

## 水中の爆発衝撃と電気雷管の不発について

鈴木輝彦・浜崎正文・井沢信之\*

### 1. 概説

最近港湾および水路の岩礁除去のため水中発破が旺んに実施されており、その規模も逐次拡大されつつある。水中発破には海底の岩盤に穿孔して装薬し発破する場合と成型爆薬を張り付けて発破する場合の2通りがある。前者は少量の薬量で良好な発破効果が得られるが、穿孔に長時間を要する欠点がある。海底の発破作業では潮流、干満等の時間的制限が多く、潜水作業の時間は作業能率の面からできるだけ短いことが望ましい。後者の張り付け発破はその点、短時間に爆薬を設置することが可能で、能率的であるため、爆薬の消費量が大いにも拘らず寧ろ経済的である。張り付け発破の場合は一般に数mの間隔に数kg~数10kgの爆薬をセットすることになり、1回に発破する爆薬量も相当大きくなっていく。従って普通水中発破で問題になるリークによる電気雷管の不発以外に、水中衝撃波により電気雷管が圧破しこれによる不発、半爆等の現象が屢々発生する。リークによる電気雷管の不発および対策に関しては、過去幾多の文献報告がなされているので省略し、ここでは水中衝撃波により管体に変形する現象を、薬量と距離をかえて管体破壊におよぼす圧力と管体変形について測定し、管体強度と爆薬設置間隔の関係を求めた。

なお、水中爆発に関しては、古くは山家氏<sup>1)</sup>の報告があり、構造物の破壊因子は爆源近くでは水流による水錘作用と衝撃波による圧力作用の二つであるが、前者の減衰は後者に比し極めて急速であるから遠距離では衝撃波のみを考えればよいと述べている。水中における張り付け発破の場合も、殉爆、発破効果等の関係で爆薬同志を至近距離に設置することはないのでここでは衝撃波の作用のみをとりあげた。

### 2. 水中衝撃波

概説で述べたように張り付け発破では、比較的大きい薬量を近接して設置する 경우가多く、しかも発破震動を減少するためにMS発破により爆薬に時間差を設ける場合が多い。従って、前段の爆発の影響がその周

辺にセットされた爆薬におよぼされることが考えられる。従来実施されている水中発破の爆薬量と設置間隔の一応の基準を表1に示す。

表1 爆薬量と設置間隔の基準

爆薬量 $W$ (kg)	設置間隔 $d$ (m)	発破法
5	1 ~ 1.5	MS
20	2.5~3	"
30	3 ~ 3.5	"
60	5 ~ 6	瞬発斉発
80	5 ~ 6	"

### 2.1 水中の衝撃波速度

水中における衝撃波速度  $U$  は Rinehart<sup>2)</sup> によれば図1のように衝撃波の波頭圧力  $P_m$  (Peak pressure) の函数として示されるが、大気圧では普通 1,463m/s (at 19°C) である。従って、爆発による衝撃波が普通の音速で伝播すると仮定しても、表1の各距離における衝撃波の到達時間は極めて僅かなもので、爆源から5mの距離で約 3.4ms しか要しない。普通MS電気雷管の段差は数10ms であるから当然衝撃波の影響を受けることになる。

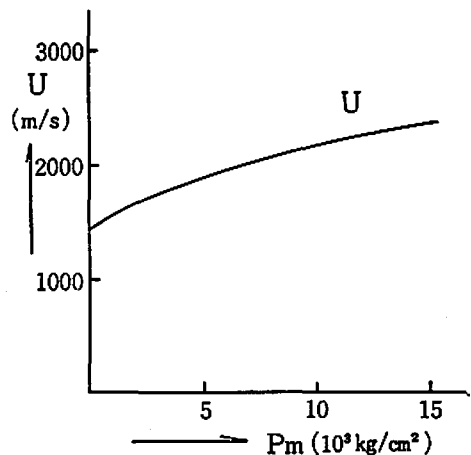


図1 衝撃波の波頭圧力と速度

昭和42年5月19日受理

\* 旭化成工業(株)雷管工場 浜岡市長浜町

## 2.2 水中衝撃波圧力

水中における衝撃波の Peak pressure  $P_m$  は  $W^{1/3}/R$  の関数となり  $P_m = K(W^{1/3}/R)^{\beta}$  で示される。但し  $W$  は薬量,  $R$  は爆源からの距離を示す。TNT の球状装薬では  $P_m = 5.37 \times 10^2 (W^{1/3}/R)^{1.13} (\text{kg}/\text{cm}^2)^{0.13}$  で示される。TNT 5kg を使用した場合の爆源からの距離  $R$  と  $P_m$  の関係は図2に示すように  $R=1\text{m}$  で 980

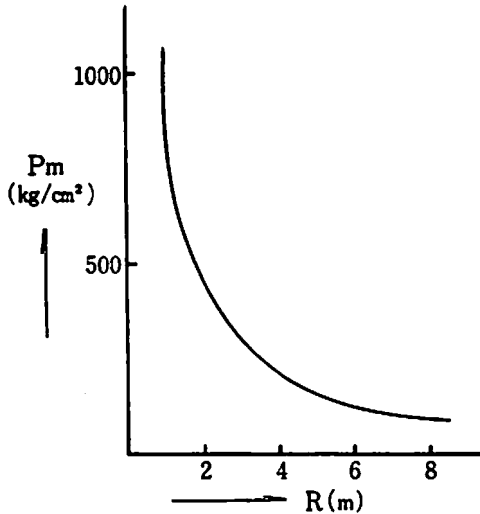


図2 爆源からの距離と圧力の関係  
TNT: 5kg

$\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $R=2\text{m}$  で  $450\text{kg}/\text{cm}^2$  であり  $P_m$  は距離  $R$  とともに急速に減衰してゆくことがわかる。しかし表1に示したように爆薬量 5kg の場合は爆薬の設置間隔 1~1.5m であり,  $P_m$  の値が  $600\sim 1,000\text{kg}/\text{cm}^2$  という高圧を瞬間的に受けることになる。

### 3. プラストメーターによる水中衝撃波圧力の測定

$\phi=50\text{mm}$ , 厚さ 1mm の銅板を使用したプラストメーターにより, 爆源に 100g の新桐ダイナマイトの球状装薬を用いて爆源からの距離 2m および 1m における銅板変形量を測定すると夫々 3.8mm, 7.0mm である。これをプラストメーターの静圧による補正曲線図3から換算すると, 静圧として  $21\text{kg}/\text{cm}^2$  および  $50\text{kg}/\text{cm}^2$  となる。爆源からの距離  $R$  と圧力  $P_m$  の関係を新桐ダイナマイトについての計算値と上記実測値をプロットすると図4のようになる。

図4で圧力は計算値に比し実測値の方が相当に小さくでているが, これは  $P_m$  は瞬間的で以後圧力は急速に減衰するので構造物におよぼす圧力の実効値  $P_e$  としては  $\alpha P_m (\alpha < 1)$  とする必要がある。爆源からの距離 1m および 2m における圧力の実測値と計算値の

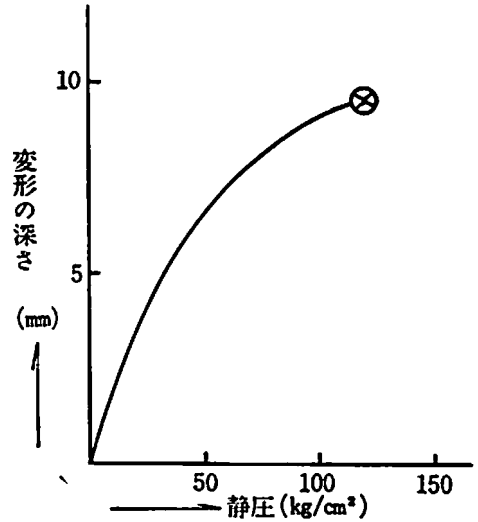


図3 プラストメーターの補正曲線

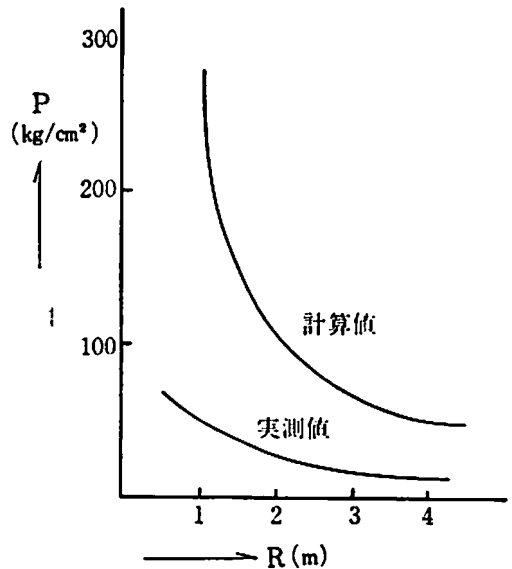


図4 爆源(100g)からの距離と圧力の関係

比をとると  $50/239=0.209$ ,  $21/104=0.20$  となり圧力の実効値  $P_e = \alpha P_m$  において  $\alpha=0.20$  となる。

同様に爆源に新桐ダイナマイトの球状装薬 500g および 1kg を用いた場合の関係は図5, 図6のようになる。

爆薬量 500g の場合の爆源からの距離 3m および 4m における圧力の比をとると  $40/124=0.311$ ,  $29/89=0.326$  となり  $\alpha=0.32$  となる。また 1kg の場合には同様に 3m で  $70/160=0.437$ , 4m で  $52/117=0.444$

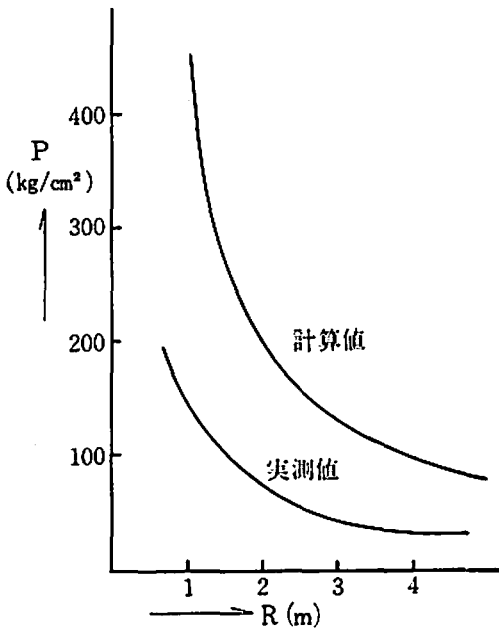


図5 爆源(500g)からの距離と圧力の関係

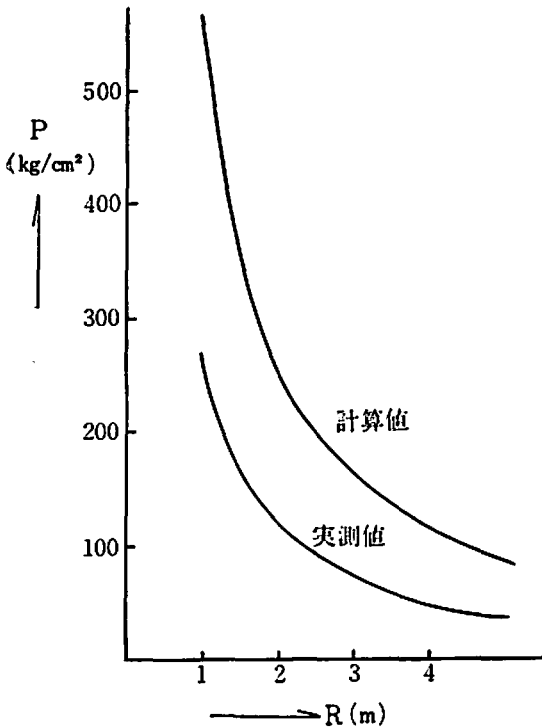


図6 爆源(1kg)からの距離と圧力の関係

となり  $\alpha=0.44$  となる。

$\alpha$ の値は薬量が増加する程大きくなってくるが、衝撃波の持続時間は  $W^{1/3}$  に比例して長くなるので同じ  $P_m$  に対して圧の実効値  $P_e$  が大きくなるのは当然である。

#### 4. 雷管管体の破壊強度

水中の衝撃波圧力による雷管管体の圧縮変形は、衝撃波の持続時間が非常に短いことから  $P_m$  の値をそのままするのは適当でないと考えられる。 $P_m$  は極く瞬間的で以後は急速に減衰するが、管体強度としては  $R_m$  が持続するとして即ち、静圧  $P_s$  として作用すると思えば十分な安全度がとれる。

薄肉管の外部圧力による変形の限界圧力式は一般に次式で示される。

$$P = E \frac{t}{r} \left[ \frac{\pi^4}{n^4(n^2-1)} \left( \frac{r}{l} \right)^4 + \frac{1}{12} \frac{m^2}{m^2-1} (n^2-1) \left( \frac{t}{r} \right)^2 \right]$$

$P$ : 限界圧力 [kg/mm<sup>2</sup>]

$E$ : ヤング率 [kg/mm<sup>2</sup>]

$t$ : 管の肉厚 [mm]

$r$ : 管の半径 [mm]

$n$ : 変形時の凹み数

$l$ : 管の長さ [mm]

$m$ : ポアソン比の逆数

しかし、肉厚 0.3mm 以下の極く薄肉管の場合には近似的に次式が採用出来る。

$$P = \frac{2t}{D} fc$$

$fc$ : 圧縮内力 [kg/cm<sup>2</sup>]

$t$ : 管の肉厚 [cm]

$D$ : 管の直径 [cm]

$P$ : 限界圧力 [kg/cm<sup>2</sup>]

雷管用の銅条および鉄条の引張強度は

銅条 22~26 kg/mm<sup>2</sup>

鉄条 28~38 kg/mm<sup>2</sup>

であるが、管体に加工することによって若干の強度上昇が認められ加工率および硬度変化から類推して管体に加工した場合の圧縮内力は

銅管体 25~30 kg/mm<sup>2</sup>

鉄管体 50~55 kg/mm<sup>2</sup>

と考えられる。従つて、 $P$ と $t$ の関係を銅および鉄管体についてプロットすると図7の直線関係が得られる。肉厚 0.16~0.17mm の銅管体について破壊限界圧力を求めると 130~170 kg/cm<sup>2</sup> の範囲となる。

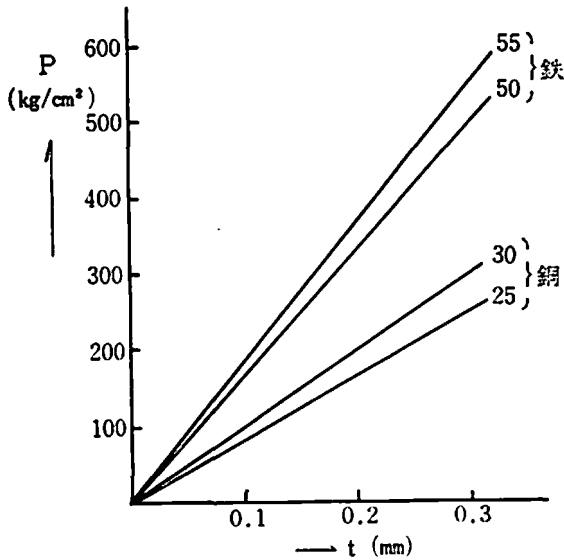


図7 管体内厚と破壊圧力

5. 管体の静水圧による破壊強度

管体の静水圧による破壊強度を実験により求めると表2のようになる。

表2 管体の破壊強度(破壊率)

種類	内厚(mm)	静圧(kg/cm²)						
		140	150	320	325	330	560	570
銅	0.16~0.17	0/6	2/6					
		0/6	5/6					
0.2t 鉄	0.19~0.21			0/6	1/6	3/6		
				0/6				
0.3t 鉄	0.30~0.32						0/6	1/6
							0/6	1/6

限界圧力について実測値と4項の計算値を比較すると

	計算値	実測値
銅	$\left\{ \begin{array}{l} t=0.16\text{mm}, f_c=25\text{kg/mm}^2 \\ t=0.17\text{mm}, f_c=30\text{kg/mm}^2 \end{array} \right\}$	140
0.2t 鉄	$\left\{ \begin{array}{l} t=0.19\text{mm}, f_c=50\text{kg/mm}^2 \\ t=0.21\text{mm}, f_c=55\text{kg/mm}^2 \end{array} \right\}$	320
0.3t 鉄	$\left\{ \begin{array}{l} t=0.30\text{mm}, f_c=50\text{kg/mm}^2 \\ t=0.32\text{mm}, f_c=55\text{kg/mm}^2 \end{array} \right\}$	560

となりほぼ一致した結果が得られる。

6. 爆源からの距離と管体変形の関係

爆源に新桐ダイナイト1kgを用いて爆源からの距離Rに対する管体の圧壊状況を測定すると表3のようになり同様に爆源5kgの場合には表4のようになる。

表3 爆源(1kg)からの距離と管体の圧壊 (○=圧壊せず ×=圧壊)

種類	R(m)						
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.5
銅				×	○		
				×	×	○	
				×	○	○	
				×	○	○	○
0.2t 鉄	×	×		○	○		
	×	×	○	○	○		
	×	×	○	○	○		
	×	×	○	○	○		
0.3t 鉄	×	○		○	○		
	×	○		○	○		
	×	○	○	○	○		
	×	○	○	○	○		

表4 爆源(5kg)からの距離と管体の圧壊 (○=圧壊せず ×=圧壊)

種類	R(m)						
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
銅		×		×	×	○	○
	×	×		×	×	○	○
	×	×	×	○	○	○	○
	×	×	×	×	○	○	○
0.2t 鉄	×	×	○	○			
	×	×	○	○			
	×	×	○	○			
	×	×	×	○			

これ等の結果から限界距離を求めると

	爆源 1kg	爆源 5kg
銅管体	1.5(m)	3.0(m)
0.2t 鉄管体	0.75	1.5
0.3t 鉄管体	0.5	—

となる。

7. 管体に及ぼす圧力  $P_e$  と管体の圧壊

管体におよぼす圧力  $P_e$  は  $\alpha Pm$  で表わされ、爆源1kgの場合は、3項で求めたごとく  $\alpha=0.44$  となり  $P_e$  と  $R$  の関係は図8の曲線となる。ここで5項で算出した管体の破壊限界圧力により限界距離を求めると銅管体で1.45~1.85m、0.2t 鉄管体で0.6~0.8m、0.3t 鉄管体0.4~0.5m となり表3に示した実験結果と一致する。

爆源5kgの場合については、5項で算出した破壊限界圧力と表4の結果から  $P_e-R$  の関係を求めると図9の様になり  $\alpha=0.60$  と推定される。

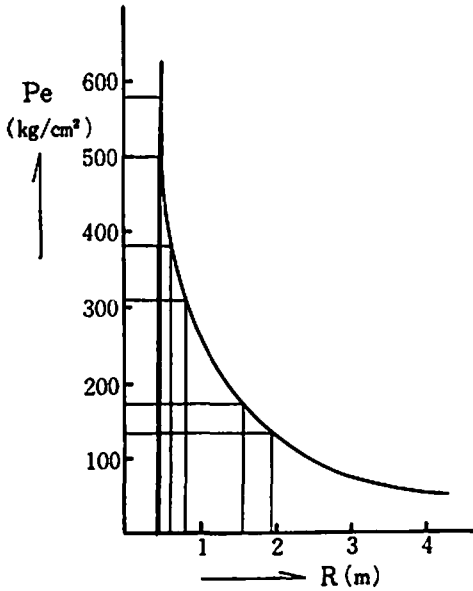


図 8 爆源 (1kg) からの距離と圧力  $P_e$  の関係

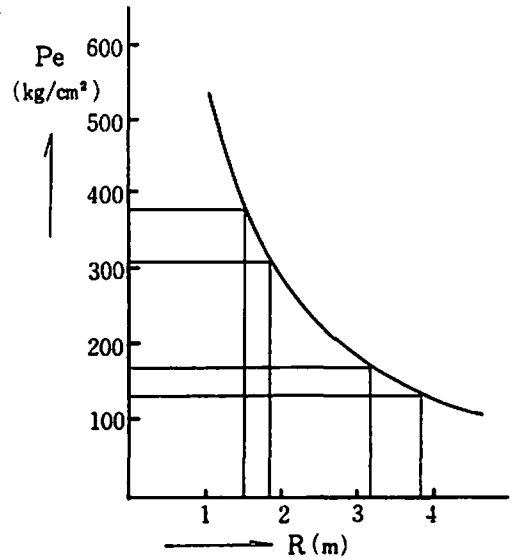


図 9 爆源 (5kg) からの距離と圧力  $P_e$  の関係

### 8. 考察

8. 1 岩剛破壊水中発破においては、管体の破壊圧力として水中衝撃圧力の  $P_m$  (Peak pressure) をとる場合、 $P_m$  は持続時間が非常に短かく以後は急速に減衰するから圧力の実効値として  $P_e$  をとるのが妥当であり次式で表わすことができる。

$$P_e = \alpha P_m \quad (\alpha > 1)$$

ここに  $\alpha$  は爆薬量  $W$  が数 kg 以内、爆源からの距離  $R$  が数 m 以内の範囲では  $W$  一定の場合  $R$  に関係なく一定の値を示し  $W=100\text{g}$  で 0.20,  $W=500\text{g}$  で 0.32,  $W=1\text{kg}$  で 0.44 となる

$W=1\text{kg}$  の場合に  $\alpha=0.44$  とした  $P_e-R$  曲線において管体の静水圧による破壊限界圧力と水中における圧破試験結果とは一致する。

$W=5\text{kg}$  の場合、管体の静水圧による破壊限界圧力と水中における圧破試験結果から  $P_e-R$  関係を求める

と  $\alpha=0.60$  と推定される。

8. 2 実験によつて求めた  $\alpha$  の値は、0.20 ( $W=100\text{g}$ ), 0.32 ( $W=500\text{g}$ ), 0.44 ( $W=1\text{kg}$ ) となり薬量  $W$  の増加に対応して大きくなつてゐるが、衝撃波の持続時間は  $W^{1/3}$  に比例して長くなるので同じ  $P_m$  に対しても圧力の実効値  $P_e$  は大きくなつてくる。

### 9. 総括

水中衝撃圧力の  $P_m$  は瞬間的で急速に減衰するから管体におよぼす圧力は実効値  $P_e$  として  $P_e = \alpha P_m$  ( $\alpha < 1$ ) をとる必要があり  $P_e-R$  曲線から管体強度 (材質、肉厚) と設置間隔の関係を求めることができる。

### 文 献

- 1) 山家信次, 水中爆発 I, II, 工火 13, 171, 273 (1952)
- 2) Rinehart and Pearson, "Explosive Working of Metals", Oxford, Pergamon Press, 1963

## Misfire of Electric Detonator in Underwater Blasting

T. Suzuki\*, M. Hamazaki\*, N. Izawa\*

A misfire of electric detonators at the event of underwater blasting may occur due to the destruction of electric detonators by pressure of shock waves caused by blasting. This report gave a relation between the deformation of electric detonators and the pressures of shock waves measured by a blast-meter.

The pressure of shock waves in underwater is expressed by the following equation.

$$P_{\max} = K(W^{1/3}/R)^{\beta}$$

wherein,  $W$ : weight of explosives,  $R$ : distance from a point of detonation. The deformation of copper plate caused by the shock pressure,  $F_{\max}$ , is smaller than that caused by the static pressure of the same value. Therefore, in order to obtain a relation between the deformation of metallic case of electric detonators and the shock pressure, it is necessary to use the effective value  $P_e$  corrected from  $P_{\max}$ ;

$$P_e = \alpha P_{\max} \quad (\alpha < 1)$$

The value of  $\alpha$  is determined for various quantity of charge when  $R$  is less than several meters. For example,  $\alpha$  is 0.20, for  $W=0.1\text{kg}$ , 0.32 for  $W=0.5\text{kg}$ , 0.44 for  $W=1\text{kg}$  and 0.60 for  $W=0.5\text{kg}$ .

The measurement of the critical pressure to destroy the metallic case of various materials provides a new suggestion concerning the design of delay electric detonator.

\* Asahi Chemical Industry Co. Detonator Plant. Nagahama-cho, Nobeoka-shi

研究論文

導火線の異常燃焼について

木村 真\*

1. 序

導火線の異常燃焼とは読んで字の如く導火線が正常に燃焼しないことであるが、ここで異常燃焼とは次のことを総称する。

- (ア) 秒時不整……1,000m 中の燃焼秒時の標準偏差が著しく大なるもの
- (イ) 速燃遅燃……正規の燃焼秒時に比して著しく早いもの又は遅いもの
- (ウ) 横吹き……燃焼中に燃焼ガスが被覆を破つて突出してはげしい音を立てて燃焼する
- (エ) 始発又は末端火炎及び火花の異常
- (オ) 始発ガス量又は始発ガス成分の異常
- (カ) 立消え……心火薬の薬切れ薬細その他の原因による

2. 芯火薬が原因となる異常燃焼とその対策

2.1 原料

(1) 硝石

(a) 粒度

硝石の粒度が細くなると粒子と粒子の接触が密になり従つて秒時は短くなる。一般に未粉碎硝石の粒度は40メッシュ、これを粉碎した硝石の粒度は325メッシュ品である。

表1 未粉碎硝石混合割合と導火線秒時 (sec/50cm)

未粉碎硝石混入割合	炭化度		
	36%	40%	50%
0%	45.1	51.2	54.6
17	51.8	55.1	58.0
50	60.8	62.7	61.0

しかし粒度の大きい硝石を混合すると篩分後に粉火薬の粒度が変わる恐れがある上に、燃焼時の圧力指数が大になる(表10)ので好ましくない。(尚現在は硝石の配合比内で硝石の外に粉火薬に対し10%以下の硝酸バリウムを混合することがある。これは未粉碎の硝石同

昭和42年6月30日受理

\* 日本化薬本社

様導火線の秒時を長くする（調節する）ために用いるものである。）

(b) 塩素分

硝石中の微量の塩素分は硝石ひいては黒色火薬の含有水分を増大し、導火線の立消えを起すので塩素分を0.03%以下と規定している。かつて日本化薬で導火線が製造中に立消えを生じた原因を調べたところ、硝石内の塩素分は表2の如くで立消えを生じた種目に著しく多いことが判明した。

(2) 硫黄

硫黄については異常燃焼に特に影響される因子は少

ない。

(3) 木炭

(a) 樹種

木炭は軽く柔かくかつ灰分の少ないものが必要とされている。軍用発射薬用としては樹種のみならず伐採の時期、伐採から炭化までの期間なども定められたが導火線用としてはそれ程厳密に定められることなく、わが国でははんのき、赤松などが用いられる。堅木を用いると燃焼が緩漫になりまた燃焼中反跳するので横吹きの原因となる。吉田銀次郎氏によれば各種の木炭を用いて製造した導火線の性能は表3の如くである。

表2 硝石中の塩素分の硝石水分及び導火線に及ぼす影響

種目	塩素分	製造月日	硝石分に対する水分		備 考
			製造時	9月8日現在	
No.1	0.018%	1月26日	0.70%	1.09%	9月8日現在で導火線立消を生せず
No.2	0.062	2月9日	0.72	1.39	" 導火線立消を生ず
No.3	0.053	3月10日	0.67	2.07	" "

表3 木材の種類と導火線秒時

木 炭 名	はん黒炭	はん褐炭	桐黒炭	桜黒炭	雑黒炭	
採取法及び炭化法	東北産 4~8寸 炭化度 36~40	同 左	樹令 約13年 枝径 約4寸	同 左	家庭用堅炭 くぬぎ炭、 火付不良樹 令15年以上	
粉末度(40目篩パス200目篩止)(%)	30	20	20	20	15	
灰 分 (%)	0.57	0.26	0.69	1.89	2.38	
真 比 重 (%)	0.71	0.86	0.56	0.87	0.98	
KNO <sub>3</sub> 70, S 15, C 15 の配合比の導火線秒時 (sec/m)	製造直後	140	193	167	150	180
	60日後	136	195	161	157	185
着 火 点 (mm) (最大距離)	65	50	50	50	40	
導火線末端火炎距離 (mm)	20	20	20以下	20	20	
導 火 線 薬 量 (g/m)	5.53	5.40	5.48	6.68	7.41	

表4 木炭の炭化度と粉火薬の仮比重並びに導火線秒時との関係

炭 化 度	36	40	50	64	備 考
仮 比 重	0.358	0.381	0.372	0.342	被覆は第1種導火線
導火線秒時	45.1	51.2	54.6	71.6	秒時は長さ50cmのもの

(b) 炭化度(収炭率)

導火線の秒時は木炭の炭化度により表4のように著しく異なり、炭化が進む程導火線秒時は短くなる。

木炭の炭化度が大きくなると未炭化の木材が木炭中に混入し篩分で篩の目を通つたものが一部製品中にはいり導火線被覆機のホッパー下部のノズル(薬白)につまんで薬切れの原因となる。また表9に見るように炭

化度大の木炭を配合した粉火薬は圧力指数も大きい。従つて木炭々化度は特殊品を除き35~40%にして導火線秒時は他の方法で調整している。

2.2 粉火薬と小粒火薬

わが国では伝統的に粉火薬を用いているが、外国では原則として小粒火薬を用いる、小粒火薬は導火線製造時に原料が分離しないこと、末端火炎の噴出力が