

## 音響場と構造場とが強連成する自動車車室内ロード ノイズのアクティブ構造騒音制御

高松, 吉郎

<https://doi.org/10.15017/1807126>

---

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名 : 高松 吉郎

論 文 名 : 音響場と構造場とが強連成する自動車車室内ロードノイズのアクティブ構造騒音制御

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

路面とタイヤとの間の振動が車体を伝搬し、車室内に生成される「ロードノイズ」の低減は、自動車車室内静粛化に関する長年の研究テーマである。ロードノイズは、車室内音響場と車体構造場とが強連成した場を形成する騒音で、多数のモードをもつ複雑な周波数特性を構成する。また、広い周波数帯域を持つ非定常な非周期音である。既存の量産車では制振材・吸音材を車体に貼り付けることによりその低減を図っているが、車両質量が増加するため燃費や運動性能との妥協が必要となる。

他方、ロードノイズのアクティブ制御も研究されてきている。一般に、騒音のアクティブ制御にはANC法、AVC法、ASAC法というアプローチがある。本論文では、ASAC（アクティブ構造騒音制御；Active Structural Acoustic Control）法により制御する手法を提案する。音響/構造場が強連成している場合、音響場と構造場の両方に起因する騒音エネルギーを低減するためには、ASAC法による騒音低減が有効であるからである。車体に取り付けた複数の加速度センサによりロードノイズの原因となる振動成分を計測し、 piezoアクチュエータにより車体の構造場に制御力を加える構成とする。マイクで計測された車室内音圧は制御には用いない。車室内音圧をフィードバックする構造では、アクチュエータと音圧との間の伝達関数に時間遅れが存在するために、十分な制御周波数帯域を確保できない可能性が高い。

そこで、車体に取り付けたセンサで計測した振動をもとにロードノイズを推定し、推定ロードノイズを低減する補償器を設計する方針とする。ロードノイズ源となる振動成分を、センサにより十分リッチに計測するために、適切な加速度センサの数と位置を提案する。複数のセンサで得られた振動が原因となるロードノイズをすべて低減できた場合の理想的な制御効果を指標として、加速度センサの数と位置を最適化する。理想的な制御効果は、加速度と車室内音圧との間のマルチプルコヒーレンスに基づき計算する。

加速度の組と車室内音圧とをもとにロードノイズ推定伝達関数モデルを同定する。しかし、車室内音圧との間のコヒーレンスを高めるために複数の加速度信号の組を選択したために、複数のセンサで同じ振動成分の信号を重複して計測してしまう可能性が高い（多重共線性と呼ばれる）。さらに、車体の音響/構造場の場合、周波数毎に相関関係が異なる。そこで、本論文では加速度信号の組を周波数領域において主成分分析し、主成分のみを用いた伝達関数モデルを同定することで、過同定でない車室内ロードノイズ推定モデルを導出する。

車室内ロードノイズを独立に制御でき、かつアクチュエータとセンサ間に存在する閉ループ系の安定余裕を確保しやすいアクチュエータ数・配置を提案する。制御効果や安定余裕を計算するためには、アクチュエータ数・配置と補償器を設計する必要があるが、これらすべてを同時に数理的に最適設計することは不可能である。そこで、補償器を併合した閉ループシステムの応答の上界を、閉ループ制御対象の周波数伝達関数のみを用いて見積もることで、補償器を設計することなくアクチュエータ数・配置を決定する方法を提案する。アクチュエータ入力信号から車室内音圧までの周波数伝達関数をもとにアクチュエータが発生可能な音圧を概算し、アクチュエータの可制御性を確認する。さらに、補償器の周波数特性の上界をフィードフォワード補償器として近似的に求めることで、閉ループにおける小ゲイン定理の成立性を調べることで、安定余裕を見積もる。

ロードノイズ低減のための補償器は加速度信号からロードノイズまでの伝達関数のエネルギーを低減すればよいため、H2 制御問題に帰着する。ロードノイズの周波数帯域においてより制御効果が高く、かつ帯域外では騒音を増幅することがないように重み関数を設計し、一般化プラントを構成する。

車両を用いた台上実験および走行実験により計測したセンサデータをもとに、計算機シミュレーションを行うことで、提案手法の有効性を検証した。半無響室内に実験車両を設置し、加振器により擬似的なロードノイズ源振動を車体に入力した。センサ・アクチュエータを配置した後、制御対象伝達関数モデルを同定し、補償器を設計した。計算機シミュレーションにより 9.2dBA のロードノイズ低減効果を得た。

走行実験用にロードノイズ源振動をリッチに観測できるセンサ配置、およびロードノイズを安定に制御可能なアクチュエータ配置を求めた。加速度信号および車室内音圧信号から推定モデルを同定し、十分な推定精度のモデルを同定できた。設計した補償器を接続した計算機シミュレーションにより、3.2dBA のロードノイズ低減効果を得た。以上のシミュレーションにより提案手法の有効性を確認した。

台上実験および走行実験においてデジタルコントローラを接続し、ロードノイズ低減実験を実施した。その結果、車室内 1 席の左右耳元位置において、台上実験では 6.5 dBA のロードノイズ模擬音の低減効果を、走行実験では 2.0 dBA のロードノイズ低減制御効果を、それぞれ得た。