

論文の内容の要旨

論文題目 音響トリガ条件付抽出法を用いた
超音速衝突噴流の音響波発生機構に関する研究

氏名 赤嶺 政仁

1. 序論

ジェットエンジンやロケットエンジンが広く用いられるのに伴って、その排気の高速のジェット(噴流)が推力だけでなく極めて強い音響波も生み出していることが知られるようになった。騒音低減という工学的な要請から、音響波の発生メカニズム等について半世紀以上に渡って研究が続けられてきたが、単純な系であってもメカニズムの複雑さから十分な理解に至っていないものが多い。

本研究で対象とする超音速衝突噴流もその一つである。この流れが実際に現れる例としては、ロケット打上げ時に火炎偏向板へ衝突する排気プルーム等が該当する。そのメカニズム理解は、火炎偏向板形状の改良等で衝突の仕方を変えることによる音響波の発生を抑制し、ロケット開発の際に大きな問題となるペイロードへの音響加振低減に寄与する。しかしながら、単純な斜め平板へ衝突する場合について行われた先行研究でも、音響波の発生メカニズムは未解明な点が多く残る。特に明らかではないのが、噴流の衝突領域から音響波が発生するメカニズムである。衝撃波等の関与の可能性が指摘されているが、流れが複雑であること、またFig. 1に模式図を示すように、衝突前後の超音速の流れからもマッハ波とよばれる音響波が発生すること、さらに他のジェット騒音の特徴から示唆されるように、音響波の発生が定常的・周期的ではなく間欠的に発生していることから、流れから音響波が発生する様子の十分な観察が実現されていない。例え

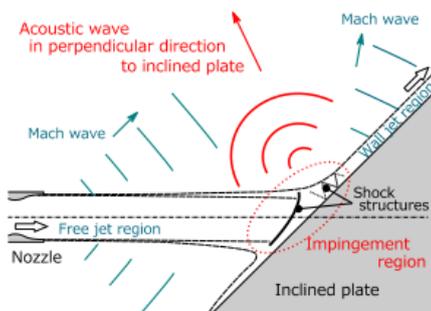


Fig. 1 Schematic overview of acoustic waves generated from an impinging jet.

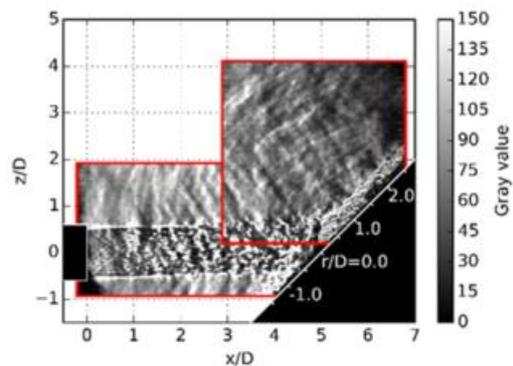


Fig. 2 Snapshot of raw schlieren visualization movies.

ば音源近傍の密度変動をシュリーレン法で可視化しても、Fig. 2のように多数の変動が混在しているため、音源位置や変動間の相関関係などの議論が困難である。また間欠性等のため、既存の解析手法を用いても音響波の発生する様子を明らかに抽出することは難しい。

本研究の目的は、斜め平板へ衝突する超音速適正膨張噴流において、特に衝突領域における音響波の発生メカニズムを明らかにするために、様々な衝突条件において、これまでよりも詳細に流れから音響波が発生する様子を観察することである。特に、音響波は間欠的に発生していることが想定されるため、これに有効な新たな手法として音響トリガ条件付抽出法を提案し、その解析結果と音圧レベル分布や音響インテンシティベクトル、壁圧分布等と比較して音響波発生機構の議論を行う。

2. 実験手法

本研究では、東京大学柏キャンパスの極超音速・高エンタルピー風洞で実験を行った。出口直径 $D = 20 \text{ mm}$ のノズルでマッハ1.8適正膨張噴流を生成し、斜め平板へ衝突させた。ノズル平板間距離を $5D - 20D$ の間で、また平板傾斜角を $45^\circ, 22.5^\circ, 10^\circ$ の間で変化させた。発生する音響波の音圧レベル計測のほか、音源近傍の音響波等をシュリーレン法で可視化し、高速度カメラで撮影した(フレームレートは100 kfps, 解像度は $512 \times 328 \text{ pixels}$)。また音響波の現れ方と衝突領域の衝撃波との関係を調べるために壁圧計測も行った。これらに加えて自由噴流領域からのマッハ波と衝突領域で生じた音響波を区別するために、平板を設置しない自由噴流の実験において音響インテンシティベクトル(音響波の伝播方向と強さを表すベクトル)の計測を行い、得られたベクトルを平板での鏡面反射を仮定してたどることで、自由噴流領域から生じるマッハ波が衝突噴流の場合にどのように現れるかを示すトレースラインを予測した。

3. 音響トリガ条件付抽出法と

その超音速自由噴流への適用

ウェーブレット変換を用いて間欠的に発生する音響波を特徴づけ、さらにこれらと同期して起こるような相関の高い変動を、同時計測した複雑なシュリーレン可視化動画等のデータから抽出する、音響トリガ条件付抽出法を提案した。この手法の模式図をFig. 3に示す。マイクロホンで計測した音圧信号(a)に対してウェーブレット変換を行うと、各周波数成分の振幅の時間変化(b)が分かる。この分布の中で、注目したい周波数が極大となる時刻を探す。位相の修正(c)をした後、これらの時刻を基

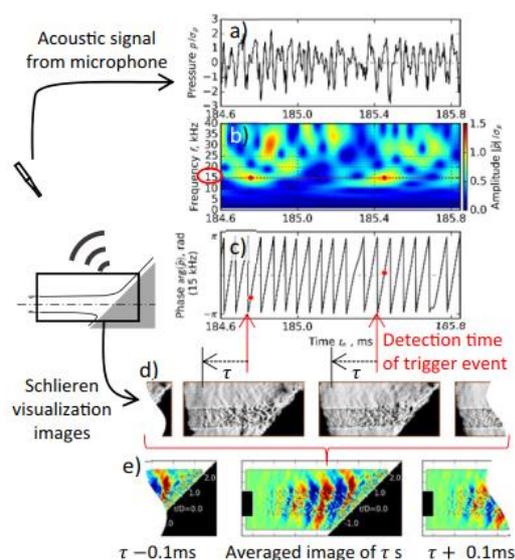


Fig. 3 Acoustic-triggered conditional sampling method

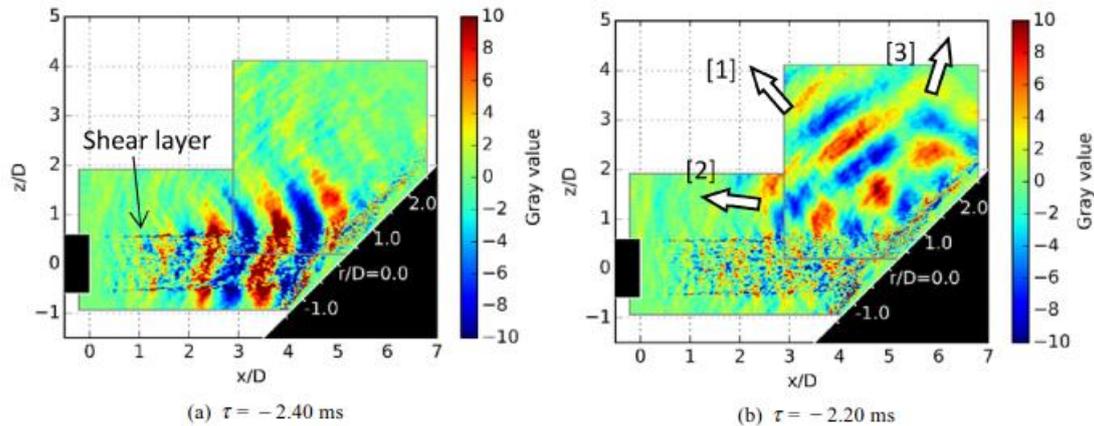


Fig. 4 Images extracted from the schlieren visualization movies using the acoustic-triggered conditional sampling method.

(Nozzle-plate distance, $5D$; plate angle, 45° ; trigger frequency, 15 kHz)

準として τ 秒前のフレームを同時計測したシュリーレン可視化動画からサンプリング(d)し、平均する(e)。この結果には、マイクロホンで検出した間欠的な音響波と無関係に現れる変動は打ち消し合うので、相関の高い変動が抽出される。この手法をまず、よく知られた現象である自由噴流のマッハ波に適用して有効性を調べた。その結果、間欠的なマッハ波の発生の様子をシュリーレン可視化動画から抽出でき、先行研究の結果や音響インテンシティベクトル等と整合性があることを確認した。

4. 音響トリガ条件付抽出法を用いた超音速衝突噴流の解析

本手法を超音速衝突噴流に対して適用し、特に衝突領域における音響波発生メカニズムを探った。先行研究で衝突領域からの音響波発生が観察されたノズル平板間距離 $5D$ 、平板傾斜角 45° のケースをもとに、ノズル平板間距離と平板傾斜角をそれぞれ変えた場合に衝突領域からの音響波の現れ方がどのように変化するか、また衝突領域の衝撃波等との関係について議論した。

衝突噴流の場合の適用例として、ノズル平板間距離 $5D$ の場合にFig. 2で示したシュリーレン可視化動画に対して音響トリガ条件付抽出法を適用すると、Fig. 4のような変動が抽出された。まず(a)自由噴流領域に沿って下流へ移流する変動が現れ、これらが平板に到達すると(b)衝突領域から音響波が発生する様子が詳細に観察できる。

本研究ではまず平板傾斜角を 45° に固定してノズル平板間距離を変えた。このとき、衝突領域付近からの音響波が伝播する平板に対し約 75° 方向では、ノズル平板間距離を $15D$ 等に広げた場合の方が、 $5D$ の場合よりも音圧レベルが高くなることが観察された。ノズル平板間距離を広げると衝突時のマッハ数が低下することから衝突の影響は小さくなり、例えば衝突領域の衝撃波は弱まる。このため、この音圧レベル上昇がなぜ起きたのかについて、音響トリガ条件付抽出法の解析結果を比較して議論した。その結果、ノズル平板間距離を広げると、自由噴流領域が長くなるため、この領域から生じるマッハ波が強まり、これが平板で反射されて衝突領域で生じた音響波と同様の方向へ伝播しており、この影響で音圧レベル上昇が起きたことが明らかになった。

次に、ノズル平板間距離を $5D$ として平板傾斜角を変えて衝突領域からの音響波の現れ方を調

べた。その結果、平板傾斜角 22.5° の場合には平板上の衝撃波(tail shock)付近から音響波が発生して干渉する様子が観察され、また平板傾斜角 10° の場合には転向角が小さいためtail shockは観察されず、また衝突領域からの音響波発生も観察されなくなった。さらに、平板傾斜角を 22.5° としてノズル平板間距離を広げた場合にも、tail shockが観察されない場合には衝突領域からの音響波発生も観察されないことが明らかになった。これらは、tail shockの現れ方と衝突領域からの音響波の発生の仕方の間に相関関係があることを示している。またいくつかのケースにおいて、衝突領域で生じた音響波とマッハ波との間に相関関係があることも示され、その理由として、衝突領域における音響波の発生にマッハ波を生み出す大規模乱流構造が関わっている可能性が考えられた。これらの観察結果から、衝突領域における音響波の発生メカニズムとして、衝撃波と大規模乱流構造との干渉が強く示唆された。

5. 結論

本研究では、音源近傍の複雑な密度変動を捉えたシュリーレン可視化動画等から、間欠的な音響波の発生と相関のある変動を取り出す手法として音響トリガ条件付抽出法を提案し、これを様々なノズル平板間距離・平板傾斜角の斜め平板へ衝突する超音速適正膨張噴流に対して適用して、流れから音響波が発生する様子を高い空間解像度で捉えることに成功した。この結果をさらに、音響インテンシティベクトルのレイトレーズ結果等と比較することにより、超音速衝突噴流における音響波の発生メカニズムに関して、以下の項目を始めとする結論を得た。

- ノズル平板間距離を広げることで自由噴流領域からマッハ波が発生し、平板で反射されて音響場に影響を与えるようになる。平板傾斜角によっては、衝突領域から生じた音響波と同じ方向へ伝播して音圧レベルを上昇させる。
- 衝突領域における平板上の衝撃波(tail shock)の現れ方と、衝突領域のから生じる音響波(tail shock付近から生じるもの)の現れ方との間に相関関係がある。
- 衝突領域から生じる音響波と噴流中の大規模乱流構造との間に相関関係があると推察される。前項と合わせると、衝突領域において、衝撃波と大規模乱流構造の干渉により音響波が発生することが示唆される。