

矩形超音速ジェットにおける音波放出の可視化

國 司 健 吾^{*1}・桑 添 裕 斗^{*1}・荒 木 幹 也^{*2}
小 島 孝 之^{*3}・田 口 秀 之^{*3}

ゴンザレス・パレンシア ファン・カルロス^{*2}・志 賀 聖 一^{*2}

^{*1} 群馬大学 大学院理工学府 理工学専攻 修士課程

^{*2} 群馬大学 大学院理工学府 知能機械創製部門

^{*3} 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

Visualization of acoustic wave emission in a rectangular supersonic jet

Kengo Kunishi^{*1}, Yuto Kuwazoe^{*1}, Mikiya Araki^{*1},

Takayuki Kojima^{*2}, Hideyuki Taguchi^{*2},

Juan C. Gonzalez Palencia^{*1}, Seiichi Shiga^{*1},

^{*1} Gunma University, Kiryu, Gunma 376-8515, Japan

^{*2} Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu, Tokyo 182-8522, Japan

1. 緒 言

現在、世界各国で次世代超音速機の研究・開発が進められている。超音速機の大きな課題の一つに空港内におけるジェット騒音の増加がある。超音速ジェットのジェット騒音源は2種類あるとされている¹⁾。ジェット騒音の音源は小規模渦と大規模渦構造の2つである。超音速ジェットにおけるジェット騒音は大規模乱流構造による騒音が非常に支配的である。これまでの研究において、単一の渦から音波が放出されている様子を実験的に観察したものは少ない。本研究ではシュリーレン光学系を用いて、ジェット騒音を輝度変動として可視化できることを明らかにした後、ウェーブレット変換を用いることで、輝度変動から音波放出現象を抽出する。さらに音波放出現象を観察することで、音波放出機構モデルを構築する。

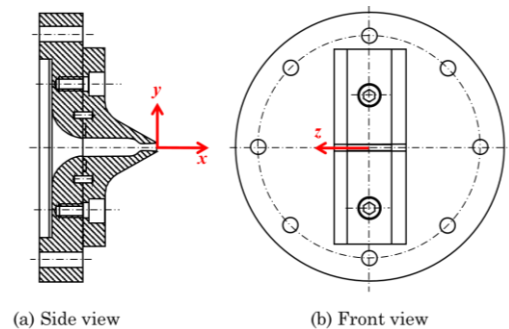


図1 矩形ラバルノズル

2. 実験装置及び方法

2.1 矩形ラバルノズル

図1に、矩形ラバルノズル概略を示す。ノズル入口全圧は絶対圧で0.308 MPa、ノズル出口静圧は大気圧である。ジェットマッハ数は $M = 1.37$ であり、ジェットは適正膨張である。ジェット速度は399 m/sである。渦の推定移流速度は240 – 355 m/sである。ジェット全温は291 Kで室温であり、作動

流体は空気である。本研究ではジェット条件は一定であるとして実験を行った。

2.2 輝度変動計測

本研究ではシュリーレン光学系を用いて輝度変動計測を行った。図 2 にシュリーレン光学系を示す。ジェット内部やその近傍を通過した平行光は、ジェットの乱流変動およびジェット騒音による密度勾配により屈折する。観測部を通過した平行光線は凹面鏡で集光され、流れに対し垂直に設置したナイフエッジを通過しハイスピードカメラで撮影される。ハイスピードカメラにより取得したシュリーレン画像は白黒 12 bit 階調であり、フレームサイズは 80×52 、サンプリングレートは 200 kHz、一回に取り込む画像数は 1 000 000 枚である。取得された画像からジェットの乱流変動やジェット騒音を輝度変動として取得できる。輝度変動は 8192 点ずつ 122 回に分けて高速フーリエ変換 (FFT) を行った。高速フーリエ変換を行うことで各周波数成分の輝度振幅である ΔI が求められる。

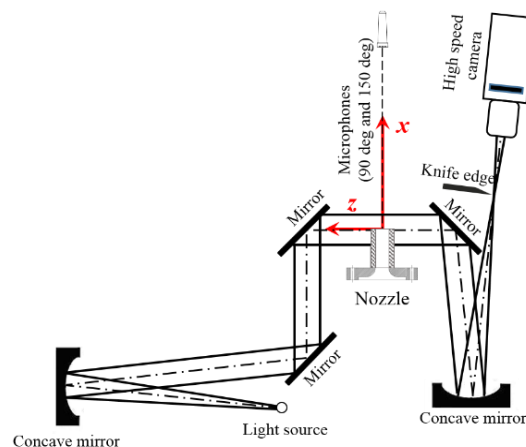


図 2 シュリーレン光学系

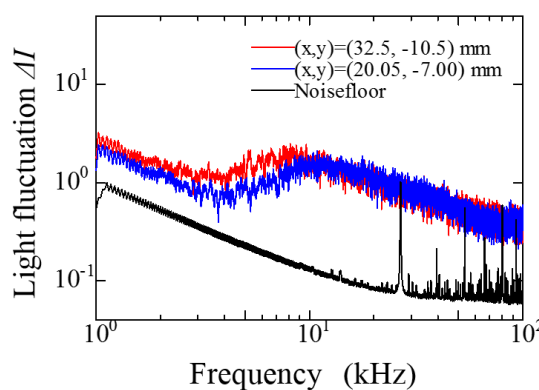


図 3 輝度変動の周波数特性

2.3 音波放出現象の抽出

画像上に参照点を設定し、ジェット騒音を輝度変動として捉えた後、ウェーブレット変換を行うことで、輝度変動の周波数分布の時間変化を求める。任意の参照点および周波数において、ウェーブレット関数の値が高い値を示した時刻が、音波が参照点を通過した時刻である。この時刻の輝度分布を重ね合わせることで、音波放出現象を抽出することができる。ウェーブレット変換には、Gabor のマザーウェーブレットを用いた。本研究では輝度変動の時系列に対する各周波数成分の相対値が分かればよいので、マザーウェーブレットの実部のみを用いている。

3.実験結果および考察

3.1 輝度変動の周波数特性

図 3 に輝度変動の周波数特性を示す。横軸は周波数、縦軸は輝度変動 ΔI である。赤線が参照点

$(x, y) = (32.5, -10.5)$ mm、青線が参照点 $(x, y) = (20.05, -7.00)$ mm に対応している。黒線は Noise floor である。スペクトルの形がわかりやすいようにそれぞれ 5 点の隣接平均をしてある。図から 8 kHz 付近にブロードバンドピークがあることを確認できる。このことから参照点 $(x, y) = (32.5, -10.5)$ mm では 8 kHz のジェット騒音が支配的であることがわかる。

3.2 音波放出時刻の選定

図 4 に参照点 $(x, y) = (32.5, -10.5)$ mm の輝度変動のウェーブレット関数を示す。横軸は時間、縦軸は周波数である。色合いはウェーブレット関数の値を示しており、音の強さを相対的に表している。図から 10 kHz から 20 kHz 付近にウェーブレット関数が強い値を示す時間が多く存在することがわか

る。これは参照点において 10 kHz から 20 kHz の音波を比較的多く観測するためである。図 4 から得た 8 kHz における輝度変動のウェーブレット関数を図 5 に示す。横軸は時間、縦軸はウェーブレット関数である。ウェーブレット関数の値が大きな値を示しており、かつその値がピークの頂点に達している時刻が各計測点で音波を捉えた時刻である。図中の赤丸は音波を捉えた時刻を示している。本研究では各周波数のウェーブレット関数の RMS 値を算出し、ウェーブレット関数が RMS 値の 2 倍以上の値に達した時刻を音波放出時刻 (Burst timing) と定義した。

3.3 音波放出現象の抽出

図 5 で選定した 8 kHz の音波放出時刻から 56 回の音波放出現象を抽出した平均輝度分布を図 6 に示す。音波放出を捉えた時刻を 0 ms として図 6 に示している。音波放出を捉えた時刻から -8.0 ms の平均輝度分布を図 7 に示している。横軸は x 座標、縦軸は y 座標である。色合いは輝度の大きさを示しており、渦や音波による輝度の変化を観察しやすいように色合いを調節している。白抜きの四角はピトー圧が最大値を示した位置を示している。三角のプロットはジェットの外縁を示している。赤の実線はポテンシャルコアを示している。図中の白い \times は音波の参照点を示している。参照点を中心に流れ方向に特徴的な模様を確認できる。これは音源となる渦と渦から放出される音波に周期性があるためである。図中において観察する渦を黒い矢印で示した。矢印の番号は世代を表している。参照点で音波を捉えた時刻における渦を第 0 世代とする。図 7 (-8.5 ms) で渦が 2 つに分裂している様子を観察できる。2 つに分裂した渦を第 1 世代とする。このとき、第 0 世代の渦が 2 つに分裂するとともに、ジェット外の音波が小さくなることわかる。この現象はさらに過去の時刻でも

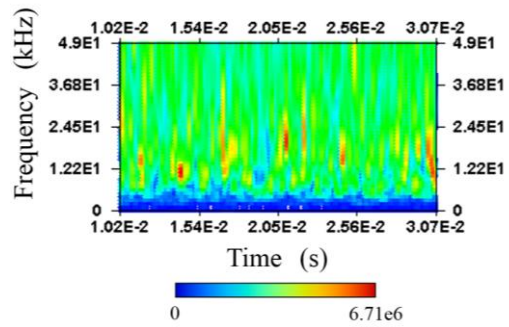


図 4 輝度変動のウェーブレット関数

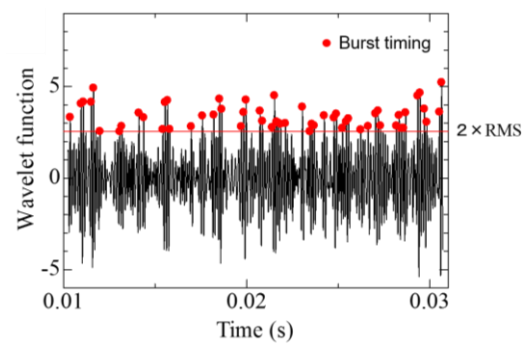


図 5 輝度変動のウェーブレット関数

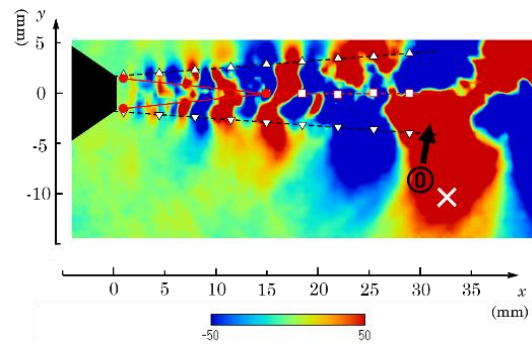


図 6 音波放出時の平均輝度分布 (0 ms)

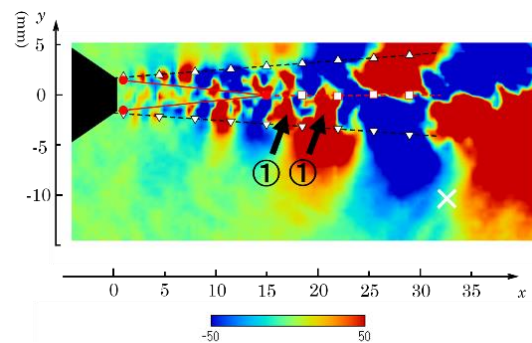


図 7 音波放出時の平均輝度分布 (-8.5 ms)

起こる。よって音波発生の原因は渦の合体によるものであると考えられる。

渦が分裂した位置とその時刻を整理したものを図8に示す。横軸は x 座標、縦軸は輝度の参照点で音波を捉えた時刻を 0 ms とした時間 t 、赤線は 8 kHz の音波の音源である渦、青線は参照点 $(x, y) = (20.05, -7.00) \text{ mm}$ で捉えた 10.5 kHz の音波の音源である渦に対応している。

以上の結果からジェット騒音源の音波放出機構モデルを構築した。図9にジェット騒音源の音波放出機構モデルを示す。三角のプロットはジェットの外縁を示している。実線はポテンシャルコアを示している。はじめにジェットせん断層上流でケルビン-ヘルムホルツ不安定性によるスケールの小さい渦が発生する²⁾。渦は成長しながら下流へ流れていく。隣り合う渦の回転方向は同じ向きなので2つの渦は合体する³⁾。2つの渦の合体時に音波が発生する。合体した渦はさらに成長しながら下流へ流れていく。渦の移流速度は低下していくので、ジェット外の音波は先行して進んでいく。これがジェット騒音源の音波放出機構モデルである。

4. 結 言

1. 音波放出現象を抽出することで、渦の合体時に音波が放出されることがわかった。
2. 音波放出現象を抽出することで、ジェット騒音源の音波放出機構モデルを構築することができた。

謝 辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構と群馬大学との共同研究として実施された。本研究の実施に当たり、群馬大学大学院生(当時)古嶋慎太郎氏、佐野典央氏、群馬大学大学院生 井出克伸氏、森優樹氏、群馬大学学部生(当時)増田祥子氏の協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

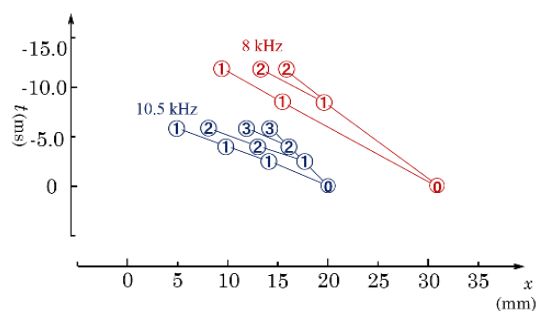


図8 渦の合体位置と時間

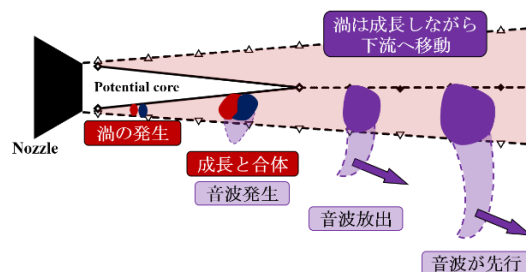


図9 ジェット騒音源の音波放出機構モデル

参考文献

1. Christopher K. W. Tam et al., *Journal of Fluid Mechanics*, **615**, pp. 253-292.
2. Werner J. A. Dahm et al., *Journal of Fluid Mechanics*, **241**, pp. 371-402.
3. K. M. Fazle Hussain et al., *Journal of Fluid Mechanics*, **173**, pp. 303-356.