

吸気系放射音解析手法の構築

Establishment of Method for Analyzing Radiation Noise in Intake System

伊藤 秀昭*
Hideaki ITOH
井出 史彦*
Fumihiko IDE

前田 元孝*
Mototaka MAEDA
上田 至朗**
Jiro UEDA

要 旨

エアクリーナの放射音は、内部音圧による音響加振と構造共振特性によって決定されるが、音響、構造連成解析により放射音を予測し、最も軽量な構造に最適化する計算手法を開発した。本手法を新規エアクリーナの開発に適用したところ、放射音予測精度は300Hz以下で充分あることが検証され、12%の軽量化が実現でき、本手法の有効性が証明できた。

ABSTRACT

Radiation noise in an air cleaner is determined by acoustic excitation due to internal pressure and also by the structural resonance characteristics. A calculation method was developed for predicting radiation noise by acoustic and structural coupling calculation analysis, and also for designing the structure of the air cleaner to be as light as possible. This method was applied to the development of a new air cleaner. As a result, it was verified that the prediction accuracy of the radiation noise was within 300 Hz, which was adequate, and also it was possible to reduce the weight of the air cleaner by 12%, thus proving the effectiveness of this method.

1. まえがき

車両の軽量化要求の高まる中でエンジン吸気系の軽量化要求も高まっている。エンジン吸気系の中では特にエアクリーナは、容積、質量が大きいため、軽量化が必要な部品である。一方、車両のNV商品性向上の要求も高く、エアクリーナは放射音を抑制できる構造を満たす必要性も高まっている。従来、エアクリーナの放射音を低減するために、板厚増や補強リブなどを設定しエアクリーナ表面の剛性を確保する手法が一般的におこなわれており、質量が増加する傾向にある。よって、吸気システムにおいても軽量化と放射音低減は相反する要素となっている。

そこで、吸気システムの中でもエアクリーナに対して、その内部音響特性と構造特性を用いて音響構造連成解析によりエアクリーナからの放射音を予測できるシミュレーション手法を開発した。加えて予め設定した目標とする放射音に対して、最も軽量な構造に最適化する手法を構築したので報告する。

2. 放射音特性の要因

エアクリーナの放射音は、一般的にエンジンの吸気管内に発生する吸気脈動による圧力変動が吸気管内を伝播し、エアクリーナ内部で音響入力として発生する。放射音特性に影響するエアクリーナの特性を解析するため、単体音響加振試験に置換し、振動特性と放射音特性の相関を明確にした。

2.1. 単体音響加振試験への置換

エアクリーナにおける放射音の特性要因を特定するため、まず完成車試験よりもより単純かつ他の騒音源からの影響が小さい単体音響加振試験に置換し、完成車試験との相関を検証した。

完成車試験におけるエンジンファイアリング時のエアクリーナ放射音の音圧レベルと単体音響加振試験におけるエアクリーナ近傍音の比較を Fig. 1 に示す。その結果、完成車試験における放射音と単体音響加振試験における放射音

* 栃木研究所

** 日本CDH株式会社

の周波数特性はほぼ一致しており、単体音響加振試験により完成車のエアクリナ放射音特性を評価できることが確認できた。

2.2. エアクリナ表面振動と放射音の相関

エアクリナ表面振動と放射音の特性の関係を明らかにするため、単体試験により比較をおこなった。エアクリナ表面の振動特性は、振動加振による手法(イナータンス)と音響加振による手法(音響イナータンス)により評価した。

2.2.1. 振動加振による振動と放射音特性

振動加振によるイナータンスと放射音の周波数特性を比較すると、イナータンスの共振ピークと放射音ピークは近い周波数であるものの必ずしも一致せず、イナータンスは放射音の特性を表しているとはいえない(Fig. 2)。すなわちエアクリナへの振動入力による表面振動との関係は低いことがわかる。

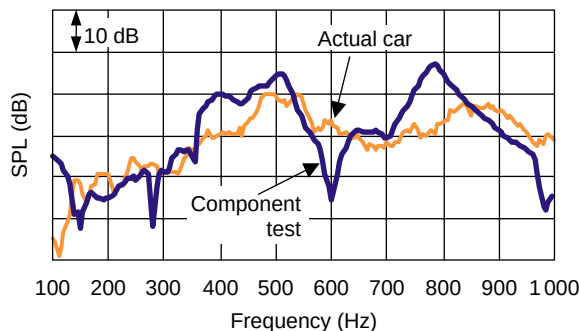


Fig. 1 Comparison of results between specification test and acoustic excitation test

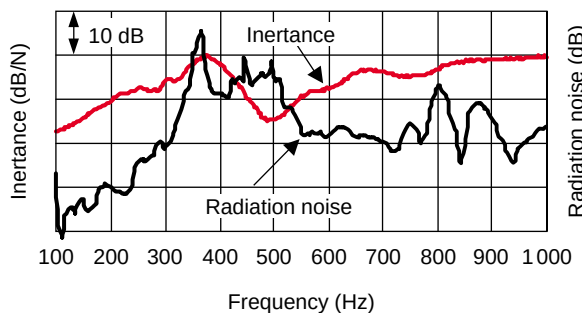


Fig. 2 Comparison of inertance and radiation noise

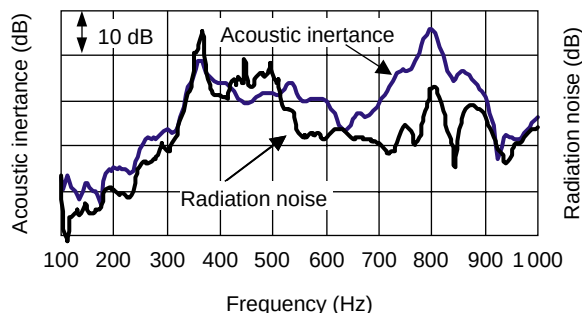


Fig. 3 Comparison of acoustic inertance and radiation noise

2.2.2. 音響加振による表面振動(音響イナータンス)と放射音特性

音響加振による振動(音響イナータンス)と、放射音の特性を比較した結果をFig. 3に示す。この結果より二つのデータのピーク周波数が一致しており、音響加振による振動と放射音の周波数特性の相関が高く、エアクリナの放射音解析は、内部音響入力と振動応答の連成解析が必要と考えられる。

2.3. エアクリナ放射音発生事例

エアクリナ放射音の発生事例を Fig. 4-7 に示す。この事例では、エンジンファイアリング時のエアクリナ放射音は Fig. 4 に示すように 300 - 400Hz, 500Hz 以上が主要

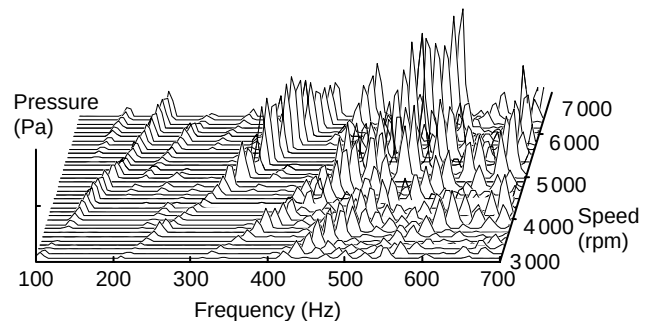


Fig. 4 Radiation noise spectrum

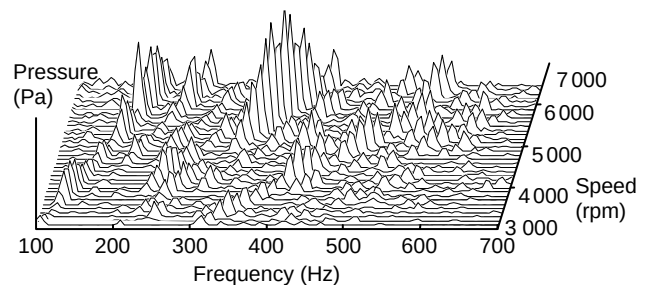


Fig. 5 Cabin noise spectrum including radiation noise

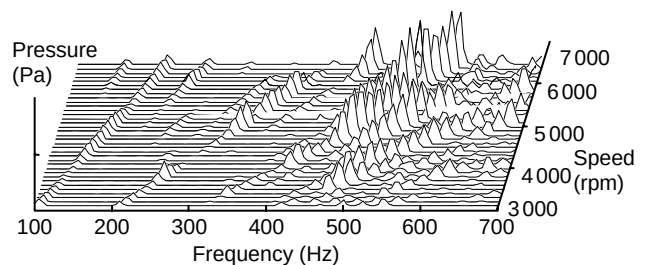


Fig. 6 Spectrum of reduced radiation noise spectrum

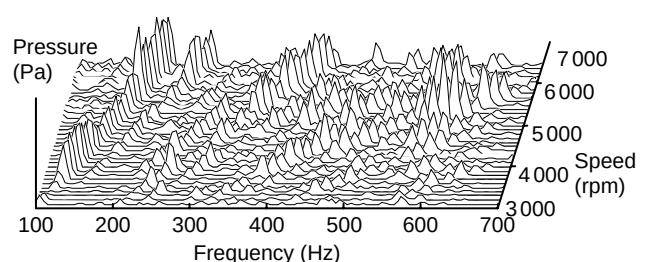


Fig. 7 Cabin noise spectrum including reduced radiation noise

成分となっている。このとき、車両室内では Fig. 5 のような騒音が発生している。エアクリーナの放射音を分離するためにエンジンルーム内のエアクリーナを遮音材で覆い、十分に放射音を低減すると Fig. 6 のように放射音スペクトルが変化し、車両室内における騒音は 300 - 400Hz の成分が Fig. 7 のとおり大幅に低減する。このことから、本事例におけるエアクリーナの放射音の車両室内騒音に対する影響は 300 - 400Hz であることが確認された。

よって、本報告では 400Hz 以下に着目し、放射音の解析をおこなうこととした。

3. 解析手法の構築

吸気管内の音響特性とエアクリーナの振動特性の音響、構造の連成解析を以下に示す手順でおこない、エアクリーナの放射音を算出した。

3.1. 吸気管内音響特性

Fig. 8 のようにエンジン側の加振点から吸入口までの吸気系全体の音響モデルをソリッド要素にてモデル化する。音響入力相当の加速度を与える加振パネルは、Fig. 9に示すようにエンジン側に接続される吸気系のスロットル部断面にシェル要素にて作成する。加振パネルは管路系と平行に移動するように定義し、他の方向の自由度を拘束する。

この加振パネルに音響入力 P_{in} を与え、吸気管路伝達関数 $H_{ac(n)}$ より、エアクリーナの壁面にかかる音圧に相当する力 $P_{(n)}$ は次の式で表される。

$$P_{(n)} = H_{ac(n)} P_{in} \quad (1)$$

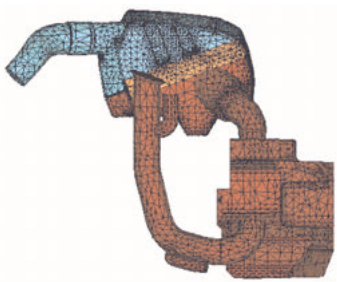
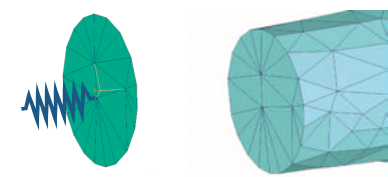


Fig. 8 Acoustic model



(A) Excited panel (B) Acoustic model

Fig. 9 Model of excited panel and acoustic model

3.2. エアクリーナ振動特性

エアクリーナの構造モデルを有限要素シェルモデルにて作成する。計算精度を高めるため、エアクリーナモデルは、ケース、カバーの外壁構造以外に、シールラバー、フィルター、カバー締め付け部の全ての部品に対し詳細にシェルモデル化する。

3.3. 音響、構造境界モデルの作成

音響、構造境界モデルを作成するためには、二つのモデルの境界部分の要素が 1 対 1 で一致する必要がある。しかし、一般的に構造モデルは音響モデルに対し、メッシュが非常に細かく、境界部の要素は一致しない。したがって、式(2)に定義される音響モデルと構造側振動モデルの接している部分の近似補完をおこなうマトリクス(連成マトリクス)が多く用いられている。本報告においてもこの連成マトリクスを用い、音響、構造境界モデルを作成した。すなわち Fig. 10 に示すように、この連成マトリクス $M_{(m,n)}$ と $P_{(n)}$ により構造モデルの各要素に作用する力 $V_{(m,n)}$ は次の式で表される。

$$V_{(m,n)} = M_{(m,n)} P_{(n)} \quad (2)$$

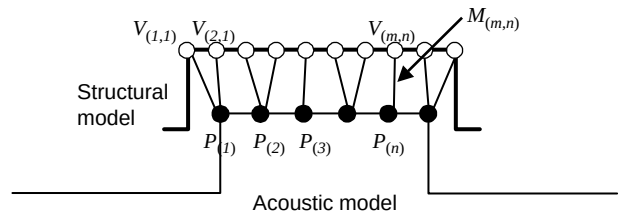


Fig. 10 Coupling matrix

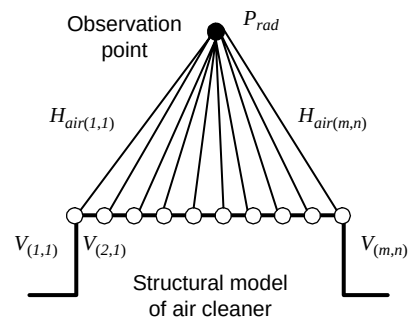


Fig. 11 Acoustic transfer function

Observation point ●

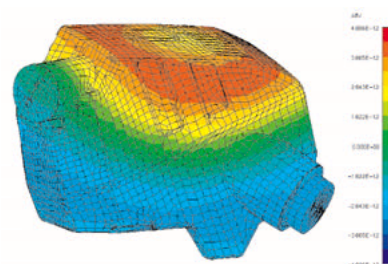


Fig. 12 Example of calculation of acoustic transfer function

3.4. 音響伝達関数計算

Fig. 11のように観測点におけるエアクリーナ表面から放射される放射音 P_{rad} をもとめるために、構造モデル表面の各要素から観測点までの音響伝達関数 $H_{air(m,n)}$ を計算する。

実際のエアクリーナの計算結果として、Fig. 12に音響伝達関数の結果を示す。寄与の高い部分を赤色で示しており、この例では上面から側面部の寄与が高いことがわかった。

3.5. 放射音計算

前述の吸気管路伝達関数 H_{ac} 、連成マトリクス $M_{(m,n)}$ 、音響伝達関数 $H_{air(m,n)}$ により、観測点における放射音が式(3)でもとめられる。

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \sum H_{air(m,n)} V_{(m,n)} \\ &= \sum [H_{air(m,n)} M_{(m,n)} H_{ac(n)} P_{in}] \end{aligned} \quad (3)$$

4. 最適化計算

前項よりエアクリーナの放射音は、吸気系の管路内の音響伝達関数とエアクリーナの構造特性により決まることがわかった。したがって、目標放射音の達成とエアクリーナの軽量化を実現できるエアクリーナの最適化は吸気系の音響特性改善と構造特性改善の二つの手法が考えられる。その中でも本報告では現状の吸気系の音響特性に対し構造特性を最適化し放射音の低減と軽量化を図ることとした。

本手法は、音響共鳴との連成を避け振動固有値をチューニングすることで、放射音の低減が可能な最適構造が存在すると仮定し、放射音を目的関数とした最適化計算と軽量化を目的関数とした最適化計算をおこなう。

最適化計算の変数にはエアクリーナの外壁および補強部材の板厚を用い、第一段階ではエアクリーナの質量を数%の範囲で拘束し対象周波数範囲における放射音の目標音圧を達成する構造を求める。次に第二段階では、放射音レベルを拘束し、最も軽量化を求める。最適化アルゴリズムはβメソッドを用い、対象周波数範囲における音圧ピークレベルを低減する手法とした。

パラメータに用いる板厚は、外壁および補強(リブ)部分を数セクションに分割して作成した。一例を Fig. 13 に示

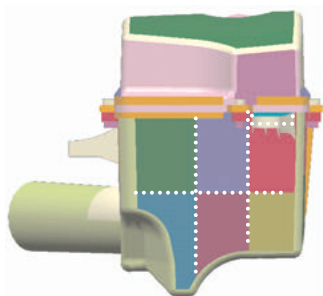


Fig. 13 Example of divided sections

す。このセクションは、前項の Fig. 11 に示した音響伝達関数および、構造モデルの振動モードを参考に分割する。

5. 適用結果

本解析手法と最適化計算を適用し新規吸気系の開発におけるエアクリーナの放射音低減と軽量化を検討した事例を紹介する。

5.6. 放射音レベル計算精度の検証

Fig. 14に示すように放射音計算結果と音響加振実験による実験結果を比較すると、300Hz 以下では、特性を良く再現できており本解析手法により放射音計算予測が可能であることが確認できた。

5.7. 最適化計算の適用

エアクリーナの振動モードを基に、構造モデルを数セクションに分割し、放射音性能を達成する最も軽量化構造に最適化した。

第一段階は Fig. 15 に示すように初期の応答レベルに関して、放射音の目標値を目的関数に設定し、各セクションの板厚を最適化し目標値を達成する構造を求める。この例では9回目の計算により、放射音目標の達成が可能となった。第一段階で最適化で得られた構造を第二段階の初期構造と

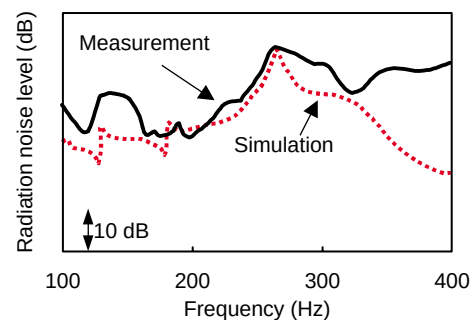


Fig. 14 Correlation of experimental and simulation results

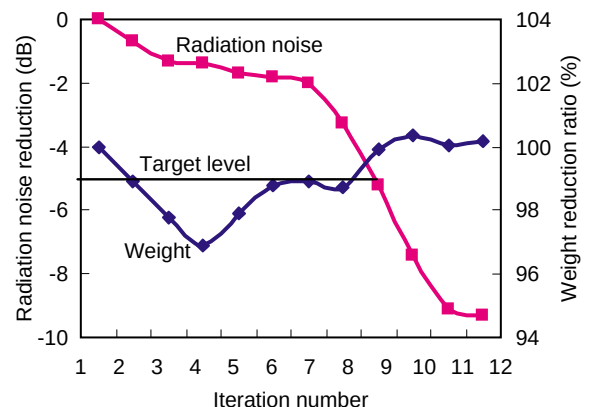


Fig. 15 First step of optimization

参考文献

- (1) 尼子龍幸: FOAにおける応答曲面法による寸法最適化, 豊田中央研究所 R&D レビュー Vol.37, No.1, p.31-36 (2002)
- (2) 田口, 実験計画法, 第3版, 上下, 丸善(1976)
- (3) M.Alex: Air Intake Development-Effects of Coupled Fluid/Structure Modes, SAE paper n. 20011919
- (4) Mladen Chargin: β 法定式化による周波数応答の最適化について, CDH 社ホームページ www.cdh.co.jp/technical/beta.pdf

し、放射音のレベルを拘束し、Fig. 16のようにより軽量となる構造を決定した。この適用例では、約85%の質量に収束した。

5.8. 最適化結果の検証

前項の最適化をおこない、その他搭載用のブラケット等を追加し試作品を作成し、エアクリーナ質量および放射音レベルを検証した。その結果、Fig. 17のように完成車における放射音を8dB低減し、かつ12%の軽量化を達成した。

6. まとめ

エアクリーナの内部音響特性とその構造特性から放射音を音響構造連成解析により予測し、構造を最適化する手法を構築し、以下の結果を得た。

- (1) 本計算手法により、300Hz 以下において、放射音計算予測を可能とした。
- (2) 本手法は、目標放射音の達成と軽量化との両立に効果的な方法であることが確認された。

なお、本手法を新規エアクリーナの開発に適用し、放射音の目標を達成し、12%の軽量化を図ることができた。

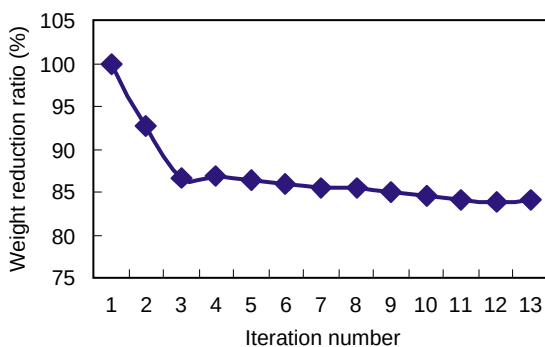


Fig. 16 Second step of optimization

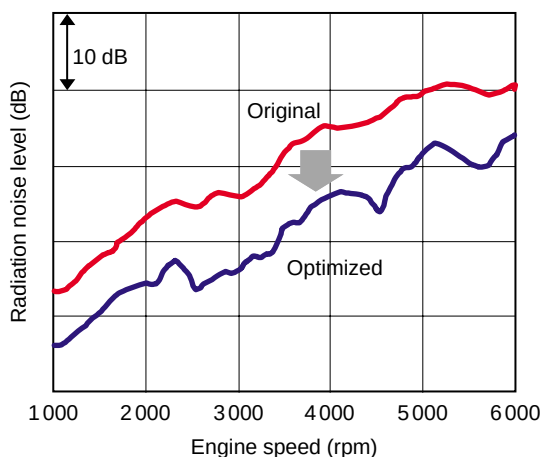
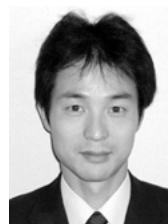


Fig. 17 Radiation noise reduction effect in the vicinity of actual car

■ 著 者 ■



伊藤秀昭



前田元孝



井出史彦



上田至朗