

アジ化銀ペレット起爆に用いるパルスNd:YAGレーザーのしきい値に関する研究

水書稔治*, Halald H. Kleine**, 高山和喜***

アジ化銀ペレット(10mg, 直径1.5mm, 長さ1.5mm)にNd:YAGレーザー光(パルス発振, 波長1064nm, 出力14mJ/pulse)を照射して起爆させる最小起爆エネルギー(しきい値)を実験的に求めた。実験は, 光強度を減光フィルタを用いて低下させて起爆しきい値を求める方法と, 平凹レンズでレーザー光を拡散して起爆の可否を測定する2種類の方法実施し, ほぼ一致する値を得た。起爆しきい値は $3.57 \pm 0.14 \text{ mJ/cm}^2$ であった。また, 爆風圧の時間履歴を測定と二重露光ホログラフィ干渉計で爆発様態の可視化をし, 起爆しきい値近傍のレーザー光照射でも有意な起爆遅れが発生しないことを確認した。今後, 起爆しきい値のレーザー光波長依存性についての検討をする。

1. 緒言

本報では, 微小爆薬(アジ化銀)をパルスNd:YAGレーザーを用いて起爆させる場合に必要となる最小エネルギー密度を実験的に求めた。

東北大学流体科学研究所衝撃波研究センターでは, 衝撃波の様々な応用研究を展開している。その中でも衝撃波の医療応用研究は, 最も成果の期待されるものの一つである。本センターは1980年初頭より, 爆薬を用いて発生させた水中衝撃波をフォーカスさせて腎臓結石を非観血的に治療する方法(ESWL:Extra corporeal Shock Wave Lithotripsy)の研究を開始し, 1987年, 臨床治療装置は医療機器として厚生省の承認を得ている¹⁾。一方, 水中衝撃波での生体現象に関する研究は発展し, 衝撃波を用いた脳血栓治療等の基礎的研究に結びついている²⁾。これらの研究を通して, 微小爆薬を起爆させた水中衝撃波の特性に関する成果を蓄積してきた⁴⁾。

微小爆薬の応用の一つに, 大規模爆発現象を縮尺爆発実験がある。これは, 宇宙機打ち上げ不可能に伴う指令破壊, 火山の噴火, テロによる都市爆発, 化学工

場での産業爆発などの大規模爆発災害予測図の作成など, 近代国家の危機管理のデータベースとして必要不可欠な研究と考える。しかし, 微小爆薬を用いた模擬実験のデータは不備で, 発生した衝撃波の伝播・反射などの特性には不明な点が多い。標準大気の音響インピーダンスは水と異なるので水中衝撃波の知見を, 微小気中爆発の衝撃波に適用することはできない。本研究では, 以上の研究の基礎データとして, アジ化銀の起爆に必要な最小パルスレーザーエネルギーを求めた。

爆薬の外的刺激に対する起爆特性の研究は, 主として機械的衝撃を与える方式によるものである。レーザー光照射の起爆しきい値に関する多くの研究はRDXなどの高性能爆薬に対するものである。Ramaswamyら⁵⁾はRDXの単結晶をQスイッチNd:ガラスレーザー(波長1050nm)を用いて起爆し, 起爆しきい値 1.5 mJ/cm^2 を得ている。また, Harrach⁶⁾は, 数値計算によってPETN, RDX, HMX及びTNTのレーザー起爆しきい値を求め, それぞれ 18.6 kW/cm^2 , 1.9 kW/cm^2 , 1.1 kW/cm^2 , 0.051 kW/cm^2 を得ている。また, アジ化物に関しては, Haganら⁷⁾がアジ化鉛の単結晶($40 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m} \times 10 \text{ mm}$)に, Qスイッチルビーレーザー(波長694.3nm)を照射し, 起爆しきい値 1.5 mJ/cm^2 を得ている。しかし, アジ化銀についての報告はない。

2. 実験方法

2.1 アジ化銀ペレット

図1に使用したアジ化銀ペレット(中国化薬製造, 直径1.5mm, 長さ1.5mm, アジ化銀含有率99.9%以上)の形状を示す。アジ化銀ペレットの底面(bottom-surface)にレーザー光を照射した。図2(a)に示すよう

2000年11月30日受付

2002年2月13日受理

*防衛庁技術研究本部 第一研究所

〒153-8630 東京都目黒区中目黒2-2-1

TEL 03-5721-7005

FAX 03-3713-6077

E-mail mizukaki@jda-trdi.go.jp

**東北大学大学院工学研究科

航空宇宙工学専攻

***東北大学流体科学研究所

衝撃波研究センター

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

TEL 022-217-5328

FAX 022-217-5324

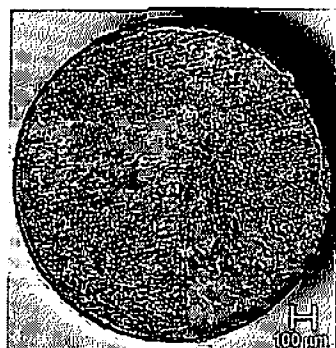
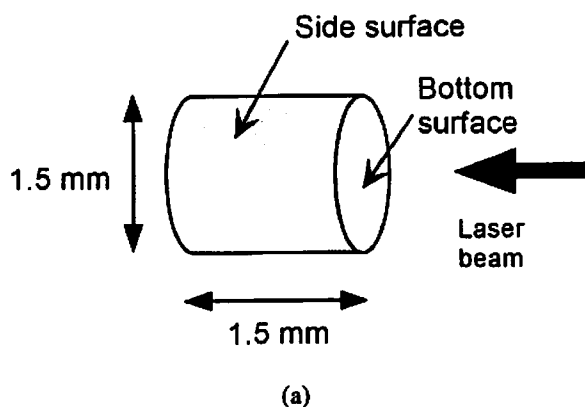


Fig.1 Silver-azide pellet : (a) Mechanical size of silver-azide pellet and direction of laser irradiation. (b) Microscopic photograph of bottom surface of silver-azide pellet.

に、側面(side-surface)に照射して起爆させた場合には、爆発生成気体の生長方向に優先的に衝撃波が伝播するため、衝撃波形状は大きくゆがみ、球状とはならない。これに対して底面へのレーザー照射では発生する衝撃波のゆがみは図2(a)とは異なり、比較的球状となる。ゆがんだ衝撃波とそうでない衝撃波の爆風圧の時間履歴を図2(c)(d)に示す。図から図2(a)のような、爆発生成気体の噴流でゆがんだ衝撃波形状では、爆風圧の履歴には二つの異なるピークが現れることがわかる。

2.2 レーザ

使用したレーザーはフラッシュランプ励起の小型Nd:YAGレーザー(発振波長1064 nm, 仕様出力21 mJ, パルス幅7 ns, Laser Photonics社製)である。起爆しきい値を求めるために、出力、パルス幅をエネルギーメータ(Gentec社製ED-200L, 測定部径22.85 mm)とSi-PIN接合型高速応答フォトダイオード(1 ns Rise time, DET210, THORLAB inc.)を用いて測定し、出力 14.5 ± 0.4 mJ/パルス, パルス幅 9.1 ± 0.2 nsを得た。また、レーザー光強度の分布を、ビームプロファイラ(Spircon社製LBA-500PC)を用いて測定した結果を

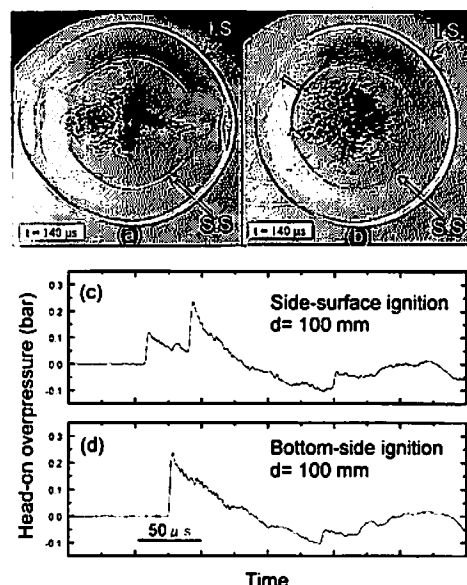


Fig.2 Differences of generated shock waves: (a) Schlieren photograph of distorted shock wave by side-surface ignition at 140 μ s after ignition, I.S.: Incident shock wave, S.S.: Secondary shock wave. (b) Schlieren photograph of shock waves by bottom-surface ignition at 140 μ s after ignition. (c) Head-on overpressure of (a) at 100 mm distance from explosion center. (d) Head-on overpressure of (b) at 100 mm distance from explosion center.

図3に示す。典型的なレーザー光の強度はガウス分布するが、使用したNd:YAGレーザーのような固体レーザーでは、レーザー媒質(ロッド)の劣化や光軸のずれなどの原因で典型的なガウス分布とは異なり、多くの場合、強度の偏りが発生する。このことはしきい値計算の誤差を増大させる原因ともなるので、可能なかぎり光強度が均一なレーザー光で測定するのが望ましい。そこで、レーザー光を拡散板(すりガラス, 砂番800, シグマ光機社製)を通して拡散させ、強度の偏りを小さくした上でアジ化銀ペレットに照射することとした。

2.3 起爆しきいエネルギー測定

起爆しきい値の精度を保証するために、2つの実験手法を用い、結果を比較した。一つはレーザー光をND (Neutral Density) フィルタを用いて減光する「減光法」で、他方は平凹レンズを用いてレーザー光を拡散させる「発散法」である。

2.3.1 減光法

減光法の光学系を図4に示す。拡散板は、レーザー光強度分布の均一化に効果があるが、距離とともにレーザー光強度が減少する。そのため、出射されたレーザー光

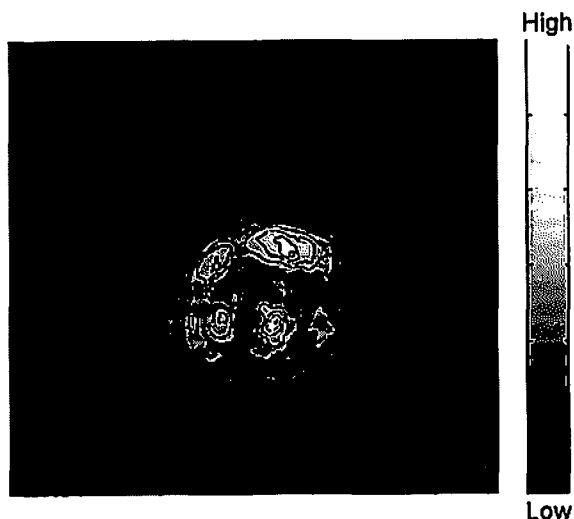


Fig. 3 Beam intensity profile of Nd:YAG laser at near field

をNDフィルタで順次減光し、エネルギーの総量を減少させた後、拡散板で強度分布を整える。用いるNDフィルタは吸収型のものと反射型(反射率が連続的に調整できるもの)を組み合わせた。NDフィルタにより減光され、拡散板を透過したレーザー光をエネルギーメータ(Gentec社製ED-200L, センサ部径22.85 mm)で50回計測し、平均エネルギーを決定した。その後、エネルギーメータと同位置にアジ化銀ペレットの底面がレーザー出射孔に対面するように正して取り付け、レーザーを照射した。起爆の有無を確認して、反射型のNDフィルタの減光率を調整し、測定を繰り返す。

2.3.2 発散法

発散法の光学系を図5に示す。入射レーザー光束は平凹レンズ(レンズ径30 mm, 焦点距離100 mm)で拡大する。光強度は距離とともに低下するので見かけの光源から距離500 mmから1300 mmまでの間において50mm間隔でエネルギー及び起爆の可否を測定した。エネルギーはセンサ部が小さく、高感度のエネルギーメータ(Gentec社製ED-104AX, センサ部径4.30 mm)を用いた。これは後述するように測定するエネルギーの誤差を小さくする効果があると考えたからである。アジ化銀ペレットは、減光法の場合と同様、ホルダーを用いてペレット底面がレーザー孔に正確に対面するように固定した。本法では、拡散板を用いず、レンズで拡大して減光した。これは前述の方法では、拡散板でレーザー光が著しく拡散したためである。したがって、発散されたレーザー光の強度分布は1様ではないため、測定結果には、減光法と比較すると相応の誤差を含むことが予想された。発散されたレーザー光の強度分布をビームプロファイラを用いて測定し、強度分布の減光法との相違を確認した。

3. 結果

3.1 減光法

図6(a)に拡散板透過後、拡散板から距離20 mmでのレーザー光強度分布を示す。図3との比較より、拡散板透過後のレーザー光は透過前に比べ、エネルギー強度の局在化が解消されたことがわかる。したがって、エネルギーメータで測定したエネルギーをビームプロファイラで測定したレーザー光の有効径(光強度がピーク値の $1/e^2$ となる直径)を用いて単位面積あたりのエネルギー

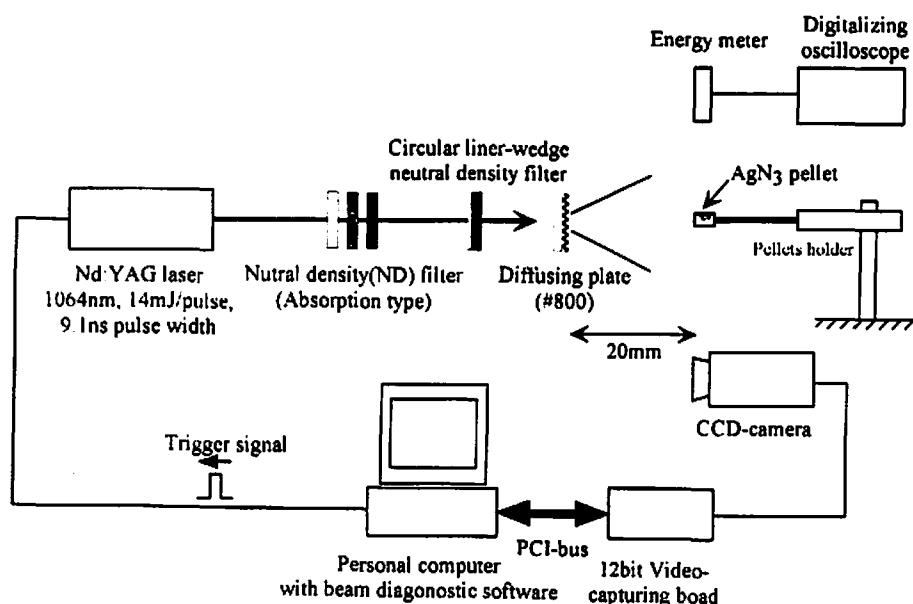


Fig. 4 Experimental setup for threshold energy measurement by ND-method.

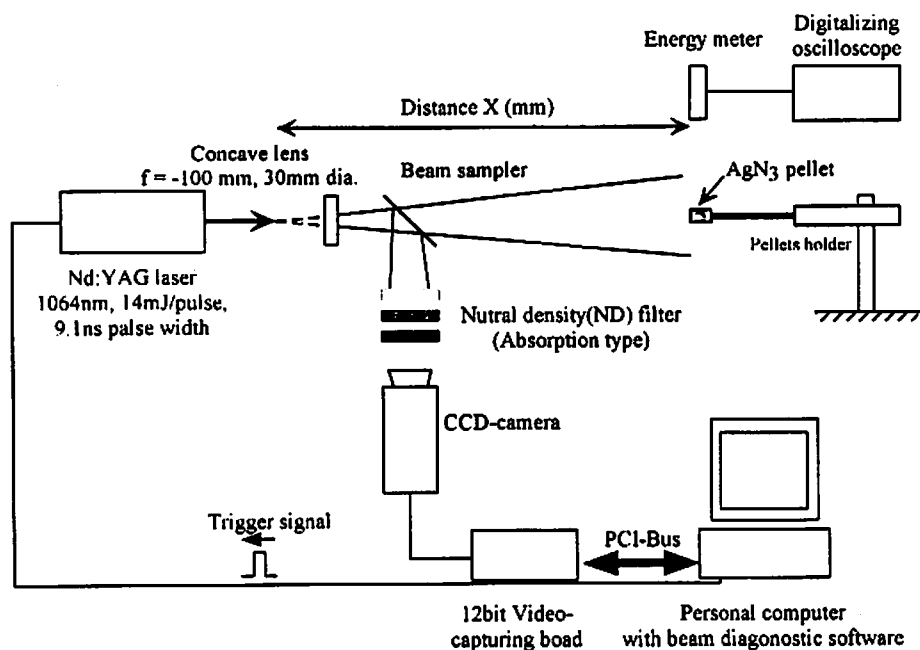


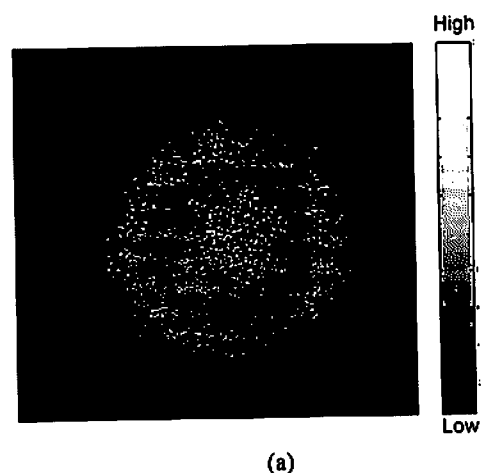
Fig. 5 Experimental setup for threshold energy measurement by divergence method.

ギーを求めることができる。レーザエネルギーと起爆の有無を図6に示す。黒丸は起爆した場合、白丸は起爆なしを意味する。それぞれの誤差棒には、レーザ光のパルス幅の誤差、出力の誤差、有効径の誤差が考慮されている。図中のハッチングは本測定より得られた起爆しきい値と考えられる領域で、 $3.57 \pm 0.14 \text{ mJ/cm}^2$

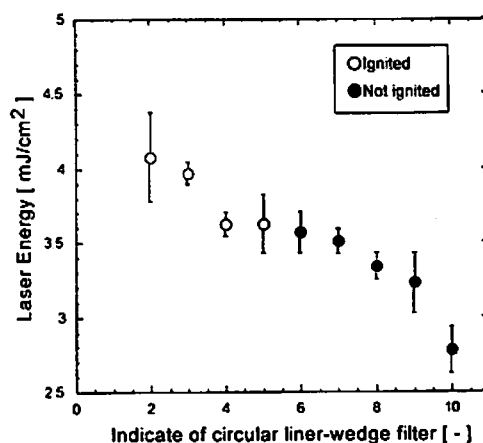
である。この値にアジ化銀ペレット底面積($17.67 \times 10^3 \text{ cm}^2$)を乗じ、ペレットが受光したエネルギーはおよそ $63 \mu\text{J}$ となる。なお、本実験では、「起爆した」という用語は、アジ化銀ペレットがレーザでの初回の照射で起爆したことを意味し、「起爆しなかった」という用語は、10回連続照射しても全く起爆しなかった場合を示す。

3.2 発散法

図7(a)に平凹レンズ通過後、200 mmの位置でのレーザ強度分布を示す。図からわかるように、本法における強度分布は一樣とはいえない。したがって、測定精度を高めるために、アジ化銀ペレットが設置される近傍の小領域のみのエネルギーを測定する必要があるため、用いるエネルギーメータを小領域・高感度のものに変更した。図7(b)にレーザパワーと起爆の有無の関係を示す。黒丸は起爆した場合、白丸は起爆しなかった場合を示す。本結果におけるレーザパワーとは、エネルギーメータが感受したエネルギー値をエネルギーメータのセンサ部面積で除したものである。それぞれの誤差棒には、レーザ光のパルス幅の誤差、出力の誤差が考慮されている。図中のハッチン



(a)



(b)

Fig. 6 Experimental results by ND-method: (a) Beam intensity profile of the Nd:YAG laser behind the diffusing plate (20 mm from the plate). (b) Ignition results.

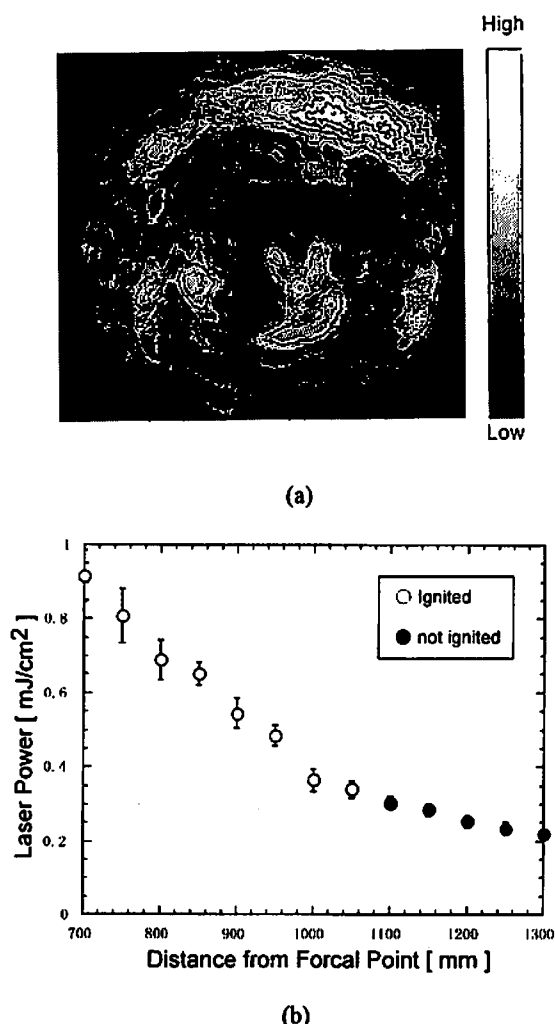


Fig. 7 Experimental results by divergence-method: (a) Beam intensity profile of the Nd:YAG laser behind concave lens (200 mm from the lens). (b) Ignition results.

グは本測定より得られた起爆しきい値と考えられる領域であり、 $2.96 \pm 0.41 \text{ mJ/cm}^2$ である。また、印加されたエネルギーは、アジ化銀ペレット底面積を乗ずることにより、およそ $52 \mu\text{J}$ となる。

4. 考 察

2種類の起爆しきい値測定実験の結果は、 $3.57 \pm 0.14 \text{ mJ/cm}^2$ 及び $2.96 \pm 0.41 \text{ mJ/cm}^2$ であった。より高い値の結果を本研究の結果に採用するならば、その値は $3.57 \pm 0.14 \text{ mJ/cm}^2$ (ペレット印加エネルギー $63 \mu\text{J}$) である。この値は、Haganらがアジ化鉛で求めた値と同程度となった。

Haganらはアジ化鉛単結晶の起爆に際して、起爆しきい値をやや超える程度のエネルギーの印加で、起爆開始の遅れを報告している⁷⁾。遅れ時間はしきい値に向かって近づくにつれ延長され、数百 μs にも達する。そのため、本研究でもアジ化銀ペレットの起爆に

同様の疑問が現れるか否かを確認した。

起爆方法は、減光法と同様の手法を用いた。起爆しきい値近傍のレーザ光エネルギーを確実にペレット底面に印加するために光ファイバ(フジクラ社製ゲルマニウムドープ石英コアファイバGC-400/500, クラッド径 $500 \mu\text{m}$, コア径 $400 \mu\text{m}$, 伝送損失率 10 dB/km ただし波長 800 nm)を通して光伝達を行った。また、光ファイバの径がレーザ光束の径 (3 mm) と比較して小さく、光強度の均一性を確保できると考え、拡散板を取り除いた。また、光ファイバは、アルファ・シアノアクリレートを主成分とした接着剤を用いてペレット底面に固定した。この接着剤は極微量で強固に接着できるため、接着剤が起爆過程に与える影響は無視できると考えた。

起爆の様態は爆風圧計測による初期衝撃波到達時間の比較と二重露光ホログラフィ干渉計で可視化計測をした。爆風圧測定では、ペレットから 100 mm の距離に圧力変換器(Kistler社製603B)を金属製円盤(直径 150 mm , 厚さ 20 mm)の中心に変換器先端面と金属円盤表面が一致するように取り付け、正確に圧力変換器が爆心に対面するように設置した。図8に、印加エネルギーが起爆しきい値を十分に越える場合(約 250 mJ/cm^2)としきい値近傍の場合(約 10 mJ/cm^2)の爆風圧の時間履歴の一例を示す。図9にそれぞれの場合の二重露光ホログラフィ干渉計による可視化画像を示す。画像はそれぞれNd:YAGレーザ発振後 $100 \mu\text{s}$ 後のものである。なお、画像中の干渉縞は、場の等密度線と等価となる。

距離 100 mm での爆風圧の時間履歴(図8)の比較から初期衝撃波の到着がほとんど同時であることがわかる。到着時間の測定はおおの5回繰り返し実施した。それぞれの衝撃波到着時間はしきい値近傍のエネルギー印加では(t_{th}), $198.6 \pm 1.7 \mu\text{s}$, しきい値を超えるエネルギーの場合(t_{en})には、 $199.0 \pm 1.6 \mu\text{s}$ となりその差は僅かで、Haganらが報告していたような遅れ時間の差異は認められない。また、可視化画像でもそれぞれの場合について爆発様態に大きな差異を認めない。したがって、アジ化銀ペレットにおいては、アジ化鉛単結晶に見られるような起爆遅れが非常に小さいことが確認できた。すなわち、アジ化銀ペレットは、 $3.57 \pm 0.14 \text{ mJ/cm}^2$ を超えるエネルギーを加えられた瞬間に起爆する。

5. 結 論

以上の結果を要約すれば：

- (1) アジ化銀ペレット(直径 1.5 mm , 長さ 1.5 mm , 重量 10 mg) をフラッシュランプ励起Nd:YAGレーザ

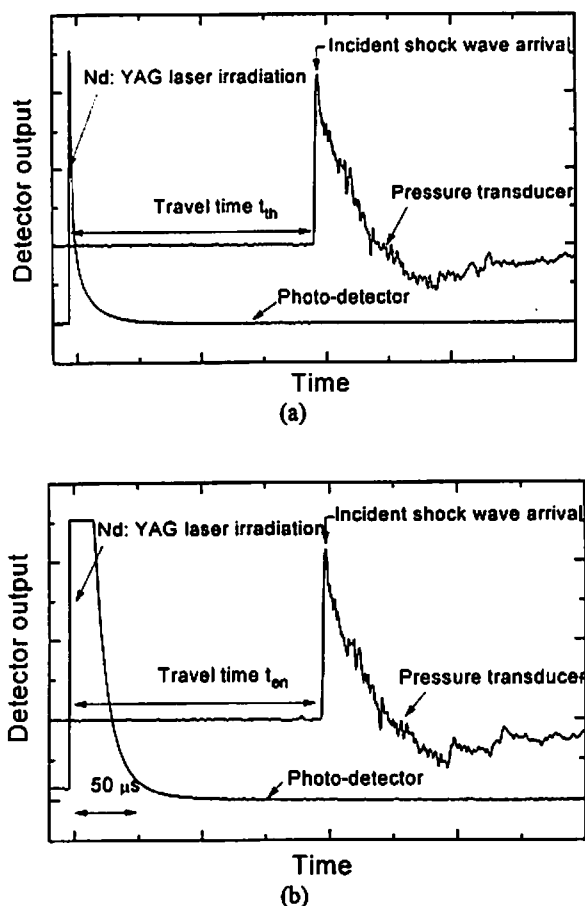


Fig. 8 Head-on overpressure time profile at 200 mm distance: (a) Ignited by approximately 250 mJ/cm² irradiation. (b) Ignited by approximately 10 mJ/cm² irradiation.

(波長1064 nm, パルス幅9 ns)を用いて起爆する際のしきい値レーザーエネルギーは、 3.57 ± 0.14 mJ/cm²である。この値は、ペレットが受けた総エネルギーとしてはおよそ63 μJに相当する。

- (2) 起爆しきい値近傍エネルギーの印加でも反応遅れは、爆風圧測定、可視化計測の結果からは認められなかった。したがって、起爆しきい値を越えるエネルギーの印加では、起爆は瞬時に発生する。
- (3) 起爆しきい値の波長依存性についての測定は行わなかった。そのため、今後の課題としては、起爆しきい値の波長依存性の確認があげられる。
- (4) アジ化銀ペレットのレーザー起爆法は、気中における微小衝撃波発生源として、時間制御および発生する衝撃波様態の均一性の面から有用であり、大規模爆発の実験室内でのシミュレーション技術、衝撃波の医療応用技術等の中核となる技術である。

謝 辞

本研究には文部省科学研究費C O E形成プログラムの助成を得た。本研究で用いたアジ化銀ペレットは

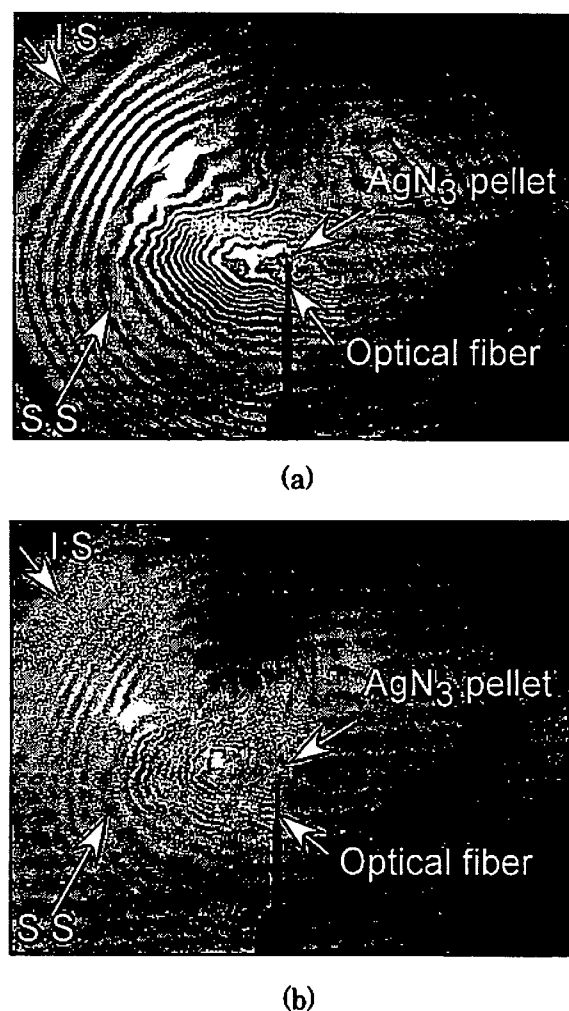


Fig. 9 Visualized shock waves by double-exposure holographic interferometry: (a) After 100 μs by approximately 250 mJ/cm² irradiation, I.S.: Incident shock wave, S.S.: Secondary shock wave. (b) After 100 μs by approximately 10 mJ/cm² irradiation.

中国化薬(株)の永易伸生氏の提供による。また、本研究に際しては同氏の助言と協力を得た。ここに付記し、それぞれ感謝の意を表する。

文 献

- 1) 高山和喜, 日本臨牀, 47, 2671(1989)
- 2) 小玉哲也, 永易伸生, 高山和喜, 吉田昌弘, 火薬学会誌, 56, 195(1995)
- 3) 小玉哲也, 高山和喜, 永易伸生, 上之原広司, 吉田昌弘, Neurosonology, 10, 79(1997)
- 4) K. Takayama, Jpn. J. Appl. Phys., 32, 2192(1993)
- 5) A. Ramaswamy, J. Field, J. Appl. Phys., 79, 3824(1996)
- 6) R. Harrach, J. Appl. Phys., 47, 2473(1976)
- 7) J. Hagan, M. Chaudhri, J. Mater. Sci., 16, 2457(1981)

Initiation threshold energy of silver azide pellets by Nd:YAG laser irradiation

Toshiharu Mizukaki,* Harald H. Kleine,** and Kazuyoshi Takayama***

In this paper, threshold laser energy for initiation of micro-explosives, silver-azide (AgN_3) of size 1.5 mm in diameter and 1.5 mm in length, has been studied using two experimental methods to verify their results each other. First one was a method that decreases laser beam intensity by neutral density filters. The other one was a method that diverges laser beam by concave lens. A small pulsed Nd:YAG laser, wavelength of 1064 nm irradiation, was used in this study. The two results were well agreed, that was $3.57 \pm 0.41 \text{ mJ/cm}^2$. We also focused on delay time of initiation at the energy of near threshold. Travel times of blast wave by detecting overpressure of incident shock wave, were compared between in the case of enough energy and in the case of slightly over the threshold energy for initiation. Visualization of explodes were also done by double exposure holographic interferometer. Any initiation delay, however, were not found in this study.

(*1st Reserch Center, Technical Research and Development Intitute, Japan Defence Agency
2-2-1 Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo 153-8630, JAPAN

(**Department Aeronautics and Space Engineering, Faculty of Engineering Tohoku University.

(***Institute of Fluia Science, Tohoku University.
2-2-1 Katahira, Aobaku, Sendai-shi, Miyagi-ken 980-8577, JAPAN)