

## 軌道パッドの低ばね化による桁式高架橋の 構造物音低減効果に関する検討

渡辺 勉\* 宇田 東樹 川口 二俊 阿久津 真理子 池田 学 (鉄道総研)  
清野 多美子 (アドバンスソフト)

Structure-borne Sound Reduction Effect of Concrete Girder Bridge by Reducing Springs Constant of Rail Pad  
Tsutomu Watanabe\*, Toki Uda, Tsugutoshi Kawaguchi, Mariko Akutsu, Manabu Ikeda,  
(Railway Technical Research Institute)  
Tamiko Seino, (AdvanceSoft Corporation)

In this study, a new large-scale acoustic analysis model was developed for Shinkansen standard concrete girder bridges. The structure-borne sound reduction effect was verified when the nominal spring constant of the rail pad was reduced from 60 MN/m to 30 MN/m. As a result, it was clarified that under the conditions of this study, the structure-borne sound reduction effect by the reducing spring constant of the rail pad was obtained at frequencies higher than 60 Hz, and that the reduction effect was greatest at around 100 Hz.

キーワード：構造物音，軌道パッド，数値解析，桁式高架橋，高速鉄道  
(Structure-borne Sound, Rail Pad, Numerical Analysis, Girder Bridge, High-speed train)

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）高架橋の構造物音は、一般に数十 Hz～1kHz の周波数成分が卓越し、高速鉄道ではその中でも 200Hz より低い周波数帯が卓越すると言われている<sup>(1)</sup>。一方で、構造物音は空力音に比べると沿線騒音に占める割合は小さく<sup>(2)</sup>、かつ鋼製部材で構成される鋼鉄道橋の構造物音に比べて小さいため、これまで問題となることはほとんどなかったが、近年の列車速度の向上により、RC 高架橋の各部材の動的応答の増大に伴う構造物音の顕在化が懸念されるようになってきた。

現在、構造物音の予測手法として、実測データ等に基づき予測する手法や部分的な解析モデルを用いた予測手法が構築されている<sup>(3)</sup>。これらの手法は、最新の知見を踏まえてアップグレードがなされているものの、構造物音の加振源から沿線までの伝播経路に存在する車両、軌道、構造物、沿線空間等の各種パラメータの諸元を任意に設定できるのではなく、新形式の車両、軌道、構造物の評価、速度向上の影響評価や各種対策工の効果の検証等が容易ではないという課題があった。

そこで筆者らは、図 1 に示す有限要素法による振動解析と音響解析を組み合わせたシミュレーションモデルによる構造物音の予測手法の構築に取り組んでいる。これまでの

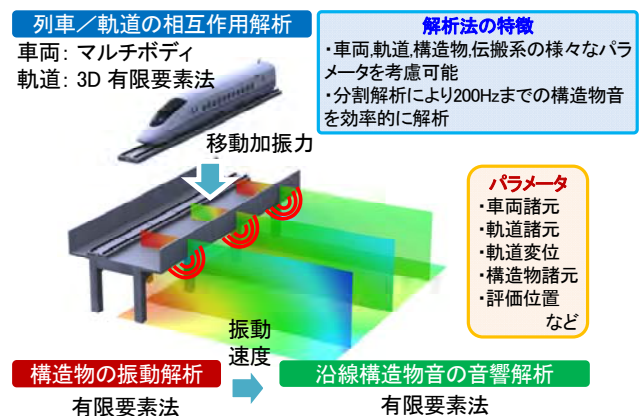


図 1 シミュレーションモデルの概要

研究では、構造物音の原因となる RC 高架橋やプレストレストコンクリート高架橋の 200Hz 程度までの振動を対象とした数値解析や現地測定試験により構造物音の発生メカニズムを明らかにする<sup>(4)</sup>とともに、新幹線標準 RC ラーメン高架橋を対象に中間スラブを補強した場合の沿線構造物音に及ぼす影響を評価した<sup>(5)</sup>。

本研究は、図 1 に示すシミュレーションモデルを用いて、新幹線標準 RC 桁式高架橋のモデルを新たに構築するとともに、軌道パッドのばね定数を 60MN/m から 30MN/m に低ばね化した場合における構造物音低減効果に関する検討を実施した結果を示すものである。

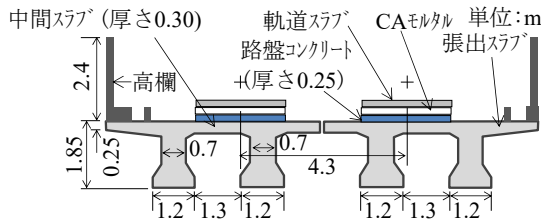


図 2 桁式高架橋の断面図 (スパン 20m)

表 1 各構造要素の材料定数

		材料定数
レール種別		60kg レール
軌道パッド公称ばね定数(MN/m)		60, 30
軌道スラブ	寸法(mm)	4930×2340×190
	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	31
CA モルタル	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	3500
	厚さ(mm)	25
高架橋 コンクリート	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	25
減衰定数(%) (全ての振動モードで一律の値)		2%

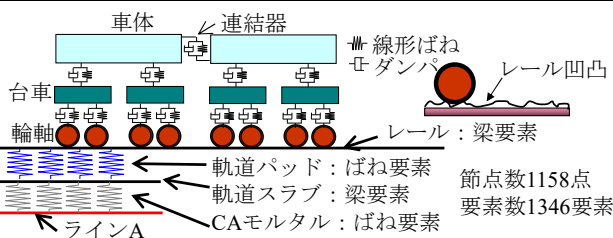


図 3 車両/軌道の動的相互作用解析モデルの概要

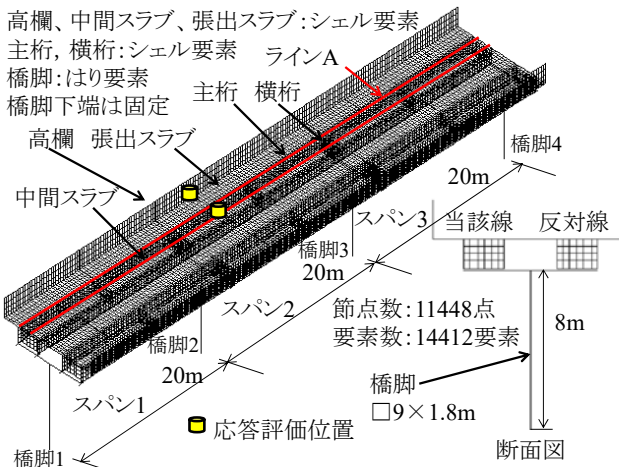


図 4 桁式高架橋の振動解析モデルの概要

## 2. 検討方法

**〈2・1〉 対象構造物** 図 2 に解析対象とした新幹線の標準 RC 桁式高架橋の断面図を、表 1 に各構造要素の材料定数を示す。桁式高架橋のスパンは 20m、主桁高さは 1.85m、防音壁高さは 2.4m、橋脚高さは 8m である。解析では、この桁を 3 連モデル化し、合計 60m を対象とした。軌道構造は一般的な普通スラブ軌道である。なお、後述する検討結果においては、軌道パッドのばね定数が 60MN/m と 30MN/m のケースの解析結果および実測結果を示すが、軌道パッドのばね定数が異なるのみで、高架橋や軌道の諸元はすべて同じである。

**〈2・2〉 構造物の振動解析の概要** 構造物の振動解析においては、車両、軌道、構造物からなる全体系を、車両/

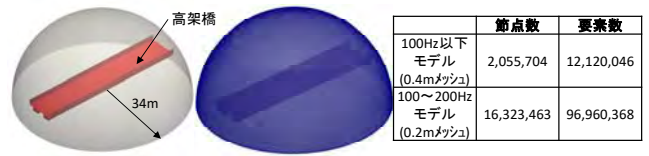


図 5 音響解析モデルの概要

表 2 音響解析における解析条件

	定数		境界条件
音速 $c$ (m/s)	340	ドーム部	無限境界
空気密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.225	地面	完全反射境界
解析周波数	410 ( $\Delta f = 0.49$ )	高架橋	面音源

軌道モデルと軌道/構造物モデルに分割することとした。このような手法によれば、個々のモデルの解析自由度を全体系で解析する場合に比べて大幅に削減することができ、効率的に解析を行うことが可能となる。車両/軌道モデル(図 3 参照)における数値解析は、鉄道総研開発の車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARSⅢを、軌道/構造物モデル(図 4 参照)には線路構造物の汎用構造解析プログラム DIARIST を用いて時刻歴応答解析を実施した。時間刻みは 0.5msec である。具体的には前者のモデルで構造物の加振力に相当する CA モルタルのばね反力を求め、それを後者のモデル(図 4 のライン A)に入力する。

DIASTARS の車両の力学モデルは、車体、台車及び輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパで結合した三次元モデルで、1 車両あたり 31 自由度である。列車は、車両の端部に設けたばねとダンパで連結して構成する。本研究では、車両長 25m、輪重 60kN 程度の一般的な新幹線車両 6 両(速度 270km/h)とした。車両とレール間の動的相互作用力は鉛直方向の接触力は Hertz の接触ばねで表現した。また、列車走行に伴う加振力を精緻に再現するため、レールを模擬した梁要素には、実際の高架橋上で長さ 1m の測定機を用いて測定したレール凹凸と 10m 分の軌道変位を与えた。

**〈2・3〉 音響解析の概要** 図 5 に音響解析モデルの概要、表 2 に解析条件を示す。音響解析には有限要素法の解析コード Advance/FrontNoise<sup>(6)(7)</sup>の周波数領域音響ソルバーを用いた。本ソルバーは有限要素法を用いており、境界要素法に比べ大規模問題に対し高速な処理が可能であるという利点がある。また、無限要素法を利用することで、解析領域を最小限にとどめ、解析コストの削減により外部問題も高速に解くことが可能である。基礎方程式は音響ポテンシャル  $\phi_v(x)$ 、角振動数  $\omega$ 、音速  $c$  において、速度場の影響はないものとして式(1)の Helmholtz 方程式に変換される。

$$\nabla^2 \phi_v(x) + k^2 \phi_v(x) = 0, \quad k = \frac{\omega}{c} \quad \dots\dots\dots (1)$$

境界条件は音響速度ポテンシャルの各周波数成分  $\phi(x)$  に対して混合境界条件として課し、加振点の速度  $v(x)$  は式(2)の Neumann 型の境界条件として与える。

$$\frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = v(x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

無限遠点の境界条件は放射源から十分に離れた場所  $r = R$  において式(3)として取り扱う。

$$\frac{\partial \phi(r)}{\partial n} = -ik\phi(r) \quad \text{at } r = R \rightarrow \infty \quad \dots\dots\dots(3)$$

音響解析の領域は桁式高架橋 60m を内包可能な大きさとし、地表面から半径 34m の半球ドーム型とした。また、メッシュサイズは 0.2m 程度とし (音速 340m/s, 対象周波数 200Hz, 1 波長の分解能 1/8), 節点数は 1632 万程度, 要素数は 9696 万程度になった。なお, 解析時間が膨大になることに配慮し, 100Hz 以下についてはメッシュサイズを 0.4m 程度としたモデルを使用した。このモデルでは節点数は 205 万程度, 要素数は 1212 万程度になった。さらに, 構造物(桁式高架橋)は音響解析の内部境界面として設定し, 振動解析により得られた構造物の加速度の周波数成分を音源として与えた。地面と半球面の境界条件は, それぞれは完全反射境界, 無限境界とした。基礎方程式および境界条件を有限要素法で離散化して, 解析領域内の音響速度ポテンシャルや音圧レベルを算出する。行列解法には GMRES 系の反復解法を使用した。

3. 検討結果

〈3・1〉 構造物の振動解析 図 6 に車両/軌道の動的相互作用解析モデル(図 3 参照)により求めた構造物への加振力の時刻歴波形と周波数特性を示す。図より, 1 軸毎に加振力が極大になること, 軌道パッドのばね定数が 60MN/m のケースでは最大値が 80kN 程度であるのに対し, 30MN/m のケースでは 60kN 程度となり, 75%程度に低減されることなどが分かる。また, 周波数特性を見ると, 列車速度 270km/h と車両長 25m から決まる加振周波数 3Hz の整数倍で応答のピークとなること, 概ね 60Hz 程度から高周波数側で軌道パッドのばね定数が 60MN/m のケースに比べて 30MN/m のケースの方が加振力が小さくなることなどが分かる。なお, 式(4)で算出される軌道の上下一次固有振動数は 60MN/m のケースで 126Hz, 30MN/m のケースで 90Hz である。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_p}{M_R + M_W}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで,  $f$  は固有振動数,  $K_p$  は軌道パッドのばね定数,  $M_R$  はレールの質量,  $M_W$  は輪軸の質量である。

図 7 に桁式高架橋の振動解析モデル(図 4 参照)で求めた桁式高架橋の振動モードの例を示す。また, 図 8 に図 4 に示す応答評価位置における鉛直加速度の周波数特性を示す。固有振動数の妥当性は既往研究で実証済み<sup>(8)</sup>である。図 8 には列車速度 270km/h の 10 列車程度の実測結果を合わせて示した。一部の周波数帯で不整合が見られるものの, 概ね解析結果は実測を再現できていることが分かる。また, 中間スラブについては, 軌道パッドのばね定数の違いによらず 30Hz で大きなピークが見られるが, これは図 7 に示した桁のねじり 2 次モードの影響と考えられる。さらに高い周波数領域を見ると, 軌道パッドのばね定数が 60MN/m のケースに比べて 30MN/m のケースの方が, 概ね 60Hz 以

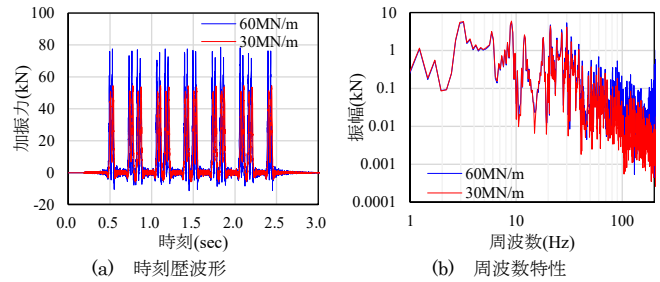


図 6 構造物への加振力の時刻歴波形と周波数特性

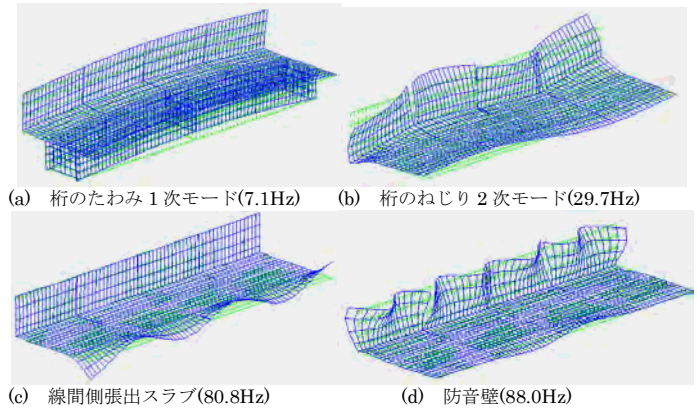


図 7 振動モードの例

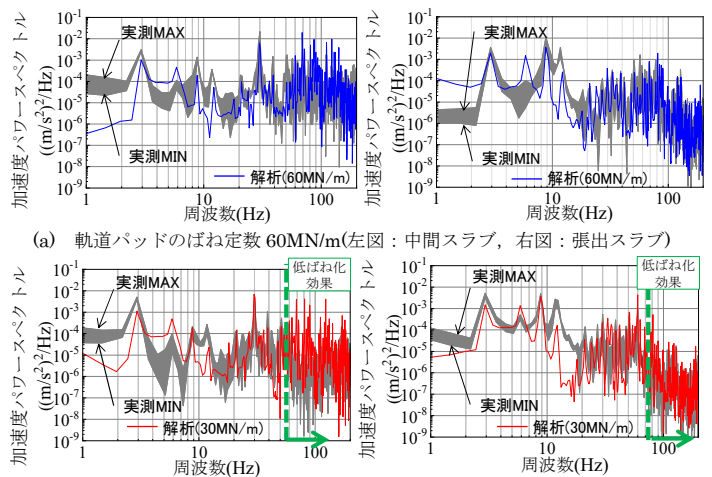


図 8 応答評価位置における鉛直加速度の周波数特性

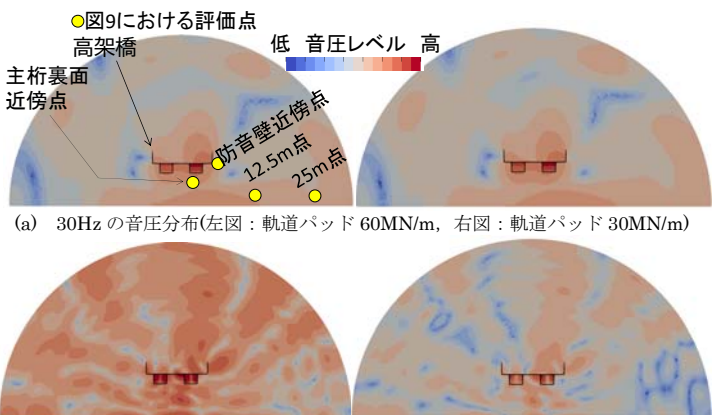


図 9 橋軸直角方向断面における音圧分布の例

上の領域において, 解析および実測において応答が 1/10 程度に小さくなっており, 軌道パッドの低ばね化の効果を確認することができる。これは前述の通り, 構造物の加振力

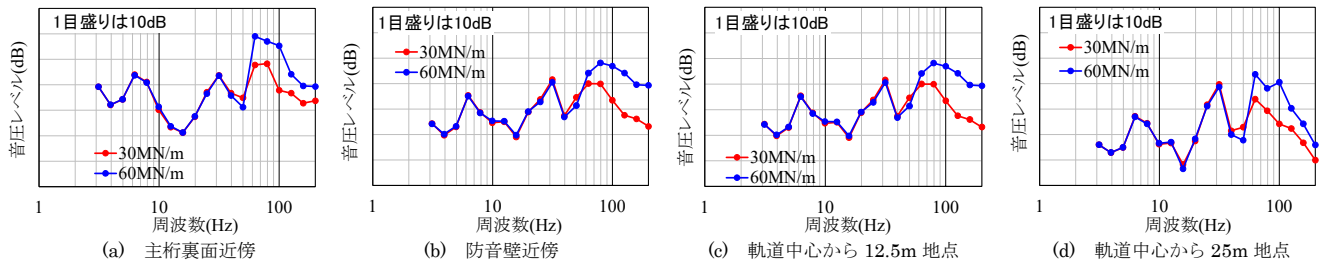


図 10 各評価点における音圧レベルの比較

の周波数特性の違いによる影響である。

**〈3・2〉音響解析** 図 9 に音響解析により求めた音圧分布を示す。30Hz と 80Hz を例として示した。図 6 で示した加振力において概ね 60Hz から高周波数側で軌道パッドの低ばね化による加振力の差異が見られた。このため、音圧分布においても、30Hz については軌道パッドによる差異がほとんど認められないことが分かる。一方で、80Hz については軌道パッドのばね定数が 60MN/m のケースに比べて 30MN/m のケースの方が音圧レベルが低いことを示す青色表示が多くなっており、音圧レベルについても図 8 で示した加速度と同様に、軌道パッドの低ばね化の効果を確認することができる。図 10 には各評価点における音圧レベルの比較を示す。評価点の具体的な位置は図 9(a)の右図に示す位置である。図より、各評価点において、これまでの結果と同様に概ね 60Hz より高周波数側で軌道パッドの低ばね化の効果を確認することができる。

**〈3・3〉音響解析結果と構造物音以外の音も含む沿線騒音の実測値との比較** 図 11 に音響解析と構造物音以外の音も含む沿線騒音の実測により得られた音圧レベルの比較を示す。解析で得られた音圧レベルは、構造物から発生した音のみで構成されるものであるのに対し、実測した音圧レベルは構造物以外の音源から発生した音(特に空力音)も含まれているため、解析結果は実測とは一致しない。解析結果と実測を比較すると、前述の通り、構造物音以外の音も含まれるため、ほぼすべての周波数帯で実測が解析結果よりも大きいことがわかる。しかしながら、30Hz、63Hz～80Hz ではその差が他の周波数帯に比べて小さくなっていることがわかる。これらの周波数帯は、図 7 で示した通り、桁のねじりモードや防音壁等の固有振動モードが卓越する周波数帯であるため、他の周波数帯に比べて音圧レベルが大きく、構造物音が卓越するためと考えられる。沿線騒音は様々な音源から発生した音が合成されたものであり一概には言えないが今回の解析条件においては、構造物の固有振動モードが卓越する周波数帯において、構造物音が空力音等の成分と同程度以上の寄与を持つ可能性があることが分かった。なお、これらの傾向は既往の RC ラーメン高架橋の解析結果<sup>(6)</sup>や実測結果<sup>(9)</sup>とも整合するものである。

#### 4. まとめ

本研究では新幹線標準 RC 桁式高架橋を対象に構造物音のシミュレーションモデルを構築し軌道パッドを低ばね化した場合における構造物音低減効果に関する検討を実施し

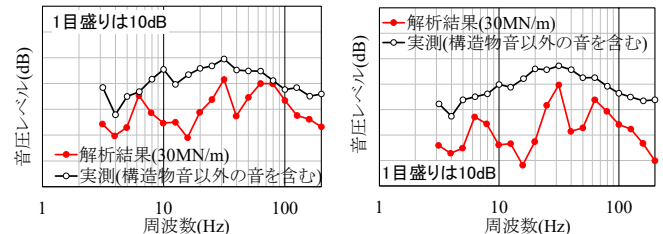


図 11 音響解析の結果と実測(構造物音以外の音を含む)により得られた音圧レベルの比較

た。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 軌道パッドのばね定数を 60MN/m から 30MN/m に低ばね化することにより、概ね 60Hz 以上の周波数領域で構造物の加振力が低減されるため、これらの周波数領域で、構造物の振動、沿線の構造物音の低減効果が得られることが分かった。
- (2) 構造物音のみを含む解析結果と構造物音以外の音も含まれる実測とを比較した結果、構造物の固有振動モードが卓越する周波数帯では解析結果と実測結果の差が小さくなった。このことから、構造物の固有振動モードが卓越する周波数帯において、構造物音が空力音等の成分と同程度以上の寄与を持つ可能性を示した。

#### 文 献

- (1) 長倉清: 構造物音の特性と低減対策, JREA, Vol.50, No.12, pp.51-53 (2007)
- (2) 宇田東樹, 齊藤実俊, 北川敏樹: 新幹線車両の低周波空力音を解明する, Railway Research Review, Vol.76, No.5, pp.28-31 (2019)
- (3) 長倉清, 吉田康雄: 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9, pp.5-10 (2000)
- (4) 渡辺勉, 曾我部正道, 徳永宗正: 車両/軌道/構造物の各種パラメータが鉄道 RC ラーメン高架橋の部材振動特性に及ぼす影響に関する数値解析的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No.2, pp.1\_821-1\_832 (2013)
- (5) 渡辺勉, 宇田東樹, 北川敏樹, 唐津卓哉, 清野多美子, 尾川慎介: 数値解析に基づく RC ラーメン高架橋の構造物音評価法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.8, pp.41-46 (2020)
- (6) 松原聖, 大家史, 尾川慎介: 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise, アドバンスシミュレーション, Vol.20, pp.65-74(2014)
- (7) 松原聖, 尾川慎介: 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise への無限要素導入, アドバンスシミュレーション, Vol.23, pp.55-87(2016)
- (8) 松岡弘大, 貝戸清之, 渡辺勉, 曾我部正道: 走行列車荷重を利用した RC 鉄道高架橋の部材振動の同定と動的挙動の把握, 土木学会論文集, Vol.67, No.3, pp.545-564(2011)
- (9) 阿久津真理子, 宇田東樹, 北川敏樹, 若林雄介: 高架橋区間における新幹線走行時の明かり区間圧力変動, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.97-100(2019)