

レーザーによる火薬類の起爆

遊江和夫*, 門馬達也*, 中原正二*
守本 純*, 田平憲一郎*, 宮川 淡*

レーザー巨大パルスは、 10^{-8} 秒という短時間に定量的にエネルギーを火薬類に注入することが可能で、しかもレンズによって微小スポット径に集光できるので、新しい点火源として注目されている。本実験では危険な起爆薬を使用せず、火薬または二次爆薬を市販の雷管管体に充てんして、Q-スイッチルビーレーザー巨大パルスの集光ビームを照射し、臨界点火エネルギーを測定した。試料火薬類は市販品の外に、それらにレーザー光吸収物質を添加したものを使用した。レーザー光吸収物質としては、炭素粉末および $0.6\sim 0.8\mu\text{m}$ に最大吸収を有する染料を用いた。これらの物質の添加により、PETN, RDX, HMXは $0.1\sim 0.2\text{J}$ で爆轟するようになり、従来より遙かに臨界点火エネルギーが小さくなった。レーザー光吸収物質を混合した爆薬を、当該爆薬層上に少量、伝爆薬として圧てんしたものは、同様に臨界点火エネルギーが低下し、しかも雷管威力は当該爆薬と同等であった。レーザー発火感度は落つい感度と関係あるようだ。

1. 緒言

近年、推進薬や爆薬に対する新しい点火源として、レーザーが注目されるようになった。特に、レーザー巨大パルスは、 10^{-8} 秒のオーダーという短時間に定量的にエネルギーを火薬類に注入することが可能であり、しかも、レーザーはレンズによって微小スポット径に集光できるので、他の熱源と比較してエネルギー密度が著しく大きく、特徴あるエネルギー注入法といえる。

レーザーによる起爆薬の起爆については、水島ら¹⁾、Y. F. Karavanov²⁾、E. K. Aleksandrovら³⁾、およびL. C. Yang⁴⁾の報告がある。二次爆薬のレーザー起爆についても、M. J. Barbarisiら⁵⁾、R. J. Harrash⁶⁾、L. C. Yangら⁷⁾⁸⁾が発表している。

本研究は、危険な起爆薬を使用せずに、火薬または二次爆薬を簡単な構造の装置に充てんし、直接しかも低エネルギーでレーザー照射することにより起爆することを目的としたものである。すなわち、これらの火薬類を文献に見られるような堅固な装置ではなく、市販の雷管管体内に圧挿密閉した。これにQ-スイッチルビーレーザー巨大パルスの集光ビームを照射して、その反応を観測するとともに、従来臨界点火エネルギーがせいぜい1J前後であったのに対して、より低いエネルギーで起爆させようと意図したものである。そのために、

火薬類市販品の他に、レーザー光吸収物質（以下添加物という）を添加したものについて試験した。また添加物を添加した試料を伝爆薬のように当該市販火薬層上に少量圧てんした場合についても試験した。

2. 実験方法

2.1 試料

火薬類はすべて市販品を使用し、JIS K 4810（火薬類性能試験方法）を参考にして真空乾燥処理を行ない、粉状でふるい分け可能なものは粒度をある程度揃えた。その他のものは、商品状態のまま使用した。

また、添加物を火薬類に添加した。添加物として、炭素粉末（グラファイト、活性炭および木炭）と、いずれも $0.6\sim 0.8\mu\text{m}$ に最大吸収を有する染料（日本化薬製）を使用した。これらの試料はTable 1に示した。

火薬類あるいはそれに添加物を添加したものの0.2g、または、火薬類と添加物の混合物0.01gを当該火薬類0.19gの上に圧てんしたものを、Fig. 1のように、銅管体内に $270\text{kgf}/\text{cm}^2$ （約 $80\text{kgf}/\text{個}$ ）で圧挿し、光学ガラス（ $6\text{mm}\phi\times 5\text{mm}$ ）と内管で接着剤を使用して密閉した。

試料管体は孔を開けたアクリル板に挿入して、厚さ3mmの軟鋼製防護カバー中に装着した。防護カバーにはレーザー光の入口と強制排気用パイプを取付けるとともに、爆風圧がこもらず、しかも管体の破片などが外部に出ない構造にした。

2.2 レーザ装置および照射方法

レーザー装置には、日本電気製SLG-2008中型ルビー

昭和58年9月2日受理

*防衛大学校

〒239 横浜賀市走水 1-10-20

TEL 0468-41-3810

Table 1 Test conditions of sample explosives and laser absorptive substances.

Sample		Appearance	Drying	Powder diameter (mesh)
Explosive	Tetryl	Powdery	Vac., 45 C, 24hrs,	48-100
	PETN	"	"	"
	RDX	"	"	"
	HMX	"	"	"
	TNT	"	"	"
	Ammonium perchlorate	"	"	32-
	Black powder	"	Vac., room temp., 24hrs,	100-
	ANFO	Granulous	"	
	Comp. B	Powdery	"	
	Comp. A-3	Granulous	"	
	Hexal	Powdery	"	100-
Laser absorptive substance	Active carbon	"		"
	Graphite	"		"
	Charcoal	"		"
	Dyestuff IR-PB	"		
	IR-SG	"		
	IR-750	Granulous		
	IR-SK	Powdery		

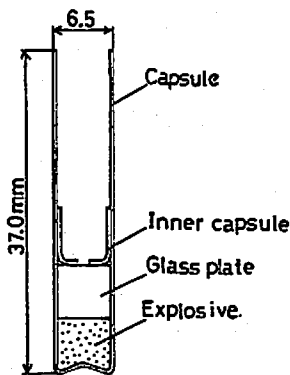


Fig. 1 Construction detail of the laser initiated sample

レーザを使用した。その性能は次の通りである。発振波長：0.6943 μ m, パルス幅：25~40ns, 最大尖頭出力：80MW, 最大エネルギー出力：約1J, Xe放電管：Fx-45 LD 630, 反射鏡：だ円筒アルミニウム製, ルビーロッド：10mm ϕ ×100mm, Q-スイッチ：クリプトシアニン方式, ポンピング電源：最大3kV 400 μ F。

照射系および測定系の経路を確保し、また光軸を調整するために、ルビーレーザクリプトシアニンQスイッチ部の後方から、He-Ne CWレーザ（発振波長：0.6328 μ m, 出力：3mW以上）の赤色レーザ光を照射

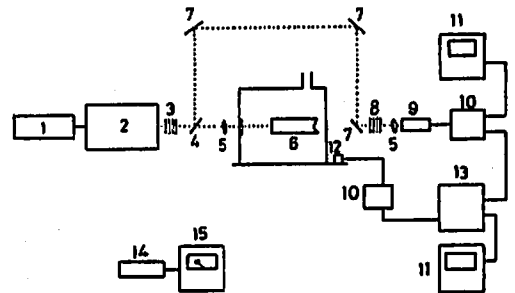


Fig. 2 Schematics of experimental configuration.

1: He-Ne laser, 2: Ruby laser, 3: Attenuator
4: Beam-splitter, 5: Lens, 6: Sample, 7: Mirror, 8: Filter, 9: Photodetector, 10: Power supply, 11: Oscillograph, 12: Transducer, 13: Digital memory, 14: Pulse calorimeter, 15: Indicator.

した。

レーザ光は Fig. 2 のように、減光用スライド板を通った後に、ビームスプリッタによって照射用とモニター用に分割され、その後、照射用ビームは凸レンズ ($f=300$ mm) によって集光して、焦点位置に取付けた試料表面に照射した。モニター用ビームは光検出器によってエネルギー量とレーザパルス幅の測定に使用した。

2.3 エネルギー測定方法

照射エネルギーは、通常の試料取付け位置に日本高周波製 LDS-20B パルスカロリメータを設置して測定し、指示計の日本高周波製 MPA-400 との組合せによって、電灯、風、人体などに影響されることなく、エネルギーを $\pm 0.01 \sim 0.03 \text{ J}$ の精度で直読できるようにした。

試料照射中のエネルギー測定には、光検出器を使用した。すなわち、モニターエネルギーを Opto-Electronics Ltd の PD 10 Ultra high speed general purpose photodetector によって検出し、オシログラフによって得られた波形を時間積分して、エネルギーを算出した。光検出器によって得られたレーザーパルス波形の一例を Fig. 3 に示す。

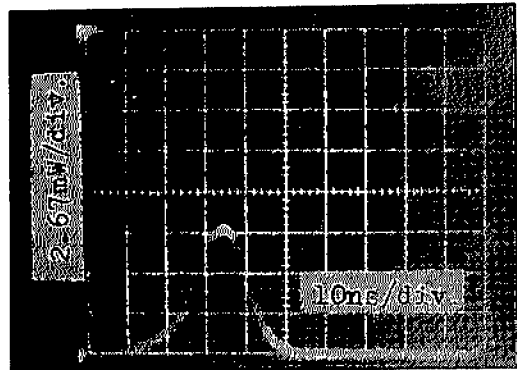


Fig. 3 An oscillogram of the Q-switched ruby laser pulse by the photodetector.

入射レーザー光量を減光用スライド板の数をかえることによって変化させて、光検出器出力積分値とパルスカロリメータ値との関係を出し、これを図表（エネルギー検量線）にして予め作成しておけば、試料照射中のエネルギー測定が可能である。

2.4 爆の判定

爆の判定には、(1)爆発音による、(2)試料取付部を雷管用鉛板試験法と大体同様の構造とし、鉛板 ($40 \times 40 \times 4 \text{ mm}$) の損傷度をしらべる、(3)爆発によって発生する振動を、防護カバーの床に取付けた水晶圧電型加速度計 (PCB 製 303 A 02 型) で検出し、オシログラフで爆発振動波形を観測する、の 3 方法によって行なった。なお、加速度計は $0.1 \sim 20000 \text{ Hz}$ の範囲の $10^{-3} \sim 10^4 \text{ G}$ までの加速度の測定が可能である。

爆、半爆、燃焼および不爆の区分は、次のようにした。

爆：爆発音とともに、残薬がほとんど生じない程度に爆発し、鉛板にせん孔が生じる。

半爆：残薬がかなり多量にあり、鉛板に凹みはできるが、せん孔は生じない。

燃焼：黒色火薬において、明らかに燃焼反応の進行が示された場合である。鉛板に凹みは生じない。

不爆：爆薬表面に変色などの化学変化は生じるが、爆発反応は起らない。

3. 実験結果

3.1 照射エネルギーの検定

照射エネルギーの検定は週一回行なうとともに、測定システムに変化が生じた場合（オシログラフやカロリメータの測定レンジの変化、フィルタの枚数や種類の変化など）にも行なった。

エネルギー検量線は最小自乗法によって作成したが、回帰直線の信頼性は比較的良好だった。検量線の一例を Fig. 4 に示す。

3.2 火薬類のレーザー感度

火薬類およびそれに添加物を添加した場合の、照射

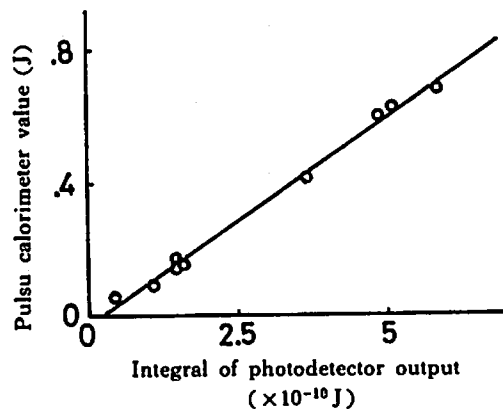


Fig. 4 Pulse calorimeter value versus integral of protodetector output

エネルギーと爆あるいは不爆の関係は PETN を例にとれば、Table 2 の通りである。実験結果をまとめると、Table 3 のようになる。

添加物を添加しない場合、黒色火薬、ヘキサール、テトリルはレーザー光に対して、かなり鋭感である。しかし、ヘキサールとテトリルは半爆であった。PETN と RDX はそれよりも鈍感であるが、完爆した。その他の火薬類は不爆であった。

添加物の最適添加量については、まだ実験してないが、活性炭の場合、テトリルと HMX では、5%の方が15%より効果的のようだ。

充てん試料をすべて添加物混合爆薬にしても、混合物を伝爆薬として当該爆薬層上に少量圧てんしても、臨界点火エネルギーには差が認められなかった。

PETN は 0.8 J 程度まで爆発しないが、いずれの添加物でも $0.11 \sim 0.13 \text{ J}$ 程度で爆を示すようになった。

RDX は 1 J 程度で爆発するが、添加物の添加により鋭感化し、いずれも $0.10 \sim 0.15 \text{ J}$ 以上で爆発した。

HMX は 1 J まで不爆であるが、5%活性炭では 0.3 J 、

Table 2 Experimental results for laser initiation of PETN

Laser absorptive substance	—		*5% AC		*5% AC		*5% C		*5% G		5% SG		5% PB		5% 75		5% SK	
	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.	Pulse ener- gy(J) R.	C. Of R.
PETN	0.678	N	0.117	N	0.087	N	0.112	D	0.088	N	0.127	N	0.103	N	0.101	N	0.086	N
	0.770	N	0.118	D	0.106	D	0.117	N	0.075	N	0.134	D	0.103	N	0.110	D	0.094	N
	0.791	N	0.126	H	0.134	D	0.118	D	0.083	N	0.144	D	0.110	D	0.120	N	0.101	N
	0.838	D	0.132	D	0.152	D	0.122	D	0.086	N	0.164	D	0.113	D	0.121	D	0.111	D
	0.852	D	0.134	N	0.216	D	0.126	D	0.096	N	0.169	D	0.147	D	0.126	D	0.113	D
			0.145	D			0.127	N	0.108	I								
			0.147	N			0.137	D	0.109	I								
			0.149	D			0.137	H	0.135	I								
			0.158	D			0.144	I	0.139	I								
			0.259	D			0.148	D	0.153	I								
			0.268	D			0.154	N										
			0.328	D			0.156	N										
			0.392	D			0.161	D										
							0.169	N										
							0.177	D										
							0.255	D										

C. of R.: Classification of reaction
 AC: active carbon, C: charcoal, G: graphite, SG: IR-SG
 PB: IR-PB, 75: IR-75, SK: IR-SK
 D: detonation, I: incomplete detonation, N: non-detonation
 without*: laser absorptive substance and explosive mixture was placed on the explosive as a booster
 with*: laser absorptive substance was mixed with explosives

15%活性炭では0.4J, グラファイトでは0.18J以上で爆を示した。

テトリルは0.4Jで爆を示すが, 活性炭で0.33J, グラファイトで0.26Jから爆を示し, 添加物によりわずかに鋭感化された。

ヘキサルは0.4J程度で爆を示したが, グラファイト5%の添加によっても鋭感化は見られなかった。

Comp. Bは1.2Jで不爆であるが, 5%のグラファイト添加により, 0.4J程度で半爆となった。

3.3 爆発威力

試料が爆の場合の鉛板せん孔径と, 半爆の場合の凹

み径を測定し, Table 3の5列に示した。PETN, RD X, HMXが爆を示したが, PETNの孔径が最も大きかった。

加速度計による振動測定で, 最大加速度を書きこみ速度10μs/wordと50μs/wordについて求めた。結果はTable 3の6, 7列に記した。

爆と半爆とでは, 最大加速度に明瞭な差が認められた。しかし, 爆の場合の鉛板孔径と最大加速度の関係はFig. 5のようになり, 両者の間に相関性は認められなかった。

鉛板の損傷状況と振動波形の一例として, PETNの

Table Experimental results for laser initiation of explosives

Explosive	Laser absorptive substance (wt.%)	Pulse energy (J)	Classification of reaction	Deformation diameter of lead plate (mm)	Maximum acceleration (G)	
					10 μ s/word	50 μ s/word
Black powder	---	0.40-1.00	C ₀			
Hexal	---	0.38-0.97	I	7.1		
	G(5)	0.41	I			
Tetryl	---	0.39-1.00	I	7.2		
	G(5)	0.30-0.40	I			
	AC(5)	0.33-0.81	I	6.3	71.2	66.3
	*AC(15)	0.44-0.61	I	5.3	110	101
PETN	---	0.84-0.85	D	13.4	642	647
	* G(5)	0.11-0.15	D	8.0	564	561
	*AC(5)	0.12-0.40	D	11.1	896	794
	AC(5)	0.11-0.22	D	13.3	661	616
	* C(5)	0.11-0.26	D	11.0	944	758
	SG(5)	0.13-0.16	D	12.3	577	515
	PG(5)	0.11-0.15	D	12.9	640	588
	75(5)	0.11-0.13	D	13.2	516	459
	SK(5)	0.11	D	12.1	558	530
RDX	---	0.99-1.20	D	9.7	731	641
	* G(5)	0.13-0.16	D	7.4	492	455
	*AC(5)	0.14-0.17	D	8.4	551	475
	* C(5)	0.15-0.17	D	8.0	496	415
	SG(5)	0.14-0.16	D	10.0	755	648
	PB(5)	0.14-0.16	D	10.6	496	436
	75(5)	0.14-0.15	D	9.8	581	338
	75(5)	0.08-0.12	I			
	SK(5)	0.13-0.17	D	9.6	518	538
HMX	---	0.37-0.99	N			
	G(5)	0.18-0.20	D	10.6		
	*AC(5)	0.30-0.41	D	9.7	624	597
	AC(5)	0.37-0.77	D	11.5		
	*AC(15)	0.41-0.78	I	5.7	281	272
Comp. B	---	0.43-1.19	N			
	G(5)	0.39-0.79	I			
Comp. A-3	---	0.44-0.96	N			
	G(5)	0.39-0.97	N			
TNT	---	0.40-0.87	N			
	G(5)	0.26-0.97	N			
	*AC(5)	0.40-0.99	N			
ANFO	---	0.38-1.03	N			
	G(5)	0.38-0.95	N			
Ammonium perchlorate	---	0.41-1.00	N			
	G(5)	0.41-0.93	N			

Co: combustion, Other symbols are same as Table 2

場合を Fig.6 に示す。

4. 考 察

レーザ光を試料に照射すると、反射、透過および吸収が起る。吸収を多くして、臨界点火エネルギーを減少させるには、炭素粉末およびレーザ光の波長と大体同じ吸収波長をもつ染料の添加が概して有利であることがわかった。PETN, RDX, HMX, および Comp. B において、これら添加物の臨界点火エネルギー減少効果は顕著であった。かくて従来二次爆薬の臨界点火エネルギーは 0.8J が最小であったが、約 0.1J が得られるようになった。ヘキサルにはアルミニウムが入っているが、アルミニウムが元来鋭感剤として作用する⁹⁾ので、添加物が効果を発揮できなかつたのであろう。添加物の15%を添加すると、臨界点火エネルギーが増大するのは、稀釈剤としての効果の方が大きくなるため

ある。

Yang ら^{7) 8)}は PETN, RDX, テトリルの臨界点火エネルギーをそれぞれ 0.8J, 1.0J, 4.0J と発表している。密閉強度、粒径、装てん比重など実験条件の相違を考慮すれば、PETN と RDX については実験のデータとあまり差がない。しかし、テトリルについては、本実験では 0.4J で大きな差がある。これは完爆と半爆との違いであろう。

鉛板孔径は爆の場合 7.4~12.9mm を示した。爆薬量が 0.2g であるから完爆したとみられる。PETN が RDX, HMX より孔径が大きかったのは、PETN の方が速かに爆轟に入ったためであろう。また炭素の添加により孔径は小さくなっている。炭素が威力を増大する効果がないことを示している。添加物混合爆薬を伝爆薬として使用した場合は、威力の低下が見られな

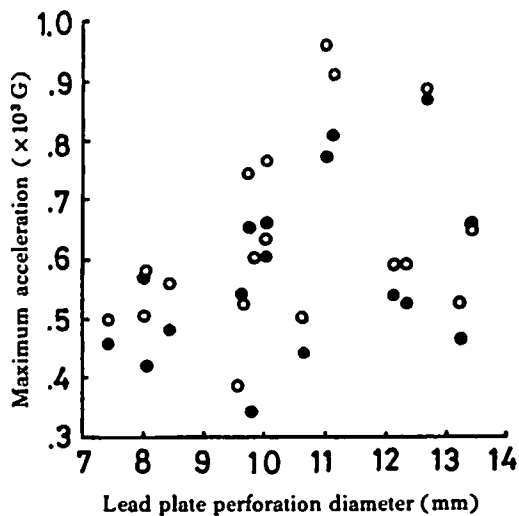


Fig. 5 Comparisons of lead plate perforation diameters and maximum accelerations by laser-initiated detonation
 ○ : $10 \mu\text{s/word}$, ● : $50 \mu\text{s/word}$

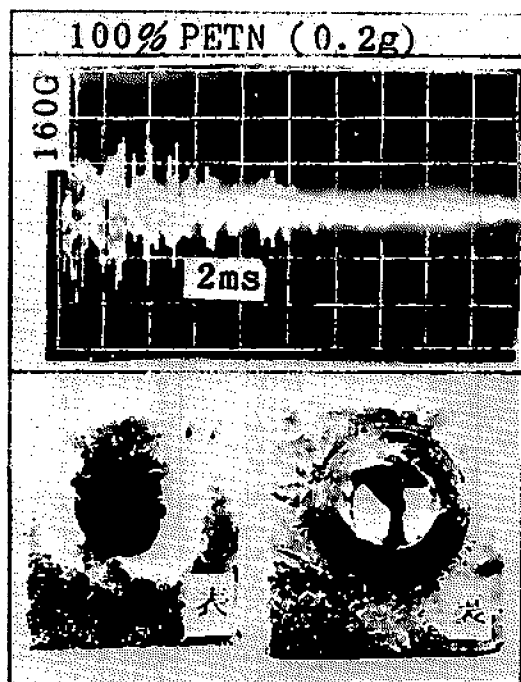


Fig. 6 A vibration oscillogram and photographs of lead plate perforation by laser-initiated PETN

Table 4 Characteristics of the explosives used.

Explosive	Composition	Color	M. P. ($^{\circ}\text{C}$) ⁽¹⁾	Ignition temperature, 5 s. ($^{\circ}\text{C}$) ⁽¹⁾	Drop hammer test, 2 kg, (cm) ⁽¹⁾	Electric spark sensitivity (J)		Detonation velocity (km/s) ⁽²⁾ (density, g/cm ³)
						(1) ⁽¹⁾	(2) ⁽¹⁾	
Black powder	KNO ₃ 74 S 10.4 C 15.6	black		290	32		0.8	-0.4
Hexal ⁽¹⁾	RDX 75 Al 25	grey		225				7.9 (1.8)
Tetryl		light yellow	129.5	257	26	0.025	4.38 -4.68	7.85(1.71)
PETN		white	141.3	225	17	0.036	0.21	8.3 (1.70)
RDX		white	204.1	260	32	0.100		8.5 (1.70)
HMX		white	276 -277	335		0.400		9.12(1.84)
Comp. B	RDX 60 TNT 40 Wax added	yellowish brown		278	75	0.036		7.8 (1.68)
Comp. A-3	RDX 91 Wax 9	light yellow		250	100+			8.1 (1.6)
ANFO	NH ₄ NO ₃ 94 Fuel oil 6	pink	169.6 (NH ₄ NO ₃)	465 (NH ₄ NO ₃)	100+ (NH ₄ NO ₃)			2.5-3.5
Ammonium perchlorate		colorless		435	67			
TNT		light yellow	80.75	475	95- 100+	0.036	4.38 -4.68	7 (1.60)

った。伝火薬の使用量が0.01gと少ないためである。

全般的にながめると、発火したグループ(黒色火薬ヘキサール、テトリル、PETN, RDX, HMX, Comp.B)は、いずれも落つい感度が鋭感であり、発火しなかったグループ(Comp. A-3, TNT, ANFO, アンモニウム)は鈍感であった。(Table 4参照)。一方、発火点と電気火花感度はあまり関係がないようである。Yangら⁷⁾がいうように、レーザ発火感度は衝撃感度と関係があるようだ。

5. 結論

Q-スイッチルビーレーザ巨大パルスを市販雷管管体内に充填した起爆薬以外の火薬類に照射して臨界点火エネルギーを求め、次の結論を得た。

- (1) 供試火薬類市販品では、黒色火薬、ヘキサール、テトリルが鋭感であった。PETNとRDXは若干感度が劣る。その他の火薬類は不爆であった。
- (2) これら火薬類にレーザ光吸収物質として、炭素粉末あるいは0.6~0.8 μ mに最大吸収を有する染料を添加すると、PETN, RDX, HMX, Comp. Bでは感度が非常によくなり、とくにPETNは0.1J程度で起爆できるようになった。テトリルでは添加効果は僅かであり、ヘキサールではむしろ感度が鈍化した。5%添加では、添加物の種類による感度の差はあまり認められなかった。15%添加すると、稀釈効果の方が顕著になって、鈍化傾向が見られた。
- (3) レーザ光吸収物質を添加した爆薬を伝爆薬として少量、当該爆薬上に圧てんすることで、試料爆薬全体を混合物とした場合と同等の発火感度を示し、しかも爆発威力の低下はなかった。
- (4) 爆、半爆、燃焼および不爆は、爆発音、鉛板の破損状況および振動によって判定した。爆と半爆とでは鉛板における貫通孔の有無と爆発振動の最大加速度で大きな差があった。
- (5) 発火した火薬類と発火しなかった火薬類では、落つい感度に差があったが、発火点および電気火花感度ではそのような傾向は認められなかった。Yangら

がいうように、レーザ発火感度は衝撃感度と関係があるようだ。

本研究には昭和58年度(第13回)火薬工業技術奨励会研究助成金を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 水島容二郎, 西山巖, 工業火薬, 35, 169 (1974)
- 2) Y. F. Karabanov and V. K. Bobolev; Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 1981, 256, (5), 1152
- 3) E. I. Aleksandrov and A. G. Voznyuk; Combustion, Explosion and Shock Wave, 14, (5), 480 (1978)
- 4) L. C. Yang; Propellant and Explosives, 6, 151 (1981)
- 5) M. J. Barbarisi and E. G. Kessler; Technical Report, 3861, Picatinny Arsenal, (1969).
- 6) R. J. Harrash; J of Appl. Physics, 47, (6), 2473 (1976)
- 7) L. C. Yang and V. J. Menichelli; Applied Physics Letters, 19, (11), 473 (1971).
- 8) V. J. Menichelli and L. C. Yang; Proceedings of the 7th Symposium on Explosives and Pyrotechnics, III-2-1, (1972)
- 9) L. C. Yang; J. of Applied Physics, 45, (6), 2601 (1974)
- 10) 中原正二, 「火薬学概論」, (1983), 産業図書.
- 11) Kirk-Othmer; Encyclopedia of Chemical Technology, Second Edition, 8, 632 (1967)
- 12) H. J. Jackson; PicArns Tech Memorandum, 1288 (1963)
- 13) F. W. Brown, D. J. Kusler and F. C. Gibson; U. S. Bureau of Mines, Rept. of Invest., RI 3852 (1946)
- 14) B. T. Fedoroff and O. E. Sheffield Encyclopedia of Explosives and Related Items, 7, H77 (1975)

Laser Initiation of Explosives by a Q-switched Ruby Laser

by Kazuo HASUE*, Tatsuya MONMA*, Shoji NAKAHARA*, Jun MORIMOTO*,
Kenichiro TAHIRA* and Toru MIYAKAWA*.

Critical ignition energy of some explosives confined in usual blasting cap capsules was measured by using a focused Q-switched ruby laser beam. Commercial explosives were mixed with various carbon powders (active carbon, graphite, or charcoal) or dyestuffs which had maximum absorption at 0.6-0.8 μ m.

The critical ignition energy levels of explosives were lowered by the addition of laser absorptive substances (carbon powders and dyestuffs) as follows ; PETN from 0.84J to 0.11J, RDX from 0.99J to 0.13J, HMX from over 1J to 0.18J, and Comp. B from over 1.2J to 0.39J. Addition of the laser absorptive substances showed little effect on Tetryl and none on Hexal.

(*The National Defense Academy, 1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka-shi,
Kanagawa-ken, 239, Japan.)
