

1%スケール模型実験のための高周波光学マイクロフォンの開発と エジェクタノズル性能調査への適用

後閑雅登^{*1}・ゴンザレス・ファン^{*2}・荒木幹也^{*2}
小島孝之^{*3}・田口秀之^{*3}

^{*1}群馬大学 大学院理工学専攻 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

1. 緒 言

現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）において、予冷ターボジェット（PCTJ）エンジンを搭載した極超音速航空機（HST）が研究中である。図1にPCTJエンジン⁽¹⁾⁽¹¹⁾概略を示す。PCTJエンジンは、離陸からマッハ5での巡航までを単一のエンジンサイクルで実現する意欲的なエンジンである。極超音速巡航を前提とした設計のため、投影面積は小さく、排気速度は高い。このため離陸時の騒音低減が大きな課題であり、騒音低減デバイスの開発が必要不可欠である。

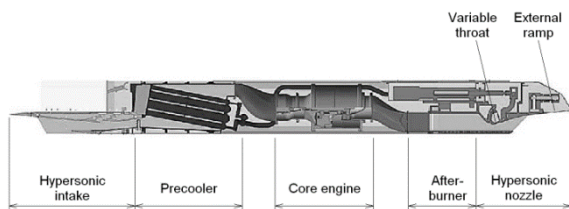


図1 PCTJエンジン概要

その開発において、騒音低減デバイスは最終的に実機を用いて評価される。しかし、高温ガスを取り扱う危険性や実験場の確保など、試験実施には多くの困難を伴う。そこで、低費用高効率化のため、1%スケール縮小ノズルを用い、高温ジェットを低密度ガスで代替し実機の音響場を模擬する手法が確立された⁽⁹⁾。ただし、その小スケール・高速ジェットがもたらす騒音周波数は極めて高く、一般的な高周波コンデンサマイクロフォンでは性能評価が不可能である。そこで、本研究では、1%スケールを実機換算した際の可聴域を計測可能な高周波光学マイクロフォンを開発し、低密度ガスを用いて音響場を模擬した上、騒音低減デバイスの性能試験に供した。

2. 実験装置および方法

2・1 光学マイクロフォン 図2に光学マイクロフォン概略を示す。レーザ光源、凹面鏡、ナイフエッジ、ピンホール、APD フォトセンサから構成されるシュリーレン光学系である。レーザ出力は200mW、波長532nm、ビーム直径は8mmである。空間分解能を確保するため、0.2mmのピンホールをフォトセンサに取り付けた。音波に暴露される測定部は200mmあり、それ以外の領域はアルミニウム製円筒で遮音した。

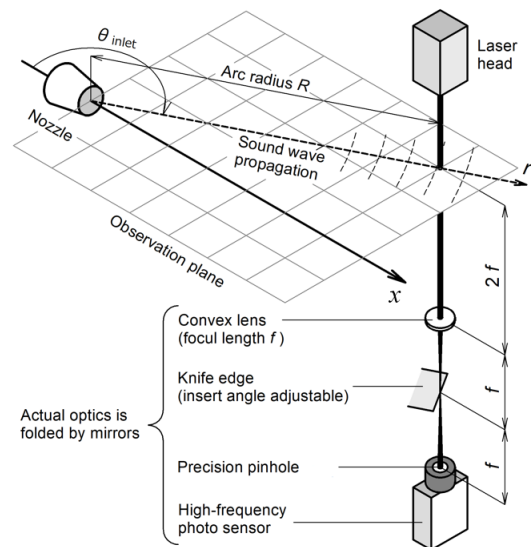


図2 光学マイクロフォン概略

光学マイクロフォンは、密度勾配を計測する原理から周波数に比例した感度を持つ⁽¹³⁾。さらに、光学系の作用、測定部の空間分解能、フォトセンサの空間分解能による周波数特性を考慮して補正する必要がある。

光学系の作用が生む周波数特性を計算する。測定部、焦点、センサ位置の輝度分布を順に計算する。測定部で光は音波による位相変調を受ける。この音波による

位相変調を受けた輝度分布を U_1 とする。続いて、平面波であったレーザ光はレンズによって焦点距離 f を半径とする球面波に位相変調される。焦点の輝度分布を U_2 とする。キルヒホッフの回折理論とレンズの位相変調子 $h(x_1, y_1) = e^{-ik(R'-f)}$ から、焦点の輝度分布は以下の式で得られる⁽¹⁴⁾。ここで、光学マイクロフォンは振幅の絶対値をコンデンサマイクロフォンとの較正によって得るため、比例係数を省略する。

$$U_2 \propto \iint_{-\infty}^{\infty} h \cdot U_1 \cdot e^{ikR} dx_1 dy_1 \approx \iint_{-\infty}^{\infty} U_1 e^{\frac{ik}{f}(x_1 x_2 + y_1 y_2)} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

ここでは、フレネル近似を適用した。(1)式の積分部分は、二次元フーリエ変換と同様の形をしている。従って、焦点の輝度分布は、測定部の輝度分布を二次元フーリエ変換することで得られる。次に、フォトセンサ上の像を U_3 とおく。焦点の大きさに比べ、フォトセンサまでの伝播距離は十分に長いので、フラウンホーファー近似が成り立つ。従って、 U_3 は以下の式で得られる。

$$U_3 \approx \iint_{-\infty}^{\infty} U_2 e^{\frac{ik}{R}(x_2 x_3 + y_2 y_3)} dx_2 dy_2 \quad (2)$$

(2)式の積分部分も(1)式と同様に二次元フーリエ変換の形をとる。測定部に様々な周波数の音波を入射し、センサ上の像を数値計算し周波数特性を算出した結果を図3に示す。光学マイクロフォンは、音波波長がプローブビームより短くなると感度が低下する。

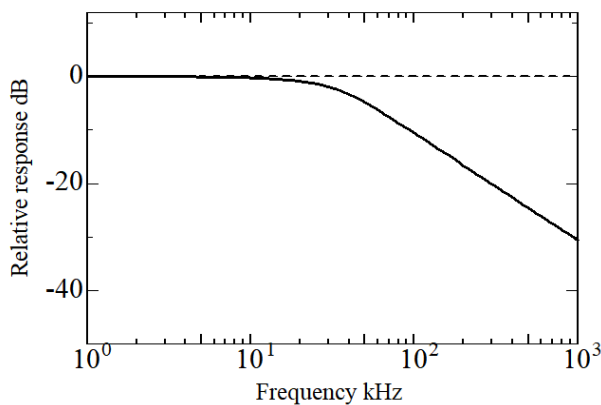


図3 光学系の作用による周波数特性

次に、光学マイクロフォンの持つ直線上の空間分解能によって生まれる周波数特性を補正する。音源は点音源であり、球面状に伝播すると仮定する。音源は距

離 R にあり、点音源から発せられた球面波の密度勾配を直線状に積分する。ここで α は音波の波数を表す。

$$\alpha L_{eff}(\alpha) \propto \left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\partial}{\partial x} e^{i\alpha\sqrt{x^2+y^2}} \Big|_{x=R} dy \right| \quad (3)$$

L_{eff} を有効光学長と呼び、図4に示す。数値計算値に最小二乗法で引いた直線の傾きを用いて光学マイクロフォン周波数特性を補正する。

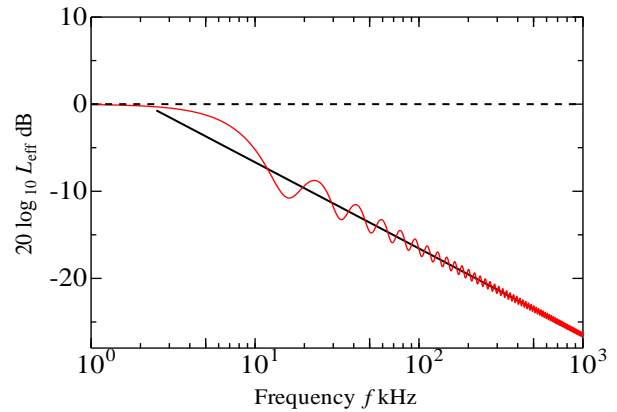


図4 有効光学長さ

フォトセンサの空間分解能によって生まれる周波数特性を計算する。ここで、ピンホール直径は十分に小さいものとし、音波波面の曲率を無視する。円形の領域に投影された平面波を積分する。

$$\eta(\alpha) \propto \left| \int_{-r}^r \sqrt{r^2 - x^2} e^{i\alpha x} dx \right| \quad (4)$$

η を光信号強度減衰量と呼び、図5に示す。

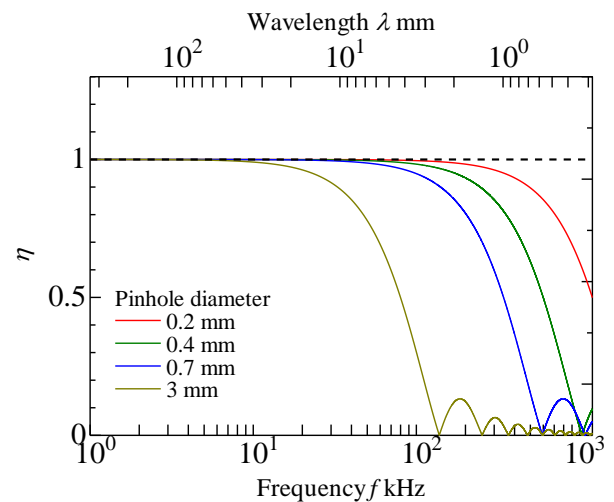


図5 光信号強度減衰量

2・2 エジェクタノズル 図6にエジェクタノズル概略を示す。実機の約1%スケールの縮小模型であり、ランプ、カウル、側壁から構成される⁽⁸⁾⁻⁽⁹⁾。ノズル幅は20mm、スロート高さは2.8mmである。ジェットの状態は表1に示す。PCTJエンジンとノズル縮小模型のジェット条件において、ジェット速度、ジェットマッハ数を一致させることで音響場模擬が可能となる⁽⁶⁾。カウル下流端中央を座標系の原点とする。エジェクタノズルでは、ランプ方向より二次流を導入する。2次側の出口面積 h を変えて、2次側の質量流量を変化させる。ノズルスロート面積 H と面積比(AR)の関係を以下に示す。

$$AR = \frac{h}{H} \quad (5)$$

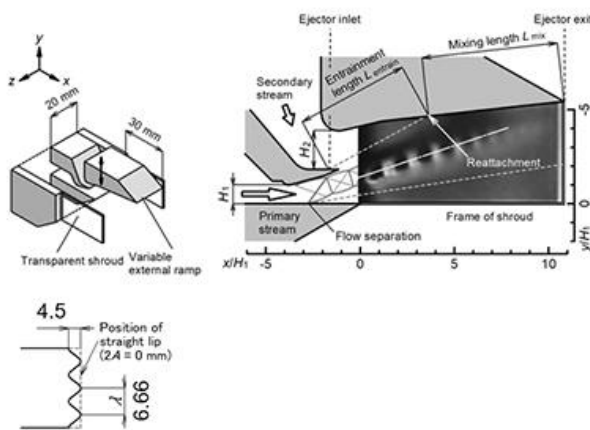


図6 エジェクタノズル概略

図6に混合促進デバイスを示す。主噴流と二次流の混合促進のために、2つの混合促進デバイスを使用する。1つはシュラウドであり、周辺大気のエントレインメントを抑制し、主噴流の運動量を二次流のみに分配させる。もう1つはミキサであり、主噴流と二次流の間に縦渦を生じさせ、混合を促進させる。ここでシュラウドなし、Mixer 振幅 $2A = 0$ 、 $AR = 0.0$ の条件を基準条件と定義する。また、混合時間を増加させるため、基準ランプから流れ方向に30mm延長したランプ(Ext.30)を用い、 $AR = 3.0$ 、 $2A = 4.5$ 、 $\lambda = 6.66$ の波形形状ミキサを選択し、これをエジェクタ条件と定義する。

表1 エジェクタ主噴流条件

Working gas	Helium
Main jet total pressure	0.31 MPa(a)
Nozzle exit static pressure	0.10 MPa(a)
Nozzle pressure ratio	3.17
Total temperature	348 K
Jet velocity	1160 m/s

2・3 音響計測 図7に音響計測位置概略を示す。音響計測には1/8インチマイクロフォン(B&K, 4138)を使用した。プロテクショングリッドは外した状態であり、マイクロフォンの周波数特性の限界から有効なデータの周波数上限を140kHzとした。基準条件とエジェクタ条件それぞれについて、 $R = 500$ mmに設置したマイクロフォンを用いてピーク放射角度を調べた後、 $R = 320$ mmのピーク放射角度に光学マイクロフォン、その後方40mmに1/8インチマイクロフォンを設置して遠方場騒音を計測した。計測方向はランプ方向である。

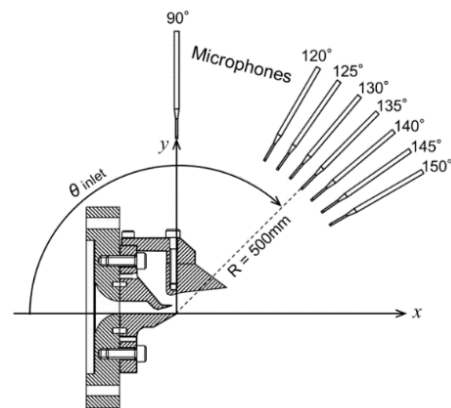


図7 音響計測位置概略

3. 実験結果及び考察

光学マイクロフォンの周波数特性は、密度勾配を計測する原理から周波数に比例し、それに図3の光学系の作用による周波数特性、図4の有効光学長さ、図5の光信号強度減衰量を足し合わせることで求められる。1kHzを基準として正規化した光学マイクロフォンの周波数特性を図8に示す。

その周波数特性の妥当性を検討する。ジェット騒音は、ノズル直径によらず相似なスペクトルを持つことが知られており、ピーク放射角度ではF-spectrumが支配的である⁽¹⁴⁾。光学マイクロフォンを用いて、ノズル直径の異なるジェット騒音を計測し、周波数をノズル直径で正規化した上、F-spectrumと比較する。図9にノズル直径4, 8mmのジェット騒音を光学マイクロフォンで計測した結果を示す。ジェット速度は561m/sである。F-spectrumと比較し、500kHzまでの周波数帯で4dB以内の誤差であるので、周波数補正は妥当であると考えられる。

光学マイクロフォンをエジェクタ性能試験に適用した結果を図10に示す。コンデンサマイクロフォンで計測可能な1kHzから140kHzまでのOASPLは、基準

条件で 140.8 dB, エジェクタ条件で 132.4 dB であり, 8.4 dB の騒音低減性能を確認した. 光学マイクロフォンで計測した 140 kHz から 1 MHz の SPL を加えると, 増分は, 基準条件で 0.4 dB, エジェクタ条件で 0.5 dB であった. 従って, コンデンサマイクロフォンで計測不可能な高周波帯に OASPL を著しく引き上げる成分がないことが確認された.

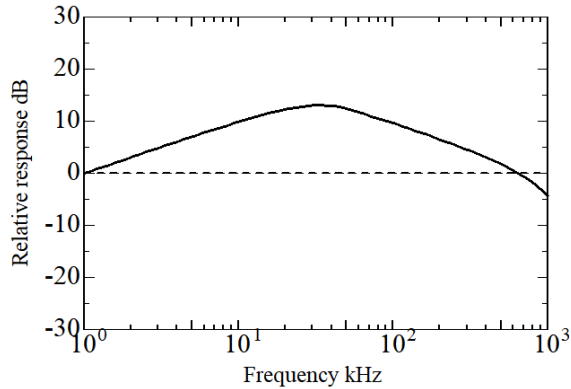


図 8 光学マイクロフォン周波数特性

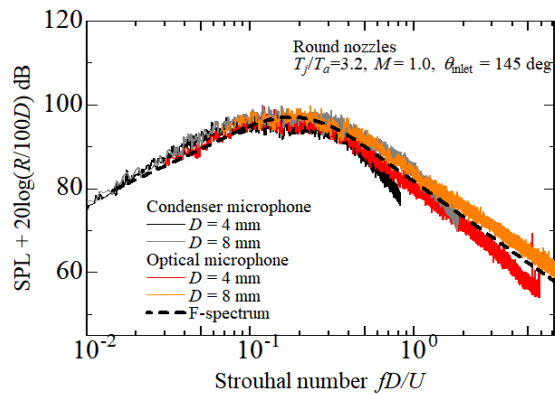


図 9 相似スペクトルを用いた光学マイクロフォン周波数特性の評価

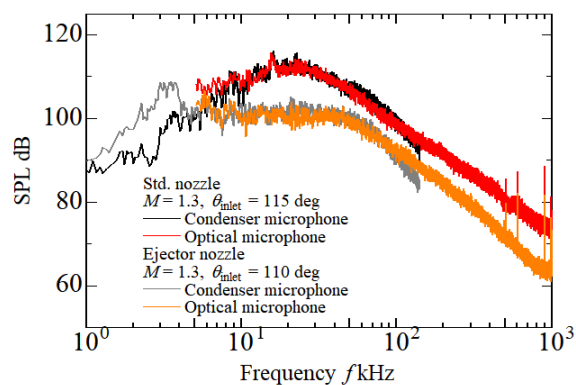


図 10 エジェクタノズル騒音低減性能調査

4. 結 言

- 1) 光学マイクロフォンの周波数特性を算出した.
- 2) 光学マイクロフォンの周波数補正の妥当性をジェット騒音の相似スペクトルを用いて評価し,

1 MHz オーダまでの周波数帯で比較対象の F-spectrum と 4 dB 以内の誤差であることを確認した.

- 3) 低密度ガスによる実機相当の音響場模擬の上, $AR=3.0$, $2A=4.5$, $\lambda=6.66$ のミキサで Ext.30 ランプを用いた場合, 騒音低減量は 8.3 dB であった.

謝 辞

本研究は, 宇宙航空研究開発機構と群馬大学の研究協力のもと行われた. 本研究は, 科研費 16H04584, 19H02338 の助成を受けたものである. 群馬大学大学院生 小野貴大氏, 栗原湧多氏, 群馬大学学部生 中村慎太郎氏, 菊池裕之氏の協力を頂いた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) Kojima, T., et al., AIAA Paper 2008-2504, 2008.
- 2) Kobayashi, H., et al., AIAA Paper 2008-2620, 2008.
- 3) Taguchi, H., et al., AIAA Paper 2009-7311, 2009.
- 4) Kojima, T., et al., AIAA Paper 2009-7312, 2009.
- 5) Araki, M., et al., *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 28, No. 6, pp. 1258-1267, 2012.
- 6) Araki, M., et al., *AIAA Journal*, Vol. 50, No. 3, pp. 751-755, 2012.
- 7) Taguchi, H., et al., *Acta Astronautica*, Vol. 73, pp. 164-172, 2012.
- 8) Araki, M., et al., *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 1, pp. 221-232, 2014.
- 9) Araki, M., et al., *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 3, pp. 820-833, 2014.
- 10) Araki, M., et al., *AIAA Journal*, Vol. 53, No.3, 2015.
- 11) Takahashi, H., et al., *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 1, pp. 204-218, 2015.
- 12) C. K. W. Tam, et al., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 615, pp. 253-292, 2008.
- 13) Panigrahi P.K., Muralidhar K., *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, pp. 23-46, 2012.
- 14) D. E. Evans, et al., *Plasma Physics*, Vol. 24, No.7, pp. 819-834, 1982.
- 15) Sonoda, Y., Akazaki, M., *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 33, No. 5B, pp. 3110-3114, 1994.