

# 雷管の爆発現象に関する研究

## — 瞬間 X 線写真法等による雷管管体破碎状況 —

吉田 正\*・赤羽周作\*・田中雅夫\*・松本 栄\*

### 1. 結 言

雷管の爆発状態に関する観察は古くから高速度写真法によつて行なわれているが、最近植村氏<sup>1)</sup>、日下部氏<sup>2)</sup>等の資料がある。

筆者等は、瞬間 X 線写真法により雷管内の構造の相違による空中懸吊での爆発現象を知り、これと平行して、厚紙紙筒およびアルミ板を用いて爆発時の破砕片の飛散状況について測定を行なつた。

もともと、雷管は鉱山等の発破で爆薬包を起爆させるための火工品であり、その薬包間での爆発挙動の観察が必要であり、将来はその薬包の起爆過程を含めた雷管の爆発状況について考究するが、この報告はその基礎試験である。

瞬間 X 線写真法を爆薬等の爆発現象観察に用いた例は外国においては約 10 年前から行なわれていて、爆薬の殉爆<sup>3)</sup>、成型爆薬の爆発<sup>4)</sup>、導爆線起爆の爆薬包の挙動<sup>5)</sup>等についての報告があるが、雷管の内部構造の相違による爆発状態の比較観察の例はない。

### 2. 瞬間 X 線写真法による雷管爆発の観察

#### 2-1 試 料

供試雷管は 6 号電気雷管で、構造上から、内管の有無により次の 3 種類のものについて試験した。その内部構造の略図は [Fig. 1] に示す。

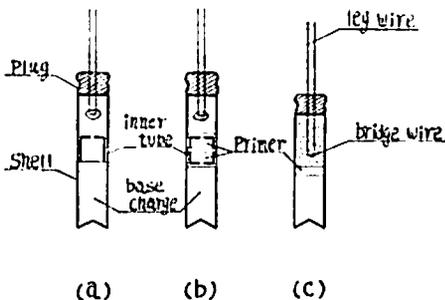


Fig. 1 Construction of tested detonators

- (1) 内管 1 個を有する雷管 [Fig. 1-a]
- (2) 内管 2 個を有する雷管 [Fig. 1-b]
- (3) 内管のない雷管 [Fig. 1-c]

これらの雷管は商品として現場で使用されているもので、特に試製したものではない。それ故、内部の起爆薬、添装薬は必ずしも同種のものではない。しかし前述の主旨から雷管構造上の相違による爆発状況を撮影した。

#### 2-2 実験方法

##### 1) 実験配置

実験配置は、[Fig. 2] に示すように X 線光源部 (T)、防禦板 (P<sub>1</sub>)、被写体 (O)、防禦板 (P<sub>2</sub>)、X 線フィルム (F) と配置した。

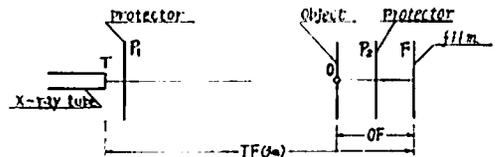


Fig. 2 Testing arrangement

防禦板 (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>) は被写体 (O) が爆発物であり、爆発に伴つて固体粒子が四方に飛散するために X 線管およびフィルムカセットを損傷するおそれがあるので設置するものである。

各配置間隔は次の通りである。

X 線管先端からフィルム間の距離 (TF) 2.5~3m  
 被写体からフィルム間の距離 (OF) 20~30cm  
 試験用雷管体の厚きは 0.15 mm であるため、後述する瞬間 X 線光源装置で TF の距離は 3m で十分であつた。なお、フィルムは高感度 X 線写真用フィルム (デュポン社) CRONEX (Hi-speed MB) で、これに増感スクリーン (デュポン社) としてフィルムカセット中に CRONEX-Intensifying Screen を貼つた。

##### 2) 瞬間 X 線光源装置

爆発現象の瞬間撮影は、最近の瞬間 X 線光源の発生装置の進歩により、極めて簡単に行なうことができ

昭和45年6月24日受理

\* 資源技術試験所 東京都北区浮間町 4-26

る。当試験所の瞬間 X 線光源装置は、米国 Field Emission 社製瞬間 X 線光源装置で FEXITRON ; Model 130 と称するもので、2 channel, 出力 300kV である。現在はさらに改良されたものがあり、600kV ~2MV のものが製造されている。機構としては高压にチャージされたコンデンサーを遅発装置 ( $10\mu\text{s} \sim 10\text{ms}$  可変) により放電させて X 線をそれぞれの管から放射し、移動体の影をフィルム上にとらえる。フラッシュ幅は  $10^{-7}\text{sec}$  である。

パルサー (pulsar) は十数個のユニットからなり、これらに並列に荷電して、スパークギャップを通して直列に放電する。それらの間には加圧窒素 ( $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ) を満たす、また X 線管の周辺にはフレオレガス (約 1 psi) を満たし絶縁をよくする。

この爆発同期方法はイオンギャップ方式を用いた。

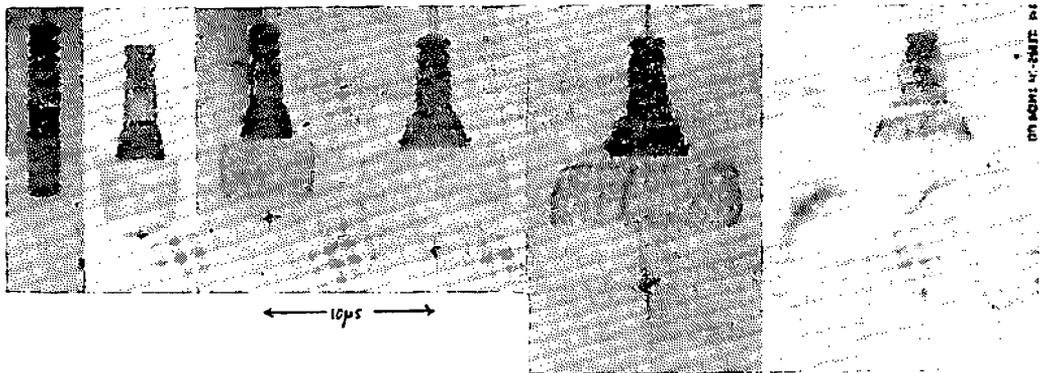


Fig. 3 Explosion process of detonator with an inner tube

Fig.1 に示す構造では、点火玉が発火し次いで起爆薬が爆発すると殆んど同時に添装薬の面が爆発し内管の入った部分は厚さ 0.30 mm であるから、その管体の側面方向に加わる力は内管の存在する部分と存在しない部分とで等しいとしても管体はその境界において切れることは当然である。その境で管体はメクレを生じていることが認められる。

また添装薬部の底部の破砕については円筒薬包の爆ごうで末端効果 (rim effect) があるように、破砕片が側面方向に飛散することが観察される。これは後述の紙筒による管体飛散角度試験においても見られる。

内管の入った部分の変形は物理的強度と起爆薬、添装薬の爆発によるガス圧で内管下部から拡大している。ここで観察されることは、雷管の内管部より上部 (点火玉のある空間) は、爆発ガスで側面方向に膨張すると同時に全体が押し上げられるようになり、塞栓方向に上部管体をおしつぶすような状況が観察された。時には、明らかに内管上部の孔をとおつて上部に向つ

### 2-3 実験結果と考察

初めに述べたようにここではまず内管の有無による雷管の爆発状況の相違点を求めたもので、これら3種の雷管の爆発状況に共通する点は総括において述べる。

Fig. 3~5 中の矢印  $\longleftrightarrow 10\mu\text{s}$  とあるは、同一フィルム上で 2 channel によるフラッシュで  $10\mu\text{s}$  のおくれをもつて撮影し、その進展状況を検討した。

この研究で最も多く試験した雷管は内管1個の構造のものであるため、これを中心として、内管2個を有するもの、内管のないものについて考察する。

#### 1) 雷管体中に内管1個を有する場合

Fig. 3 に示す写真は爆発前から爆発後時間とともに変化する爆発状況 (ここでは管体の破壊状況) を示す。

た爆発生成ガスにより塞栓の下部の管体が膨張する場合も見られた。

添装薬部の管体破片の飛散方向は下方向には進まず側面方向に飛散するが、この時の爆発ガス膨張との関係については後に述べる水中での爆発雷管の写真において、ガスは球形に進展するが添装薬部管体は側面に進行することが観察出来る。

これら一連の写真観察から、雷管管体の破砕片は雷管の内管位置より下部は微細破片として飛散し、破片の大きいものは内管を含めた上部管体の破片であることが明確になった。これは後に述べる厚紙紙筒を用いた雷管体破片の飛散状況の測定結果と一致する。

添装薬部の管体側面の平均速度は、実験回数が少なく明らかでないが、側面から 13 mm 付近では 1,000 m/s 以下と思われる。

管体底部は爆発と同時に1個の破砕片として軸方向に飛行するようであるが、紙筒試験やアルミ板試験の結果では時に 2~3 個に破砕されている場合もある。

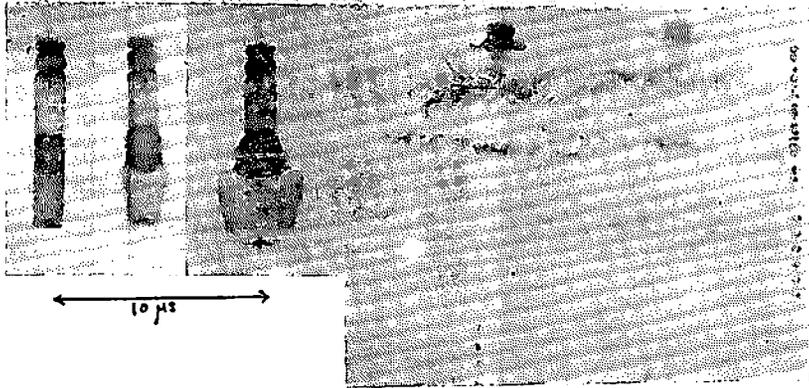


Fig. 4 Explosion process of detonator with 2 inner tubes.

この底部と添装薬の爆発生成ガスの関係は水中での雷管の爆発写真で観察出来る。[Fig. 7 参照]

爆薬包中に装着された雷管の管体破片の運動には示さないが、他の写真によると初めは爆薬成分である固体や粉体の抵抗をうけ、後には爆発生成ガスの流動に支配されるようである。

#### 2) 内管 2 個を有する場合

Fig. 1-b に示す内管 2 個を有する構造の雷管の爆発は Fig. 4 に示すように、第 1 段階として 2 個の内管で密閉された部分の爆発により、管体強度の差による破壊の変化、外部銅管体と内管（下部のもの）との接触部における添装薬の爆発生成ガスの圧入状況が明らかに観察される。そのため前述の内管 1 個の場合の内管下部における切断破壊と、内管 2 個の場合の下部内管と添装薬接触部における膨脹状況とは構造上から異なる変形状態を示した。

なお、その他の点で内管 2 個の場合の添装薬部の爆発状況が内管 1 個の場合の爆発状況と著しく異なるかどうかは明確に出来なかつた。

#### 3) 内管の存在しない場合

Fig. 1-c に示すように内管がなく、起爆性点火薬中に直接電橋が入り、通電とともに点火薬一起爆薬→添装薬が爆発する電気雷管がある。

Fig. 5 はこの種の雷管の爆発写真である。この一連の爆発の進行過程写真で左端が爆発前の雷管で、中央が起爆薬部、添装薬部の多少変形した時、右端がその後の進展状況である。

この管体の変形は起爆薬部と添装薬部はほとんど同時に変形しているが、その後は添装薬部の側面管体の飛散が早く、起爆薬部はこれに比しておそい。起爆薬添装薬部の境界においてわずかに管体の破砕度のことなることが認められる。

管体底部の飛散については特に他のものと異なる点は認められなかつた。

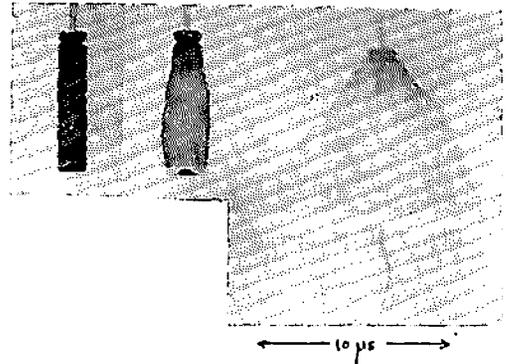


Fig. 5 Explosion process of detonator without an inner tube

#### 4) 水中での雷管の爆発実験

この実験は内管 1 個を有する雷管を用いて、Fig. 6 に示す水槽中に雷薬を懸吊し爆発写真 [Fig. 7] を撮つた。この実験では水の存在によつて、爆発生成ガスの進展と雷管管体の破砕片の進展の関係を明にさせた。

水の存在による爆発生成ガスの冷却は、この撮影時点では認められない。

1) で述べたように内管部の破砕度は小であり、また爆発生成ガスは点火玉部の空間に侵入し、空中懸吊に比べて著るしく膨脹している状態が確認される。さ

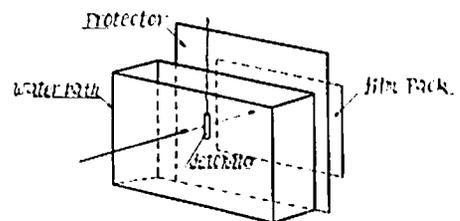


Fig. 6 Testing arrangement for detonator in water

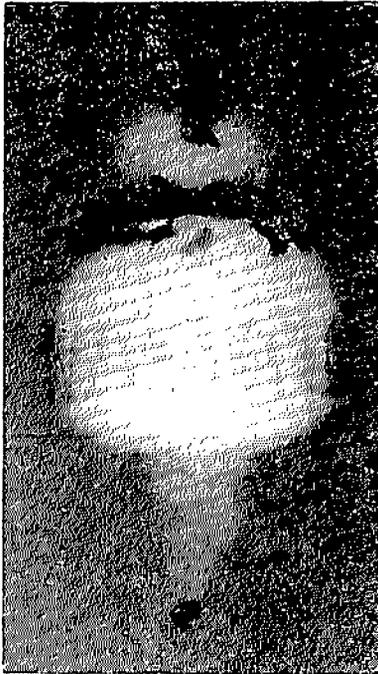


Fig. 7 Explosion of detonator in water

らにその付近の管体の変形過程もとらえている。

雷管底部の進行と爆発生成ガス膨張との関連性を十分とらえている。

### 3. 雷管体の爆発飛散試験

この試験は以前に、爆発雷管体破片の飛散角度に死角があると言われて行なつた実験であるが、上記瞬間X線写真による観察と関連するのでここで述べる。

#### 3-1 試料

供試雷管は6号電気雷管で、管体の材質、爆粉および添装薬の異なる4種類の雷管 [Table 1] である。しかしすべて内管1個を有するものである。これらの雷管は前節の雷管とは製造日時は異なる。

#### 3-2 実験方法

##### 1) 紙筒による雷管々体破砕片飛散状況の測定

管体破片の飛散状況を軸方向および側面方向にわたつて測定するため厚紙紙筒(長さ21cm, 厚さ0.4cm 直径20cm, 17cm, 13cmの3種)を用い Fig. 8 に示すように雷管体の底面が紙筒の中心に位置するように垂直に懸吊し、紙筒における爆発管体破片の停止、貫通の痕跡より破片分布範囲を  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  に分けて、飛散角度、破片粒度および分布密度を測定した。

Table 1 試料雷管

名	称	管体	爆粉	添装薬
鉄 (A)	ベントリット6号電気雷管	鉄表面処理	雷采爆粉 0.42 g	ベントリット 0.45 g
鉄 (B)	テトリール "	"	"	テトリール 0.45 g
銅 (A)	ベントリット "	銅	"	ベントリット 0.45 g
銅 (B)	テトリール "	"	DDNP 0.17 g	テトリール 0.45 g

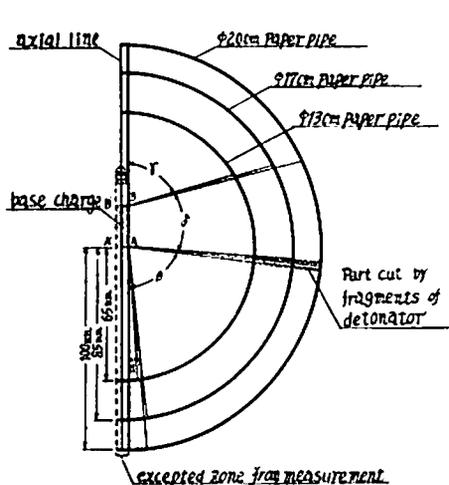


Fig. 8 Measurement of scattering angle of fragments

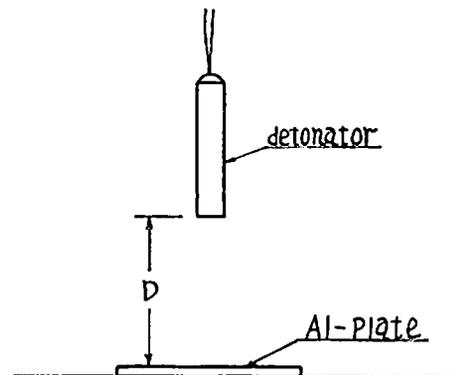


Fig. 9 Penetration test of lump of detonator end

飛散角度の測定方法は Fig. 8 に示すように雷管の添装薬部の管体側面 (AB または A'B) を基線とし、

点 A および B, または A' および B' を基点として角度を測定したため管体側面 (AB および A'B') の延長線と紙筒との交点内は測定範囲外とした。

2) アルミニウム板による雷管底部の飛散状況観測

雷管体の底部が爆発により如何なる破片体となつて飛散するか、その状態を検するため上述の紙筒試験と並行してアルミニウム板を用いて行なつた。Fig. 9 示すように雷管を垂直に懸吊し、その管底より 5cm,

および下にアルミニウム板も水平に置き、そのアルミニウム板に生ずる破片痕跡から各種管体の底部飛散の相違を測定した。

3-3 実験結果および考察

管体破片飛散角度の実測値は [Table 2] に示すとおりである。この測定結果を見ると、各試料雷管とも飛散角度は近似している。ただ角  $\alpha$  において鉄雷管 (A) のみが他のものより大きい角度を示している。これは管体底部の角度の差によるものと考える。

Table 2 管体破片飛散角度実測値

雷管体種類	紙筒直径	飛散角度 (°度)				雷管体種類	紙筒直径	飛散角度 (°度)			
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
銅 雷 管 (A)	13 cm	6	81	57	48	鉄 雷 管 (A)	13 cm	11	84	48	46
		6	81	61	40			11	83	48	52
		5	79	56	29			14	86	65	31
		5	79	70	43			14	81	53	44
	17 cm	10	86	76	17		17 cm	15	82	71	27
		10	83	62	35			15	82	72	52
		10	86	71	24			18	92	64	31
		10	83	68	29			18	81	70	44
	20 cm	8	86	55	40		20 cm	18	86	71	23
		8	85	44	50			16	77	80	23
		11	78	47	23			17	84	70	25
		8	87	59	34			17	81	79	20
		6	88	46	46			23	81	76	24
		7	79	44	21			23	79	76	26
	平均角度	7.8	82.8	60	34		平均角度	16.1	82.2	65.8	29.5
	銅 雷 管 (B)	13 cm	5.5	83	71		30	鉄 雷 管 (B)	13 cm	7.5	72
5.5			81.5	68	26.5	7.5	82			70.5	30
5.5			85	79	24	12	85.5			76	31
5.5			82.5	73	16	9	82			68	19
17 cm		5.5	88.5	75	23	17 cm	13.5		86.5	82	24
		5.5	84	72.5	17		6		81	75	12
		10	86.5	70	29		4		86	59	37.5
		8	84	68	24		4.2		83	60	35
平均角度		6.2	84.3	65.8	23.7	平均角度	7.9		83	71.3	27

Table 3 管体破片の飛散粒度及び飛散分布密度測定値

飛散状況	管体種類		鉄 A			鉄 B			銅 A			銅 B		
	紙筒種類		13 cm 分布			13 cm			13 cm			13 cm		
	飛散範囲		$\alpha$	$(\beta-\alpha)$	$\delta$									
分布密度 (個/cm <sup>2</sup> )	1.6	1.2	0.9	1	1.2	0.8	5	1.4	2	10	1.5	1.4		
貫通密度 (個/cm <sup>2</sup> )	0.6	なし	0.4	0.35	なし	0.4	なし	なし	0.8	0.7	なし	0.8		
貫 通 比 (%)	37.5	0	44.4	35	0	50	0	0	40.0	0.7	0	57.1		
破 片 径 (mm)	5	1.0	7	2	0.5	11	0.6	0.5	2	3.5	0.8	4		
	最小	0.2	0.2	0.5	0.1	0.1	1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.8	
管体垂直下破片貫通孔径 (mm)	5			6			3			5				

管体破砕片の粒度は爆発飛散範囲  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  の各部分における破片痕跡の最大径, 最小径を測定し, 分布密度も各範囲の破片痕跡数より算出した。

この結果は [Table 3] に示す。表中  $\gamma$  部分は銅, 鉄管体とも大きな相違がなかつたので除いた。また前述の管体側面接線内はアルミニウム板による測定を行なつたので分布密度, 貫通密度は測定しなかつた。

この実験で鉄管体と銅管体の底部破砕片粒度は銅管体の方が小であつた。アルミニウム板試験において鉄管体底部の破砕片は一般に1個貫通し, 銅管体の場合は1個または数個の貫通孔が見られ, 時にはその周辺にさらに小さい貫通孔の輪が出来ることがあつた。これは材質の差異によるものと考えられる。

角  $\beta-\alpha$  の範囲は貫通孔も見られず, X線写真からと考えて死角範囲をなすと思われる。

#### 4. 総 括

雷管が爆薬を起爆する機構として次のものが考えられている。すなわち,

- 1) 添装薬自体の爆発衝撃, 熱ガス効果
- 2) 雷管体の固体粒子の衝突効果

ここではむしろ後者の解析を行なう実験の一つとして雷管自体の空中での起爆状態の解明を行なつた。

とくに, 従来得られなかつた爆発生成ガス中の固体物質の挙動をとらえるために瞬間 X線写真法を用い内管の破砕状況に重点をおいて管体全体の破砕過程を究明した。同時に厚紙紙筒を用いた飛散角度, 破砕片粒度の測定を行ない考察を明確にした。

雷管体間の構造の相違による特異点はすでに述べたのでここではとくに共通点について総括する。

1) 内管の存在の有無によって雷管体の破砕状態が相違する。

2) 物理的に管体強度の増加した部分内管部および装薬部分より遠い部分は破砕片が大きくなる。これは厚紙紙筒による飛散角度, 破砕片粒度試験においても同様に観察される。

3) 添装薬部の側面管体の破砕片は雷管体軸方向と殆んど直角の側面方向に進展する。これは厚紙紙筒による飛散角度測定においても見られる。

4) 点火玉式雷管の点火玉のある空間部分は添装薬の爆発で押しつぶされるか, または侵入高圧ガスで膨張する。後者の場合は水中爆発写真に見るようにダルマ形のガス膨張が見られる。

5) 内管の存在しない雷管は起爆薬部, 添装薬部の

管体の変形の時間差は少ないがその付近の管体のそれぞれその破砕度(破砕片粒度)を異にする。

6) 雷管底部は側面管体部に比し早い速度で軸方向に進むが, この3種の構造上の差異の影響は管体底部片については認められなかつた。

7) 水中で雷管を爆発させることによつて, 管体の変形および破砕片の挙動と爆発生成ガスの関連性を観察することができた。とくに水中にあるために上部空間の膨張は空中懸吊のものに比して著しい。

厚紙紙筒による飛散角度, 粒度試験およびアルミニウム板貫通試験から鉄雷管は銅雷管に比して一般に破砕片粒度は大で, 管体底部の破砕個数は鉄雷管は1個, 銅雷管は数個の破砕片となる場合が多い。

飛散角度は鉄, 銅雷管で殆んど相違なく軸に対して  $79\sim 90^\circ$  に破砕片の飛散の死角が存在する。

以上主として空中懸吊の雷管の爆発の時の管体破砕片の挙動について究明したが, 将来われわれは爆薬包間の雷管の爆発とこれによる爆発の起爆過程について研究したい。

本報告の試験試料を提供して頂いた各火薬会社に対して感謝の意を表します。

(昭和45年春季研究発表会に発表)

#### 文 献

- 1) 植村; 生産研究 Vol. 13, No. 9 (1961) 表紙, 工業火薬協会誌 Vol. 23, No. 5, p. 229
- 2) 日下部, 工業火薬協会誌口絵 Vol. 28, No. 3, (1961)
- 3) H. Ahrens, & E. Eitz, Röntgenblitzaufnahmen bei der Untersuchung der Detonationübertragung von Wettersprengstoffen. Nobel Heft. sept. 1958 (p. 244~296)
- 4) H. Rodewald, Beispiel für eine Versuchsprojectierung in der Röntgenblitztechnik. Explosivstoffe. No. 10/1966
- 5) T. Cocu, J. Bigourd, & M. Giltaire, Le Tir sous Eau. Restricted International Conf. of Directors of Safety in Mines Research 1965, No. 22
- 6) 吉田, 松本, 雷管体の爆発飛散状況について, 探鉱と保安, Vol. 6, No. 7 (1960) p. 9~14

# X-ray Photographic Observation upon Explosion of Detonator of Different Construction

by T. Yoshida, S. Akaba, M. Tanaka  
and S. Matsumoto

In explosion of a detonator, deformation of the shell and the inner tube, and development of their fragments are observed by an X-ray photographic method. Results in penetration test of these fragments with carton pipes of Al-plates are also gained.

Three types of detonator in different constructions shown in Fig.1 are tested.

They are pended in air, but one of them in water, as shown in Fig.6.

The following phenomena are observed in their photographs.

- 1) In the process of deformation of the shell, there are remarkable differences among three types of detonator, as shown in Fig.3, 4 and 5.
- 2) The fragments of the reinforced part with the inner tube, and of the not-loaded part in the shell are bigger than those of the loaded part in size.
- 3) By the gaseous products from the detonated charge, the cylindrical shell-part between the plug and the inner tube is expanded or compressed as shown in Fig.7.
- 4) Difference in the size of the fragments of the shell without inner tube is also recognized at the boundary between the priming charge and the base charge in the shell, as shown in Fig.5.
- 5) By pending a detonator in water, the corelation between the fragments of the shell and the gaseous product is recognized, as shown in Fig.7.

(Resources Research Institute, Kawaguchi, Japan)

## ニュース

### 人工地震用の爆薬コード

人工地震によって石油や天然ガスを探知する新しい爆破装置がI.C.I社の手で開発されたが、これには「Geo flex」という英国製爆薬コードを使用している。

これはPETNを芯薬にして、特殊の織布で2層に包み、丈夫なプラスチックのさやにおさめたもので、標準の長さは152.4m約1.6kgの爆薬が装填されている。深さ自在の「すき」を取付けたトラクターで、望みの深さに埋入するので敷設作業は平地で短時間内にできるが、山地でもジャングルでも使用できる。また雷管がない限り、誤って点火しても

勢よく燃えるだけであるから安全である。

(英国通商産業 1970 夏の号) (伊藤)

du Pontは無煙火薬の製造について考えをかえた数種の案を検討した後、会社はウェストバージニアのMartinsburgにあるボトマック川工場で火薬の乾燥包装をする永久施設を作ることにきめた。この作業は昨年Carney pointにおける爆発以来一時的にそこにおかれていた。先月du Pontは永久的な最終工程を外におくよりもNew Jerseyに無煙火薬生産をおとそうと考えていた。

Chemical Week June 17 '70 (木村 真)