

令和元年6月11日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03939

研究課題名(和文) 振動騒音の時刻歴応答ピーク低減のための構造変更感度解析

研究課題名(英文) Sensitivity Analysis for Structural Modification for Reduction of a Sound or Vibration Peak in Time History Data

研究代表者

吉村 卓也 (Yoshimura, Takuya)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：50220736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,000,000円

研究成果の概要(和文)：機械構造物の振動騒音評価においては、その平均的なレベルではなくショック入力等に対する時刻歴応答においてそのピーク値の低減が求められることも多い。申請者は従来周波数領域の応答に対して用いられていた感度解析を時刻歴応答に拡張し、時刻歴のピークを低減させるための感度解析法を提案した。入力は再現性があれば良く、その特性は未知のものでも良い。本研究においては提案法の有効性を確認し、質量付加だけでなく剛性付加や減衰付加にも適用範囲を拡大した。また放射音低減のためにパネルの曲げ振動を対象とした適用法を検討し、計測においてはひずみ応答を活用する方法を提案した。さらに感度解析と寄与解析の関連性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の構造解析法においては過渡現象対策のための有効な手法が無い。時刻歴応答のピークを効果的に低減させることは産業機械などの疲労耐久性に密接に関わることからこれを有効に低減できることは社会的意義が大きい。提案法では例えば、質量増加をなるべく抑えながら効果的な剛性補強を行うことによりピークを低減させたり、逆に質量を部分的に削減することによりピーク低減を実現する可能性を探ることも可能である。

研究成果の概要(英文)：In the evaluation of noise and vibration for mechanical structures, the peak value of the time response due to the input such as the shock is sometimes important. The applicant expanded sensitivity analysis to the time domain that had ever been applied in the frequency domain, and presented the sensitivity analysis for the time domain data to reduce the peak in the transient response. The repeatability of the input is required, and the input property such as frequency component can be unknown. In this research the validity of the presented approach is confirmed, and the sensitivity is expanded to the stiffness or the damping as well as the mass addition. The application to the bending vibration of the panel structure is examined and the sensitivity with the strain measurement is presented. It is also investigated that the relation between the sensitivity and the contribution

研究分野：振動工学

キーワード：振動騒音低減 時刻歴応答 感度解析 構造変更 モード解析

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 社会的背景

快適性重視の観点から振動騒音の低減に対する要求はさらに厳しくなりつつある。また製品開発の期間短縮も進んでおり、短い時間で高性能な構造を実現することが求められている。要求される振動騒音性能を実現するために、振動騒音の要因分析技術ならびに対策立案のための合理的な検討方法が求められている。

### (2) 技術的背景

振動騒音予測のためには有限要素法を中心とした CAE 解析があり、コンピュータ処理能力の向上により CAE 解析に基づいた構造最適化の検討なども進んでいる。ただし CAE の予測精度には限界があり、実測に基づいた振動騒音対策も必要とされている。

### (3) 先行研究の状況

申請者は上記のような背景の元で、機械の稼働状態における振動騒音を直接低減させるための感度解析技術を開発した。この方法は振動源（入力）を未知としたまま、振動騒音低減のための構造対策検討（感度解析）が可能であり、入力信号に定常性があれば適用可能であった。これについては質量付加の有効性について十分な効果を確認できていた。

## 2. 研究の目的

(1) 機械構造物の振動騒音評価においては、その平均的なレベルではなくショック入力等に対する時刻歴応答においてそのピーク値の低減が求められることも多い。現在の構造解析法においては過渡現象対策のための有効な手法が無い。そこで申請者は従来周波数領域の応答に対して用いられていた感度解析を時刻歴応答に拡張し、時刻歴のピークを低減させるための感度解析法を提案した。提案法では例えば、質量増加をなるべく抑えながら効果的な剛性補強を行うことによりピークを低減させることが可能になる。

(2) 図 1 に提案する時刻歴感度解析の概念図を示す。ここでは入力点を  $a$ 、出力評価点を  $b$ 、構造変更箇所を点  $i$  とし、質量付加による時刻歴波形のピーク低減を想定している。事前計測としては、点  $b$  を加振した時の質量付加候補点間の FRF

$G_{bi}(\omega)$  ( $i=1, \dots, n$ ) を計測しておく。

入出力点間の FRF の質量付加感度は、次式に

$$\frac{\partial G_{ba}(\omega)}{\partial m_i} = \omega^2 G_{bi}(\omega) G_{ia}(\omega) \quad (1)$$

ここで、点  $a$  を加振したときの点  $b$  のインパルス応答を  $H_{ba}(t)$  とすれば、

$$H_{ba}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{ba}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

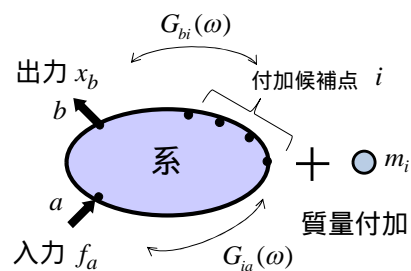


図 1. 提案する時刻歴感度解析の概念図

式(2)を点  $i$  への付加質量  $m_i$  で微分すると,

$$\frac{\partial H_{ba}(t)}{\partial m_i} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial G_{ba}(\omega)}{\partial m_i} e^{j\omega t} d\omega \quad (3)$$

これより, 式(1)で表される質量付加感度を逆フーリエ変換すると, 時刻歴応答の感度を得ることができる.

### 3. 研究の方法

(1) 時刻歴感度解析の妥当性の検討 実構造物の衝撃入力に対する時刻歴応答の最大値に着目し提案法を適用することにより, 最大応答の低減に有用であることを確認する. 建設機械(以下建機)を取り上げパワーショベルに作用する衝撃荷重に対するボディパネルの振動応答のピーク低減を試みる. 建機の稼働時に発生する入力を模擬するために, 大型インパクトハンマーを用いてバケットに衝撃荷重を与える. これにより発生する建機のサイドパネル上の衝撃応答加速度に着目し, そのピークを低減させるために感度解析を用いて質量付加点を検討する.

(2) ひずみ計測による曲げ剛性感度解析の検討 パネルの曲げ振動を対象として面積  $A$  の領域に厚さ  $t$  のパネルを付加するとき, 評価点 FRF  $G_{if}$  の感度として式(4)の関係を導出した.

$$S_t = \frac{\partial G_{if}}{\partial t} = -AE\varepsilon_{ri}\varepsilon_{if} \quad (4)$$

ここで,  $E$  は付加パネルのヤング率,  $\varepsilon_{if}$  は点  $f$  を加振したときの点  $i$  のひずみ応答を表す FRF である.

(3) 振動メカニズム理解のための感度解析の検討 相互平均コンプライアンスは応答に対する各部位の寄与を評価する方法として有用であり, 評価点応答に対する質量寄与や剛性寄与を評価することができる. 一方, これらは質量付加感度や剛性付加感度と比例関係にあることが知られており, 応答に対する寄与の大きな部位は構造変更感度も大きくなるのが分かる. そこで, 構造音響連成モデルを用いて, 数値解析によって得られる相互平均コンプライアンスから算出した感度と, 実構造物を用いて従来の感度解析手法を適用して算出した感度を比較する.

### 4. 研究成果

(1) 時刻歴感度解析の妥当性 パネル上に加速度計を 17 点設置し(図 2 参照), 面外方向( $y$  方向)の加速度を測定し, これらを質量付加候補点とした. パネル支持部の耐久性向上の観点から, 代表点として節点 10 番の加速度応答のピーク低減を目標とし感度解析を行なった.

図 3 に示すピーク感度を見ると点 5 ではマイナス点 6 ではプラスの感度を示している. 実際にこれらの点に質量を付加して付加前後の応答を比較したのが図 4 である. 点 5(a)ではピークが約 15%低減, 点 6(b)では同時刻では変化がほとんど見られないが, ピークがわずかに右に移動しながら約 24%増大しており, いずれも感度の傾向通りにピークが変化し

ていることが確認できた。

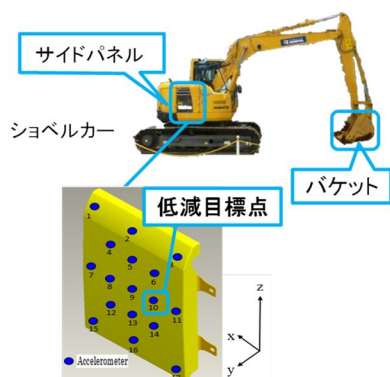


図 2 . パワーショベルと構造パネル

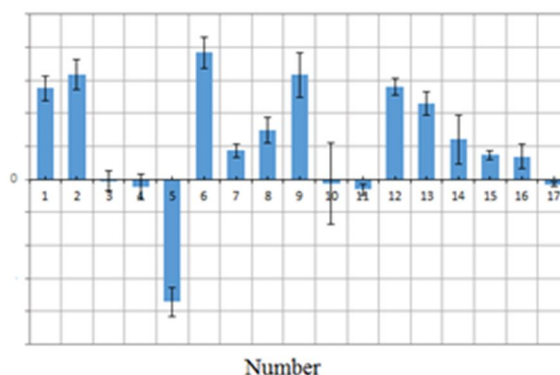
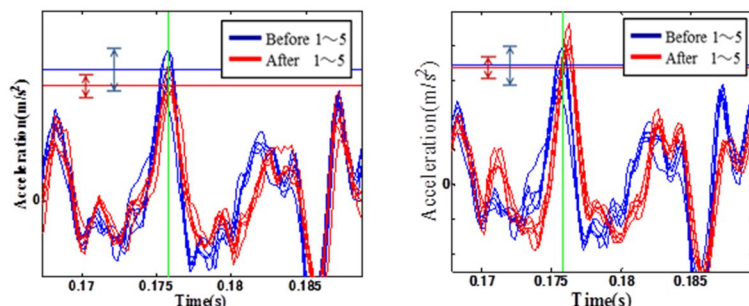


図 3 . 衝撃入力に対する評価点のピーク感度



(a) 点 5 に質量付加

(b) 点 6 に質量付加

図 4 . 質量付加前後の衝撃応答比較

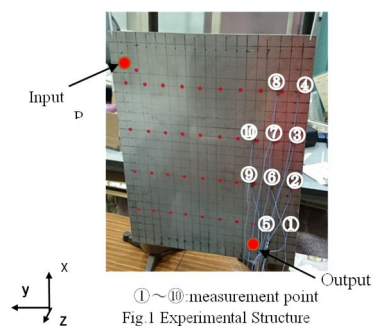


図 5 . 対象とする平板構造物

(2) ひずみ計測による曲げ剛性感度解析

図 5,に対象とする平板構造物を示し,入出力点を赤丸で示している.板が xy 平面上にあり, y 軸回りの曲げ剛性を評価する.このため x 軸に沿ってひずみセンサを ~ に貼りつけ,曲げ振動モードの応答低減のための感度解析を実施した.この結果が図 6 に示されている.1,2,6,7,9,10 という曲げモードの腹の部分に大きな負の感度が表れており,振動低減に有用な板厚の付加箇所が示されていることが確認できた.パネルの剛性付加に関しては曲げだけでなく,せん断,ねじり,面内等の複数の変形を考慮する必要があり,そのための検討も行っている.

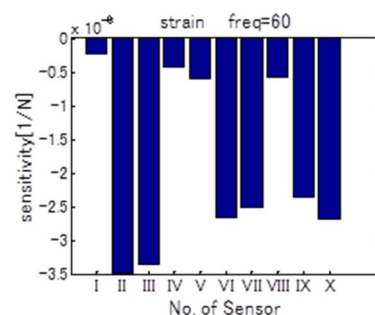


図 6 . 曲げ剛性感度解析

(3) 振動メカニズム理解のための感度解析

図 7 に示すような音響箱を対象として,数値モデルの相互平均コンプライアンスと実験モデルの剛性付加感度を比較した.図 7 の入力点は底面,評価点は内部音響空間の音圧とした.音響箱は底面,上面,背面の 3 面が弾性

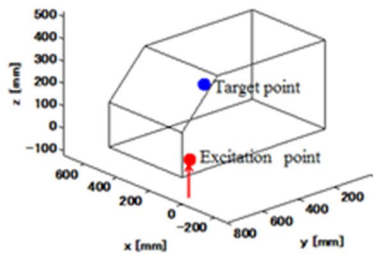
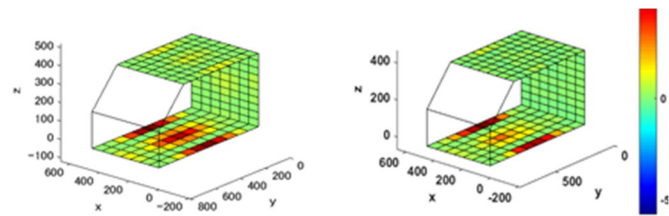


図 7. 対象とする音響箱



(a) 相互平均 compliance (b) 剛性付加感度  
図 8. 評価点に対する寄与の比較

パネルできており、これらのパネルの評価点に対する寄与を比較した。底面パネルが曲げ振動する周波数で比較したところ、図 8(a)の剛性の相互平均コンプライアンス、図 8(b)の剛性付加感度のいずれも同じ傾向が示されており、感度が評価点に対する寄与と密接に関連していることが確認できた。このことから、数値モデルのモデル精度を検証する目的で数値モデルと実験モデルの感度を比較検証することができることが分かった。例えば、数値モデルと実験モデルの応答特性が合わない時、乖離要因を特定するために両者の感度を比較することが有効であり、これを自動車のカットボディに適用しその乖離要因特定を行うことができた。乖離要因特定については、着目したコンポーネント単体の動特性をアセンブリのままの状態の評価する方法についても検討した。

(4) その他 上記の研究推進を中心としながら、減衰付加の感度解析についても検討し、減衰材の配置検討のための感度解析の可能性を調査した。また、時刻歴応答に関しては、ピーク低減だけでなくピーク時刻を大きく移動させる方法についても検討し、異なる 2 つの時刻において感度解析を実施することにより、ピーク移動が可能であることが分かった。

<引用文献> 5. [雑誌論文] , , 等

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

吉村卓也, 音響工学 (VI) - 振動特性の改善とその応用 , 査読有 , 57-4, 2018, 475-479  
DOI: <https://doi.org/10.11370/isj.57.475>

Jia Jun HONG, Takuya YOSHIMURA, Structural Modification for Stiffness Sensitivity Analysis with The Use of Strain Measurement, 査読無 , Proc. of 25<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration 2018, 1-8, DOI:無し

Takuya YOSHIMURA, Experimental Approaches for Solving Noise and Vibration Problems, Proc. of the 17<sup>th</sup> Asian Pacific Vibration Conference in Nanjing, 2017, DOI:無し

JiaJun HONG, Takuya YOSHIMURA, A Stiffness Sensitivity Analysis with Strain Measurement to Decrease the Out-of-plane Vibration, 査読無 , Proc. of the 17<sup>th</sup> Asian

Pacific Vibration Conference in Nanjing, 2017, 2017, DOI:無し .

Toshihiko UENO, Takuya YOSHIMURA and Makoto TAKESHITA, Noise and Vibration Effects of Soundproof Material for Simplified Car-like Structure, 査読無し, Proc. of the 17<sup>th</sup> Asian Pacific Vibration Conference in Nanjing, 2017, 2017, DOI:無し .

石鍋善郎, 吉村卓也, 他 3 名, 感度解析を用いた振動騒音解析モデルの精度不足部位の検討方法, 査読無し, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演論文集, 2016. DOI:無し.

迎恵利, 吉村卓也, 他 3 名, 過渡応答のピーク低減のための構造変更感度解析, 査読無し, 日本機械学会, 機械力学・計測制御講演論文集, No.15-7, 2015, 1-6, DOI:無し .

山田健悟, 吉村卓也, 諸見修一, 振動騒音低減のための歪計測を用いた剛性付加感度解析, 査読無し, 日本機械学会 機械力学・計測制御講演論文集, No.15-7, 2015, 1-9, DOI:無し

[学会発表] (7 件)

JiaJun HONG, Structural Modification by Stiffness Sensitivity Analysis with The Use of Strain Measurement, 25<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration 2018, 2018.

Takuya YOSHIMURA, Experimental Approaches for Solving Noise and Vibration Problems, the 17<sup>th</sup> Asian Pacific Vibration Conference in Nanjing, 2017.

JiaJun HONG, A Stiffness Sensitivity Analysis with Strain Measurement to Decrease the Out-of-plane Vibration, the 17<sup>th</sup> Asian Pacific Vibration Conference in Nanjing, 2017, 2017.

Toshihiko UENO, Noise and Vibration Effects of Soundproof Material for Simplified Car-like Structure, the 17<sup>th</sup> Asian Pacific Vibration Conference in Nanjing, 2017, 2017

山田健悟, ひずみ計測を用いた剛性付加感度解析による振動騒音低減, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2016.

石鍋善郎, 感度解析を用いた振動騒音解析モデルの精度不足部位の検討方法, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2016.

吉村卓也, 過渡応答のピーク低減のための構造変更感度解析, 過渡応答のピーク低減のための構造変更感度解析, 日本機械学会, 機械力学・計測制御講演会, No.15-7, 2015.

[図書] 無し

[産業財産権] 無し

[その他] 本研究に関連した共同研究 (3 件)

## 6 . 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名 : 古屋 耕平

ローマ字氏名 : (FURUYA, kohei)