

p-uセンサを用いた音響測定

猪頭惇*³ 大鶴徹*¹ 富来礼次*²
 鄭在訓*³ NAZLI BIN CHE DIN*³ (大分大)

1. 序

近年、deBree等は粒子速度センサ(以下、uセンサと記す)を開発し、その基本的有効性を示した¹⁾。岩瀬等は、このuセンサを適用した音響計測を試行している^{2,3)}。またdeBree等は、さらに小型マイクロフォン(以下、pセンサと記す)を組合わせた「puセンサ」を導入し、吸音特性の測定並びにインテンシティの計測^{4,5)}を行っている。しかし、puセンサの特性はまだ十分に明らかにされてない。また、puセンサを用いた測定方法が確立されていないのが現状と考える。

そこで、本研究ではまず、puセンサの校正手法を示した後、センサのノイズ特性と指向特性を示す。また、音圧、粒子速度およびインテンシティそれぞれのインパルス応答の測定へ適用した結果を示す。

2. puセンサの基本特性

2.1 puセンサの概要⁶⁾

Fig.1に本研究に用いたpuセンサ(MicroflownPT406-7)の概要を示す。puセンサはuセンサとpセンサを1/2インチマイクロフォンと同等寸法のカバー内に収めてお

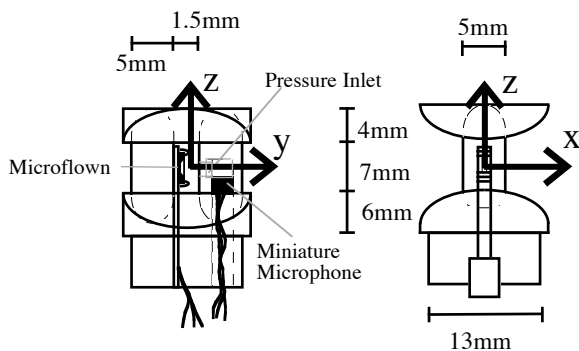


Fig. 1 Section view of Microflown PT406-7 and system of coordinates employed.

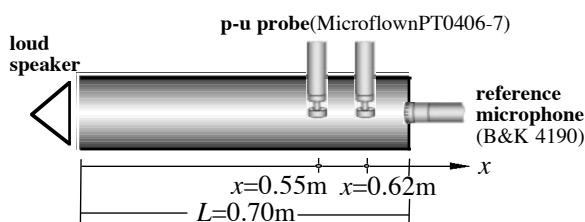


Fig. 2 Acoustic tube for calibration.

り、uセンサは1対の熱線微風速計で構成されている。

2.2 校正手法の改良

deBree等はuセンサに関して、次の2つの問題を指摘している⁵⁾。

1. 高周波数域での感度低下。
2. 周波数毎の位相特性の相違。

これらの影響を回避するため、deBree等は、音響管を用いたキャリブレーションを提案している^{5,7)}。Fig.2に本論でキャリブレーションに用いた音響管の概要を示す。管端の音圧の実測値を P_{ref} とすると、点 x の音圧 $P(x)$ 、粒子速度 $U(x)$ はそれぞれ次式で表される。

$$P(x) = \cos\{k(L-x)\} \cdot P_{ref} \quad \dots(1)$$

$$U(x) = \frac{i}{\rho c} \sin\{k(L-x)\} \cdot P_{ref} \quad \dots(2)$$

ここで、 k, ρ, c, i はそれぞれ波数、空気密度、音速、虚数単位である。一方、点 x のpuセンサで測定された音圧及び粒子速度を $P_m(x), U_m(x)$ とすると、(1), (2)式より、音圧、粒子速度の補正值 $C_p(\omega), C_u(\omega)$ は次式で

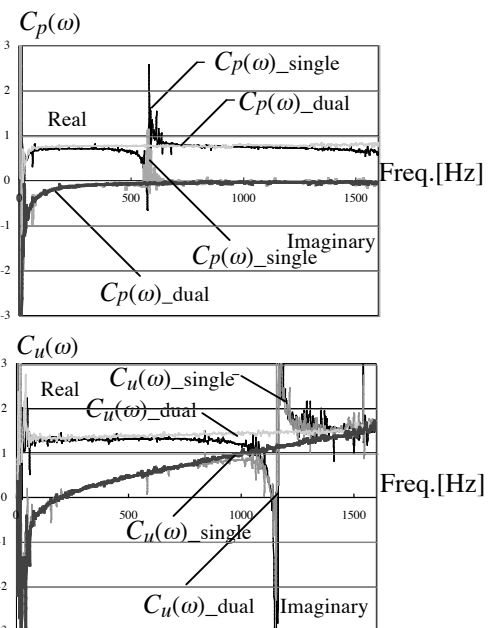


Fig. 3 Correction factor, $(C_p(\omega), C_u(\omega))$ for pu-sensor.

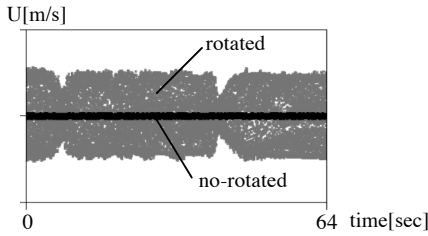


Fig. 4 Comparison of amplitude characteristics of u-sensor when rotated and no-rotated

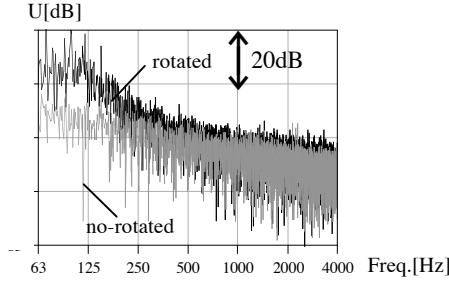


Fig.5 Comparison of frequency characteristics of u-sensor when rotated and no-rotated

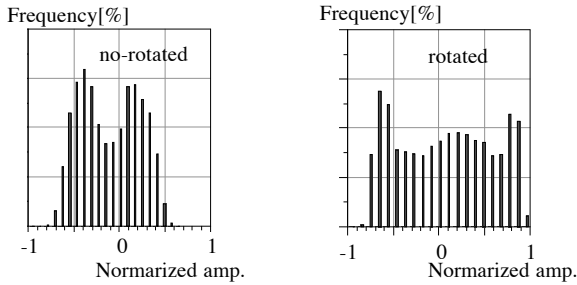


Fig.6 Frequency distribution of amplitude of u-sensor when rotated and no-rotated

得られる。

$$C_p(\omega) = \frac{P(x)}{P_m(x)}, C_u(\omega) = \frac{U(x)}{U_m(x)} \quad \dots(3)$$

ここで、 $P_m(x), U_m(x)$ は、定在波の影響のため、 $\lambda/4$ となる周波数で補正值が不定となる。Fig.3($C_p(\omega)_{single}, C_u(\omega)_{single}$)に示すように $x=0.55m$ の1ヶ所の測定結果から得られる補正值はピークディップが生じている。安定した補正值を算出するため、 $x=0.55, 0.62m$ の2ヶ所で測定した。2ヶ所の測定から得られた補正值はFig.3($C_p(\omega)_{dual}, C_u(\omega)_{dual}$)に示すとおり、100~1500Hzの全域にわたりほぼ安定した性能が得られるよう合成して用いた。

2.3 pu センサのノイズ特性

Microflown社のマニュアルによるとpセンサに比しuセンサの自己ノイズが大きいとされている⁷⁾。また、uセンサは熱線微風速計を用いるため、センサの移動に起因するノイズ(気流ノイズ)の発生が推測され

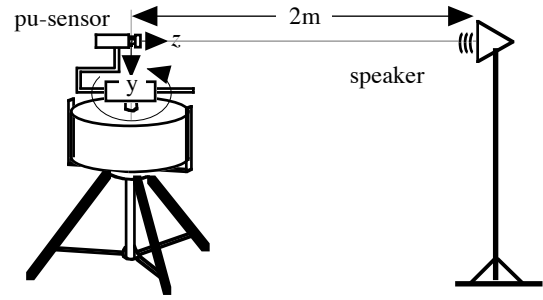


Fig.7 Outline of the directivity experiment

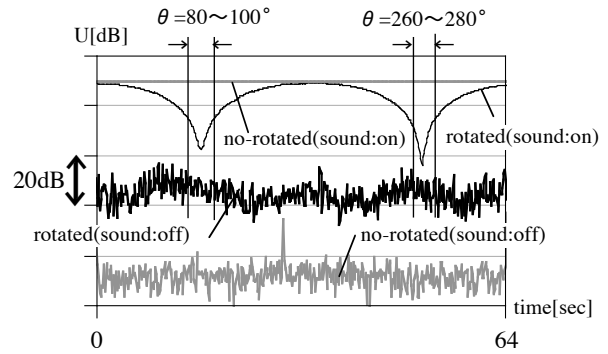


Fig.8 Characteristics of u-sensor when rotated and no-rotated(with/out sound source) at 250Hz

る。そこで、無響室で音源を用いず、uセンサ静止時と回転時のノイズ(自己ノイズ+気流ノイズ)の測定を行った。なお、回転速度は64sec/roundで、測定時間は64secとした。

結果をFig.4に示す。センサ回転時にノイズの増加が確認された。Fig.5にそれぞれの周波数特性を示す。センサ回転時は、250Hz以下の低周波数域でノイズが大きく、125Hzで20dB、500Hz以上で約3dBノイズが増加した。最後に、uセンサ静止時と回転時の振幅の度数分布をFig.6に示す。センサ静止時は2つの正規分布がみられ、センサ回転時では振幅の最大値と最小値の付近で度数が大きい。

2.4 pu センサの指向性

2.4.1 実験概要

Microflown社のマニュアルの中で、uセンサの指向性は簡単に示されているが、周波数毎の指向性は不明である。そこで、puセンサの周波数毎の指向性の測定を行う。Fig.1のようにx,y,z軸をとり、x-y,x-zの2平面について測定を行う。一例としてFig.7にx-z平面の実験概要を示す。なお、音源には250~8kHzの1oct.bandの中心周波数の純音

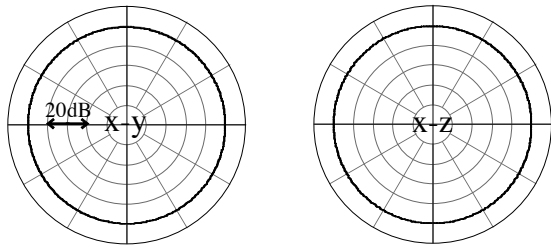


Fig. 9 Directivities of Microflown, p-sensors at 1kHz.

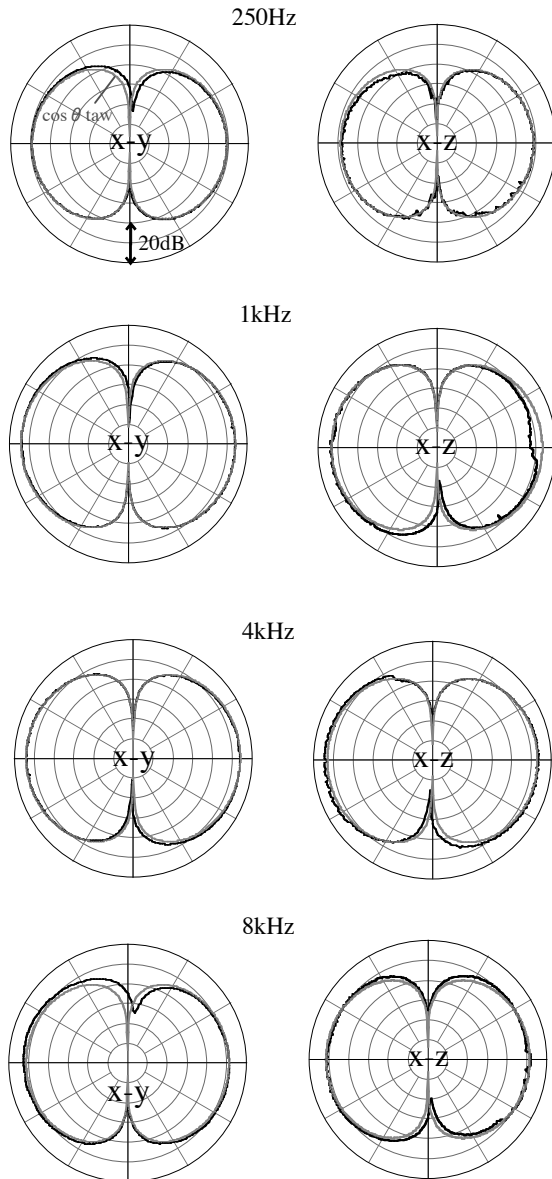


Fig. 10 Directivities of Microflown, u-sensor at difference frequency

を用い、センサは音源から2mの位置に設置した。

2.4.2 結果・考察

まず、センサ回転時のSN比の確認を行う。250Hzのセンサ静止時と回転時のuセンサの測定結果をFig.8に示す。比較のために音源なしの場合も併せて示している。セ

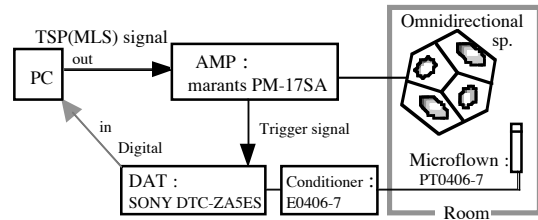


Fig.11 Block diagram of measurement system using TSP and MLS method

ンサ回転時のSN比は $\theta = 80 \sim 100^\circ, 260 \sim 280^\circ$ を除き、10dB以上確保できることが確認された。

得られた結果の一例としてpセンサの1kHzの指向性をFig.9に示す。x-y, y-z両平面ともにほぼ無指向性であることが示された。確認できた。なお、他の周波数でも同様の指向性が得られた。これはセンサ全体の形状やInletの効果によるものと考えられる。

続いて、250~8k Hzのuセンサの指向性をFig.10に示す。両平面ともに $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 付近を除き、およそ $\cos \theta$ 則に従う指向性となることが分かった。

3. puセンサを用いたインパルス応答測定法

3.1 インパルス応答測定法

線形時不変系では、信号 $x(t)$ があるシステムに入力された場合、出力される信号 $y(t)$ は、システムのインパルス応答 $h(t)$ とノイズ $n(t)$ の和であると仮定される。ここで、 $n(t)$ はシステムに存在する背景雑音に加え、測定するセンサの自己ノイズと背景も含まれる。uセンサによる測定を考える場合、特にuセンサは、pセンサに比し自己ノイズが大きく注意が必要であると考えられる。

3.2 測定手法の概要

本章では、puセンサを用いたインパルス応答の測定を試みた。MLS法及びTSP法による音圧と粒子速度のインパルス応答(以下、 $h_p(t), h_u(t)$ と表す)の測定を試みた。本論で用いたTSP法及びMLS法による測定システムの概要をFig.11に示す。両手法とも同期加算により、インパルス応答のSN比が向上し、前述の $n(t)$ は低下すると推測される。なお、測定信号の次数は17、サンプリング周波数44.1kHz、TSP信号の継続時間及びMLS信号の周期2.972sである。

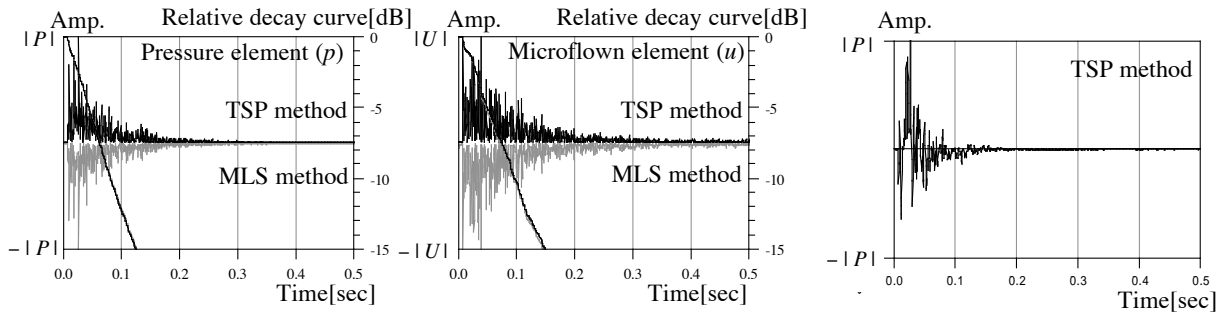


Fig.12 Comparison of measured impulse responses and decay curves using p-u sensor (TSP and MLS method)

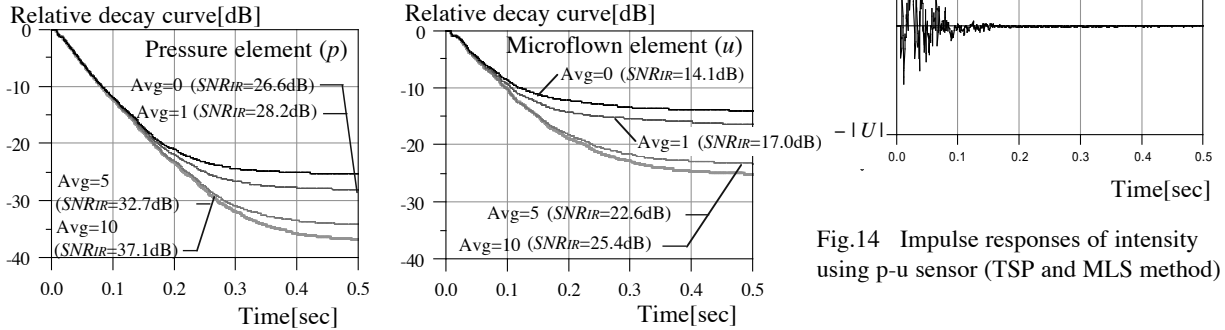


Fig.13 Comparison of decay curves using p-u sensor (TSP method)

Fig.14 Impulse responses of intensity using p-u sensor (TSP and MLS method)

3.3 MLS及びTSP法による測定結果

まず、同期加算5回の $h_p(t)$ 、 $h_u(t)$ をそれぞれ5set連続測定した。測定は大分大学の無響室、残響室、会議室(福祉環境工学棟3F)の3室で行った。

測定した $h_p(t)$ 、 $h_u(t)$ およびそれぞれの減衰曲線の一例をFig.12に示す。両手法による結果の間に、直接波・各反射波の位置、および減衰傾斜の良好な一致がみられた。また、両手法の $h_p(t)$ 、 $h_u(t)$ 間と5setの測定毎の $h_p(t)$ 、 $h_u(t)$ 間の相関係数の平均値は、共に0.959以上であり、十分な再現性が確認された。

続いて、同期加算による $h_p(t)$ と $h_u(t)$ のノイズ除去に関する比較を行うため、同期加算回数を0, 1, 5, 10回と変化させて測定した。 $h_p(t)$ 、 $h_u(t)$ から求めたSN比(SNR_{IR})と減衰曲線をFig.13に示す。同一の同期加算の $h_p(t)$ と $h_u(t)$ の SNR_{IR} の間には約11dBの差異がある。これは2.3節に示すuセンサの自己ノイズのためと考える。しかし、同期加算に関しては、 $n(t)$ の低減は $h_p(t)$ と $h_u(t)$ 共に同程度の効果が得られ、同期加算5回で約6dBのSN比の向上がみられた。

最後に、試行的に $h_p(t)$ 、 $h_u(t)$ からインテンシティのインパルス応答(以下、 $h_l(t)$)と表

す)を算出した。 $h_l(t)$ を以下に定義する。

$$h_l = \langle pu \rangle_{\Delta t}$$

ここで、 $\langle \rangle_{\Delta t}$ は時間 Δt で移動平均することを表す。 $\Delta t=0.005(\text{sec})$ で算出した結果をFig.14に示す。両手法毎の $h_l(t)$ の相関係数の平均値は0.83である。 $h_l(t)$ の算出方法やその利用方法については現在検討中である。

4. 結

以上、puセンサのノイズ特性と指向特性を検討した後、音圧、粒子速度およびインテンシティそれぞれのインパルス応答の測定へ適用した結果を示した。本研究の推進にあたり、卒論生の杵掛、三浦、村上の各君に協力を頂いた。また、H17年度学術振興会科学研究費(萌芽)16656173「アンビエントノイズによる建築材料の音響特性解明に関する研究」(代表・大鶴)の助成を頂いた。

参考文献

- 1) H-E de Bree, et al., Sensors and Actuators A 54(1996) 552-557.
- 2) 岩瀬昭雄,騒音制御:Vol.24,No.5(2000),pp339-343
- 3) 岩瀬昭雄,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-1,113-116,2003.9
- 4) R.Lanoye et al., ISMA 2004
- 5) H-E de Bree et al., Inter-Noise2004
- 6) Microflow Technologies,Manual Microflow PU-Probe model A, ver.1.0.6, 2002
- 7) H-E de Bree, et al, Sensors and Actuators A 54(1996) 552-557

*1 大分大学工学部・教授・工博
*2 同大学VBL研究員・博士(工学)
*3 同大学工学研究科・博士前期課程

*1 Prof., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. of Eng.
*2 P.D. Research Fellow, Venture Business Laboratory, Oita Univ., Ph. D
*3 Graduate School, Oita Univ.