

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560719

研究課題名(和文)スリット状建物開口部のための機械学習型アクティブ騒音制御手法

研究課題名(英文)Active noise control technique with machine learning functions for residential slit openings

研究代表者

穴井 謙 (Anai, Ken)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10325467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では数値シミュレーションおよび実物大模型実験を併用して研究を遂行し、その具体的成果として、(1) 機械学習アルゴリズムが従来の適応制御アルゴリズムに対して、より高い周波数域の騒音まで追従して干渉音を生成することができるという優位性を把握し、(2) スリット中心部と端部近くの合計3か所に2次音源スピーカーを組み込んだ、スリット開口部からの透過音をアクティブ騒音制御するためのANCフードを考案し、(3) 制御位置(マイクロホン設置位置)をスリット中央と端部近くの2か所に設けることが、スリット開口部全般の遮音性能を向上させるためには効果的であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The results in this study by combination using of numerical simulations and real-scale model experiments are as follows. (1) It was grasped that the machine learning technique had an advantage of generating interference sounds over a traditional adaptive algorithm in terms of following toward higher-frequency noise. (2) A soundproof hood that was incorporated three speakers as secondary sources at the center of a slit opening and near the slit ends was devised for active control of noise through the slit. (3) It was suggested that control microphones should be effectively placed at two points of the center and near the end of the slit for the purpose of increasing the insulation performance to a wide area around the slit.

研究分野：建築環境，騒音予測，騒音対策

キーワード：スリット開口部 アクティブ騒音制御 遮音フード ニューラルネットワーク

### 1. 研究開始当初の背景

わが国では、経済・社会活動の活発化に伴い、都市において道路交通騒音や鉄道騒音に曝される人々が増え続けている。一方、近年の建物においては、オフィスのような大規模な建物でも、住宅をはじめとする小規模な建物でも、自然エネルギー利用および室内環境の維持の観点から換気・通風のために建物の外周部に開口部が設けられる。開口部の遮音対策として考えられるのは、キャップ型の遮音フードのような音響的にパッシブな手法であるが、道路交通騒音などの屋外の環境騒音は高音域から低音域まで含んだ広帯域な騒音であるため、高音域の遮音に優れたパッシブ手法だけでは適切な騒音対策の実施は難しい。

活発な経済・社会活動と同時に健康・快適に過ごすことができる省エネルギーな都市を実現するために、パッシブ手法に加えて中低音域の制御に優れているアクティブな手法を組み合わせ、建物開口部のための広帯域な騒音対策技術が必要とされている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、建物のスリット開口部から室内へ透過する騒音を安定して抑制することができる機械学習機能を有するアクティブ騒音制御 (ANC) 手法を提案することである。そのために、数値シミュレーションおよび実物大模型実験により、スリット状の広い開口部を効率よく制御するために、適切なスピーカーやマイクロホンの個数や配置を検討して、スリット開口部のための ANC ユニットの考案する。そして、通風を得ながら静穏性を確保できる、健康で快適な空間の形成に役立つ騒音対策技術を提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

スリット開口部に対する ANC の適用効果や逆効果を正しく把握し、適用方法の改善を検討するためには、音場の数値シミュレーションと実物大模型実験を併用する必要がある。本研究ではスリット開口部のための新しい ANC 手法を構築するために、数値シミュレーションにより、(1) 機械学習アルゴリズムの優位性を把握した後に、実物大模型実験により、(2) スリット開口部のための 2 次音源組込みフードの考案、ならびに (3) スリット開口部のための効果的な制御位置の提案、を行った。

### 4. 研究成果

(1) 機械学習アルゴリズムの優位性の把握  
 アクティブ騒音制御のために一般的に使用されている適用制御アルゴリズムは (Filtered-X) LMS アルゴリズムであるが、本研究では、機械学習機能を有するアルゴリズムであるニューラルネットワーク (NN) を代用することを提案した。LMS アルゴリズムは線形回帰により解析的に干渉音を生成す

るが、NN は学習機能により非線形回帰を行うことができることとされ、より精細な干渉音を作り出せることが期待できるためである。そこで、LMS アルゴリズムに対する NN の優位性を把握するために、数値シミュレーションによる検討を実施し、次のような結果を得た。制御対象の騒音は道路交通騒音 (広帯域な騒音) である。シミュレーションの条件は、サンプリング周波数を 44.1 kHz、LMS への入力信号長は 0.01 s 分の 441 サンプル、NN への入力信号長は計算量を軽減するために LMS よりも条件の悪い 80 サンプルとした。LMS と NN のいずれも適用フィルタが十分収束した段階で比較検討した。騒音と各アルゴリズムから出力された干渉音を周波数分析し、それらの差を検討したところ図 1 に示すような結果となった。図 1 は、縦軸の SPL (相対音圧レベル) が 0 に近いほど、各アルゴリズムが騒音を追従できていることを示している。LMS の場合は、低音域から 1 kHz あたりの周波数域まで、ある程度の性能が確認できたが、120 Hz、400 Hz、830 Hz の所々で単発的に一致しない周波数域が存在し、線形回帰では道路交通騒音に一部追従できない成分が含まれていることが示唆された。一方、NN の場合は 1 kHz を超えると徐々に性能が悪くなるが、それ以下の周波数域では非常に精度よく追従できた。

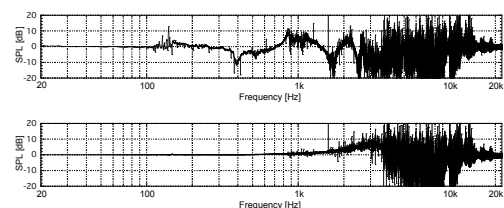


図 1 LMS (上図) と NN (下図) の騒音追従性能の比較

この成果により、複雑な騒音に対しては非線形回帰のアルゴリズムの方が優位に機能するということが把握できたと考えている。制御対象騒音以外は存在しないという理想的な環境を想定したシミュレーションではあるが、NN は LMS アルゴリズムに比べて 15 dB ほど大きな効果が得られる有効な技術であると言える。

### (2) スリット開口部のための 2 次音源組込みフードの考案

スリット開口部は“線”状の広い (長い) 空間であるが、その空間全体の騒音 (空気振動) を一斉に制御できるような線音源スピーカーというものは存在しない。現実には、あくまで音響的に“点”であるコーン型スピーカーを複数個並べて、線状の音場を制御しなければならない。本研究では、スリット開口を透過して室内に放射される騒音の、スリット周辺の音圧分布を実験的に把握し、音圧が大きくなる箇所の直近にスピーカーを配置することを提案した。

無響室に設置した実物大のスリット模型を対象にして、アクティブ制御の対象になると思われる中心周波数  $f_c$ : 160 Hz~800 Hz のバンドノイズの透過音の音圧分布を実測したところ、図 2 のような結果であった。図中、横軸  $y = 0$  mm の位置がスリットの中央であり、 $y = 600$  mm がスリット上端である。スリットからの透過音は回折して干渉し合うために音圧分布は決して一様にならず、また周波数によって中央部 ( $y = 0$  mm) の音圧が大きくなったり、端部近く ( $y = 450$  mm) が大きくなったりすることが把握できた。遮音フード内に設置できるスピーカーの個数は限りがあるため、本研究では、 $y = 0$  mm と  $y = \pm 450$  mm の 3 箇所を、音圧が大きくなる代表的な位置として決定した。

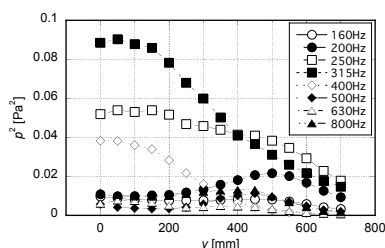


図 2 スリット開口部の透過音の音圧分布

スリット開口部を制御するための 3 個のスピーカーを組み込んだフードを製作し、スリットにフードを被せることによるパッシブな遮音効果を計測した結果 ( $y = 450$  mm の場合) を図 3 に示す。200 Hz 以下と 800 Hz 以上の帯域で遮音性能が 5 dB 程度上昇している。しかし、250-630 Hz の中音域ではパッシブ効果は得られておらず特に 500 Hz 付近では、遮音性能が他の帯域に比べて大きく低下したままであることが分かる。したがって、この中音域がアクティブ制御技術の対象周波数域と考えられる。

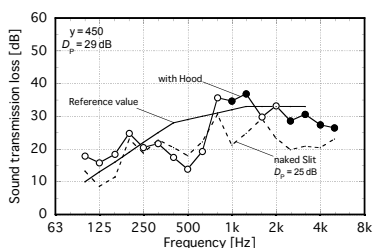


図 3 フードの遮音性能 (パッシブ効果)

### (3) スリット開口部のための効果的な制御位置の提案

アクティブ騒音制御は、制御用マイクロホンを設置した位置、すなわち“点”の音圧を小さくするように 2 次音源スピーカーの出力を調整するものである。“線”状のスリット開口部からの透過音を任意の点で捉えて全体を制御する必要があり、工夫が求められる。円筒状の開口部を対象にした研究代表者らの研究において、制御位置 (マイクロホンの設置位置) は制御したい騒音の音圧が大きな箇所に設けるのが効果的であることが明らか

かにされている。そこで、本研究でも、前項で把握したスリット開口部からの透過音が大きくなる箇所を制御位置の候補と考えて検討を進めた。

線状のスリット開口部を、点でアクティブ制御したときの効果 (または逆効果) は全く不明なため、実験的に制御点の位置や数の影響を検討した。その結果は、騒音の周波数帯によって傾向が異なったが、例として 500 Hz 帯の場合を図 4 に示す。最上図が透過音の音圧分布、中央 2 図が 1 点 ( $y = 0$  mm あるいは  $y = 450$  mm) を制御したとき、最下図が 2 点を制御したときの遮音性能である。

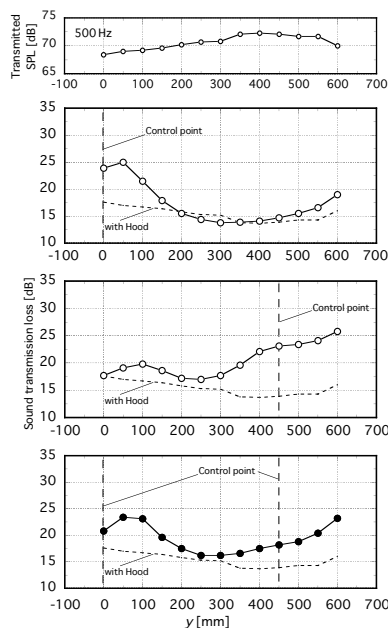


図 4 制御点の位置および数のアクティブ効果への影響 ( $f_c$ : 500 Hz の場合)

図は割愛しているが、波長が長い (周波数が低い) 100-160 Hz の場合は、スリット開口部のように幅の広い開口部を透過する場合にも平面波と見なせる現象が起きていると思われる、制御点の位置および数は制御効果の大きさに影響せず、アクティブ制御しない場合に比べて 3 dB から 7 dB の遮音性能の向上が得られた。

200-500 Hz の中音域では、図 4 の中央 2 図に例示しているように、制御位置が 1 点の場合では、透過音の音圧レベルが大きい箇所 (図 4 では  $y = 450$  mm) を制御する方が、制御位置に限れば遮音性能の向上の度合いは大きくなった。しかし、制御位置から離れるに連れて効果がなくなり、逆効果になってしまう箇所も見受けられた。ところが、制御点を 2 点にすることで (図 4 の最下図)、著しく大きな効果を得られる箇所がなくなり効果は平滑化されてしまうものの、逆効果になる箇所をなくすことができ、広い範囲で遮音性能を向上させることができた。本研究の成果を発展させることで、スリット開口部のアクティブ制御の実用が可能であることが明らかになった。

本研究で得られた成果の一部は、国際騒音制御工学会議において招待論文として複数発表しており、当該分野における最新の研究事例として国内外で認知されている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① Ken Anai, Experimental study of control position determination for active noise control of residential slit openings, Proceedings of Inter-noise 2015, Invited, 2015, 1-9
- ② 穴井 謙, 藤本一寿, アクティブ騒音制御技術の住宅換気口への適用のための基礎的研究, 日本音響学会 騒音・振動研究会資料, 査読無, N-2013-41, 2013, 1-9
- ③ 穴井 謙, アクティブ騒音制御技術の住宅換気口への適用, 音響技術, 査読無, No.164, 2013, 46-49
- ④ Ken Anai, Kazutaka Suetsugu and Shintaro Tsubaki, Suitable control position against road traffic noise for active control technique in residential ventilation openings, Proceedings of Inter-noise 2013, Invited, Paper No.573, 2013, 1-7
- ⑤ Ken Anai and Kazutoshi Fujimoto, Preliminary investigation of active noise control technique by applying the neural network for residential ventilation openings, Proceedings of Inter-noise 2012, Invited, Paper No. 377, 2012, 1-7

[学会発表] (計10件)

- ① 日置寛樹, 穴井 謙, 住宅換気口におけるアクティブ騒音制御技術の適用 —スリット状の開口部に対する制御効果の実験的検討—, 日本建築学会九州支部 研究報告, 2015年3月1日, 熊本県立大学(熊本市)
- ② 穴井 謙, アクティブ騒音制御技術の住宅換気口への適用 —ANC効果の遮音性能としての評価とスリット開口のための制御位置—, 日本騒音制御工学会 秋季研究発表会, 2014年9月17日~18日, 明治大学(東京都中野区)
- ③ 末次和貴, 穴井 謙, 住宅換気口におけるアクティブ騒音制御技術の適用 —円筒状およびスリット状の開口部における効果的な制御位置—, 日本建築学会九州支部 研究報告, 2014年3月2日, 佐賀大学(佐賀市)
- ④ 末次和貴, 椿 進太郎, 穴井 謙, 住宅換気口のアクティブ騒音制御技術における道路交通騒音に対する効果的な制御位置の検討, 日本建築学会 大会学術講演, 2013年8月30日~9月1日, 北海道大学(札幌市)

- ⑤ 椿 進太郎, 穴井 謙, 住宅換気口のアクティブ騒音制御のための相互相関による音の到来方向の判別手法, 日本建築学会 大会学術講演, 2013年8月30日~9月1日, 北海道大学(札幌市)
- ⑥ 穴井 謙, アクティブ騒音制御技術の住宅換気口への適用 —音圧波形の相互相関による音の到来方向の判別—, 日本騒音制御工学会 秋季研究発表会, 2013年9月5日~6日, 熊本大学(熊本市)
- ⑦ 穴井 謙, 末次和貴, 椿 進太郎, アクティブ騒音制御技術の住宅換気口への適用 —道路交通騒音に対する効果的な制御位置—, 日本騒音制御工学会 春季研究発表会, 2013年4月23日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区)
- ⑧ 穴井 謙, 住宅換気口のアクティブ騒音制御のための音の到来方向の判別 —2つのマイクロホン間の音圧波形の相互相関による判別手法—, 日本建築学会九州支部 研究発表会, 2013年3月3日, 大分大学(大分市)
- ⑨ 末次和貴, 穴井 謙, 住宅換気口におけるアクティブ騒音制御技術の適用 —自動車騒音に対する適切な制御位置—, 日本建築学会九州支部 研究発表会, 2013年3月3日, 大分大学(大分市)
- ⑩ 穴井 謙, 末次和貴, アクティブ騒音制御技術の住宅換気口への適用 —制御効果に及ぼす開口端反射率の影響—, 日本騒音制御工学会 秋季研究発表会, 2012年9月5日~2012年9月6日, 日本大学(東京都千代田区)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kyutech.ac.jp/professors/taobata/t2/t2-2/entry-912.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

穴井 謙 (ANAI, Ken)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 10325467

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし