

自動車車室内へのドアシール透過音の予測 Prediction of Vehicle Interior Sound Transmitted through Door Seal against Exterior Noise

精密工学専攻 8号 岩沢 亮
Ryo Iwasawa

1. はじめに

近年の自動車業界において、乗用車に求められる品質のひとつに走行時の車室内静粛性が挙げられる。従来からその向上には音の発生源対策や遮音対策が実施され効果を上げてきた。しかし現在では更なる静粛性の向上を目指す上で、全体的な音から局所的な音の存在に着目すべき状況にあり、その音に対する遮音対策が不可欠となっている。局所的な音には様々な要因が挙げられるが、本論文では車外の騒音が車室内に侵入する際のファクターのひとつであるドア部のシール部品に着目し、ドアシールからの車外騒音進入を低減し更なる静粛性の向上を図ることを目的とする。

研究内容としては、初めに実車において自動車車室外から車室内に侵入してくる音の中で、ドアシールを透過する音がどのような周波数帯にあるかを調べ、調査対象とする周波数帯を決定する。次に自動車全体のドアシールの透過率を予測する手法を考案する。まず実車を模擬した簡易 BOX を用いてドア部全体のドアシール透過率を測定する。全体の透過率を簡便に予測するために、実験的な手法としてある程度の長さをもった有限長のドアシールについて透過率を測定し、それに基づいて全体の透過率を予測していく。数値解析においてもある程度の長さをもった有限長のドアシールのモデルを作成し、透過率を計算した結果から全体の透過率を予測することができる。

2. 実車におけるドアシール透過率の測定

はじめに、実車を用いてドアシールの透過音の周波数帯を調べる。実験のセットアップを Fig.1 に示す。自動車車室外に外部騒音を想定して音源を設置し、周波数 0 から 4096Hz までのランダム波を出力した。また車室内側の窓枠近傍に応答点を 19 点設定し、ドアシールを透過して車室内に入る音を測定する。音源前の位置を入力点として(入力点での音圧) / (応答点での音圧) を透過率と定義する。Test1: 通常の運転席側ドア部 (Normal) と Test2: ドア部をバテで遮音した状態 (Sealed with putty) の二種類の透過率を比較する。

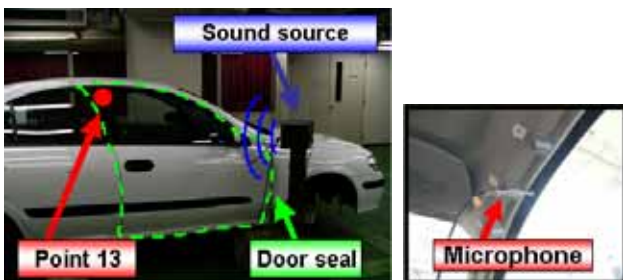


Fig.1 Real vehicle experiment setup & Response point

測定の結果を Fig.2 に示す。これを見ると、1250HzBand, 1600HzBand, 2000HzBand 付近の周波数帯が Test1, Test2 共に値が大きいことから、この付近の周波数帯において車外の音が大きく透過していることがわかる。また、Test1 と Test2 でより差が顕著に出ているのも同じ周波数帯であり、特に 1600HzBand に大きな差が見られる。これよりドア部のドアシール部品からの透過音は 1600HzBand 付近の周波数帯に着目することが重要であるといえる。

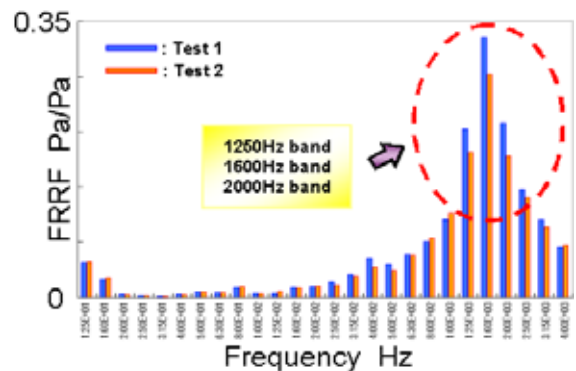


Fig.2 Transmittance at response point 13 (1/3 octave band)

3. 簡易 BOX を用いた ドアシール透過率の検証

現在自動車に搭載されている一般的なドアシールは、固定治具の足やドアが閉められた際に畳み込まれ方を一定にするなどの目的から複雑な形状をしており箇所によって材質が異なるという特徴を持っている。本論文では断面形状による透過率の違いを調べるために Fig.3 に示すような簡易的な形状を持つ二種類のドアシールを使用し研究を進める。



Fig.3 Section of door seal

本章では、実車を模擬した簡易 BOX を用いて実験を行う。簡易 BOX 上面の開口部の淵に全長 720mm のドアシールを圧縮高さ 15mm で設置しガラスを乗せ開口部を閉じることで、実車のドア部を模擬する。セットアップを Fig.4 に示す。前章の実験と同様に、簡易 BOX 外に音源を設けて車外騒音とし、音源からは周波数 0 から 4096Hz までのランダム波を出力する。入力点、応答点は Fig.4 のようにし、(入力点での音圧) / (応答点での音圧) を透過率と定義する。

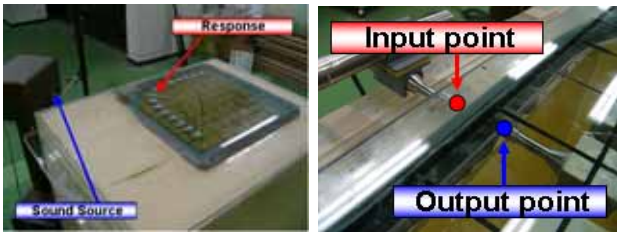


Fig.4 BOX experiment setup and Input point & Output point

ジオメトリを Fig.5 に示す．全長 720mm のドアシールを直線部分 200mm ,カーブ部分 320mm は半径 200mm の円弧状になるよう配置した．測定点のペアは，各部分について 5 組ずつ計 15 組設定し透過率を測定する．



Fig.5 Straight & Curve part geometry

各測定点の 1600HzBand の周波数帯における透過率と，各部分におけるその値の平均値を Fig.6 に示す．また透過率の平均値と A 断面に対する B 断面の透過率の平均値の比率を表にしたものを Table 1 に示す．これより，直線部分とカーブ部分では透過率の大きさが異なる．よってドアシール全体の透過率を評価する場合は，部分毎に分割して考える必要があるといえる．また断面 A と断面 B では直線部分もカーブ部分も B の透過率の値の方が小さく，音を透過しにくいと言えるので，実際の自動車に搭載される場合には断面 B のドアシールのほうが静粛性は良いということがわかる．

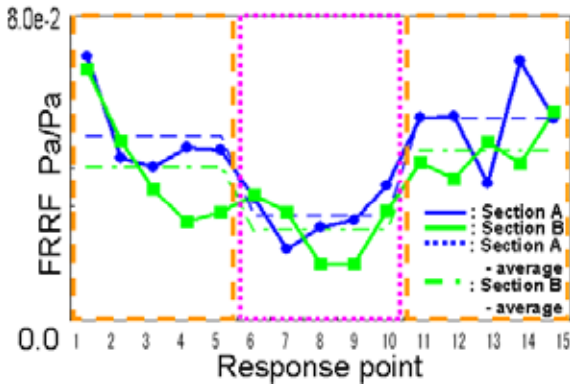


Fig.6 FRRF, FRRF average for 1600Hz 1/3 octave band

Table 1 FRRF average & Ratio of section A, B

	Straight part	Curve part	Straight part
Section A	4.856e-2	2.747e-2	5.295e-2
Section B	4.044e-2	2.402e-2	4.436e-2
Ratio	83.3%	87.2%	83.8%

4．実験による透過率予測手法

4.1 簡易 BOX を用いた単位長さドアシール透過率の測定

3 章でドアシール全体の透過率を測定し透過率を評価したが，これは実際の車体を用いて実験するのと同義であり実用性に欠ける．本章ではこれを実験によってより簡易的に求める手法を考案する．Fig.6 より部分毎の透過率の値に差があることがわかっているので，ジオメトリの 1 から 5 番点を直線部分 1, 6 から 10 番点をカーブ部分，11 から 15 番点を直線部分 2 として 3 つの部分に分けて透過率を評価する．全体の透過率を簡易的に評価するため，各部分に対応するドアシールの長さを短くしたものを使用し実験を行う．この際に，直線部分は 100mm ,カーブ部分は 160mm のドアシールを Fig.7 のように配置して前章と同様の実験を行った．以下において，このドアシールを単位長さドアシールと呼ぶ．ジオメトリは前章の各 5 点のうち，両端を除いた 3 点を用いて透過率を評価する．また，ドアシール両端のパテの影響を少なくするために測定点を前章の実験よりもやや中央寄りに設定してある．

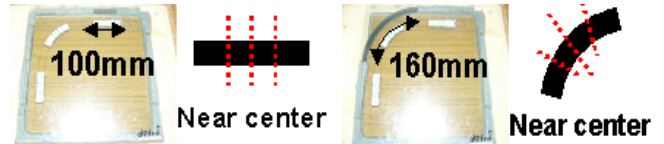


Fig.7 Setup for elemental door seal & Geometry

実験結果を Fig.8 に，透過率の平均値の表を Table 2 に示す．これを見ると，各部分における透過率の平均値が前章の Fig.6 及び Table 1 の値とおおよそ一致していることがわかる．これより，前章のように簡易 BOX 全体に設置した長いドアシールの透過率は，全体を各部分に分割して考えると直線部分については 100mm ,カーブ部分については 160mm 程度の長さのドアシールを用いて同様の実験を行うことで全体の透過率を予測できるといえる．

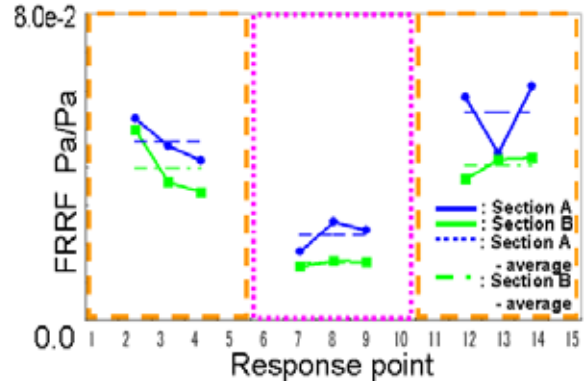


Fig.8 FRRF, FRRF average for 1600Hz 1/3 octave band

Table 2 FRRF average & Ratio of section A, B

	100mm	160mm	100mm
Section A	4.658e-2	2.229e-2	5.423e-2
Section B	3.978e-2	1.493e-2	4.046e-2
Ratio	85.4%	66.9%	74.6%

4.2 単位長さドアシール単体での透過率の測定

4.1 節では簡易 BOX に単位長さドアシールを配置して透過率を測定することで全体の透過率を予測できることを述べた。しかし本論文では簡易 BOX は車体を模擬しているのでこの方法も現実的ではない。そこで次に、簡易 BOX を用いずに単位長さドアシールの透過率を測定する実験を行った。実験のセットアップの簡易図と実験に用いた単位長さドアシールをそれぞれ Fig.9, Fig.10 に示す。

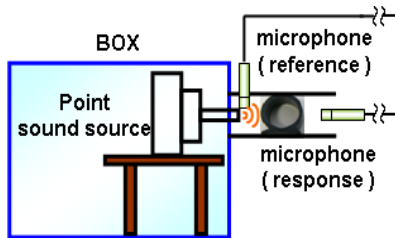


Fig.9 Illustration of setup

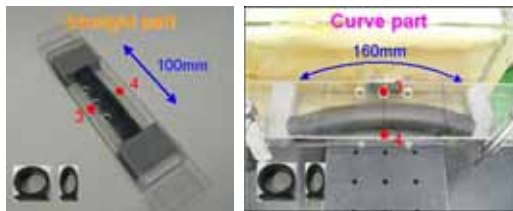


Fig.10 Door seal element (straight and curve part)

実験では点音源スピーカから出力されるランダム波 (0Hz から 4096Hz) の回折を防ぐために、単位長さドアシールの音源入力側空間を簡易 BOX にて封鎖し閉空間としている。対する応答点側の空間は開である。また単位長さドアシールの両端は 3 章の簡易 BOX を用いた実験と同等の境界条件にするために、両端をパテで封じてある。例として直線部分の透過率を Fig.11 に示す。

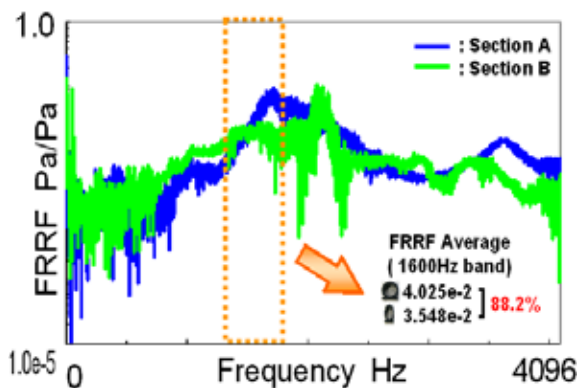


Fig.11 FRRF at response point 3, 4(straight part)

これより、単位長さドアシールについて単体で測定した 1600HzBand の周波数帯における透過率の平均値は、先ほどの単位長さドアシールを簡易 BOX に配置して測定した透過率とおおよそ値が一致していることがわかる。よって、単位長さドアシールを単体で実験し、透過率を測定することで、その断面形状のドアシールを簡易 BOX 全体に配置した際の部分毎の透過率をおおよそ予測できるといえる。これは実際の自動車に搭載されているドアシールにおいては、直線部分とカーブ部分等に分け、各部分についてある程度の長さを持

ったドアシールの透過率を単体で実験することで全体の透過率を予測できることを示唆している。

5. 数値解析による透過率予測手法

前章では実験的な手法によって透過率を予測したが、本章では数値解析によって透過率を予測する手法を考える。数値解析において 3 章で用いた全長 720mm のドアシールについてモデルを作り透過率を計算するとモード数が膨大となり、計算量も多大で精度が悪く現実的ではない。よって単位長さドアシールについて数値解析で透過率を計算する。

5.1 物性値の決定

ドアシールは大きく変形して使用されるため変形していない際の物性値をそのまま用いることができないと推測されるので、初めにドアシールの物性値の決定を行う。変形していない際の物性値としてヤング率: 8.8×10^6 [Pa], ポアソン比: 0.37 [], 密度 649 [kg/m³] が与えられているが、大変形した際の物性値にアップデートする必要がある。しかし単位長さドアシール(100mm)では低い周波数からモードが密に存在し 1600HzBand にも多数のモードが存在する。さらに高減衰であるために実験的にモードの分離が非常に困難であることがわかっている。そこでモード数を少なくするよう長手方向 5mm のドアシールを音響加振し固有振動数を調べることで数値解析モデルとの物性値のアップデートを行った。実験のセットアップを Fig.12 に示す。

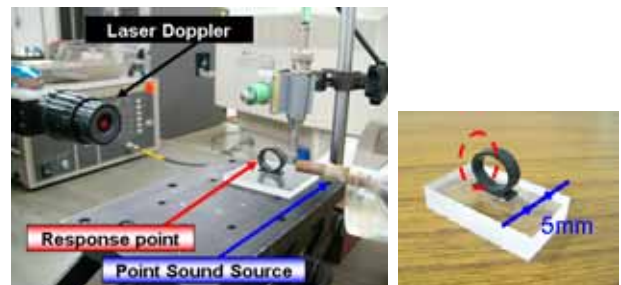


Fig.12 Setup for material property (5mm)

Fig.13 に実験で得たドアシールのモードシェイプと数値解析モデルのモードシェイプを重ねたものを示す。Section A については四つのペア、Section B については二つのモードシェイプペアを選びヤング率についてアップデートを試みた。これより算出されたヤング率は Section A: 26.87×10^6 [Pa], Section B: 88.99×10^6 [Pa] となったので、以下の数値解析においてはこの値を物性値として使用する。なお減衰についても実験値を用いた。

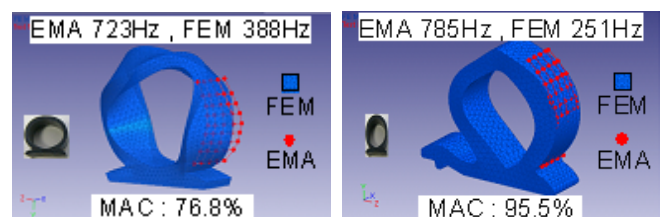


Fig.13 Updated model (EMA and FEM)

5.2 単位長さドアシール単体での音響数値解析

前節で求めた物性値を用いて各部分の単位長さドアシールの透過率を計算する。Fig.14 に直線部分の音響数値解析のモデルを示す。

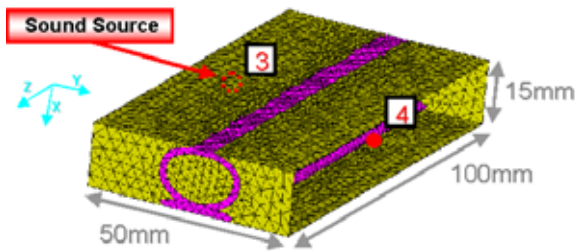


Fig.14 FEM straight part (section A)

モデルは 4.2 節で行った実験とできる限り同等の条件にするため空間を取り囲む壁は全て剛壁とし、音源側を閉空間、出力側を開空間としている。音源は 0 から 4096Hz の音を用い、中央に配置した単位長さドアシールとの連成解析とする。そして透過率を計算した結果を Fig.15 に、Fig.16 に実験と解析における音源側閉空間内の音圧分布を示す。

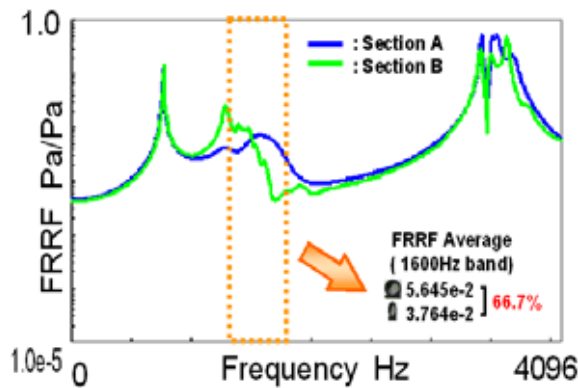


Fig.15 FRRF at response point 3,4 (straight part 100mm)

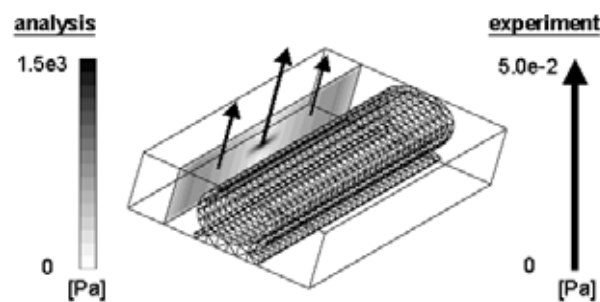














Fig.16 Sound pressure distribution for sound source space

これより、1600HzBand の周波数帯における透過率の平均値は、先ほどの単位長さドアシール単体で測定した透過率とおおよそ値が一致していることがわかる。よって、数値解析上で単位長さドアシールモデルを作成し透過率を計算することで、その断面形状のドアシール単体での透過率をおおよそ予測できるといえる。また Fig.16 から実験と解析とも、中心部分において音圧値が大きくなっていることがわかる。

以下の Table 3 に今までにおける 1600HzBand の透過率の平均値をまとめたものを示す。

Table 3 Average of transmittance for 1600HzBand

	Straight part	Curve part
BOX experiment		
	4.856e-2	2.747e-2
	4.044e-2	2.402e-2
	83.3%	87.2%
Elemental door seal		
	4.025e-2	2.196e-2
	3.548e-2	1.472e-2
	88.3%	67.0%
Analysis		
	5.645e-2	2.791e-2
	3.764e-2	2.765e-2
	66.7%	99.1%

これより、数値解析にて単位長さドアシール単体での実験における透過率を予測することが出来て、単位長さドアシール単体での実験から簡易 BOX 全体の各部分における透過率を予測することが出来る。よって透過率を計算することで簡易 BOX 全体のドアシールの各部分における透過率を予測できるといえる。

6. 研究成果

1. 実車実験よりドアシールの透過音は 1/3 オクターブバンドでは 1600HzBand が大きいことがわかった。
2. 実車を模擬した簡易 BOX を用いて、ドアシール全体の透過音を測定した際に、直線部分とカーブ部分では透過率の大きさが異なるため、部分毎の評価が必要であることがわかった。
3. 各部分の透過率を実験的に予測するためには、ある程度の長さをもったドアシールを用いればおおよその透過率が予測でき、今回は直線部分では 100mm、カーブ部分では 160mm として予測ができた。
4. 数値解析において物性値の決定を行い、連成解析で単位長さドアシールの透過率を計算した。
5. 数値解析での透過率計算結果から、簡易 BOX でのドアシール全体の透過率を予測することができた。

7. 参考文献

1. 大久保信行“機械のモーダル・アナリシス”中央大学出版部(1982)
2. 木立純一・他“ドア閉まり音メカニズムの研究”学術講演会前刷集 No.37-06(2006)