J0910104

流れを伴うダクトにおける音の開口端反射率増加現象に関する一考察*

西村正治^{*1}, 金澤太一^{*2}, 後藤知伸^{*1}Study on the increasing phenomena of the sound reflection coefficient
at a duct open end with flowMasaharu NISHIMURA^{*1}, Taichi KANAZAWA and Tomonobu Goto^{*1} Tottori Univ. Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering
Koyama-cho South 4-101, Tottori, 680-8552, Japan

The increasing phenomena of the sound reflection coefficient at a duct open end with flow have been studied by many researchers since 1970's. However its physical mechanism has not been made clear. In this paper, the mechanism was tried to be clarified by using CFD simulation. Compressible unsteady CFD using URANS($k-\epsilon$) or LES model was used to simulate sound propagation and reflection at a duct open end with flow. CFD simulation could capture the sound propagation. As the results, the increasing phenomena of the sound reflection coefficient were calculated. Base on the visualization of flow and pressure field, the increase of the sound reflection coefficient was considered to be occurred by new sound source generation according to the interaction between the radiated sound and fluctuating shear layer. Its phenomena are remarkable when the sound frequency coincides with the flow instability frequency.

Key Words : Sound reflection coefficient, Duct open end with flow, Compressible unsteady CFD, Physical mechanism

1. 緒 言

流れを伴うダクトの開口端での音響インピーダンスは、エンジンのマフラーや送風機ダクト系の音響設計において、重要な境界条件を与えるものであり、古くから種々研究されてきた⁽¹⁻⁷⁾。中でも R. M. Munt は、ダクトの出口開口端に亜音速流れが存在する場合の音波の反射現象に対して解析モデルを構築し、流出マッハ数が増加するとともに音波の開口端反射係数が増加し、特定の周波数範囲で 1 を超えることを示した^(8,9)。またこの現象は、いくつかの先行研究によって実験的に確認されている^(10,11)。著者らが行った実験でも、低亜音速ながらそのような結果が得られた⁽¹²⁾。本結果は、ダクト開口端に向かう音波の音圧より、ダクト開口端から反射してくる音波の音圧が大きくなるということを意味しており、一見不可思議な現象のように思える。Munt の解析モデル⁽⁹⁾から、本現象はダクト出口で生じるせん断流れと音波が干渉して発生すると推察されるが、その物理メカニズムが今一步明確でない。

そこで本研究では、圧縮性非定常 CFD 解析を用いて、音波を模擬した非定常脈動を与えることにより、流れを伴うダクトにおける音の開口端反射現象をシミュレートし、上記現象を再現するとともに、可視化により、その物理メカニズムを考察した。

2. CFD を用いた開口端反射率計算手法

2・1 解析モデル

解析は、市販の汎用解析コード (ANSYS-FLUENT) の圧縮性非定常解析を用いて行った。解析モデルは、図 1, 2 に示す、2 次元軸対称モデルである。計算領域は、内径 55mm、長さ 100mm のパイプと、直径 4000mm、長さ

^{*1} 正員, 鳥取大学 (〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

^{*2} 学生員, 鳥取大学 工学研究科

E-mail: mnishimura@mech.tottori-u.ac.jp

Fig. 1 Calculation zone

Fig. 2 Mesh model

9600mm の外部空間とした。境界条件としては、パイプの入り口に 1%の流動変動を有する流れを与え、後方遠方の出口境界としては、静圧一定境界とした。メッシュ数 63000、タイムステップ 5×10^{-6} 秒である。計算モデルとしては、渦の影響を明確には捉えられないモデルとして、URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes, $k-\epsilon$) を、渦の存在もとらえられるモデルとして LES (Large Eddy Simulation) を用いて行った。なお、入り口での流動変動としては、音波の反射率の計算にはランダム変動を、可視化には正弦波変動を用いた。

2・2 開口端反射率の計算手法

まず CFD 解析結果から、ダクト開口端 (図 1 の monitor 点) での静圧 $p(t)$ 、流速 $u(t)$ を求め、その時間平均値を差し引いた変動成分 $p'(t)$ 、 $u'(t)$ を計算する。これが、ダクト開口端での音圧と粒子速度に対応する。今、ダクト内で平面波のみが伝播する周波数領域を対象としているので、これらは以下の平面波の基礎式を満足する。

$$p'(t) = p'_i(t) + p'_r(t) \quad (1)$$

$$u'(t) = \frac{1}{\rho c} (p'_i(t) - p'_r(t)) \quad (2)$$

ここで、 $p'_i(t)$ 、 $p'_r(t)$ は、それぞれ、音圧のダクト開口端への入射波成分、開口端からの反射波成分を表す。また、 ρ は密度、 c は音速である。そこで、それぞれは、音圧と粒子速度を用いて、次式で求められる。

$$p'_i(t) = \frac{1}{2} (p'(t) + \rho c u'(t)) \quad (3)$$

$$p'_r(t) = \frac{1}{2} (p'(t) - \rho c u'(t)) \quad (4)$$

式(3)、(4)で求めた $p'_i(t)$ 、 $p'_r(t)$ をそれぞれフーリエ変換し、得られた周波数ごとの振幅スペクトル $p'_i(f)$ 、 $p'_r(f)$ を用いて、周波数ごとの反射率 $R(f)$ を次式で求めることができる。

$$R(f) = \frac{p'_r(f)}{p'_i(f)} \quad (5)$$

3. 計算結果

3・1 開口端反射率

本シミュレーションで得られた開口端での音圧反射率を、URANS, LES に対してそれぞれ図 3, 4 に示す。横軸は無次元周波数 ka (k : 波数, a : ダクト半径) で整理し、パラメータは、ダクト内平均流速のマッハ数である。いずれの場合も、マッハ数の増加とともに反射率が大きくなり、1 を超える周波数域が生じている。また、そのピーク位置はマッハ数とともに高周波数に移っているのがわかる。URANS と LES では、ピーク周波数はほぼ同じであるが、ピーク高さは、LES の方が顕著に表れている。なお、データがギザギザしているのは、FFT におけ

Fig.3 Sound reflection coefficient (URANS)

Fig.4 Sound reflection coefficient (LES)

Fig.5 Sound reflection coefficient (Munt)⁽⁹⁾ Fig.6 Sound reflection coefficient (Steady flow)⁽¹³⁾

る平均化回数が十分取れなかったためと考えられる。

比較として、図5にはMuntの計算結果⁽⁹⁾を、図6には、松原らが定常流を仮定して音場計算を実施した場合の結果⁽¹³⁾を、概略スケールを合わせて表示している。いずれもマッハ数の増加とともに反射率が増加し、1を超える周波数域が生じることは同様だが、その増加量は、いずれも今回の計算結果に比べて小さい。また、ピークの周波数は、Muntの場合はマッハ数とともに高周波に移動するが、その移動量は図3、4に比べて大きい。定常流を仮定した図6の場合は、ピーク周波数はさほど顕著に高周波に移動していない。

以上、圧縮性非定常CFD解析を用いて、流れを伴うダクト開口端での音圧反射率が大幅に増幅し、1を超える周波数帯が発生する現象が再現できた。また、その反射率の増加は、流れの非定常性、さらに渦を考慮することにより、より顕著に表れることがわかってきた。

3・2 音場の可視化

ダクト開口端部で発生している物理現象を考察するために、音波の可視化を試みた。図7は、URANSの計算で入り口流速に700Hzの正弦波脈動を与えたときの、ダクト開口端部付近での流速変動の大きさ $u'(t)$ 、圧力変動 $p'(t)$ （いずれも平均値からの差分で＋をつけて示す）を半径断面上で示している。これは、動画のスナップショットである。マッハ数0.03はほぼ流速ゼロに対応する条件として選んでいる。

圧力変動 $p'(t)$ の図から、ダクト開口端から放射する音波の波面が捉えられていることがわかる。また、 $M=0.03$ では開口端からスムーズに音波が放射されているのに対し、 $M=0.2$ の場合は、ダクト開口部直後のせん断層付近に新たな音源が発生し、それが流れに乗って後方に移流しているように見受けられる。一方、流速変動はダクト出口の後方で、速いところと遅いところが交互にあらわれ、流れが詰まって遅くなったところで圧力が上昇し、速いところで圧力が減少している。その間隔はせん断層の揺らぎに対応している様子である。

4. 考 察

図3の結果から、反射率のピーク周波数とマッハ数の関係をプロットすると、図8が得られる。これから、ピ

Fig.7 Visualization of sound field (URANS, 700Hz)

ーク周波数はほぼマッハ数に比例し, $[ka]_{peak} \cong 1.18M$ の関係になっていることがわかる. 図4の結果からもほぼ同様の関係が見出される. この周波数をダクト出口平均流速 U とダクト径で無次元化したストローハル数 St で表すと, $St = 2af/U = ka/\pi M = 0.378$ となる. ダクトから放射される噴流のせん断層で発生するケルビン・ヘルムホルツ不安定渦のストローハル数は, 一般に直径の2~3倍下流では0.38程度とされている⁽¹⁴⁾. よって, 音波の反射率が最も大きくなる周波数は, この不安定渦の周波数とほぼ一致することとなる.

以上の関係から, 流れを伴うダクト開口端で音圧反射率が増幅され, 一部反射率が1を超える現象は, 下記ののようなメカニズムによると推察される. (図9参照)

- ・ダクト端から音波による圧力変動が放射されると, それに応じてせん断層が広がったり狭まったりする.
- ・そのせん断層の揺らぎ(渦)は, 移流によって下流方向に流れる.
- ・波動の伝ば速度は, 揺らぎ(渦)の移流速度に比べて速いので, せん断層の揺らぎで生じた噴流中央部の縮小, 拡張と音波による流速変動との相互干渉によって噴流中央部の圧力変動が助長され, 新たな音源となる. なお, この圧力変動は, せん断層の揺らぎの速度で下流へ, 移流していく.
- ・この音源から放射された音波は上下流に伝わり, ダクト開口端での音圧反射率が増加する.
- ・なお, 音波の周波数がケルビン・ヘルムホルツ不安定による噴流の不安定渦の周波数と一致すると, より現象が顕著になる. LES解析で反射率がより大きくなったのは, この不安定渦をより顕著にとらえることができたためと推察される.

Fig.8 Relation between $[ka]_{peak}$ and Mach number

Fig.9 Image diagram of the relation between fluctuating shear layer and pressure fluctuation

3. 結 言

流れを伴うダクト開口端において音圧反射率が大きく増幅する現象について、圧縮性非定常 CFD 解析を用いて検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

1. 圧縮性非定常 CFD 解析を用いて、流れを伴うダクト開口端での音圧反射率が大幅に増幅し、1 を超える周波数帯が発生する現象が再現できた。また、その反射率の増加は、流れの非定常性、さらに渦を考慮することにより、より顕著に表れることがわかった。
2. 音場の可視化により、上記現象が、ダクト端からの放射音波によって誘起され下流に移流するせん断層の揺らぎと、音波による速度変動との相互干渉で発生する新たな音源によるものと推察された。またその現象は、音波の周波数がケルビン・ヘルムホルツ不安定による噴流の不安定渦の周波数と一致すると、より助長されることがわかった。

今後、本現象を実験により、定量的に検証していく必要がある。

文 献

- (1) 梶昭次郎, 岡崎卓郎, “軸流機械の回転騒音のダクト開口端における放射”, 日本機械学会論文集第 2 部, Vol. 38, No. 315 (1972), pp. 2854-2862.
- (2) 平本政明, 梶昭次郎, 岡崎卓郎, “気流を伴う管開口端の放射音響インピーダンス”, 日本機械学会論文集第 2 部, Vol. 42, No. 359 (1976), pp. 2116-2126.
- (3) 椿下庸二, 濱名寛幸, 吉川孝雄, “断面変化のあるダクト開放端付近の音場への流れの影響”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 59, No. 566 (1993), pp. 3100-3105.
- (4) 椿下庸二, 濱名寛幸, 吉川孝雄, “ダクト開放端からの音の放射の差分計算”, 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 59, No. 559 (1993), pp. 846-851.
- (5) Alfredson, R.J., and Davis, P.O.A.L., “The Radiation of Sound from an Engine Exhaust”, *J. Sound Vib.*, Vol. 13, No. 4 (1970), pp. 389-408.
- (6) Davis, P.O.A.L., Bento Coelho, J.L., and Bhattacharya, M., “Reflection Coefficient for an Unflanged Pipe with Flow”, *J. Sound Vib.*, Vol. 72, No. 4 (1980), Letters to the editor, pp. 543-546.
- (7) Davis, P.O.A.L., Bhattacharya, M., and Bento Coelho, J.L., “Measurement of Plane Wave Acoustic Fields in Flow Ducts”, *J. Sound Vib.*, Vol. 72, No. 4 (1980), Letters to the editor, pp. 539-542.
- (8) Munt, R.M., “The Interaction of Sound with a Subsonic Jet Issuing from a Semi-infinite Cylindrical Pipe”, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 83 (1977), pp. 609-640.
- (9) Munt, R.M., “Acoustic Transmission Properties of a Jet Pipe with Subsonic Jet Flow: I. The Cold Jet Reflection Coefficient”, *J. Sound Vib.*, Vol. 142, No. 3 (1990), 413-436.
- (10) Savkar, S.D., “Radiation of Cylindrical Duct Acoustic Modes with Flow Mismatch”, *J. Sound Vib.*, Vol. 28 (1975), 715-735.
- (11) Schlinker, R.H., “Transmission of Acoustic Plane-Waves at a Jet Exhaust”, *ALAA Paper 77-22* (1977)
- (12) 工藤久嗣, 西村正治, 後藤知伸, “流れを伴うダクトにおける音の開口端反射に関する基礎研究”, 日本機械学会講演論文集, No. 115-1 ('11-3 中国四国支部第 49 期総会講演会) (2011), pp.323-324.
- (13) 松原聖, 中森一郎, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による流れを伴うダクト開口端反射率の評価 (第 1 報)”, アドバンスシミュレーション, Vol.17 (2013,12), PP.45-60.
- (14) 社河内敏彦, “噴流工学—基礎と応用—”, 森北出版, (2004)