

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04742

研究課題名（和文）設備騒音の低周波音遮蔽のための空気壁の提案

研究課題名（英文）Proposal of walls made of air for shielding low-frequency noise from equipments

研究代表者

穴井 謙（ANA1, Ken）

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：10325467

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：大気中の熱を集めることができる画期的な技術であるヒートポンプ給湯機は、屋外のユニットに大きな開口面が必要となり、深夜の騒音源になり得る。本研究では、開口面から放射されて周囲に広がる低い周波数の騒音を低減するために、音の干渉現象を利用したアクティブ騒音制御技術の適用可能性を検討した。数値シミュレーションや実物大模型実験により、適切な干渉音源の本数や制御マイクロホンの位置を明らかにし、また、地面などの反射面のある空間においても適応制御させることが可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アクティブ騒音制御技術は発展途上の技術であり、省エネルギー設備から生じる騒音に対する適用可能性が詳細に検討されることはなかった。本研究では、最新の数値シミュレーションと精緻な実物大模型実験により、制御効果を可視化し、適切な制御方法を具体的に示し、得られる効果を定量的に明らかにした。本研究において、適切に構築されたアクティブ騒音制御システムによる低周波音の放射を抑制する能力は、従来の遮音壁による対策と同等の効果を発揮する可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：The heat pump water heater is revolutionary technique that can use heats in the air. Machine units of the heat pump water heater at outside unavoidably have large opening for air-intake in principle. For that reason, there is a danger that the units may be noise sources in midnight. In this study, active noise control technique was applied for reducing low-frequency noise. This technique made use of sound interference phenomenon, and it could reduce the noise emitting from the opening. Suitable numbers and positions of interference sources or a controlling microphone were shown by using numerical simulations and real-size model experiments. Effectiveness of this technique in spaces with reflective surfaces was also made clear.

研究分野：環境音響学，騒音制御

キーワード：ヒートポンプ給湯機 アクティブ騒音制御 低周波音

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

深夜の騒音のために静穏な生活環境が脅かされると、訴訟にまで発展してしまう恐れもある。消費者庁の消費者安全調査委員会は、事故情報データバンクに寄せられた苦情相談が平成 29 年 1 月から平成 30 年 2 月までの 1 年間に 59 件にも及ぶとしている。また、環境省はヒートポンプ給湯機等から発生する騒音等の実態把握のための調査等を実施するとしており、建築に付随する設備によって生じる低周波騒音は解決に至っていない社会問題と考えられる。建築の付随設備の業界団体（一般社団法人日本冷凍空調工業会）においても「騒音等防止を考えた家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック」を頒布して対策に取り組んでいる。ヒートポンプ給湯機の一般的な騒音対策は、音源対策・距離減衰・回折減衰の 3 つであり、これらの対策に一定の効果があることは間違いない。しかし、我が国のように都市に人が密集して住まう環境では、十分に対策スペースが確保できない敷地も少なからずあると思われる。ヒートポンプ給湯機の屋外のユニット（以降、ヒートポンプユニットと呼称する）には、その原理から大きな開口部（直径およそ 400 mm）を設けなければならないため、生活環境の静穏性を担保しつつ省エネルギー設備を普及させるためには、開口部から放出される低周波音の遮蔽技術が大変重要になる。省スペースで実現可能なアクティブ騒音制御技術を適用して開口部からの騒音を遮蔽する技術は未だに発展途上にあるものの、その具体的な適用方法が確立され、低周波音の伝搬を抑えられる新しい遮蔽技術として普及することで、結果的に健康被害を被る人を減らせることが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究では家庭用のヒートポンプユニットを対象とし、戸建住宅の敷地内で遮蔽することを目指し、音の干渉現象を利用したアクティブ騒音制御技術の適用方法とその効果を明らかにする。ヒートポンプユニットの開口部周辺に配置したスピーカー（干渉音源）によって低周波音と干渉する音波を発生させることで、あたかも空気のできた遮蔽壁のように振る舞わせることが可能になると考えている。本研究は、ヒートポンプ給湯機向けの空気壁を提案することを目指して、アクティブ騒音制御技術を適用し、最新の情報処理手法を応用した遮蔽システムを提案すること、すなわち、ヒートポンプユニットの大きな開口部から放出される低周波音を制御するために、点音源である干渉音源を何本どのように配置すれば効果的であるのか、そして得られる効果は十分であるのかを明らかにすることを目的とする。そのために、干渉音源の本数（位置）および、制御マイクロホンの位置と制御効果の関係を検討し、設備騒音に対する有効な制御システムの構成、ならびに制御システムの適用効果を定量的に明らかにする。

### 3. 研究の方法

まず、数値シミュレーションにより、干渉音源の本数と距離による制御効果の相違の検討（2 次元）を行う。次に、実物大の模型実験により、アクティブ騒音制御技術（騒音源に近接させて制御スピーカーを設置すること）により、開口部からの音響放射を低減できることを検証する。そして数値シミュレーションにより、塀を建てるというパッシブ対策との効果の比較検討（3 次元）を行い、最後に、実際の制御に用いられる適応制御における適切な制御マイクロホン位置の検討を行う。

### 4. 研究成果

本研究課題の成果として、次の 4 項目について整理して述べる。

- (1) 干渉音源の本数と設置位置の違いによる制御効果
- (2) 近接させた干渉音源による音響放射の低減可能性（実験）
- (3) パッシブ対策との騒音低減効果の比較
- (4) 適応制御における適切な制御マイクロホン位置の把握

(1) 騒音源と干渉音源でダイポールを形成させることによる空間的な制御効果について数値シミュレーションを用いて可視化し、騒音源に対する干渉音源の位置関係が、効果に大きく影響することを明らかにした。さらに、干渉音源の本数を増やすことにより、制御効果を空間全体に及ぼすことが可能であることを明らかにした。

図 1 に音圧（100 Hz 純音）の空間分布を示す。上図がアクティブ制御していない場合であり、中央から騒音のみが放射されている。中図は、制御対象騒音の波長  $\lambda$  に対して  $\lambda/8$  の距離に 1 本の干渉音源を設置した場合の結果であり、中央部を除くと、上図に比べて音圧が小さくなることが示されている。さらに、下図は、3 本の干渉音源を騒音源から  $\lambda/4$  の距離に近接させた場合で、中図よりさらに音圧を小さくできていることが読み取れる。

干渉音源が 1 本の場合は  $\lambda/8$  以下の距離に設置し、干渉音源が 3 本の場合は  $\lambda/4$  以下の距離に設置すれば、逆効果を生じさせずに、騒音源からの音響放射を抑制できることを明らかにした。この成果は、設備騒音のアクティブ制御の可能性を示す新しい知見であり、さらに、実際の設備機器の放射音の特性を踏まえた研究への発展が望まれる。

(2) 騒音源に近接させた制御スピーカーによって放射音が抑制できることを、実物大の模型実験を通して明らかにした。音響インテンシティを空間的に計測し、部分音響パワーの低減量に換算することで、アクティブ騒音制御効果が計測位置に留まらず、広い範囲に及ぶことを検証した。

制御対象は、ヒートポンプユニットの騒音を想定して、30, 60, 90, 120, 150, 180 Hz の純音を付加したピンクノイズとした。3本の干渉音源を用い、ヒートポンプユニットの開口部中心から485 mmの距離に配置した。この距離は、制御対象周波数の上限である180 Hzの波長 $\lambda$ の1/4程度である。

また、騒音源を取り囲むように、音響インテンシティを計測することで、部分音響パワーの低減量として評価すると、周波数によって異なるもののヒートポンプユニットの前方に対して4.8から7.8 dBの低減効果が得られることを明らかにした。

数値シミュレーションで確認された現象を、実空間においても生じさせられると示したことの意義は大きいと考えている。

(3) 設備機器が設けられる空間を想定し、反射面である地面と自邸の壁が存在する音場におけるアクティブ騒音制御効果について数値シミュレーションを用いて検討し、遮音塀を建てるようなパッシブ対策との騒音低減効果を比較検討した。アクティブ騒音制御技術は、騒音源から近距離ではパッシブ対策と同等の効果を発揮し、数m離れるとパッシブ対策を凌ぐ効果が得られる可能性が示された。

図2に、100 Hz純音を制御対象とし、遮音塀を設けることによる相対音圧レベルの変化について、騒音源からの距離(Y axis)で整理した結果を示す。併せて、干渉音源1本あるいは3本でアクティブ制御した場合についても示している。遮音塀を設けた場合のレベル変化は、距離が離れてもほぼ変化しないのに対し、アクティブ制御の効果は距離によって減衰していく傾向が読み取れる。音源の近傍でアクティブ制御するというのは、音源からの放射を抑える音源対策として機能することが示されている。

今後、設備騒音の特性を踏まえて、アクティブ騒音制御によって得られる効果を詳細に分析する必要があると考えている。

(4) アクティブ騒音制御技術を実用する際は適応制御しなければならないが、その際に制御マイクロホンの位置に留意すべきであるが、適切な位置を論理的に導くことは不可能である。そのため、数値シミュレーションを用いて試行錯誤的に検討し、騒音源の直近に制御マイクロホンを設置することは必ずしも適切ではなく、設備騒音のように低い周波数を制御するためには、例えば1mほど離す必要があることを明らかにした。

図3は、騒音源から2m離れた箇所の相対音圧が、適応制御の開始(図では2 sec.経過)後に、徐々に低減されていく様子を示している。なお、この数値シミュレーションは2次元であるが、反射面を設けており、地面が存在する現実の空間においても適応制御が可能であることを示している。

今後、実用の際に活用できるように、制御マイクロホン位置の決定方法として整理されることが望まれる。

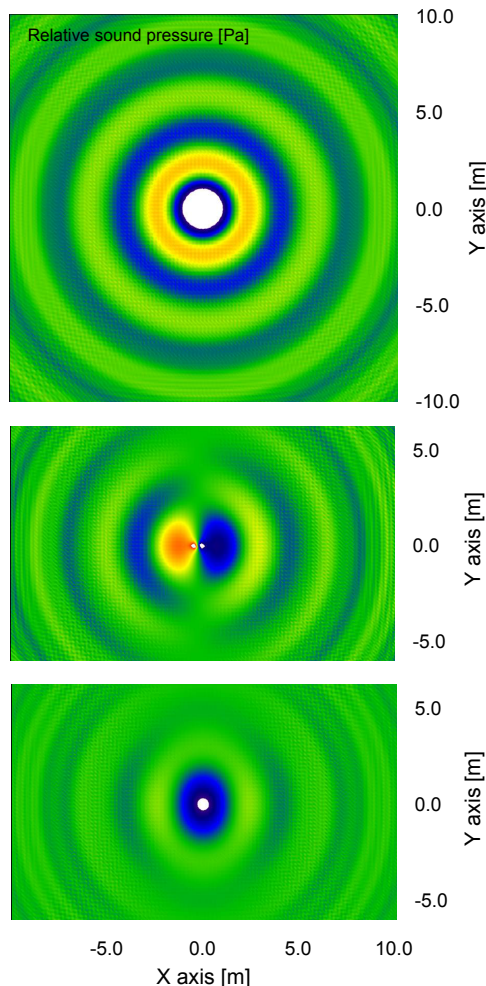


図1 アクティブ制御の有無による音圧の空間分布の比較 (上図: 制御なし, 中図: 干渉音源1本, 下図: 干渉音源3本)

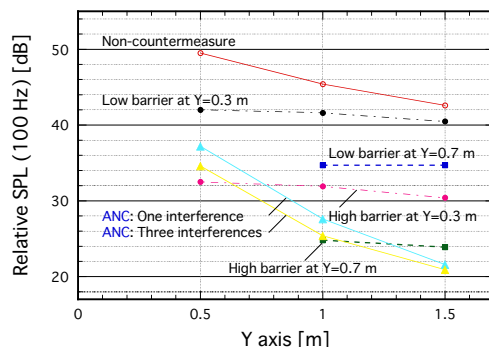


図2 遮音塀対策とアクティブ制御の効果比較

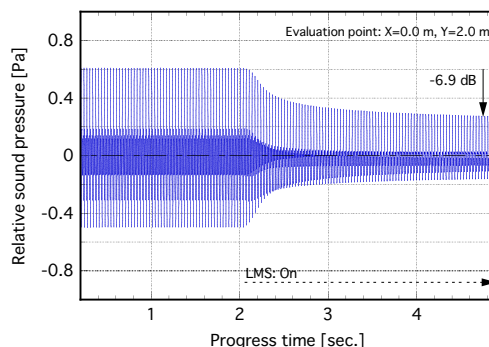


図3 適応制御による音圧の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 穴井 謙	4. 巻 46
2. 論文標題 家庭用ヒートポンプ給湯機に対するアクティブ騒音制御技術の適用可能性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 騒音制御	6. 最初と最後の頁 14-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 福永奈々, 穴井 謙
2. 発表標題 数値シミュレーションによるヒートポンプ給湯機のアクティブ騒音制御効果の検討 - Filtered-X LMSアルゴリズムによる適応制御 -
3. 学会等名 日本音響学会 2022年春季研究発表会 (2-6-2)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永守優樹, 穴井 謙
2. 発表標題 家庭用ヒートポンプ給湯機に対するアクティブ騒音制御技術の適用 - 数値シミュレーションによる自邸のある空間における最大効果の把握 -
3. 学会等名 日本建築学会 九州支部研究報告 (第61号, pp.21-24)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ken Anai and Shou Kato
2. 発表標題 Applicability of Active Noise Control Technique to Heat Pump Water Heater for Household Use
3. 学会等名 ICSV27 (27th International Congress on Sound and Vibration, No.1078) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 穴井 謙
2. 発表標題 家庭用ヒートポンプ給湯機に対するアクティブ騒音制御技術の適用 -自由音場における制御効果の検討-
3. 学会等名 日本騒音制御工学会 2021年春季研究発表会 (1-1-09)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 峪口理彩, 穴井 謙
2. 発表標題 家庭用ヒートポンプ給湯機に対するアクティブ騒音制御技術の適用 -数値シミュレーションによる自由音場における干渉音源配置の検討-
3. 学会等名 日本建築学会 九州支部研究報告 (第60号, pp.17-20)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 穴井 謙
2. 発表標題 家庭用ヒートポンプ給湯機に対するアクティブ騒音制御技術の適用 -実物大模型実験における音響インテンシティによる制御効果の把握-
3. 学会等名 日本音響学会 建築音響研究会 (資料 AA2019-23)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 穴井 謙, 加藤 彰
2. 発表標題 家庭用ヒートポンプ給湯機に対するアクティブ騒音制御技術の適用 -無響室における実物大模型実験による適用可能性の検討-
3. 学会等名 日本騒音制御工学会 2019年秋季研究発表会 (1-3-02)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------