

簡易な強制破膜法を用いた衝撃波の発生

石井 翔太 (群馬大院理工・院), 山崎 颯太 (群馬大院理工・院)
船津 賢人 (群馬大院理工), 木村 敦史 (群馬大院理工・院)

Generations of Shock Waves Using Simplified Forced-rupture Method

ISHII Shota (Graduate School of Science and Technology, Gunma University),
YAMAZAKI Sota (Graduate School of Science and Technology, Gunma University),
FUNATSU Masato (Graduate School of Science and Technology, Gunma University),
and KIMURA Atsushi (Graduate School of Science and Technology, Gunma University)

ABSTRACT

In this study, in order to control the pressure of the high-pressure chamber, a simplified forced-rupture device was introduced in the diaphragm-type shock tube. The forced-rupture device is wirelessly operated from the outside of the shock tube by using Bluetooth and heats the nichrome wire to rupture the diaphragm and generates shock waves. The pressure waveform of the shock wave was obtained by using pressure sensors. The rupture process was observed by using a high-speed video camera. The shock front was visualized by Schlieren method. It was found that it was possible to control the pressure in the high-pressure chamber, the rupture process of the forced-rupture method was different from the one of the natural rupture, and the normal shock waves were generated by the forced-rupture method.

1. はじめに

衝撃波は、爆発、放電、高速変形などに伴う圧力変動が伝播する際にあらわれ、音速を超えて伝播する圧力の波である。衝撃波を発生させる装置の一つに衝撃波管がある。衝撃波管は航空宇宙工学や高温物理学など多くの分野に利用されており、隔膜式衝撃波管と無隔膜式衝撃波管の二種類に大別できる¹⁾。隔膜式衝撃波管は構造が単純で簡便に衝撃波を発生させることができる。一方、無隔膜式衝撃波管は高速開口弁等を用いることで装置の連続駆動が可能だが、構造が複雑であり弁を急速に開口させることが困難であるなど技術的な課題がある²⁾。

本研究では隔膜式衝撃波管を利用し、衝撃波背後の放射に関する実験的研究を系統的に行っている^{3)~6)}。以前の研究では高圧力室圧力を高め、隔膜を自然破膜させることで衝撃波を発生させた。本研究では、高圧力室圧力を一定に制御し再現性を高める方法として強制破膜法に着目した。製作した強制破膜装置はBluetoothを利用して衝撃波管外部から無線で操作し、加熱したニクロム線で隔膜を破膜させる装置である。この強制破膜装置は既存の衝撃波管を大規模に加工することなく導入でき、低コストであるなどの様々な利点がある。強制破膜法で発生させた衝撃波の圧力波形を圧力センサーを用いて取得した。また隔膜の破膜過程を高速ビデオカメラで撮影し、隔膜の開口率を求めた。さらに発生させた衝撃波をシュリーレン法⁷⁾を用いて可視化し、入射衝撃波面を高速ビデオカメラで撮影した。これらの実験結果から発生させた衝撃波および隔膜の破膜挙動について考察した。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置概略を示す。衝撃波管は、内径80mm

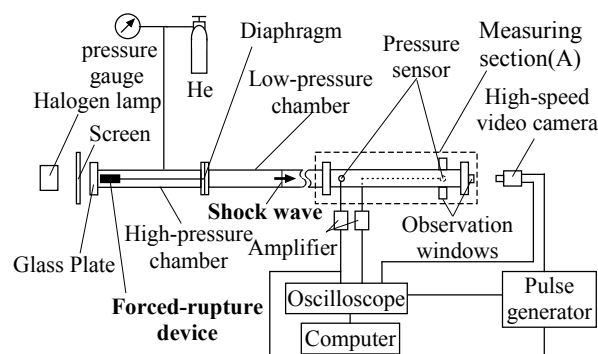


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

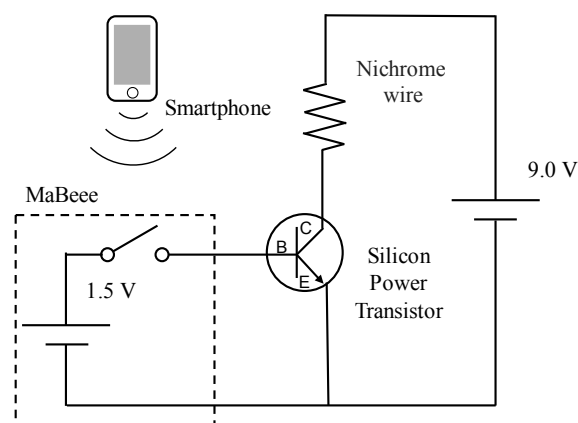


Fig. 2 Circuit diagram of forced-rupture device

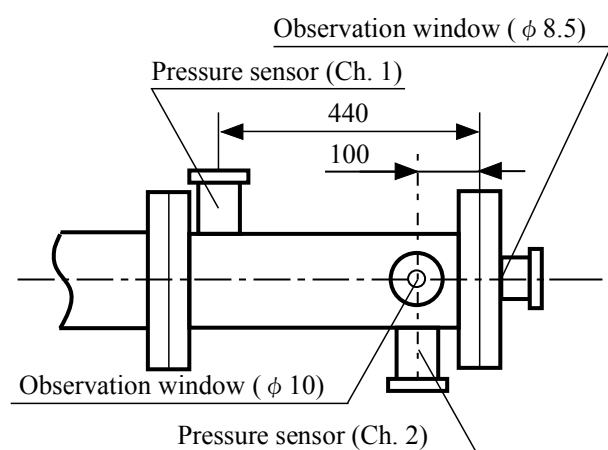


Fig. 3 Detail of measuring section (A)

の高圧力室（長さ1,000mm）と低圧力室（同4,000mm）からなる隔膜式の衝撃波管である。駆動気体にはHeを用い、試料気体は空気とした。高圧力室と低圧力室の間に隔膜としてPolyethylene Terephthalate (PET) フィルムを設置した。強制破膜法では強制破膜装置を高圧力室に設置した。この強制破膜装置は加熱したニクロム線で隔膜を破膜させる装置であり、隔膜の中心に取り付けたニクロム線と接続している。一定の高圧力室圧力を保持し、強制破膜装置を駆動させ、衝撃波を発生させた。隔膜の破膜過程は低圧力室の管端に設置した観察窓から高速度ビデオカメラ（ナックイメージテクノロジー製GX-3；モノクロ）で撮影した。ハロゲンランプ（日動工業製HS-500L）の光をスクリーンで散乱させ、高圧力室側から隔膜を照らした。隔膜には遮光性のある白色PETフィルム（帝人フィルムソリューション製FW2, 339）を用いており、隔膜が破れ高圧力室側から漏れた光を撮影することで、破膜過程を撮影した。強制破膜装置の回路図を図2に示す。回路はスイッチ部とニクロム線駆動部で構成されている。シリコンパワートランジスタ（日本電気株式会社製2SD2164）を用いて、スイッチ部とニクロム線駆動部を接続する。スイッチはMaBee（ノバルス製乾電池型通信機器）を用いており、衝撃波管外部からBluetoothでスマートフォンと接続し、操作ができる。スイッチを入れることでシリコンパワートランジスタに電流が流れ、ニクロム線を加熱する。発生させた衝撃波は図1の測定部（A）で測定する。図3に図1の測定部（A）を側面から見た詳細を示す。測定部には2つの圧力センサー（ジェイテクト製PMS-5M-2）を隔膜から3,560mm位置（管端から440mm位置）、3,900mm位置（管端から100mm位置）に設置し、それぞれチャンネル1（Ch. 1）、チャンネル2（Ch. 2）とした。これらの圧力センサーの信号をアンプを介してオシロスコープに入力し、圧力波形を取得した。

また、発生させた衝撃波をシュリーレン法⁷⁾を用いて可視化し、高速度ビデオカメラで撮影した。図4にシュリーレン光学系の実験装置概略を示す。ハロゲンランプの光を両凸レンズで平行光にして、衝撃波管側面の観察窓を通した。平行光は衝撃波管内を通ったあと、

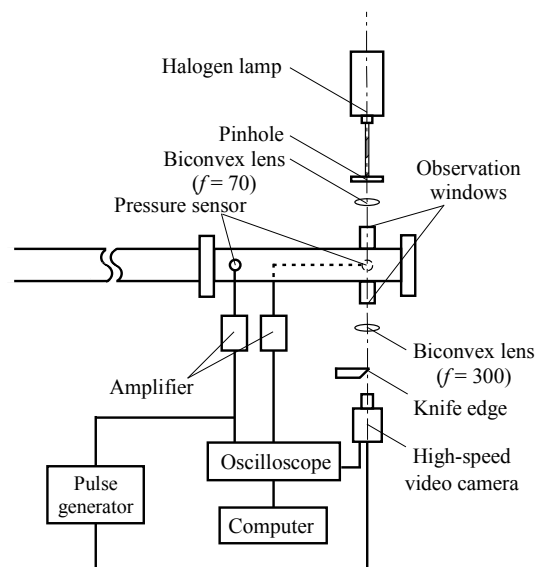


Fig. 4 Schematic view of experimental setup of Schlieren method

両凸レンズで集光する。集光した光の一部をナイフエッジで遮り、高速度ビデオカメラで撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1. 強制破膜装置による高圧力室圧力の制御

本研究では低圧力室条件大気圧で実験を行った。高圧力室圧力は0.68MPa、0.71MPaとし、強制破膜法を用いて衝撃波を発生させた。またその高圧力室圧力付近で自然破膜させ、衝撃波を発生させた。圧力センサーで取得した圧力波形を図5に示す。左の図は強制破膜法、右の図は自然破膜で取得した圧力波形を示している。図の横軸はCh. 1の圧力センサーが入射衝撃波を検出してから経過時間を示しており、図の縦軸は圧力センサーが検出した絶対圧力を示している。図中の赤の実線はCh. 1の圧力センサー、青の実線はCh. 2の圧力センサーの測定結果をそれぞれ示している。図5より強制破膜法と自然破膜はどちらも0μsec、600μsec付近において不連続な圧力変化がみられ、圧力波形の形状が同じである。このことから発生した衝撃波に差異はないと考えられる。次に圧力波形から衝撃波のマッハ数を取得した。図6に高圧力室圧力と入射衝撃波マッハ数 M_s の関係を示す。図の横軸は高圧力室圧力（絶対圧力）、図の縦軸は入射衝撃波マッハ数である。図中の赤のプロットは強制破膜法の実験値を示している。黒のプロットは自然破膜の実験値を示している。図中の黒の実線は理想気体を仮定した理論値⁸⁾を示している。赤のプロットをみると強制破膜法の高圧力室圧力は0.68MPa、0.71MPaとなっており、一定の圧力に制御できていることがわかる。また強制破膜法で得られた入射衝撃波マッハ数は自然破膜と同様にばらつきが少ない。高圧力室圧力0.71MPaの強制破膜法の結果を見ると入射衝撃波マッハ数は自然破膜と比べわずかに低い。以上から強制破膜装置は高圧力室圧力を制御し、マッハ数の再現性が高い衝撃波を発生させることができる。

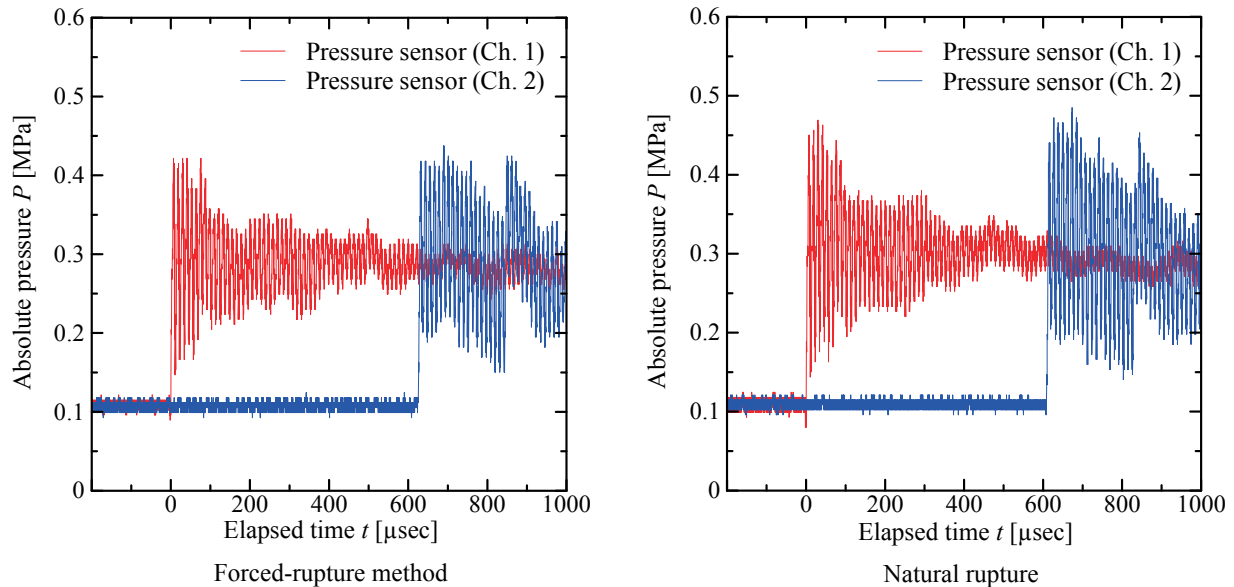


Fig. 5 Pressure waveforms of shock wave

3.2. 隔膜の破膜過程

強制破膜装置を用いた際の隔膜の破膜過程を高速度ビデオカメラ（モノクロ）で撮影した。高速度ビデオカメラの撮影速度は80,000frames/sec、露光時間は12.5μsecであり、隔膜の破膜過程を十分に観察することができる。図7に強制破膜法と自然破膜の破膜過程の時間変化を示す。図の上段は強制破膜法の破膜過程、図の下段は自然破膜の破膜過程をそれぞれ示している。図の下段の時間は隔膜が破膜を開始してから経過時間を示している。また、一番左の図は隔膜を設置する前の撮影画像であり、強制破膜法では強制破膜装置の影が撮影されている。図7よりどちらも管中心から破膜していることがわかる。強制破膜法は中心からの広がりには偏りがあるが、自然破膜は中心から全体に広がるように破膜していることがわかる。強制破膜法の破膜過程の偏りはニクロム線の加熱により初期開口状態が複雑なためだと考えられる。そのため、今後は初期開口状態が点状や円形となるような工夫が必要であると考えている。

次に図7の撮影画像から強制破膜法と自然破膜の隔膜の開口率の時間変化を求めた。図8に隔膜の開口率の時間変化を示す。ここで開口率とは管の断面積に対する隔膜の開口面積であり、隔膜を設置する前の撮

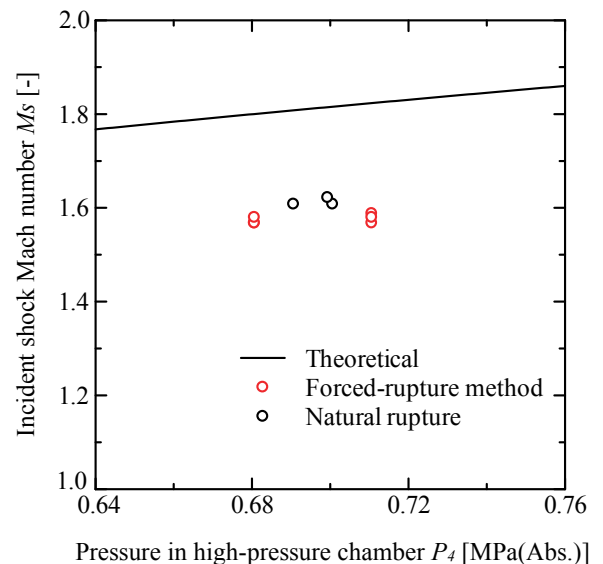


Fig. 6 Relationship between pressure in high-pressure chamber and incident shock Mach number

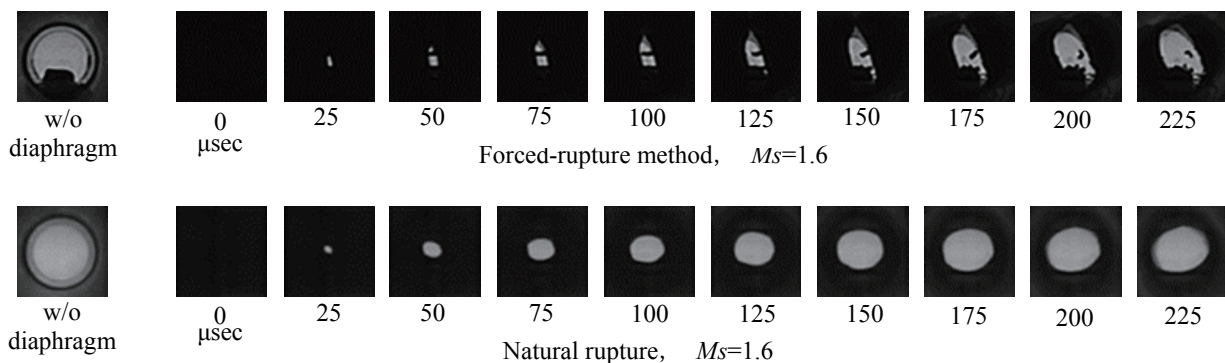


Fig. 7 Time changes in the rupture process of forced-rupture method and natural rupture

影画像が最大の開口率である。図の横軸は隔膜が破膜を開始してから経過時間を示しており、左の縦軸は自然破膜の隔膜の開口率、右の縦軸は強制破膜法の隔膜の開口率を示している。強制破膜法では強制破膜装置の影があるため、擬似的な開口率であることに注意する。図8より、最終的な開口率はどちらの場合においても65%程度であり、最終的な開口面積は同程度である。また、150 μ secまでの傾きをみると、自然破膜の方が傾きは大きいことから開口速度が速く、最終的な開口率になるまでの開口時間は短い。そのため、開口時間が短いと発生する衝撃波が強くなること⁹⁾から、入射衝撃波マッハ数のわずかな差に影響を及ぼしていると考えている。以上のことから、今後、初期開口状態の改良に加え、開口時間が短くなるような改良が必要であると考えている。

3.3. シュリーレン法による衝撃波の可視化

強制破膜法で発生させた衝撃波をシュリーレン法を用いて可視化し、入射衝撃波面を高速ビデオカメラ（モノクロ）で撮影した。高速ビデオカメラの撮影速度は破膜過程の撮影と同様に80,000frames/sec、露光時間は1 μ secとした。図9に入射衝撃波面のシュリーレン画像を示す。図の左は強制破膜法、右は自然破膜を示している。図の下の時間は、図3のCh.1の圧力センサーが入射衝撃波を検出してから経過時間を示している。図9より強制破膜法と自然破膜で発生させた入射衝撃波はどちらもほぼ垂直な衝撃波が形成されていることがわかる。したがって、強制破膜法で衝撃波を発生させた場合でも、入射衝撃波面に差異はない。このことから高速流体の物体周りの流れ場の可視化実験などに強制破膜装置を活用できると考えている。

4. まとめ

高圧室圧力を一定の圧力に制御し再現性を高めることを目的とし、簡易的な強制破膜装置を既存の衝撃波管に導入した。強制破膜装置はBluetoothを利用して衝撃波管外部から無線で操作し、加熱したニクロム線で隔膜を破膜させ、衝撃波を発生させる装置である。発生させた衝撃波の圧力波形を圧力センサーを用いて取得した。また隔膜の破膜過程を高速ビデオカメラで撮影し、隔膜の開口率を求めた。さらに発生させた衝撃波をシュリーレン法を用いて可視化し、入射衝撃波面を高速ビデオカメラで撮影した。これらの実験結果から発生させた衝撃波および隔膜の破膜挙動について考察した。以下に主な結果を示す。

- (1) 強制破膜装置を用いて高圧室圧力を制御し、衝撃波を発生させることができた。
- (2) 強制破膜法で発生させた衝撃波の入射衝撃波マッハ数のばらつきは自然破膜と同程度であり、入射衝撃波マッハ数は自然破膜と比較しわずかに低い。
- (3) 強制破膜法と自然破膜の破膜はどちらも管中心からはじまり、隔膜の開口過程には差異がある。
- (4) 強制破膜法の最終的な開口率は自然破膜と同程度であるが、最終的な開口率になるまでの時間は自然破膜に比べ遅い。

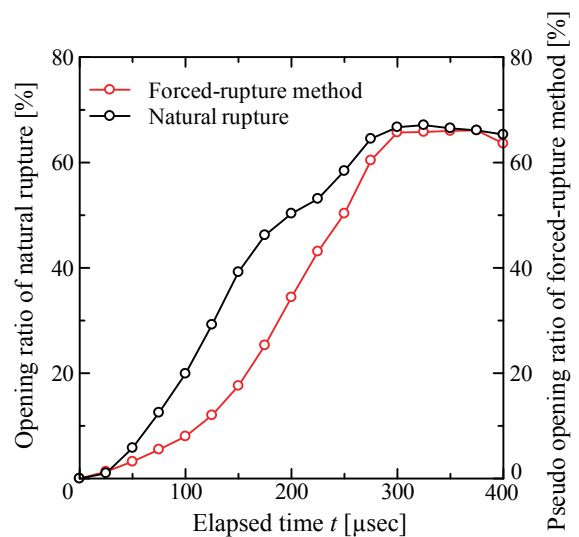


Fig. 8 Time changes in the opening ratio of diaphragm

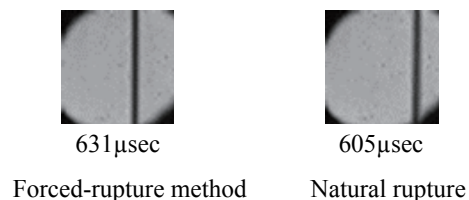


Fig. 9 Schlieren images of incident shock front

- (5) 強制破膜法と自然破膜で発生させた衝撃波の入射衝撃波面はどちらもほぼ垂直となる。
- (6) 強制破膜法で衝撃波を発生させた場合でも、入射衝撃波面に差異はない。

参考文献

- 1) 例えば、高山和喜編、「衝撃波ハンドブック」、シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社、1995、pp.538-540.
- 2) 阿部晃久、菅原和也、山田洋平、「磁力支援型高速開口弁を有する無隔膜衝撃波管の性能評価」、日本機械学会論文集（B編）、Vol.79, No.806, 2013、pp.99-100.
- 3) 山崎颯太、原澤彰、船津賢人、「複数の狭帯域フィルターを用いた空気反射衝撃波背後の可視化」、平成28年度衝撃波シンポジウム講演論文集、2C2-2.pdf, 2017, 5pages.
- 4) Yamazaki, S., Harasawa, A., and Funatsu, M, "Experimental Study of Radiation behind Reflected Air Shock Waves," *Proc. 31st Int'l Sympo. Shock Waves*, SBM000137.pdf, 2017, 6pages.
- 5) 木村敦史、山崎颯太、船津賢人、「複数の狭帯域フィルターを用いた空気反射衝撃波背後の放射測定—低圧力室条件300Paにおける測定—」、平成29年度衝撃波シンポジウム講演論文集、P-18.pdf, 2018, 5pages.
- 6) 木村敦史、山崎颯太、船津賢人、「空気反射衝撃波

背後の放射に関する実験的研究－低圧力室条件が放射強度に及ぼす影響－」，第50回流体力学講演会講演集, JSASS-2018-2054-F-1E03.pdf, 2018, 4pages.

- 7) A. J. Smits and T. T. Lim, "*Flow Visualization Techniques and Examples*," Imperial College Press, 2012, pp.241-244.
- 8) 例えば, 生井武文, 松尾一泰, 「圧縮性流体の力学」, 理工学社, 1977, pp.46-51.
- 9) 兼子航, 吉原淳之介, 石井一洋, 「円管における隔膜の開口過程が衝撃波強さに及ぼす影響」, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.835, 2016, p.15-00541.