

簡易な強制破膜装置を援用した空気衝撃波の形成

田島 尚起 (群馬大院理工), 石井 翔太 (群馬大院理工)
 船津 賢人 (群馬大院理工), 中沢 信明 (群馬大院理工)

Formations of Air Shock Waves with Simplified Forced-rupture Devices

TAJIMA Naoki, ISHII Shota, FUNATSU Masato, NAKAZAWA Nobuaki
 (Graduate School of Science and Technology, Gunma University)

ABSTRACT

In our laboratory, the characteristics of radiation behind air shock waves have been studied systematically by using a diaphragm-type shock tube. In previous studies, a simplified forced-rupture device with nichrome wire was introduced in the diaphragm-type shock tube. Shock waves were generated by the forced-rupture method. However, the rupture process of the forced-rupture method was different from the one of the natural rupture. In this study, the forced-rupture device was improved so that the diaphragms can be ruptured from one point in the center of the diaphragms. The shock waves were generated by using the improved forced-rupture device, and the pressure waveforms of the shock waves were obtained by using pressure sensors. The incident shock fronts were visualized by the Schlieren 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1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の多くの分野に利用されている。衝撃波管は隔膜式衝撃波管と無隔膜式衝撃波管の2種類に大別できる¹⁾。隔膜式衝撃波管は構造が単純であり、簡単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などを用いることで装置の連続駆動が可能であるが、構造が複雑で、弁を急速に開口させることが困難であるなどの課題がある²⁾。

本研究室では隔膜式衝撃波管を利用し、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、衝撃波背後の基礎的な放射に関する実験的研究を系統的に行っている^{3)~6)}。

以前までの研究^{7), 8)}では衝撃波発生再現性を高める方法として強制破膜法に着目した。強制破膜法の実験を行うためにBluetoothを利用した強制破膜装置を製作した。この強制破膜装置は衝撃波管外部から操作し、加熱したニクロム線により隔膜であるPETフィルムを破膜させることができる。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することができ、低コストであるなどの様々な利点がある。しかし、この強制破膜装置を用いて強制破膜法により衝撃波を発生させた場合、自然破膜と比較して隔膜の開口

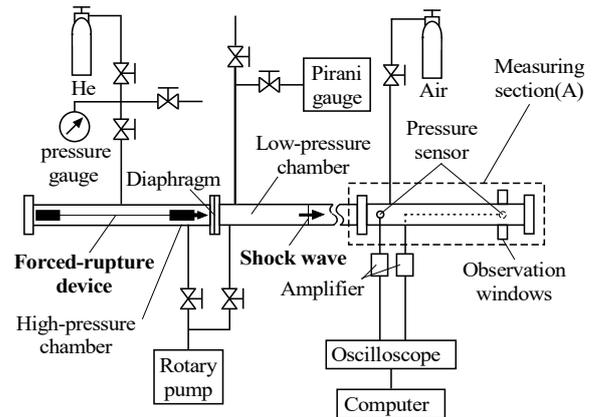


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

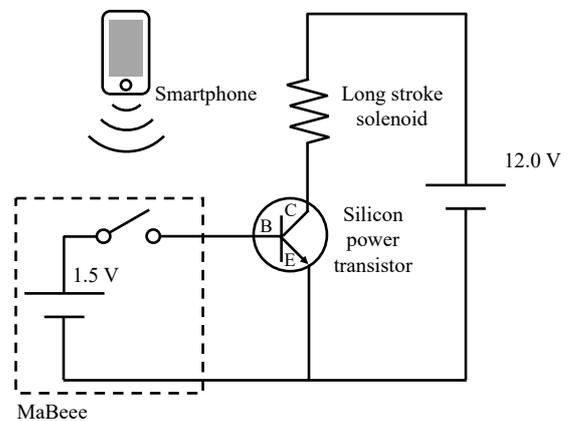


Fig. 2 Circuit diagram of forced-rupture device

過程に偏りがあり，入射衝撃波マッハ数はわずかに低かった。

そこで，本研究では隔膜の開口形状に偏りがなく，管中心の一点から隔膜を破膜できるように強制破膜装置の改良を行った．以前に製作した強制破膜装置のニクロム線をソレノイドに変更し，ソレノイドの先端に取り付けた針を押し出し，撃針により隔膜を破膜させる方法へ変更した．改良した強制破膜装置を用いて衝撃波を発生させ，発生させた衝撃波の圧力波形を圧力センサーで取得した．また発生させた衝撃波はシュリーレン法⁹⁾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改良した強制破膜装置により形成された衝撃波について考察した．

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80 mmで高圧力室(長さ1,000 mm)と低圧力室(長さ4,000 mm)からなる隔膜式衝撃波管である．駆動気体にはHeを用い，試料気体には乾燥空気(体積比率 $N_2 : O_2 = 79 : 21$)を用いた．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ソレノイドを用いて撃針により隔膜を破膜させる装置である．ソレノイドは管中心の一点で隔膜を撃針できるように高さを調整した．強制破膜法では一定の高圧力室圧力を保持し強制破膜装置を駆動させることで衝撃波を発生させた．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ソレノイド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2SD2164)を用いてスイッチ部とソレノイド駆動部を接続する．スイッチはMaBeece(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，ソレノイドを駆動させる．隔膜が低圧力室と高圧力室の圧力差により膨らんだ場合にも撃針できるようにロングストロークソレノイド(タカハ機工製CH12840062)を使用しており，針を35 mm可動させることができる．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)を側面からみた詳細を示す．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3,560 mm位置(管端から440 mm位置)，3,900 mm位置(管端から100 mm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はアンプを介してオシロス

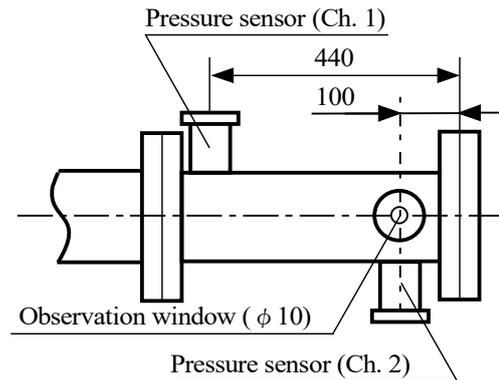


Fig. 3 Detail of measuring section (A)

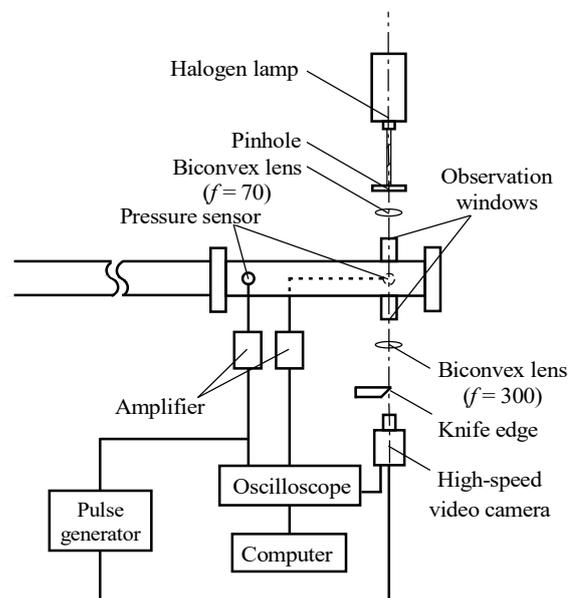


Fig. 4 Schematic view of experimental setup (Schlieren)

コープに入力し，圧力波形を取得した．

また，発生させた衝撃波はシュリーレン法を用いて可視化し，高速ビデオカメラ(ナックイメージテクノロジー製GX-3)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，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 強制破膜法で発生させた衝撃波の圧力波形

低圧力室圧力大気圧，ねらいの高圧力室圧力0.46, 0.56, 0.71 MPa(絶対圧力)とし，本研究では以下の3種類の方法で実験を行った．1つ目は改良した強制破膜装置を用いて強制破膜法により衝撃波を発生させる

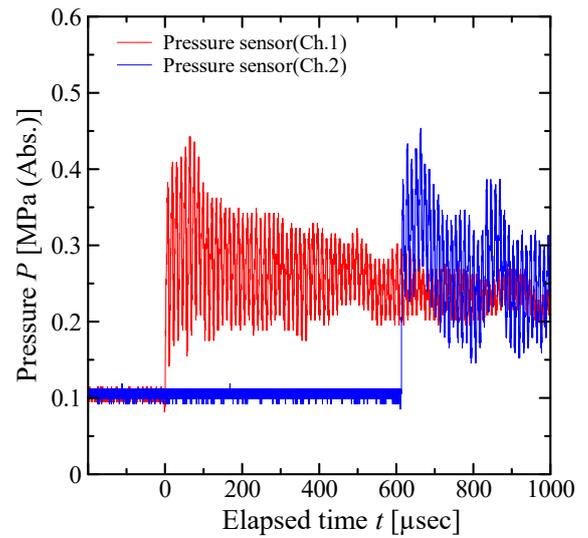
方法である。2つ目はねらいの高圧力室圧力付近で隔膜を自然破膜させ、衝撃波を発生させる方法である。

3つ目は強制破膜装置を高圧力室内に設置し、隔膜を自然破膜させ、衝撃波を発生させる方法である。図5に圧力センサーで取得した圧力波形の一例を示す。上の図は強制破膜法、下の図は自然破膜で取得した圧力波形をそれぞれ示している。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の経過時間を示しており、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、自然破膜はどちらも0 μsec 、600 μsec 付近において不連続な圧力変化がみられる。また強制破膜法で得られた圧力波形は自然破膜に比べ、全体的に圧力が低いが、圧力波形の形状は同じである。このことから強制破膜装置を用いた場合でも衝撃波が発生していることがわかる。

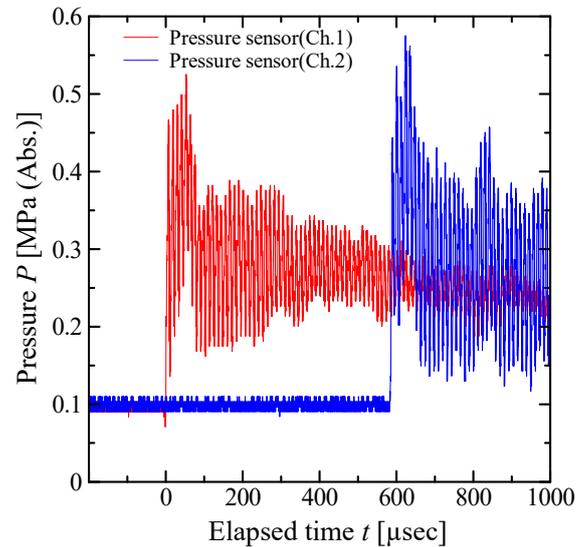
3.2 高圧力室圧力と入射衝撃波マッハ数の関係

圧力波形から発生させた衝撃波のマッハ数を取得した。図6に低圧力室圧力大気圧における高圧力室圧力と入射衝撃波マッハ数の関係を示す。図の横軸は高圧力室圧力（絶対圧力）、縦軸は入射衝撃波マッハ数を示し、図中の赤のプロットは強制破膜法の実験値、黒のプロットは自然破膜の実験値、青のプロットは高圧力室に強制破膜装置を設置し、自然破膜させた実験値を示している。また図中の黒の実線は理想気体を仮定した理論値¹⁰を示している。赤と黒のプロットをみると自然破膜では高圧力室圧力にばらつきがあるのに対し、強制破膜法ではそれぞれねらいの高圧力室圧力0.46, 0.56, 0.71 MPaで制御できていることがわかる。強制破膜法で得られた入射衝撃波マッハ数は自然破膜で得られた入射衝撃波マッハ数より低く、理論との誤差は10%程度である。次に青のプロットをみると高圧力室に強制破膜装置を設置し、自然破膜させた場合で得られた衝撃波の入射衝撃波マッハ数は自然破膜よりわずかに低い。このことから低圧力室圧力大気圧の場合では、強制破膜装置を高圧力室に設置したことにより発生させた衝撃波の入射衝撃波マッハ数が低減したと考えられる。これは管の断面積に対し、ソレノイドの投影面積の占める割合が約40%と大きいため、ソレノイドが衝撃波の形成過程に影響を与えているのではないかと考えている。また高圧力室に強制破膜装置を設置し、自然破膜させた場合で得られた衝撃波の入射衝撃波マッハ数は強制破膜法より高いことがわかる。

以上より低圧力室条件大気圧の場合では強制破膜法



Forced-rupture method



Natural rupture

Fig. 5 Pressure waveforms of shock waves

と自然破膜の隔膜の開口過程に差異があると考えられる。また隔膜の開口過程の差異が入射衝撃波マッハ数の差異に影響しているのではないかと考えている。

次に低圧力室圧力760 Pa、ねらいの高圧力室圧力は0.80 MPaとして、先ほどと同様に3種類の方法で衝撃波を発生させた。図7に低圧力室圧力760 Paにおける高圧力室圧力と入射衝撃波マッハ数の関係を示す。図中の赤のプロット、黒のプロット、青のプロット、黒の実線は図6と同様である。赤と黒のプロットをみると、低圧力室圧力大気圧の場合と同様に、自然破膜では高圧力室圧力にばらつきがあるが、強制破膜法ではねらいの高圧力室圧力0.80 MPaに制御できていること

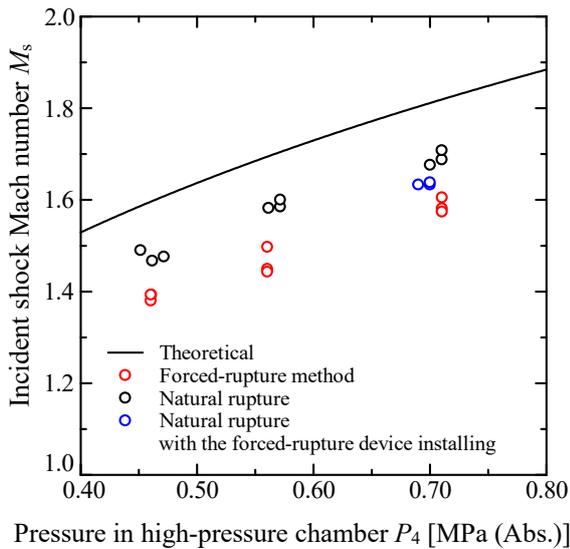


Fig. 6 Relationship between pressure in high-pressure chamber and incident shock Mach number ($P_1 = 0.1 \text{ MPa}$)

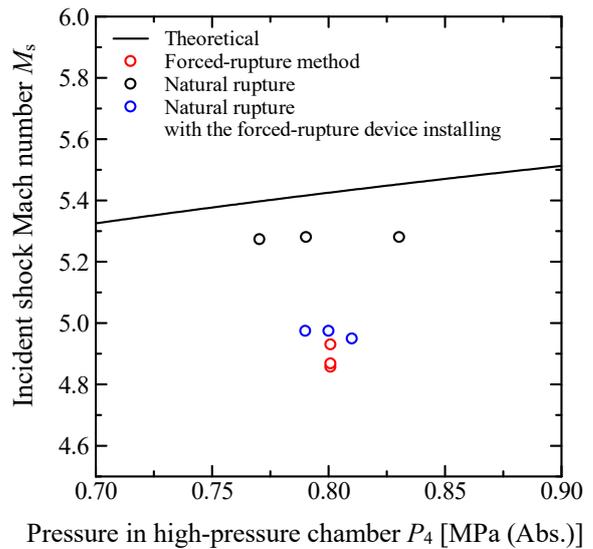


Fig. 7 Relationship between pressure in high-pressure chamber and incident shock Mach number ($P_1 = 760 \text{ Pa}$)

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より低く、理論との誤差は10%程度である。次に青のプロットをみると高圧力室に強制破膜装置を設置し、自然破膜させた場合で得られた衝撃波の入射衝撃波マッハ数は自然破膜より低いことがわかる。このことから低圧力室条件760 Paの場合でも低圧力室条件大気圧の場合と同様、高圧力室に強制破膜装置を設置した場合、発生させた衝撃波の入射衝撃波マッハ数が低減すると考えられる。また高圧力室に強制破膜装置を設置し自然破膜させた場合では得られた衝撃波の入射衝撃波マッハ数は強制破膜法と同程度であることがわかる。このことから強制破膜法と自然破膜で隔膜の破膜過程に差異がないと考えられる。これは低圧力室条件を760 Paにしたことにより、高圧力室と低圧力室の圧力差が大きくなったことが影響しているのではないかと考えている。

3.3 シュリーレン法による入射衝撃波面の可視化

低圧力室条件大気圧、ねらいの高圧力室圧力は0.71 MPaとし、強制破膜法で衝撃波を発生させ、シュリーレン法を用いて可視化した。可視化した入射衝撃波面を高速度ビデオカメラで撮影した。高速度ビデオカメラの撮影速度は80,000 frames/sec、露光時間は1 μsecとした。図8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の経過時間を示している。図8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

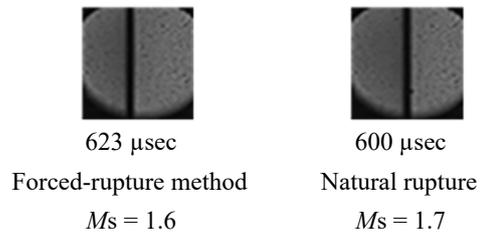


Fig. 8 Schlieren images of incident shock front

らもほぼ垂直な衝撃波が形成されていることがわかる。また入射衝撃波の厚さは衝撃波の発生方法にかかわらず、同程度である。したがって強制破膜法で衝撃波を発生させた場合でも隔膜の設置位置から測定部までの距離を十分にとることで、自然破膜と同様の厚さを持ったほぼ垂直な衝撃波が形成されると考えられる。

以上の実験結果から、今回改良した強制破膜装置では高圧力室圧力を一定に制御し、撃針により隔膜を管中心の一点から破膜させ、衝撃波を発生させることができる。しかし、高圧力室に強制破膜装置を設置することにより、入射衝撃波マッハ数が低減している可能性がある。そのため強制破膜装置をより小型にする、または高圧力室の管端付近に設置し衝撃波の形成に与える影響が少なくなるようにするなど、より改良を行う必要がある。

4. まとめ

本研究では以前に製作した強制破膜装置のニクロム

線をソレノイドに変更し、ソレノイドの先端に取り付けた針を押し出し、撃針により隔膜を破膜させる方法へ変更した。改良した強制破膜装置を用いて衝撃波を発生させ、発生させた衝撃波の圧力波形を圧力センサーで取得した。また発生させた衝撃波は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改良した強制破膜装置により形成された衝撃波について考察した。

- (1) 強制破膜装置を用いて高圧力室圧力を制御し、衝撃波を発生させることができた。
- (2) 強制破膜法で得られた圧力波形は自然破膜に比べ全体的に圧力が低い、形状はほぼ同じである。
- (3) 高圧力室に強制破膜装置を設置することにより、入射衝撃波マッハ数を低減させる可能性がある。
- (4) 入射衝撃波面は破膜方法にかかわらず、光学的測定部において、ほぼ垂直である。

参考文献

- 1) 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.99-110.
- 3) 山崎颯太, 石井翔太, 木村敦史, 船津賢人, 「空気反射衝撃波の放射観察」, 平成30年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 3A3-4, 2019, 5pages.
- 4) Ishii, S., Yamazaki, S., Kimura, A., and Funatsu, M., "Observations of Radiation behind Reflected Air Shock Waves," *Proc. 32nd Int'l Sympo. Shock Waves*, P-05-0229, 2019, 7pages.
- 5) Yamazaki, S., Harasawa, A., and Funatsu, M., "Experimental Study of Radiation behind Reflected Air Shock Waves," *Proc. 31st Int'l Sympo. Shock Waves*, SBM000137, 2017, 6pages.
- 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／第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演集, 1E03, 2018, 4pages.
- 7) 石井翔太, 山崎颯太, 木村敦史, 船津賢人, 中沢信明, 「簡易な破膜方法を利用した衝撃波の発生試験」, 平成30年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 1B1-1, 2019, 4pages.
- 8) 石井翔太, 山崎颯太, 船津賢人, 木村敦史, 「簡易な強制破膜法を用いた衝撃波の発生」, 第51回流体力学講演会／第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演集, 1C03, 2019, 5pages.
- 9) A. J. Smits and T. T. Lim, "Flow Visualization Techniques and Examples," Imperial College Press, 2012, pp.241-244.
- 10) 生井武文, 松尾一泰, 「圧縮性流体の力学」, 理工学社, 1977, pp.46-51.