

レーザー起爆雷管の研究

黒川孝一*, 田崎 陽治*, 服部勝英*
 佐藤俊文**, 宮嶋俊和**, 鷹野幹雄**

パルス幅数msの通常のパルスレーザー装置と石英系光ファイバーを用いてレーザー雷管の起爆実験を行った。レーザー発振器は波長1.06 μ mのYAGレーザーである。爆薬はPETNを用い、レーザー吸収物質としてカーボンブラックを添加し、その添加割合と装填比重を調整した。また、雷管に金属パイプを装着して拘束力を増加させた。この結果、最小起爆エネルギーはカーボンブラックの添加割合1%, 装填密度1.15g/cm³で1.69Jであった。

雷管の威力評価として、鉛板試験、爆速試験、鈍性爆薬試験を行った。その結果、鉛板試験ではレーザー起爆雷管は6号電気雷管と同程度の貫通径であった。点火薬、起爆薬、添装薬の3層構造とし、点火薬部分にのみPETNにカーボンブラックを1%添加し、各層の装填密度をそれぞれ1.15, 1.15, 1.40g/cm³にしたレーザー起爆雷管において、最大7800m/sの爆速を得た。また、鈍性爆薬の起爆試験では、TNT:タルク=7:3の鈍性爆薬および含水爆薬を完爆させることができ、レーザー起爆雷管は6号電気雷管と同程度の起爆力を有していることを確認した。

1. 緒 言

レーザーによる爆薬の起爆に関する研究は、Qスイッチパルスレーザーを使用して数10nsの短時間に巨大パルスのレーザーを照射し、そのレーザーの爆発的なエネルギーの注入による衝撃波により爆薬を起爆した例等が報告されている¹⁾²⁾³⁾。

本報告は、Qスイッチを用いたパルス幅数10nsの巨大パルスのレーザーではなく、通常の発振方式による数msのパルスのレーザーを用いた場合の爆薬の起爆を検討したものである。この場合の起爆機構は、レーザーを照射された爆薬表面がレーザーの赤外線熱エネルギーを吸収し、そこから燃焼、爆燃、爆轟へと移行して起爆するものと考えられる。従って、レーザーの熱エネルギーを効率よく吸収させること、および爆燃から爆轟へとスムーズに移行させることがポイントとなる。本研究では、爆薬としてはレーザー起爆の実験において過去最も多く使用されているPETNを用いた。レーザーの熱エネルギー吸収物質としては、

カーボンブラック(以後CBと略記)を用い、鋭感剤としてアルミニウム(以後Alと略記)を添加することも試み、それらの添加割合と爆薬の装填密度を変化させた。また、雷管内に装填した爆薬の薬長および雷管管体の拘束条件についての検討も行った。レーザー起爆雷管の威力評価としては鉛板試験、爆速測定、鈍性爆薬の起爆試験を行い、6号電気雷管との比較を行ったのでそれらの結果について報告する。

2. 実験装置

2.1 レーザー発振装置

火薬類の燃焼、起爆実験には、炭酸ガスレーザー、ルビーレーザー、YAG(Yttrium Aluminium Garnet)レーザーが過去多く用いられている。

レーザーの発振形態には2種類あり、0.25秒以上発振が持続するレーザーを連続出力レーザー、0.25秒未満のものをパルスレーザーとして区別している。パルスレーザーの中にも、1パルスの長さが数msの通常パルスレーザーと数10nsのQスイッチパルスレーザーがある。

本報告では、通常のパルスを発振するYAGパルスレーザーを使用し、パルス幅が数msのレーザー光を光ファイバーを通してレーザー起爆雷管に伝送する方法について検討した。

YAGパルスレーザー装置は、一般にレーザー加

平成3年3月27日受理

*日本油脂(株)武豊工場

〒470-23 愛知県知多郡武豊町西門82番地
 TEL 0569-72-0916

**鹿島建設(株)技術研究所

〒182 東京都調布市飛田給2丁目19番地1
 TEL 0424-85-1111

Table 1 Specification of the laser oscillating apparatus

Item	Specification	
Laser oscillating device	Nd ³ YAG lod (φ10x75mm)	
Active lamp	Xe flash lamp (2 pieces)	
Oscillating wave length	1.06 μm	
Beam diameter	φ10mm (at exist of the laser) output mirror	
Laser output	Pulse width (ms)	Output energy (J/pulse)
	0.2	0.10 ~ 0.97
	0.4	0.14 ~ 2.50
	0.6	0.30 ~ 3.90
	0.8	0.53 ~ 5.53
	1.0	0.80 ~ 6.70
	3.0	2.65 ~ 16.7
	5.0	4.45 ~ 25.9
	7.0	6.10 ~ 33.5
9.0	7.80 ~ 40.5	

Table 2 Specification of optical fiber

Item	Specification
Core material	Quartz
Refracting distribution	Step index type
Refractive index of core	1.452
Core diameter	800μm
Fiber diameter	1.0mm
Sheath diameter	2.0mm

工機として市販されている東芝製LAY603A型を使用した。このレーザー装置はTable 1に示したようにパルス幅が決まっており、出力エネルギーは各パルス幅毎に変化し、最大出力は40.5Jである。

2.2 光ファイバー

光ファイバーは、Table 2に示したようにコア材料が石英で、コア径は0.8mmのものを使用した。

3. 最小起爆エネルギーの測定

3.1 試料

実験に使用したレーザー起爆雷管は、PETNに添加するCBおよびA ℓ の割合を0~10%の範囲でそれぞれ変化させた。それらの爆薬を内径6.2mm、厚さ0.3mm、長さ45mmの鋼管体に22mmに定寸圧填し、装填密度(g/cm³、以後単位省略)を1.15、1.40の2種類とした。

使用したPETNの粒径は150~200μm、CB粉末は平均粒径30μm、A ℓ 粉末は平均粒径20μmである。

3.2 実験方法

実験装置は、Fig. 1に示すようにアルミニウム製

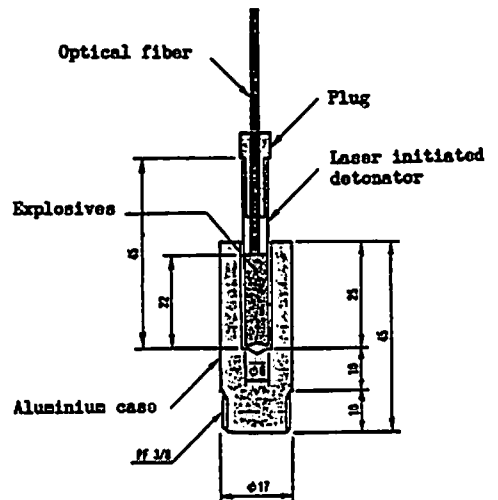


Fig. 1 Sample of the laser initiated detonator for minimum initiation energy measurement.

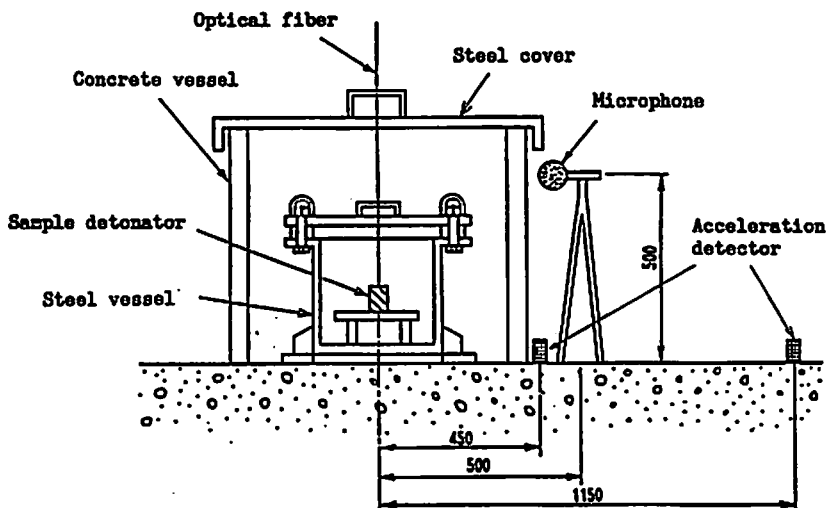


Fig. 2 Scheme of the minimum initiation energy measurement.

の取付治具に試料を取付け、その破壊状況を観察すると共に、取付治具をFig. 2に示す鉄製容器内に設置してその外側に騒音計、加速度計を配置し、レーザー光の照射の際に発生する音圧と加速度を測定して完爆、半爆、不爆の判定を行った。

3.3 実験結果および考察

Table 3にそれぞれの試料を完爆させるために必要な最小起爆エネルギーの測定結果を示す。また、Fig.3 およびFig.4に完爆した際の取付治具の破壊状況と加速度、音圧の計測波形例を示す。

Table 3によると、主爆薬であるPETNは白色であり、それ単体ではレーザー光をほとんど反射する。そのため、本装置で発生可能な最大エネルギーの40.5 Jで起爆させることができなかった。しかし、CBおよびA₁の添加物を加えることにより起爆可能となった。

装填密度と起爆エネルギーとの関係を見ると、装填密度1.15と1.40ではA₁のみを添加した試料を除いて装填密度の低い方が最小起爆エネルギーが小さく、装填密度が高くなると起爆に要するエネルギーが数倍～10数倍高くなる傾向を示している。ただし、A₁のみを添加した試料は装填密度の低い方が最小起爆エネルギーが数倍高くなっている。

最小起爆エネルギーは1.69 Jであった。これは、CBの添加割合が1.0～2.0%であり、しかもA₁の添加割合が2.0%以下の試料である。A₁の添加は、起爆した際の威力を多少向上させるようであるが、最小起爆エネルギーに関しては、CB程の効果は認められなかった。

これらの結果からレーザー起爆雷管の最小起爆エネルギーを小さくするためにはCBを1～2%添加し、



Fig. 3 Typical breakage example of aluminium case in the case of detonation.

装填密度を1.15程度に設定すれば有効であると考えられる。

4. 威力評価

4.1 鉛板試験による爆力評価

レーザー起爆雷管を用いて含水爆薬やダイナマイト等を起爆する場合、6号雷管と同程度の威力が必要となる。ここでは雷管の爆力を簡単に評価する方法として広く用いられている鉛板試験によるレーザー起爆雷管の爆力を評価した。

4.1.1 試料

実験に用いた試料はFig. 5に示す3種類である。試料はいずれもレーザー光が照射される部分は、3項の最小起爆エネルギーの測定結果よりPETNにCBを1%添加し、装填密度を1.15としたものとした。試料Aは、前述の爆薬を薬長33mmに定寸圧填したものとした。試料Bは、管底から23mmの区間を添加物なしのPETNで装填密度を1.15とした以外は試料Aと同様のものとした。試料Cは、管底から10mmの区間を添加

Table 3 Results of minimum initiation energy measurement

Content of laser absorption material (wt%)		Minimum initiation energy (J)	
CB	Al	Loading density =1.15(g/cm ³)	Loading density =1.40(g/cm ³)
0	0	40.5*	40.5*
0.5	0	2.50	—
1.0	0	1.69	—
2.0	0	1.69	6.70
5.0	0	6.70	13.1
10.0	0	6.70	16.7
0	2.0	6.70	3.30
0	5.0	13.1	3.30
0	10.0	16.7	5.00
0.5	2.0	2.50	20.5
1.0	2.0	1.69	25.9
2.0	2.0	3.90	40.5*
0.5	5.0	2.50	25.9
1.0	5.0	3.90	25.9
2.0	5.0	2.50	40.5*

* This samples are not initiated in the case of maximum output laser energy 40.5J.

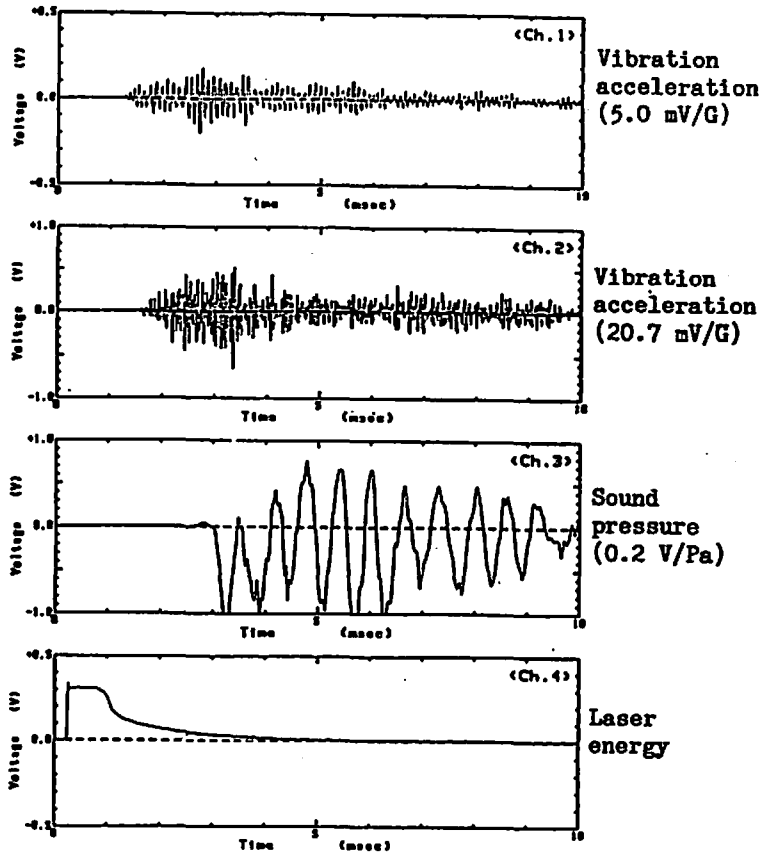


Fig. 4 Typical waveforms of vibration acceleration, sound pressure and laser energy in the case of detonation.

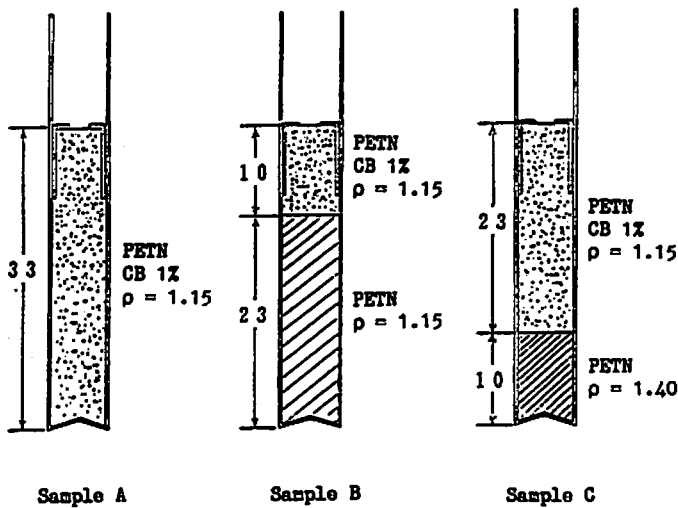


Fig. 5 Samples of the laser initiated detonator

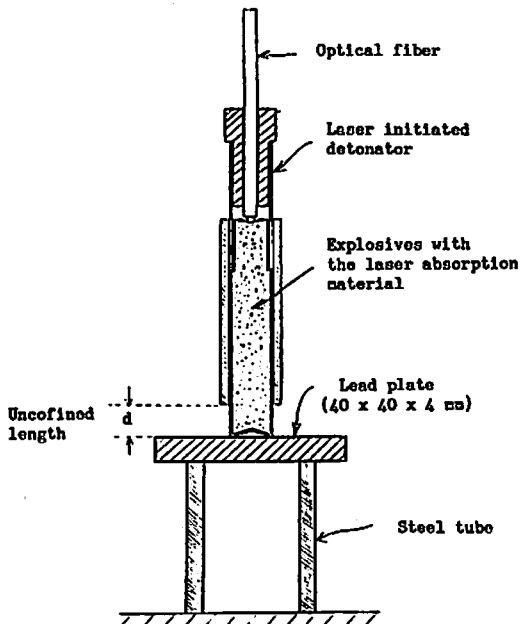


Fig. 6 Lead plate penetration test

物なしのPETNで装填密度を1.40とした以外は試料Aと同様のものとした。管体は、内径6.2mm、厚さ0.3mm、長さ45mmの銅管体を用いた。また、内管を用いて拘束力の向上を図った。

4.1.2 実験方法

実験は3種類の試料についてFig. 6に示すように、内径7mm、厚さ1mmの鉄製のパイプを雷管に装着して雷管の末拘束長dを変化させた。鉛板試験はJISK 4807(電気雷管)に規定されている方法である。また、照射したレーザーエネルギーは一定出力(2.5J)にした。

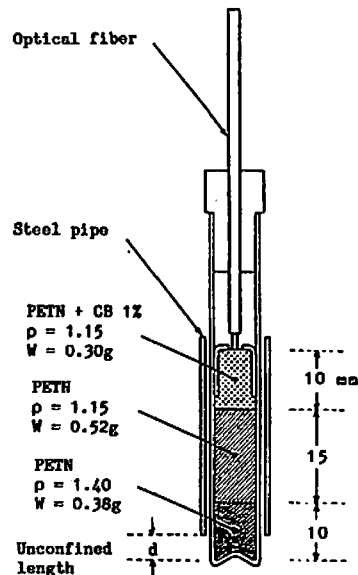


Fig. 7 Scheme of the laser initiated detonator

4.1.3 実験結果

試料Aを用いた鉛板試験の結果をTable 4に示す。Table 4から明らかのように試料Aにおいて、雷管の末拘束長を変化させ、2.5Jのレーザー光を照射した場合、末拘束長7.5mm以上では半爆であったが、5mm以下では完爆した。6号電気雷管では拘束が全くない場合でも試料Aの末拘束長5mmと鉛板貫通径はほぼ同様の結果であった。このことから本試料のレーザー起爆雷管では拘束条件により爆力が大きく影響される。また、試料B、Cにおいても同様の結果を得た。完爆した場合の鉛板貫通径および条痕も試料の種類による

Table 4 Results of the lead plate penetration test

Unconfined length d(mm)	All	10	7.5	5	0
Laser Initiated detonator					
Electric detonator					

顕著な差は見られなかった。

4.2 爆速測定

レーザー起爆雷管の威力の評価方法として、本実験では雷管の拘束長と爆速の関係から、必要拘束長を得るために爆速の測定を行った。

4.2.1 試料

実験に用いた試料をFig. 7に示したように点火薬、起爆薬、添装薬の3層構造とし、点火薬部分にのみPETNにレーザー光吸収物質としてCBを1%添加した。起爆薬および添装薬部分は添加物なしのPETNである。

各層の装填密度は、それぞれ1.15, 1.15, 1.40に調整した。管体は、内径6.2mm、厚さ0.3mm、長さ55mmの銅管体であり、側面は厚さ2mmの鉄製のパイプで補強し、このパイプを移動して末拘束長dを変化させた。

4.2.2 実験方法

爆速測定は、爆薬が爆轟状態でイオン化する現象を利用したイオンギャップ法と、爆轟時の発光現象を利用した光ファイバー法により行った。

測定方法の概要をFig. 8に示す。

爆速測定は、Fig. 8に示した試料雷管の管底から18mm(A)、13mm(B)、8mm(C)、3mm(D)の5mm間隔の

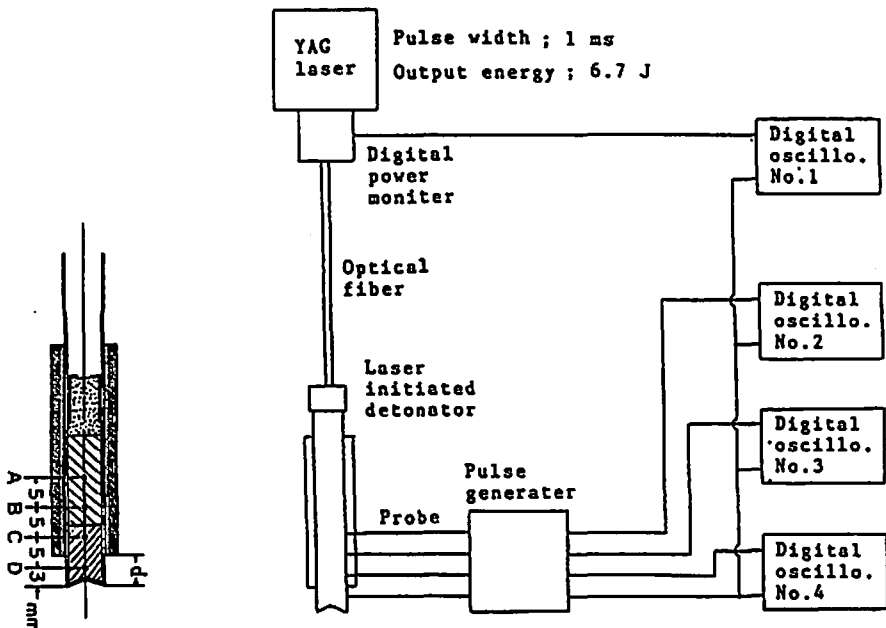


Fig. 8 Method of the detonation velocity measurement

Table 5 Results of the detonation velocity measurement

Unconfined length d (mm)	Detonation velocity (m/s)		
	A-B	B-C	C-D
1	—	—	8070
	—	7690	7690
	—	7190	8260
	—	7040	7250
	—	—	—
	—	$\bar{x}=7300$	$\bar{x}=7820$
5	3330	7460	8070
	3570	7410	7350
	—	—	7940
	2130	—	7940
	—	7140	—
	$\bar{x}=3010$	$\bar{x}=7340$	$\bar{x}=7820$
10	—	—	—
	—	7190	8260
	—	7410	8000
	—	7040	7250
	—	6850	7460
	—	$\bar{x}=7210$	$\bar{x}=7740$

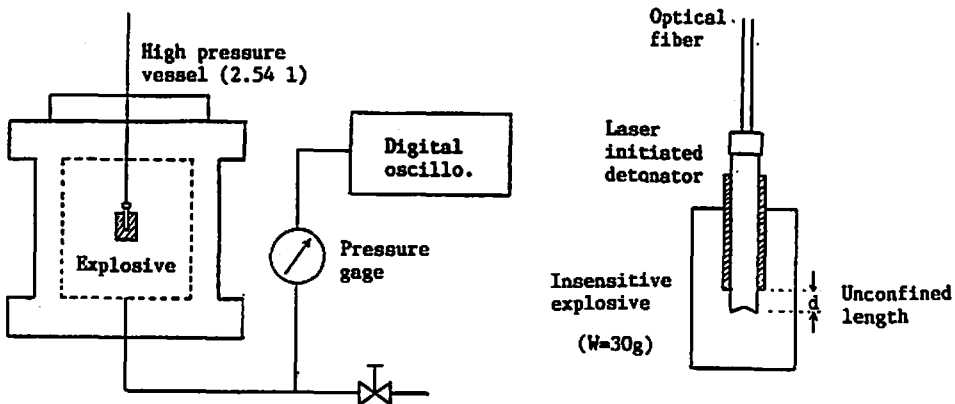


Fig. 9 Scheme of the insensitive explosive initiation test

測定点に穴を開け、イオンギャップ探針もしくは光ファイバーを差し込み、各測定点間の時間間隔をデジタルストレージオシロスコープで測定し爆速を算出した。また、照射したレーザー出力は、パルス幅1ms、エネルギー6.7Jである。

4.2.3 実験結果および考察

Table 5に爆速測定結果を示す。Table 5によると末拘束長5mmの場合、各測定点間の平均的な爆速はAB間は3000m/s、BC間は7300m/s、CD間は7800m/sであり、レーザーエネルギーの照射から管体が破

裂するまでの発火遅れ時間は450~550 μ sであった。また、CD間の爆速は、拘束条件によらず一定であり、添装薬部分では爆速が十分に立ち上がっていることが確認できた。

4.3 鈍性爆薬試験による起爆力評価

本実験では実際の爆薬を起爆させることが可能かどうかを評価するために、鈍性爆薬の起爆試験を行った。

4.3.1 試料および実験方法

実験に用いた試料雷管は4.2項の爆速測定に用いたものと同様である。

Table 6 Results of the insensitive explosive initiation test

Insensitive explosive	Detonator	Unconfined length d(mm)	Pressure of vessel (kgf/cm ²)			Results *
TNT:Talc = 8:2	Laser	5	52	76		○
TNT:Talc = 7:3	Electric	—	46	51		○
	Laser	1	22	42	40	△
		5 10	41 23	61 53		○ △
TNT:Talc = 6:4	Electric	—	32			△
	Laser	5	12			×
Dynamite (NG 30%)	Electric	—	132	139	139	○
	Laser	1	141	131	124	○
		5 10	139 139	140 136	133	○ ○
Emulsion explosive	Electric	—	136	120		○
	Laser	5	92	104	106	○
		10	116	109		○

* ○ — Detonation, △ — Detonation failure, × — Not ignited

鈍性爆薬としては、TNT:タルクを8:2、7:3、6:4の割合で混合したもの30gを使用した。

この鈍性爆薬を起爆したかどうかの判定のため、Fig. 9に示す鉄製の压力容器内で起爆試験を行い、その圧力変化を測定し、完爆、半爆、不爆の判定を行った。また、一般の産業爆薬であるダイナマイト(ニトログリセリン30%含有)およびエマルジョン系含水爆薬(日本油脂社製チタマイト)の起爆試験も行った。

4.3.2 実験結果および考察

鈍性爆薬の起爆試験結果をTable 6に示す。Table 6に示すように、レーザー起爆雷管は6号電気雷管と同様に、末拘束長5mmでTNT:タルク=7:3の鈍性爆薬を完爆させることができた。また、一般の産業爆薬であるダイナマイトおよびエマルジョン系含水爆薬も6号電気雷管と同様十分に起爆することができた。

4. 結論

レーザー起爆雷管は、爆薬としてPETNを用いた場合、レーザー吸収物質、および、その添加割合、装

填比重、薬長、拘束条件等を適度を選ぶことにより、パルス幅数msのYAGレーザーで起爆できることがわかった。

レーザー起爆雷管は、電気的発火機構を用いないため、漏洩電流や静電気等電気的障害による誤爆の危険性がなく、しかも、衝撃感度の高い起爆薬を用いないため、耐衝撃性が従来の電気雷管等に比較して向上しており、安全性が高い。

今後、段発型レーザー起爆雷管、および多数本の斉発に用いる分岐方法の研究を行いたい。

文 献

- 1) 水島容二郎, 西山 敬 工業火薬 35, 169 (1974)
- 2) 蓮江和夫, 門馬達也, 中原正二, 守本 純, 田平 憲一郎, 宮川 洩 工業火薬 44, 281 (1983)
- 3) Peter C. Shan, "Detonation of Explosive Charges and Equipment Therefor", USP 4 391 195 (1983)

Experimental Study of Laser Initiated Detonator

by Koichi KUROKAWA*, Yoji TASAKI*, Katsuhide HATTORI*
Toshifumi SATO**, Toshikazu MIYAJIMA**, Mikio TAKANO**

The laser oscillator used in the experiment was a YAG laser with a wavelength of $1.06\mu\text{m}$, the explosives used was PETN with carbon black added as an laser absorption material. The experiment was carried out to investigate the effects of the proportion of carbon black in the explosives and the loading density of the explosive in detonator. Metal tube was attached to increase the confinement of the detonator.

It was found that the minimum initiation energy was 1.69 J, when the carbon black content was 1 wt% and the loading density was 1.15 g/cm^3 .

To evaluate the power of the detonator, a lead plate penetration test, a detonation velocity test and an insensitive explosion test were conducted. The laser initiated detonator penetrated to a lead plate the same extent as No.6 electric detonator. The detonation velocity was measured with the ion gap method and the optical fiber method, and the highest detonation velocity was obtained 7800m/s. As the result of the initiation test of the insensitive explosives composed of TNT and talc, the initiated detonator showed to have an initiating power equivalent to No.6 electric detonator.

(*Taketoyo Plant, Nippon Oil & Fats Co., Ltd. 82 Nishimon, Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi-ken 470-23

**Kajima Institute of Construction Technology, Kajima Corporation 2-19-1 Tobitakyu, Chofu-shi, Tokyo 182)