

論文の内容の要旨

論文題目 傾斜平板に衝突する適正膨張噴流から発生する音響現象に関する実験的研究
(Experimental Study on Acoustics from a Correctly-Expanded Jet Impinging on an Inclined Flat Plate)

氏名 中西 佑太

1. 緒言

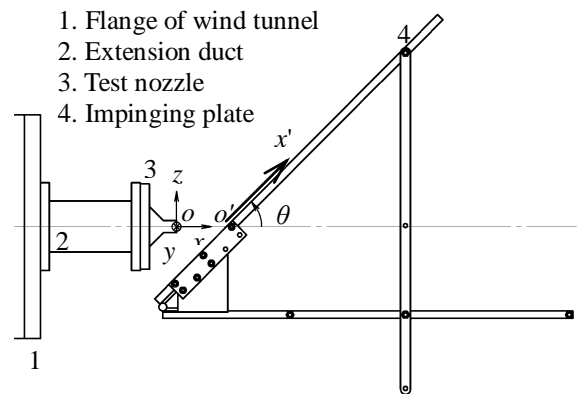
衝突噴流から発生する音響現象は、ロケットや垂直離発着機の運用時に見られる現象である。特にロケットの打上げ時には、排気ブルームと火炎偏向板の干渉により強大な圧力波が発生するが、この圧力波がペイロードを加振し破損する可能性が指摘されている。しかし、衝突噴流による音響現象は、発生メカニズム等に不明確な点が多く残されており、十分な精度での音響予測は困難である。そのため、衝突噴流自身をもたらす音響現象の理解と発生メカニズムの解明が求められている。そこで本研究では、斜め平板への衝突噴流を対象に実験を行い、そこで発生する音響現象の理解と発生メカニズムの解明を試みることを目的とする。

2. 実験装置

本研究における一連の実験は東京大学柏キャンパスの極超音速高エンタルピー風洞（以下、柏風洞）において行われる。図1に実験装置を示す。衝突噴流から発生する音響現象の物理メカニズムに着目するため、現象を単純化して $M_j = 1.8$ の適正膨張噴流を噴流軸に対して傾けた平板に衝突させた。平板はその傾斜角を $\theta_{plate} = 22.5, 45, 67.5$ [deg] と変化させられる。ノズルには出口径 $D = 20$ [mm] であり、噴流軸上のノズル出口から衝突板までの距離は $5D$ と定めた。また座標系を図1(b)のように定め、ノズル軸と衝突板の交点を衝突点とする。実験では $1/4$ "コンデンサダイヤフラムマイクロホンによる音響計測、シュリーレン法による可視化と非定常圧力センサによる衝突板上の圧力変動計測を実施した。



(a) Photograph of experimental setup



(b) Schematic of experimental setup and coordinate

Fig. 1 Overview of experimental setup

3. 噴流計測とその検証

本研究において実験を行った柏風洞は、これまでに詳細な噴流騒音の計測に供されてこなかった。そこで、衝突板を設置しない自由噴流騒音を計測し、他の研究機関において計測されたデータと比較することで、本研究の計測データの妥当性を検証した。

柏風洞を含めた実験系の機器騒音とマイクロホンの周波数特性から、妥当な計測周波数帯は 200 Hz 以上 40,000 Hz 以下と確認された。これに対応する周波数帯で、本研究のデータと他の研究機関によ

るデータを図 2 に比較する. 図 2 より本研究のデータは他のものに対して最大 5 dB 程度の差で良好に一致していることが確認される. これにより, 本研究の音響データは定量的にも妥当なものとして議論できることが示された.

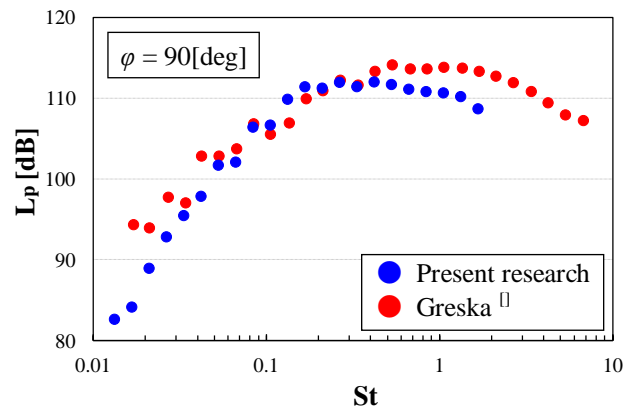


Fig. 2 Comparison of 1/3 octave band sound pressure level free jet noise of present research and other

4. 衝突噴流から発生する音響現象とその特徴

まず, 衝突噴流場において発生する音響現象について概要とその特徴を探った.

実験により取得したシュリーレン画像を図 3 に示す. 図 3 から 2 種類の波動現象の伝播が認められる. 一方は細かい波面が複合したような形状の圧力波 (図 3 (a)) であり, 他方は比較的確かな波面を持った圧力波 (図 3 (b)) である. これらはそれぞれ衝突板を基準として, 概ね 90 deg 方向と 30 deg 方向に伝播している.

音響計測の結果として, 図 3 に overall での音圧分布を示す. これより, 衝突噴流がもたらす音響現象は, 特徴的な指向性を 2 方向へもつことがわかる. これらも噴流軸を基準とすると, 一方は概ね 90 deg 方向 (図 2 (a)) に, 他方は概ね 30 deg 方向 (図 2 (b)) に指向性をもっている. これは図 3 の圧力波の伝播方向に対応しており, 両者には密接な関係性があると判断される.

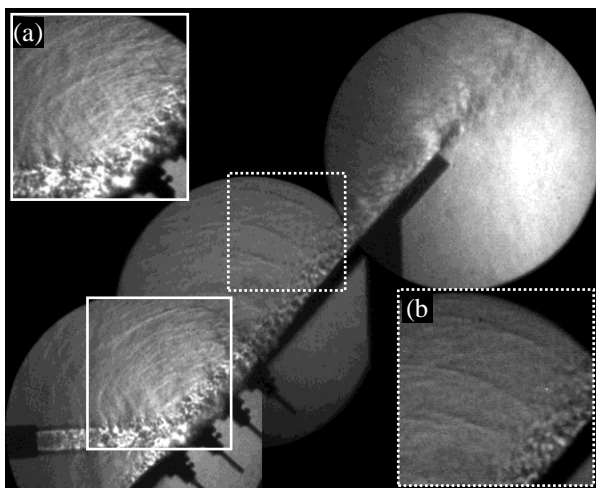


Fig. 3 Schlieren photograph of $M_j = 1.8$ supersonic jet impinging on an inclined plate

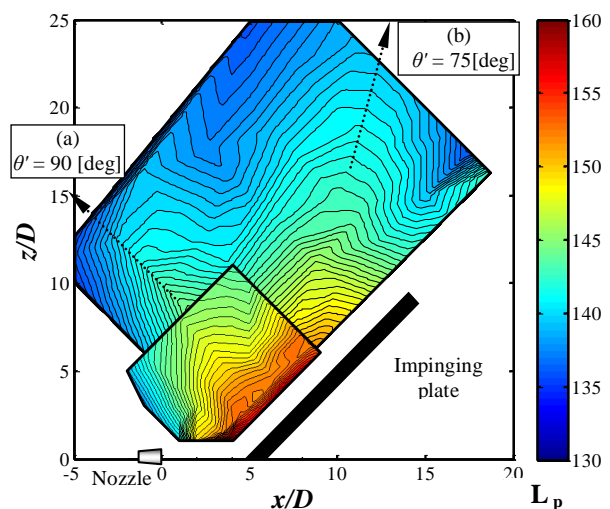


Fig. 4 Distribution of overall sound pressure level at impinging jet field

これらの指向性をもつ音響現象の性質を具体的に探るため, 衝突板上方空間の各点で計測した音響データをスペクトルにより考察した. その結果, 90 deg 指向性の音響現象が伝播する方向では, 1,000 Hz 以下と 4,000 Hz 以上の周波数帯において, 衝突噴流の音圧値は自由噴流の場合よりも卓越したものとなっており, 10,000 ~ 40,000 Hz で最も高いピークを与える. また衝突点を中心として等方的に伝播するような性質が見られた. 一方で 30 deg 指向性の音響現象が伝播する方向では, 全周波数帯に亘って, 衝突噴流の音圧値が自由噴流の場合よりも卓越し, 4,000 ~ 7,000 Hz で最も高いピークを与える.

また、衝突点からの距離によってスペクトル形状の変化が見られた。これらのことから、2つの指向性をもつ音響現象は異なる性質を有し、その音源の性質も異なる可能性が示唆された。

5. 音響現象発生源の絞り込み

衝突板傾斜角を変化させて同様の計測を行い、各音響現象をもたらす流れ現象の絞り込みを行った。傾斜角を $\theta_{plate} = 22.5$ [deg] とした場合、シュリーレン画像、オーバーオール値の音圧分布ともに $\theta' = 90$ [deg] 方向の指向性は十分に確認されず、 $\theta' = 30$ [deg] 方向の指向性のみが確認された。90 deg 方向の指向性は、特定の周波数で弱く現れるのみで、音響スペクトルの音圧値も小さくなっていった。これは、自由噴流から衝突現象を経て壁噴流へと移行する際の転向角が小さいために、衝突による音響現象の発生が弱まったためと考えられる。しかし、衝突噴流による音場の性質は衝突板を基準とした角度 θ' を用いると、衝突板傾斜角 $\theta_{plate} = 45$ [deg] の場合も含めて整理できることが明らかとなった。その結果、90 deg 方向の音響現象の発生は衝突板傾斜角に依存しており、噴流が衝突する作用によって生じるものであり、30 deg 方向の音響現象は衝突板傾斜角に関わらず発生し、壁噴流のマッハ波によって生じるものと推察される。

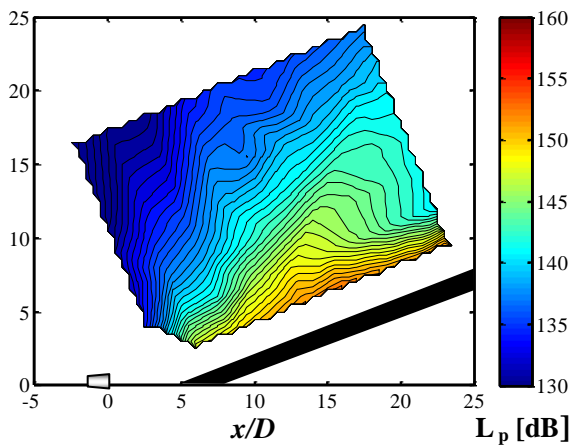


Fig.5 Distribution of overall sound pressure level for $\theta_{plate} = 22.5$ [deg]

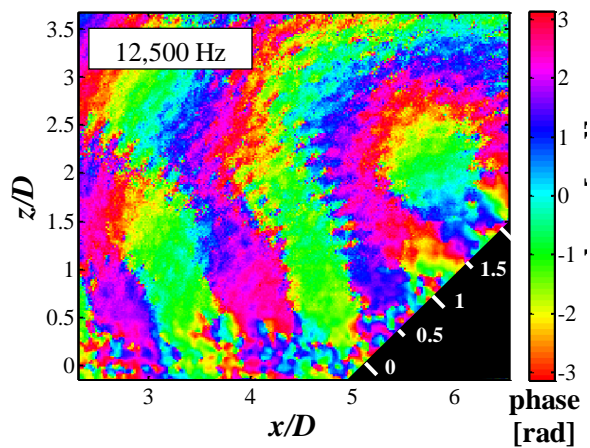


Fig. 6 Phase contours near the impinging point calculated from Schlieren photographs

90 deg 音響現象について、可視化画像に現れる圧力波挙動を追うことにより、音響現象の伝播の様子を確認し、その発生の起点となる位置について絞り込みを行った。高速度カメラで取得した可視化連続化像の輝度値を解析して、圧力波の位相分布を求めたものが図6である。位相分布中の位相の繰り返し部から、圧力波は衝突板上 $1.0 < x'/D < 2.0$ の領域を中心として放射状に伝播していることがわかり、この領域において音源となる現象が生じているものと考えられる。

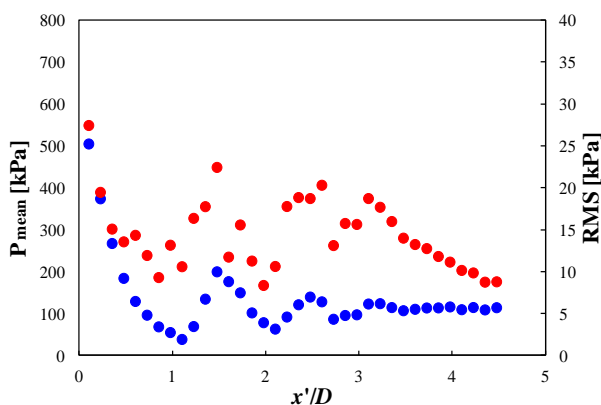


Fig. 7 Distributions of wall pressure For $\theta_{plate} = 45$ [deg]

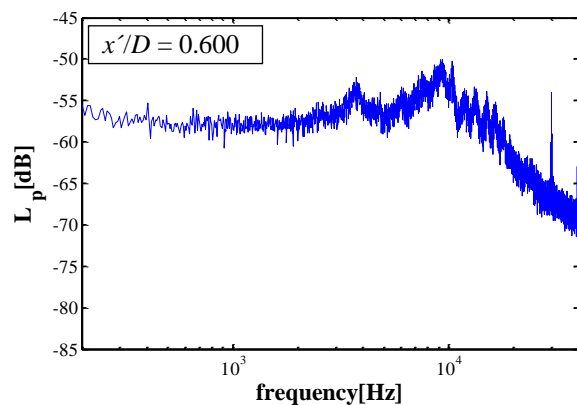


Fig. 8 Narrow band pressure level of fluctuation on impinging plate

さらに、音源となる現象が衝突板上にも影響を与えていると考え、衝突板上の圧力変動を確認した。

衝突板上圧力の平均値及び RMS 値には、2 つのピークを有する分布が見られた (図 7)。このピーク部における圧力変動スペクトルを確認すると、4,000 Hz と 10,000 Hz に特徴的なピークが見られた (図 8)。10,000 Hz は 90 deg 音響現象に特徴的な周波数だが、このピークが観察される領域は上で絞り込まれた領域とは異なっており、音源となる現象は直接的には衝突板上の圧力変動に影響を与えないことが確認された。

6. 結言

東京大学 柏キャンパス 極超音速高エンタルピー風洞において、自由噴流騒音と衝突噴流騒音について一連の計測実験を実施することにより、以下の結論を得た。

出口径 $D = 20[\text{mm}]$ の convergent-divergent ノズルから $M_j = 1.8$ の適正膨張超音速噴流を 5D 離れた傾斜平板に衝突させた際に発生する音響現象を議論して、2 種類の音響現象の存在を見出し、それぞれの特徴を明確にした。さらに、これらの特徴に基づいて、衝突板傾斜角をパラメータとした実験結果を議論し、音源領域の絞り込みと音源現象の糸口を示した。