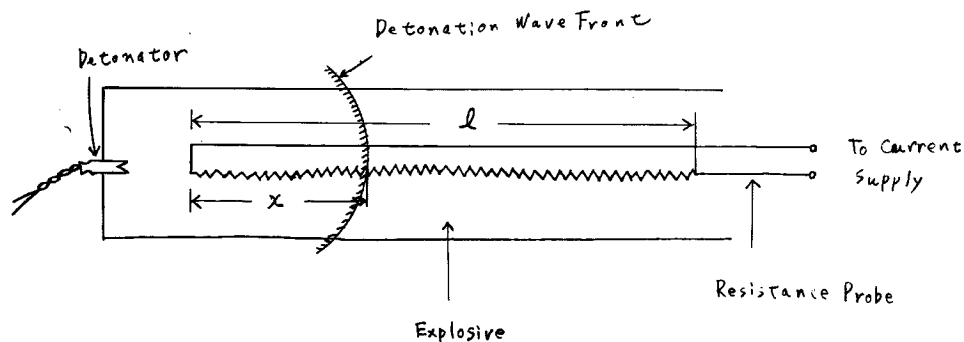


Fig. 1 Principle of Resistance Method.

Fig. 1 のように、爆薬内に爆轟波の進行方向に平行に、単位長さ当りの電気抵抗 $r\Omega$ 、長さ l の抵抗線よりなる抵抗プローブを挿入し、これに一定電流 I を流すと、プローブ両端の電圧 V は、 $V = I \cdot r \cdot l$ となる。さて、前述のように爆轟波面の比抵抗は非常に低いので、爆轟波の進行とともに抵抗線が爆轟波の位置で順次短絡されていく。したがって、例えばプローブ先端よりの距離が x の位置まで、爆轟波が進行したとすれば、その場合プローブ両端の電圧は、プローブに流れる電流が一定の場合には、

$$V = I \cdot r \cdot (l - x)$$

となり、爆速 D は、

$$D = \frac{dx}{dt} = -\frac{1}{I \cdot r} \cdot \frac{dV}{dt}$$

で示される。したがって、プローブ両端の電圧の時間的変化の状態を測定することにより、その爆速値を求

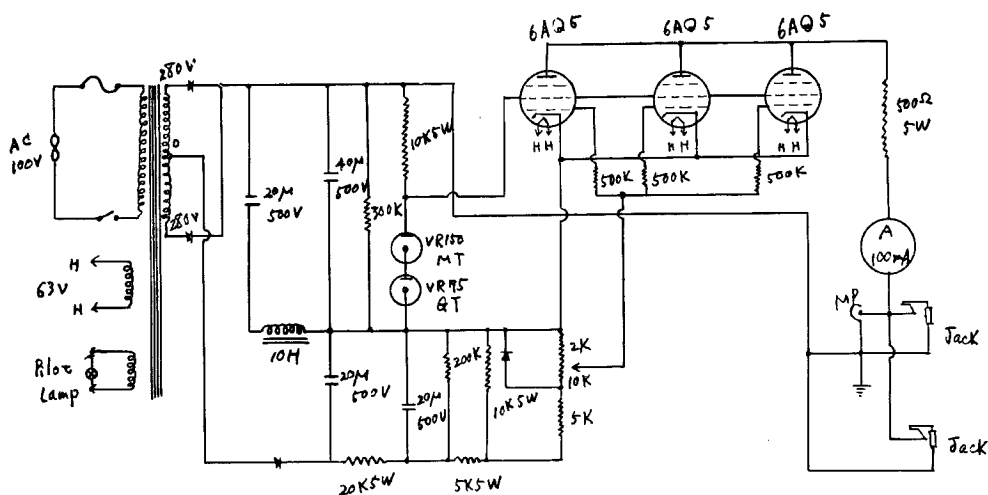


Fig. 2 Circuit Diagram of Constant Current Supply

めうる。この場合一番問題となるのは、爆速とプローブ両端の電圧変化との関係を直線的にするには、プローブへその抵抗値と関係なく、一定電流を流さねばならぬ点であるが、われわれは Fig. 2 に示すような回路の定電流装置を製作して、プローブへ常に一定の電流を流すように工夫した。

次に、現場での測定においては、爆破箇所と測定器との間にかなりの距離をとらねばならない。したがって、抵抗プローブと測定器の間の電線の分布容量を無視することができなくなるから、この分布容量に起因する波形のひずみが生じないように抵抗プローブの全抵抗値及びそれに流す電流の値を決める必要がある。佐々らの実験結果⁷⁾より、全抵抗 700 Ω のプローブに 30 mA の電流を流した場合には、ほぼ 0.001 μF 以下、約 150 Ω のプローブに 100 mA の電流を流した場合には、ほぼ 0.01 μF 以下の分布容量であれば波形のひずみは、ほとんど認められないことが確かめられているので、われわれの実験の場合にも上記の実験結果にもとづいて、プローブの全抵抗および電流を決定した。すなわち、プローブと測定器の間に 200 m 以下の同軸線（その分布容量は 3 pF/cm）を使用、約 150 Ω 程度の抵抗プローブを作り、80 mA 程度の電流を流して測定を行なった。さて、われわれは測定用に Fig. 3 に示すような、1/2 W, 10 Ω の P 型固定抵抗を一定間隔に鎖状につなぎ合せて、真ちゅう管に挿入したプローブを製作した。

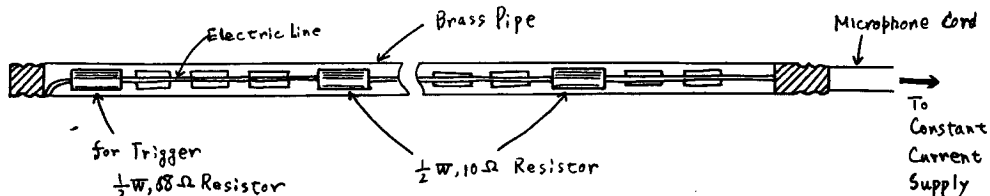


Fig. 3 Outline of Resistance Probe.

なお、先端の抵抗としては、シンクロスコープの同期信号用として 68 Ω の固定抵抗を使用した。このプローブを爆薬中に挿入しておく、爆薬が起爆されて爆轟波が生じると、前に述べた理論により、先ずシンクロスコープのトリガー信号が起動し、次いで爆轟波面が順次進行するにしたがって、真ちゅう管が溶けて抵抗体と順次短絡していくことによって、連続測定法とは違って階段状の波形が得られるわけである。なお、測定方法の概略図は Fig. 4 に示すとおりである。

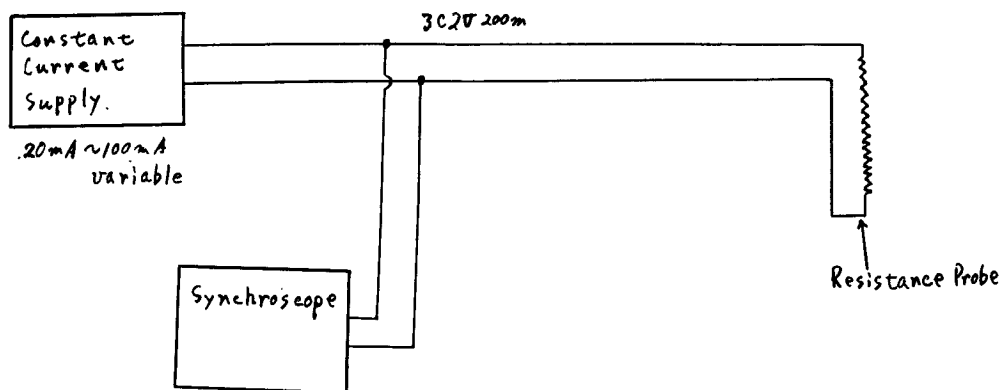
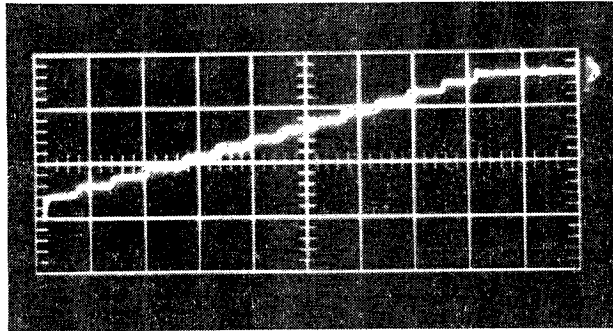


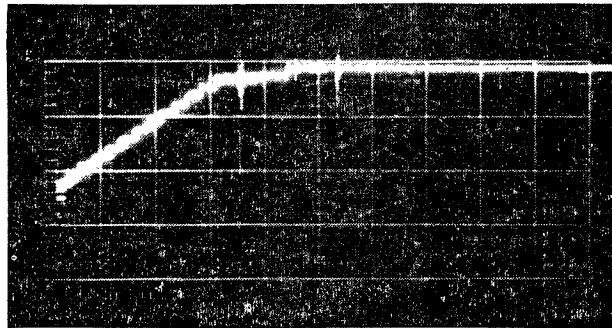
Fig. 4 Outline of Measurement.

4. 実験結果及び考察

この爆速測定による測定波形の例を Photo. 1 の (a) (b) に示す。この波形からみてもわかるように、波形のひずみはほとんどみられず、階段状の波形になっている。



(a) Granular TNT, sweep velocity 100 μ s/div.



(b) TNT slurry, sweep velocity 200 μ s/cm

Photo. 1 An Example of Oscillograms of Field Test Shot.

また測定結果をTable 2, Table 3, Table 4 に示す。

Table 2 Results of Experiment (Example 1)

[At Nagano Dam. Nov. 1966 and Apr. 1967]

Type of explosive.	TNT slurry	TNT slurry	TNT slurry	TNT slurry	TNT slurry	granular TNT	granular TNT	granular TNT
	Hole diameter							
	250mm	90mm	90mm	75mm	65mm	250mm	250mm	75mm
Detonation velocity (m/s)	0~3m	0~1.2m	0~0.6m	0~0.6m	0~0.6m	0~2m	0~1.2m	0~0.6m
	5,200	4,300	4,800	5,860	5,440	5,500	6,230	5,900
	3~6m	1.2~3.6m	0.6~3.6m	0.6~1.2m	0.6~1.8m	2~4m	1.2~4.2m	0.6~1.8m
	5,700	3,800	4,100	5,720	5,100	6,000	5,700	5,500
	6~8m			1.2~1.8m	1.8~2.1m	4~6m	4.2~6.6m	1.8~4.2m
	5,400			4,700	4,900	6,000	5,400	5,100
				1.8~3.3m	2.1~2.4m			
				3,350	1,940			
average (m/s)	5,400	4,050	4,200	4,500	4,370	5,800	5,730	5,300

Table 3 Results of Experiment (Example 2)

[At Taga Mine Nov. 1967 Hole Diameter : 70 mm]

Distance from primer	Type of explosive	ANFO	ANFO	ANFO	granular TNT	granular TNT	TNT slurry	TNT slurry	TNT slurry
	cm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0~25		3,570	3,120	3,840	5,000	4,550	6,250	8,330	5,000
25~50		3,570	3,120	3,840	4,170	4,170	6,250	6,250	4,170
50~75		3,570	3,120	3,120	4,170	3,930	5,000	5,000	4,170
75~100		3,120	3,120	3,570	3,930	4,550	5,000	6,250	4,170
100~125		2,780	3,120	3,120	3,930	4,550	5,000	5,000	4,170
125~150		3,570	3,570	3,120	4,170	4,550	4,170	5,000	3,570
150~175		2,780	3,570	3,120	4,550	4,550	5,000	5,000	3,570
175~200		3,120	3,570	2,780	3,580	4,550	5,000	5,000	4,170
200~225		3,120	3,120	2,780	4,550	4,170	4,170	4,170	4,170
225~250		3,120	2,500	2,780	3,930	4,550	5,000	5,000	3,570
250~275		3,120	2,780	2,780	3,930	5,000	5,000	5,000	4,170
275~300		3,570	2,780	3,570	4,170	3,930	4,170	4,170	4,170
300~325		—	—	3,570	4,170	4,170	1,000	3,570	4,170
average		3,230	3,100	3,280	4,060	4,360	4,000	5,000	4,060

Table 4 Results of Experiment (Example 3)

[Hole Diameter : 70mm]

Type of explosive	granular TNT	ANFO	TNT slurry
Detonation velocity (m/s)	0~18cm	0~18cm	0~15cm
	5,460	4,500	7,500
	18~36cm	18~36cm	15~30cm
	3,900	3,600	5,000
	36~54cm	36~108cm	30~45cm
	4,300	3,790	5,000
	54~72cm	108~144cm	45~60cm
	4,550	3,750	6,000
	72~108cm	144~198cm	60~105cm
	4,500	3,700	5,000
	108~144cm	198~234cm	105~120cm
	4,420	3,270	7,500
	144~216cm		120~175cm
	4,090		3,750
average (m/s)	4,360	3,660	5,210

Table 2 に示したものは、1966年11月および1967年4月に九頭龍川長野ダムの原石山（岩質は角礫凝灰岩）で測定した結果であり、Table 3 は1967年11月に多賀鉱山の石灰山ベンチカット現場で測定した結果を示したものである。また Table 4 に示したものはその他の現場において測定した結果の一例である。

爆破の現場においては、岩質による差異、場所の相違、装填の不均一性、爆薬組成の不均一性などがあるために、一概には論じられないが、これらの結果を巨視的にみれば、Table 2, Table 3, Table 4 より爆速と起爆点からの距離の関係は Fig. 5 のようになるものと考えられる。

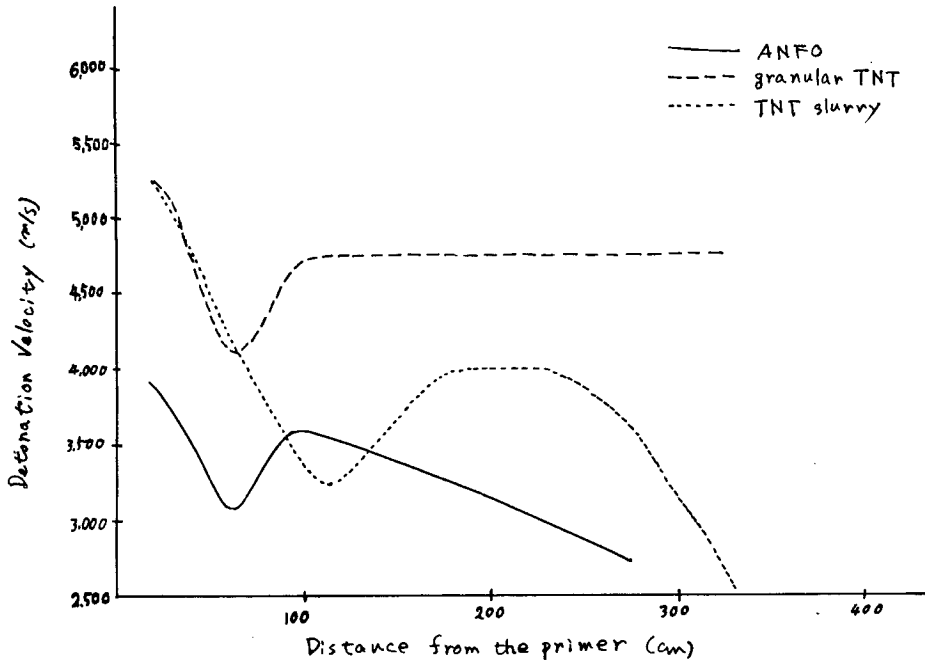


Fig. 5 Relation between detonation velocity and distance from the primer.

一般に爆薬の爆発速度は Fig. 5 の粒状 TNT にみられるように、最初起爆点近くにおいて高い値を示し、この値が起爆点から遠ざかるにつれて一度減少したのち、やや回復しその後は大体一定の値を示すものといわれている。ダイナマイトなどの爆薬がこの例であり⁷⁾、このことは爆薬の長孔使用において、孔長がある程度長くても爆薬の威力が余り減少せず、したがって爆破効果が低下することも少ないことを示している。これに対し、ANFO 爆薬の場合、長孔内の連続測定例は少ないが大体 Fig. 5 のような傾向をたどるものと思われる。このことはわれわれが、口径3インチ長さ3mの鉄管内のANFO爆薬の区間爆速をドートリッシュ法により測定した時の測定結果とよく一致している。すなわち、爆速は起爆点付近では高い値を示し、起爆点から遠ざかると爆速値は一度低下したのち、再び回復するが、その後は徐々に低下の一途をたどる傾向を示すものと思われる。TNT スラリー爆薬の場合は、Fig. 5 に示した曲線から考えて、ANFO 爆薬に近い傾向を示すものと考えられる。しかしながら、TNT スラリー爆薬は、爆速の低下する割合が、ANFO 爆薬に比して激しいように思われる。

一般に長孔装薬において、爆薬の爆速が途中より低下するという事は、爆破効果の低下を示すものであるから、このような場合には起爆薬（プライマー）に爆圧の高い強力な爆薬を用いるか、途中に伝爆薬（ブースター）を挿入することによって、爆速低下を防止する対策を講じなければならない。Spencer社のTechnical data¹⁰⁾をみると、ANFO爆薬の長孔装薬の場合、途中に伝爆薬を挿入して、爆破効果の向上を図っている。したがって、スラリー爆薬が今回の実験結果から考えられるように、爆速が途中から甚しく

低下する傾向を示すならば、現場における長孔使用などの場合には、装薬途中に伝爆薬を挿入する必要があるものと思われる。TNT スラリー爆薬および ANFO 爆薬が、粒状 TNT 爆薬とは違って、途中から爆速が低下する傾向を示すことは、TNT スラリー爆薬および ANFO 爆薬が硝安を組成の基剤としている点で非常に興味深いことである。すなわち爆速が途中から低下する傾向は、この硝安が原因しており、この傾向は、硝安系の爆薬に共通する点のようにも思えるが、これは今後の検討を要する問題であろう。

また、A1 系スラリー爆薬については、実験例も少なく、どのような傾向を有する爆薬であるかは、現在の段階では断定できないので、今後引き続き測定する方針である。

5. 結 言

以上の測定の結果から、スラリー爆薬は他の爆薬と比較して特異性のある爆薬ではあるが、爆速の変化からみると、粒状 TNT 爆薬のように爆速値が一定している爆薬と違って、ANFO 爆薬のように爆速値が低下する傾向を示すものと考えられる。しかしながら、その低下の割合は ANFO 爆薬に比較して激しい。したがって、現場使用に際しては強力な起爆薬（プライマー）を用いるか、途中に伝爆薬（ブースター）を挿入することによって爆速低下を防止する必要があるものと思われる。

スラリー爆薬は未だ実験的段階を脱しておらず、丁度初期の ANFO 爆薬のような状態であるが、将来性のある爆薬であり、さらに製造方法、爆破法の研究を行なうことにより、実用に供し得るものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 横尾, 飯笹, 安: 土木施工, Vol. 2, No. 5, p. 38, 1961.
- 2) 若園, 佐藤: 爆破, p. 94, 1965, 鹿島研究所出版会
- 3) M. A. Cook: The Science of High Explosives, p. 316, 1960.
- 4) 木村: 工業火薬協会誌, Vol. 25, No. 5, p. 37, 1964.
- 5) 若園, 佐藤: 爆破, p. 4, 1965, 鹿島研究所出版会
- 6) 伊藤, 若園, 佐藤, 安: 工業火薬協会誌, Vol. 25, No. 2, p. 70, 1964.
- 7) 佐々, G. Larocqe: 抵抗法による爆速測定について, 工業火薬協会誌, Vol. 27, No. 4, p. 223, 1966.
- 8) R. L. Ash, P. H. Rydlung and J. J. Yancik: A Potential Method For Evaluating The Energy Released From Non-Ideal Explosive Reaction.
- 9) 伊藤, 藤中, 平尾: 水曜会誌, Vol. 25, No. 3, 1963.
- 10) Spencer Chemical Co.: Use of Prilled Ammonium Nitrate Fuel Oil Mixture in Stripping, Qudrringand Metal Mining, Spencer Technical Data, Sept, 1960.