

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：42686

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2023

課題番号：20K22454

研究課題名（和文）健康被害を引き起こす居住空間に生じる低周波騒音の共鳴現象の評価・防止手法の開発

研究課題名（英文）Development of evaluation and prevention method for the resonance of low frequency noise in a room causing health hazard

研究代表者

鈴木 諒一（SUZUKI, Ryoichi）

日本大学短期大学部・その他部局等・助手

研究者番号：40875043

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：低周波騒音による健康被害を防止するため、居住空間で生じる共鳴現象である固有振動の評価手法を提案した。本研究で得られた成果は以下の通りである。

1. 粒子速度ベクトルを分析することで、固有振動の方向を検出できることを示した。2. 音響エネルギー密度のパワースペクトルによって、測定点にあまり依存せずに固有振動を分析可能であることを示した。3. インパルス応答から減衰を除去した減衰除去インパルス応答を周波数分析することで、減衰によって不明確となっていた固有振動をより明確に分析できることを示した。4. 周波数変動係数を用いることで、固有振動の影響を受けた音圧レベル分布の一様性を評価できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国において「環境問題」対策の一環として省エネルギー、再生可能エネルギーの利用が強く推進されている。しかし、そのための設備（例：ヒートポンプ給湯器、風力発電等）が発する低周波騒音が健康被害を発生させる問題が報告されている。そのため、環境問題対策を推進していくのと同時に低周波騒音の対策が必須である。

本研究では小規模な建築空間で問題となる低周波音の共鳴現象である固有振動の評価指標を開発した。本研究成果によって、既存の手法だけでは困難であった固有振動を制御して健康被害を防止する新しい小規模空間の音響設計手法の提供が可能となる。

研究成果の概要（英文）：An evaluation method to prevent health hazards caused by characteristic vibration, which is resonance in a room sound field was proposed. The following were shown as research achievements:

1. The direction of characteristic vibrations can be detected using the particle velocity vector. 2. Characteristic vibrations can be analyzed without depending on measurement positions using the power spectrum of acoustic energy density. 3. Cancelling the decay from the room impulse response can reveal characteristic vibrations more clearly. 4. The spatial uniformity of sound level distribution affected by the characteristic vibration can be evaluated using the frequency-domain coefficient of variation even at fewer measurement points.

研究分野：建築音響

キーワード：室内音場 低周波騒音 固有振動 周波数スペクトル 減衰除去インパルス応答 周波数変動係数

1. 研究開始当初の背景

居住空間では低周波騒音が室内で強く共鳴することにより、様々な健康被害を引き起こす可能性がある。居住空間内において低周波騒音による健康被害を防止するためには、居住空間内の共鳴現象である固有振動を制御することで特定の周波数で共鳴が卓越してしまうことを避ける必要がある。しかし、建築音響の研究はコンサートホール等の大空間が主な研究対象となっており、知見が蓄積されてきた歴史があり、小規模空間で問題となる固有振動を制御する音響設計手法が未だ確立されていないという現状がある。そのため、小規模空間において固有振動を制御する設計・評価手法の確立が必要である。

現在の建築空間の音響設計において、固有振動制御手法の主流は吸音処理である。しかし、壁面で吸音処理するには音の波長の4分の1程度の厚みの吸音壁が必要となる。これは、波長の長い低周波音では極めて厚い吸音壁が必要であることを示しており、小規模の居住空間では非現実的である。このことから、小規模空間の音響設計は既存の手法だけでは困難であり、小規模空間の実用的な音響設計手法の確立が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、まず固有振動の発生原因を特定するため、1)「固有振動の方向検出手法」の開発を目指す。適切な固有振動制御を行うために、問題となる固有振動がどの壁面間で生じているのかを特定する測定手法の開発は低周波騒音の重要な対策手法の1つとなる。次に、得られた方向情報に基づき、2)被害程度の評価に必要な「固有振動の評価手法」の確立を目指す。この評価手法を建築音響設計のスキームに落とし込むことで、固有振動を制御して健康被害を防止する音響設計手法の確立につなげることが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、固有振動の評価手法に関する検討のため、一般的なマイクロホンで測定可能な音圧に加えて、従来は測定が困難であった粒子速度を用いる。粒子速度の測定には複数の指向性マイクロホンを組み合わせることによって、各軸方向の粒子速度の測定が可能なC-C法を用いて行われた。また、本研究ではCIP法と呼ばれるコンピュータを用いた波動音響シミュレーションも併用し、実音場では困難なパラメトリックな条件設定による検討を実施した。

4. 研究成果

本研究で得られた成果は以下の通りである。

(1) 粒子速度ベクトルのパワースペクトルを分析することで、固有振動の方向を検出できることを示した。

図1に示す矩形残響室において分布測定された粒子速度ベクトル $\mathbf{u}(t)$ の各直交成分のパワースペクトル $|U_x(f)|^2$, $|U_y(f)|^2$, $|U_z(f)|^2$ を図2に示す。図中には固有周波数と固有振動モードの次数(n_x , n_y , n_z)を示す。また、43 Hzにおける粒子速度ベクトル分布を図3に示す。

図2を見ると、y軸方向の軸波である43 Hzにおける $|U_y(f)|^2$ のピーク値は他方向のパワースペクトルと比べて15 dB以上大きい。さらに図3を見ると、運動エネルギーが節となる測定点を除き、全ての測定点でベクトルがy方向に向いている。このことから、粒子速度の各直交方向のパワースペクトルの分析によって、固有振動の発生方向を検出できる可能性を示した。

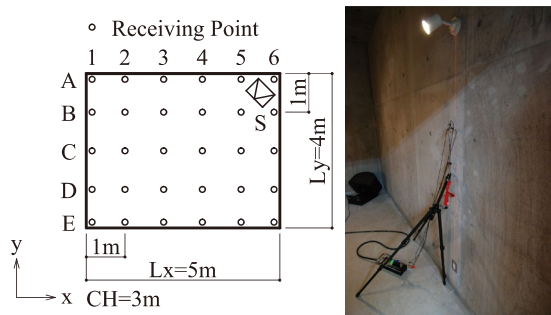


図1 室平面図(左)と測定の様子(右)

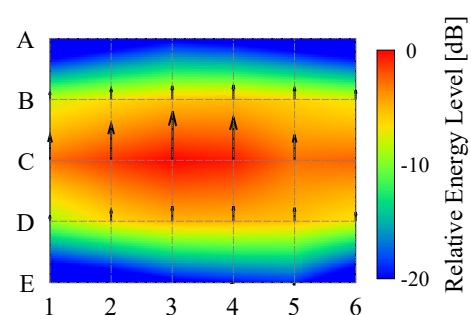


図3 粒子速度ベクトル分布 (43 Hz)

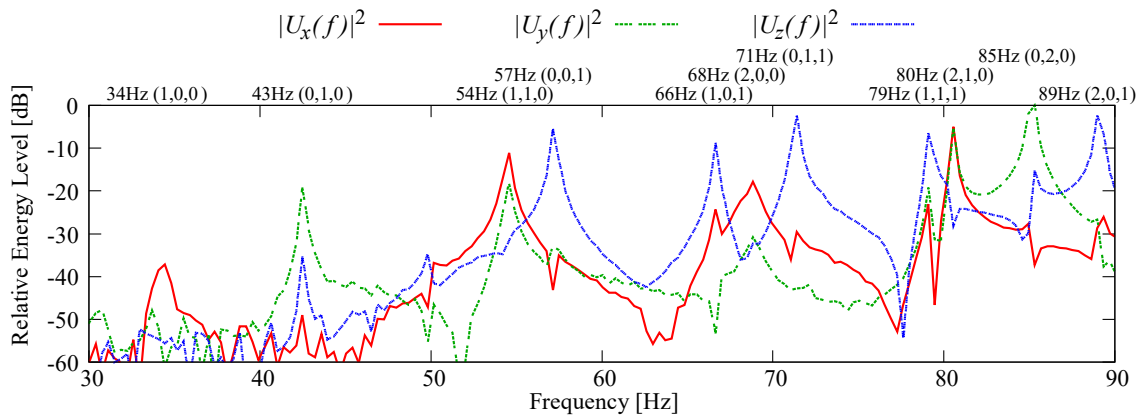


図2 測定点 B4 における粒子速度のパワースペクトル

(2) 音響エネルギー密度のパワースペクトルによって、測定点にあまり依存せずに固有振動を分析可能であることを示した。

図 1 に示した矩形残響室において測定された音圧と粒子速度のインパルス応答から、従来の分析手法である音圧のパワースペクトルと提案手法である音響エネルギー密度のパワースペクトルを求め比較する。それぞれの結果を図 4, 図 5 に示す。図中には固有周波数と固有振動モードの次数 (n_x, n_y, n_z) を示す。

図 4 を見ると音圧のパワースペクトルは測定点によって大きく変化し、固有周波数に明確なピークが生じない測定点も見られることから、従来の音圧のみによる測定では測定点によっては固有振動を捉えられない場合があることがわかる。一方、図 5 を見ると、音響エネルギー密度のパワースペクトルは音圧と比べて測定点によるスペクトルの変化が小さくどの測定点でもほぼ全ての固有周波数にピークが生じている。以上の結果から従来の音圧のみによる分析と比べて、音響エネルギー密度のパワースペクトルによって音場の固有振動を測定点にあまり依存せずに推定可能であることを示した。

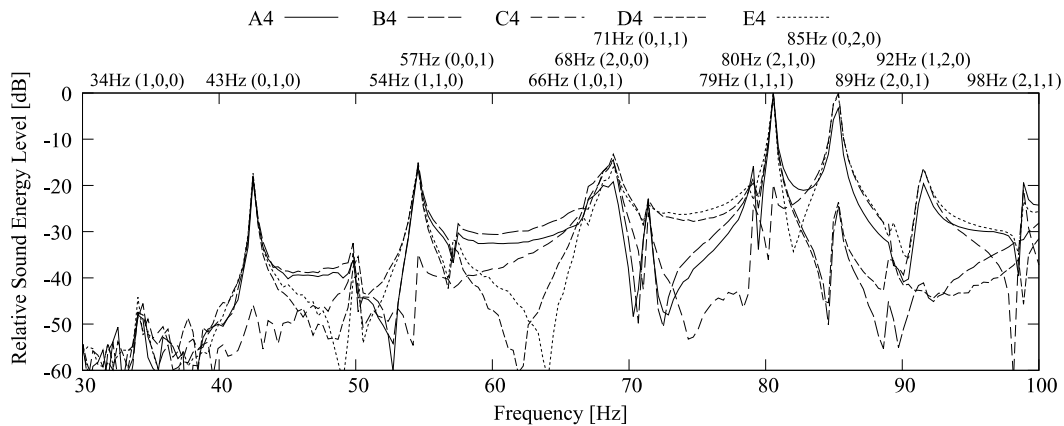


図4 測定点 A4～E4 における音圧のパワースペクトル

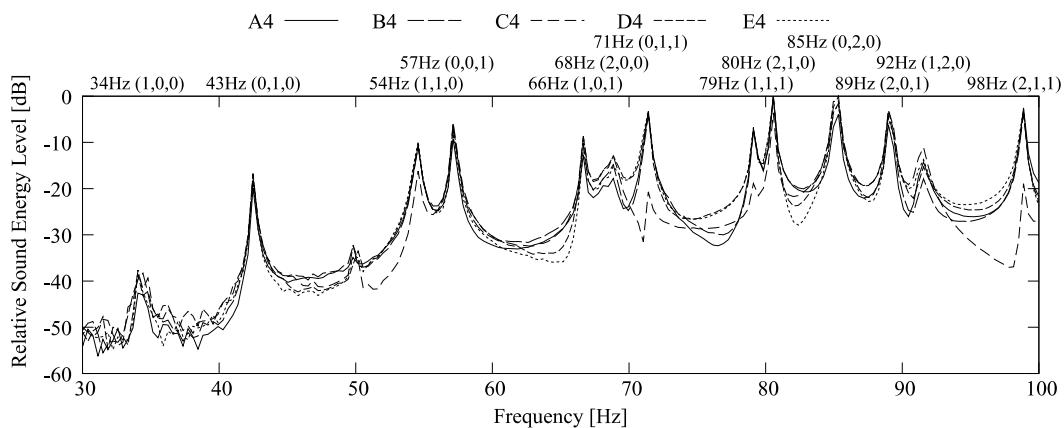


図5 測定点 A4～E4 における音響エネルギー密度のパワースペクトル

(3) インパルス応答から減衰を除去した減衰除去インパルス応答を周波数分析することで、減衰によって不明確となっていた固有振動をより明確に分析できることを示した。

図 6 に示す 3 次元音場について CIP 法による波動音響シミュレーションを実施した。全ての境界の吸音率は 0.15 である。測定点 R2 におけるインパルス応答と減衰除去インパルス応答の

パワースペクトルを図7に示す。

図7を見ると、インパルス応答のパワースペクトルでは残響減衰によって半値幅が広がっており、固有周波数に明確なピークが生じていないのに対し、減衰除去インパルス応答のパワースペクトルはピークが急峻になり、インパルス応答のパワースペクトルと比べて固有周波数で明確なピークが生じている。以上から、減衰除去インパルス応答を分析することで、室の固有振動の影響を的確に捉えられることがわかった。

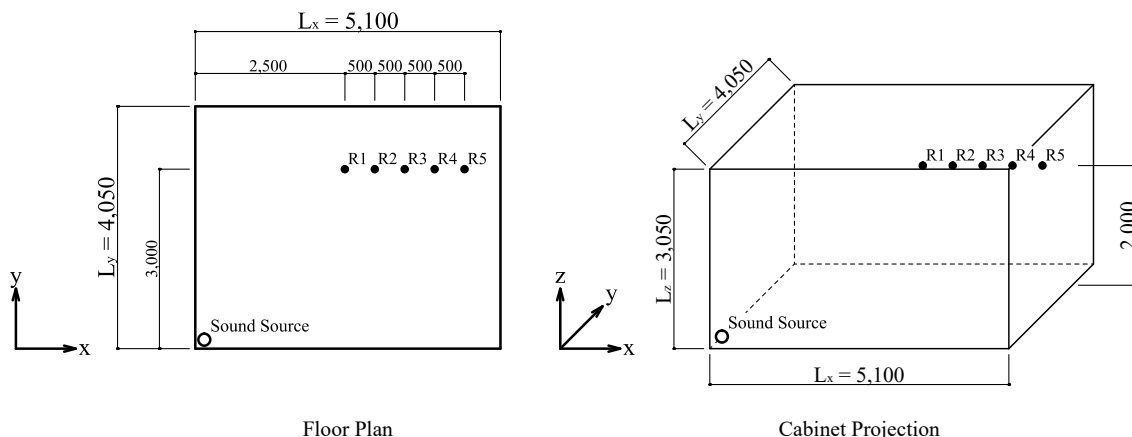


図6 シミュレーション音場の概要

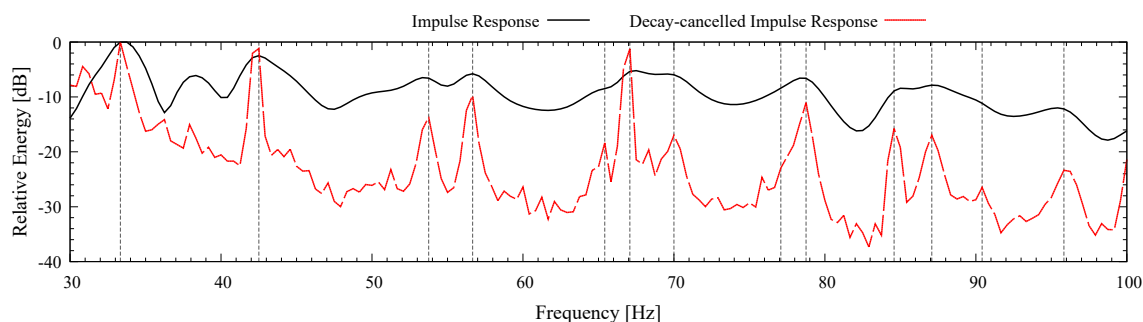


図7 インパルス応答と減衰除去インパルス応答のパワースペクトル

(4) 周波数変動係数を用いることで、音圧レベル分布の一樣性を評価できる可能性を示した。

小規模空間では、固有振動の影響により音圧レベルが測定点位置によって大きく変動する。そこで、固有振動の評価指標として減衰除去インパルス応答のパワースペクトルの変動係数である周波数変動係数 FCV を提案し、評価に多くの測定点が必要な音圧レベルの空間偏差 σ_L よりも、少ない測定点で安定して音圧レベルの空間的な一樣性を評価できるか否か検討した。解析対象音場は、室形状2パターンと吸音率4パターンの組み合わせの8音場である。室形状は、図8と図9に示すRoom-AとRoom-Bの2室である。吸音率は全ての境界面の統計入射吸音率 α が0.00～0.15の0.05刻みとなるように設定し、波動音響シミュレーションを実施した。500mm間隔の立法格子状に配置した測定点のうちランダムに選定した6点のインパルス応答から σ_L と FCV を求める。この測定点の選定と指標の算出を1万回試行し、その際の各指標のばらつきについて比較検討した。解析対象の周波数帯域は63Hzの1/3オクターブ帯域である。

ランダムに1万回選定した6点の測定点における σ_L と FCV をそれぞれ図10、図11に示す。図中の各点は指標の算出を1万回繰り返した際の平均値を、エラーバーはその標準偏差を示す。

図10を見ると、全ての吸音率でRoom-AよりRoom-Bの σ_L が大きく、Room-Bの音圧レベルの空間偏差が大きいことがわかる。図11を見ると、 FCV も σ_L と同様に全ての吸音率でRoom-AよりRoom-Bが大きい。これは、音圧レベルの空間偏差が大きい音場において、 σ_L と同様に FCV も大きくなることを示している。次に標準偏差に着目すると、6点選定時の σ_L の標準偏差は、 FCV の標準偏差と比較して相対的に大きい。この結果は、 σ_L は測定点数が少ない場合には指標のばらつきが大きく結果の安定性、信頼性が低くなってしまうことを示している。一方、 FCV は測定点数が少ない場合においても結果のばらつきが小さく、音圧分布の一樣性を安定して評価できる可能性を示している。以上より、固有振動の影響を受けた音圧レベルの空間的な一樣性を、提案手法である FCV を用いることで σ_L と同様に評価できる可能性を示した。さらに、 σ_L と比べて少ない測定点でも安定して評価できることを示した。

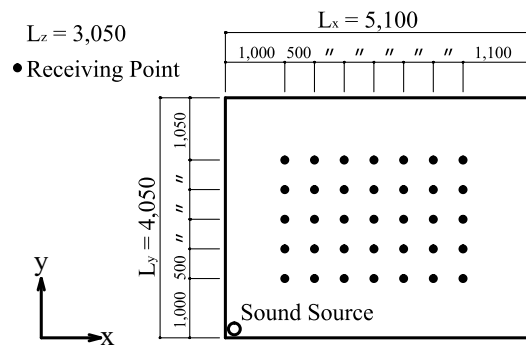


図 8 Room-A の平面図と測定点位置

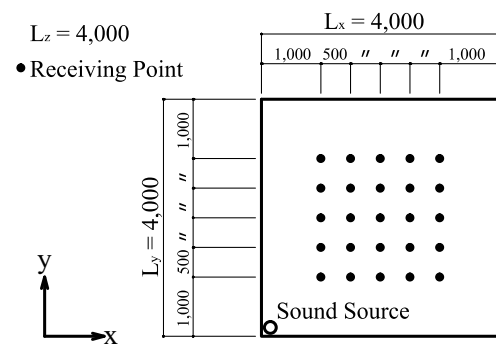


図 9 Room-B の平面図と測定点位置

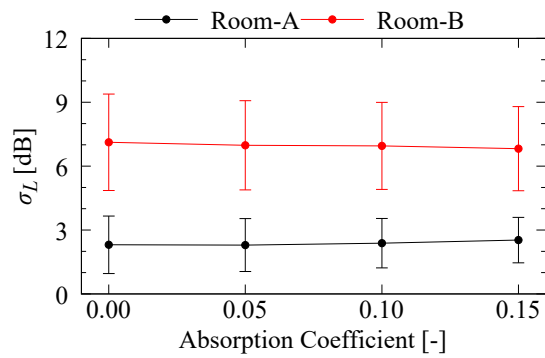


図 10 σ_L の結果

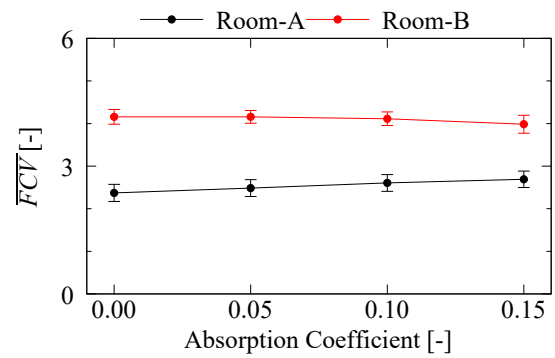


図 11 $\overline{FCV}$ の結果

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1 . 発表者名 Ryoichi Suzuki, Kazuma Hoshi, Toshiki Hanyu
2 . 発表標題 Estimating the characteristic vibrations of a sound field in a room using coefficient of variation in the power spectrum of a decay-cancelled impulse response
3 . 学会等名 inter-noise 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 鈴木諒一, 星和磨, 羽入敏樹
2 . 発表標題 周波数変動係数を用いた矩形小空間の低音域における音圧分布の一様性評価に関する基礎的検討
3 . 学会等名 令和5年度（第67回） 日本大学理工学部学術講演会
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Ryoichi Suzuki, Kazuma Hoshi, Toshiki Hanyu
2 . 発表標題 method for evaluating the spatial uniformity of sound pressure in a small room by using power spectra at fewer measurement points
3 . 学会等名 ACOUSTICS 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 鈴木諒一, 星和磨, 羽入敏樹
2 . 発表標題 矩形小空間のパワースペクトルを用いた低音域における音圧分布の一様性評価
3 . 学会等名 日本音響学会 第151回(2024年春季)研究発表会
4 . 発表年 2024年

1．発表者名 鈴木諒一，星和磨，羽入敏樹
2．発表標題 減衰除去インパルス応答を用いた固有振動の評価に関する実験的検討
3．学会等名 日本建築学会大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 鈴木諒一，星和磨，羽入敏樹
2．発表標題 減衰除去インパルス応答の周波数変動係数を用いた固有振動分析の数値シミュレーションによる検討
3．学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4．発表年 2022年

1．発表者名 Ryoichi SUZUKI, Kazuma HOSHI, Toshiki HANYU
2．発表標題 Analysis of characteristic vibrations in a room sound field using a decay-cancelled impulse response
3．学会等名 International Congress on Acoustics (国際学会)
4．発表年 2022年

1．発表者名 鈴木諒一,星和磨,羽入敏樹
2．発表標題 粒子速度に着目した直方体室における固有振動の発生方向検出
3．学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4．発表年 2021年

1．発表者名 鈴木諒一,星和磨,羽入敏樹
2．発表標題 室内音場における固有振動の推定のための音響エネルギー密度による周波数スペクトルの測定
3．学会等名 日本建築学会大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 鈴木諒一,星和磨,羽入敏樹
2．発表標題 室内音場における固有振動の方向検出手法の数値シミュレーションによる基礎的検討
3．学会等名 令和2年度（第64回）日本大学理工学部学術講演会
4．発表年 2020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
---------	---------