

D-7

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

A basic study on detection of directions of characteristic vibration in a room sound field by a numerical simulation

○鈴木諒¹, 星和磨¹, 羽入敏樹¹*Ryoichi Suzuki¹, Kazuma Hoshi¹, Toshiki Hanyu¹

1. はじめに

建築空間内では、壁面間で低周波音が強く共鳴して固有振動が生じる。それにより、低周波騒音が局所的に増幅され、滞在者に健康被害を及ぼす事例が報告されている^[1]。そのため、室内音場に生じる固有振動が特定の周波数で卓越することを防止する建築空間の評価・設計手法の確立が急務である。

実空間における固有振動の分析は、音圧のインパルス応答を周波数分析することが一般的である。しかし、スカラー量である音圧は方向情報を含まないため、固有振動のエネルギーの大きさを分析できるが、固有振動が生じる方向を検出できない。そこで、筆者らはベクトル量である粒子速度に着目し、そのインパルス応答を周波数分析することで、固有振動の生じる方向を検出できると考えた。

本研究では固有振動分布が明らかな矩形音場を対象として数値シミュレーションを実施する。その結果から固有振動の方向を検出する手法について検討する。

2. 音圧と粒子速度の周波数分析

筆者らはこれまで、測定点が音圧分布の節であった場合に固有周波数に生じるスペクトルのピークを捉えられず、固有振動を検出できない問題を解決するため、音圧に加え粒子速度を考慮した音響エネルギー密度を周波数分析する手法^[2]を提案している。定在波音場では、音圧と粒子速度の位相がずれ、両者の空間分布の腹と節が異なる位置に生じる。そのため、両者を加算することにより、音場の固有振動を測定位置に依らず検出することが可能である。

音圧 $p(t)$ のパワースペクトル $|P(f)|^2$ からポテンシャルエネルギー密度 $E_p(f)$ を式(1)、粒子速度ベクトル $\mathbf{u}(t)$ の各方向成分のパワースペクトル $|U_x(f)|^2$, $|U_y(f)|^2$, $|U_z(f)|^2$ から各方向の運動エネルギー密度 $E_{kx}(f)$, $E_{ky}(f)$, $E_{kz}(f)$ を式(2)~(4)、音響エネルギー密度 $E(f)$ を式(5)のように求める。ただし、 ρ は空気密度、 c は音速である。本研究では、運動エネルギー密度 $E_{kx}(f)$, $E_{ky}(f)$, $E_{kz}(f)$ をそれぞれ比較することで、固有振動が生じる方向を検出可能か否かについて検討する。

$$E_p(f) = \frac{1}{2\rho c^2} |P(f)|^2 \quad (1)$$

$$E_{kx}(f) = \frac{1}{2}\rho |U_x(f)|^2 \quad (2)$$

$$E_{ky}(f) = \frac{1}{2}\rho |U_y(f)|^2 \quad (3)$$

$$E_{kz}(f) = \frac{1}{2}\rho |U_z(f)|^2 \quad (4)$$

$$E(f) = E_p(f) + E_{kx}(f) + E_{ky}(f) + E_{kz}(f) \quad (5)$$

3. 数値シミュレーションの概要

図1に示す、 $L_x = 5\text{m}$, $L_y = 4\text{m}$, $L_z = 3\text{m}$ の3次元矩形音場を対象として、C型CIP法^[3]による波動音響シミュレーションを実施した。時間離散化幅は $40\mu\text{s}$ 、空間離散化幅は 50mm 、空気密度は 1.21kg/m^3 、音速は 343m/s である。音場境界は剛壁とし、音場の隅角部に配置した音源S(高さ 0.15m)に標準偏差 $300\mu\text{s}$ のガウシアンパルスを音圧の時間波形として与え、受音点R1, R2(高さ 2m)における音圧と粒子速度のインパルス応答を計算する。本報ではデータ長 2^{16} のインパルス応答を求め、周波数分析した。

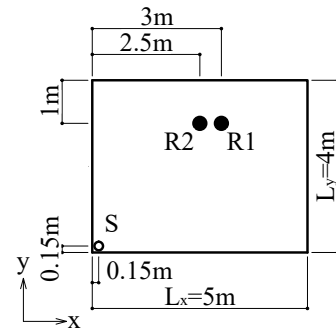


図1 解析対象の矩形音場の平面図

4. 結果と考察

受音点R1とR2における音響エネルギー密度 $E(f)$ 、ポテンシャルエネルギー密度 $E_p(f)$ 及び各方向の運動エネルギー密度 $E_{kx}(f)$, $E_{ky}(f)$, $E_{kz}(f)$ を図2と図3に示す。なお、図中に室寸法から算出した固有周波数とその固有振動モードの次数を示す。

図2と図3を見ると、固有周波数である 34Hz や 55Hz において、受音点R2の $E_p(f)$ が卓越しておらず、固有振動を検出できていない。これはR2がその固有周波数の音圧分布の節にあたるのが原因である。一方、 $E(f)$ を見るとR1とR2が同様のスペクトルを示し、全

ての固有周波数で明確なピークを示していることから、 $E(f)$ により受音点に依らずに固有振動を検出できることがわかる。

次に、固有振動の方向検出手法について検討する。図2の $E_{kx}(f)$ 、 $E_{ky}(f)$ 、 $E_{kz}(f)$ を見ると、x方向の軸波である34Hzは $E_{kx}(f)$ のみに、y方向の軸波である43Hzは $E_{ky}(f)$ のみに、xy平面の接線波である55Hzは $E_{kx}(f)$ と $E_{ky}(f)$ に明確なピークが生じており、次数と対応した方向の運動エネルギー密度が卓越していることがわかる。これは他の固有周波数でも同様のことが言える。この結果より、方向別に運動エネルギー密度の卓越を捉えることで固有振動が生じている方向を検出できる可能性が示唆される。

しかし、図3を見ると、受音点R1の55Hzで卓越していた $E_{ky}(f)$ がR2では卓越していない。これは粒子速度分布の影響が原因であると推察される。同様にx方向の軸波である69HzでもR2では $E_p(f)$ のみが卓越しており方向検出ができない。このように、運動エネルギー密度はポテンシャルエネルギー密度と同様に、受音点によって分布の腹と節の影響を受けるため、特定の受音点のみによる解析で評価することは困難である。したがって、固有振動の方向を検出するためには複数点での測定が必要であると考えられる。

5. まとめ

本報では、運動エネルギー密度のパワースペクトルにより、室内音場に生じる固有振動の方向を検出できる可能性が示された。方向が解れば、低周波騒音の原因の特定や具体的対策の検討に資することが期待される。

本報では音場境界を剛壁としたが、実音場では壁面吸音や空気吸収の影響によりインパルス応答が減衰するため、固有振動の周波数分解能が低下する。そこで、今後減衰除去インパルス応答^[4]を算出することで、固有振動の方向検出において周波数分解能を向上できるか否かを検討する予定である。

【謝辞】本研究の一部は、文部科学省科学研究費助成事業2020年度研究活動スタート支援(課題番号:20K22454, 研究代表者:鈴木諒一)による。

【参考文献】[1] 秋山いづみ 他:「建築空間における音響固有振動による低周波音の不快感に関する検討」, 日本大学卒業論文, 2020年. [2] 鈴木諒一 他:「減衰除去インパルス応答による室内音場における固有振動の推定」, 日本音響学会誌, 76巻, 2号, pp.81-84, 2020年. [3] 日本建築学会 編:「はじめての音響数値シミュレーション プログラミングガイド」, コロナ社, 2012年. [4] T. Hanyu:「Analysis method for estimating diffuseness of sound fields by using decay-cancelled impulse response」, Build. Acoustics., 21, pp.125-134, 2012年.

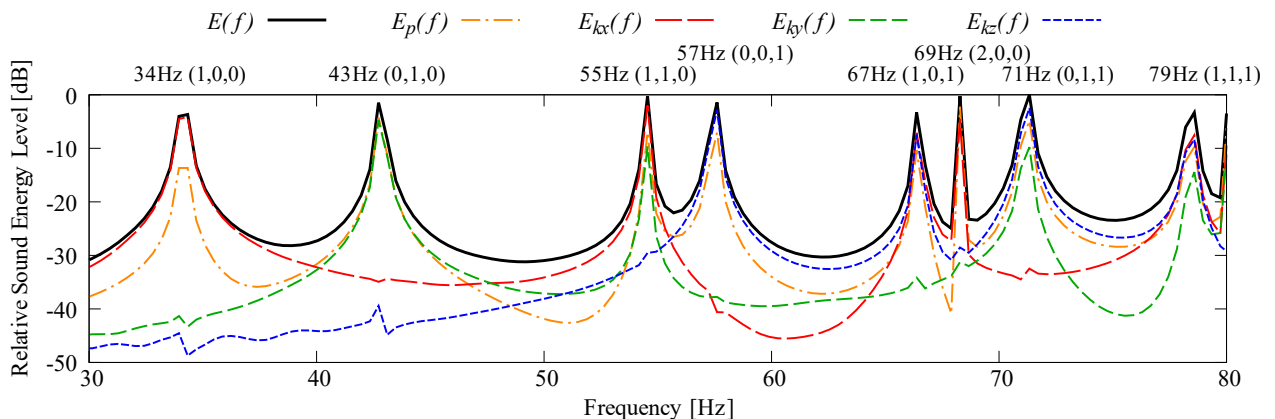


図2 受音点R1における各パワースペクトル

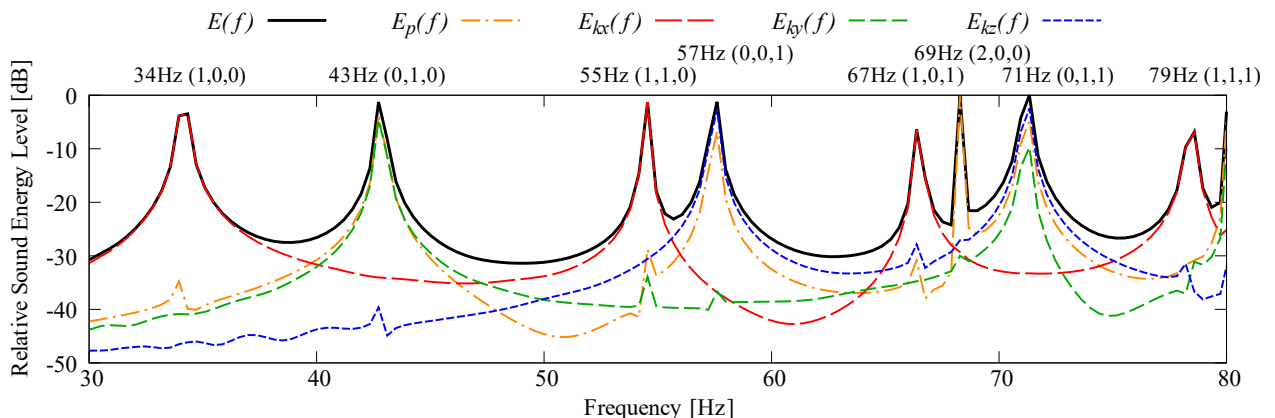


図3 受音点R2における各パワースペクトル