

spark or flame, initial gas volume, initial gas components and the interruption of burning are due to the composition ratio of raw materials of powder core, the covering materials and the manufacturing conditions.

It is most effective for prevention of the abnormal burning of safety fuse to decrease the pressure coefficient n in burning.

From the statistical standpoint, author commented on JIS (Japanese Industrial Standard) concerning safety fuse and calculated the probability of inverse shot in the blasting using the existing safety fuses.

研究論文

圧搾起爆薬の燃焼

柳沢 剛・岡崎一正*

1. 序 論

雷こうを高圧に圧搾すると爆轟せずに燃焼するが、これは一般に死圧現象と呼ばれている。また Clark¹⁾によるとジアゾジニトロフェノール (DDNP) においては死圧現象はないといわれているが、この場合は死圧という用語の解釈に問題がある。このことについてはあらためて論ずることとして圧搾起爆薬の燃焼であるが、その燃焼速度を測定した例は比較的少ない。死圧状態における起爆薬の燃焼速度と、さらに圧搾圧力を増加したときに生ずる燃焼速度の変化を明らかにすることは、雷管その他の火工品の製造上、および起爆薬を取扱う上からも重要なことである。

1. 1 死圧と過圧

Muraour²⁾によれば雷こうを 700kg/cm²以上で圧てんすると、緩燃導火線の伝火では爆轟せずに単に爆燃するに過ぎないが、これを雷こうが過圧されたといっている。このように過圧された爆薬は伝火では爆轟しないとしても、もしアジ化鉛のような起爆薬の少量を付してその爆轟で起爆すれば、過圧起爆薬も爆轟するようになる。この現象の起る限界状態は Dautriche が

述べている爆轟生起の限界密度とは本質的に異なる。この限界密度は混合爆薬ならでは生じないといわれている。

Table 1 に示す Kast の値³⁾によれば、ピクリン酸、TNT のような単一化合物には限界密度が存在しないで圧縮下で到達する最大密度の下でもかなり強い伝爆薬を用いれば、爆轟しうることを示している。

Forg⁴⁾ はアジ化鉛を 600kg/cm² に圧縮しても過圧の現象が認められなかつたと報告し、Muraour ら²⁾は 120°~130°C に予熱した雷こうが単に赤熱線の接触で燃焼の先行なしに爆轟することを示した。予熱した雷こうの直接爆轟は、ただに粉状のみでなく過圧したものについても見受けられると述べている。

そこで、高密度において十分な起爆作用を与えても爆轟しない現象を死圧と呼び、過圧という語を死圧と区別して用いるとすれば前記のように DDNP には死圧現象がないといえるであろう。また、雷こうについては死圧ではなく過圧ということになる。

Taylor⁵⁾ は火薬類の爆轟は結晶相互の摩擦により表面分子が活性化されることによるので、摩擦化学の立

Table 1 Relation between density ρ and detonation velocity D of explosives

Explosive	Picric acid				T N T				
ρ (g/cm ³)	0.81	1.30	1.50	1.66	0.81	1.31	1.50	1.55	1.61
D (m/sec)	4,570	5,980	7,100	7,100	4,400	5,000	6,500	6,700	6,710

昭和42年6月1日受理

* 京大工学部燃料工学科

場から火薬類の密度を大にしたときには、結晶が相互運動をなしうる余地を失うため爆轟しなくなるものと論じた。梶原⁹⁾は雷管の死圧について ぼう粉量とぼう粉に加える圧搾圧との関係より、雷管の半爆現象について検討している。この報告によるとぼう粉圧搾圧が高いほどぼう粉量が増加して半爆の増加も著しいことになる。

1 2 圧搾起爆薬の燃焼

雷こう、DDNP その他の起爆薬類の燃焼速度について Andreev⁸⁾は雷こうが低密度で爆轟し易いのは、爆薬粒子の間に熱ガスの貫通をたやすくし、燃焼速度を増大する結果であるとした。この事実を確認するため、5,000 kg/cm²に圧した雷こう 1g を少量の無煙火薬と共に鉄管に詰め、65 kg/cm²の圧に耐える鉄板で封じて実験した。このとき雷こうは燃焼したが爆轟しなかった。しかし、さらに多量の無煙火薬を加え、約 500 kg/cm²に耐える鋼板で封入すると雷こうは爆轟した。

Belyaev ら⁹⁾は 1,750 kg/cm²で圧搾した雷こうの錠剤は大気圧で 1.5~2.0 cm/sec の速度で燃焼することを示した。なお雷こうの大気圧下での燃焼は2段におこる。第1は雷こうの一部が崩壊して細かい粒になり、第2は錠剤の表面に密接したこれら微粒子の完全分解である。また、密度 3.8 g/cm³までに圧縮した雷こうは爆轟せずに燃える。DDNP の圧搾については、7,030 kg/cm²、8,300 kg/cm²等の圧力で導火線点火で起爆したと論じているが著者等の実験では高度に圧搾した試料はすべて燃焼した。

Belyaev¹⁰⁾は高度に圧搾した起爆薬類の燃焼速度について次の値を示している。

雷こう 1.55 cm/sec, DDNP 0.95 cm/sec, トリニトロアジソベンゼン 0.65 cm/sec, ピクリン酸カリウム 1.50 cm/sec, トリシネートは燃焼せずに爆轟する。ただし、トリシネートにおいては40%タルクを混合すると、14.5 cm/sec になる。

2 実験方法および結果

雷こう、DDNP、ニトロシアナミド銀およびテトラセンを試製成形器 (Photo. 1) を使い、それぞれ 500~1,250 kg/cm²で 2mm×2mm×20mm の直方体に圧搾成形し、これを一端より白金電橋で点火して燃焼速度を測定した。

2. 1 試料

- a. 雷こう：灰白色、菱形板状結晶、純度 99.6%
- b. DDNP：帯緑褐色、針状結晶
- c. ニトロシアナミド銀 AgCN₃O₂：無定形白色結晶
- d. テトラセン：淡黄色、柱状結晶

2. 2 圧搾圧力と密度

Photo. 1 は成形器を上方より見たもので、秤量した試料を本体の中央の横長の溝に落し込む。次に圧搾用

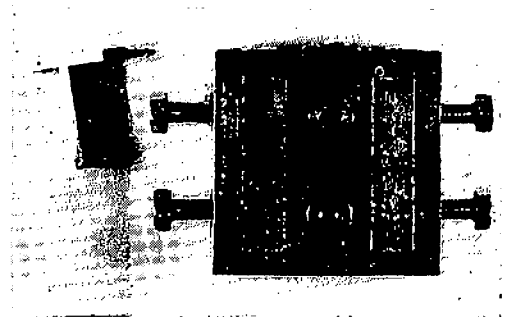


Photo. 1 Compression apparatus

の蓋をそう入しプレスで加圧する。圧搾圧力は 500, 750, 1,000, 1,250 kg/cm²の4段階とし、ニトロシアナミド銀については 500, 1,250 kg/cm²の2段階とした。以上の方法で成形した試料の密度を Table 2 に示す。

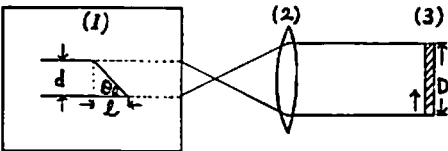
Table 2 Relation between compression pressure and density of samples

Primary explosive	Compression pressure (kg/cm ²)			
	500	750	1,000	1,250
Mercury fulminate	Density (g/cm ³)			
	3.71	3.81	4.00	4.13
DDNP	1.39	1.44	1.50	1.56
Silver nitro-cyanamide	2.75	—	—	3.37

2. 3 燃焼速度の測定

a. 流し写真法

試料を白金電橋によつて点火し、その燃焼の状態を回転ドラム上のフィルムに像を結ばせると Fig. 1 のようになる。



(1) film (2) lens (3) sample

Fig. 1 Outline of streak photography

燃焼速度の算出は次式による。

燃焼速度

$$v = r, n, L, \tan \theta$$

$$r = \frac{D}{d} (\text{拡大率})$$

L : フィルム長

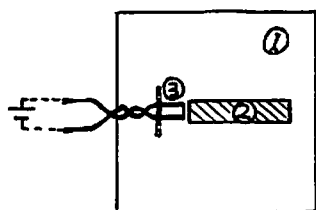
n : ドラム回転数/秒

$$\tan \theta = \frac{d}{l}$$

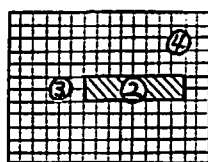
b. 試料の固定方法

b-1. アクリル板上固定

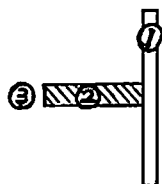
測定距離が近いので、圧搾試料が燃焼中に飛散するのを防ぐため透明アクリル板上に、長方形の一面を密着固定し、電橋で発火させる。雷こう、DDNP いずれの場合も圧搾圧力に関係なく、燃焼しながら飛散するので燃焼速度の測定はできない。その状況は静止写真で雷こうについては Photo. 2, DDNP については Photo. 3 に示し、固定法は Fig. 2 に示す。



(a) one surface fixed



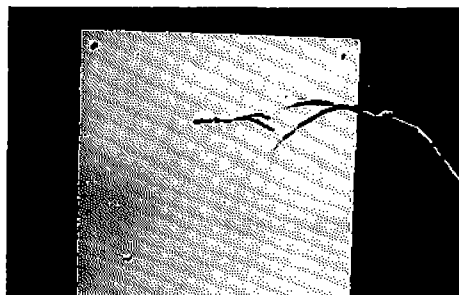
(b) fixed onto net



(c) one edge fixed

- ① fixing plate
- ② sample
- ③ bridge wire
- ④ net

Fig. 2 Fixing method of samples



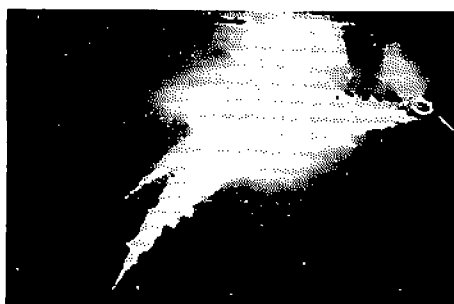
(a) sample



(b) 750kg/cm²



(c) 1,000kg/cm²



(d) 1,250kg/cm²

Photo. 2 Burning feature of mercury fulminate pellet fixed



(a) 500 kg/cm²



(b) 750 kg/cm²



(c) 1,000 kg/cm²



(d) 1,250 kg/cm²

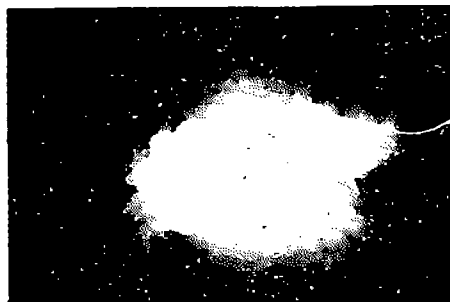
Photo. 3 Burning feature of DDNP pellet fixed on a plate

b-2. サラン網上固定

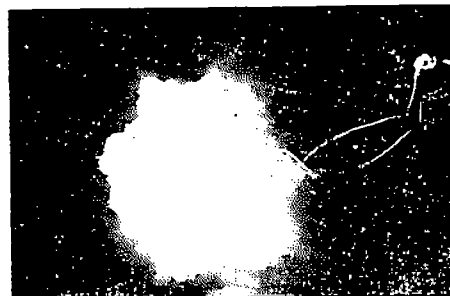
試料の自由面を増す目的で、試料をサラン網上に固定して燃焼させると、雷こうについては Photo. 4、DDNPについては Photo. 5 に示すように定常燃焼となる。流し写真より燃焼速度を測定した結果は Table 3 の通りである。



(a) 500 kg/cm²



(b) 750 kg/cm²



(c) 1,250 kg/cm²

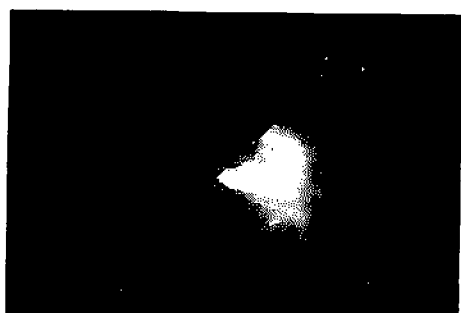
Photo 4 Burnig feature of mercury fulminate pellet fixed onto net

Table 3 Relation between compression pressure and burning velocity (measured with streak camera) of the samples fixed onto the net.

Primary explosives	Compression pressure (kg/cm ²)	Burning velocity (m/sec)		
Mercury fulminate	500	0.9	1.3	1.1
	750	1.3	1.3	1.1
	1,000	1.5	1.3	1.1
	1,250	1.1	1.1	1.3
DDNP	500	1.3	1.2	
	750	1.3		
	1,000	1.1		
	1,250	0.9		
Silver nitro-cyanamide	500	0.5		
	1,250	0.4		
Tetracene	500	none		



(a) 500 kg/cm²



(b) 750 kg/cm²



(c) 1,250 kg/cm²

Photo. 5 Burning feature of DDNP pellet filed onto net

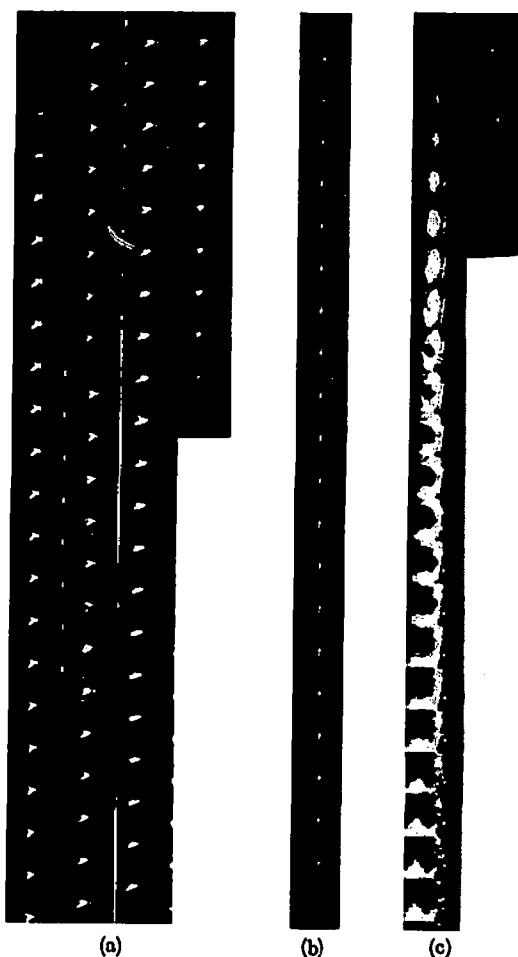
c. 16 mm 連続写真による方法

自由面をさらに増すために、長方形試料の一端を固定板上に垂直に固定し、他の一端より電橋点火するとより定常燃焼状態を示す。この状態を 64コマ/秒の定速で撮影した。連続写真の一部を Photo. 6 に示す。

写真では時間的には上から下へ進行し、燃焼の方向は左から右に向っている。ただし雷こうにおいては、圧搾圧力によらず異常燃焼することがある。

次に雷こうの定常燃焼と異常燃焼の状態を拡大して Photo. 7 および Photo. 8 に示す。

以上の連続写真より燃焼速度を求めると Table 4 のようになる。



(a) mercury fulminate
(750 kg/cm², $v=0.018$ m/sec)
(b) DDNP (1,000 kg/cm², $v=0.059$ m/sec)
(c) silver nitrocyuanamide
(500 kg/cm², $v=0.049$ m/sec)

Photo. 6 Succession of pictures obtained with 16mm cine camera (64 frames/sec), showing the propagation of combustion.

Table 4 Relation between compression pressure and burning velocity measured with 16mm movie camera.

Primary explosives	Compression pressure (kg/cm ²)	Burning velocity (m/sec)		
Mercury fulminate	500	0.16	0.10	0.03
	750	0.16	0.02	0.03
	1,000	0.02	0.02	0.03
	1,250	0.02	0.03	
DDNP	500	0.07	0.07	0.06
	750	0.07	0.07	0.10
	1,000	0.06	0.06	0.07
	1,250	0.06	0.06	0.05
Silver nitro-cyanamide	500	0.5		
	1,250	0.4		

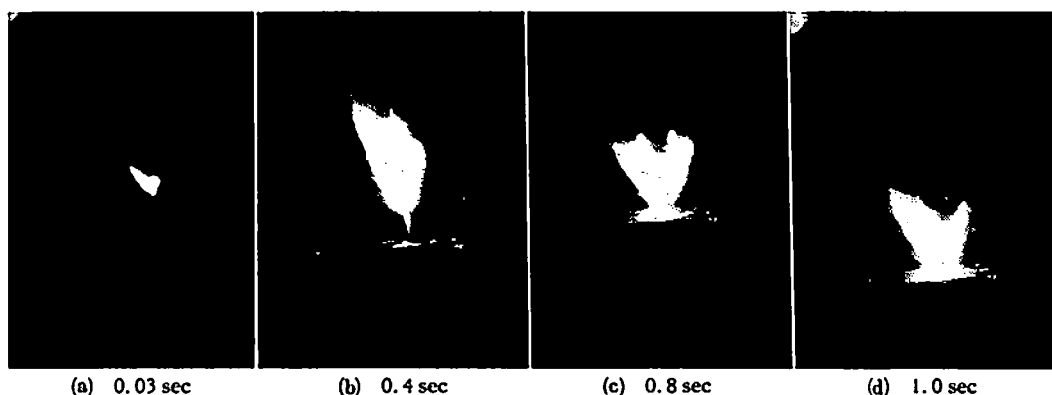


photo. 7 Steady burning of mercury fulminate

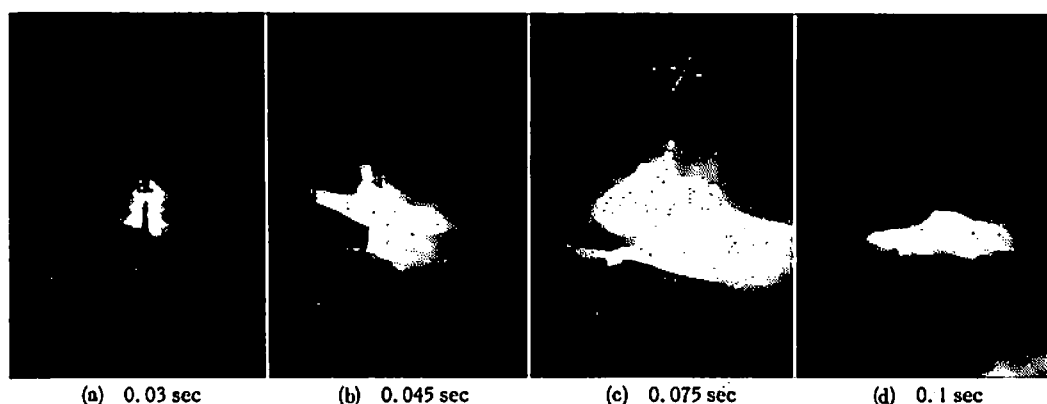


Photo. 8 Unsteady burning of mercury fulminate

d. イオンギャップ法

燃焼速度をさらに検出するために、イオンギャップをシネカメラと並用し、オシログラフで時間を測定

すると Table 5 のような値をうる。
試料には雷こうを用いた。

Table 5 Burning velocity of the mercury fulminate measured by the ion gap method

Mercury fulminate	Compression pressure (kg/cm ²)	500	750	1,000	1,250
	Combustion velocity (m/sec)	0.04	0.03	0.03	0.03

3. 総 括

以上の測定結果の妥当な値をまとめて表示すると次のようになる。

Table 6 Summary of results

Primary explosive (500~1,250 kg/cm ²)	Burning velocity (m/sec)	
	Fixed onto net	Edge fixed
Mercury fulminate	0.9~1.5	0.02~0.04
DDNP	0.9~1.5	0.06~0.07
Silver nitro-cyanamide	0.4~0.5	0.05

以上の結果から圧搾圧は 500~1,250 kg/cm² の範囲内では燃焼速度にほとんど関係がない。

Photo. 2, 3 および 4 に示すように試料の固定法の相違による燃焼自由面の影響が雷こうおよび DDNP の燃焼速度にあらわれ、一側面完全固定の場合には激しく発火飛散するので自由面の小さな状態ほど燃焼速度を増すことが確認される。

雷こうはときどき異常燃焼することがある。Photo. 8 (a) に示したように電橋点火の瞬間に炎が試料の全表面をおおうことによるもので、この現象は圧搾圧に関係なく、すべて同程度の確率でおこる。また、この

現象は試料表面が緻密で均一な金属光沢をおびているものにはほとんど生じないことから、試料表面のあらさに支配されるものと考えられる。

文 献

- 1) L. V. Clark: Ind. Eng. Chem., 25, 663~699 (1933)
- 2) H. Muraour: Mem. Artill. France, 18, 895 (1937)

- 3) 山本祐徳: 工火協誌, 3, 285 (1942)
- 4) Forg: Mitteil. Artill. Geniewesen, 336 (1916)
- 5) H. Muraour: Chim. et Industr., 36, 3 (1936)
- 6) W. Taylor and A. Weale Proc. Roy. Soc., A 138, 92 (1932)
- 7) 榎原 周: 工火協誌, 9, 104 (1949)
- 8) K. K. Andreev: ソ連学士院報, 31, 456 (1941)
- 9) A. F. Belyaev: ソ連学士院報 33, 41 (1941)
- 10) 同上, 52, 503 (1946)

Burning of Primary Explosives under Compressed Conditions

Takeru Yanagisawa & Kazumasa Okazaki

Samples of mercury fulminate, DDNP and silver nitrocyuanamide were compressed under varying pressures of 500 kg/cm², 750 kg/cm², 1,000 kg/cm², and 1,250 kg/cm² forming a long rectangular shape of 2mm×2mm×20mm, with the surface fixed. Each of these compressed samples was ignited at one end for the photographic study of the burning velocity and "combustion process".

Table 6 shows the results of burning velocity test. From these results it is learned that the combustion velocity is nearly constant in the compression range of 500 to 1,250 kg/cm².

As shown in Photo. 8, mercury fulminate often undergoes unsteady burning, and the burning velocity of DDNP, though known to have no dead pressure, is affected by compression pressures.

(University of Tokyo)

ニ ュ ー ス

推力制御可能な固体燃料ロケット

米国、ロッキード・プロパルジョン社は宇宙船の軌道変更や姿勢制御に適する大型固体燃料ロケットの完成に導く重要な実験に成功したという。

操作が複雑な液体燃料ロケットに代つて、固体燃料ロケット開発と取組んで来たが、これを實現するには大推力を持ち、噴射の停止、再点火が繰返し可能で、更に推力の強さを自由に制御出来る事が必要である。同社が開発実験に成功した新型の大推力固体燃料ロケットは主従2つの固体燃料エンジンを組合せ、副エンジンを制御する事によつて主エンジンの推力を自由に調節する事が出来るという画期的構想にもとづくものである。その構想は次の通りである。

主エンジンは超高エネルギー燃料で大推力を出す普通の固体燃料ロケットであるが、特別の大型ノズルを持ち、自力では燃焼を継続出来ないように設計されている。従(副)エンジンは高压ガス発生装置で、ここで発生した高压、高温ガスをバルブを通じて主エンジンのノズルに送りこむと、燃焼反応を誘導し、直ちに主エンジンの活動が開始する仕組み。したがつてこの注入ガスの量を調節する事によつて主エンジンの停止、再点火をはじめ微細な制御が出来るわけ。又この高压ガスを別のノズルから噴射させて宇宙船の姿勢制御を行なう事も出来る。同社が最近行なつた地上噴射実験によると、外部からの指令信号で高压ガスの注入が自由に制御され、これに応じて主エンジンの推力を大幅に変化出来る事が実証された。(グローブ・プレス・サービス 日刊工業 6月2日) (伊藤)