

# 空気反射衝撃波背後の発光に関する実験的研究

## Experimental Study of Emissions behind Air Reflected Shock Waves

群馬大院工・院 鈴木 拓也  
群馬大院工・院 岡本 智宏  
群馬大工・学 呉 益邦  
群馬大院工 船津 賢人  
群馬大工 高草木 文雄

### Abstract

In order to investigate the characteristics of emissions behind air shock waves, the emissions in a shock tube were obtained with increasing incident shock Mach number and were photographed by a cooled CCD camera and by a high-speed video camera. It was found that the emission intensity increased with increasing shock Mach number and theoretical temperature behind reflected shock waves, and it decreased over the incident shock Mach number of 5.3. It was confirmed by the experiment that the emissions came from the region behind a reflected shock wave.

### 1. はじめに

地球大気圏に再突入する宇宙往還機は、その前方に強い衝撃波が発生し、機体は著しい空力加熱を受ける。空力加熱は対流加熱と放射加熱にわけられ、機体の突入速度が速いほど放射加熱の影響は大きくなる。そのため、機体設計において衝撃波背後の放射特性<sup>1), 2)</sup>を解明することは重要である。筆者らの研究室では、高温高压気体の放射特性の解明を目的に、衝撃波管による実験的研究を系統的に行っている<sup>3)</sup>。

本研究では、衝撃波管内に生じる発光の特性を知るため、衝撃マッハ数の増加に伴う発光強度を冷却CCDカメラ（露光時間5sec）により取得し、入射衝撃マッハ数とその積算発光強度および衝撃波背後の理論温度の関係を実験的に調べた。また、高速度ビデオカメラを用いて衝撃波の発光画像を取得し、その強度の時間変化を考察した。

### 2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置概略を示す。装置は大別して衝撃波管と測定部からなる。衝撃波管は、内径80mmの高圧室（長さ1,000mm）と低圧室（同4,000mm）からなる隔膜式の衝撃波管である。駆動気体にはヘリウム、試料気体には空気を用いた。高圧室と低圧室の間に隔膜としてPolyethylene Terephthalate (PET) フィルムを重ねることで破膜圧力を調節した。また、低圧室をロータリーポンプにより低圧力にして実験を行った。図2に図1の測定部(A)の詳細を示す。測定部は隔膜から3,560mm位置（管端から440mm位置）に1ch, 3,900mm位置（管端から100mm位置）に2chとして2つの圧力センサーを設置し、バランス回路を介してオシロスコープに信号を入力し、圧力波形を取得した。管内に生じる発光は、冷却CCDカメラと高速度ビデオカメラを用いて合成石英製の観察窓から撮影した。冷却CCDカメラを用いた

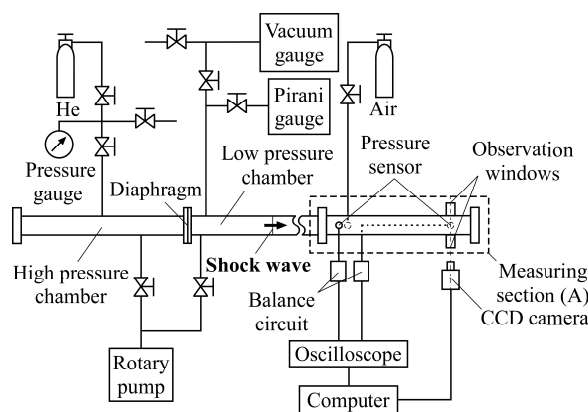


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

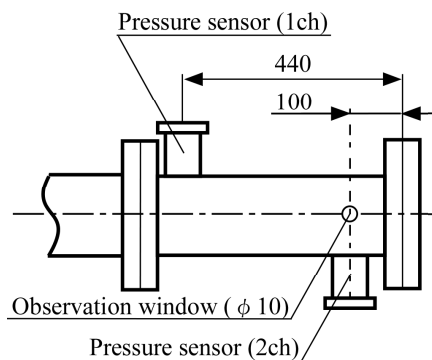


Fig. 2 Detail of measuring section (A)

撮影では、合成石英製の両凸レンズで像を2倍に拡大した。撮像範囲は観察窓の中央に設定し、露光時間を5secとして入射衝撃波背後と反射衝撃波背後の両方の発光を含む画像を撮影し、積算発光強度を取得した。高速度ビデオカメラを用いた撮影では、観察窓全体が観察できるようにした。また、1chの圧力センサーの信

号からアンプとパルスジェネレーターを用いてトリガー信号を生成し、高速度ビデオカメラに入力することで発光強度を取得した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 衝撃マッハ数の計測

実験で得られた圧力波形の一例（高圧室と低圧室の圧力比120）を図3に示す。図の横軸は上流に設置した1ch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、縦軸は絶対圧力である。また、太い実線が1ch、細い実線が2chの圧力センサーの圧力波形である。1, 2chともに、1度目の不連続な圧力上昇が入射衝撃波であり、2度目の不連続な圧力上昇が反射衝撃波である。衝撃波の速度は、これらの圧力上昇の時間差と圧力センサー間の距離から求めた。図4に圧力比と衝撃マッハ数の関係を示す。横軸は高圧室と低圧室の圧力比であり、縦軸は入射衝撃マッハ数と反射衝撃マッハ数である。また実曲線と破曲線は、それぞれ入射衝撃マッハ数と反射衝撃マッハ数の理論曲線であり、○のプロットは入射衝撃マッハ数の実験値、△のプロットは反射衝撃マッハ数の実験値である。理論入射衝撃マッハ数は式(1)、理論反射衝撃マッハ数は式(2)、(3)、(4)を用いて算出した。いずれも理想気体に対する理論式である。

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{2\kappa_1 M_S^2 - (\kappa_1 - 1)}{\kappa_1 + 1} \times \left\{ 1 - \frac{\kappa_4 - 1}{\kappa_1 + 1} \times \frac{a_1}{a_4} \left( M_S - \frac{1}{M_S} \right) \right\}^{\frac{2\kappa_4}{\kappa_4 - 1}} \quad \dots (1)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\kappa_1 M_S^2 - (\kappa_1 - 1)}{\kappa_1 + 1} \quad \dots (2)$$

$$\frac{P_5}{P_2} = \frac{2\kappa_1 M_R^2 - (\kappa_1 - 1)}{\kappa_1 + 1} \quad \dots (3)$$

$$\frac{P_5}{P_2} = \left( \frac{\kappa_1 + 1}{\kappa_1 - 1} + 2 - \frac{P_1}{P_2} \right) / \left( 1 + \frac{\kappa_1 + 1}{\kappa_1 - 1} \times \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \dots (4)$$

ここで、 $P$ は圧力、 $\kappa$ は比熱比、 $M_S$ は入射衝撃マッハ数、 $M_R$ は反射衝撃マッハ数、添字の1は低圧室、2は入射衝撃波背後、5は反射衝撃波背後を示す。

図4において入射衝撃マッハ数と反射衝撃マッハ数の実験値は、理論曲線と同様の傾向を示した。入射および反射衝撃マッハ数の実験値は理論値と比較して10%程度低い値となったが、これは管壁付近に形成される境界層や気体の粘性などに起因すると考えている。本実験で得られた衝撃マッハ数の最大値は、破膜圧力0.7MPa、初期低圧室圧力220Pa（圧力比3,200）の条件

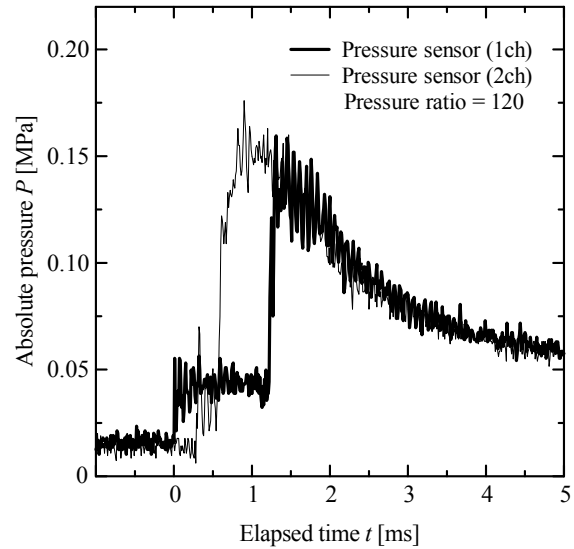


Fig. 3 Pressure profiles of incident and reflected shock wave

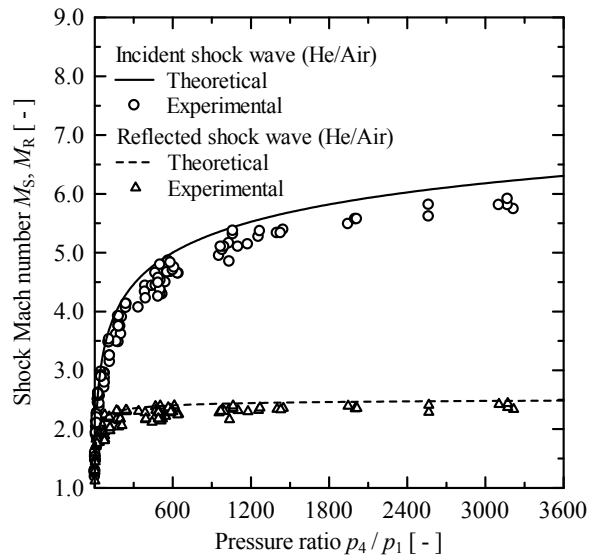


Fig. 4 Relationship between shock Mach number and pressure ratio

で、入射衝撃マッハ数 6.0、反射衝撃マッハ数 2.5 が得られた。

#### 3-2 相対的な発光強度と理論温度

衝撃波管内に生じる発光の特性を知るために、冷却 CCDカメラを用いて入射衝撃波背後と反射衝撃波背後の両方の発光が含まれる画像（露光時間5sec）を撮影し、積算発光強度を取得した。図5に入射衝撃マッハ数と相対的な発光強度および衝撃波背後の理論温度の関係を示す。横軸は入射衝撃マッハ数、左の縦軸は発光強度、右の縦軸は衝撃波背後の理論温度である。図中の○のプロットとエラーバーは、それぞれ1枚の撮影画像から得た発光強度の平均値と最大値、最小値を示している。また、実線と破線はそれぞれ入射衝撃波背後

と反射衝撃波背後の理論温度曲線を示す。これらの理論温度の算出には、理想気体を仮定して式 (5), (6) をそれぞれ用いた。

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\{(\kappa_1 - 1)M_S^2 + 2\}\{2\kappa_1 M_S^2 - (\kappa_1 - 1)\}}{(\kappa_1 + 1)^2 M_S^2} \dots (5)$$

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{\{2(\kappa_1 - 1)M_S^2 + (3 - \kappa_1)\}\{(3\kappa_1 - 1)M_S^2 - 2(\kappa_1 - 1)\}}{(\kappa_1 + 1)^2 M_S^2} \dots (6)$$

ここで、 $T_1$ は低圧室の温度（本研究では室温）、 $T_2$ は入射衝撃波背後の温度、 $T_5$ は反射衝撃波背後の温度、 $\kappa_1$ は低圧室気体の比熱比、 $M_S$ は入射衝撃マッハ数である。

入射衝撃マッハ数と相対的な発光強度の関係をみると、入射衝撃マッハ数 3.0 付近から発光強度は徐々に強くなり、衝撃マッハ数 4.7 付近から急激に強くなることがわかる。また、衝撃マッハ数 5.3 付近で最も発光強度は強くなり、それよりも衝撃マッハ数が大きくなると急激に発光強度は弱くなる。この図から、発光強度が強くなり始める反射衝撃波背後の理論温度はおよそ 1,500K であり、急激に弱くなる場合の温度はおよそ 4,000K であることがわかった。

### 3-3 発光強度の時間変化

図5の積算発光強度が特徴的な変化を示した入射衝撃マッハ数 4.7 と 5.3 付近の衝撃マッハ数において、高速度ビデオカメラにより衝撃波の発光を撮影し、相対的な発光強度の時間変化を取得した。図6に高速度ビデオカメラの撮影画像から得た発光強度を色分けして表した発光強度分布の時間変化を示す。図の上段は入射衝撃マッハ数  $M_S = 4.2$  の実験結果、中段は  $M_S =$

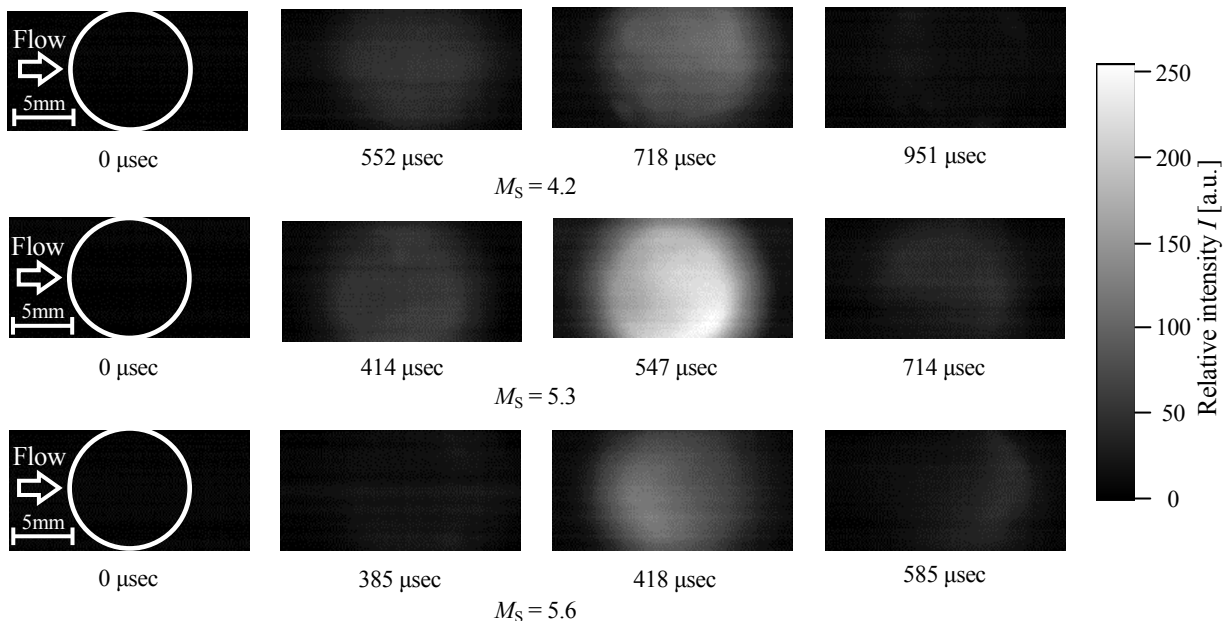


Fig. 6 Time changes of relative intensity distributions behind reflected shock waves

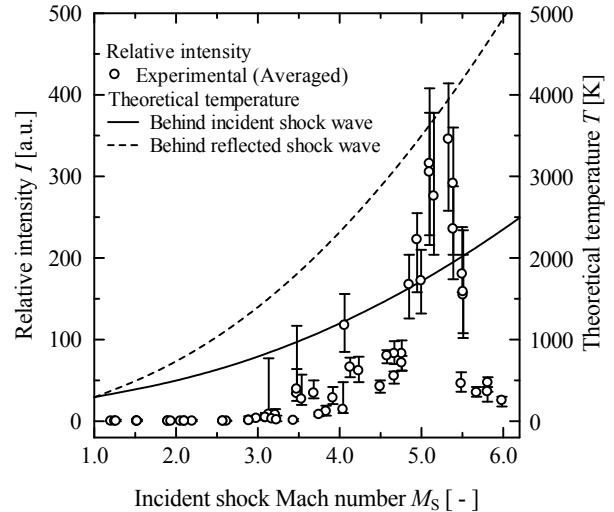


Fig. 5 Relative intensity and theoretical temperatures as a function of incident shock Mach number

5.3, 下段は  $M_S = 5.6$  の実験結果である。入射衝撃マッハ数 5.3 の場合にのみ、NDフィルター (O.D. = 0.5) を用いて光量をおよそ1/3 に減光している。これらの発光強度は右のカラーバーに対応する。図中の時間は、1ch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である。入射衝撃波の伝播方向は左から右であり、0  $\mu\text{sec}$  の図の白い円は観察窓の範囲である。それぞれの入射衝撃マッハ数の結果において、左から2番目の図は最初に発光強度が強くなり始めた時点の図であり、以降右の図は発光強度がピークとなった場合、発光強度がゼロになる直前を表している。また、今回実施した全ての実験において、2chの圧力センサーが反射衝撃波を検出した時間以降、すなわち反射衝撃波背後で発光強度が強くなることがわかった。ピーク強度

の図（図5の左から3個目）に着目すると、衝撃マッハ数 4.2, 5.3 では主に観察窓の右側で、衝撃マッハ数 5.6 では主に観察窓の左側で発光強度が強くなるのがわかる。今回の実験では、どの入射衝撃マッハ数においても、発光強度は空間的に不均一であることがわかった。その理由として、反射衝撃波背後の気流に乱れが生じていること、局所的に存在する不純物の発光などが考えられる。

図6の結果から、衝撃波管の中心軸上かつ観察窓の中心点の発光強度を取得し、各入射衝撃マッハ数に対する発光強度の時間変化を比較した。図7に発光強度の時間変化を示す。横軸は、1ch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、相対的な発光強度である。破線は入射衝撃マッハ数 4.2 の場合の発光強度の時間変化を示す。同様に、細い実線は入射衝撃マッハ数 5.3 の場合、太い実線は入射衝撃マッハ数 5.6 の場合である。また図中には入射衝撃マッハ数 5.3 の場合の入射衝撃波背後の時間領域（Incident）と、反射衝撃波背後に対するそれ（Reflected）を示す。

図7をみると、入射衝撃マッハ数 5.3 では入射衝撃波背後（Incidentの範囲）の発光強度はほとんどみられないが、反射衝撃波背後（Reflectedの範囲）では発光強度が強くなるのがわかる。入射衝撃マッハ数 4.2 と 5.6 の場合も同様の傾向を示した。発光強度のピーク値に着目すると、入射衝撃マッハ数が大きくなるにつれて発光強度がピークとなるまでの時間は短くなる。この理由は、入射衝撃波と反射衝撃波の速度が速くなるために、1chで入射衝撃波が検出されてから反射衝撃波が観察窓を通過するまでの時間が短くなるためであると考えている。また入射衝撃マッハ数 4.2 と 5.6 のピーク値はほぼ同じだが、衝撃マッハ数 5.3 の場合の発光強度のピーク値は、他の結果よりも著しく大きいことがわかる。この結果は、図5に示した結果と整合性があり、また図6で言及した発光は反射衝撃波背後から生じるという考察結果と整合性がある。しかし、入射衝撃マッハ数に対する発光強度分布（図5）、発光領域が空間的に不均一であること（図6）および発光強度の特色ある時間変化（図7）などの実験結果を説明するためには、発光源の化学種やそれに関連する諸々の物理化学反応についての知見が必要であり、その研究が今後の重要な課題と考えている。

#### 4. 結論

本研究では、衝撃波管内に生じる発光の特性を知るため、衝撃マッハ数の増加に伴う発光強度を冷却CCDカメラ（露光時間5sec）により取得し、入射衝撃マッハ数とその積算発光強度および衝撃波背後の理論温度の関係を実験的に調べた。また、高速度ビデオカメラを用いて衝撃波の発光画像を取得し、その強度の時間変化を考察した。本実験で得られた最大の衝撃マッハ数

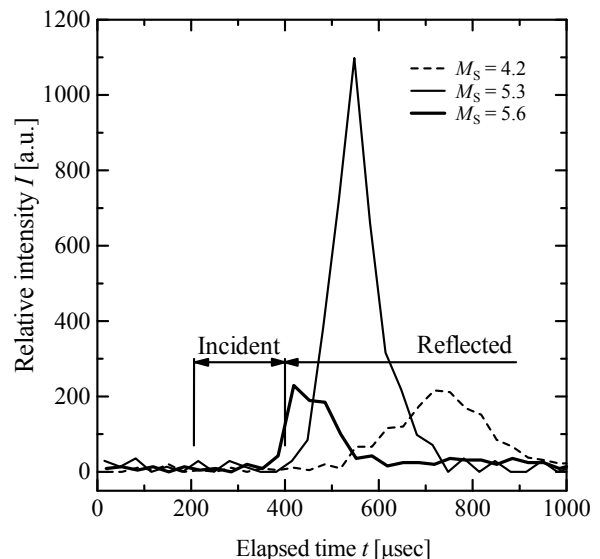


Fig. 7 Relative intensities behind shock waves as a function of elapsed time

は、入射衝撃マッハ数 6.0、反射衝撃マッハ数 2.5 であった。以下に主な結論を示す。

- (1) 冷却CCDカメラによる撮影では、反射衝撃波背後の理論温度がおよそ 1,500K になると発光強度が強くなり始め、およそ 4,000K を超えると急激に弱くなった。
- (2) 冷却CCDカメラと高速度ビデオカメラによる測定から、発光はほとんどすべて反射衝撃波背後からであること、その発光強度は空間的に不均一であることがわかった。
- (3) 入射衝撃マッハ数に対する発光強度分布、発光領域が空間的に不均一であること、発光強度の特色ある時間変化などの実験的現象を説明するためには、発光源の化学種やそれに関連する諸々の物理化学反応についての知見が必要であり、それに関する研究は重要である。

#### 参考文献

- 1) Sharma, S., and Gillespie, W., "Nonequilibrium and Equilibrium Shock Front Radiation Measurements," *AIAA Paper 90-0139*, 1990.
- 2) Yamada, G., Suzuki, T., Takayanagi, H., and Fujita, K., "Development of Shock Tube for Ground Testing Reentry Aerothermodynamics," *Proc. Trans. Japan Soc. Aero. Space Science*, Vol.54, No.183, pp.51-61, 2011.
- 3) 鈴木拓也, 岡本智宏, 船津賢人, 高草木文雄, 「空気衝撃波の発光に関する実験的研究」, 第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2012講演集 (CD-ROM), JSASS-2012-2042.pdf, 4pages, 2012.