

of which charge is 500kg and burden is 22m, the time is estimated to be 0.03 sec.

In our previous paper, it is calculated that the pressure of the gas within the blasting chamber maintains 0.02sec. The value of the duration of the pressure in the paper agrees with the time between the incidence of the

stress wave and the occurrence of the scabbing in this paper. This fact shows that scabbing is caused by the driving force of gaseous products and not by the momentum of the incident stress wave. (Technical Laboratory, Asahi Chemical Industry Co. Ltd.)

電気雷管によるメタン-空気混合物の

着火に関する研究(第一報)

(高速度カメラによる着火機構の解析)

植村 恒 義* 木下 四 郎**

中 原 正 二** 山 本 顕一郎**

摘 要

35年度工業火薬協会研究発表会以来5回に亘り報告を行つて来たが、雷管によるメタン-空気混合物の着火源となり得るものに雷管の爆発火焰、衝撃波、延時薬の熱粒子が考えられそのうち重要なものは爆発火焰と延時薬の熱粒子であり衝撃波も若干の影響があることが判明した。我々はこれらの結果を更に明確にするため、植村式 SP-1 型超速度流しカメラ、16H高速度こま取カメラ(1万コマ/秒)、植村式 M. L. D-2 型高速度カメラ(10~16万コマ/sec)を使用し電気雷管によるメタン-空気混合物の着火状況の時間的経過を観測しその結果次の結論を得た。鉄製容器内に於ける雷管のメタン着火性は J. Dolan 氏が述べた如く雷管の爆発火焰が爆発ガスからはみ出してメタン-空気混合物に直接触れるか否かによつて決るものでなく、どの雷管も爆発直後に衝撃波による発光現象が現われる。M. L. D-2 型カメラでは爆発火焰を詳細に撮影出来なかつたが、SP-1 型流しカメラでは雷管の爆発火焰の大きさ及び持続時間と相関性を有する。即ち火焰が大きく持続時間の長いもの程着火性が大きく、これまでの結論を裏付けることが出来た。更にこの撮影実験の第IV章は従来多くの人々が撮影することが出来なかつた同一の雷管でしかも雷管の発火現象の時間的变化を最初から最後まで十数コマに亘つて捉えることが出来た。メタンの燃焼の発達過程は 16H カメラにより撮影し

た結果、燃焼核は極めて弱く 4 msec 位まで徐々に発達して本格的な燃焼に発達していることが判明した。

I 緒 論

我が国では雷管のメタン安全度試験が法的に定められている。これは実際には爆薬に挿入した雷管が Cut-off 等によつて抜け出すことにより、雷管がメタン-空気混合物中で単独発火する場合を予想して行うものである。雷管の本質である威力や、段発に於る秒時精度を失うことなく安全雷管を製造する事がわれわれの最終の目的であるがそのためには雷管によるメタン着火性を単に雷管の組立て条件の下で試験するだけでなく適当な高速度カメラにより、メタン着火の現象をとらえてその着火機構を解明する必要がある。雷管によるメタンの燃焼は、その反応速度が非常に速く、わずか数百 msec の間に全現象が終了してしまう。従つてこの反応状態を時間的に捉えるためには高速度写真に依らなければ肉眼で明確に見ることができない。

高速度写真により雷管のメタン着火現象を撮影した報告に香月、古閑氏¹⁾等が行つた Fastax カメラによる写真がある。氏等はメタン槽内の中央に雷管を吊し、撮影速度 4,000コマ/sec で撮影した。この結果瞬発網及び鉄雷管のメタンへの引火は管体の燃焼粒子や鉄の火花から起らず雷管火焰の先端部槽のほぼ中央から起つてゐることを観測した。更に雷管の衝撃波の影響について実験を行い雷管を試験槽壁に近づけたが着火率に変化なかつた所から、雷管の衝撃波は引火にあまり関与しないものと思はれると報告している、

加藤氏²⁾は鉄製メタン槽の中央に 8 号銅雷管を吊

昭和37年8月22日受理

* 東京大学生産技術研究所 東京都港区麻布新橋土町

** 日本化薬株式会社折尾作業所 福岡県若松市河川

し、Fastax で着火状況を撮影している。これによれば最初の1コマに雷管の爆発火焰と銃槽周囲の発光が同時に現われ、その後数 msec の間暗黒であるが3 msec 位からメタン燃焼の核が槽の中央から発生しているのが見られる。

雷管の爆発現象を時間的、空間的に撮影した報告として、古くは Payman 氏³⁾の報告がある。彼は1コマ取りのシュリーレン写真を撮り雷管爆発後の瞬間の爆発現象を観察した。この写真は雷管の衝撃波と爆発ガスの形を観察しているものであるが、その速度は解析出来ない。又日下部、井田氏⁴⁾等は8コマ取りのシュリーレンで雷管の爆発過程を4 μ sec 置きに撮影しており Payman 氏の場合に比較して時間的変化がかなり明瞭に観察出来る。尤もこれは雷管の威力測定のために行つた実験であり衝撃波速度、爆発ガス速度を重要視する場合にはこの方法でも良いと考えられるが、メタン着火の着火源であると思われる爆発火焰の時間的解析を目的とする場合には、火焰の自発光が多重露出するという欠点がある。更に光源は閃光放電管(マイクロフラツシュ)によるものであるからその同期信号のとり方に問題があり、爆発現象の最初の部分は撮影出来ない。撮影速度は250,000コマ/sec で現象は32 μ sec までしか撮影出来ないのも、これも雷管の爆発現象を詳細に撮影するには速度が早すぎる。従つてこの方法で撮影した写真は、爆発による自発光はどのコマも同一の大きさであるから静止しているように見え、同期信号が遅れた場合には、爆発火焰が爆発ガスに包蔵されているように見えるが、同期信号が早い場合には、はみ出している様に見えるのである。即ち衝撃波と爆発ガスは、同一時間の現象をとらえているが、雷管の発光現象に関しては前二者と時間的に一致していないのである。

J. E. Dolan⁵⁾氏は雷管によるメタン着火性を支配する因子につき検討を行つた。彼は火焰の直接静止写真と閃光露写真の結果から瞬発雷管の場合、メタンの着火源は雷管の爆発火焰であり、その着火性は爆発火焰が爆発ガスに包蔵されるか否かによつて決まる。即ち6号銅雷管が比較的メタンに安全なのは爆発火焰が小さく、爆発ガスによつて火焰が包蔵されるからであり、8号雷管では火焰が大きく爆発ガスの外側にはみ出すために着火性が大きであると述べている。しかし乍ら Dolan 氏の方法は閃光放電式であり、しかも一枚撮りの写真判定である以上、火焰と爆発ガスは時間的に一致していないという欠点を有している。以上述べた様に雷管のメタン着火性を検討するためには雷管の発光過程を細かく解析することが必要であるが、

Fastax は撮影速度が遅く、しかも雷管とメタン燃焼の自発光が撮影出来るのみで爆発ガス、衝撃波の時間的变化は得られない。

一方、シュリーレンによる従来の方法では火焰が2重露出したものや、1コマ撮りの写真であり雷管の爆発現象が最初から最後まで正確に撮影出来ないのである。更に雷管が爆発してからメタンの燃焼が始まるまでの数 msec は、メタンの自発光が非常に弱く、フィルムの感度をよくするか特別な照明方法を考えない限り、撮影出来ない。

本研究報告は植村式 SP-1 流しカメラ、プリズム式 16H 高速度カメラ、更にシュリーレンと植村式 M. L. D 高速度カメラを併用したものを使用し、雷管の爆発火焰、衝撃波、破片飛散状況、爆発ガス、メタン燃焼核の成長等を捉えるため東京大学生産技術研究所植村研究室と協同のもとに撮影実験を行つたものである。

II 植村式 SP-1 型超高速度流し写真撮影

装置によるメタン着火状況の解析

2.1 装置の性能諸元は次の如くである。

SP-1 型超高速度流しカメラ撮影装置 (図 2.1)

- | | |
|---------------|----------------------------|
| 1. 掃引速度 | 4,000 m/sec 以下 |
| 2. 光学系の明るさ | $f=16$ |
| 3. 解像力 | 20本/mm |
| 4. 掃引時間 | 200 μ sec 以上 |
| 5. 撮影倍率 | 1:1~1:100 |
| 6. 任意の方向の撮影可能 | |
| 7. スリット | 0.1~1 mm |
| 8. 使用フィルム | 35mm 標準フィルム |
| 9. 装置寸法 | 長さ 1900×高さ 680
×400(mm) |
| 10. 装置重量 | 107kg |

このカメラの特徴は連続掃引方式で現象を同期さす必要がない。照明は電気雷管の爆発及びメタンの自発光のみを撮影するので特別な照明は行わなかつた。

2.2 撮影配置

撮影配置は2.2図に示すように被写体のメタン槽正面とカメラを相対しメタン槽内に吊した電気雷管を画面の中央にセットした。被写体と対物レンズの距離は1,820 mm とし、メタン槽すべてを撮影した。

フィルム上に於ける縮少倍率は0.057である。

現象との同期は雷管の自発光のみを撮影する場合には問題とせずカメラを開放して現象を入れたが、メタン着火状況を撮影する場合には雷管がメタンに着火しからの発光持続時間が長いので、レンズシャッター1/50秒、1/100秒、及び1/200秒のX接点を用いた。雷管に通電してから現象が開始するまでの遅れは約1~

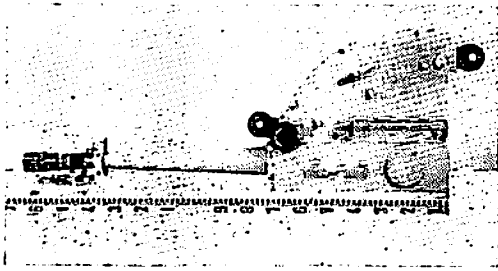


Fig. 2.1 Uyemura's SP-1 Ultra-High-Speed Streak Camera.

2 msec としても多重露出するので現象を更に遅らせるため delay circuit を用いることにし、カメラの接点からのパルスを delay circuit に入れ 1~10msec 遅らせてサイラトロンを動作させ現象と同期させて撮影した。

2.3 撮影試料及び撮影条件

撮影試料はこれまでの実験結果から雷管構成因子によるメタン着火性に於て特に影響の大きいと思われる

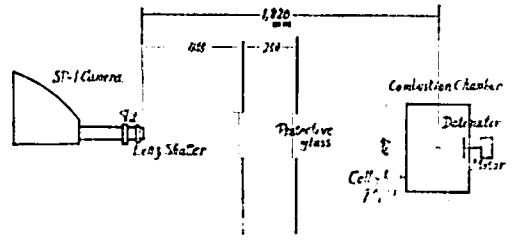


Fig. 2.2 Experimental arrangement

添加薬量、添加薬種、厚肉、起爆薬の影響について爆発火焰及びメタン待時間の差異を観察する目的で選択した。

今回は主として瞬発電気雷管を対象とした。試料は表に示した。掃引速度はメタン混入した場合には 500m/sec で掃引し、混入しない場合（雷管の発光のみを観察する目的のもの）には 1,000m/sec 付近で掃引した。各種試料について 2 回撮影した。

表 2.1 撮影試料 ①

試料No.	管 体	添 装 薬	添 加 物	起 爆 薬	着 火 率
1	銅薄肉	テトリール 0.45g (粒度大)	なし	雷 爆	5/10
2	"	テトリール 0.90g (粒度大)	"	D. D. N. P.	10/10
3	"	テトリール 0.45g (粒度大)	"	"	3/10
4	"	テトリール 0.45g (粒度小)	"	"	1/10
5	"	Comp B) テトリール) 0.45g (粒度普通)	"	"	1/10
6	"	Comp B) テトリール) 0.45g (粒度普通)	KClO ₄ 10%	"	0/10
7	"	Comp) テトリール) 0.45g (粒度普通)	NaF, Talc 20%	"	0/10
8	銅厚肉	Comp B) テトリール) 0.45g (粒度普通)	なし	"	0/10
9	銅薄肉	テトリール 0.45g (粒度普通)	点 火 玉 2s	"	3/10
10*	銅厚肉	Comp B) テトリール) 0.40g (粒度普通)	なし	"	7/10
11**	銅薄肉	Comp B) テトリール) 0.45g (粒度普通)	なし	"	6/10

* No. 10 のみ段発電気雷管である。** No. 11 は基山試製品である。

上記の試料のうちメタンに着火するものを選び、メタン着火核成長の時間的経過を観察した。

表 2.1 撮影試料 ②

試料No.	管 体	添 装 薬	添 加 物	起 爆 薬	掃 引 方 向
3	テ ト リ ール	0.45g 6号	なし	D. D. N. P.	縦 方 向
2	テ ト リ ール	0.90g 8号	"	"	縦 方 向
11 {	Comp B—テトリール	0.45kg 6号	"	"	横 方 向
11 {					縦 方 向
10	H N 段発電気雷管		"	"	縦 方 向

2. 4 試験結果

流しカメラの結果から(d 爆発火焰横方向の拡がり)

D_1 (爆発火焰持続時間) D_2 (壁の発光持続時間) を測定した。結果は表 2.2 ① の如くである。

表 2.2 ① 雷管の発光, 壁の2次発光の持続時間

試料 No.	掃引速度 (m/sec)		d (cm) 1次火焰横方向	1次火焰持続 時間 $n = 2$ (μsec)	2次火焰持続 時間 $n = 2$ (μsec)	着火率
	第1回	第2回				
1	400	795	11.75	44.9	125.5	5/10
2	490	—	16.90	71.5	170.0	10/10
3	510	995	10.26	34.7	27.6	3/10
4	500	990	14.54	55.0	144.0	1/10
5	465	—	15.20	65.2	127.2	1/10
6	510	1,015	11.13	38.8	67.8	0/10
7	520	1,025	8.93	25.2	45.3	0/10
8	490	—	10.52	31.5	11.8	0/10
9	515	1,030	10.17	27.0	67.3	3/10
10	28	—	11.83	—	—	7/10
11	—	1,020	13.78	55.0	120.0	6/10

測定値は各試料につき2回撮影しその平均値をとつたものである。上記の実験結果を見ると、雷管の種類によってその差異はかなり明瞭に現われている。爆発火焰の横の広がりは8号雷管に於て約 17cm Tetryl 系6号雷管で 10~14cm, Comp B-Tetryl 系6号雷

管に於て約 17cm である。火焰の持続時間もそれぞれ、70 μsec , 35~40 μsec , 50~60 μsec となり、火焰の直径の大きいものほど、持続時間は長く着火率も概して大である。厚肉、消焰剤入り安全雷管は同じ添装量の雷管と比較して火焰直径も持続時間も小さい値を示している。

次に電気雷管の爆発よりメタン燃焼までの発光の時間的変化を掃引速度約 40m/sec の速度で撮影した結果は表 2.2 ② の如くである。撮影方向は雷管の軸方

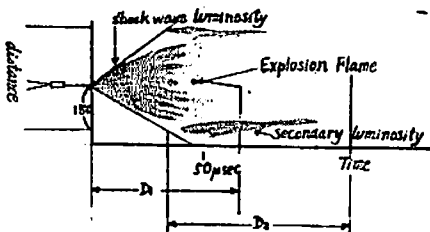
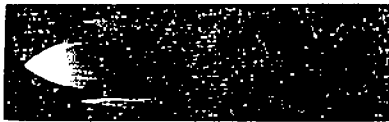


Fig. 2.3 Streak photograph showing the explosion of No. 8 detonator.

次に電気雷管の爆発よりメタン燃焼までの発光の時間的変化を掃引速度約 40m/sec の速度で撮影した結果は表 2.2 ② の如くである。撮影方向は雷管の軸方

向に掃引した場合と軸に対して垂直に掃引した場合をとつた。前者の方法ではメタン槽壁の側面での発光が得られ後者では底方向の発光が得られた。この実験では同一の雷管を2方向より同時に撮影したものでない

表 2.2 ②

雷管の種類	掃引方向	メタン燃焼の Induction Time
8号雷管	縦方向 (軸方向)	1.5 msec
6号雷管	縦方向	3.2 msec
	横方向	5.0 msec

III プリズム式 16H 高速度カメラによる電気雷管のメタン着火状況の撮影

前章の流しカメラによる実験結果を総括すると、

- (1) 雷管の爆発発光時間は6号雷管で火焰が 50 μsec 以内、メタン槽壁に衝突した時に生ずる2次火焰が約 100 μsec 持続する。
- (2) メタンの燃焼核は槽のほぼ中央から始まる。
- (3) 雷管がメタン槽内で爆発してからメタン燃焼

核が現われるまでの時間は6号雷管で4~5msec.

8号雷管1~2msecで真暗の中から燃焼が始まっている。

我々は撮影速度が速く且つ光学系の明るい16H高速度カメラを使用しして雷管によるメタン着火状況を更に追跡した。撮影実験に際し被写体となるメタン試験槽は一面を透明にしなければならない。実際のメタン試験に使用されている槽と比較すると槽の密閉強度が弱くなると考えられ着火状況も変ってくるかも知れない。撮影に際しては光の透過度を重要視しなければならないので密閉強度が弱くなり雷管の爆轟ガスによつてメタン-空気混合物が早く槽外に押し出される懸念はあつてもセロファン紙を使用する方法がよいと考えられた。

3.1 カメラ装置及び方法

実験に使用したプリズム式16Hカメラの性能は下記の如くである。

- (1) 撮影速度 500~10,000コマ/sec
- (2) レンズ H. Topcon 1:18 f:5.8cm
- (3) 回転プリズム 四面体
- (4) 使用フィルム 16mm×30.5m 一巻
- (5) 寸度及び重量 300×300×250mm 15kg

撮影配置図は3.1図に示すごとく、メタン槽の斜方向より撮影し、照明は1kWランプを両側より3個づつ用い被写体の静止像、電気雷管の起爆及びメタンの着火状況を撮影した。雷管はPETN-D.D.N.P雷管である。撮影条件は $f=2.8$, 9,500コマ/sec, でTri-Xフィルムを用い同期は内部接点を通して雷管に通電した。

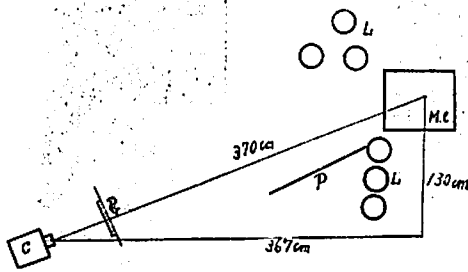


Fig. 3.1 Optical apparatus for viewing ignition.
C: Hitachi-High-Speed Motion Analysis Camera.
M.C.: Combustion chamber (9.0% CH₄)
M: Motor
L: Reflector lamp (600kW)
P: Protective glass.

3.2 撮影結果

流しカメラ及びFastaxカメラで撮影した場合には雷管が爆発してからメタン-空気混合物が燃焼するまで

の数msecの間は真黒であつたがこの写真に見られるように16H高速度カメラによつてメタンの局部燃焼が観察された。結果を3.2図に示した。

この写真によれば、メタンの局部燃焼は雷管が爆発してからメタン槽周囲の2次発光が消失する以前の200 μ sec(最初から2コマ目)に発生していると推定されるが写真では210~525 μ secの間は周囲の発光が強く発生状況を明瞭に観察することが出来ない。槽の中央附近に発生したメタンの局部燃焼は周囲のメタン槽壁の2次発光が消失してもそのまま残り以後数msecは徐々に成長しているが、その位置はわずかに左右にゆれながら移動している。その後4~5msec経過した後メタンの燃焼は急激に成長して本格的な燃焼に移る。セロファン紙は雷管の爆発及び壁への2次発光が終る200 μ sec附近で破壊を始めるが、セロファン紙の破壊速度はかなり遅く600 μ sec附近で大部分が破壊される程度である。メタン空気混合ガスが槽外に押ししやられるとしたら、それはセロファンの破壊後である。そのときには既に燃焼核は発生していてその後もあまり位置が変わらないことから、セロファン紙と鉄板の差異は本質的にメタンの着火機構を变るとは考えられない。

IV 植村式 M.L. D-2 型超高速度カメラによる電気雷管の爆発現象の撮影

III章において雷管によるメタン着火状況につき検討した、メタンの局部的燃焼の発生とそれが成長してメタンの本格的燃焼に至る過程が明らかとなつたが雷管によるメタン着火状況を更に詳細に知るため、シユリーレン法と240,000 frame/secの性能を有するM.L. D-2型高速度カメラを組合せ、雷管の爆発火焰、衝撃波、爆発ガスの広がる状態を撮影した。

4.1 カメラ装置

M.L. D-2型高速度カメラは最大撮影速度24万コマ/secを有する連続コマ撮り(約200コマ)で性能を下記に示した。

最大撮影速度	240,000 frame/sec
1コマの露出時間	0.5 μ sec
明るさ	f:9
画面寸法	5×25cm
連続撮影コマ数	200コマ
使用フィルム	35mm標準フィルム
フィルム全長	1,884mm
解像力	40/mm
本撮影方式	群撮影

このカメラの特徴は現象との同期を必要とせず、同一の雷管について連続200コマの撮影が可能である。

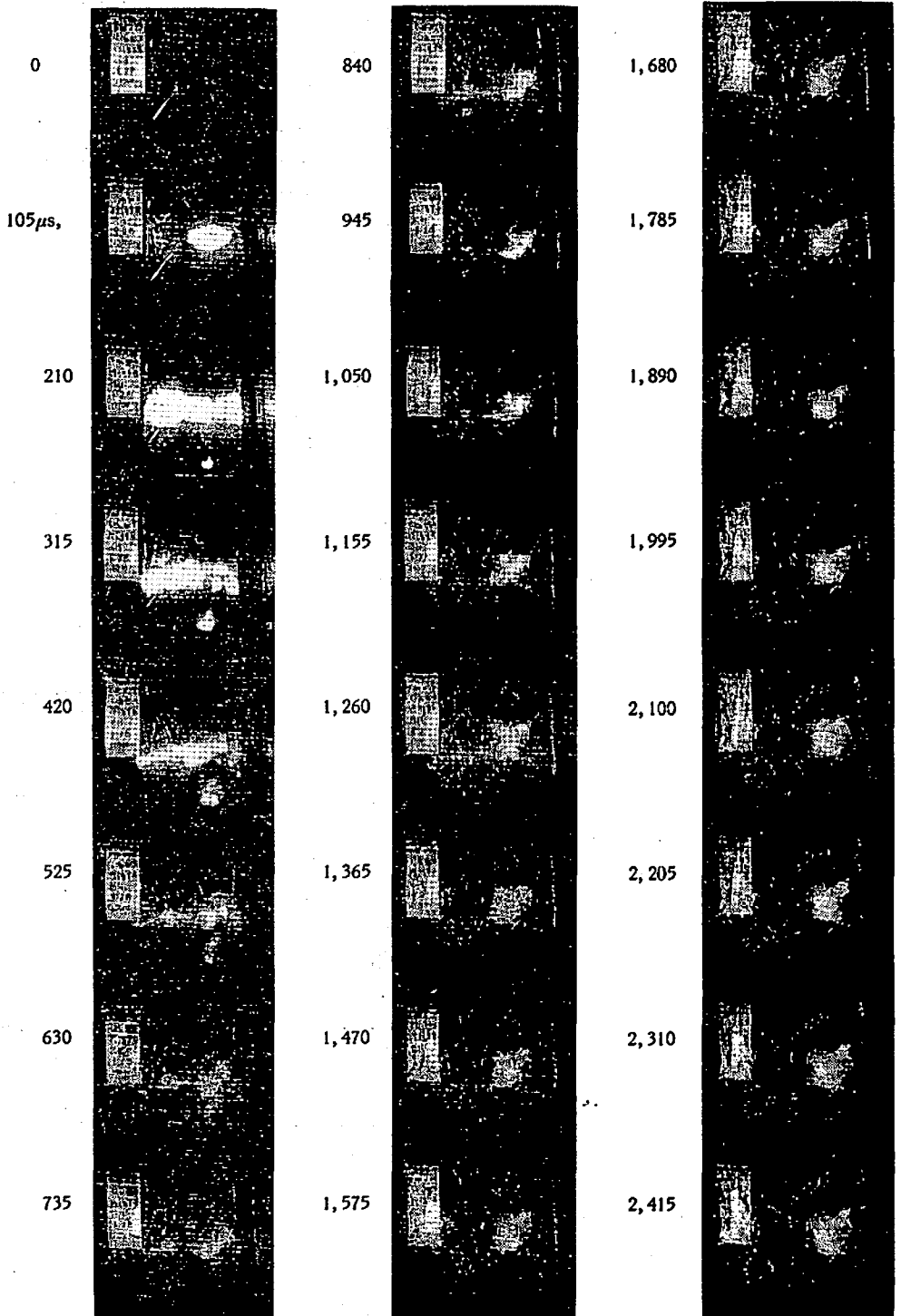


Fig. 3.2 (1) Framing Camera sequence of the ignition of the CH_4 -air gas by No. 7 Copper detonator. (taken at $105\mu\text{sec/frame}$)

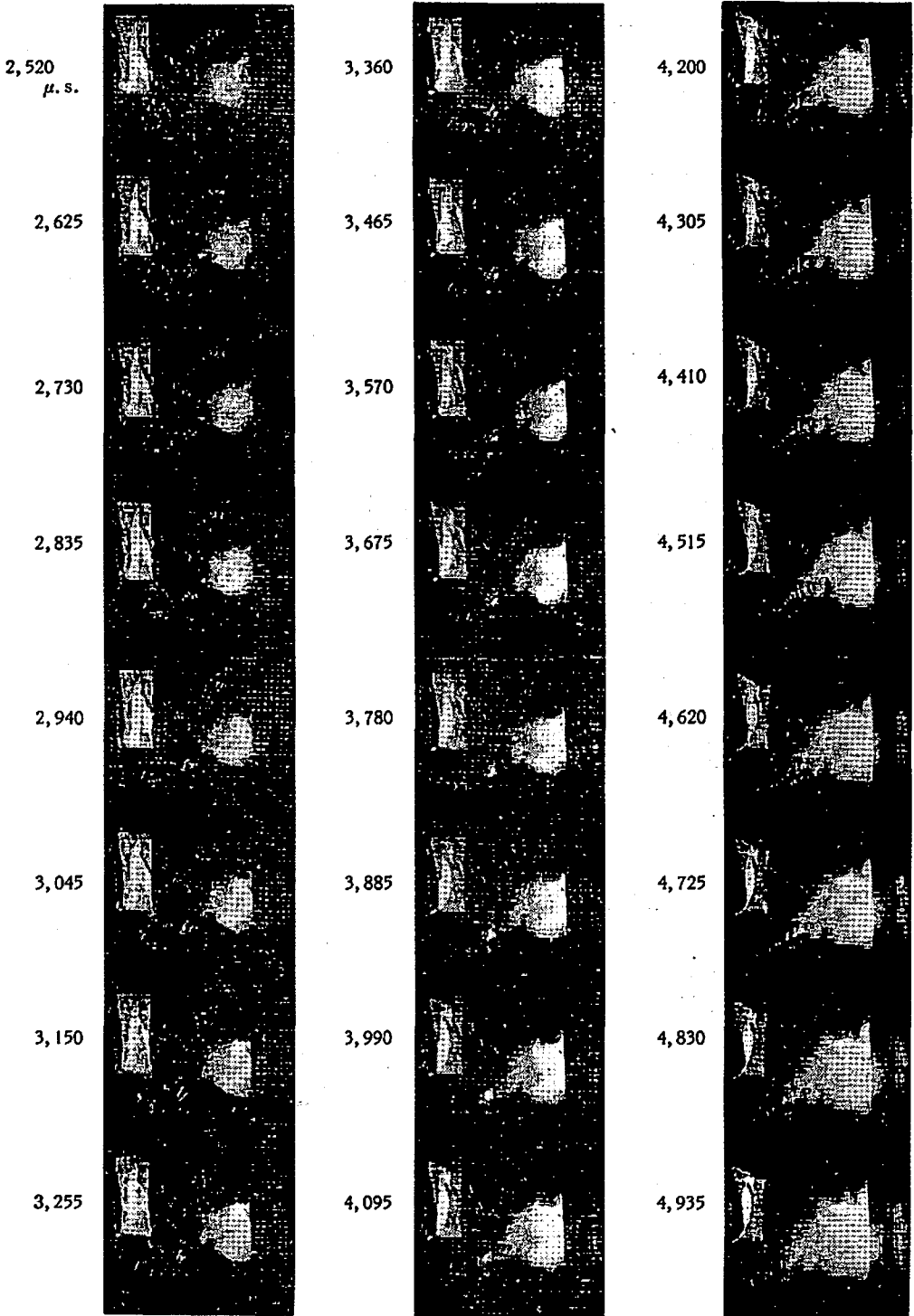


Fig. 3.2 (2) Framing Camera sequence of the ignition of the CH_4 -air gas by No. 7 Copper detonator. (taken at $105 \mu\text{sec/frame}$)

従来発表されていたシュリーレン法では雷管の爆発火焰が多重露出する欠点があり撮影コマ数も少く雷管爆発の極く一部分しか捉えることが出来なかつたが、植村式 M. L. D はこれらの欠点を克服した新しい装置である。

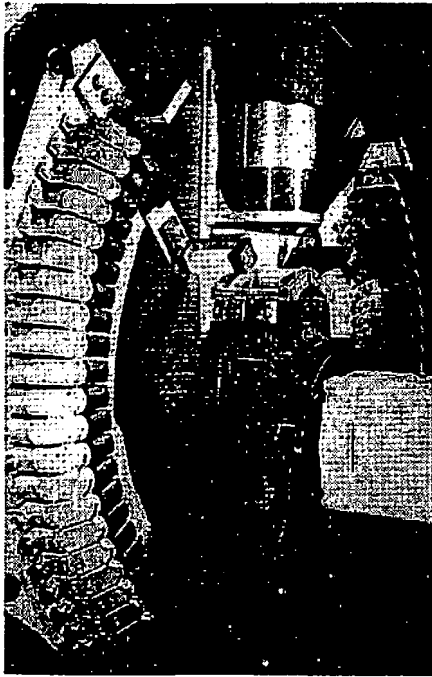


Fig. 4.1 M.L.D-2 Camera.

4.2 撮影装置の詳細

シュリーレン光学系は図に示した如く、点光源(L)

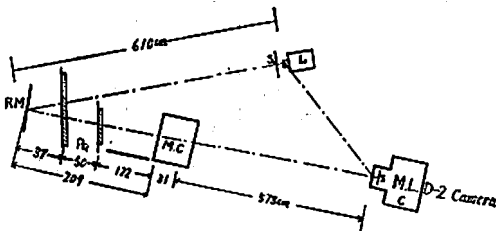


Fig. 4.2 Experimental Arrangement.

C; Uyemura's M.L.D Ultra-High-Speed framing camera, L; Light Source (Hg-Lamp), RM; Parabolic Mirror ($f=3m$), S; Slit, MC; Combustion Chamber, Pg; Protective Plate Glass.

は超高压水銀燈を用いた連続光源である。M. L. D カメラは平行光源の場合には山型反射鏡で2分されて連続撮影が可能であるが、点光源の場合には視野が2分されて撮影出来ないのので2点光源とした。点光源用

スリットの孔径は約 3~5mm で水銀燈の焦点をこれに結ばせ、その前にレンズシャッター直径 16mm シャッター速度 1/1000 を置いた。同期の方法はレンズシャッターの X 接点を雷管のスウィッチインに利用し雷管の現象を 0.5~0.75msec の範囲で撮影した。凹面鏡は直径、40cm, 焦点距離 3m で凹面鏡の前に防爆壁として光学ガラスを置き、被写体の視野は雷管をメタン槽の中央に吊し横方向は片半分、上下方向は底方向を全部入れた。縮少率は 0.0437 倍である。撮影試料は 7 号雷管 (D.D.N.P 0.20g-Tetryl-Comp B 0.60g 銅雷管) である。

4.3 撮影結果

撮影結果の一例を 4.3 図に示した。撮影速度 13 万コマ/sec で雷管の発光部分を約 8 コマにおさめ同時に爆発ガスの拡散状態、衝撃波の発光、分離、反射の過程管体破片の飛散状態等、これまでの実験で得られなかつた多くの点を観察することが出来た。

4.3.1 JIS 6 号雷管の爆発現象の解析例

4.3.1-① 図の雷管の爆発模型に従い、衝撃波、爆

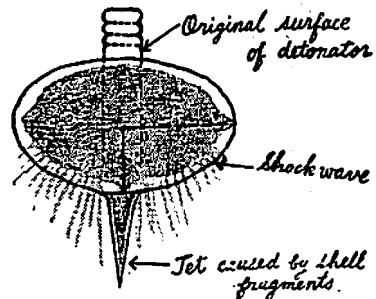


Fig. 4.3 The Model of the explosion phenomenon.

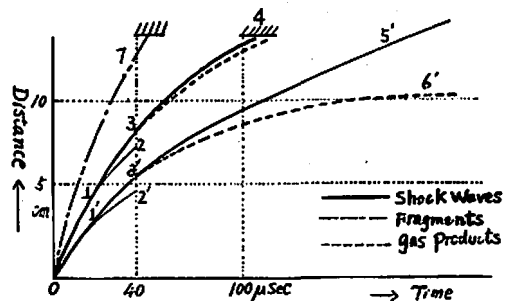
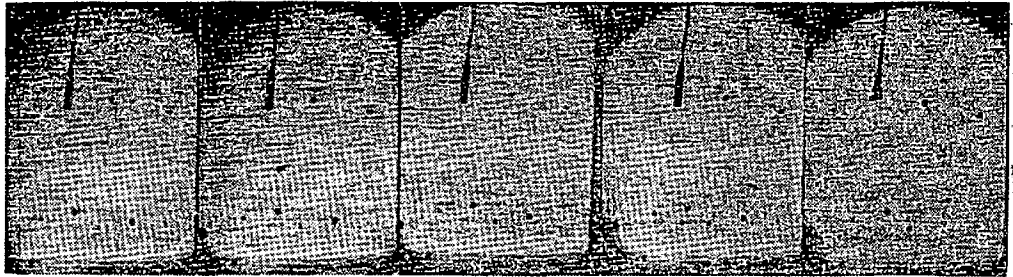
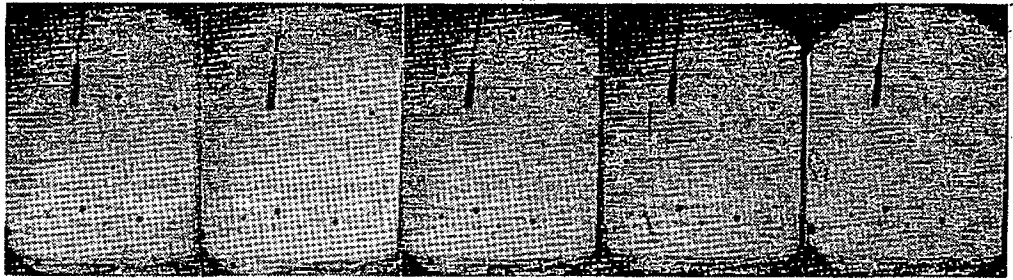
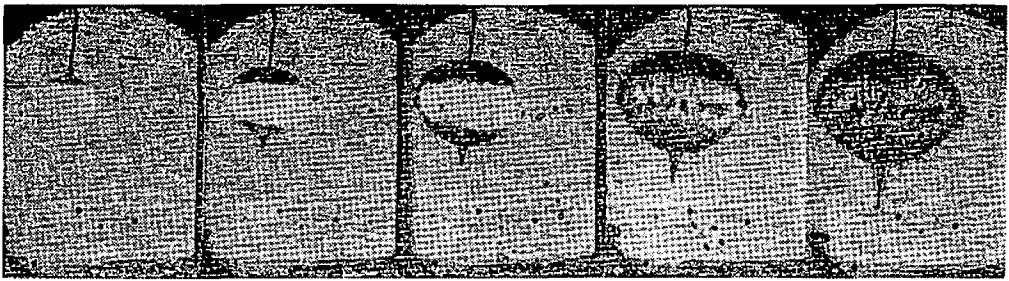


Fig. 4.3-① Time-distance diagrams of the shock wave and the explosion gas products. (No. 7 Copper detonator)



6.99 μ s



13.98

20.98

27.97

34.96

41.95



48.94

55.94

62.93

69.92

76.91

Fig. 4.3 The explosion phenomenon of the copper detonator in an iron chamber. (interval between frames; 6.99 μ s)

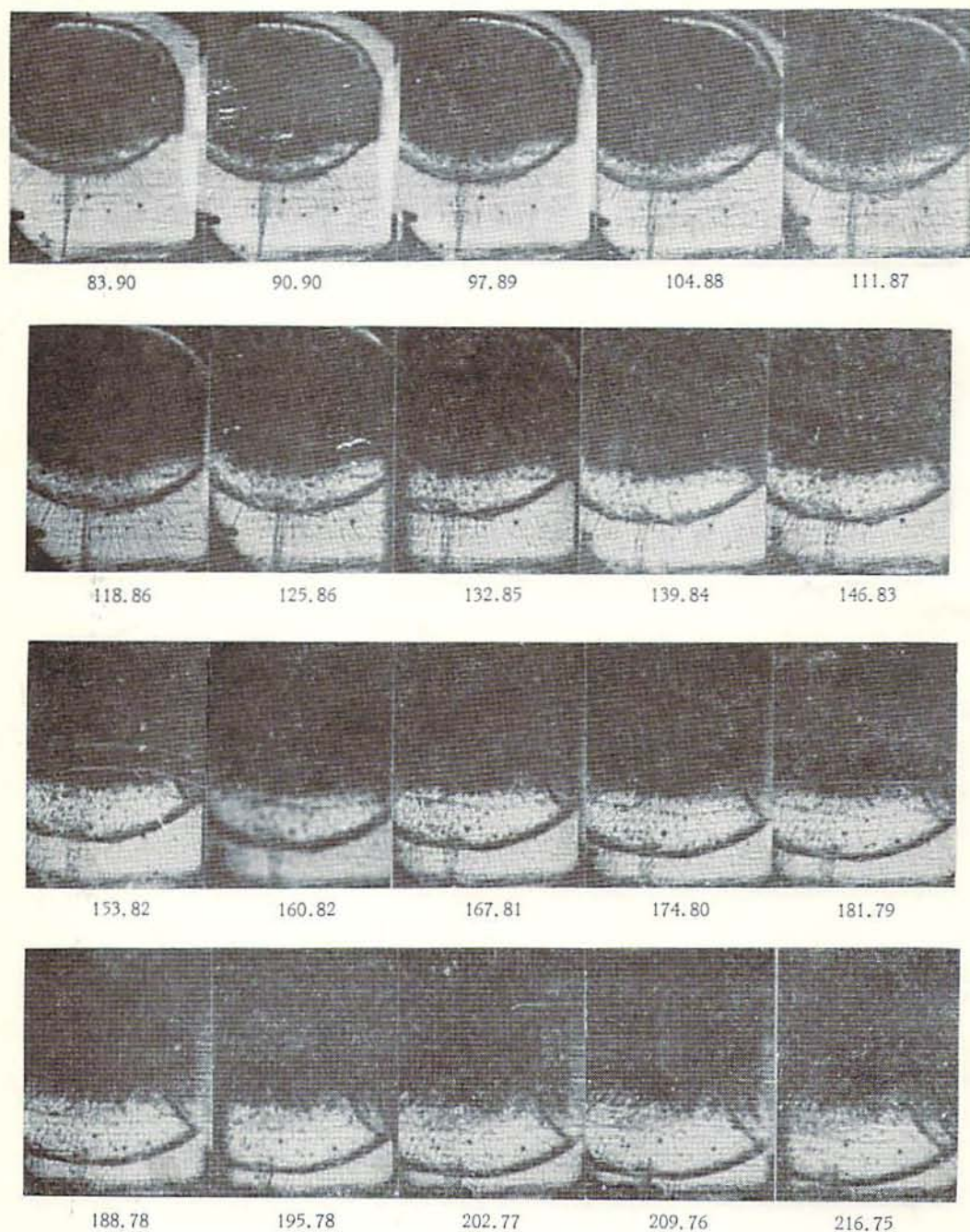


Fig. 4.3 The explosion phenomenon of the copper detonator
in an iron chamber. (interval between frames; $6.99\mu\text{s}$)

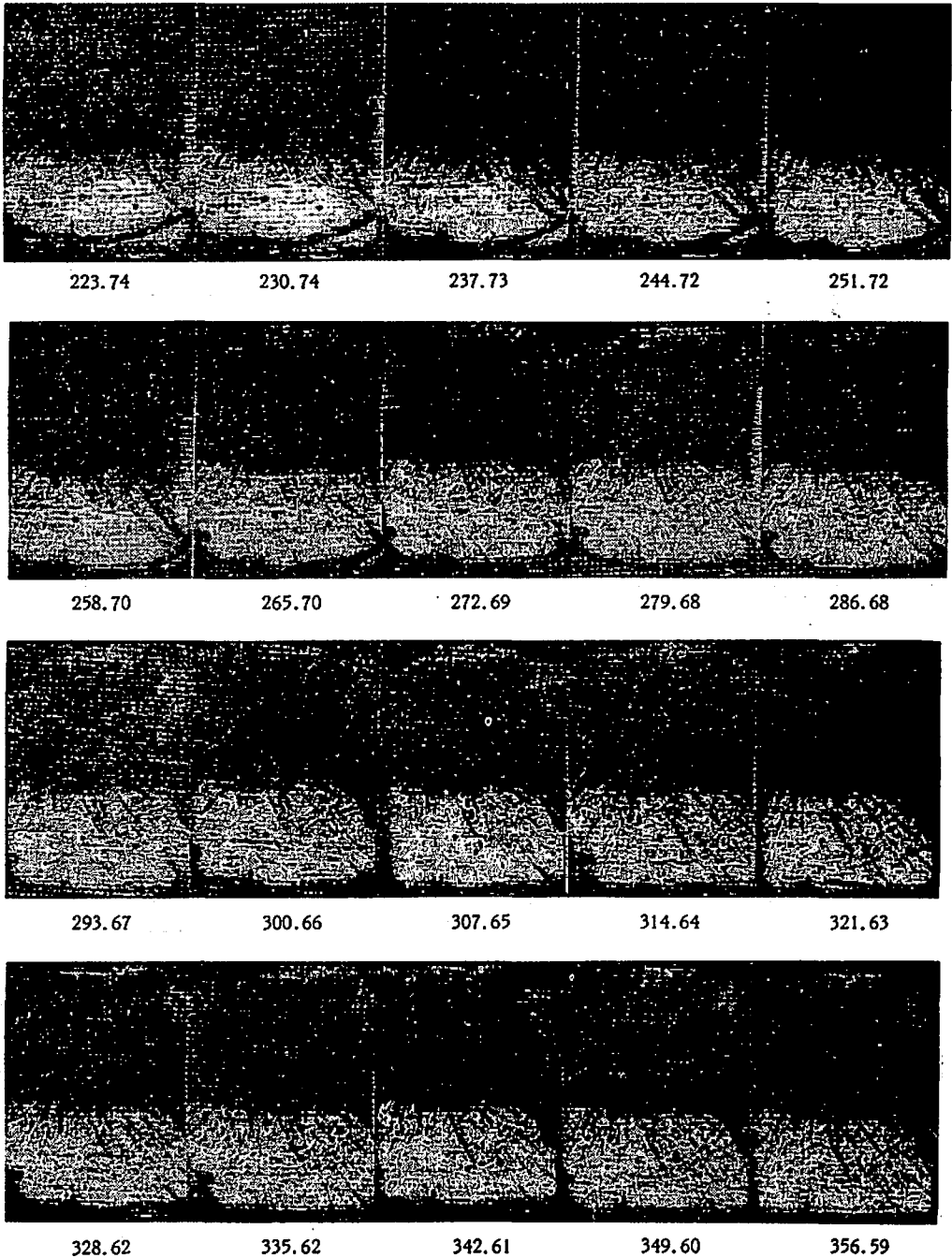


Fig. 4.3 The explosion phenomenon of the copper detonator in an iron chamber. (interval between frames; $6.99\mu s$)

1. 衝撃波、爆発ガスが同一速度で進行している。
2. 衝撃波による発光が消失したところ
3. 衝撃波と爆発ガスの分離点
4. メタン槽壁の衝突
5. 分離後の衝撃波
6. 分離後の爆発ガス
7. 破片速度

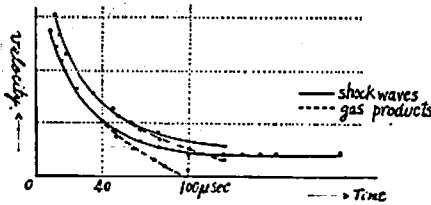


Fig. 4.3-2 Time-velocity diagrams of the shock wave and the explosion gas products (○; Lateral spread ·; axial spread)

爆発ガスの前面位は横方向の拡がり中央線に対し線対称であると仮定し、雷管の添装薬部の位置から前面までの距離をとり、縦方向は添装薬部から雷管底方向の前面位置の距離をとった。衝撃波、爆発ガスの前面位置の時間的变化を4.3.1-②図に示した。又衝撃波と爆発ガスの速度と時間の関係を4.3.1-③図に示した。

4.4 雷管の爆発現象の考察

雷管が爆発すると管体が破壊し、添装薬の装填してある部分のほぼ中央から球状の発光現象が現われる。(1コマ目)実際には管体が破壊されるまでには多少の時間を要するので雷管の爆発現象がフィルム上に現われない前に、起爆薬から添装薬に爆撃波が進行してゆく状態があり、合成樹脂雷管のような透明な雷管ではこの状態を撮影することが可能であるが、不透明な銅雷管では観測することは出来ない。

管体が破壊されると爆発ガスが外部に放出される。爆発生成ガスは約3,000m/secの超音速で噴出するために周囲のメタン-空気混合物は圧縮波となり所謂衝撃波を形成する。写真に現われた球状の発光体は衝撃波による発光であると考えられ、表面は薄い衝撃波のfilmであり温度は約6,000°Kであると推定される。内部は爆発物が充滿しており、化学反応が行われていると考えられる。衝撃波の発光であることの証明は、H. Muraour⁷⁾氏の実験による。氏等は爆薬の発光スペクトルを撮り、窒素と酸素のスペクトルしか得られなかつたので、衝撃波による空気の発光であることが一般に認められている。発光している衝撃波の温度について考察すると、衝撃波の前後の状態変化を等エントロピー変化と仮定すれば、断熱変化 $T/P^{r-1} = \text{const}$ が成立し、質量保存の式、エネルギー保存の

式、運動量保存の式を組合せると最終には

$$\left(\frac{P_0'}{P_0}\right)^{r-1/r} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right) \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-1/r}, \left(\frac{P_0}{P_0'}\right) = \left\{ \frac{2r}{r+1} M_1^2 \right. \\ \left. - \frac{r-1}{r+1} \right\}^{1/r-1} \left\{ \frac{(r-1)M_1^2/2}{(r+1)M_1^2/2} \right\}^{r/r-1}$$

が得られる。ここに M はマッハ数、 T は温度、 P は圧力 ρ は密度を表わし添字はそれぞれ衝撃波の前後の状態を示す。今 $r=1.4$ として、 $M=10$ ならば、 $T_2 \approx 6,000^\circ\text{K}$ 、即ち発光の最初の部分の温度は6,000°Kになる。

爆発後 20 μsec 附近から爆発ガスの噴出速度は縦方向に於て急激に減衰する。一方横方向はまだ 2,000m/sec の速度を維持しているため、噴出ガスの形は楕円型になる。発光の強さは衝撃波の速度が大きい程強く、速度の減衰が著しい縦方向は横方向より早く冷却される。従つて、縦方向の光が消失することが分る。

この衝撃波による発光は 40 μsec で完全に消失する。爆発火焰は最初の数コマまで衝撃波 film で覆われているため外見上はその状態は分らない。爆発火焰は 40 μsec まで衝撃波と分離することなく、衝撃波と爆発火焰の速度は同じであると考えられる。この状態に於て衝撃波のせぐ背後には化学反応が行われ、このときの温度は3,000°C位ではないかと考えられる。雷管の自発光を照明を行わずに M. L. D カメラで撮影した場合は爆発火焰がかなり明確に撮影出来、火焰は雲状に拡がり、時間と共に次第に薄くなるがその持続時間は大略 50 μsec であり流しカメラの実験結果と一致した。所がシユリーレン写真では爆発火焰はむしろ暗写くり、衝撃波と爆発火焰の発光を同時に撮影することは困難である。これは W. L. Murray 氏⁸⁾も指摘している。

爆発後 40 μsec 附近から衝撃波と爆発ガスの分離がはじまる。衝撃波はメタン-空気混合ガス中を進行し側面壁に衝突する速度は、700m/sec、底方向に衝突する速度は 500m/sec である。200 μsec 以後はメタン槽の周囲からの反射衝撃波、爆発ガスによつて攪乱状態となる。Dixon, Hawood⁹⁾ 氏によれば、壁面の反射衝撃波によりメタンの着火が起るなら少くとも入射衝撃波の速度は 1,000m/sec 以上でなければならないことを指摘していることからこのメタン槽に於ける壁面の衝撃波は直接着火源にならないと推定される。

以上の考察により、初期の段階分離前に於る高温高圧の衝撃波と爆発火焰はメタン-空気混合物と接触している部分では絶えずメタンの着火を引き起していると考えられるがこの局部的な燃焼がメタンの本格的な燃

焼に発達し得るか否かは高温状態の持続時間の外にその後の爆発ガスの移動状態、衝撃波の反射状態によつて左右されると思われる。

V. 結 論

瞬発電気雷管のメタン着火性は爆発火焰が爆発ガスによつて包蔵されるか否かによつて決まるといふ Dolan 氏³⁾の報告がある。

すなわち、火焰は爆発生成ガスの後に生成し、ある時間を経過した後爆発生成ガスを追越し、メタン-空気混合物に触れ、そこから着火するという見解であつた。

然しながら今回の実験から雷管爆発後最初に出るものは衝撃波とそれに包まれた火焰でありこれが高温高压で発光する。

発光持続時間は約 20 μ sec であり。その後周囲が冷却して光らなくなる。Dolan 氏の所論は今回の実験結果から妥当な結論であるとはいえない。流しカメラの結果から見ると雷管のメタン着火性は火焰の横の広がり大きいほど、また、持続時間が長いものほど大である。

従がつて着火性を支配するものは主として火焰の熱エネルギーであると推定されるが、雷管の衝撃波と爆発火焰およびガスは爆発後 40 μ sec までは分離せず、同一の速度で拡散するのでこの点から雷管による着火原因を火焰と衝撃波にはつきり区分することは出来ないと思われる。16H high speed camera で観察したところによると瞬発雷管がメタン-空気混合物に着火する場合はメタンの初期の局部的燃焼は非常に弱く、その発生状態は正確に捉えることが出来なかつた。

しかし今回の実験からメタンの燃焼は爆発火焰が消

失し壁での 2 次発光が消失する前の 200 μ sec の間に発生しているものと推定され、その後メタンの局部燃焼が本格的燃焼に移るまで約 4 msec 持続していることが観察された。また燃焼核発生の位置は雷管火焰先端の各附近から着火しているものと考えられ、これらの局部的燃焼は爆発ガスおよび壁面から反射する衝撃波により途中で消失するものも持続するものもあり左右に移動しながら発達している。

最後に本研究を許可された日本化薬株式会社火薬部長山田正幸氏ならびに本研究の爆発現象の解析について有効なる御教示を賜つた東京大学工学部疋田教授に深く感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 香月収, 古閑豊: 採鉱と保安 6 (3) 1960
- 2) 加藤清視: 折火研報告 (1960)
- 3) W. Payman: W. Woodhead, H. Hit: Proc. Roy. Soc. 1 48 604 (1935)
- 4) 川下部, 井田: 工業火薬協会誌 19 353 (1958)
- 5) J. E. Dolan: J. Appl Chem 5 215 (1955)
- 6) 水島他: 工業火薬協会誌 18 2 157 (1958)
- 7) H. Muraour: Rev. Optique 20 149 (1949)
- 8) H. B. Dixon, J. Harwood: S.M.R.B No. 93 1935
- 9) W. L. Murray: 11th International meeting of directors of Safety in mines research No. 43 1961

本文の内容は昭和36年10月, 昭和37年4月工業火薬協会研究発表会に於て, 又昭和37年1月日本燃焼協会に於て発表いたしました。

The Mechanism of the Ignition of Methane-Air Mixture

by Electric Detonator

T. Uyemura* S. Kinoshita** S. Nakahara** and K. Yamamoto**

In the present paper, the three types of high speed cameras; (1) Uyemura's SP-1 Ultra-High-Speed Streak Camera, (2) 16H Prism type Hitachi High-Speed Motion Analysis Camera, and (3) Uyemura's MLD-2 Ultra-High-Speed Framing Camera, have been used in the investigation of the ignition

of methane-air mixture(9% CH₄) by instantaneous electric detonators in an iron chamber (30cm×30cm square and 40cm high.)

It is found from the streak photographs that the ignition probability of the methane-air mixture by instantaneous electric detonators is mainly due to the explosion flame; that

is, the ignition probability becomes high with increase of the lateral spread and the duration of explosion flames. That seems to be the reason why No. 8 detonator is more incendive than No. 6 detonator.

The 16H camera caught the local combustion process of the methane-air mixture which had not been visible in photographs using other cameras. The local combustions at approximate center of the chamber may be caused by the explosion flame and grow slowly to the general combustion after 4 ~ 5ms when a No. 6 instantaneous copper shell detonator is fired. On the other hand, secondary luminosities caused by shell fragments from a copper shell seem to be unimportant factor.

The explosion of a detonator is recorded in the photograph by an appearance of a spherical luminosity at the base charge posi-

tion. The shape of the luminosity differs entirely from that of the explosion flame which is taken in a direct still photograph. The luminosity seems to be due to the shock wave produced by a high degree compression of the methane air mixture by a super-sonic expansion of gaseous products with speed of 3,000m/sec. from the detonator.

It may be concluded from these observations using the highspeed cameras that the probability of the methane-air mixture by detonators depends not only on the lateral spread reach and the duration of the explosion flame, but also on the local combustion processes, that is, on their scales, disturbance effects of gaseous products and the geometric condition of shock waves reflected from the walls of the chamber.

火薬類による災害の防止に関する原則の研究

清水 武 夫*

I. 緒 言

筆者は先に火薬類による災害の防止、特に煙火の製造消費などのような多品種少量の取扱に宿命的につきまとう複雑多様性または流動性の顕著な場合について、その原則の研究の必要性を提案したのであるが¹⁾、その後我が国の火薬類取締法規およびこれに関連する危害予防規定規範の審議改訂されるに伴い、その業務に関係しつつ、自己の携わる現場の実践行動について反省し、再びこの思想を検討する機会に恵まれたのである。よつてその結果を整理する意味においてこの小文を纏めることを試みたのであるが、将来この種の、より深い研究が複雑な人間関係を含めた困難な防災の問題を、より有効適切に処理し得るのではあるまいかと思案するのである。

II. 原則研究の立場について

我々は過去の事実は事実として絶対的に承認を迫ら

れる。原則とはこのような過去の事実を承認分析する結果として、そこに底流し万人が認めざるを得ないような実践規範の根源となる思想の謂である。これ等の研究は兵学においては早くより発達した。兵学は危険に対する不安と錯誤と偶然との問題の複雑さを絶えず簡明、的確、最善に処理すべき課題を負わされていること、実に災害防止の問題を超えるとも思われる。他の一つは会計学において発達した。会計学は複雑なる商活動を細大漏らすことなく最も簡明な手続と形式とによつて記録し、かつその処理は企業の危険性を予測し安全を保つ如く表示することを要求される。また一般の処世の術としては古くより所謂格言の形で流布されている。これ等に見られるように人間関係を含めた複雑さに対し簡明な実践規範または指針を得ることが原則研究に期待される効果である。筆者は以上三者について教えられること極めて多く、特に近代企業会計原則は企業活動の整理と危険処理との課題に取り組むこと、この災害防止の原則とその精神において相通ず

昭和37年8月30日受理

* 細谷火工株式会社、東京都西多摩郡秋多町