

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 —

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

Experimental Study of Radiation behind Reflected Air Shock Waves - Influences of Low-pressure Chamber Conditions on Radiation Intensities -

by

Atsushi KIMURA, Sota YAMAZAKI, and Masato FUNATSU

ABSTRACT

In our laboratory, the characteristics of radiation behind air shock waves have been studied systematically. In previous studies, air shock waves with different Mach number were generated by changing high-pressure chamber conditions and low-pressure chamber conditions. Radiation intensities behind air shock waves were observed by using a cooled-CCD camera. The radiation intensities were increased with an increase in the incident shock Mach number. Also, the radiation intensities were increased dramatically with incident shock Mach number of 4.8, and the maximum radiation intensities were observed with incident shock Mach number of 5.3. In this study, air shock waves with different Mach number were generated by increasing pressures in high-pressure chamber under three types of low-pressure chamber conditions. The time change of the radiation intensities behind air shock waves was investigated in detail by using a high-speed video camera. As a result, the radiation was observed behind reflected air shock waves. The radiation intensities were increased significantly when the pressures behind reflected air shock waves were higher than about 0.1MPa. Therefore, it is considered that the radiation intensities were influenced by the pressure behind reflected air shock waves.

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。マッハ数の高い衝撃波では衝撃波背後は高温となることから、気体の放射や電離などの物理化学反応の解明など、さまざまな分野に用いられている¹⁾。

本研究では、衝撃波管を用いた空気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^{2)~5)}。以前の研究では、高圧力室圧力と低圧力室圧力を変化させ、異なるマッハ数の空気衝撃波を発生させた。これらの空気反射衝撃波背後の放射強度を取得し、マッハ数と放射強度の関係について調べた。その結果、入射衝撃波マッハ数4.8付近から放射強度は急激に強くなり、入射衝撃波マッハ数5.3付近で放射強度は最も強くなった²⁾。

本研究では複数の低圧力室条件を選定し、それらの低圧力室条件のもと高圧力室圧力を増加させ、異なるマッハ数の衝撃波を発生させた。これらの衝撃波背後の積算放射強度を冷却CCDカメラを用いて取得し、衝撃波に関連するすべての放射を撮影した。また高速度ビデオカメラを用いて放射を撮影し、衝撃波背後の放射強度の時間変化について詳しく調べた。これらの実験結果から低圧力室条件が放射強度に及ぼす影響を考察した。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置概略を示す。衝撃波管は、内径80mmの高圧力室(長さ1,000mm)と低圧力室(長さ4,000mm)からなる隔膜式の衝撃波管である。駆動気体にはHe, 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、高圧力室圧力を高めることで隔膜を破膜させ、衝撃波を発生させた。図2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つの圧力センサーを隔膜から3,560mm位置(管端から440mm)、3,900mm(管端から100mm)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。管内に生じる放射は、

冷却CCDカメラと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)により撮影した。

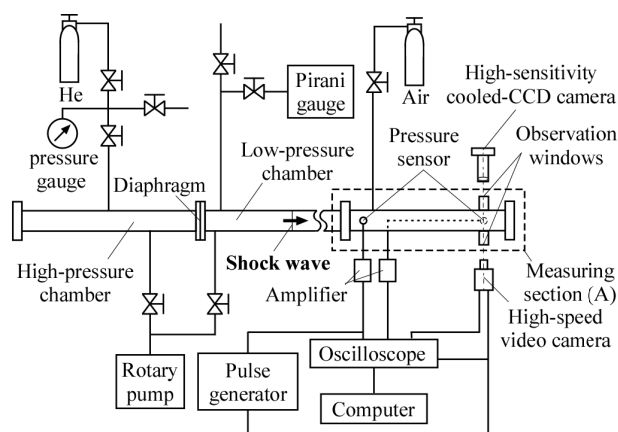


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

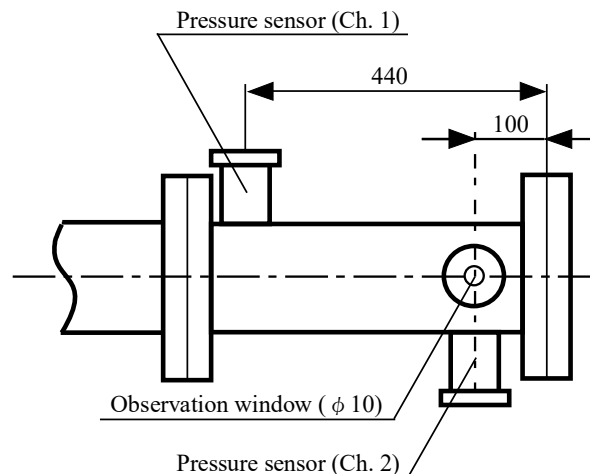


Fig. 2 Detail of measuring section (A)

3. 実験結果および考察

3-1 衝撃波マッハ数の計測

図3に高圧力室圧力 P_4 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、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低圧力室の圧力条件 P_1 が300Paの実験値を示している。青と黒のプロットは以前の研究^{3),4)}で取得した低圧力室条件600Paと760Paの実験値をそれぞれ示している。図中の赤、青、黒の実線は理想気体を仮定したそれぞれの低圧力室条件に対する理論値¹⁾を示している。これより、高圧力室圧力の増加に伴い入射衝撃波マッハ数は増加し、実験値は理論値とほぼ一致することがわかる。

3-2 入射衝撃波マッハ数と積算放射強度の関係

衝撃波管内に生じるすべての放射を調べるため、冷却CCDカメラを用いて積算放射強度を取得した。以前の研究³⁾から、同じマッハ数の衝撃波を発生させた場合には、積算放射強度は低圧力室条件により差異があることがわかっていて、そこで低圧力室条件が放射強度に及ぼす影響を詳しく調べるため、低圧力室条件を複数選定し積算放射強度を取得した。本研究では冷却CCDカメラの露光時間は5秒とした。これは衝撃波に関連する現象がすべて終わるまでの時間(約4msec)よりも十分に長い時間である。図4に入射衝撃波マッハ数と積算放射強度の関係を示す。横軸は入射衝撃波マッハ数、縦軸は積算放射強度である。図中の赤のプロットは低圧力室条件300Paの実験値を示している。また青と黒のプロットはそれぞれ以前の研究^{3),4)}で取得した低圧力室条件600Pa、760Paの実験値を示している。図4からそれぞれの低圧力室条件で入射衝撃波マッハ数の増加に伴い積算放射強度が増加することがわかる。また低圧力室条件によって同じ強度の積算放射強度が得られた入射衝撃波マッハ数は異なる。さらに低圧力室条件300Paでは、入射衝撃波マッハ数6付近、600Paではマッハ数5付近、760Paではマッハ数5付近から積算放射強度が急激に増加した。これらの積算放射強度が急激に強くなったマッハ数で取得した放射強度は低圧力室条件300Paが最も強い。

3-3 高速度ビデオカメラによる放射強度分布の時間変化

衝撃波背後の放射強度の時間変化を高速度ビデオカメラを用いて取得した。放射強度は積算放射強度が急激に増加した入射衝撃波マッハ数に最も近いマッハ数で取得した。高速度ビデオカメラの撮影速度は60,000frames/sec、露光時間は16.7 μ secとした。図5に放射強度の時間変化を擬似カラー表示して示す。代表的な実験結果として、低圧力室条件300Paでは入射衝撃波マッハ数5.9、低圧力室条件600Paでは入射衝撃波マッハ数5.1、低圧力室条件760Paでは入射衝撃波マッハ数4.9を選定した。図の放射強度は下のカラーバーに対応する。擬似カラー表示された画像の下の時間は図2に示すCh. 1の圧力センサーが入射衝撃波を検出してから画像が撮影されるまでの時間を示している。例えば、図の最上段の左から2番目の画像はCh. 1の圧力センサーが入射衝撃波を検出してから389 μ sec経過後に撮影された画像である。0 μ secの白い円は観察窓の位置を表している。また t_R は観察窓と同様の位置に設置されたCh. 2の圧力センサーが反射衝撃波を検出した時間であり、時間軸に対応するように黒の実線で示した。図5からすべての低圧力室条件において放射は反射衝撃波背後で強くなり、その後弱くなることがわかった。また低圧力室条件300Paでは放射が初めに観測されてから最大の放射強度が観測されるまでの時間は100 μ secであるのに対し、600Pa、760Paではそれぞれ168 μ sec、167 μ secである。このことから低圧力室条件300Pa

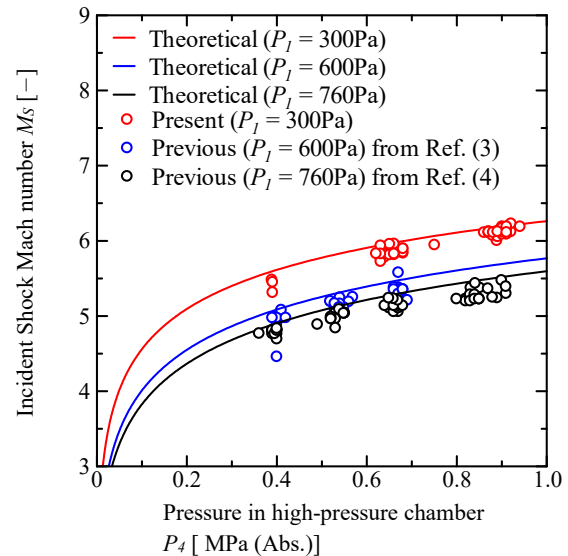


Fig. 3 Relationship between pressure in high-pressure chamber and incident shock Mach number

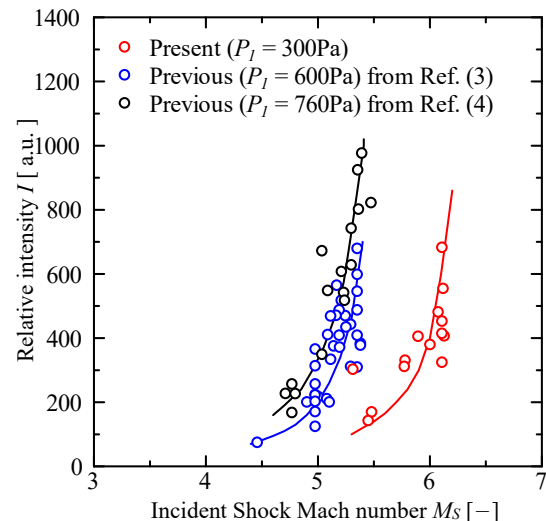


Fig. 4 Relationship between incident shock Mach number and relative intensity

では短い時間で最大の放射強度となることがわかった。放射強度の時間変化について定量的に示すため観察窓中心における放射強度の時間変化を取得した。図6, 7, 8に低圧力室条件300Pa, 600Pa, 760Paの実験結果をそれぞれ示す。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、縦軸は相対的な放射強度である。また、図中に、観察窓の位置に入射衝撃波が到達してから反射衝撃波が到達するまでの時間領域(Incident)と、反射衝撃波到達後の時間領域(Reflected)を示す。図6, 7, 8からすべての低圧力室条件においてIncidentでは放射強度がほとんど見られず、Reflectedで放射強度が強くなり、その後弱くなった。また放射強度の最大値をみると低圧力室条件300Paが最も強く、低圧力室条件600Pa、760Paと比べ2倍以上の強度となっている。

次に衝撃波背後の圧力と放射の関係について考える。図5で選定した実験条件における反射衝撃波背後の圧力(最大放射強度が観測されたときの圧力)はCh. 2の圧力センサーから、低圧力室条件300Paでは0.08MPa、600Paでは

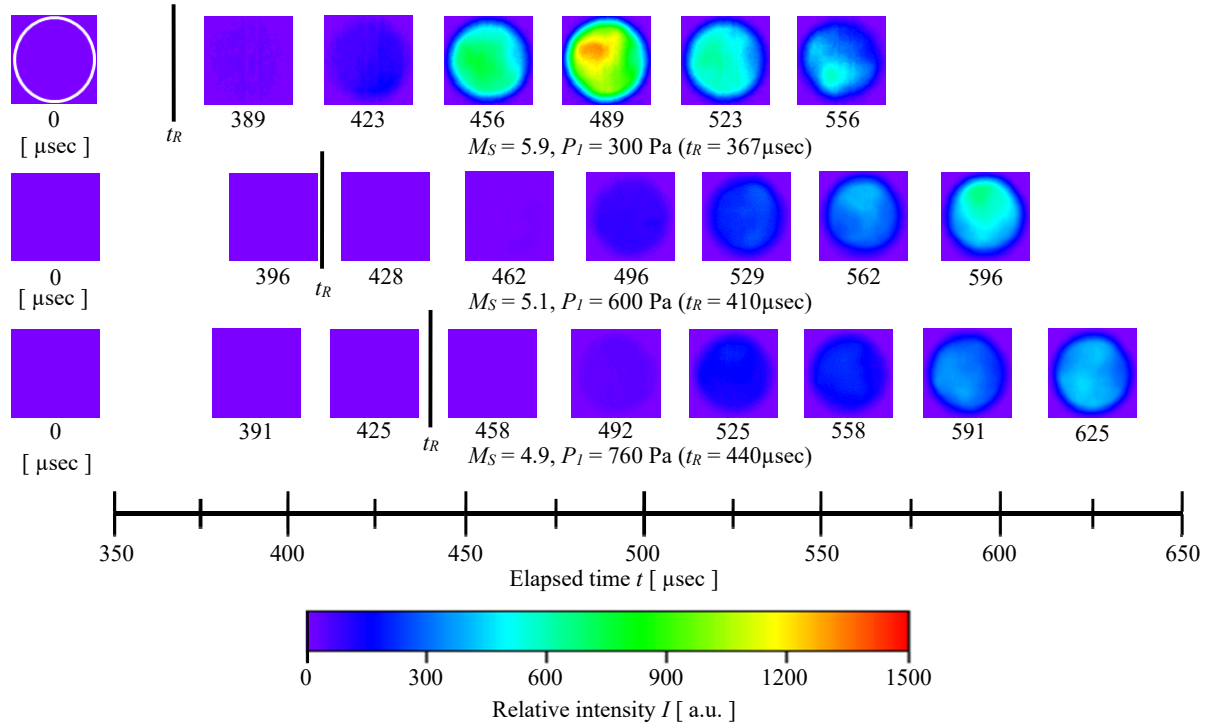


Fig. 5 Time change of relative intensity distributions behind shock waves

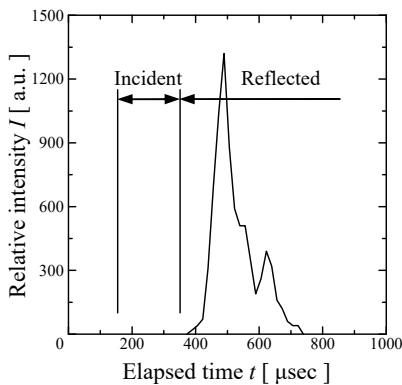


Fig. 6 Profiles of relative intensity behind shock waves ($P_l = 300\text{Pa}$, $M_S = 5.9$)

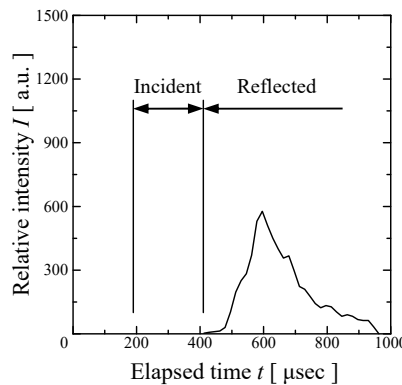


Fig. 7 Profiles of relative intensity behind shock waves ($P_l = 600\text{Pa}$, $M_S = 5.1$)

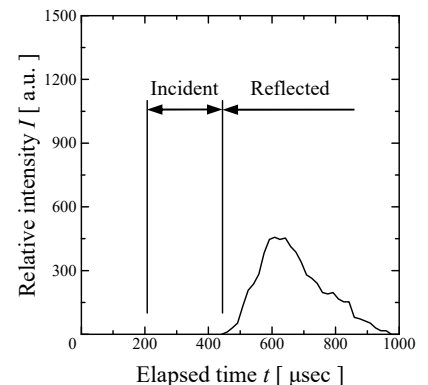


Fig. 8 Profiles of relative intensity behind shock waves ($P_l = 760\text{Pa}$, $M_S = 4.9$)

0.11MPa, 760Paでは0.15MPaであり, これらは反射衝撃波背後の理論圧力値¹⁾とほぼ一致している. これらの結果から反射衝撃波背後の圧力が一定値以上 (0.1MPa程度) となると放射強度が急激に強くなることわかる. 以上のことから, 低圧力室条件は放射強度の増加にわずかに影響を及ぼすが, 著しい放射強度の増加は反射衝撃波背後の圧力状態によるものと考えられる.

4. まとめ

本研究では複数の低圧力室条件を選定し, それらの低圧力室条件のもと高圧力室圧力を増加させ, 異なるマッハ数の衝撃波を発生させた. これらの衝撃波背後の積算放射強度を冷却CCDカメラを用いて取得し, 衝撃波に関するすべての放射を撮影した. また高速度ビデオカメラを用いて放射を撮影し, 衝撃波背後の放射強度の時間変化について詳しく調べた. これらの実験結果から低圧力室条件が放射強度に及ぼす影響を考察した. 以下に主な結論を示す.

(1) 高圧力室圧力の増加に伴い入射衝撃波マッハ数は増加する.

- (2) 入射衝撃波マッハ数の増加に伴い, 放射強度は強くなる. また, 低圧力室条件によって積算放射強度が急激に増加するマッハ数は異なる.
- (3) 放射強度は反射衝撃波背後で強くなり, その後弱くなる.
- (4) 反射衝撃波背後の圧力が一定値以上となると放射強度が急激に強くなる.
- (5) 低圧力室条件は放射強度の増加にわずかに影響を及ぼすが, 著しい放射強度の増加は反射衝撃波背後の圧力状態によるものと考えられる.

参考文献

- 1) 例えば, 松尾一泰, 「圧縮性流体力学—内部流れの理論と解析—」, 理工学社, pp.97-100, 1994.
- 2) 青木俊輔, 岡本智宏, 呉益邦, 船津賢人, 「空気反射衝撃波背後の放射に関する基礎的研究」, 第46回流体力学講演会／第32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, JSASS-2014-2044.pdf, 5pages, 2014.

- 3) 原澤彰, 青木俊輔, 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150Paにおける測定—」, 平成28年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2C2-3.pdf, 5pages, 2017.
- 4) 山崎颯太, 原澤彰, 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—複数の狭帯域フィルターを用いた放射測定—」, 第49回流体力学講演会/第35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, JSASS-2017-2127.pdf, 6pages, 2017.
- 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.pdf, 6pages, 2017.