

## レーザーシャドウグラフ法による雷管の爆発現象の観察

中村裕一\*, 松尾日出男\*

爆発ガスの膨脹や飛散物の飛しょうとそれによって形成される衝撃波の観察を行うために、現象との同期が可能で、短時間に十分なエネルギーが放出できるポッケルセルQスイッチルビーレーザーを光源として用いたシャドウグラフ法を検討し、これを用いて雷管の爆発現象を解析した。

実験の結果、ガスの膨脹によって形成された衝撃波、管体の微小破片の飛しょうとその分布状況、それによって形成された衝撃波、爆発ガスと空気の境界面などがシャドウグラフ写真によって示された。特に、底上型雷管特有な現象である底面からのジェットは、先行する微小破片とそれにつづく大きな破片からなっていることが実験的に確認された。

得られたシャドウグラフ写真をもとに、これらのR-t線図(Rは雷管底面からの距離、tは爆発後の時間)を作成した。これによって、雷管底面からの先行する微小破片は約2km/sec、それに続く大きな破片は約1.4km/secのほぼ一定速度で飛しょうしており、爆発ガスの膨脹は爆発後50μsecで、ほぼ停止することがわかった。

### 1. 緒言

爆発現象を実験的に解析する場合、高速度写真によって現象を観察することは有力な1つの手段である<sup>1)</sup>。この場合もっとも簡便な方法は、高速度カメラによる爆発の自己発光の直接撮影であろう。これは連続撮影可能であるが、爆発現象において重要となる衝撃波の挙動を観察することはできない。これを行うには、シャドウグラフ法やシュリーレン法などの特別な光学的手法を用いなければならない。爆発現象にこの光学的手法を適用する場合、現象と光源の発光時刻の同期、光学機器の防護、光源の発光強度と露光時間、爆発の自己発光の影響などが問題となるであろう。我々は、これらの問題点を考慮して、爆発現象との同期が可能で発光強度が強く短時間露光(約20nsec)の単色光を得ることができるポッケルセルQスイッチルビーレーザーを光源として使用したシャドウグラフ法を検討した。これによって、瞬間的現象である爆発現象においても1コマではあるが、完全な静止写真を撮影することができる。又、実験する際の光学機器の爆風や飛散物からの防護は、幸いに熊本大学衝撃エネルギー実験所には爆発実験室が設置されているので、観測窓に注意を払えば、特に問題とはならない。

本報告は、観察方法の詳細とこれを用いて行なった雷管の爆発現象の観測結果についてまとめたものである。雷管の爆発現象の解析は、すでに高速度カメラ<sup>2)</sup>、瞬間X線<sup>3)</sup>や、爆薬アルゴンフラッシュ法<sup>4)</sup>、シュリーレン法<sup>5)</sup>などの光学的方法によってもなされているが、本実験では、短時間露光、高分解能撮影によって、従来なされた観測では明瞭にとらえられていなかった管体の微小破片の撮影に成功し、さらに、そのおおよその大きさや飛しょう速度をも求めることができた。

### 2. 実験装置及び実験方法

Fig. 1は、ルビーレーザーの作動特性を示したものである。通常発振の場合と異なり、ジャイアントパル

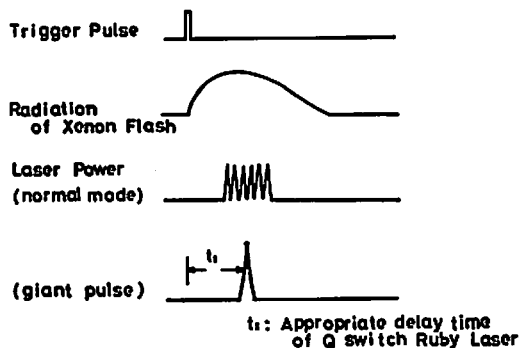


Fig. 1 Operating characteristics of Q switch ruby laser.

スを効率よく得るには、Qスイッチの作動をポンピング開始時より最適遅延時間  $t_1$  だけ遅らせる必要がある。Fig. 2は、現象とQスイッチ作動の同期に関する時系列を示したものである。この時系列にしたがってQスイッチルビーレーザーを作動させるための装置のブロック線図をFig. 3に示す。遅延回路(A)は、起爆信号を出力するためのものであり、これによって起動される発爆器 (Pulse-triggered Blasting Machine, 以後略してPBMと呼ぶことにする。)を使用して、爆薬を起爆する。使用したPBMは、充電電圧18V、充電エネルギー0.076ジュールであり、10A程度の電流値を流すことができる。

遅延回路(A)の出力パルスもしくは爆発確認のための

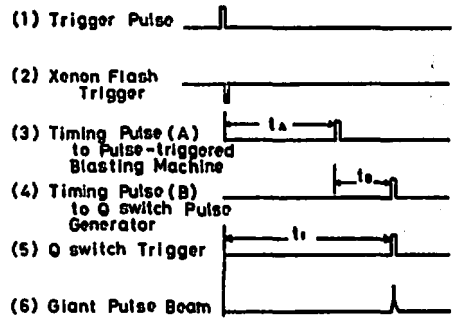


Fig. 2 Time sequence of synchronization of Q switch ruby laser operation with explosion phenomena.

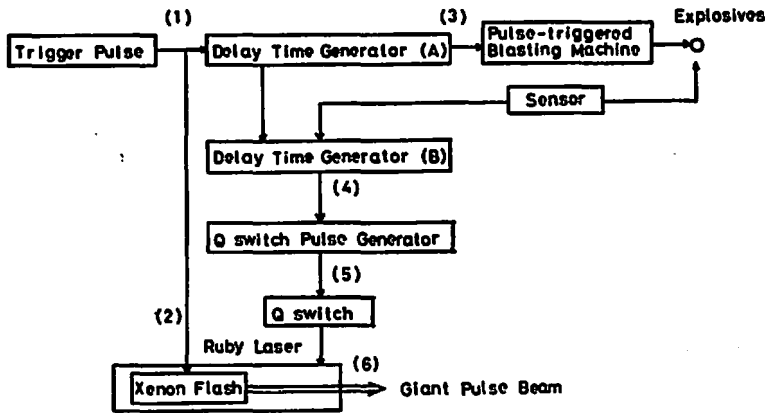


Fig. 3 Operating systems of Q switch ruby laser.

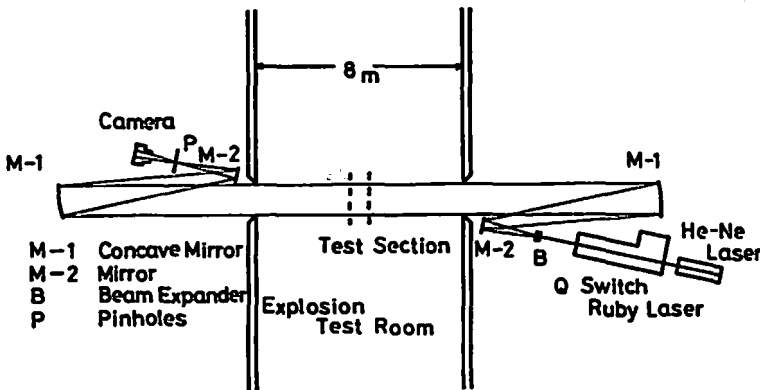


Fig. 4 Schematic diagram of optical arrangement.

センサーからの信号によってトリガーされる遅延回路(B)は、Qスイッチ作動のためのトリガーパルスを出力する。なお、遅延回路(A)、(B)は、デジセットスイッチによって、 $0.1\mu\text{sec}$ の精度で遅延時間の設定が可能であり、これらの装置の使用によって、Qスイッチの作動と現象との同期は、爆薬の起爆おくれのパラツキを

除外すれば、 $1\mu\text{sec}$ 以下の精度で可能である。

次に、シャドウグラフ観察を行うための光学系の配置をFig. 4に示す。光学系は、熊本大学工学部付属衝撃エネルギー実験所の爆発実験室の対向した2つの観測窓を用いて配置され、2個の凹面鏡(焦点距離1500mm有効径200mm)を用いた2面对向法によるものであ

る。ナイフエッジを加えれば、シュリーレン法による観察も可能となる。観測部の有効範囲は、この場合、観測窓の大きさで制限され、有効径は170mmである。

これらの光学系は、ルビーレーザーの背後に配置された He-Ne レーザーによって調整される。ルビーレーザーの光は、ビーム拡散用凹レンズB, 補助平面鏡M-2, 凹面鏡M-1によって平行光線となり、観測部を通過する。このとき、観測部における密度変化によって生じる光の濃淡は、受光側の凹面鏡, 補助平面鏡でふたたび集光されたのち、カメラのフィルム面上に結像され、シャドウグラフ写真が撮影される。観測部での密度変化によって生じるフィルム面での光のコントラストは、検査面からフィルム面までの距離  $l$  に比例する。この配置では、 $l$  は6m程度と長く、特に雷管の爆発現象を観察する場合、管体の破片の飛しょうによってできた多数の衝撃波は、過度のコントラストのために明瞭に識別できなかった。これを改善するために、検査面にカメラレンズのピントを合わせ、長い  $l$  によって生じる過度のコントラストを緩和することにした。カメラレンズとしては、検査面全体 (170mmφ) がフィルムの画面全体におさまるような焦点距離180mmのレンズを使用した。フィルムは、レーザー光の強度が十分であることから、ASA 感度の低いネオパンF (ASA32) を使用した。又、図中のピンホールPは、爆発の自己発光をとりぞくためのものであるが、シュリーレン効果を生じさせるため、本実験では使用しなかった。

レーザー装置は、NEC 社製のポッケルセルQスイッチルビーレーザー装置 SLG2018 (公称出力40MW以上、パルスの半値巾約15nsec) であり、遅延回路は、我々の意図した実験方法にしたがって特別に製作されたものである。

### 3. 実験結果及び考察

前節で述べたレーザーシャドウグラフ法を電気雷管の爆発現象に適用し、爆発ガスの膨脹, 飛散物の飛しょう, 衝撃波の伝播について調べた。同期の問題から電気雷管は、起爆遅れのバラツキが少ない地震探鉱用を使用した。実験によって、起爆遅れは $150 \pm 5 \mu\text{sec}$ 程度であることがわかった。爆発現象を解析するために必要な時間基準として、爆発光をフォトランジスターが感知した時刻を採用した。

Fig. 5は、トランジェントレコーダー (岩崎通信社製DM902) が記録したフォトランジスターの出力波形 (下側のビーム) の1例である。トリガーには遅延回路(A)の出力パルスを用いた。第1パルスは爆発光によるものであり、第2パルスはレーザービームの攪乱によるもので、Qスイッチの作動時刻 (上側のビ-

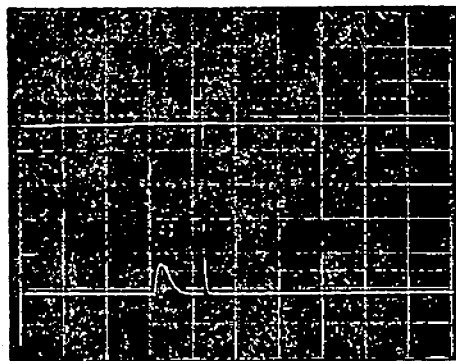


Fig. 5 Typical record on CRT Display.  
(Sensitivity: 4.0v/div, Time scale: 40μsec/div)  
Upper beam shows the Q switch trigger pulse.  
Lower beam shows the Photo TR signal. First and second pulse indicate the response to the light emitted from the explosion of detonator and ruby laser respectively.

ム)に対応している。この第2パルスによって、ジャイアントパルス発振が正常に行われたか否かが判定できる。実験は遅延時間  $t_A, t_B$  の組み合せを種々変化させて行い、爆発後の現象の時間的変化を調べた。得られたシャドウグラフ写真の一例をFig. 6に示す。

Fig. 6の一行目の4枚の写真は、爆発後20μsecまでの状態を示したものである。10μsec程度では、爆発ガスと衝撃波面はほぼ合体して膨脹していることがわかる。又、点火玉が装着されている管体位置付近の爆発ガスの時間的変化を、10μsecまでの写真から知ることができる。その後衝撃波面の前面には、爆発ガスによって加速された管体の微小破片が飛び出し、その飛しょうによって、くさび状衝撃波を背後に形成している。爆発後10数μsecで破片が衝撃波に先行するのは、爆発による衝撃波が急速に減衰するためである。

この微小破片の分布状態をFig. 6の三行目の3枚の写真で示す。破片の分布領域は、雷管底部と頭部にほぼ区分けすることができる。すなわち、添装薬の側面方向 (半径方向) には破片の飛散が集中しており、その方向に爆発ガスの膨脹エネルギーが卓越していることがわかる。これは、爆こう波が雷管底面でせきとめられることによる端末効果であろう。事実、端末を開放したパイプに充填した爆薬の爆発現象においては、爆発ガスの膨脹はパイプの軸方向に卓越していることが、すでに報告されている<sup>7)</sup>。又、Fig. 6の写真から、雷管の頭部の周囲には、爆発ガスに先行した破片はほとんど確認できない。

Fig. 6の二行目の写真は、雷管の軸方向の破片の飛しょう状態を示したものである。特徴的な現象として

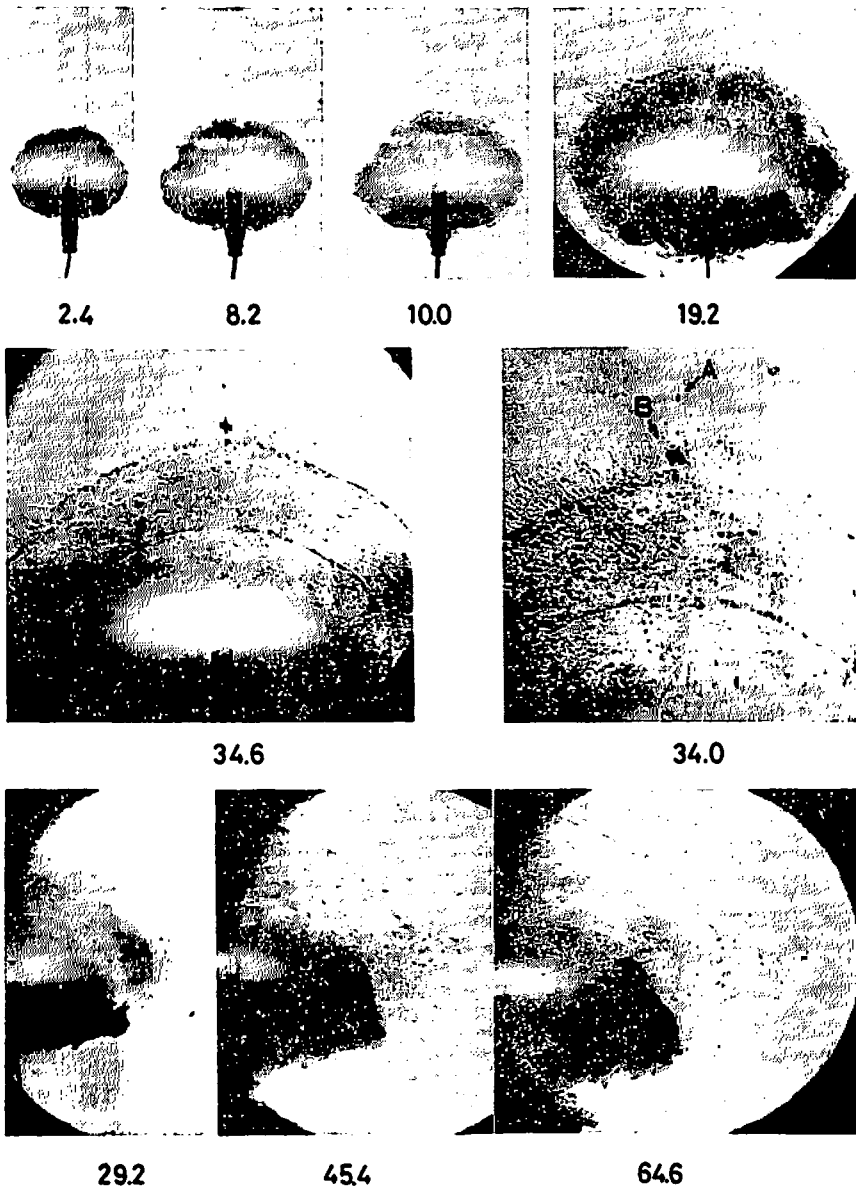


Fig. 6 Shadowgraphs of the explosion phenomena of detonator taken at sequential times. Each photograph is of a different experiment. The numbers give time in  $\mu\text{sec}$  after the explosion.

雷管底面から鉛直方向に飛しょうする微小破片A (大きさ約 $0.8\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ ) とそれに続く大きな破片B (大きさ約 $4\text{mm} \times 3\text{mm}$ ) の存在が認められる。これは、雷管の底面に人為的に作られた凹みによって生じた一種のノイマン効果によるものであろう。微小破片の背後のくさび状衝撃波は、破片が超音速で飛しょうしているために形成されたものである。従来の写真観察では<sup>2)3)6)</sup>、これらは1つのジェットとしてしか撮影されておらず、それを構成する個々の管体破片はとらえられていなかった。本実験によって、それが先行する微

小破片とそれにつづく大きな破片からなることが確認され、そのおよその大きさも知ることができた。これは、本観察法では流れの微細構造を知るうえで適していると言われるシャドウグラフ法を用いたこと、十分な発光強度で短時間露光の光源を用いたこと、過度のコントラストを取り除くために検査面にカメラレンズのピントを合せたことなどによってもたらされた結果である。

雷管の効力の観点からは、雷管底面から1つのかたまりとして、破片Bが高速で飛しょうすることの意義

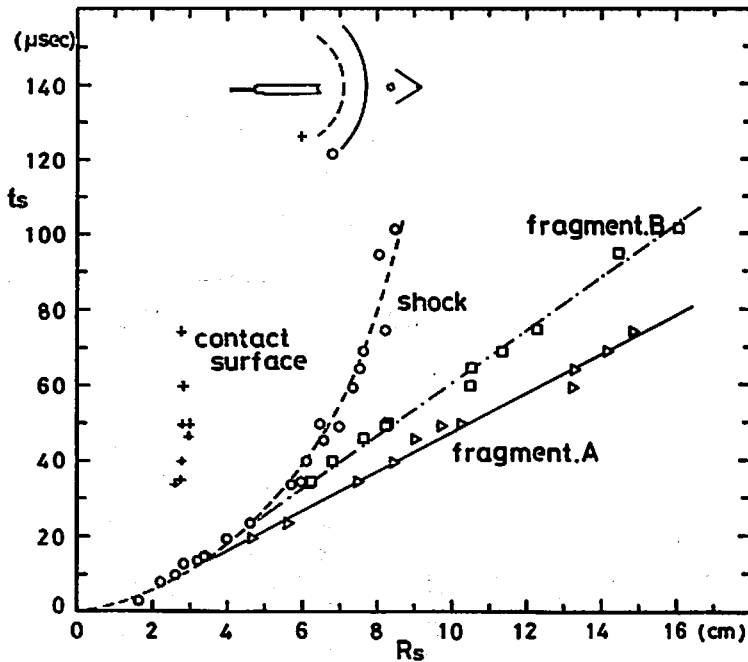


Fig. 7 Time-distance diagrams of shock waves produced by expansion of detonation gas and metal fragments emanating from concave bottom of detonator.

は大きい。雷管の底面からのこのような破片の飛しょう状態はすべての実験において確認されており、雷管の爆発現象の再現性の良さを示しているものと思われる。又、Fig. 6の数枚の写真からわかるように、爆発後30 $\mu$ sec程度で衝撃波の背後に1つの明瞭な濃淡ができる。これは、爆発ガスと衝撃波で圧縮された空気との境界面（接触面）と考えられる。

Fig. 7は、シャドウグラフ写真を解析して求めた雷管底面からの破片の飛しょうと衝撃波面の軌跡をR-t線図で示したものである。（横座標Rsは雷管底面からの距離を、縦座標tsは爆発後の時間をあらわす。）各々の軌跡の傾きから、衝撃波面前方に飛び出した微小破片Aの飛しょう速度は約2km/sec、それに続く大きな破片Bのそれは約1.4km/sec程度であることがわかり、ほぼ一定の速度で飛しょうしている。この微小破片Aの速度は、文献5)での電気計測によって求めた値に近い。接触面は爆発後50 $\mu$ sec程度からほぼ静止した状態に至り、80 $\mu$ sec以後は明瞭な濃淡は確認されなかった。この爆発ガスの膨脹の停止によって、衝撃波の減衰が著しくなり、爆発後60 $\mu$ secたつとその伝播速度が急激に減少していることがFig. 7からわかる。

#### 4. 結論

爆発現象の光学的観察を行うために、ポッケルセルQスイッチレーザーを光源として用いたシャド

ウグラフ法を検討し、これを用いて雷管の爆発現象を解析した。

結論は、次のようにまとめることができる。

1) 雷管の爆発ガスや、その膨脹によって形成された衝撃波だけでなく、管体の微小破片や爆発ガスと空気との境界面も撮影することができた。特に、底上型雷管底面からのジェットは、先行する微小破片とその背後の大きな破片からなることが実験で確認された。

2) シャドウグラフ写真の解析から、衝撃波の伝播や飛散物の飛しょうに関するR-t線図を作成した。これより、雷管底面から発出した微小破片は約2km/sec、それにつづく大きな破片は約1.4km/secのほぼ一定速度で飛しょうしていることがわかった。爆発ガスと空気との境界面は、爆発後50 $\mu$ sec程度でほぼ静止し爆発ガスは周囲媒体への力学的作用を停止する。

本研究を進めるに際して熊本大学工学部永山邦仁講師からは、発破器PBMを使用させていただき、又、多くの御助言をしていただいた。同じく藤田昌大助教授には御援助と励ましをいただいた。実験は、卒業研究生の井上、谷口、新垣、高瀬君の協力によってなされた。使用した雷管は、すべて旭化成工業株式会社より提供していただいた。ここにあわせて深く感謝の意を表する。なお本研究の費用の一部は文部省科学研究費（奨励研究(A)）によったことを付記する。

#### 文 献

- 1) Y. Mizushima, Proc. of the 13th Int. Congress on high speed photography and photonics, p. 109 (1978).
- 2) C. H. Johansson and P. A. Persson, "Detonics of high explosives" p. 117 (1970), Academic Press.
- 3) 吉田 正, 赤羽周作, 田中雅夫, 松本 栄, 工火誌, 31, 319 (1970).
- 4) 柳沢 剛, 工火誌, 23, 33 (1962).
- 5) 日下部正夫, 井田一夫, 工火誌, 19, 353(1958).
- 6) 植村恒義, 木下四郎, 中原正二, 山本顕一郎, 工火誌, 23, 229 (1962).
- 7) 永山邦仁, 藤田昌大, 清田堅吉, 工火誌, 40, 300 (1979).

---

## Optical Observations on the Explosion Phenomena of Detonators by Laser-Shadowgraphy

by Yuichi NAKAMURA\* and Hideo MATSUO\*

A shadowgraph system using a ruby laser as a light source is set up to observe the flow fields produced by the explosions of the detonator. To synchronize the emissions of the laser beam with the phenomena, a pokels cell Q switch, two delay time generators, and a pulse-triggered blasting machine to initiate the explosion of the detonator are used. These enable us to get a giant pulse beam at a desired time after explosions and to obtain time-resolved shadowgraphs at desired intervals.

The shadowgraphs of the explosion phenomena of the detonator obtained in this way show the existence of shock waves produced by the expansion of the detonation gas, the metal fragments rushing out with supersonic velocities, the shock waves developed by the motion of the fragments and the contact surface between the air and the detonation gas.

Time-distance diagrams obtained from the shadowgraphs show;

- (1) A small fragment scattered axially from the concave bottom of the detonator with a velocity of about 2 km/sec gets ahead of the shock wave produced by the detonation gas expansion, approximately 10  $\mu$ sec after the explosion.
- (2) Behind this small fragment, there is a large fragment with a velocity of about 1.4 km/sec.
- (3) The detonation gas stops expanding approximately 50  $\mu$ sec after the explosion, causing the subsequent decay of the shock wave.

(\*Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kurokami 2-39, Kumamoto)