

実稼動モード解析と音響ホログラフィを用いた ドア閉まり音メカニズムの研究

Study of Door Closing Sound Mechanism Using Operational Modal Analysis
and Acoustic Holography

木 立 純 一*
Junichi KIDACHI

要 旨

ドアが閉まるときの境界条件を確保するため、実稼動モード解析(OMA)を用いてモード解析し、時刻歴振動挙動(ODS)と振動モードの関連付けをおこなった。さらに振動挙動と音の放射現象の関係を証明するために、時間領域音響ホログラフィにて音響放射現象を確認した。従来法では低周波の測定限界があったため、今回は、新しい手法である統計的最適化近距離音響ホログラフィを用いた。その結果、過渡状態における振動現象と音響放射現象に関連性があることを確認できた。また、振動の流れをコントロールすることで、ドア閉まり音の音色を変える手法を開発した。

ABSTRACT

In order to keep the boundary conditions of door closings, operational modal analysis (OMA) was used to obtain the correlation between the operational deflection shape (ODS) and mode of vibration. As a result, it was possible to understand the time domain deflection shape. In addition, to verify the relationship between the deflection shape and phenomenon of noise radiation, the acoustical radiation phenomenon was determined using time domain acoustical holography. With this conventional method, there were limits to the measurement of low frequencies, so in this research a new method called statistical optimal near-field acoustic holography was used. As a result, it was possible to determine a correlation between the vibration phenomenon and phenomenon of noise radiation in transient conditions. A method of changing the door closing sound was developed by controlling the vibration flow.

1. まえがき

近年、自動車の商品魅力の一つとしてドア閉まり音(以下閉まり音)が注目されているが、一方、自動車の低燃費化を目的とした車両の軽量化への要求も高くなり、閉まり音の向上を目的とした部材の採用が困難となっている。

本研究では、時間領域における過渡的な閉まり音発生メカニズム(以下時間領域的閉まり音)の解明をおこない、現行量産ドアに対し部材の追加をせずに、閉まり音向上が可能な構造を導いた。

2. 閉まり音構成要素

閉まり音の構成要素は、Fig. 1に示すように、低周波、中周波、高周波成分は、それぞれドア外板面、ドアシール、ド

アロックと相関が高い。

ドアシール(中周波)、ドアロック(高周波)については、それぞれ物体間で音が発生する現象であり、シール断面やドアロック内部の構造で対応が可能である。一方、ドア外板面の音は、なんらかの衝撃が起因となり、ドア外板面が振動し

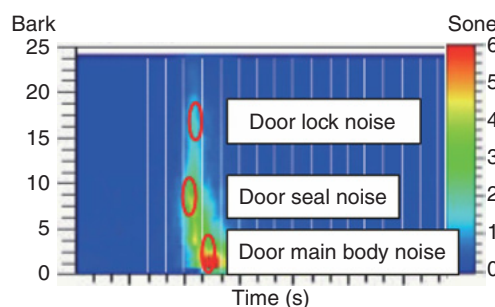


Fig. 1 Door closing sound element

*四輪開発センター

ている現象である。このための解析手法として、ドア外板面の固有値を調べるモード解析が考えられるが、過渡現象であるドア閉まり音メカニズムを解明するには、さらに入力と応答のプロセスを調べる必要があるため、以下に述べるよう実稼動モード解析と時刻歴振動挙動、時間領域音響ホログラフィを用いて解析をおこなう。

3. 過渡状態における振動挙動の解析

ドア外板面の振動解析をおこなう場合、一般的にはモード解析が有効である。モード解析は、対象構造から得られる周波数応答関数(FRF)からモードパラメータを抽出し、モードモデルを推定する技術である。FRF測定は対象物を自由支持し、加振器等を用いて対象物に対する入出力信号を測定する。

この場合、実際にドアが使用される状態の境界条件が異なることと、過渡状態の振動挙動を把握することができないことが問題であった。

そこで、これらの課題を解決できる手法として、以下に示す、実稼動モード解析と時刻歴振動挙動を用いて、過渡状態の振動挙動を解析した。

3.1. 実稼動モード解析(OMA)

OMA(Brüel&Kjær 社 Operational Modal Analysis)⁽¹⁾は対象物の振動応答信号のみからモーダルパラメータを抽出する技術で、加振力の測定を必要としない。しかし、何らかの方法で対象物の振動を励振する必要があるため、車室内に配置されたスピーカからランダム信号を放射してドアを音響励振し、ドア外板面およびサッシュに取り付けた36個の加速度ピックアップで振動挙動を把握した(Fig. 2)。

3.2. OMA によるモード解析結果

閉まり音構成要素解析結果から、モード解析の対象の上限周波数を 200 Hz とし、ドア外板面のモード解析した結果、Fig. 3 に示すモードシェイプの MAC の(OMA の SSI 法)⁽¹⁾とおり、精度の高いモーダルパラメータを推定することができた。

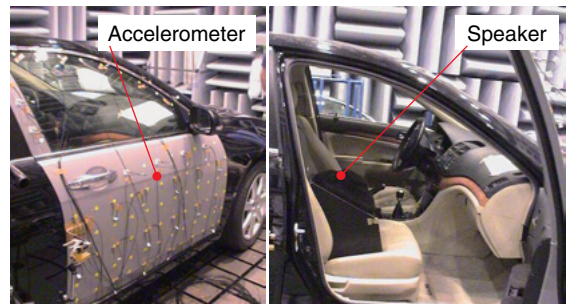


Fig. 2 Operational modal analysis

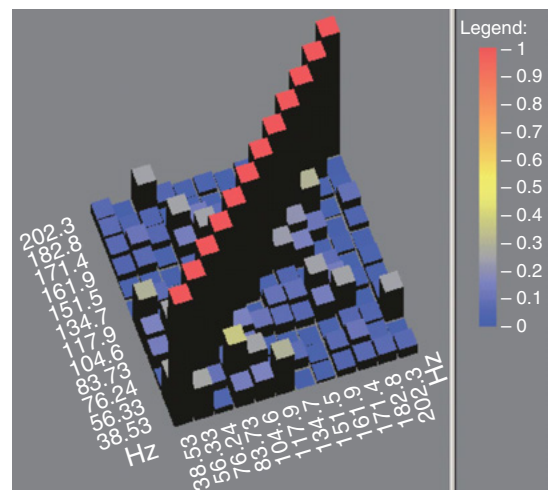


Fig. 3 MAC of door mode shape

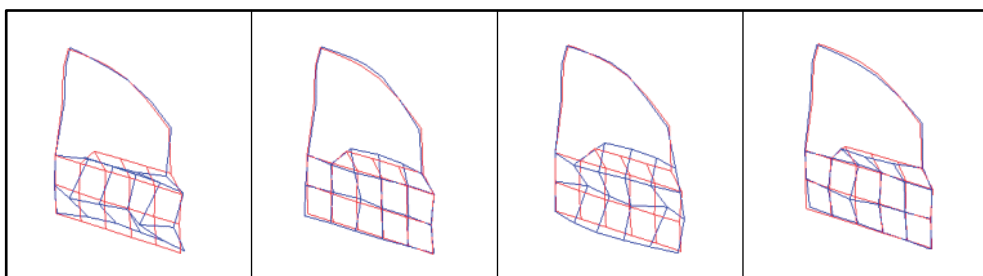


Fig. 4 Time ODS around 135 Hz

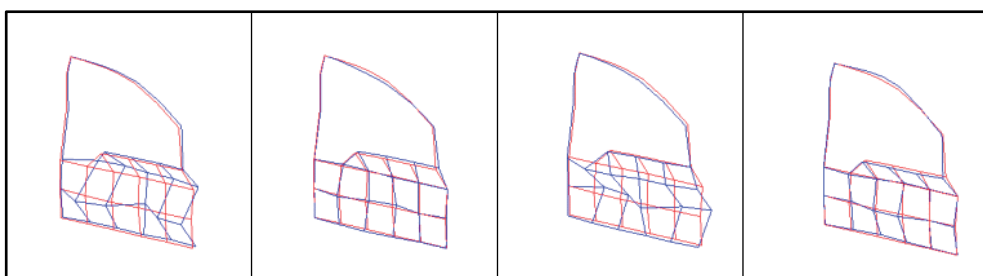


Fig. 5 Modal shape of 7th mode, 135 Hz

3.3. 時刻歴振動挙動 (ODS)

ODS (Brüel&Kjær社 Operational Deflection Shape) は、複数のセンサと単純な信号処理 (振幅比と位相差を得るクロススペクトル測定または時間同時測定) を用いて、実稼動状態における対象構造の振動挙動を (特定周波数または時刻歴信号の) 動画にて表現する技術である⁽²⁾。

3.4. ODS による過渡振動挙動検証結果

OMA にて推定された振動モードと時刻歴の振動挙動との関連を調べるため、時刻歴 ODS に用いた信号をモード周波数付近でフィルタ処理した信号による ODS 動画とモード形状を比較した。その一例を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。

Fig. 4 は 135 Hz を中心とする 10 Hz 幅のバンドパスフィルタ信号による 1 サイクルの時刻歴動画で、Fig. 5 は OMA により推定された 7 次モード (135 Hz) のモード形状である。両者は振動の腹および節の位置が良く一致しており、ドア閉まり時の境界条件でモード解析がおこなえたといえる。

また OMA ではわからない過渡振動挙動が Fig. 6 に示す通り、ドアが閉じた瞬間にドアサッシュ上端に発生した衝撃が、振動源となりドア外板面へ伝搬され、外板面のモードを励振させているとわかった。

4. 音響放射現象の検証

ODS の解析結果から過渡振動挙動は把握できたが、振動と音の関連を調べるため、音響放射状態を確認する必要がある。そこで、ドア外板面の音響放射の実態を知るために、時間領域音響ホログラフィ (Brüel&Kjær 社 統計的最適化近距離音響ホログラフィ) を適用した。

4.1. 時間領域音響ホログラフィの問題点

従来の近距離音響ホログラフィ (NAH) は、原理として 2 次元離散フーリエ変換に基づく。低周波数の音響現象に対してホログラフィ測定を適用する場合、実際には有限長で決定される 2 次元離散フーリエ変換のためのアレイサイズ (空間窓) に音響現象が入りきらないことがある。その場合、空間周波数領域への離散フーリエ変換とその逆変換を繰り返すことで、空間窓の端における不連続性が、解析結果にゴーストをもたらす⁽³⁾。類似の現象は、時間信号に離散フーリエ変換を適用する場合の窓関数の議論と同じである。このため、先に推定されたドア外板面の低次モード周波数では大きなサイズを必要とするが、適用が現実的ではない。

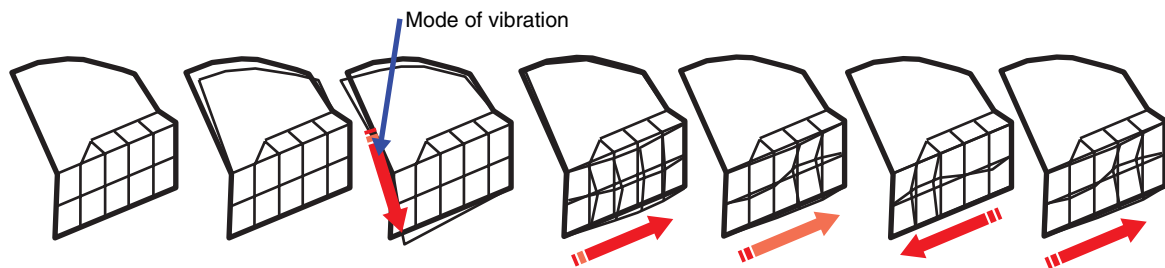


Fig. 6 Operational deflection shape

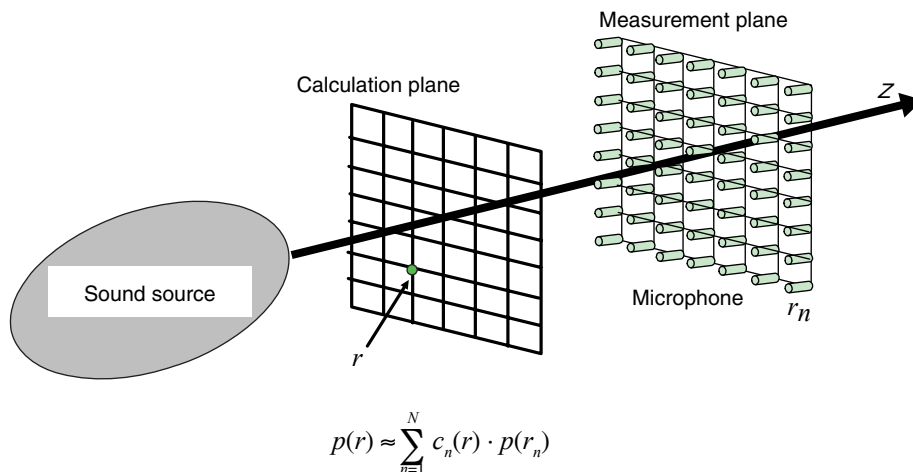


Fig. 7 Basics of statistical optimal near-field acoustic holography

4.2. 統計的最適化近距離音響ホログラフィ (SONAH)

SONAH は近距離音場ホログラフィ (NAH) を改良したものであり、任意配置された測定面上の音圧データから任意の計算面に、2次元離散フーリエ変換を使わずに直接に計算する方法である (Fig. 7)。任意の計算点 r での時間高調波音圧 $p(r)$ は、測定音圧データ $p(r_n)$ の複素線形結合として表すことができ、複素係数 $C_n(r)$ は最小自乗法にて統計的に推定される⁽⁴⁾。この場合、複素係数 $C_n(r)$ は音響波面を表現するための固有情報となるが、ここでは z 軸を移動するために用いている。

SONAH の場合、ホログラフィのセンサに対する制約 (アレイサイズ、マイクロホン配置) が少ないため、小さなサイズのアレイが適用できるという優位性がある。

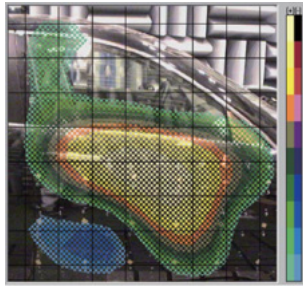


Fig. 8 Near-field acoustic holography (135 Hz)

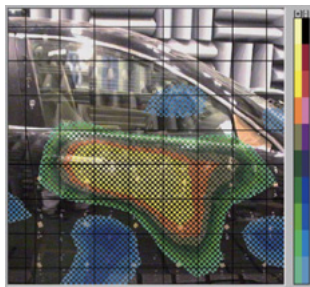


Fig. 9 Statistical optimal near-field acoustic holography (135 Hz)

4.3. 低周波数限界の検証

ドア外板面 7 次モード周波数 (135 Hz) における、従来法の NAH (Fig. 8) と SONAH (Fig. 9) による Active Intensity の結果は、同時刻の Active Intensity の振幅の大きい部分と正負の境界はそれぞれ対応する振動モードの腹と節との位置と一致している (Fig. 5)。また、SONAH の結果 (Fig. 9) は、従来法 (Fig. 8) に比べて、振動モードの腹と節の位置との関係をより明確に示していること (分解能の良さ) もわかる。

4.4. 音響放射現象の検証結果

SONAH によるホログラフィ計算を適用した結果、ODS のアニメーションと同様に、ドア外板面後端より低周波成分の (30Hz-200Hz) 音源が発生し時間の経過と共に外板面を移動していることが確認できた (Fig. 10)。

また、Fig. 11 に示すとおり、SONAH の結果は、振動現象に対して、位置関係と方向が一致していることもわかった。

以上の結果から、ドア外板面の過度振動現象が音響放射されていることを証明できた。

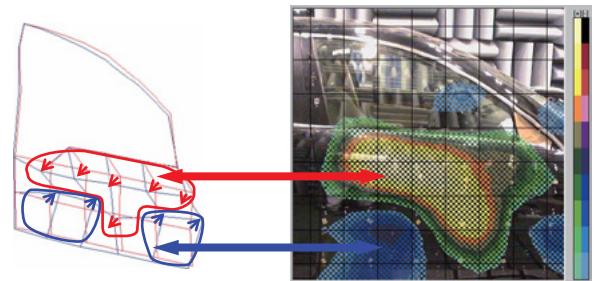


Fig. 11 Time ODS and near-field acoustic holography (135 Hz)

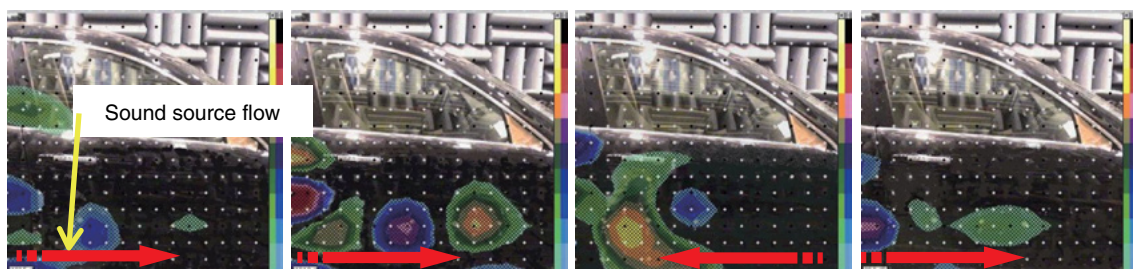


Fig. 10 Near-field acoustic holography of door

5. 低周波成分強調手法

ドア外板面の振動挙動が音となって放射されていることが先の実験から示されたことから、振動の流れを制御し、低周波成分の音色をコントロールする手法について検討した。

音圧レベルとして、低周波成分が多いドア外板面のモードを解析したところ、ドア単体の1次振動モードが40Hz以下に存在していることがわかり、低周波成分を強調させるためには、1次振動モードを下げて、振動の伝搬を制御すればよいと考えた。

そこで、量産車のドア(以下ベースドア)を用いて、振動伝搬の制御手法を検討した。

5.1. 構造の検討

CAEを用いて、1次振動モードを下げられる構造を検討した。

今回は、ベースドアに対し、ドア外板面へ振動抑制効果のある部材などは検討項目から除外し、ドア外板面の保持構造を変更することで、1次振動モードの変化ができるかを検討した。

その結果、1次振動モードを下げる外板面の保持構造を得ることができた。

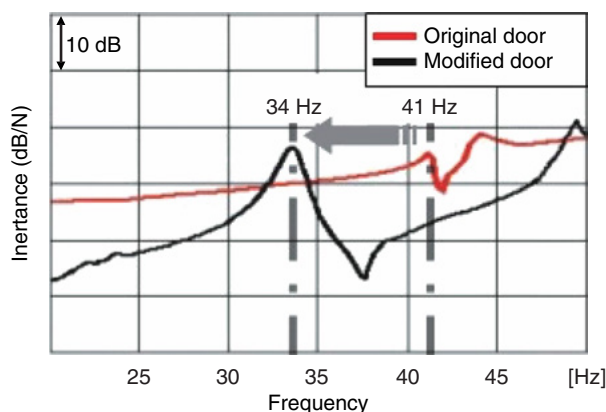


Fig. 12 Modal analysis of door

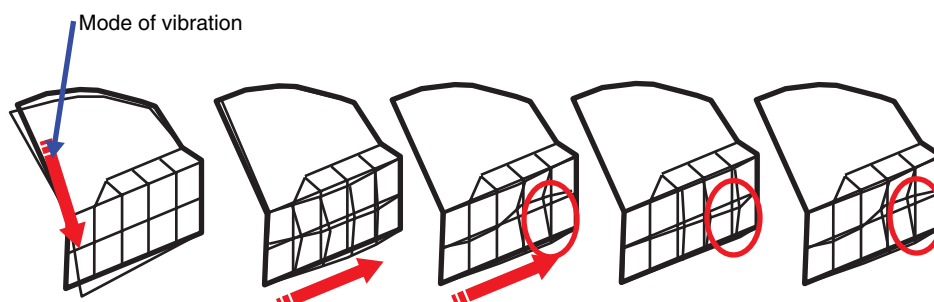


Fig. 13 Operational deflection shape

Table 1 Sound pressure level (-200 Hz)

	SPL (dB)
Original door	96.0 dB
Modified door	99.2 dB

5.2. 外板面保持構造変更ドアの効果検証

外板面保持構造を変更したドアを作成し、モード解析したところ、Fig. 12に示すように1次振動モードを下げることができた。

また、ODSの結果から外板面保持構造を変更ドアは、変更前(Fig. 6)に比べ Fig. 13に示すとおり前後方向の振動の流れを制御していることも確認できた。

5.3. 外板面保持構造ドアの音検証

実車にて閉まり音の効果を確認したところ、外板面保持構造を変更したドアは、エキスパート、一般ユーザの主観評価において、低周波成分が強調されている効果を確認できた⁽⁵⁾。

また、Table 1に示すとおり、低周波(-200Hz)の音圧レベルが3 dB以上向上していることがわかった。

6. まとめ

本研究にて、ドア閉まり音メカニズム解明をおこなった結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) 実稼動モード解析、時刻歴振動挙動と時間領域音響ホログラフィを用いて、低周波成分は、ドア閉時の衝撃により発生した振動が、ドア外板面へ伝搬し、振動モードを励振、音を放射しているのを証明できた。
- (2) ドア外板面の振動モード解析において、音響加振による実稼動モード解析(OMA)がドア閉まり時の境界条件を確保しながら、有効に実施できた。
- (3) ドア閉まり音の音響現象を把握する手法としてSONAHによる時間領域音響ホログラフィで、ドアの低次モード周波数の音響現象を明確に把握できた。
- (4) 量産車のドアに対し、外板面保持構造を変更することによって低周波成分を強調できた。

参考文献

- (1) Møller, N., Gade, S.: Operational Modal Analysis on Cars,
Proc. Of JSAE Spring Convention(2002)
- (2) Døssing, O.: Structural Testing Part 1 & 2, Brüel&Kjær
Primers. BR 0458-11 & BR 0507-11
- (3) 木立純一, 富田宜志, 高須努: ドア閉まり音メカニズム
解明のための測定技術, 自動車技術会学術講演会前刷
集, No.37-06, p.5-8(2006)
- (4) Hald, J.: Patch Near-field Acoustical Holography Using a
New Statistically Optimal Method, Bruel & Kear
Technical Review, No.1, p.40-50(2005)
- (5) 木立純一, 小池昌則: ドア閉まり音メカニズムの研究,
自動車技術会学術講演会前刷集, No.37-06, p.1-4(2006)

■ 著 者 ■



木立 純一