

瞬間 X 線観察による炭鉛爆薬の爆ごう

田中雅夫・松本 栄
赤羽周作・吉田 正

炭鉛爆薬の爆ごう研究において、 BaSO_4 糸を用い二重露光方式の瞬間 X 線写真観察を行ない、次の結果を得た。

- (1) この方法は薬包内の爆ごう観察に有効である。造影剤 BaSO_4 よりもさらに適当な材料を検討中である。
- (2) 薬包内爆ごう波通過直後 BaSO_4 糸は進行方向に前進し、その後爆ごう生成ガスの進展方向にすすむ。
- (3) 導爆線起爆の薬包においては、雷管起爆の場合よりも、起爆点、薬包形状のことになるために、爆ごう生成ガスの拡散は複雑である。
- (4) 導爆線起爆薬包の軸方向観察は爆ごう生成ガスの進展を考えるに有効であつた。
- (5) 雷管付近の爆発観察、薬包内の粒子速度計測等に BaSO_4 糸の使用は有効なことを示した。

I 緒 言

一般に爆薬の爆ごうに関する X 線写真観察は外国では既に 10 年前から行なわれている。

公害資源研究所（前資源技術試験所）においても数年前米国 Field Emission 社 FEXITRON-Series 730 の X 線フラッシュ装置を設備して爆発現象について研究中であるが、ここでは起爆方式のことなる爆薬包の爆ごう状態、および爆薬の鉄板上殉爆について観察した。

本報告で従来の X 線写真研究と異なる点は、爆薬の薬包内爆ごう状態を観るために、 BaSO_4 糸を用いたことおよび二重露光方式を用いたことである。

II 実験による観察項目

1. 雷管起爆方式による爆薬爆ごうの実験
 - (a) Detonation Front 付近の観察
 - (b) 爆発生成ガスの進展
 - (c) 雷管付近の爆ごう状況（予備試験）
2. 導爆線起爆方式による爆薬爆ごうの実験
 - (a) 導爆線起爆の薬包爆ごう状況の側面観察
 - (b) 爆発生成ガスの挙動
 - (c) 導爆線、薬包軸の方向よりの爆ごう生成ガ

スの観察

3. 鉄板上における爆薬包の殉爆

- (a) 平面鉄板上における殉爆状況の観察
- (b) 鉄板上の半円溝内における殉爆状況の観察

III 実験方法

3-1 実験装置と実験配置

これらについては既に筆者等の報告¹⁾で述べたので省略する。なお当所における装置は 2 channel であるが本報告では 1 channel のみを用いた。

3-2 BaSO_4 の使用と目的

BaSO_4 は人体胃検診に使用する流動性 X 線造影剤を用いた。ここでいう「 BaSO_4 糸」とは木綿糸に上記造影剤を塗布し乾燥したものであり、「 BaSO_4 テープ」とは紙テープ（幅 18mm）に造影剤を塗布乾燥したものである。その他粉状 BaSO_4 を用いる場合は爆薬成分中に混合し、薬包内に BaSO_4 混合層を作る。

その目的はこれら BaSO_4 を爆薬包内部または薬包周囲に配置することにより多少のおくれはあるが爆発後は爆発生成ガスと共に移動するであろうから、それぞれの部分での爆発生成ガスの挙動を知るためである。

3-3 BaSO_4 糸の配置

BaSO_4 糸の配置はそれぞれの写真説明図に示すよ

昭和46年6月11日受理

* 公害資源研究所資源第4部 東京都北区浮間町4-26

うに次の3つのタイプを用いた。

- (a) 薬包軸に直角
- (b) 薬包軸に 60°
- (c) 薬包軸に平行

このために薬包を半円溝つき木台に固定して、まず銅製の針 (約0.8mmφ) により薬包に孔をあけ、その中に BaSO₄ 糸を通した後、孔と糸の空間をなくす。BaSO₄ テープはその薬包の周囲に巻く。BaSO₄ 粉を爆薬成分と混合する場合は BaSO₄ 粉混合層を薬包内の必要な位置に作る。

3-4 二重露光

従来、筆者等は一回のフラッシュで BaSO₄ 糸の挙動をとらえたが²⁾、BaSO₄ 糸の最初の位置を知ることができない。しかも実験によると BaSO₄ 糸はまず爆ごう波の通過で前進するので最初の位置からある時間後の BaSO₄ 糸の変位を知るためにこの方式をとった。

このような二重露光方式をとった例は M. H. Id の薬包面付近にある銅球、銅球等の飛行観察の報告にある³⁾。

第1回フラッシュと第2回フラッシュの放電電圧はX線の爆薬包、爆発生成ガスに対する透過度によつて相互に調節する必要があり検討中であるが、本報告では次の電圧で放電した。第1回放電電圧 200kv、第2回放電電圧 250kv。各写真や説明図に見るように爆発前の BaSO₄ 糸は実線状を示し、爆ごう波通過後の BaSO₄ 糸は切断され、変位して破線状の曲線となしている。

3-5 供試火薬類

この試験に用いた爆薬は Table 1 に示す成分、爆速をもつイオン交換型爆薬である。

Table 1 Ingredient and Detonation velocity of Testing Coal-mining Explosives.

Ingredient	NG	9.0%
	n/c	0.2
	NH ₄ Cl	28.0
	NaNO ₃	44.4
	Ca-Stearate	0.5
	guhr-gum	0.5
	NH ₄ NO ₃	12.4
	Starch	5.0
Detonation Velocity	in Steelpipe (JIS)	1,800~1,850m/s
	in Papertube (φ30mm)	1,600~1,650m/s

雷管は主として内管1個をもつ銅管体の6号電気雷管である。導爆線は日本カーリットK.K 製第二種導爆線 (芯薬はペンシリット、ビニール被覆) で爆速は

6,500m/s である。

IV [実験1] 雷管起爆方式による爆ごう実験

[Photo. 1], [Photo. 2], [Photo. 3] は何れも雷管起爆による炭鉱爆薬の爆ごうを示し、その説明図は [Fig. 1], [Fig. 2], [Fig. 3] に示す。

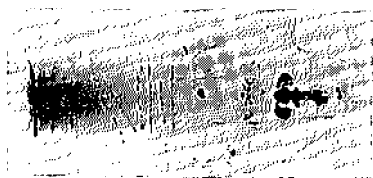


Photo 1 Photograph by Arrangement in Fig. 1



Photo 2 Photograph by Arrangement in Fig. 2

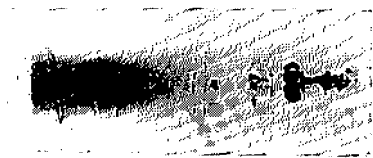


Photo 3 Photograph by Arrangement in Fig. 3

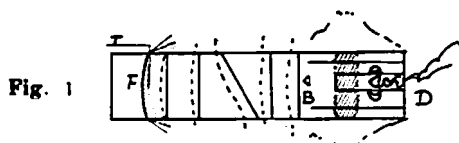


Fig. 1

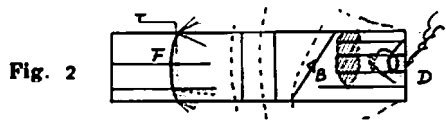


Fig. 2

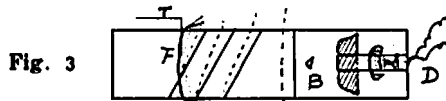


Fig. 3

F: Detonation Front
B: Bottom of Caps Shell
D: Detonator, T: Trigger
—: Original position of BaSO₄-thread
----: Displaced BaSO₄-thread.

Arrangement and Displacement of BaSO₄-thread in a Cartridge, initiated by a detonator.

4-1 Detonation Front 付近の観察

Ion gap 端子を爆薬包末端側に配置し、第2フラッシュによつて Detonation Front が得られた。これは Photo. 1~3 に見るように倣かに弓形をなして進行する。

[Photo. 1]~[Photo. 3] おいて、 BaSO_4 系の薬包軸に垂直に挿入されているものは爆ごう波通過後、その Detonation Front からある距離(L)のところで弓形に変形し、薬包軸上では爆ごう進行方向に変位(d')している。[Fig. 9 参照]

[Photo. 2] では薬包終端側に薬包軸に平行に BaSO_4 糸が挿入されている。 BaSO_4 糸は Detonation Front の通過で進行方向に移動し、その後薬包軸に近い BaSO_4 糸は側面方向への変位が少ないが、薬包周辺に近い BaSO_4 糸は Detonation Front の通過後薬包周辺側に変位する。これは rarefaction zone に関連するであろうが、これについてはさらに検討している。

[Photo. 3] で軸に60°の BaSO_4 糸は Detonation Front で変位をはじめ、また雷管に近い側の BaSO_4 糸は遠い側の BaSO_4 糸よりも大きく変位していることを示す。

4-2 爆轟生成ガスの挙動

上記の写真に見られるように Detonation Front 通過後 BaSO_4 糸は弓形前進するがその両端は薬包軸に垂直に延びる。これは爆ごう生成ガスの進展を示すことになる。

爆ごう生成ガスの前面と BaSO_4 糸の端の位置とは多少のおくれがあることが見られるが、これは銅脚線²⁾、鋼球等³⁾を使用した場合の運動のおくれよりは小である。

4-3 雷管付近の爆ごう状況

Photo. 1~Photo. 3 においてはトリガーが雷管の位置から遠いので、雷管起爆直後の爆薬の爆ごう経過は見られない。雷管起爆直後の状況観察の予備実験として、これらの薬包内に雷管軸に平行に BaSO_4 糸を挿入し、ある時点での雷管周辺における爆ごう生成ガスの進展に伴う BaSO_4 糸の変位を観察した。

この状況はさきに報告¹⁾した雷管の爆発における添装薬部側面方向の BaSO_4 糸の破砕進展が著しく、雷管軸と添装薬装てんの管体部の飛行方向との間の範囲(所謂管体飛散のない死角領域)は BaSO_4 糸の破砕が少ない。

また点火玉部の側面においても同様である。

前報告の空中または、水中懸吊雷管の爆発状況の観察¹⁾では点火玉部が膨張した場合もあるが、爆薬包内に装着された雷管の点火玉部は Photo. 1, Photo. 3

に見るように周辺の爆薬の爆発により圧縮される。

V [実験II] 導爆線起爆方式による爆ごう実験⁴⁾

5-1 各種時間における爆薬包爆ごうの側面観察

[Photo. 4], [Photo. 5] は導爆線上のトリガー位置を爆薬包末端からそれぞれ 0mm, 110mm にかえて同期させて第2回フラッシュを行なつた写真である。

BaSO_4 糸の初めの位置と変位は [Fig. 4], [Fig. 5] に示す。

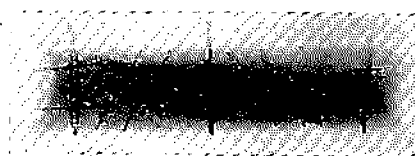


Photo 4 Photograph by Arrangement in Fig. 4

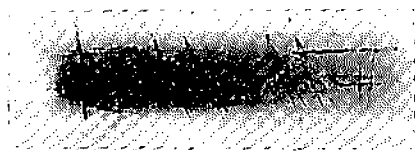


Photo 5 Photograph by Arrangement in Fig. 5

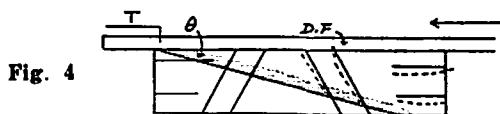


Fig. 4

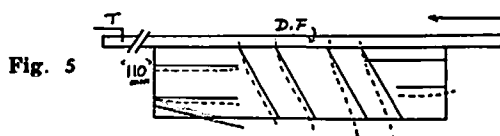


Fig. 5

DF: Detonating Fuse, T: Trigger.

θ: Angle of Detonation Front for axis of Cartridge.

—: Original position of BaSO_4 -thread

----: Displaced BaSO_4 -thread.

Arrangement and Displacement of BaSO_4 -thread in a Cartridge, initiated by Detonating Fuse.

この供試爆薬では、爆ごう波は薬包軸に平均 13.6°の角度をもつ。この爆ごう波の速度は導爆線の燃速を 6,500m/s として試算すると 1,550~1,600m/s である。

爆ごう波面は後に示す [Photo. 6] と併せ考えて導爆線軸を中心とした円錐形である。爆ごう波は薬包内を進み反対側に出ると衝撃波として進み、爆ごう生成

ガス、固体粒子もこれに続く。

5-2 爆ごう生成ガスの挙動

[Photo. 4], [Photo. 5] の何れの写真も二重露光であり、前節 (§4) に示したように、 BaSO_4 糸は爆発前の位置から爆ごう波通過直後にその進行方向に変位する。その後切断破碎されて爆ごう生成ガスと共に移動する。

導爆線接着部の BaSO_4 糸は、[Photo. 4], [Photo. 5] に見るように、一度伝爆方向に押され、その後爆薬包の爆ごうによって爆ごう生成ガスと共に移動するようである。

[Photo. 5] に示す薬包両端の軸に平行に配置された BaSO_4 糸のうち、導爆線接着部に近い BaSO_4 糸は一度爆ごう波の方向に進み、さらに上部に移動したと考える。これは起爆方式、爆薬包形状の相違によって爆ごう生成ガスが複雑な進展をするために生じたものである。

その後の BaSO_4 糸の移動は爆ごう生成ガスの移動と共に変位するが、導爆線側の爆ごう生成ガスは多少導爆線の爆ごう生成ガス圧の影響を受けながら起爆点側に進展する。爆ごう波が起爆点側と反対の薬包面に出ると衝撃波となり、この付近では爆ごう生成ガス、固体粒子もこれに続くので BaSO_4 糸も当然これと共に移動する。この状況は [Photo. 5] に明確に見られる。

5-3 導爆線、薬包軸の方向よりの爆ごう生成ガスの観察

[Fig. 6] に示す配置で導爆線起爆方式による爆薬包の爆ごう状態を [Photo. 6] に示す。この写真のトリガーの位置は薬包末端より 110mm であるので前節の側面写真 [Photo. 5] を薬包軸の方向から見たことになる。この写真から次の諸点が考えられる。

(1) [Photo. 6-b] で薬包末端にまいた銅脚線（三本の一番内側の線）の変形から見られるように、導爆線と爆薬の接合点付近では導爆線の爆発により爆薬はまず爆ごう波進行方向に押しつけられる。この現象は [Photo. 4] の導爆線との接合点付近にある BaSO_4 糸の変位にも見られる。そしてその後この BaSO_4 糸は爆薬の爆ごう生成ガスの移動と共に導爆線側に移動する。

(2) 爆薬包に巻いた BaSO_4 テープの変位 (Photo. 6-a 参照) から爆薬の爆ごう生成ガスは導爆線側への進展が少ない。これは起爆点の位置、導爆線の爆ごう生成ガス圧によると思う。

(3) 爆薬内に挿入した BaSO_4 糸 (Photo. 6-b 参照) は雷管起爆方式による爆薬の爆ごうの場合と同様に、爆ごう波の進行直後その進行方向に移動し、その

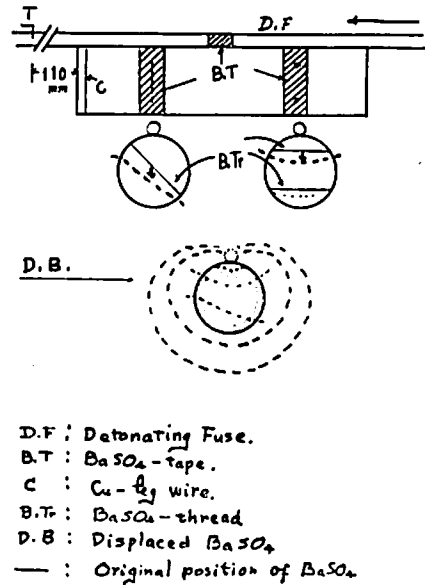
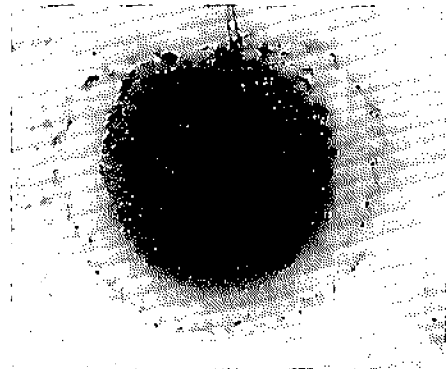
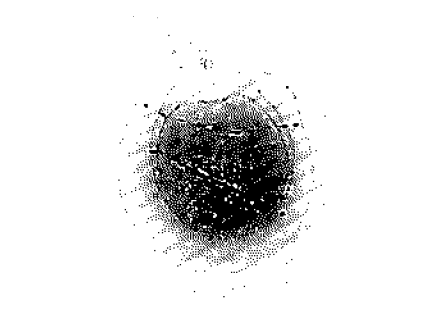


Fig. 6 Arrangement and Displacement of BaSO_4 -tape or BaSO_4 -thread.



(a) Shows Displacement of BaSO_4 -tape.



(b) Shows Displacement of BaSO_4 -thread in a Cartridge.

Photo 6 Photograph by Arrangement in Fig. 6

後は爆ごう生成ガスと共に移動する。導爆線起爆方式による爆薬包の爆ごう生成ガスの移動は、雷管起爆方式によるガス移動よりも複雑である。〔Photo. 6-b〕において薬包内の BaSO_4 糸の両端の変位は爆ごう生成ガスの進展方向に伸びる。

5-4 導爆線起爆方式による爆薬包爆ごうのまとめ

〔Photo. 4〕～〔Photo. 6〕において爆薬包の側面方向、垂直方向から、 BaSO_4 糸、テープの各種配置により爆薬包の爆ごうを観察した。これを総括的に考えると次のごとくである。

(1) 導爆線起爆方式による爆ごうは、雷管起爆方式の場合と爆ごう波進行方向は異なるが、爆ごう波通過後 BaSO_4 糸はその方向に前進し、その後爆ごう生成ガスの進展と共に変位することは雷管起爆方式の場合同様である。

(2) 〔Photo. 4〕, 〔Photo. 5〕の側面方向からの観察において薬包両端における爆ごう生成ガスの挙動は雷管起爆方式による場合よりも複雑であるが、おおむね BaSO_4 糸の変位によつて知ることができる。

(3) 薬包軸の方向よりの観察は側面方向よりの観察 (Photo. 4, 5) と併せて考察するために有効であった。とくに従来の薬包軸方向よりの爆焰写真と比較考察することができた。

VI 〔実験Ⅲ〕鉄板上における爆薬包の殉爆

懸吊した炭鉱爆薬による殉爆の瞬間X線写真観察は H. Ahren 氏⁵⁾ によつて報告されているが、鉄板上や砂上殉爆等については行なわれていない。

わが国の殉爆試験法は JIS K-4810 に示すように2本の薬包間の砂上殉爆試験方法であるが、この実験では鉄板上における1薬包を半分に切り、半薬包間の殉爆状況を観察した。

すなわち、供試薬包を2個に切り、切口に薬包紙を張った。第1薬包 (雷管起爆) を励爆薬包とし、第2薬包を受爆薬包として、適当な位置に BaSO_4 糸、トリガーを付し、薬包の間隔 20mm として鉄板上においた。鉄板 (厚さ 50mm) は平面のものと、半円溝付鉄板を使用した。これらの配置状況は [Fig. 7], [Fig. 8] に示し、爆ごう写真は [Photo. 7] および [Photo. 8] (一回露光) に示す。

この写真から次のことが観察される。

(1) 第2薬包の受爆面には、H. Ahren 氏の報告にもあるが、第1薬包の爆ごうにより加圧された圧縮層⁶⁾が見られる。

(2) 第2薬包内に挿入した BaSO_4 糸の変位については [Photo. 7] に見ることができ、[Photo. 8] は一回露光であるので BaSO_4 糸の移動位置のみを示す。

(3) Detonation Front は [Photo. 7] において鉄

板に接する側がやや前進している。

(4) 第1薬包の雷管軸に平行においた BaSO_4 糸の変位は §4.4 における雷管付近の爆ごう観察の予備試験の一部として行なつた。〔Photo. 7〕における雷管の前面においた BaSO_4 糸は爆ごう生成ガスと共に前進して外に出ている。

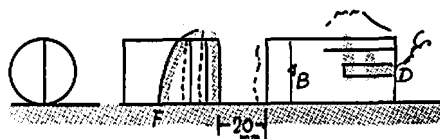
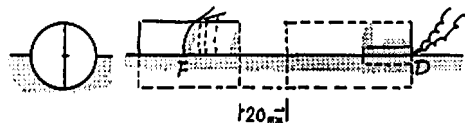


Fig. 7 Arrangement of gap test on steel plate.



F: Detonation Front

D: Detonator

B: Bottom of Caps Shell.

—: Original position of BaSO_4 -thread

----: Displaced BaSO_4 -thread

Fig. 8 Arrangement of gap test on grooved steel plate.

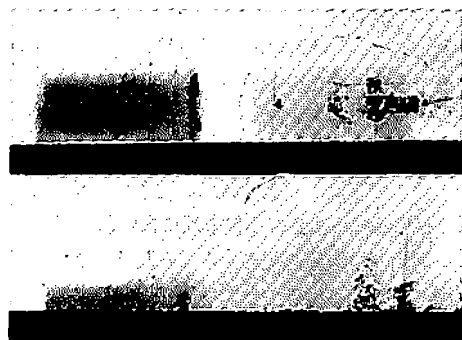


Photo 7 Photograph by Arrangement in Fig. 7 (上図)

Photo 8 Photograph by Arrangement in Fig. 8 (下図)

VII 爆薬包内 BaSO_4 糸の変位計測に対する考察

この報告では BaSO_4 糸の変位を測定するには別に二枚の写真を撮るよりも二重露光方式を用いる方が正確な変位測定が行なわれることを認めた。

計測値の精度はさらに検討の必要はあるとしても、ここでは供試炭鉱爆薬と三号桐ダイナマイトについて

薬包軸上の計測例を示す。

〔Fig. 9〕に示す雷管起爆による薬包軸における爆
 とう波進行方向への BaSO₄ 糸の変位を考える。
 Detonation Front(F)を基点として爆発前の BaSO₄ 糸
 までの距離(L)とその位置から BaSO₄ 糸の変位(d)
 を測定して図示した。それぞれの地点における爆速を
 測定すれば BaSO₄ 糸の変位速度が求められるが、こ
 こではある定常爆速にあるものと仮定して爆速(供試
 爆薬の爆速D=1,650m/s, 三号桐ダイナマイトの爆
 速D=4,500m/s)を用いて仮算した値を〔Table. 2〕,
 〔Fig. 9〕に示す。

これによると供試爆薬, 三号桐ダイナマイトの Ba
 SO₄ の最大速度はそれぞれ約 420m/s, 700m/s と推
 定する。爆薬の性状として, 粉体, 膠質, 成型爆薬等
 による差異については将来検討したい。

Ⅷ 総 括

以上炭鉱爆薬を用いて, 雷管起爆, 導爆線起爆による
 爆薬包内の爆とう現象, 殉爆状況について, BaSO₄
 糸〜二重露光方式瞬間X線写真観察を行なった。

これを総括すると次のごとくである。

(1) 薬包間の爆とう現象の観察に BaSO₄ 糸〜二重

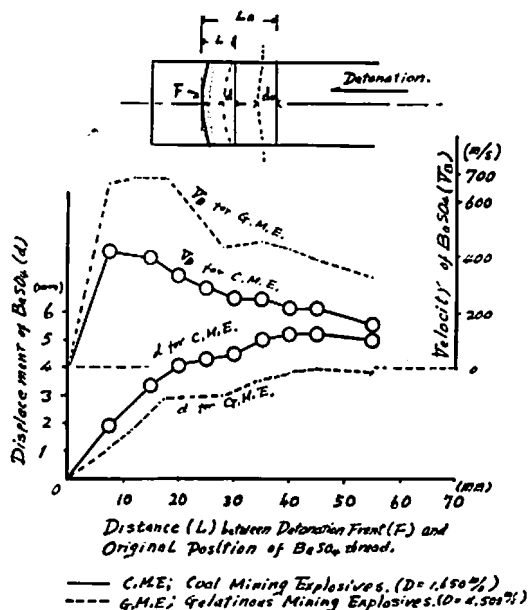


Fig. 9 Displacement(d) and Velocity(V_B) of BaSO₄ versus Distance(L) between Detonation Front (F) and Original Position of BaSO₄ Thread.

Table 2 Displacement(d), and Velocity(V_B) of BaSO₄ V.S. Distance(L) between Detonation Front and original position of BaSO₄ thread.

Powder Coal Mining Explosives. (爆速D=1,650m/s)									
F から Ba 糸の距離 L	mm 7.5	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	55.0
BaSO ₄ の変位 d	mm 1.9	3.4	4.1	4.3	4.5	5.0	5.2	5.2	5.0
変位速度 $V_B = \frac{d \cdot D}{L}$	m/s 417	393	323	282	247	246	215	215	151
Gelatinous Mining Explosives (爆速D=4,500m/s)									
L (mm)	7.5	12.0	18.0	28.0	35.0	40.0	45.0	55.0	—
d (mm)	1.1	1.8	2.7	3.0	3.5	3.75	3.85	3.95	—
$V_B = \frac{d \cdot D}{L}$, (m/s)	660	678	675	430	450	422	385	324	—

露光方式は適当である。造影剤 BaSO₄ よりさらに適
 当なものも探究中である。

(2) この方法により薬包内の爆とう波の進行に伴な
 う薬包内の爆とう生成ガス, 粒子の変位を観察するこ
 とができた。すなわち, 爆とう波面の通過と共に Ba
 SO₄ 糸は前進し, その後爆とう生成ガスの拡散方向に
 進む。

(3) 雷管起爆による爆とう状況と導爆線起爆による

爆とう状況では爆とう波の薬包内進行方向はことなる
 が, 爆とう波通過後の現象は同様である。しかし前者
 に比して後者は爆薬包の形状が複雑であるから, その
 後の爆とう生成ガスの進展方向はことなる。

(4) 導爆線起爆による爆とうの薬包軸方向よりの観
 察はその側面方向よりの観察とともに, その爆とう生
 成ガスの進展を考察するに適当であつた。

(5) 雷管付近の爆とう観察(予備実験)は前報¹⁾と

ことなり爆薬包内では雷管の点火玉部は周囲の爆薬の爆ごうにより圧縮される。添装薬部付近の爆ごうは、 BaSO_4 糸の変位により推察される。

(6) BaSO_4 糸の使用は爆薬包内の粒子速度の計測等に対して適用が可能であろう。

終りにこの研究に高安全度爆薬を提供して頂いた旭化成工業K.K.に感謝いたします。

文 献

- 1) 吉田, 赤羽, 田中, 松本: 雷管の爆発現象に関する研究, 工業火薬 31, 319~325 (1970)
- 2) 田中, 松本, 赤羽, 吉田, 角柱型爆薬包の爆ごう

現象の観察 工業火薬 32, 75~80 (1971)

- 3) M. Held; Splitterballistik, Explosivstoffe 15, 265 (1967)
- 4) T. Cocu, J. Bigourd, M. Gilairc; Le Tir sous Eau. Restricted International Conf. of Directors of Safety in Mines Research (1965). No. 22.
- 5) H. Ahrens, & E. Eitz, Röntgenblitzaufnahmen bei der Untersuchung der Detonation übertragung von Wettersprengstoffen. Nobel Hefte, Sept. 1958, (p 244~296)

Double Exposed Flash Radiographic Observation on Detonation of Coal Mining Explosives

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

For study of coal mining explosives, the double exposed flash X-ray photographic observation with BaSO_4 -thread was carried out.

The following results are recognized;

1) This method with BaSO_4 -thread is useful for the observation for detonating phenomena in a cartridge.

We are going to find the more suitable material in this purpose than BaSO_4 , as the shadowing material.

2) BaSO_4 -thread moves forward immediately after the passage of detonation front, and later develops together with expansion of detonating gaseous products.

3) In the detonating cartridge initiated by detonating fuse, the development of detonating gaseous products is more complex than that in the cartridge initiated by a detonator, because of different initiating point and shape of cartridge for detonating direction between these initiation methods.

4) The axial observation by this testing procedure with BaSO_4 for the cartridge initiated by detonating fuse is effective for the consideration of detonation phenomena in this cartridge.

5) Moreover, it is possible to apply this testing procedure to the observation for explosion of detonator in a cartridge, and the measurement to particle velocity in a detonating cartridge, from these preliminary tests.

(National Research Institute for Pollution and Resources.)