

高温吸音率測定技術の確立

研究開発本部 試験解析室 三 木 達 郎

1. 背 景

自動車の車外騒音規制が2016年より段階的に厳しくなっている^{1), 2)}ことから、自動車部品においてはエンジンルームをはじめとした車両の防音強化が求められている。車両中で特に騒音源となりがやすいのはエンジンや排気管であり、これらの部品周辺は走行中に数百℃の高温になることが知られている。より小さい面積で効果的に吸音させるためには、騒音源に近い位置に防音材を設置することが必要である。一般的に吸音率や透過損失といった音響性能は空気物性に影響を受けることが知られている³⁾。しかしながら、防音材を高温下で使用するにも関わらず、防音材の性能を予測・計測する技術は常温付近に限られており、高温下での音響性能挙動を把握する技術が世の中にはない。高温で性能を発揮する防音材を設計するには、高温での音響性能を測定する技術が必要である。

当社はこれまでに、常温で繊維系多孔質材料の密度や繊維径から吸音率を予測する技術に取り組んできた⁴⁾。本稿では、高温下での音響管による音響性能測定技術について紹介する。

2. 音響管による垂直入射吸音率測定

2.1 常温測定装置

一般的な防音材の吸音率評価方法のひとつに、音響管を利用した垂直入射吸音率測定がある。

図1に一般的な音響管の概略図を示す。筒状の管の一端に試料を設置し、もう一端から音を入射

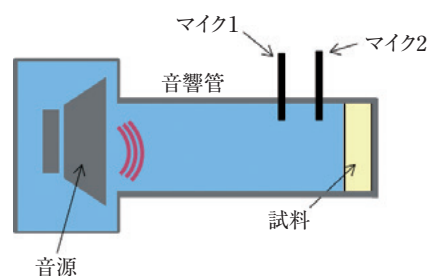


図1 音響管の概略図

する。試料で反射した音圧を2本のマイクで測定し、伝達関数法によって吸音率を算出する。

2.2 伝達関数法の概略

一般的に管内減衰補正を含まない吸音率は下記式で計算される⁵⁾。

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (1)$$

ここで、 α は吸音率、 r は音圧反射率を表す。

音圧反射率 r は下記式で計算される。

$$r = \frac{H_{12} - H_i}{H_r - H_{12}} e^{-2ikx_1} \quad (2)$$

x_1 : マイク1までの距離 [m], H_i : 入射波のみの伝達関数,
 H_r : 反射波のみの伝達関数, H_{12} : マイク間の伝達関数

ここで、 H_i , H_r , H_{12} はそれぞれ下記式で計算される。

$$H_i = e^{-ik\Delta x} \quad (3)$$

$$H_r = e^{ik\Delta x} \quad (4)$$

$$H_{12} = \frac{P_1^*}{P_2^*} \quad (5)$$

Δx : マイク間の距離 [m], P_1^* : マイク1の複素音圧,
 P_2^* : マイク2の複素音圧, k : 波数

3. 高温吸音率測定装置のコンセプト

図2に高温吸音率測定装置の概略図を示す。基本形状は常温測定装置を踏襲した。試料設置箇所および音響管の一部を外部ヒーターで加熱する。音源や測音用マイクは耐熱性に限度があり、常温に近い環境で運用する必要があるため、マイクはプローブマイクを利用し、音源部は加熱部から十分距離を取った場所に設置する。また、ヒーターと音源間は空冷により冷却する。

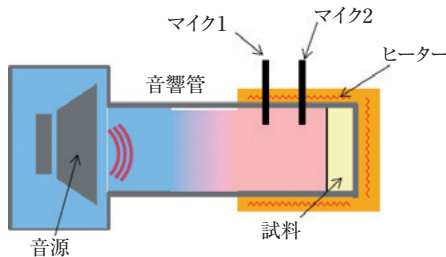


図2 当社で作製した高温吸音率測定装置の概略図

4. 高温吸音率測定装置のシミュレーション

高温下での吸音率測定における懸念点としては、装置を加熱した際の空気の温度ムラがある。音響管による測定では、音が管内で平面波として発達していることを前提としている。音速は温度依存性があるため、装置内に温度差があると局所的に速度差が生じて平面波が崩れ、測定誤差となる可能性がある。そのため、管内で生じる現象について、高温吸音率測定装置のシミュレーションにより予測を行った。

4.1 解析の流れ

熱流体解析によって音響管内の温度分布を計算し、得られた温度分布をモデルに与えて音響解析を行った。熱流体解析には、SCRYU-Tetra

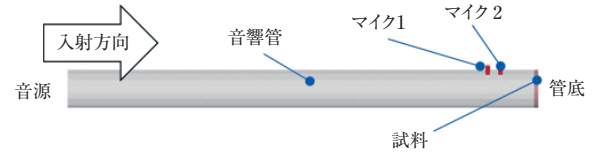


図3 解析モデル

(MSC社)、音響解析にはActran (MSC社)を用いた。音響管の解析モデルを図3に示す。モデルはφ40mm×800mmの円筒とし、図の左方向から平面波が入射してくると設定した。音圧測定点は底面を起点として、80mm, 50mm (それぞれマイク1, マイク2) に設定した。加熱温度は300℃, 加熱範囲は管底からマイク1までを基準加熱長さとし、マイク1から音源までは空冷とした。試料は厚さ10mmの無機繊維材料とし、背後空気層は設けていない。マイク1, マイク2にて算出された音圧から、吸音率を求めた。

4.2 解析結果

図4に音響管を加熱した場合の空気の温度分布、図5に温度分布がある場合の音圧分布のシミュレーション結果を示す。

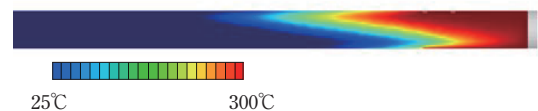


図4 音響管内の空気の温度分布計算結果

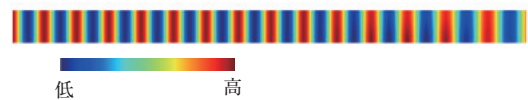


図5 温度分布がある場合の音圧分布

部分的な加熱の結果、管内に対流を起因とした、温度分布が生じていることがわかる。また、温度が均一な部分では音響管断面方向の音圧が均一であるが、温度分布の界面付近で音圧が均一でなくなり平面波が崩れていることが分かる。温度分布がない条件での計算を基準として、温度分布がある場合の吸音率との誤差を算出した結果を図6に示す。

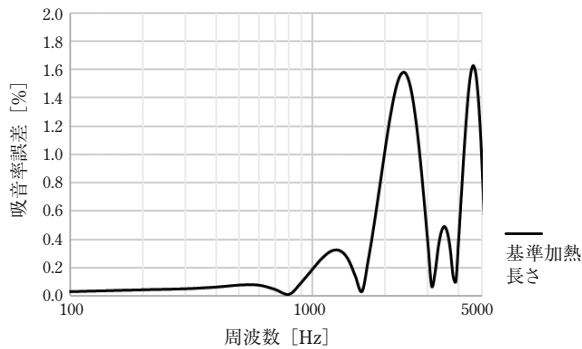


図6 温度分布がある場合の吸音率誤差

温度分布がある場合は、管内が均一に300℃である場合から吸音率に誤差が生じた。これらの結果から、測定時には管内の温度環境を安定させる必要があると考えられる。そこで、高温測定時に誤差が小さくなる装置形状の検討を行った。

5. 高温吸音率測定装置の形状検討

装置内部の温度環境が変動する要因として、マイク1から音源側方向への加熱長さ（以下、加熱長さ）、ヒーター温度ばらつき、マイク間温度の影響をシミュレーションで検証した。その結果を示す。

5.1 加熱長さの検討

音響管は構造上、管径および周方向にモードが生じない周波数においては、音波の進行に伴い平面波のみが伝搬する。つまり、十分な均熱区間があれば平面波が再度形成され则认为られる。加熱長さを変更し、温度分布および音圧分布を計算した。以下に解析結果を示す（図7）。いずれも加熱温度は300℃とした。各図の上段が温度分布、下段が周波数5000Hzにおける音圧分布を示す。また、図中の白破線は音圧が平面波から崩れた境界を、黄実線は加熱面をそれぞれ示す。

温度は加熱長さを問わず、加熱ゾーン端から50mm程度で安定した。音圧は温度が安定している領域を150mm以上通過すると安定した。図8に加熱長さが異なる場合の吸音率誤差のシミュレーション結果を示す。加熱長さを十分にとるとマイク位置までに音圧が安定し、吸音率誤差が小さくなることが示された。

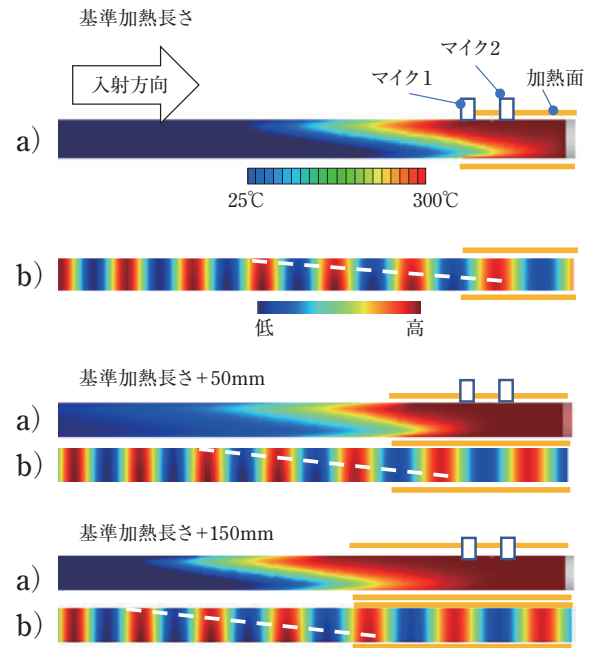


図7 加熱長さによる温度および音圧分布の変化
a) 温度分布 b) 音圧分布

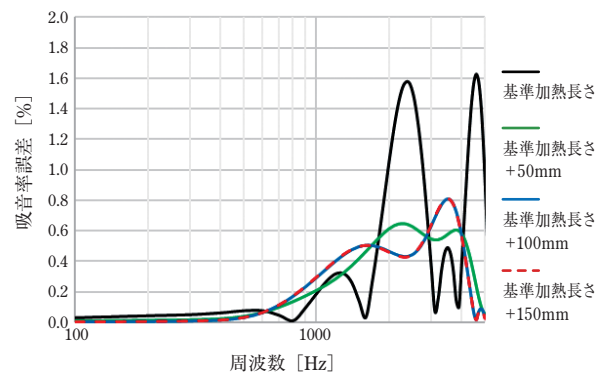


図8 加熱長さが異なる場合の吸音率誤差

5.2 ヒーター温度ばらつきの検討

ヒーターによる加熱は温度がばらつく可能性があるため、意図的に加熱面に温度差を生じさせて温度分布および吸音率を計算した。温度は300℃を基準として、設定したばらつき範囲内でランダムな温度を設定した。また、加熱長さは基準加熱長さ+150mmとした。以下に解析結果を示す（図9、図10）。

ばらつき範囲 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ では管内に温度分布の乱れが生じ、吸音率に大きな誤差が生じたが、ばらつき範囲 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ では吸音率に大きな誤差は生じなかったことから、ヒーター温度のばらつきは、 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以内とした。

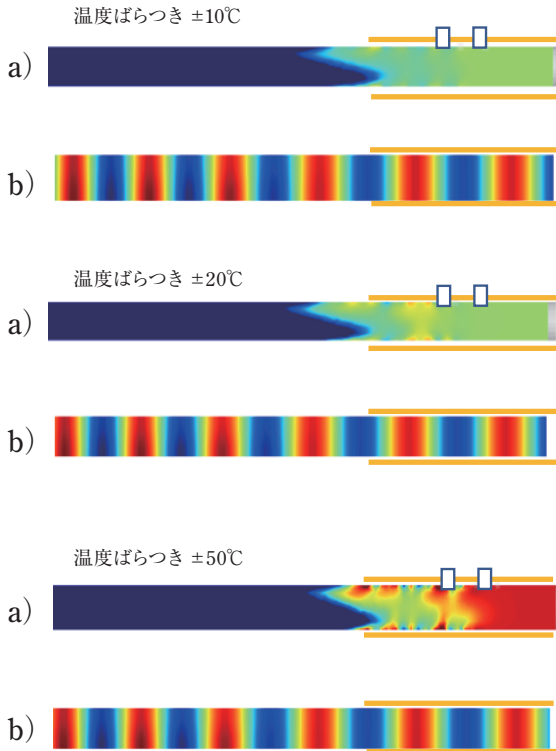


図9 温度ばらつきによる温度および音圧分布の変化
a) 温度分布 b) 音圧分布

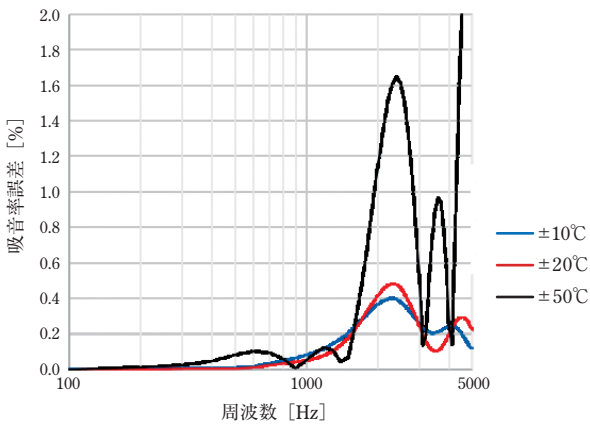


図10 ヒーター温度ばらつきがある場合の吸音率誤差

5.3 マイク間温度差の検証

マイクと音響管をプローブでつなぐ構造としている。プローブに温度差が生じると、内部の音速に差が生じ、マイクへの到達時間が変化する。そこで、到達時間の差による吸音率変化を検証した。

300℃における試料無し（ブランク）吸音率について、伝達関数に意図的に到達時間差（位相差）を与えて吸音率を理論計算した。図11に、位相差

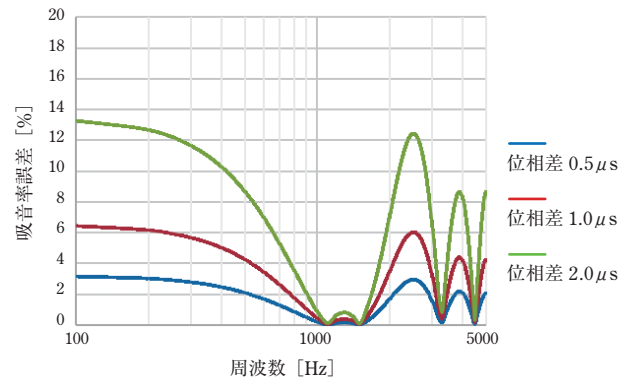


図11 到達時間差による吸音率誤差

なしを基準値として差分を計算した結果を示す。

マイク間の到達時間差が $2.0\mu\text{s}$ で、吸音率の誤差が10%以上となった。また、このときのマイク間温度差は、 14°C と見積もられた。そのため、マイク間温度差は 10°C 以内とした。

6. 実機による検証

シミュレーション結果の検証のため、高温での吸音率測定が可能な装置を作製した。また、装置作製にあたり、日本音響エンジニアリング株式会社殿および株式会社ニイズマックス殿に多大な協力を仰いだ。

6.1 装置概要

図12に作製した測定装置の概略を示す。音響管周辺に精密な温度制御が可能なヒーターを設置し、観測マイクにもそれぞれ温度制御が可能な装置を取り付けた。

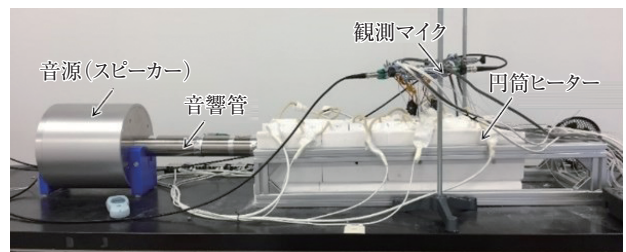


図12 高温吸音率測定装置外観

6.2 検証方法

作製した装置で垂直入射吸音率を測定した。測定対象は試料を入れないブランク測定とした。管

構造と空気物性値から吸音率の理論値を計算し、実験値と比較した。

6.3 検証結果

300℃における吸音率の実験値と計算値の比較を図13に示す。この装置で実際に測定した結果、実測値と理論値がよく一致していることがわかる。

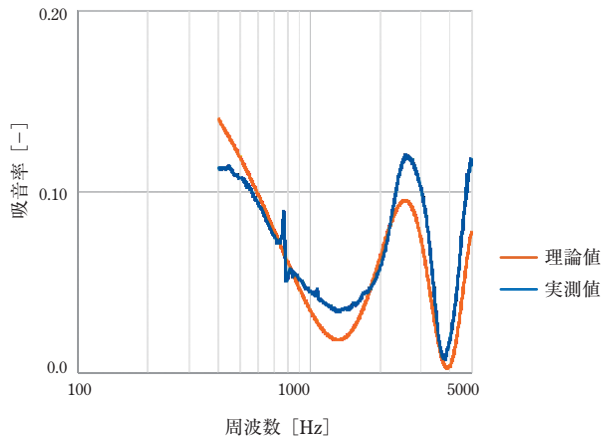


図13 プラント吸音率測定の結果 (300℃)

6.4 無機繊維材料の高温吸音率測定

一例として、無機繊維材料（厚さ25mm、密度100kg/m³）について、温度を常温から300℃まで変更して吸音率の測定を行った。測定結果を図14に示す。温度の上昇に伴い、吸音率が変化していることが確認できた。

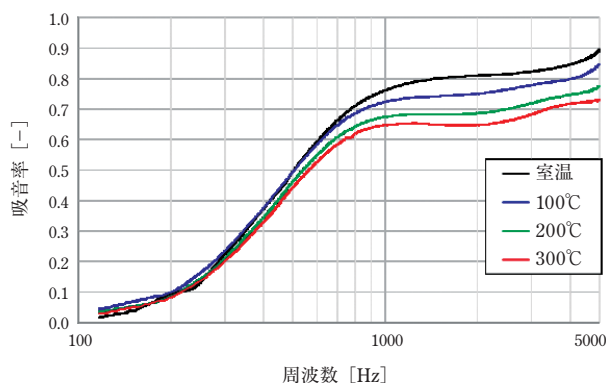


図14 無機繊維材料の高温吸音率測定結果

7. ま と め

シミュレーション結果に基づいて、音響管の詳細な温度コントロールによる高温吸音率測定技術を確立した。これにより、実使用環境における防音材の性能検証が可能になると考えられ、実機により適した製品を提案することが期待できる。

今後は実測を進め、高温で性能を発揮する防音材の開発に活用していきたい。

参 考 文 献

- 1) GRB Expert Group on Regulation 51 : Proposal for the 03 series of amendments to Regulation No. 51 (Noise of M and N categories of vehicles), Informal Documents for the 58th GRB session, GRB-58-04, p. 1-74 (2013).
- 2) 経済産業省：乗用自動車のエネルギー消費性能の向上に関するエネルギー消費機器等製造事業者等の判断の基準等，経済産業省・国土交通省告示第二号，2013，9p.
- 3) 立道有年ほか：高温の雰囲気における多孔質材の吸音特性：特に板状材料の垂直入射吸音率について，日本音響学会誌，日本音響学会（1984）vol.40，no.9，p.612-619.
- 4) 見坐地一人，石井仁樹，高橋亜佑美，三木達郎，藤澤生磨，安藤大介：繊維体吸音材料のBiotパラメータの推定，自動車技術会論文集，49巻，4号，p.787-792（2018）.
- 5) JIS A 1405-2 音響管による吸音率及びインピーダンスの測定－第2部：伝達関数法.

筆者紹介



三木 達郎

研究開発本部 試験解析室
音響測定技術の開発と音響解析に従事