

# 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—

山崎颯太（群馬大院理工・院），船津賢人（群馬大院理工），原澤彰（群馬大院理工・院）

## Experimental Study of Radiation behind Reflected Air Shock Waves - Radiation Measurements with Several Kinds of Narrow Band-pass Filters -

by

Sota Yamazaki, Masato Funatsu, and Akira Harasawa

### ABSTRACT

In our laboratory, the characteristics of radiation behind air shock waves have been studied systematically by using a shock tube. In previous studies, the pressures in high pressure chamber and low pressure chamber conditions were kept as independent variables, and radiation behind reflected air shock wave was observed by a high-sensitivity cooled CCD camera. As a result, the radiation intensities were increased with an increase in the incident shock Mach number. In this study, the shock waves with different incident shock Mach number were produced under the conditions where pressure in the low pressure chamber was kept at constant value and pressure in the high pressure chamber was increased. The radiation behind those reflected shock waves was visualized temporally and spatially by a high-speed video camera. In addition, the time changes of the radiation originated from the chemical species were analyzed by using the high-speed video camera with narrow band-pass filters. The narrow band-pass filters corresponding to atomic nitrogen and oxygen lines were selected, and the filter not corresponding to these lines, namely 520 nm in wavelength, was also done. As a result, the radiation was observed in all the cases with the narrow band-pass filters. However, the radiation intensity obtained from the narrow band-pass filter which does not correspond to these lines is weaker than the radiation intensities obtained from the narrow band-pass filters which correspond to these lines. Thus, there is a possibility that the radiation was due to atomic nitrogen and oxygen lines.

### 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を解明することは大変重要である。

本研究室では、高温高压気体、特に空気の放射特性の解明を目的に、衝撃波管を用いた実験的研究を系統的に行っている<sup>2-5)</sup>。以前の研究では高压力室と低压力室条件を変化させ空気反射衝撃波背後の放射を高感度冷却CCDカメラにより撮影した<sup>2)</sup>。本研究では一定の低压力室条件のもと、高压室圧力を増加させ、異なる衝撃マッハ数を有する空気衝撃波を発生させた。それらの反射衝撃波背後の放射を高速ビデオカメラにより時間的空間的に可視化した。また、窒素や酸素の原子線に対応する狭帯域フィルターを用いて特性波長に対応する可視化像も取得した。さらに、窒素や酸素の原子線による放射が存在しないと考えられる波長領域に対応する狭帯域フィルターを用いて放射測定を行い、放射化学種に関して考察した。

### 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の高压室（長さ1,000mm）と低压室（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、試料気体には乾燥空気（体積比率  $N_2 : O_2 = 79 : 21$ ）を用いた。高压室と低压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、高压室圧力を高めることにより隔膜を破膜させ、衝撃波を発生させた。図2に図1の測定部（A）を側面からみた詳細を示す。測定部は隔膜から3,560mm位置（管端から440mm位置）にチャンネル1（Ch. 1）、3,900mm位置（管端から100mm位置）にチャンネル2（Ch. 2）として2つの圧力センサーを設置し、アンプ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。管内に生じる放射は、観察窓から高速ビデオカメラ（ナックイメーজテクノロジー製

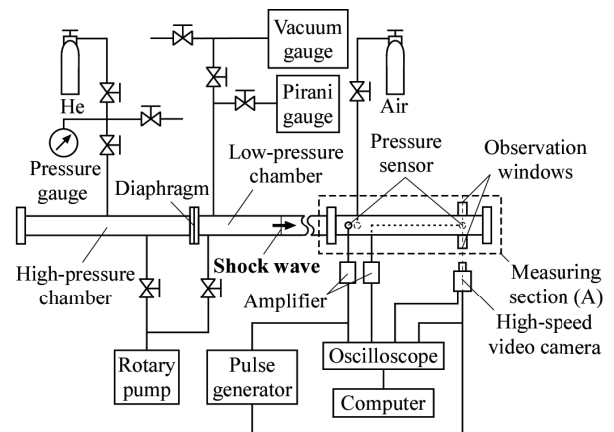


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

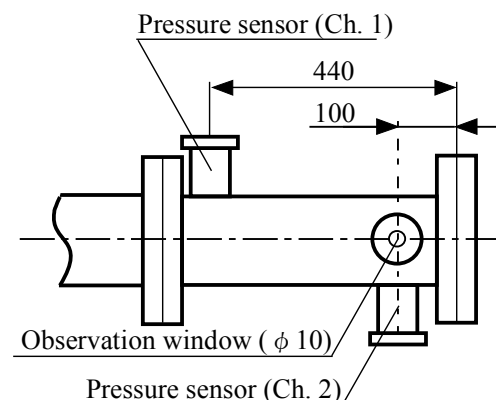


Fig. 2 Detail of measuring section (A)

GX-3) により撮影した。

### 3. 結果および考察

#### 3-1 衝撃マッハ数の計測

本研究では、低压室圧力 $P_1$ が760Paの条件のもと、高压室

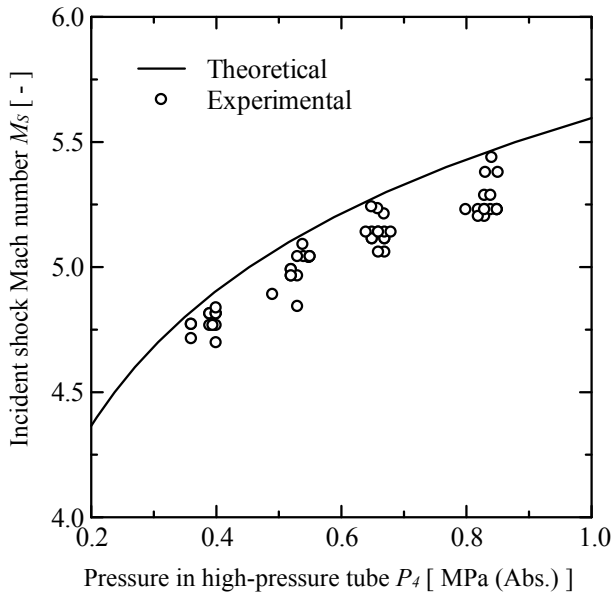


Fig. 3 Relationship between pressure in high-pressure chamber and incident shock Mach number

圧力 $P_4$ を増加させ実験を行った。図3に高圧室圧力 $P_4$ と入射衝撃マッハ数 $M_S$ の関係を示す。図の横軸は高圧室圧力、縦軸は入射衝撃マッハ数である。図中の黒の丸のプロットは入射衝撃波の実験値、黒の実線は理論曲線<sup>2)</sup>を示している。高圧室および低圧室の圧力は絶対圧力で示す。図3から高圧室圧力の増加に伴い、入射衝撃マッハ数が増加することがわかる。

### 3-2 高速度ビデオカメラによる放射強度分布の時間変化

高速度ビデオカメラを用いて衝撃波背後の放射強度分布の時間変化を取得した。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 $\mu$ secとした。図4に実験結果を擬似カラー表示して示す。上段から入射衝撃マッハ数4.8、5.0、5.1の実験結果を示している。これらの放射強度は下のカラーバーに対応する。図の下時間は、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の経過時間を示しており、0 $\mu$ secの白い円が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る。図4から今回実施したすべての実験において、放射強度は反射衝撃波背後で急激に強くなり、その後弱くなることがわかった。また入射衝撃マッハ数の増加に伴い、全体的に放射強度は強くなり、最大放射強度も強くなることが観察された。

### 3-3 高速度ビデオカメラと狭帯域フィルターによる放射測定

衝撃波背後の放射化学種を高速度ビデオカメラと狭帯域フィルターを用いて調べた。狭帯域フィルターを用いる場合、放射はフィルターにより減光されるため露光時間を長くする必要がある。そのため撮影速度を30,000frames/sec、露光時間を33.3 $\mu$ secとした。表1に用いた狭帯域フィルターの特性を示す。例えばMC650の狭帯域フィルターは中心波長648.75nm、半値全幅(FWHM)12.50nm、透過率89.7%であり、窒素の原子線(648.27nm)に対応するフィルターである。また、表1に示すとおり、MC750、MC870は窒素の原子線、MC780は酸素の原子線に対応する。

図5に一例として入射衝撃マッハ数5.1の放射強度分布の時間変化を擬似カラー表示して示す。図5の上段から

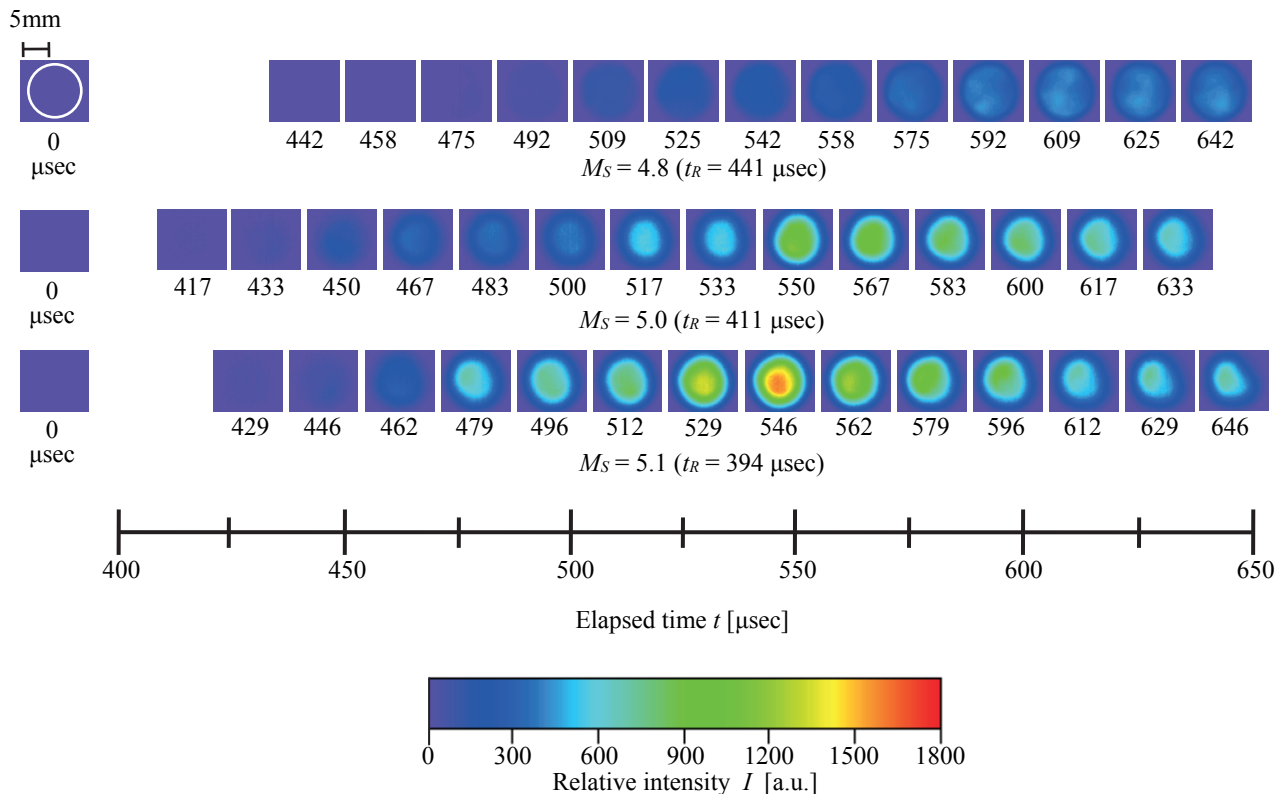


Fig. 4 Time changes of relative intensity distributions behind shock waves ( $P_4 = 760$ Pa)

Table 1 Characteristics of narrow band-pass filters

Filter name	Central Wavelength [nm]	FWHM [nm]	Transmittance [%]	Corresponding Systems
MC650	648.75	12.50	89.7	N I (648.27 nm)
MC750	747.00	10.00	68.5	N I (746.83 nm)
MC780	779.25	10.50	80.2	O I (777.19 nm)
MC870	869.25	11.50	67.1	N I (868.03 nm)

MC650, MC750, MC780, MC870の実験結果である。これらの放射強度は下のカラーバーに対応する。図の下の時間および観察窓の位置などは図4と同様である。図5からすべての狭帯域フィルターにおいて反射衝撃波背後で放射強度が強くなった。また、酸素の原子線に対応するMC780の狭帯域フィルターの結果（図5の上から3番目）をみると、ほかの狭帯域フィルターよりも放射強度が強くなった。これらより反射衝撃波背後において窒素や酸素の原子線に起因する放射が生じている可能性があることがわかる。

窓中心点で取得した放射強度の時間変化を示す。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。黒、赤、緑の破線はそれぞれ窒素の原子線に対応するMC650, MC750, MC870の狭帯域フィルター、青の実線は酸素の原子線に対応するMC780の狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度を表す。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。どの入射衝撃波マッハ数においてもIncidentでは放射強度がほとんど

図6, 図7, 図8に各入射衝撃マッハ数において、観察

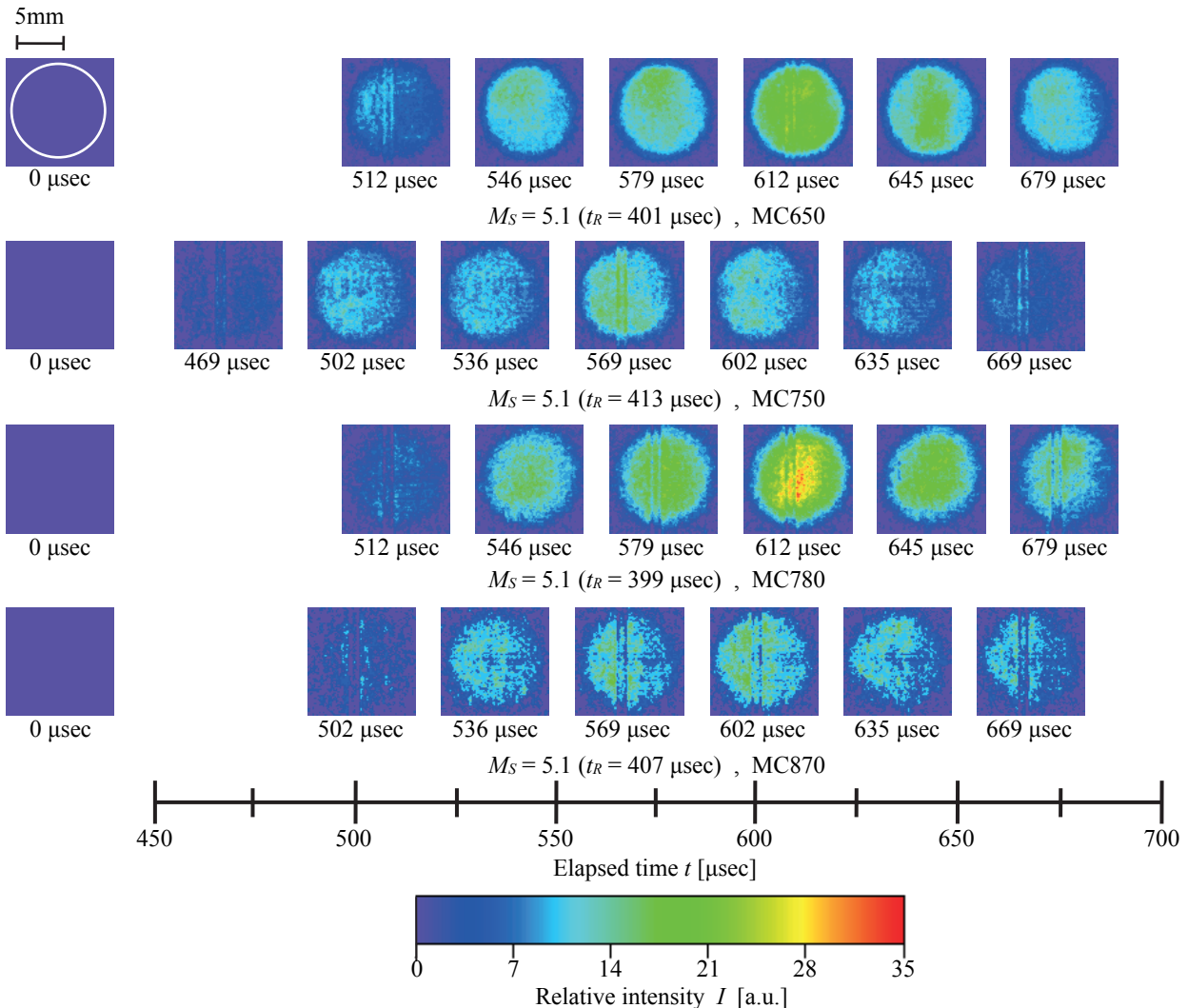


Fig. 5 Time changes of relative intensity distributions by using the narrow band-pass filters ( $P_I = 760\text{Pa}$ ,  $M_S = 5.1$ )

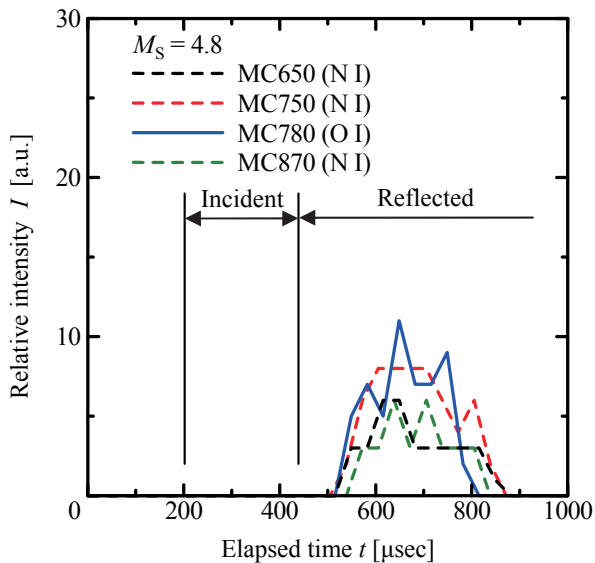


Fig. 6 Time changes of relative intensities behind shock waves ( $P_1 = 760\text{Pa}$ ,  $M_S = 4.8$ )

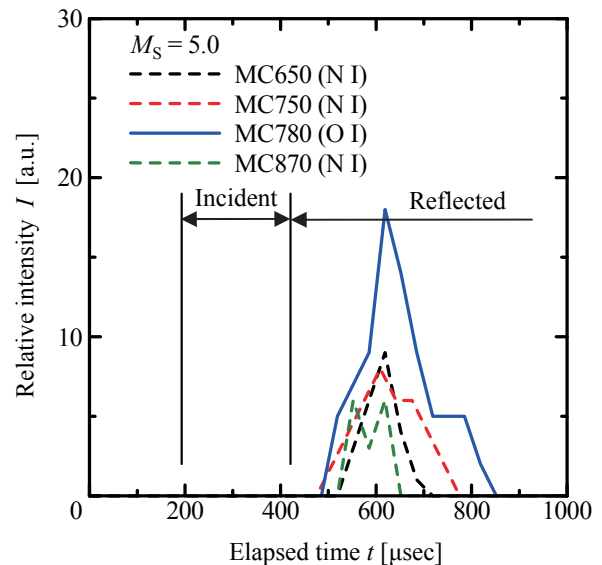


Fig. 7 Time changes of relative intensities behind shock waves ( $P_1 = 760\text{Pa}$ ,  $M_S = 5.0$ )

みられず、Reflectedで放射強度が急激に強くなり、その後弱くなる。また入射衝撃波マッハ数の増加に伴い、それぞれの狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度は全体的に強くなる傾向があった。さらに酸素の原子線に対応したMC780 (図中の実線)の実験結果をみると入射衝撃マッハ数の増加に伴い最大放射強度が強くなるが、窒素の原子線に対応したMC650, MC750, MC870 (図中の破線)の実験結果をみると入射衝撃マッハ数4.8と5.0では最大放射強度があまり変化せず、衝撃マッハ数5.1で最大放射強度がほかの条件と比較して強くなる傾向があった。これらの結果より、入射衝撃マッハ数の増加に伴い放射強度は増加する傾向があるものの、化学種に依存して放射強度の増加量に差異がみられた。

つづいて、窒素や酸素の原子線に由来する放射が存在しない波長領域に対応する狭帯域フィルターを用いて反射衝撃波背後の放射化学種を調べた。用いた狭帯域フィルターは、表1に示す窒素と酸素の原子線に対応するフィルターに加え、窒素と酸素の原子線に対応しない狭帯域フィルターであるMC520の狭帯域フィルターである。表2にMC520の特性を示す。

図9に入射衝撃マッハ数5.2で得られた画像を擬似カラー表示して示す。図の上段からMC520, MC650, MC750, MC780, MC870の狭帯域フィルターを用いて取得した実験結果である。これらの放射強度は下のカラーバーに対応する。図の下の時間および観察窓の位置などは図4と同様である。図9から入射衝撃マッハ数5.2においてもすべての狭帯域フィルターにおいて入射衝撃波背後で放射はほとんどみられず、反射衝撃波背後で放射強度が強くなり、酸素の原子線に対応するMC780の狭帯域フィルターを用いて取得

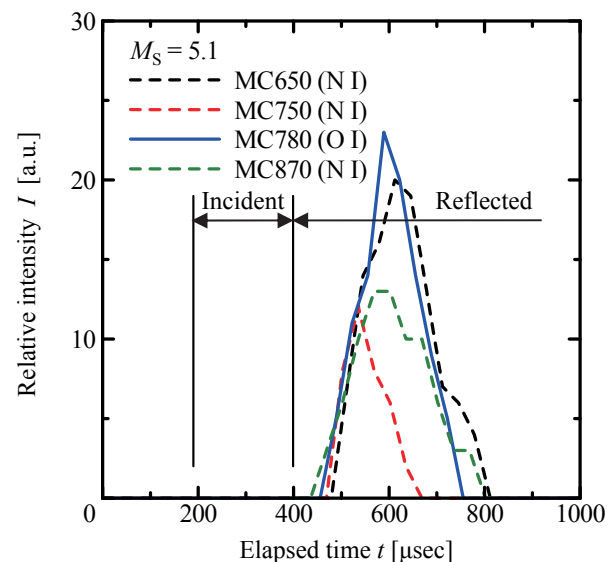


Fig. 7 Time changes of relative intensities behind shock waves ( $P_1 = 760\text{Pa}$ ,  $M_S = 5.1$ )

した放射強度が最も強くなった。MC520の狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度はほかの狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度より弱くなった。MC520の狭帯域フィルターを用いて放射が撮影された理由として、窒素や酸素に関係のない何らかの連続的な放射の一部を観察していると考えている。

図10に入射衝撃マッハ数5.2において観察窓中心点で取得した放射強度の時間変化を示す。横軸はCh. 1の圧力セン

Table 2 Characteristics of narrow band-pass filters

Filter name	Central Wavelength [nm]	FWHM [nm]	Transmittance [%]	Corresponding Systems
MC520	521.00	10.00	83.0	—



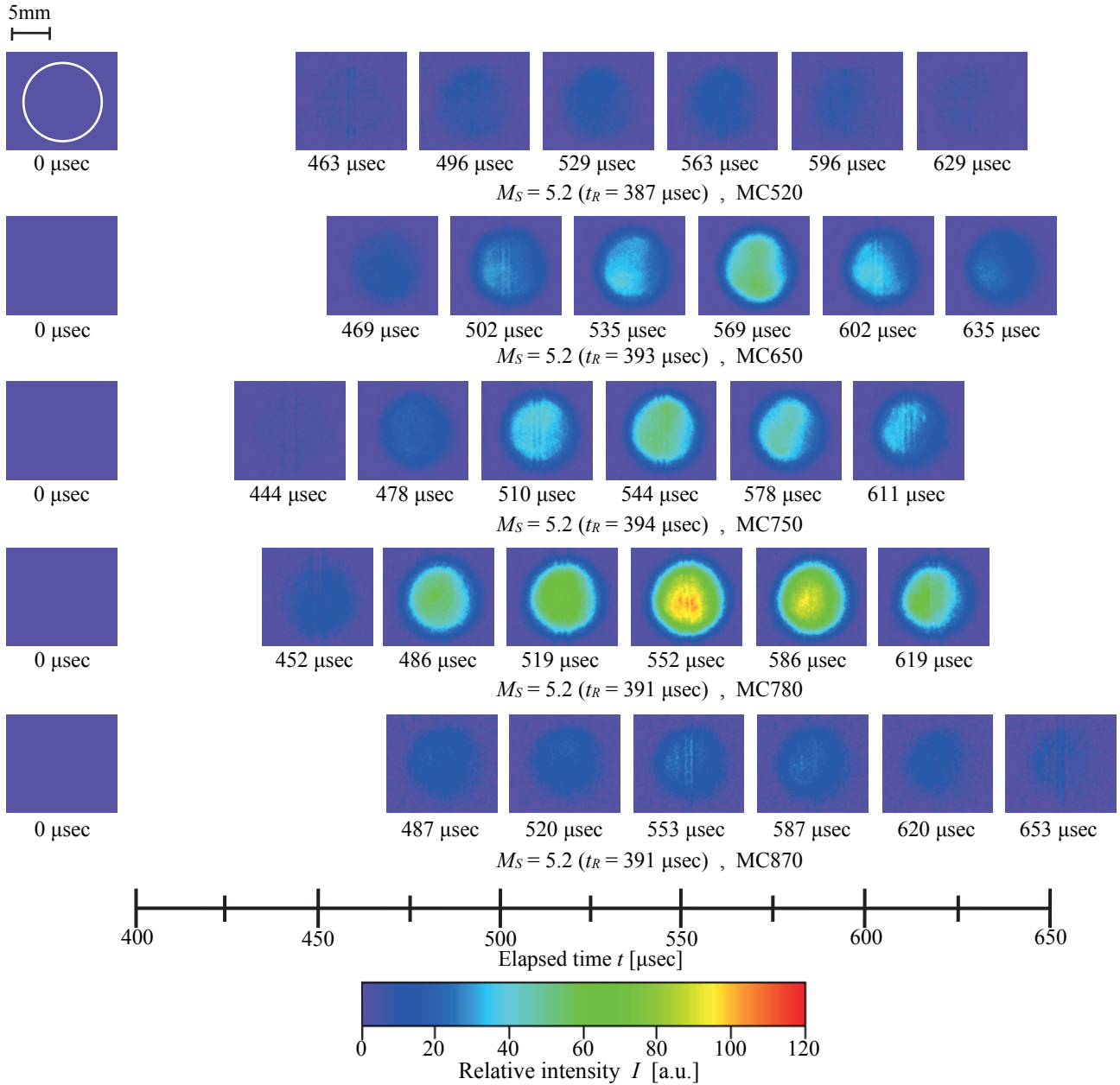


Fig. 9 Time changes of relative intensity distributions by using the narrow band-pass filters ( $P_I = 760\text{Pa}$ ,  $M_S = 5.2$ )

サーが圧力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。図中の点線、青の実線は図6と同様、窒素と酸素の原子線に対応した狭帯域フィルターの実験結果であり、紫の実線は窒素と酸素の原子線に対応しないMC520の実験結果を示している。図中のIncidentの領域とReflectedの領域は図6と同様である。図10からすべての狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度はReflectedの領域で強くなった。またMC520の狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度はほかの狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度より弱く、窒素と酸素の原子線に対応するフィルターのなかで最も放射強度が弱いMC870の狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度の半分程度となった。これらの実験結果からMC520の狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度は、窒素や酸素の原子線に関係のない何らかの連続的な放射の一部を観察している可能性がある。これより、MC650, MC750, MC780, MC870の狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度は、窒素や酸素の原子線に由来している可能性が高いことを示唆しているものと考えられる。

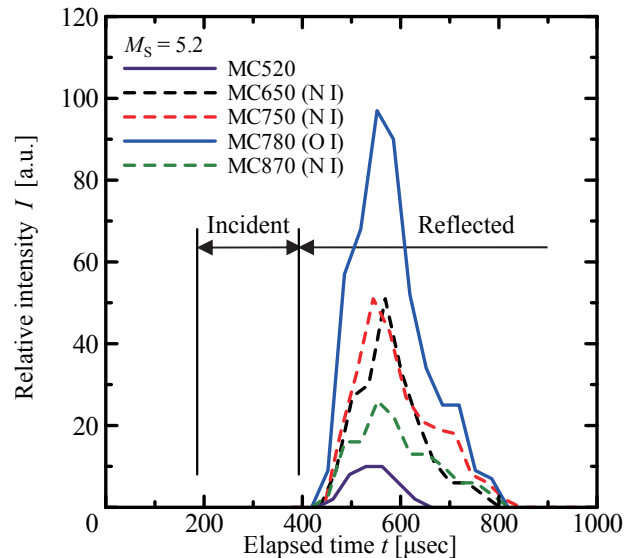


Fig. 10 Time changes of relative intensities behind shock waves ( $P_I = 760\text{Pa}$ ,  $M_S = 5.2$ )

#### 4. 結論

一定の低圧力室条件のもと、高圧室圧力を増加させ、異なる衝撃マッハ数を有する空気衝撃波を発生させた。それらの反射衝撃波背後の放射を高速度ビデオカメラにより時間的空間的に可視化した。また、窒素や酸素の原子線に対応する狭帯域フィルターを用いて特性波長に対応する可視化像も取得した。さらに、窒素や酸素の原子線による放射が存在しないと考えられる波長領域に対応する狭帯域フィルターを用いて放射測定を行った。以下に主な結論を示す。

- (1) 放射強度は反射衝撃波背後で急激に強くなり、その後弱くなる。
- (2) 入射衝撃マッハ数の増加に伴い、放射強度は強くなる。
- (3) 狭帯域フィルターを用いて取得した放射強度において入射衝撃マッハ数の増加に伴い、最大放射強度は強くなる傾向がある。また化学種に依存して放射強度の増加量に差異がみられた。
- (4) 入射衝撃マッハ数5.2において、窒素や酸素の原子線に対応しない波長520nmの狭帯域フィルターを用いた場合でも放射が観察されたが、ほかの狭帯域フィルターに比べ放射強度は弱い。
- (5) 波長520nmの狭帯域フィルターを用いた放射強度が弱いことから、窒素や酸素の原子線に対応した狭帯域フィルターを用いた放射強度は窒素や酸素の原子線に由来した放射を観察している可能性が高い。

#### 参考文献

- 1) Yamada, G., Suzuki, T., Takayanagi, H., and Fujita, K., "Development of Shock Tube for Ground Testing Reentry Aerothermodynamics," *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol.54, No.183, pp.51-61, 2011.
- 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) 青木俊輔, 原澤彰, 船津賢人, 「狭帯域フィルターを用いた空気反射衝撃波背後の放射に関する実験的研究」, 第47回流体力学講演会/第33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-2015-2105-F/A.pdf, 5pages, 2015.
- 4) 原澤彰, 青木俊輔, 新保勇青, 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—狭帯域フィルターを用いた放射測定—」, 第48回流体力学講演会/第34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-2016 -2064.pdf, 4pages, 2016.
- 5) 山崎颯太, 原澤彰, 船津賢人, 「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」, 可視化情報全国講演会(日立2016)講演論文集, 可視化情報, Vol.36, Suppl. No.2, D106.pdf, 4pages, 2016.