

卒業論文要旨

楕円ノズルを用いた小型ジェットエンジンの性能及び騒音評価

Performance and Noise Evaluation of a Small Jet Engine with an Elliptical Nozzle

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1220107 野老山 将悟

1. 緒言

今日の航空機が発生させる騒音に対して国際的な規制が敷かれており、航空機輸送量の増加に伴い騒音の規制値は年々厳しくなっている。そのため航空機の騒音を低減させることは重要な課題の一つである。航空機から発生する騒音は機体騒音とエンジン騒音の2つに分類される。エンジン騒音にはジェット騒音やファン騒音、燃焼器騒音などがある。本研究では離陸時に大きな割合を占めるジェット騒音⁽¹⁾に着目した。

ジェット騒音を低減させる取り組みの一つとして排気ノズルの形状を利用した方法がある。その方法の中でも実機へ採用されているものとしてシェブロンノズルがあり、これはノズル吹き出し口を周方向へ鋸状の凹凸形状にすることで縦渦を誘起し、排気ジェットと周囲空気の混合を促進させ、低騒音化を実現させている。しかし、問題点として巡航時の推力低下が挙げられる。

そこで本研究では、推力低下を最小限に防ぎ、ジェット騒音を低減させる新しいノズル形状の提案を目的とし、小型模型用ジェットエンジンを用いた実験によりノズル形状の違いによるエンジン性能と騒音の評価を行った。

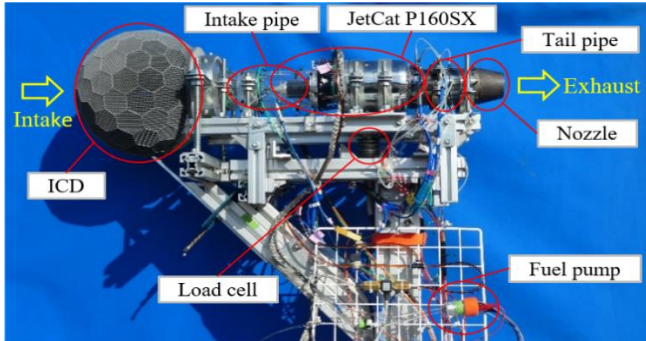


Fig. 1 Testing equipment.

Table 1 Engine specification.

Mass	1.59	[kg]
Engine size	$\phi 112 \times 320$	[mm]
Maximum thrust	160	[N]
Maximum rotational speed	125,000	[rpm]
Maximum exhaust temperature	750	[°C]

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置

実験に用いた小型模型用ジェットエンジンは JetCat 社製の P160SX である。図 1 に実験装置、表 1 に P160SX の仕様を示す。燃料にはジェットエンジン用燃料である JetA-1 に容積比が 5% のタービンオイル AeroShell Turbine Engine Oil 500 を混ぜた混合油を使用した。

インテークパイプの上流はベルマウス形状になっており、ベルマウスを覆うようにエンジン内への異物流入防止と流入空気の整流を目的とした流入空気整流装置(Inflow Control Device, ICD)を設置した。また、インテークパイプとテイルパイプには温度を測るための K 型熱電対と全圧及び壁面静圧を測定するためのチューブが取り付けられている。推力の測定には P160SX の下部に取り付けてある共和電業社製のビーム型ロードセル LUB-30KB を使用した。本研究では各種ノズルをテイルパイプに取り付けて実験を行う。

実験にはノズル出口形状が真円形状であるベースノズル(Base)と、扁平率が異なる 2 種類の楕円ノズル(EL- α , EL- β)を使用した。図 2 に実験に使用したノズル、表 2 に各ノズルの寸法を示す。実験では、楕円の長軸が水平な向き(以下, HL)と、鉛直な向き(以下, VL)の 2 パターン計測し、ベースノズルと合わせて計 5 パターンの計測を行った。



Base EL- α EL- β

Fig. 2 Base nozzle and Elliptical nozzles.

Table 2 Nozzle dimensions.

Nozzle type	Base	EL- α	EL- β
Nozzle length [mm]	46.0		
Nozzle outlet diameter [mm]	49.0		
Nozzle outlet major axis [mm]		55.0	60.0
Nozzle outlet minor axis [mm]		43.6	40.0
Flattening	0.000	0.207	0.333

騒音の測定には 20Hz~80kHz まで測定可能なアコー社製のプリアンプ一体型マイクロホン TYPE 4156N(TYPE2)を用いた。騒音の録音には Zoom 社製のフィールドレコーダー

ZOOM F6 を使用し、ビット数 24bit, サンプル周波数 192kHz, wav 形式で録音をした。

2.2 実験方法

本研究は高知工科大学香美キャンパスのグラウンドで実施した。マイクロホンはジェット軸から下流に向かって反時計回りに $\theta=30, 35, 40, 45, 50, 55$ [deg] の位置に設置した。エンジン回転数が最高回転数に対して約 50, 60, 70, 80, 90[%] で推力をはじめとするエンジン性能のパラメーターを 20 秒間計測し、騒音は 5 秒間計測した。また、誤差範囲の確認のため各回転数で 3 回データの取得を行った。図 3 にマイクロホンとエンジンの位置関係を示す。ノズル中心からマイクロホンまでは 10m とした。

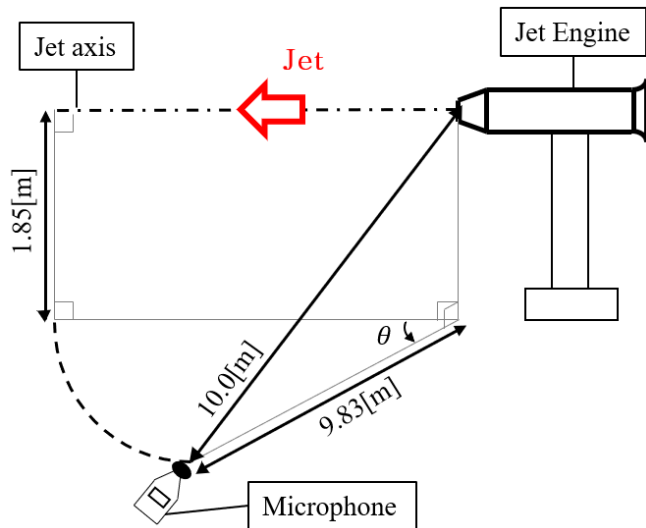


Fig. 3 Noise measurement.

3. 実験結果と考察

図 4 に推力、図 5 に燃料消費量の計測結果を示す。今回の実験では回転数が 90% で安定せず、一部誤差範囲が大きくなっている。楕円ノズルは推力及び燃料消費量で Base と同一曲線を示し同様な値であると確認された。また推力、燃料消費量において楕円ノズルの向きや扁平率の影響が少ないことを確認した。これは、楕円のノズルのノズル出口面積がベースノズルの出口面積と等しいためであると考えられる。

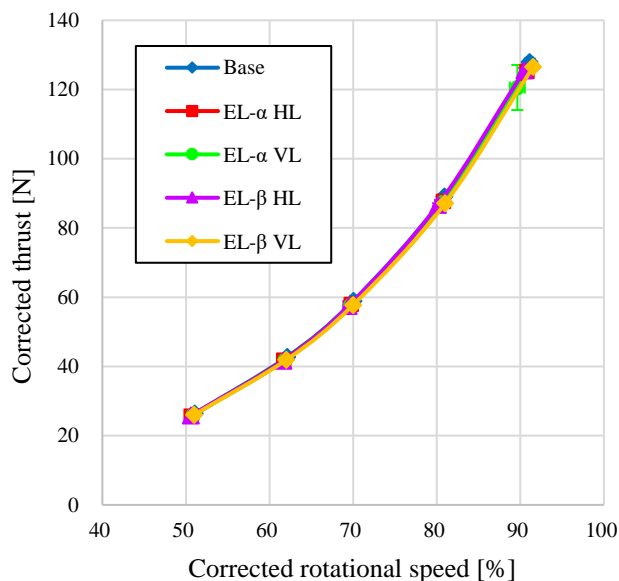


Fig. 4 Corrected rotation speed and corrected thrust.

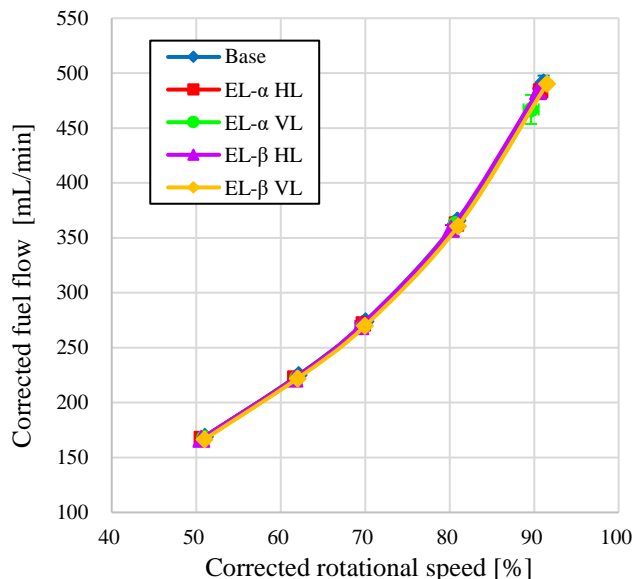


Fig. 5 Corrected rotation speed and corrected fuelconsumption.

騒音測定に関しては修正回転数 90% にて回転数が不安定であるため、比較的同じ回転数で運転できた修正回転数 80% での比較を行った。また騒音の評価には音圧レベルの時間平均値である等価音圧レベル L_{eq} で評価した。図 6 に修正回転数 80% で Overall の騒音測定結果を示す。また、図 7 に参考として Solidworks flow simulation の粘性解析による、ジェット軸からの距離を横軸にとった Base, EL- α , EL- β の長軸上及び短軸上のノズル出口付近の流速分布を示す。なお流入境界における主流速度は回転数 80% 時におけるベースノズルの計測結果から 128m/s とした。

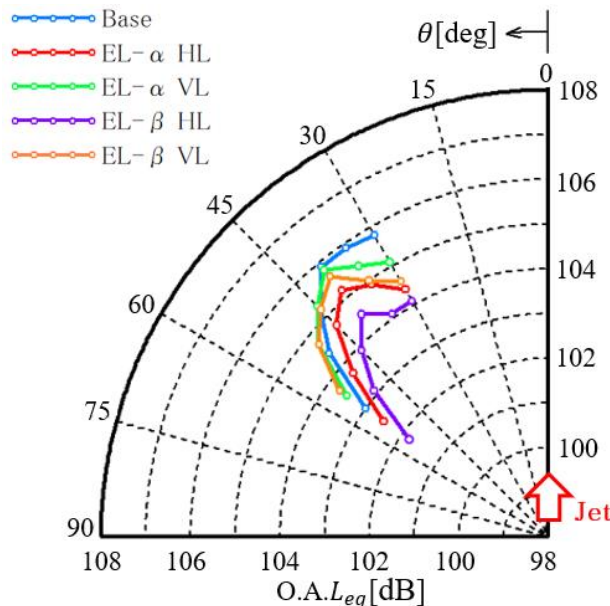


Fig. 6 Directivity of overall jet noise.

図 6 において、Base と楕円ノズルを比較すると Base は 35deg ~ 40deg の間、楕円ノズルは 40deg でピークを迎えており指向性の違いが見られた。また、Base のピーク角度及び、楕円ノズルのピーク角度に着目すると、ノズルの向きによらず扁平率が大きいほど騒音が低くなり、また Base よりも小さい傾向であった。

次に楕円ノズルの HL に着目すると各角度において Base 及び楕円ノズルの VL よりも低くなった。図 7 より Base と楕円ノズルを比較すると長軸側の最大流速は Base の最大流速よりも小さいことがわかる。また、楕円ノズルのみ比較すると短軸側の最大流速と長軸側の最大流速の差が、EL- α では約 3m/s、EL- β では約 5m/s であり長軸側の方が流速は小さく、周方向で流速が一樣ではないことがわかる。これは長軸側断面が短軸側断面より絞りが緩いため、流速が短軸側よりも加速されなかったからだと考える。ジェット騒音は流速の 8 乗に比例のすることが知られており、楕円ノズルの長軸側の噴流によって発生する騒音は Base 及び短軸側より小さいと考えられる。また、各マイクロホンが計測している音は、計測に使用しているマイクロホンが音場型マイクロホンであり、マイクロホンに対して正面に入ってくる音を感度良く計測することから、ノズルに向けているマイクロホンの延長線上にある音源から発生した音を主に計測すると考えられる。ジェット騒音は噴流と周囲空気とせん断領域が音源になることから、マイクロホンからの延長線と噴流との交差点で発生した音を主にマイクロホンは計測していると考えられる。図 8 に EL- β HL の噴流と 30deg のマイクロホンからの延長線との交差の様子を、図 9 に EL- β HL の噴流と 55deg のマイクロホンからの延長線との交差の様子を、図 10 にノズルの排気側から見た時の 30deg と 55deg からの延長線を示す。なお、延長線の直径は計測に使用したマイクロホンと同じ径である。図 8 と図 10 より、30deg からの延長線は長軸方向の噴流と交差しており、ノズルの排気側から見ると延長線は長軸側にあることから、30deg からの延長線は主に長軸側付近から出ている噴流と交差していることが考えられる。次に図 9 と図 10 より、55deg からの延長線も長軸方向の噴流と交差しており、ノズルの排気側から見ても延長線は長軸側にあることから、55deg からの延長線も長軸付近から出ている噴流と交差していると考えられる。また、30deg~55deg の間のマイクロホンからの延長線も計測点と同じ円周上にあることから長軸付近から出ている噴流と交差することが考えられる。これらのことから楕円ノズルの HL の場合、各角度におけるマイクロホンは長軸側の噴流によって発生した騒音を主に計測していると考えられる。

よって、長軸側の流速が Base 及び短軸側よりも小さいことから騒音も小さくなり、また楕円ノズルの HL の場合、マイクロホンは長軸側の騒音を計測すると考えられることから各角度で騒音が小さくなったと考えられる。

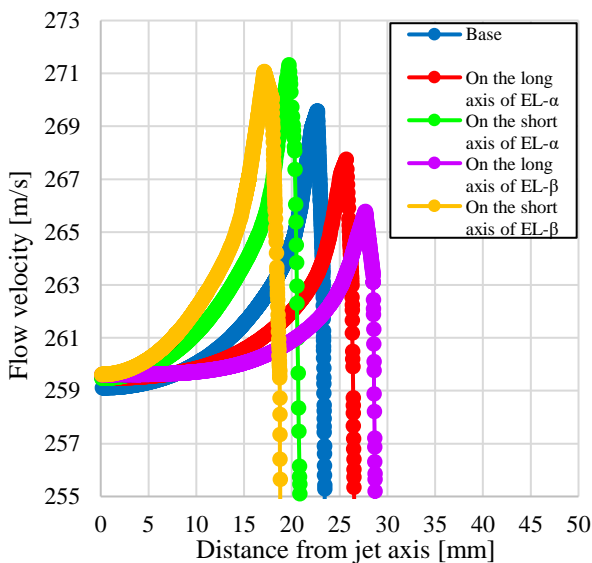


Fig. 7 Flow velocity distribution on the long axis and short axis.

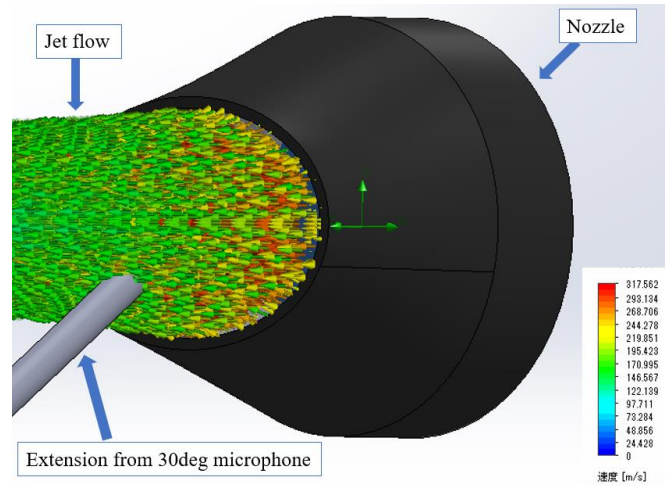


Fig. 8 Jet in EL- β and extension from 30deg microphone.

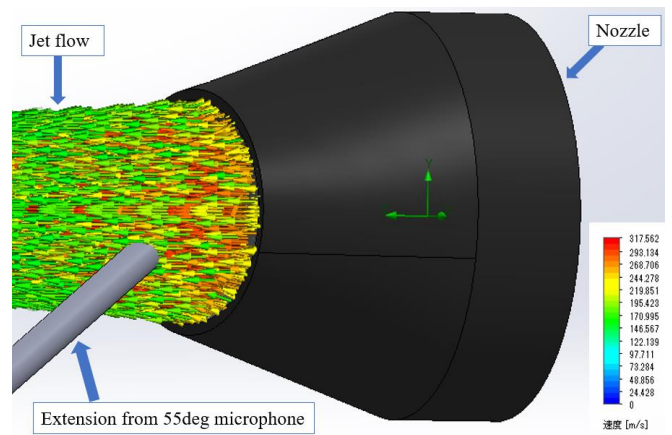


Fig. 9 Jet in EL- β and extension from 55deg microphone.

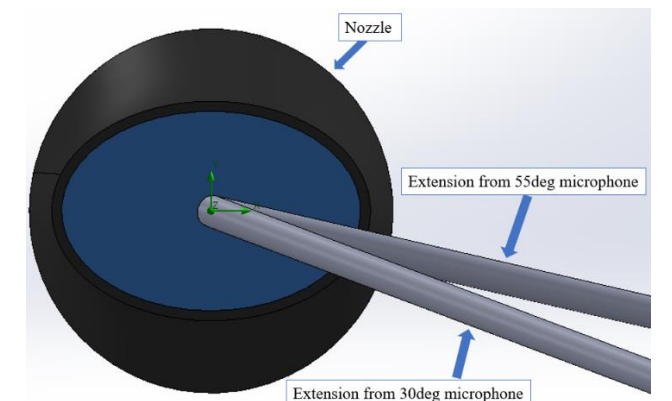


Fig. 10 Extension of 30deg and 55deg when viewed from exhaust side.

結言

本研究では小型模型用ジェットエンジンを用いてノズル形状の違いによるジェットエンジン性能及び騒音の計測を行った。その結果、楕円ノズルとベースノズルは推力及び燃料消費量に明確な差はなく、扁平率が大きくなるほどベースノズル及び楕円ノズルのピーク角度における騒音が低くなる傾向であった。また、実験結果の補完として Solidworks flow simulation を用いることで噴流の流れを解析した。その結果長軸側の最大流速はベースノズルよりも小さくなることがわかり、また実験において長軸側の流速によって発生した騒音を計測した結果、騒音は小さくなったことから長軸側の騒音は

ベースノズルよりも小さくなると考えられる。このことから、楕円ノズルはエンジン性能に大きな変化を与えず、騒音を低減させるノズルとして有効であると考えられる。

今後は楕円ノズルとシェブロンノズルの比較実験を行うことで、エンジン性能や騒音低減において楕円ノズルの優位性を調査することを検討している。

文献

- (1) 大石勉, “航空機騒音の低減対策について”, 日本音響学会誌, 73 卷 11 号 (2017), pp. 725-730.
- (2) Michael James Lighthill, “On sound generated aerodynamically I. General theory”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 211, No. 1107 (1952), pp.564-587.