

ノート

音響粒子速度プローブによる音響インテンシティ計測の評価

西沢 啓子^{*1)} 神田 浩一^{*1)}

Evaluation of sound intensity measurement with particle velocity sensor probe

Keiko Nishizawa^{*1)}, Koichi Kanda^{*1)}

キーワード：音響インテンシティ，粒子速度プローブ，音圧，粒子速度

Keywords：Sound intensity, Particle velocity sensor probe, Sound pressure, Particle velocity

1. はじめに

防音材，機器騒音の評価では，音の強さを表す「音響インテンシティ」(音の伝搬方向に対して垂直な単位面積(1 m²)を単位時間(1 s)に通過する音のエネルギー：単位W/m²)が多く用いられる。材料の音響透過損失や機器騒音の音響パワーレベル計測は，JIS A 1441⁽¹⁾，JIS Z 8736⁽²⁾など音響インテンシティ法によるものがJISに規定されている。音響インテンシティを精度良く計測することが，防音材や機器の性能評価には重要である。

計測用のインテンシティプローブは2マイクロホン方式(以下，P-Pプローブ)が従来から用いられてきたが，音響粒子速度を直接計測できる音響粒子速度プローブ(以下，P-Uプローブ)が開発され，P-Pプローブと同等の実用性が期待されている。P-UプローブをP-Pプローブと同一環境で使用する際の比較・検証法は研究者の測定対象⁽³⁾⁽⁴⁾により異なり，基礎的条件下で比較した例は見当たらない。本研究では，無響室で音響インテンシティを測定し，P-Pプローブとの比較からP-Uプローブの測定精度を検証した。

2. 音響インテンシティ

2.1 音響インテンシティとは 音響インテンシティについての概念を以下に述べる。図1に示す仮想面を考える。その面に音圧 $p(t)$ が作用した結果，仮想面が速度(粒子速度) $u(t)$ で運動したと考えると，時間 dt の間に音圧がなす仕事(エネルギー)は式(1)で表される。音響インテンシティ I は，その時間平均をとって式(2)で表される⁽⁵⁾。

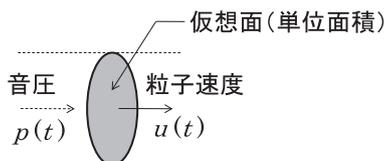


図1. 音のエネルギーの伝搬

$$dE = p(t)u(t)dt \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)u(t)dt = \overline{p(t)u(t)} \quad (2)$$

2.2 音響粒子速度の算出 音響インテンシティは，音圧と音響粒子速度から求める(式(2))。従来のP-Pプローブでは，図2および式(3)の通り，音響粒子速度 $u_r(t)$ をペアマイクロホンから得た2点の音圧 $p_1(t)$ と $p_2(t)$ の差(有限差分)から近似的に求める⁽⁶⁾。これに対してP-Uプローブは図3に示す音響粒子速度センサから，音響粒子速度を直接計測する。

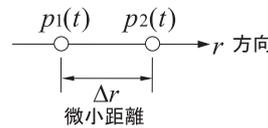


図2. 近接2点の音圧

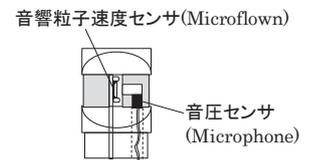


図3. P-Uプローブのセンサ

$$u_r(t) \approx -\frac{1}{\rho\Delta r} \int_{-\infty}^t [p_2(\tau) - p_1(\tau)]d\tau \quad (3)$$

ρ ：空気密度

3. 音響インテンシティ計測の評価

3.1 計測方法 基礎的条件下で検証する観点から，音波の進行方向が把握しやすい無響室(都産技研)で計測した。P-Pプローブ(ブリュエル・ケアー社製 Type 2683, 4197)，P-Uプローブ(マイクロフロン社製 PU-regular)それぞれについて，音波がインテンシティプローブを通過する際の音響インテンシティレベル LI (dB)を計測した。無響室での設置状態を図4に，測定システムを図5に示す。音源および受音位置は床から1.1 m，音源-受音位置間の距離は3 mとした。音源は1 kHz純音およびランダムノイズを用いた。純音についてはプローブマイクロホンで計測される音圧レベル(dB)も確認した。

事業名 平成23年度 基盤研究
*1) 光音技術グループ

3. 2 音響インテンシティの算出 LI は音響インテンシティ I の基準の音響インテンシティ I_0 に対する比から得られる(式(4))。音響インテンシティ I は、P-Pプローブでは計測された2点の音圧のクロススペクトル密度関数の虚部から求められ⁽⁵⁾、P-Uプローブにおいては音響粒子速度と音圧のクロススペクトル密度関数の実部から求める⁽⁵⁾。

$$LI = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

I_0 : 基準の音響インテンシティ (10^{-12} W/m²)

3. 3 計測結果 表1および図6に結果を示す。P-Pプローブはペアマイクロホンそれぞれにおける音圧レベルを示す。1 kHz純音の場合、音圧レベルと音響インテンシティレベルのいずれもP-PプローブとP-Uプローブの差は1 dB以内となった。

表1. プローブによる音圧レベルおよび音響インテンシティレベルの比較 (1 kHz純音)

	音圧レベル (dB)	音響インテンシティレベル (dB)
P-Uプローブ	86.8	85.9
P-Pプローブ	84.9/85.9	85.6

ランダムノイズについては、全ての周波数でP-UプローブとP-Pプローブの差は2 dB以内となった(図6)。160 Hzから3150 Hzにおいては、P-UプローブとP-Pプローブの音響インテンシティレベルは一致した。P-Pプローブのペアマイクロホンの仕様は周波数応答の変動幅を±2 dB⁽⁶⁾としており、P-UプローブはP-Pプローブと同等の実用性を持つことが示された。

3. 4 今後の課題 音響粒子速度センサの感度と位相は周波数応答が平坦ではないため、今回はプローブ付属のシグナルコンディショナの補正機能⁽⁷⁾を使用した。一方、P-Uプローブで精密な測定を行う場合、コンディショナによる補正よりも厳密な校正の必要性⁽³⁾⁽⁴⁾が指摘されており、校正方法については今後の課題である。

4. まとめ

本報告では、無響室におけるP-PプローブとP-Uプローブの音響インテンシティレベルを比較し、P-UプローブがP-Pプローブと同等の実用性を持つことが示された。校正方法の確立は今後の課題である。P-Uプローブは音響粒子速度を直接計測できることから、背景騒音の影響が少ない。また、プローブが小型であり試験体に近接した計測で音の透過や放射を詳細に把握できる。現場での実測や製品の改良に有効な装置であり、防音材の性能向上や機器騒音低減などの技術支援に役立つものと考えている。

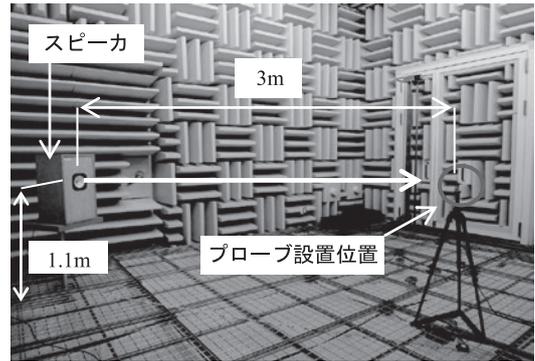


図4. 無響室における測定位置

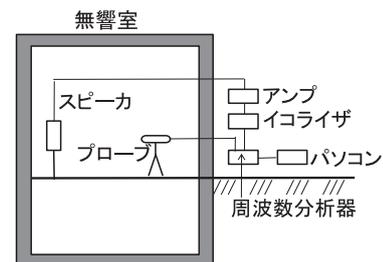


図5. 測定システム概要

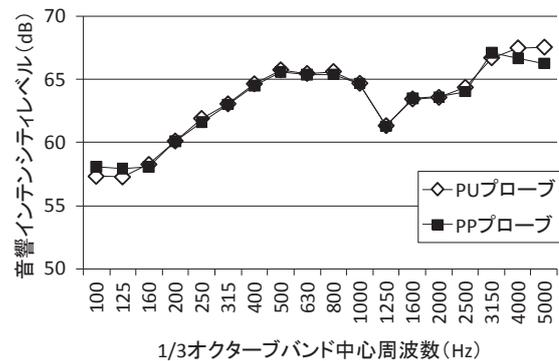


図6. プローブによる音響インテンシティレベルの比較 (ランダムノイズ)

(平成27年7月13日受付, 平成27年8月12日再受付)

文 献

- (1) JIS A 1441: 「音響インテンシティ法による建築物及び建築部材の空気音遮断性能の測定方法」(2007)
- (2) JIS Z 8736: 「音響インテンシティによる騒音源の音響パワーレベルの測定方法」(1999)
- (3) 大鶴 徹: 「粒子速度センサと使用事例」, 騒音制御, Vol.34, No.3, pp.205-210 (2010)
- (4) 安達光平・安田洋介・佐久間哲哉: 「PUプローブを用いた窓ガラスの音響透過損失測定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 環境工学 I, pp.209-210 (2010)
- (5) 橘 秀樹・矢野博夫: 「環境騒音・建築音響の測定」, p.4, pp.21-22, pp.161-162, コロナ社 (2004)
- (6) Product Data: “Sound Intensity Microphone Pair-Type4197-”, p.7, B&K
- (7) Data Sheet: “2 Channels signal conditioner”, pp.9-10, Microflown