

排気脈動流れシミュレーションによる 排気吐出音発生メカニズムの解明

Clarification of Mechanism of Exhaust Orifice Noise via Exhaust Pulsating Flow Simulation

桜井 雅人*
Masato SAKURAI

田中 健一**
Kenichi TANAKA

笠島 祐也**
Yuuya KASAJIMA

要 旨

近年、車の環境騒音に対する規制は厳しくなりつつある。そこで排気騒音の低減を実現すべくシミュレーション技術の構築が必要である。筆者らは、実験解析技術として内燃機関から生成される排気脈動の吐出噴流についてシュリーレン法による吐出噴流の可視化と音響ホログラフィ法による吐出音源の可視化実験をおこなった。次に可視化データから得られた現象把握をもとに、排気脈動流れのシミュレーション技術を構築し、吐出音の定量的な予測が可能となり、圧縮波と渦輪による二つの主音源で構成している吐出音発生メカニズムが解明できた。

ABSTRACT

Regulations relating to environmental noise generated by automobiles are becoming increasingly stringent, making it essential to develop simulation technologies to contribute to the reduction of exhaust noise. The authors attempted to make the pulsing exhaust flow produced by an internal combustion engine visible using Schlieren photography and to visualize the source of exhaust orifice noise using noise holography. The knowledge obtained from these experiments was used to develop an exhaust pulsating flow simulation technology for exhaust orifice noise that enables quantitative prediction of levels. The major components of exhaust orifice noise are compression waves and ring vortices; the new simulation technology enabled further clarification of the mechanism of production of this noise.

1. まえがき

排気騒音は放射音と吐出音に大きく分類される。放射音の発生メカニズムは排気脈動中の圧力変動が加振力となり排気系構造体を加振させ放射音源となることを既に明らかにした⁽¹⁾。本研究では吐出音の発生メカニズムについて解明をおこなう。吐出音は環境騒音に与える影響が大きいにもかかわらず、発生メカニズムの解明やシミュレーション技術に対し十分な研究開発がなされていないのが現状である。発生メカニズムの解明には排気管端部で発生する吐出音についての現象把握が必要である。筆者らは排気吐出噴流のシュリーレン可視化実験をおこない、さらに音響ホログラフィ法による吐出音源の可視化実験を試みた。その現象把握の結果、渦輪を詳細に解析可能な条件を満足する数値流体解析を選定し計算をおこない吐出噴流音源を得た。

さらに吐出噴流音源の音響パワーを算出することによって、音場への音波伝播を実用的な手法で精度よく求める手法を構築した。これら可視化実験と排気脈動流れシミュレーション技術を使い、排気吐出音の発生メカニズムの解明を試みたので報告する。

2. 吐出音の生成メカニズム

まず最初に排気脈動が排気音として空間に伝播されるメカニズムを考える。排気脈動流れの圧力や流速にもとづく内部エネルギーの一部は排気管内及び消音器の構造加振力となり放射音として空気伝播する。

これまで筆者らがおこなった実験と計算結果から、吐出音は排気吐出口から放出される音源により音波として伝播するという仮説を考えた(Fig. 1)。

* 栃木研究所

** 東京電機大学

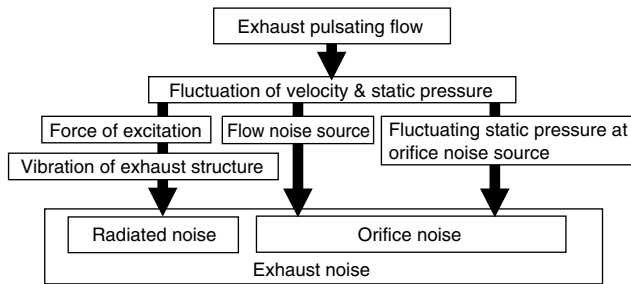


Fig. 1 Mechanism of generation of exhaust noise

吐出音については主音源が吐出口端音源と噴流音源の二つに分かれる。この仮説を証明するために吐出噴流の可視化実験による現象把握をおこなった。次に数値流体計算をおこなって吐出音源を求め、吐出噴流の音響パワーを算出し音場での吐出音の実測値と計算値を定量的に比較した。

3. 実験解析技術

排気管内から吐出口に到達した排気脈動が吐出口端で吐出噴流として放出される。吐出音源を可視化するために、シュリーレン法による流れの可視化をおこなった。次に吐出音源の広範囲の領域を可視化するため、時系列で測定可能な非定常音響ホログラフィ法による排気吐出音の可視化計測をおこなった。

3.1. シュリーレン法による可視化実験方法

キセノンランプを光源とし放物面鏡を用いた光学系により平行光束とし測定領域を通過後に光束をナイフエッジへ集束させる。平行光束がナイフエッジの刃に近づく方向に屈折された測定領域は暗く、遠ざかる方向に屈折された領域は明るくなる。これにより測定領域の密度分布が明暗のコントラストとして可視化される。可視化撮影方法はエンジン回転数と発光タイミングを同期させ、デジタルリター

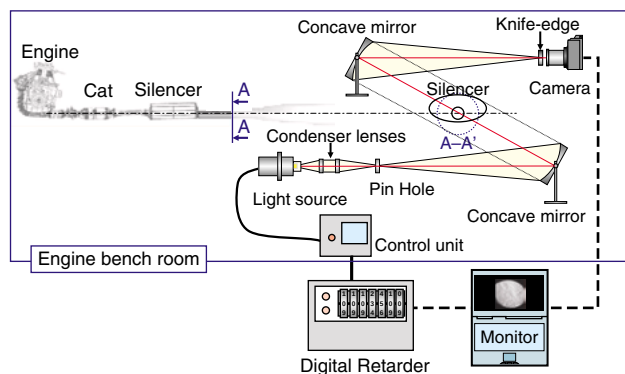


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

ダの指定した遅延時間により光源を閃光させコマ撮り撮影をおこなった。これらの実験装置概要を Fig. 2 に示す。

3.2. シュリーレン法による実験結果

シュリーレン法による 3 000 rpm でのファイアリング状態(燃焼有り)とモータリング状態(燃焼無し)における排気吐出噴流の可視化写真を示す(Fig. 3)。

吐出噴流の可視化実験により以下の現象が確認された。

- (1) 吐出噴流中に無数の渦の存在が確認された。渦の密度分布はモータリング時よりも排気温度の高いファイアリング時に大きいことがわかった。
- (2) 大規模な渦輪の発生が確認された。吐出噴流の密度変化の比較的小さいモータリング時にその存在が明瞭に確認された(Fig. 3 青線)。ファイアリング時には無数の渦のため明瞭ではない。
- (3) 排気管内で発生する衝撃波⁽²⁾は排気吐出口近傍においてはみられなかった。

3.3. 非定常音響ホログラフィ法による可視化実験方法

消音器端面から 100mm に配置されたマイクアレイ(6 × 11 本)による 240 μ s 毎の音響インテンシティを測定する(Fig. 4)。

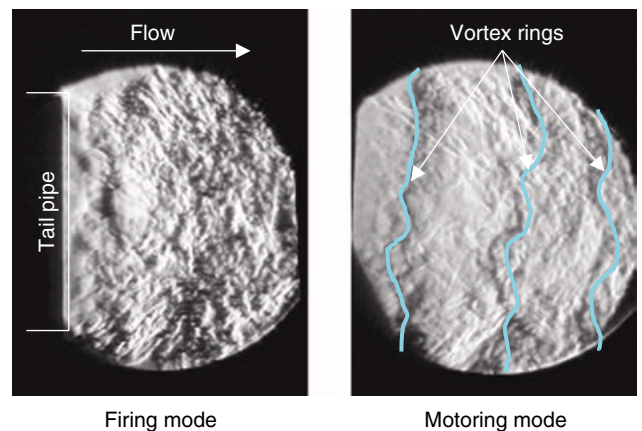


Fig. 3 Schlieren photograph of exhaust orifice flow (3 000 rpm, Th15%)

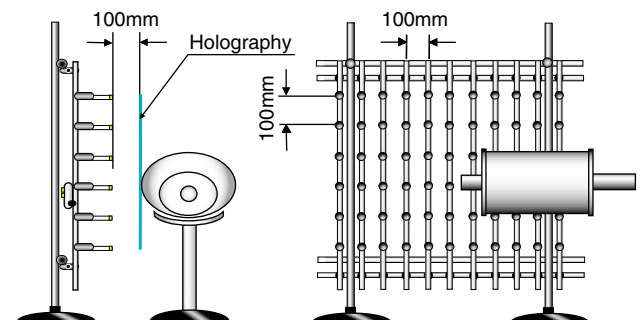


Fig. 4 Schematic of nonsteady acoustical holography

3.4. 非定常音響ホログラフィ法による実験結果

非定常音響ホログラフィによる吐出音源の可視化により、以下の現象が確認された。

- (1) 吐出口から放出された音源は球面状に音速で伝播し拡散する。
- (2) 一部の吐出音源は、音源の中心部が吐出口から遠ざかりながら移動する現象が見られた(Fig. 5 図中白点)。

この音源移動は吐出噴流中の脈動による流速と一致しており、流れに影響されて移動すると考えられる。

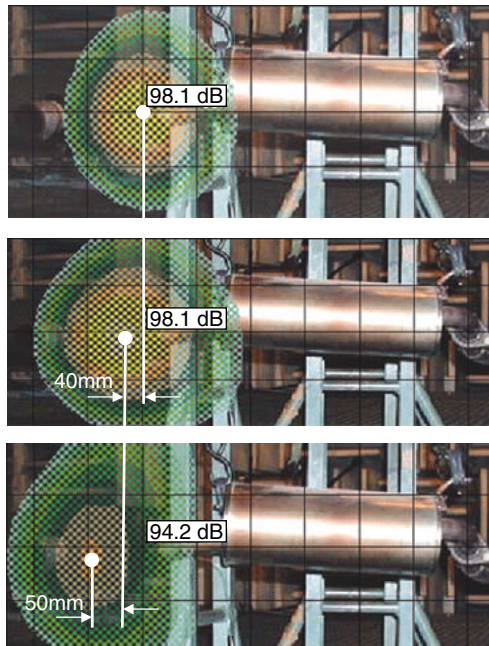


Fig. 5 Nonsteady acoustical holography of exhaust orifice noise (5 000 rpm WOT:Wide Open Throttle)

4. シミュレーション技術

実際の内燃機関において、シリンダ内部の燃焼行程を経たのち排気行程により排気脈動が生成される。したがって燃焼ばらつき等の要因が排気吐出音に影響を与える。本研究では、燃焼ばらつき等の要因を含まない高速脈動発生装置をモデル化した吐出音のシミュレーションとの比較検証をおこなった。

4.1. 検証実験装置

内燃機関を模擬した燃焼行程を含まない高速脈動発生装置⁽³⁾により得られた実験値と数値解析との比較検証をおこなった。高速脈動発生装置はFig. 6に示すようなロータリーバルブを有しており、その回転により右側供試管内に脈動を誘起させる。管内を伝播した脈動流れは管端部から防音室内へと噴出する。可視化手法はシュリーレン法を用いて吐出噴流を可視化する。なお供試管は全長 1 m、バルブ下

流 100 mm(Point A)、吐出口端上流 100 mm(Point B)の位置に圧力半導体センサを取り付け、管内を伝播する圧力波による静圧の変化を測定した⁽³⁾。左側高压タンク内圧力と大気圧との比は1.5(Pressure ratio=1.5)とした。また吐出音圧測定は右端排気管出口からマイク位置 1 000 mm45 度後方の音場で音圧測定した。

4.2. 数値解法

実験における現象確認結果、管内の排気脈動流れおよび吐出噴流の数値解析をするためには、以下の数値解法の条件が必要である。

- (1) 圧縮波膨張波、衝撃波など管内流れを解く圧縮性流体解法
- (2) 流れ場の詳細構造(乱流、渦輪など)を解くための非定常解法
- (3) 流れ場の圧力変動から音場までの音響伝搬解法

本研究では(1)-(2)に関して支配方程式にNavier-Stokes方程式と質量保存則、エネルギー則を用い上記解法条件を満たした市販 CFD ソルバ⁽⁴⁾を使用し、(3)に関しては実用的な手法として吐出噴流の音響パワーレベルの算出法を用い、距離減衰による観測点の音圧レベルを予測した。

4.3. 圧縮性計算モデル

数値解析モデルは Fig. 7 モデルA部に示すような 0.25 mm ピッチの 2D-軸対象モデルである。高压タンク内初期圧 150 kPa に流入条件を設定し、ALE 法⁽⁵⁾による移動メッシュを用いたバルブ部にて排気脈動を生成させる(Fig. 8)。排気管内では前節 3.1 で述べた衝撃波などの圧縮性流体を解く必要があるため、排気管内外の熱の授受を等エントロピーと仮定した圧縮性解法による計算モデルを用いた。

4.4. LES 計算モデル

吐出噴流部では噴流構造の詳細を解くため、乱流モデルにLES法(Large Eddy Simulation)⁽⁶⁾を使った擬似圧縮性解法による計算モデルを用いた(Fig. 7モデルB部)。また、モデルA部の管吐出口端から 100 mm 上流断面(Point B)での

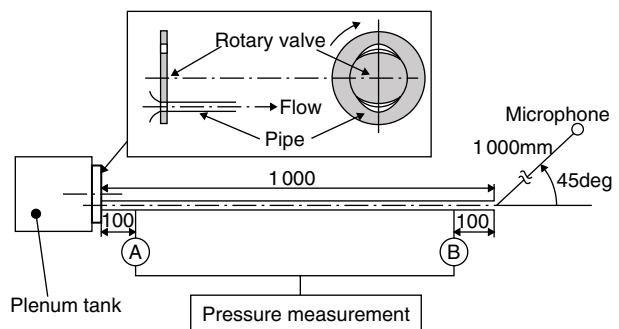


Fig. 6 Schematic of experimental apparatus

計算結果をモデルB部の入り口側(Point C)の境界条件としている。噴流モデルの境界は無反射境界を設定した。

モデルA, B部ともメッシュピッチは0.25 mmの正方形メッシュとし、全要素数は合わせて約50万メッシュである。

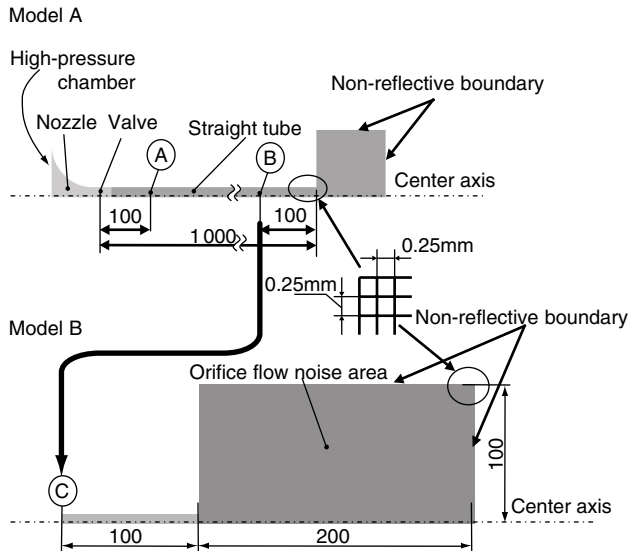


Fig. 7 Calculation model

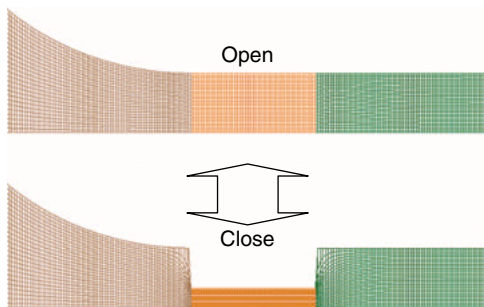


Fig. 8 Valve ALE model

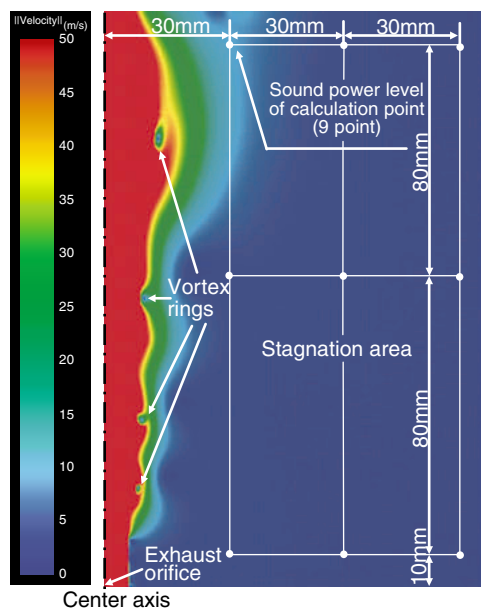


Fig. 9 Calculation model of sound power level

4.5. 音響パワー計算モデル

吐出噴流の影響を受けた近接音場は擬似音波⁽⁷⁾を含んでいる。擬似音波とは流れ場の近傍の噴流の影響を受けた圧力変動である。擬似音波の影響を受けない音場での音圧レベルを求める手法として Lighthill 理論^{(8), (9)}に基づく音源を用いた音響数値解析を使う方法があるが、本研究では吐出噴流の音響パワーの算出をおこない、距離減衰による観測点の音圧レベルを予測した。この手法は流れ場の影響を受けないよどみ領域の音響パワー計算モデルを同定する必要がある。流体計算結果から噴流の影響を受けない、流速分布のよどみ領域に音響パワー測定点9箇所を設定した(Fig. 9)。

4.6. 管内脈動計算結果

管内の圧力分布の計算結果を Fig. 10 に示す。次にバルブ下流 100 mm 位置(Point A)での管内圧力履歴、管吐出口端から 100 mm 上流(Point B)を Fig. 11, Fig. 12 に示す。

管内での数値計算結果、圧縮波と膨張波の分布が見られ、特に圧縮波領域内においては開口端部及びバルブ部からの反射波の影響による複雑な分布となっている(Fig. 10)。

また Fig. 11 と Fig. 12 において、実験値と計算値との比較では概ね良好な一致が見られ、管端部において圧縮波形の立ち上りが鋭くなり衝撃波へと成長する経過が再現できた。

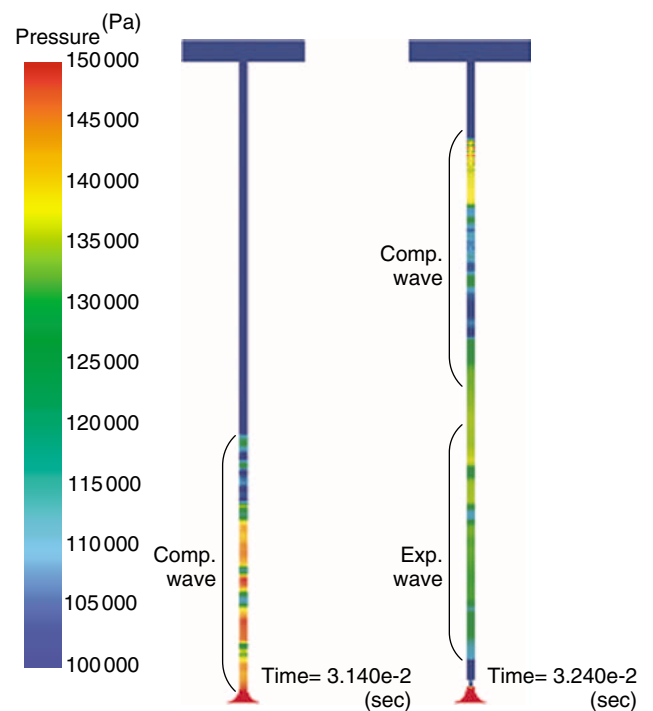


Fig. 10 Pressure distribution (contour map)

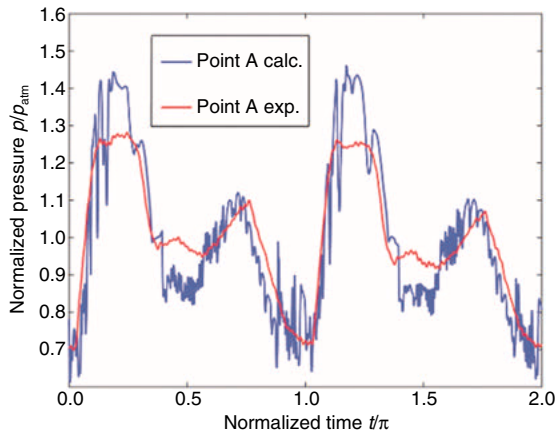


Fig. 11 Pressure history at Point A

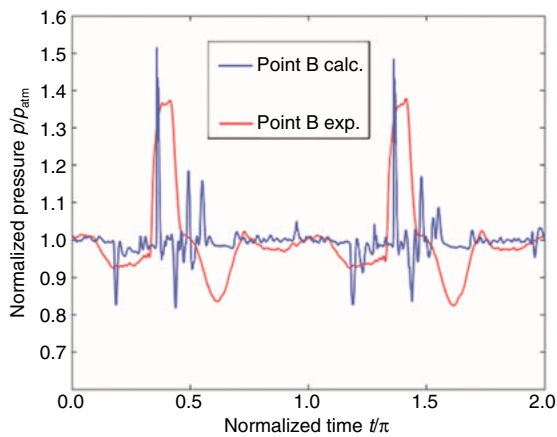


Fig. 12 Pressure history at Point B

4.7. 吐出口近傍及び吐出噴流計算結果

管吐出口近傍の計算結果を Fig. 13 に示す。管吐出口に到達した圧縮波は吐出口を中心とした球面状の広がりとなり、その後複数の渦輪を伴った噴流が続く様子が確認された。またこの現象はシュリーレン法による可視化実験においても確認された(Fig. 14)。

なお、内燃機関の排気系においてはこのような圧縮波を多段膨張型構造の消音器を用いて減衰させるのが一般的である⁽¹⁰⁾。

次に吐出噴流空間の計算結果を Fig. 15 に示す。渦輪を中心とした圧力変動の分布が連続して見られ、渦輪が発達するにつれて圧力変動も上昇する。このことから渦輪は吐出噴流音源の主要因のひとつであると考えられる⁽¹¹⁾。

4.8. 吐出音計算結果

音響パワーモデルの測定面(軸対象)を構成する幾つかのCFD計算格子点から周波数スペクトルの音圧平均をもとめ音響パワーレベルを計算し、音場での吐出音を計算する。

一般的に音響エネルギー密度 $E [W \cdot \text{sec}/m^3]$ と音源の出力 $W [W]$ との関係は式(1)が成り立つ。

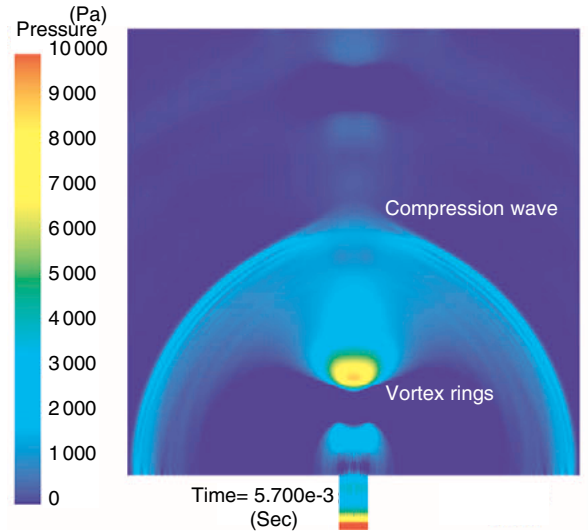


Fig. 13 Pressure distribution at exhaust orifice

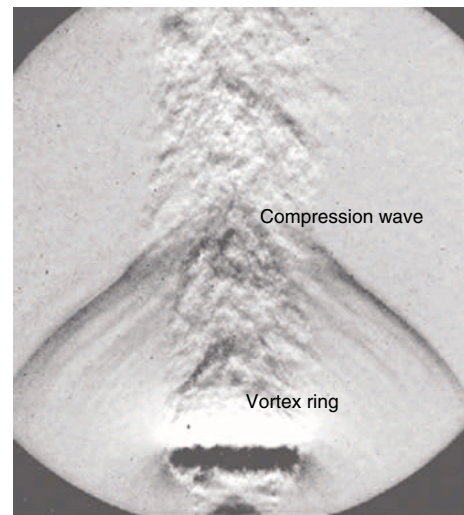


Fig. 14 Schlieren photograph at pressure ratio 4.0

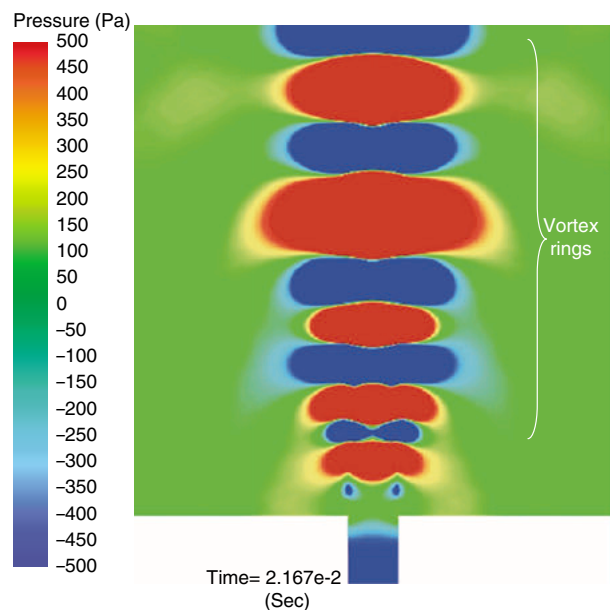


Fig. 15 Pressure distribution of vortex rings

$$E = \frac{W}{4\pi r^2 c} \quad (1)$$

r : 音源からの距離 [m], c 音速[m/sec]

音圧測定点の音圧レベルを L_{mic} [dB], 音源のパワーレベル L_w [dB], $10E-12$ [w]=0dB 基準とすると,

$$L_{mic} = L_w - 11 - 20\log_{10} r \quad (2)$$

となる。

音響パワーレベル L_w と音響パワー測定点の平均音圧 L_p [dB] との関係は

$$L_w = L_p + 10\log_{10}(S) \quad (3)$$

S : 音響パワー測定面積[m²]

であるため、音圧測定点の吐出音圧レベル L_{mic} [dB] が得られる。

吐出口から 1 m 音場における吐出音圧測定点と実測値の周波数スペクトルの比較を Fig. 16 に示す。およそ 4000 Hz までピーク誤差がおおむね 10 dB 以内であり実験値との比較的良い一致が見られるが、4000 Hz 以上では実測値の音圧レベルが高い傾向が見られる。これは本計算における渦輪近傍の高周波の音響パワーレベルが不足しているためであり、音響パワー測定点の設定が高周波の気流音の予測精度に影響を及ぼしていると考えられる。

4.9. 数値解析結果における吐出音発生メカニズム

数値解析において以下の吐出音発生メカニズムが明確になった。

- (1) 管内の圧縮波、膨張波の圧力分布が見られ、管内を助走するにつれて圧縮波の立ち上がりが鋭くなる様子が見られた。また吐出口に到達した圧縮波を中心とした球面状の圧力伝播が見られた。これらの現象は検証装置における管内圧力測定及び吐出噴流可視化実験で確認された。

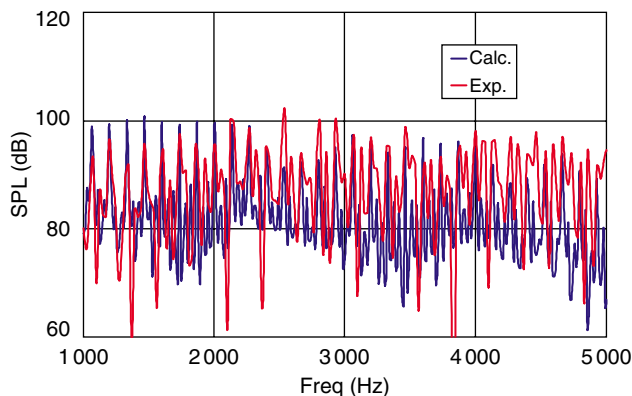


Fig. 16 Comparison of orifice noise at microphone (1 m)

- (2) 吐出噴流空間において複数の渦輪の形成が見られ、渦輪の移動とともにその周囲に広がる圧力分布がみられた。この現象はシュリーレン法による吐出噴流可視化実験においても渦輪の存在が確認された。

- (3) 噴流場の音響パワーレベルから求めた音場(1 m)での音圧スペクトルは、脈動周期に同期した複数の圧縮波による鋭いピークを持つ脈動音と、渦輪近傍の音源からもとめた音響パワーを算出することで、気流音の主成分である高周波領域の幅広い音圧分布を有している。このスペクトル分布は観測点の実測値においてもほぼ同様の傾向であることが確認された。

5. まとめ

排気騒音の主要因となっている排気吐出音について、以下の生成メカニズムが、実験と数値解析をおこなうことによって明らかになった。

- (1) 排気吐出音の発生主要因は、管内の排気脈動中の圧縮波および噴流が吐出口から放出する際に生ずる圧力変動であり、吐出音源については、吐出口を中心とした圧縮波による音波の伝播と、噴流中の渦輪を中心とした圧力変動の二つに大きく分類される。
- (2) 圧縮波による圧力変動は音響空間上を球面状に伝播し脈動周期に同期した脈動音となる。

複数の渦輪音源は吐出噴流とともに移動し、成長、拡散し、高周波領域におよぶ幅広い周波数スペクトルの音圧分布を有する気流音となる。

これらの現象を解明する排気脈動流れシミュレーション技術として、本研究で構築した数値解法による手法が有効である事が確認できた。また計算リソースに関しては、2次元軸対象流れに限定した流体計算および音響パワー算出法を用いる事により PC リソースでの計算が可能となり、排気吐出音の実用的な現象メカニズム解析ツールを構築できた。

謝 辞

本研究の排気吐出音可視化実験において東京電機大機械工学科岩本順二郎教授に高速脈動のシュリーレン可視化写真を、三恵技研工業(株)技術センター小野技師に非定常音響ホログラフィ可視化写真をご提供を戴きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) 桜井雅人ほか：排気脈動による排気系放射音予測技術の開発，自動車技術会論文集，Vol.36, No.2, p.71-76 (2005)

- (2) Endo,M.,et al.: Relation between the flow pattern downstream of duct and the noise, JSAE Review 21, p.125-132(2000)
- (3) Higashiyama,J.,et al.: Experimental study of exhaust noise generated by pulsating flow downstream of pipe end, JSAE Review 20, p.73-79(1999)
- (4) RADIOSS-CFD ユーザーマニュアル
- (5) Donea,J.: Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Elements Methods,Computational Methods in Transient Analysis, Vol.1, No.10(1983)
- (6) 小林敏雄ほか：LES の工業的問題への適用について, ENGINE TECHNOLOGY, Vol.2, No.5(2000)
- (7) 飯田明由：空力騒音の物理, 日本機械学会空力騒音セミナー, p.1-8(2005)
- (8) Lighthill,M.J.: Proc.R.Soc.Lond., A211(1952)
- (9) Goldstein,M.E.: 流体力学, p.311(1991)
- (10) 中川博史, 吉本秀之, 遠藤正樹, 白髭優重, 藤代正道, 桜井雅人：排気ガス脈動流れによる排気放射音予測技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.2, p.195-202(2002)
- (11) 木村敦典ほか：高速脈動噴流から生じる騒音に関する研究, 日本機械学会論文集B編, Vol.67-664, p.57-64 (2001)

■著 者■



桜井雅人



田中健一



笠島祐也