

振動騒音用トリムボデーのモデル化技術の構築

Development of Trimmed Body Model for Noise and Vibration

相澤 伸 夫*
Nobuo AIZAWA

井出 史 彦*
Fumihiko IDE

鍵山 恭 彦*
Yasuhiko KAGIYAMA

要 旨

トリムボデーの振動騒音性能を予測するために計算時間が短く、かつ精度の高いモデル化技術を開発した。本開発ではモデル自由度を削減するために、音響特性に影響を及ぼす部品を実験により明確にし、影響の小さい部品をシェル要素から集中質量モデルに簡素化した。さらに、計算上で自由度を削減し計算を高速化させる手法として新たに提案されたAutomated Multi-Level Substructuring(AMLS)を適用した。その結果、計算時間を大幅に短縮しながら、計算結果が実験と良く一致することを検証することができた。

ABSTRACT

Modeling Technology for a trimmed body that can predict noise and vibration with short computation time and high accuracy was developed. In order to reduce the total degrees of freedom, parts that exert only a small influence on the acoustic characteristics were simplified from shell elements to concentrated mass models. The acoustic significance of trim parts was determined both experimentally and computationally. Also, Automated Multi-Level Substructuring (AMLS) was applied resulting in significant reduction in computation time. Finally, the trimmed body prediction results agreed closely with experimental data.

1. まえがき

近年、自動車の振動騒音開発において、CAE予測精度の向上が求められている。そのために詳細なモデル化が必要であることから、FEモデルの自由度は大幅に増加している。あわせて、解析周波数も拡大しており、計算時間は増加する一方である。本開発は、モデル精度を保ちながら増大する計算時間を削減することを目的とした。

計算時間を削減するには、代表的な三つの手法がある。第一の方法は、実験とFE解析を組み合わせる手法である⁽¹⁾。これは、自由度の少ないモデルを用い、その精度不足を補うために実験とFEモデルの相関からFEモデルの剛性や質量などを調整する手法である。しかし、実験を必要とするため、試作車の存在しない開発段階での適用は困難である。第二の方法としては、FEモデルをモーダルモデルに変換するComponent Mode Synthesis(CMS)により解析不要な部分のモデル自由度を削減する手法が挙げられる⁽²⁾。この場合、モーダルモデルに変換するFEモデルを詳細に作成する必要があるため、モデル化に時間が必要である。また、モーダルモデルへの変換やモデル分割には、高度な知識と技術が

必要である。本開発では、第三の方法であるトリムボデーの精度に影響を及ぼさないトリム部品に集中質量要素を使用することで自由度を削減する手法を採用し、計算時間の短縮を図った。さらに、新しく提案された計算手法であるAMLSによる計算時間の短縮効果とその精度を検証した。

2. AMLSの自由度削減による計算時間の短縮

AMLS⁽³⁾はBennighofらによって開発された固有値計算手法である。以下にAMLSの基本概念である拘束

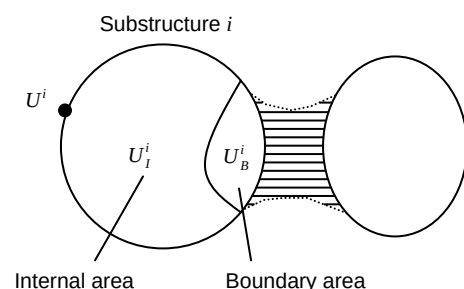


Fig. 1 Definition of substructure

モード法⁽⁴⁾について述べる。Fig. 1に示すように全体構造をいくつかの部分構造に分割し、それぞれの部分構造を境界部と内部領域に分類すると部分構造*i*の変位 U^i は、内部領域の変位 U_I^i と境界部の変位 U_B^i に分類される。内部領域の変位は、境界領域の変位と内部領域のモードマトリクスにより次のように表される。

$$\{U_I^i\} = [T_B^i]\{U_B^i\} + [\Phi_I^i]\{\xi_I^i\} \quad (1)$$

ここで、式(1)の第一項は境界部の変位による内部領域の変形を表し Guyan の静縮約によるマトリクスである。第二項は境界部を拘束した時の内部構造のモード形状からなる変形であり、第一項の静縮約の精度を改善するために定義され、次の式(2)から求められる。

$$([K_I^i] - \omega^2 [M_I^i])\{\Phi_I^i\} = 0 \quad (2)$$

式(1)(2)から部分構造*i*の変位は次のように表される。

$$\{U^i\} = \begin{Bmatrix} U_B^i \\ U_I^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ T_B^i & \Phi_I^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_B^i \\ \xi_I^i \end{Bmatrix} = [A^i] \begin{Bmatrix} U_B^i \\ \xi_I^i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$[A^i]$ はモード合成法変換マトリクスを表し、式(3)から $[A^i]$ を求め、全体構造の固有方程式に前後から乗じること、モード全系の固有方程式が得られる。

$$([\hat{K}] - \omega^2 [\hat{M}])\{\hat{\Phi}\} = 0 \quad (4)$$

AMLS では、数千から数万の階層化された部分構造剛性マトリクスが自動的に生成される。式(2)に示すように、部分構造マトリクスは固有値解析によりモード自由度に変換される。その結果、モデル全体の自由度を縮退することが可能であり、計算の高速化を実現している。また、多数の部分構造を用いるため並列計算による高速処理が可能である。

Fig. 2にAMLSによる計算の流れを示す。ユーザがAMLSを実行する場合には、一行の記述を NASTRAN 実行カードに加えるだけで特別な設定を必要としない。また、計算結果

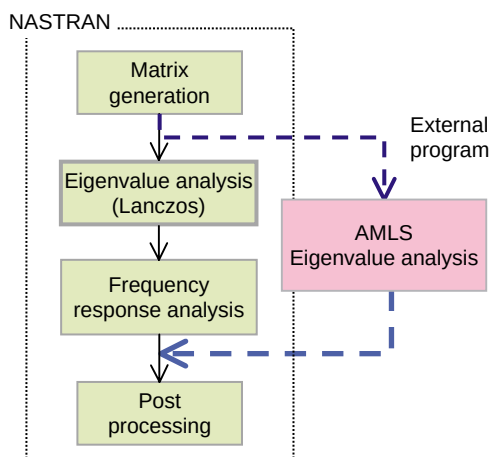


Fig. 2 AMLS process

も NASTRAN の書式で出力するため、新たな技術習得を必要としない。

3. モデル化手法における自由度削減と精度

Fig. 3 にトリムモデルを構成する部品と自由度の比率を示す。計算時間を短縮するためにはモデルの自由度を削減しなければならないが、一方で精度を向上するために詳細なモデル化をおこなうと自由度は増大してしまう。

Body In White(以下 BIW)やドアパネルなどの鉄製部品は、モデルの簡素化により自由度を削減すると精度を保てなくなってしまうことから図面に対し忠実にモデル化する必要がある。よって、BIWなどの鉄製部品においては、要素数をできるだけ増やさずに形状をモデル化するために要素サイズを最大でも 15 ミリ程度とし、半径5ミリ以上のフィレットについても形状を表現した(Fig. 4)。また、各部

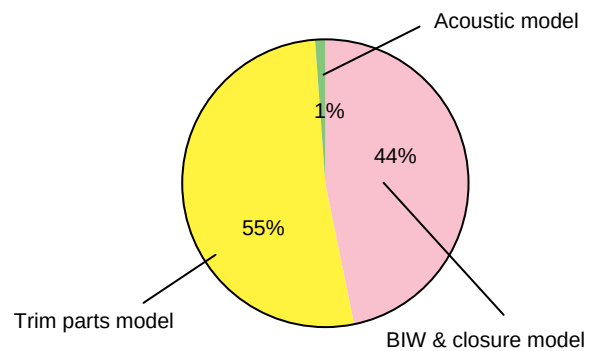


Fig. 3 Degree-of-freedom ratio

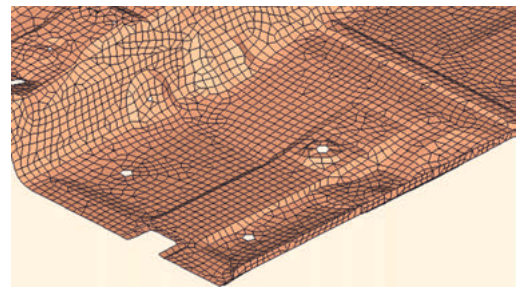


Fig. 4 Floor panel model

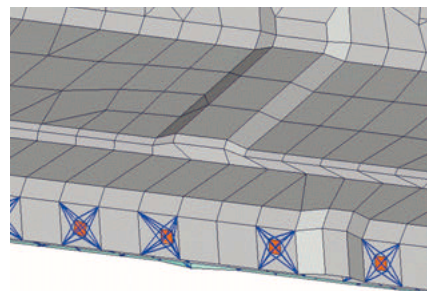


Fig. 5 FE model for Spot welding

品の結合を正確に表現することが必要と考え NASTRAN の HEXA 要素と RBE3 要素を用いて溶接径を忠実に表現した⁽⁵⁾(Fig. 5)。

車室内音響空間のモデル化については、車室内の詳細な形状を再現したとしても音響モードの振動数はあまり変化

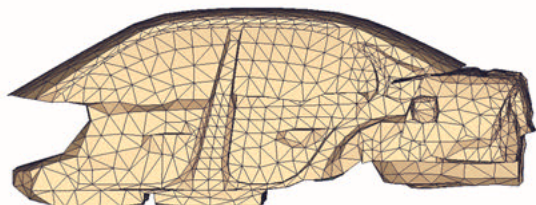
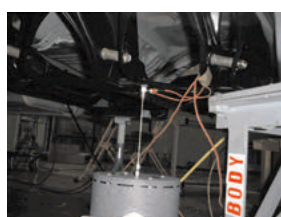
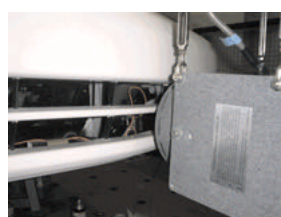


Fig. 6 Acoustic model for cavity



Rear subframe



Member front cross

Fig. 7 Excitation points

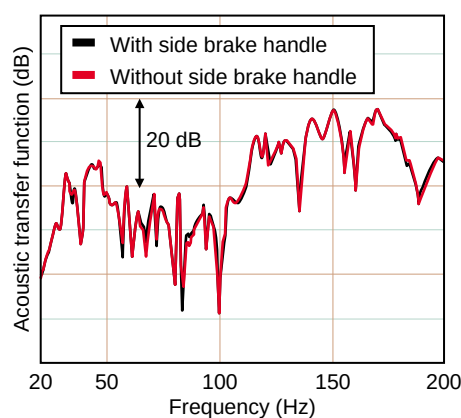
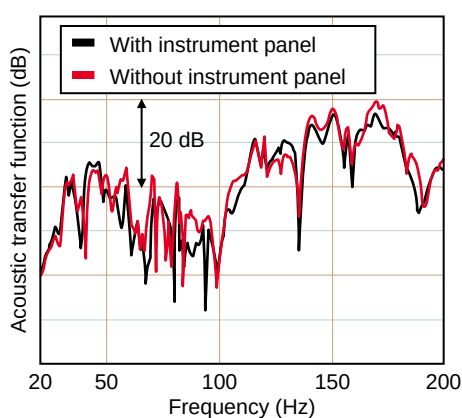


Fig. 8 Influence of trim parts

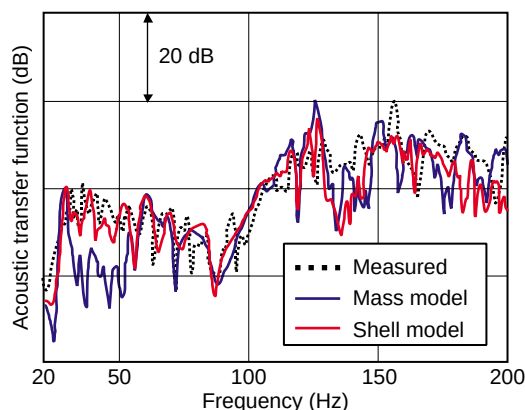
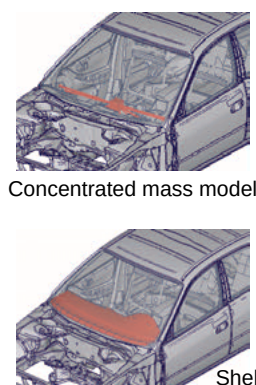


Fig. 9 Influence of instrument panel model

しないことが確認できた。そこで、音響モデルの要素サイズは、音響モードを十分に再現できるよう解析最大周波数の $1/8$ 波長以内とし、トリムボデー全体自由度に対し十分小さいモデルとなっている (Fig. 6)。

トリム部品については、各部品が計算精度に対し構造体として影響を及ぼすのか、単に質量として影響を及ぼすのかが不明である。これらを明確にし、構造体として影響の無い部品を質量モデルに置き換えることで自由度の削減をおこなった。

3.1. 自由度削減のためのトリム部品モデル化手法

全てのトリム部品を安易に集中質量で表現すると計算精度が悪化し、不必要な部品を詳細にモデル化すると、モデル自由度が増えることで計算時間が増加してしまう。そこで、各トリム部品の音響特性に対する影響度を調査し、単に質量によってモデル化できる部品と、構造をモデル化しなければならない部品とに分類し、前者を質量モデルに置き換えることで自由度を削減した。以下にその手順を示す。

(1) 実験において、各トリム部品を個々に取り外し、音響周波数応答関数に変化する部品についてはシェル要素で詳細なモデル化をおこない、それ以外の部品は集中質量でモデル化した。

(2)さらに FE モデルにおいて、(1)で詳細なモデル化が必要だと判断した部品個々に対し、シェル要素で詳細なモデル化をした場合と集中質量でモデル化した場合を比較計算し、両者の音響特性の差が小さい場合には集中質量でのモデル化とした。

3.2. トリム部品取り外し実験

実験では、各トリム部品の振動を励起するため、フロントサブフレーム、リアサブフレームの上下方向、メンバフロントクロスの前後方向に加振入力をおこない、前席、後席、トランク内の音圧を測定した(Fig. 7)。

各トリム部品を個々に取り外し、その前後での音響応答関数の変化を比較し、その度合いに応じて優先順位を決めた。Fig. 8は、もっとも音響特性に変化のあったインストルメントパネルと変化の小さいサイドブレイクの周波数応答関数を示す。

3.3. トリム部品モデルの簡易化

実験で音響特性への影響が大きいたことが判明したトリム部品については、シェル要素による詳細なモデル化をおこなった。さらに、作成したシェル要素モデルを集中質量に置換し、モデルの簡易化による影響を確認した。Fig. 9にもっとも影響が大きかったインストルメントパネルの結果を示す。シェル要素モデルを集中質量モデルに置き換えることで、30 – 60Hz において実験との相関が悪くなることが確認できた。すなわち、このような周波数帯において計算精度を確保するためには、詳細なモデルを作成する必要があることがわかる。次に、ルーフライニングをシェル要素モデルから集中質量に置換した場合について検証をおこなった。その結果を Fig. 10 に示す。音響特性に大きな変化はなく、集中質量モデルで十分表現可能であると考えられる。以上のような過程を経て、音響特性への影響が小さい部品を簡素化することで、トリムモデル全体の自由度を23%削減することができた。

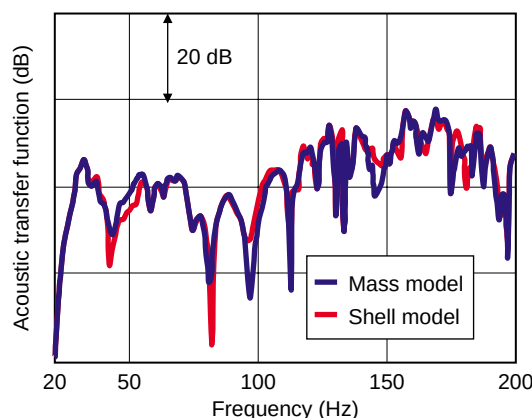
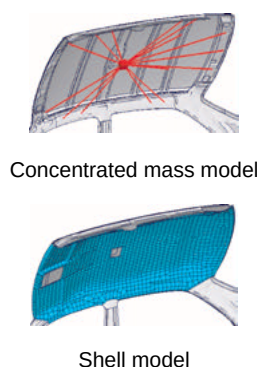


Fig. 10 Influence of roof lining model

3.4. トリムボデーモデル精度検証

精度が検証された各部品で構成されたトリムモデルを Fig. 11 に示す。前述したとおり、このトリムボデーのトリム部品は、シェル要素でモデル化された部品と集中質量でモデル化された部品とが混在している。精度検証は、フロントサブフレームに上下振動入力した場合の周波数応答関数を実験と比較することでおこなった。Fig. 12 にその結果を示す。FE モデルは、実験とのレベル差が 200Hz まで ± 5 dB 以内に収まっており、振動騒音開発において実用的な精度を有するトリムボデーモデルであることが確認できた。

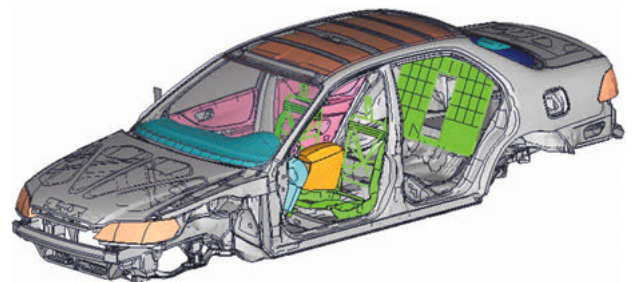


Fig. 11 Trimmed body model

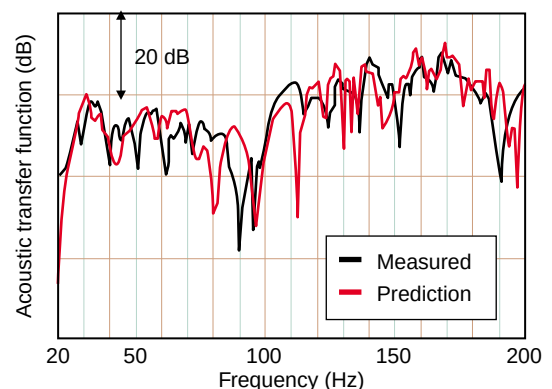


Fig. 12 Verification for trimmed body

4. 計算速度検証

計算速度の検証のために、300Hz までの周波数応答解析を実行した。計算時間の比較は、トリム部品の自由度を削減しない場合と削減した場合、さらに AMLS を使用した場合とでおこなった。Fig. 13 にそれぞれの計算時間を示す。トリム部品の自由度を削減した場合には 20% 短縮され、AMLS を使用した場合には、さらに 66% 短縮することが可能であることが確認でき、トリムボデーの自由度削減と AMLS と効果を実証することができた。

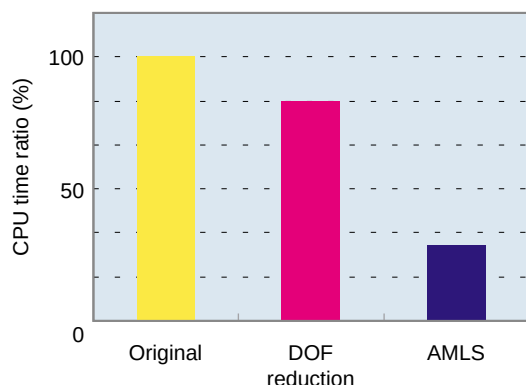


Fig. 13 CPU time ratio

5. まとめ

トリム部品の自由度削減と新たな計算手法を検討した結果、次の結論を得た。

- (1) 計算時間が短く精度の高い実用的なトリムボデーのモデル化技術として、一部のトリム部品を集中質量要素で取り扱うことが有効であることがわかった。
- (2) 自由度削減のためのトリム部品に対するこのモデル化手法と AMLS による固有値解析手法の計算時間短縮への有効性を示すことができた。

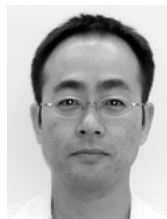
以上のモデル化技術を適用することによって、CAE による振動騒音開発を精度及び時間という観点からより効率的におこなうことが可能となった。

参考文献

- (1) 木村文彦, 清水宏: 実験とのコリレーション・パラメータスタディ. デジタルエンジニアリング, 朝倉書店, 2002, p.25
- (2) 社団法人自動車技術会: 自動車技術ハンドブック基礎・理論編, 1991, p.247
- (3) Bennighof, J.K., Kaplan, M.F., Muller, M.B.: EXTENDING THE FREQUENCY RESPONSE CAPABILITIES OF AUTOMATED MULTI-LEVEL SUBSTRUCTURING, SDM Paper AIAA-2000-1574

- (4) 長松昭男, 大熊政明: 拘束モード合成法, 部分構造合成法, 培風館, 1991, p.103-104
- (5) Heiserer, D., Sielaff, J., Chargin, M.: High performance, process oriented, weld spot approach, 1st MSC Worldwide Automotive User Conference(1999)

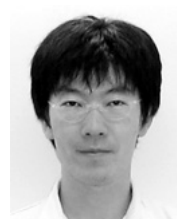
■著 者■



相澤 伸夫



井出 史彦



鍵山 恭彦