

二輪車マフラー騒音の1次元シミュレーション システムの構築

今野彰ⁱ 山出吉伸ⁱⁱ 宝渦寛之ⁱⁱⁱ 山崎徹^{iv}

Construction of a 1-D Simulation System for Noise from Mufflers of Motorcycles

Akira KONNO Yoshinobu YAMADE Hiroyuki HOUZU Toru YAMAZAKI

二輪車を初めとする自動車の主な騒音源に、マフラーからの騒音がある。このマフラー騒音を流体解析シミュレーションに基づき予測することは、実測によるコストの削減と騒音対策の観点で重要である。そこで当社では、マフラーの内部構造を1次元モデル化することで、マフラー騒音を簡易かつ精度良く予測するシミュレーションシステムを構築した。本報ではその方法と、実測値との比較結果を示す。

(キーワード): 流体, 騒音, 環境, 自動車, 二輪車, シミュレーション, マフラー, 1次元

1 はじめに

日本における環境政策の根幹を担う法律に「環境基本法」がある。その中の第十六条では、大気や水質、土壌の汚染に加え、騒音に関する環境基準を設定するよう定められている。騒音にも航空機騒音や鉄道騒音、建設作業騒音など様々な種類があるが、中でも二輪車や四輪車のような自動車から発せられる道路交通騒音は我々の生活に密接に関係するため、その騒音に対して規制を設けることは我々の健康維持、さらには環境の保全に大きな影響を与えることになる。

自動車の車外騒音の音源は、排気系騒音やエンジン騒音、タイヤ路面騒音などがあるが、このうち排気系騒音を抑える機構が「マフラー（サイレンサーともいう）」である。エンジンからの排気ガスは高温高压であるため、これをそのまま大気に放出すると大きな騒音となる。マフラーの役割は、このような排気ガスの温度を下げ圧力変動を抑えることである。マフラー内部では複数の部屋に分かれ、これらの部屋がパイプで繋がっている。マフラーによって

は内部にグラスウールのような綿状の繊維質（吸音材）が収められている。エンジン排気ガスは、マフラー内部の複数の部屋とパイプを通過することで膨張・収縮され、また吸音材との摩擦によって、排気ガスの持つエネルギーが小さくなる。これによりマフラー出口での圧力変動、すなわち騒音が抑えられる。

冒頭で述べた環境基本法の第十六条の第三項では、騒音等の環境基準について、「常に適切な科学的判断が加えられ、必要な改定がなされなければならない」とされている。一方で、現状の車外騒音の評価や騒音規制値の検討には大量の実測データに基づいている。実測データは車両全体の騒音を測定しているため、音源別の騒音の寄与度は把握できない。従って、たとえばある二輪車に対してマフラーを交換した際、どの程度騒音レベルが変化するかは実際に二輪車にマフラーを装着して測定しなければ評価できないことになる。評価すべきマフラーが大量にある場合、その都度実測する必要があるためコストがかかり、非効率的である。

前述の通り、マフラー内部ではエンジンから排出されるガスが膨張・圧縮されること（または、吸音材

ⁱ サイエンスソリューション部 社会インフラチーム コンサルタント 博士（理学）

ⁱⁱ サイエンスソリューション部 社会インフラチーム 課長

ⁱⁱⁱ 独立行政法人 自動車技術総合機構 交通安全環境研究所 主任研究員 博士（工学）

^{iv} 神奈川大学 教授 博士（工学）

との摩擦)によって、エンジン排気流の圧力変動が抑えられ、マフラー出口では騒音レベルが小さくなる。従ってマフラーの内部構造が分かれば、流体力学に基づいたシミュレーションを実行することで、マフラー出口での圧力変動を定量的に予測することができ、科学的に妥当性のある自動車騒音の規制値の検討を行うことができる。シミュレーションによるマフラー騒音予測システムが確立できれば、評価すべきマフラーが大量にあった場合でも、コンピュータ上で評価できるため実測に伴うコストの削減が期待できる。さらに定量的な騒音評価ができることから、たとえば「騒音値をこれだけ下げするには、内部構造をこのように変更すれば良い」と、設計に対する科学的な提言も可能になる。しかし、そのようなマフラー騒音、さらには車両全体の騒音を予測するシミュレーション技術は現時点では見受けられない。

当社では、マフラー内部構造に基づくマフラー騒音シミュレーションシステムを開発している。本報ではこのシステムについて解説する。シミュレーションの方法として、マフラーの3次元CADデータを読み込み、それを既存の流体解析ソフトウェアで解析することが考えられる。しかしこの場合大きな計算コストと計算時間を要することになり、実測に伴うコストの削減という、シミュレーションを実施するメリットを享受できなくなる。そこで本システムを開発する際は、マフラー内部要素の断面積と長さの情報を基本とした1次元騒音シミュレーションシステムとして構築することにした。これにより3次元シミュレーションに伴う計算コストを抑えることができる。この1次元騒音シミュレーションを行うために必要な物理を2章で解説し、3章ではシステムの全体像を示す。4章でシミュレーションの結果と実測値との比較を行い、5章で結論をまとめる。

2 マフラー騒音の物理とその定式化

ここではマフラー騒音をシミュレーションする際に考慮すべき物理現象や方程式について記述する。

2.1 物理現象のモデル化

1次元騒音シミュレーションでは、直接的に考慮できない物理現象はモデル化してシミュレーションプログラムに実装している。モデル化する現象あるいは効果としては、流路抵抗、壁面抵抗、吸音抵抗、

熱移動、気流騒音が挙げられるが、これらの現象あるいは効果の概要を以下に示す。

■ 流路抵抗

マフラー内部の構造にはいくつかのタイプや形状があり、それにより流路抵抗が異なるが、1次元騒音シミュレーションでは直接その効果を考慮できない。従って運動方程式において、断面平均速度から計算される動圧に比例する流体力を付加する。

なお、マフラーによっては途中で流路が分岐する場合もある。例えばパンチングパイプにエンジン排気流が通過する際、その穴の部分から排気流が漏れ出ることがそれである。流路分岐をシステムに組み込む際の考え方は3.2章に示した。

■ 壁面摩擦

運動方程式において、平板乱流を仮定した摩擦係数を用いて壁面摩擦力を与える。

■ 吸音抵抗

運動方程式において、多孔度および抵抗係数をモデルパラメータとして吸音材の効果を与える¹⁾。

■ 熱移動

エネルギー保存式において、壁面の吸熱量を壁面温度、内部温度、熱伝達率から算出し、内部エネルギーに吸熱項として与える。

■ 気流騒音

マフラー騒音には、エンジン回転に伴う脈動流に起因する脈動音に加え、流れの中の微小な渦（マイクロメートルスケール）の変形、運動に起因する気流騒音が含まれる。この微小な渦を1次元騒音シミュレーションで再現するのは難しいためモデル化を検討する必要がある。詳細は2.4章で示す。

2.2 理論式

1次元騒音シミュレーションの支配方程式は、連続の式と運動方程式、エネルギー保存式である。連続の式と運動方程式、エネルギー保存式を以下に示す²⁾。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial (\rho u A)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial (\rho u u A)}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} - (F_1 + F_2 + F_3) \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial(e + P)uA}{\partial x} = -h \frac{D}{A} (T - T_{wall}) \quad (3)$$

ここで、 ρ , u , P , e , T はそれぞれガスの密度、流速、圧力、内部エネルギー、温度を表す。 A と D はそれぞれマフラー内部の断面積と等価直径であり、 h と T_{wall} はそれぞれマフラーの熱伝達率と壁面温度を表す。 また、

$$F_1 = C_p \frac{\rho u |u|}{2dx} A \quad (4)$$

$$F_2 = 4C_{fp} \frac{\rho u |u|}{2D} \quad (5)$$

$$F_3 = R_f \frac{\rho |u|}{dx} \quad (6)$$

であり、それぞれ流路抵抗と壁面摩擦、吸音抵抗を表す。 なお、式(4)-(6)中の C_p , C_{fp} , R_f はそれぞれ圧力損失係数、壁面の摩擦抵抗係数、吸音材損失係数を表し、 dx は流れ方向の質量要素長さを表す。 そして内部エネルギー e は、

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho u^2}{2} \quad (7)$$

で表され (γ は比熱比)、圧力と密度、温度の間には、

$$p = \rho RT \quad (8)$$

で表される理想気体の状態方程式を適用する (R は気体定数)。

2.3 離散化

離散化は、2 段階 Lax-Wendroff 法を適用する。 2 段階 Lax-Wendroff 法では、既知である時間ステップ n での独立変数を用いて、時間ステップ $n+1/2$ における仮の値を求め、これを用いて次の時間ステップ $n+1$ の独立変数を求める。 2 段階 Lax-Wendroff 法の説明のために、2.2 章で示した理論式を一般化した形として以下の方程式を考える。

$$\frac{\partial F}{\partial t} = Q \quad (9)$$

現在の時刻 n とグリッド i における独立変数が既知として、はじめに時刻 $n+1/2$ における独立変数を以下のように求める。

$$\frac{F_{i-1/2}^{n+1/2} - F_{i-1/2}^n}{dt/2} = Q_{i-1/2}^n \quad (10)$$

$$\frac{F_{i+1/2}^{n+1/2} - F_{i+1/2}^n}{dt/2} = Q_{i+1/2}^n \quad (11)$$

そして、式(10), (11)を用いて時刻 $n+1$ での独立変数を計算する。

$$\frac{F_i^{n+1} - F_i^n}{dt} = Q_i^{n+1/2} \quad (12)$$

2.4 気流騒音

2.1 章でも示したが、マフラー騒音には脈動音に加え、流れの中の微小な渦の変形と運動に起因する気流騒音が含まれる。 脈動音はエンジン回転数の整数倍の周波数にピークをもち、このピークにおける音圧パワーがマフラー騒音の主要成分である。 一方で気流騒音は広範囲の周波数帯にわたってパワーを有する広帯域音であり、マフラー騒音を予測する上で無視できない要素になりうる。 この気流騒音を、実測に基づいてモデル式で表現した研究³⁾がある。 ここでは様々なマフラー形状に対して実測を行い、気流騒音のモデル化を行っているが、その中で最も単純かつ多くのマフラー内部構造を表すことのできる形状として図1のような形状を考える。

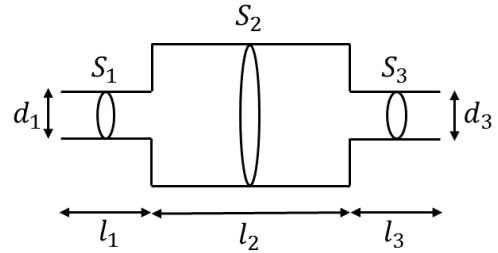


図1 マフラー形状の模式図

このマフラー形状において、気流騒音は以下の式で与えられる。

$$SPL = SPL_0 + SPL_{g1} + SPL_{g2} + SPL_{g3} + SPL_{vel} \quad (13)$$

ここで SPL_0 は基準音圧を表し、 SPL_g と SPL_{vel} はそれぞれ形状と流速に依存した音圧レベルのバイアスを表し、以下のような式が得られている。

$$SPL_{g1} = 10 \log \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^3 \quad (14)$$

$$SPL_{g2} = -10 \log \left(\frac{l_2}{d_1} \right)^{2/3} \quad (15)$$

$$SPL_{g3} = -10 \log \left(\frac{S_2}{S_3} \right) \quad (16)$$

$$SPL_{vel} = -10 \log M^6 \quad (17)$$

式(13)-(17)から、拡大率が小さく、マフラーが長く、縮小率が大きいほど音圧レベルが小さくなることを示している。また、音圧レベルはマフラー出口マッハ数の6乗に比例する。

この式を実際のマフラーに対して適用した。1次元シミュレーションの計算結果から、マフラー出口のマッハ数を確認したところ、おおよそ0.03程度であることがわかっていて、これより、気流騒音の大きさは約60～70dB程度であることが分かった。一方で、マフラー騒音の実測値は80～90dB程度であり、気流騒音の方が20dBほど小さい。従って、マフラー騒音において気流騒音は支配的ではなく、脈動音が主要成分であることが確認できた。そこで本シミュレーションシステムでは、気流騒音に関してはマフラー騒音全体に大きな影響を与えないとして無視することにした。

3 1次元シミュレーションシステム

ここでは2章の内容をシミュレーションに実装したシステムの全体について記述する。

3.1 全体システム

流れ計算プログラムでは、マフラー入口における圧力と質量流量の非定常データを流れ計算用の境界条件ファイルに変換し、それを入力する必要がある。前処理プログラムは、これらを流れ計算プログラムにおける独立変数である密度、運動量、内部エネルギーに変換して時系列データとして出力する。

流れ計算プログラムでは、先述の境界条件ファイルと解析条件ファイル、形状ファイルを入力する。解析条件ファイルは、入出力ファイル名、モニター位置、各種モデルパラメータ等の情報より構成される。形状ファイルは、格子点数、格子点間隔、各格子点での断面積情報を含む。流れ計算プログラムでは、マフラー内部の流れ場、すなわち密度、運動量、

内部エネルギーの時間発展の計算を行う。計算終了後、流れ計算プログラムは時間履歴ファイルを出力する。時間履歴ファイルは、ユーザが指定したモニター位置（複数設定可能）における圧力、温度、速度の時系列データである。

後処理プログラムは、流れ計算プログラムが出力した時間履歴ファイルを入力し、その場の圧力変動のRMS及び騒音計測点における音圧のオーバーオール値を出力する。マフラー外部の音場として自由音場を想定することにより、距離減衰によって騒音計測点における音圧を計算する。ここで距離減衰は、地面からの反射を考慮して、以下の式で表される。

$$\delta = 10 \log_{10} \left(\frac{R_{out}^2}{2R_{dis}^2} \right) \quad (18)$$

ここで R_{out} はマフラー出口半径、 R_{dis} はマフラー出口から騒音測定点までの距離を表しているが、 R_{out} が R_{dis} に比べて十分小さい、すなわち点音源であることを仮定している。なお4章で騒音計測点での予測値と実測値を比較するが、その際実測に用いられている騒音測定器の性質に応じて、聴感補正であるA特性処理や、時定数を考慮する。図2に1次元シミュレーションシステムにおける処理流れを示す。

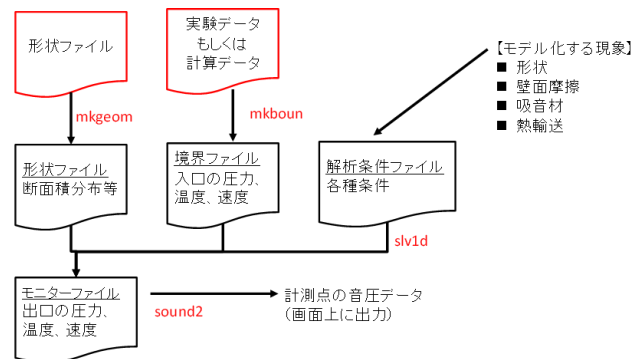


図2 1次元騒音シミュレーションシステムの概要図

3.2 流路分岐機能

3.1章で形状ファイルについて触れたが、流路が1パターンである場合、マフラー内部の流路を微小要素に区切り、格子点ごとに断面積情報を持たせることで、密度や運動量、内部エネルギーのような物理量を計算することができる（図3上）。しかし、2.1章で示した流路分岐をこのシステム上で考慮したと

き、格子点で分岐が生じることになるが、この分岐点上で速度を定義することができなくなる。従って、分岐点で速度を定義できるように改良する必要がある。そこで、流路分岐を考慮に入れた1次元騒音シミュレーションシステムを構築するために、新たにノードとエッジという概念を導入することにした(図3下)。ノードでは微小要素の体積情報を持ち、ここでは密度と内部エネルギーを計算する。エッジではそこでの断面積情報を持ち、ここでは運動量(すなわち速度情報を持つ)を計算する。分岐を考慮しない場合は、ノードとエッジが交互に並ぶことになるが、分岐を考慮する場合、ノードで分岐させることで分岐点での速度の定義を避けることができる。このようにノードとエッジの概念を導入することで、流路分岐を表現できるようになる。従って形状ファイルにノード・エッジ情報を記載し、それを考慮に入れた1次元騒音シミュレーションシステムを構築することで、より多様なマフラーの内部構造を表現することが可能になった。

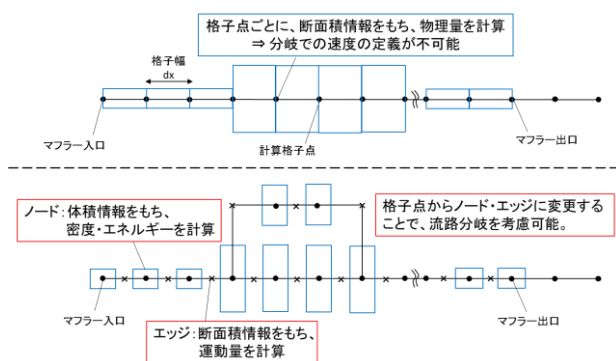


図3 流路分岐の概念図

4 計算結果と実測値との比較

3章までに構築した1次元騒音シミュレーションシステムを用いて、実際の二輪車からのマフラー騒音を計算し、その結果と実測で得られた結果とを以下で比較する。

図4は、ある二輪車に装着されたマフラーの出口における騒音予測値(緑線)と実測値(紫線)の時系列データである。また、緑線のマフラー出口での騒音予測値において、最初の1秒間に騒音レベルが下がっているが、これは最初空気が静止状態にあったマフラー内部にエンジン排気流が侵入し始めた過渡状態を表している。図4の上段、中段、下段は自

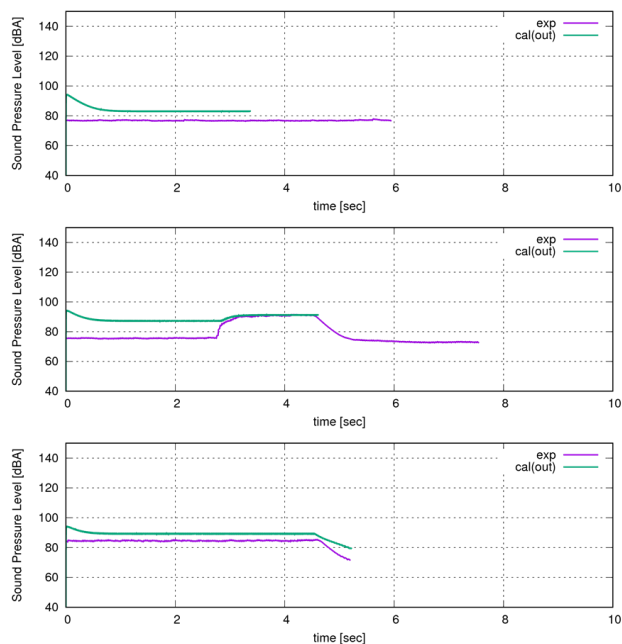


図4 マフラー出口における騒音予測値と実測値の時系列データの比較

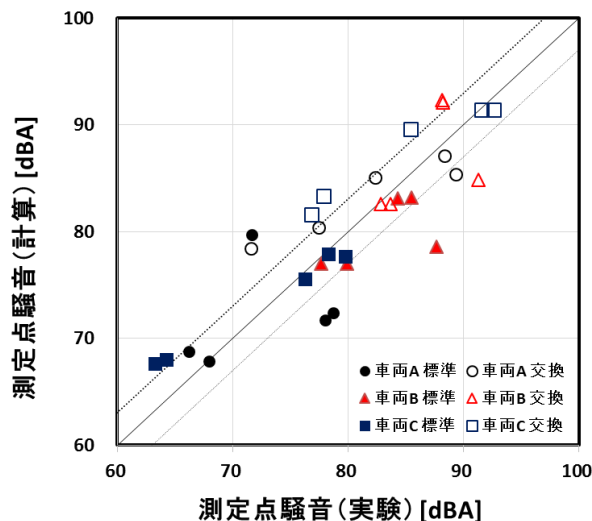


図5 マフラー出口における騒音予測値と実測値の最大値の比較

動車の型式認証時の騒音試験方法の違いを表しており、それぞれR41定常走行騒音試験、R41加速走行騒音試験、近接排気騒音試験である。図4より、どの試験法においても約5dBの誤差の範囲内でマフラー騒音の最大値を予測できることが示された。

これと同様の比較を、別の車両とマフラーに対しても実施した。図5は3車両の標準と交換マフラーに対して、騒音予測値と実測値を比較している。なお、ここでは上述の3つの試験法に加えて、TRIAS

定常走行騒音試験と TRIAS 加速走行騒音試験と呼ばれる、2つの試験法も追加している。図 5 より本シミュレーションシステムでは、全 30 ケースのうち 23 ケースが 5dB 以内の精度で予測できることが示された。

5 結論

本報では、実測によるコストの削減と騒音対策への定量的な提言を目的とした、二輪車マフラー騒音予測システムを構築した。このシステムでは、まずマフラーの内部構造を微小要素に分け、その体積と断面積情報をもとに流路を 1 次元化した。ここで、マフラー内部で流路分岐を考慮できるよう、ノードとエッジの概念を導入した。そしてマフラー内部流れの物理現象をモデル化することで、解析的に計算できるようにした。これにより、実際の二輪車マフ

ラーを用いて計算を行ったところ、30 ケースのうち 23 ケースが 5dB の誤差の範囲内で予測することが可能であることを示した。

最後に本報は、平成 30 年度における環境省請負業務「平成 30 年度二輪車のマフラー騒音等を評価するシミュレーション手法の開発」の成果に基づいている。

引用文献

- 1) 森下達哉，青木琢也，多氣昌生，“時間領域差分法を用いた多孔質材料の音響特性解析”，日本音響学会誌 59 巻 2 号（2003），pp. 63-69
- 2) 保田高志，“自動車排気システムの音予測技術の開発”，広島大学博士論文，平成 25 年 3 月
- 3) 小幡輝夫，平田賢，消音器における気流音と損失水頭の予測，音響学会誌 34-9 (1978)