

## 研究論文

建築材料の音響特性測定手法開発に関する研究  
- puセンサの基本特性とその応用 -

富来 礼次\*\*、大鶴 徹\*、猪頭 惇\*\*\*、ナズリ・ビン・チェ・ディン\*\*\*、鄭 在訓\*\*\*

Development of measurement method  
for absorption characteristics of building materials  
- Basic characteristics and applications of pu sensor -Reiji TOMIKU\*\*, Toru OTSURU\*,  
Atsushi IGASHIRA\*\*\*, NAZLI Bin Che Din\*\*\* and JEONG Jea Hun\*\*\*

In this study, basic characteristics of a sensor of the sound pressure and the particle velocity (pu sensor) are shown to measure absorption characteristics of building materials by the sensor. At first, calibration method of the sensor are explained and airflow noise characteristics generated when the sensor is moved are investigated. In addition directional patterns of the sensor are also clarified each frequency. Next, as applications of the sensor, impulse responses in rooms are measured by TSP or MLS method. Finally, absorption characteristics of two glass wool and sound intensity around the glass wool measured by the sensor are compared with those measured by pp sensor.

Keywords: pu-sensor, particle velocity, impulse response, sound intensity, absorption characteristics

## 1. 序

筆者等は従来より、建築材料の吸音特性の現場測定に関する検討を行ってきた<sup>1)</sup>。既報<sup>2)-4)</sup>において、de Breeが開発した粒子速度(u)センサ<sup>5),6)</sup>と小型マイクロフォン(p)を組合わせた「puセンサ」を導入し、より詳細な検討を開始した。一方、JacobsenはdeBreeとともに、puセンサによる音響インテンシティ測定法に関し、既往のpp法との原理的比較や実験を行った上で、正しく校正されたpuセンサはclass1のppセンサと同等のパフォーマンスが期待できること<sup>7),8)</sup>、また、近接場音響ホログラフィにおけるuセンサの優位性を示した<sup>9)</sup>。

本稿では、多方面への応用も期待されるpuセンサの校正方法やノイズ、指向性など基本特性を示すとともに、さらに室内のインパルス応答計測へ応用した測定例について概略を記す。最後に、建築材料の

吸音特性の測定へ適用する。

## 2. puセンサの基本特性

2.1 puセンサの概要<sup>10)</sup>

Fig.1に本研究に用いたpuセンサ(Microflown PT406-7)の概形を示す。puセンサはuセンサと小型コンデンサーマイクロフォンである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り、この形状やシリンダ内にマウントされたマイクロフォンの構成がセンサーとしての性能を高めるとされている。

ここでuセンサは、近接した一対の微小なワイヤ(プラチナ被覆のシリコン窒化物 (silicon nitride) 製)で構成され、直流電源によって約300°Cに熱せられている。なおワイヤの電気抵抗は温度に依存するが、de Breeによれば、その温度分布は音波に伴う粒子速度(ワイヤに対し垂直方向)によって瞬間的に変化する、とされている。その場合、もし空気の流れが片方のワイヤを他方より強く冷却したとする

平成18年1月7日受理

\* 大分大学 工学部 福祉環境工学科建築コース

\*\*大分大学 ベンチャービジネスラボラトリー

\*\*\*大分大学 大学院工学研究科

と、瞬間的な電気抵抗の差はブリッジ回路で検出でき、その差が粒子速度に比例するものとの仮定のもと粒子速度の測定原理が構成されている。

2.2 校正手法の改良

deBree等はuセンサに関し、以下二つの問題があると述べている<sup>9),11)</sup>。

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

これらに対し補正を行うため、deBree等は、音響管を用いたキャリブレーション法を提案している<sup>9),11)</sup>。また、付属のコンディショナーを用いることで簡便な利用も可能である。ただし、精密な測定では、より厳密なキャリブレーションが求められ、deBree等も音響管もしくは無響室を用いた方法を推奨している。しかし、既報<sup>9)</sup>のように、装置付属の音響管のみでは校正値が不定となる周波数が存在する。本節では、これを改良した方法を示す。

Fig.2に、キャリブレーションへ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。

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

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

ここで、 $k, \rho, c, i$ はそれぞれ波数、空気密度、音速、虚数単位である。puセンサにより、点 $x$ 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、音圧、粒子速度の補正值 $C_p(\omega), C_u(\omega)$ は次式で得られる。

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

ただし、 $P_m(x), U_m(x)$ は、定在波の影響のため、測定位置が管端から $\lambda/4$ および $\lambda/2$ となる周波数で補正值が不定となる。 $x=0.55m$ で測定された $P_m(0.55), U_m(0.55)$ より算出された補正值を、Fig.3では $C_p(\omega)_{single}, C_u(\omega)_{single}$ として示す。測定位置が管端から $\lambda/4$ となる周波数(約567Hz)で $C_p(\omega)_{single}$ が、 $\lambda/2$ となる周波数(約1133Hz)で $C_u(\omega)_{single}$ がピークディップを生じている。この影響を回避するため、 $x=0.62m$ でも同様の測定を行い、得られた補正值を、 $x=0.55m$ から得られた補正值と合成する。合成した補正值をFig.3では $C_p(\omega)_{dual}, C_u(\omega)_{dual}$ として示す。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いる。

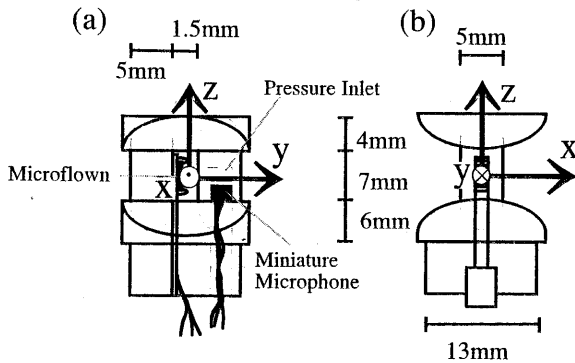


Fig. 1 Section view of Microflow PT0406-7 and system of coordinates employed.

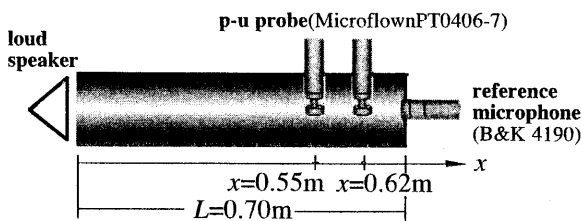


Fig. 2 Acoustic tube for calibration.

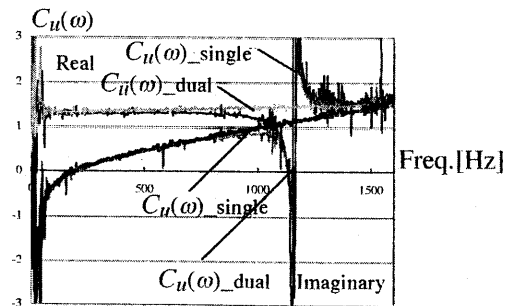
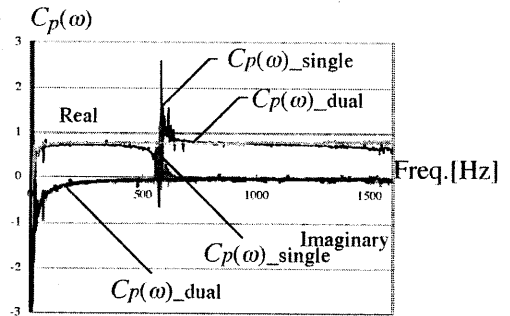


Fig. 3 Correction factor, ( $C_p(\omega), C_u(\omega)$ ) for pu-sensor.

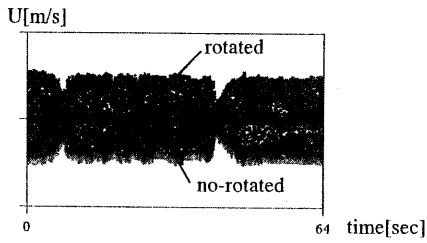


Fig. 4 Comparison of amplitude characteristics of u-sensor when rotated or no-rotated

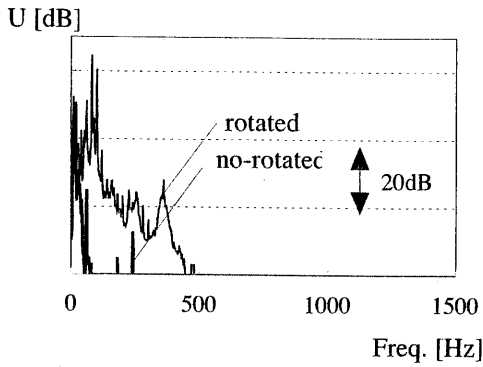


Fig. 5 Comparison of frequency characteristics of u-sensor when rotated or no-rotated

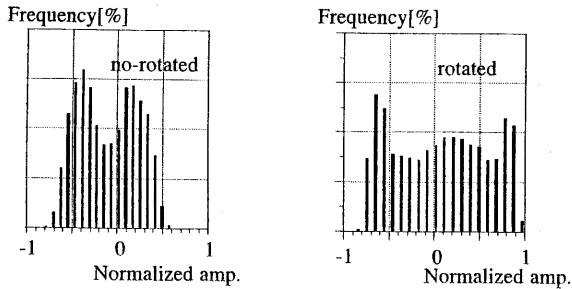


Fig. 6 Frequency distribution of amplitude of u-sensor when rotated or no-rotated

### 2.3 pu センサのノイズ特性

Microflown社のマニュアルによると、uセンサの自己ノイズはpセンサに比し大きいとされる<sup>9)</sup>。また、uセンサは熱線微風速計を用いるため、センサの移動もしくは気流に起因するノイズ(気流ノイズ)の発生が推測される。そこで、これらのノイズ特性について検討を行う。

まず、無響室で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。

ノイズの時間変動の結果を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

Table 1 Settings of experiment

	case0	case1	case2	case3	case4
radius (a) [mm]	0	424	847	847	847
rotation period [s]	0	66.5	66.5	33	16
tangential speed [mm/s]	0	40	80	161	332

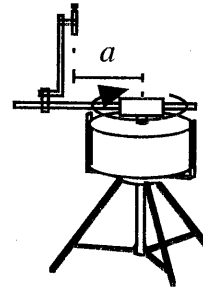


Fig.7 Rotation system for the measurement.

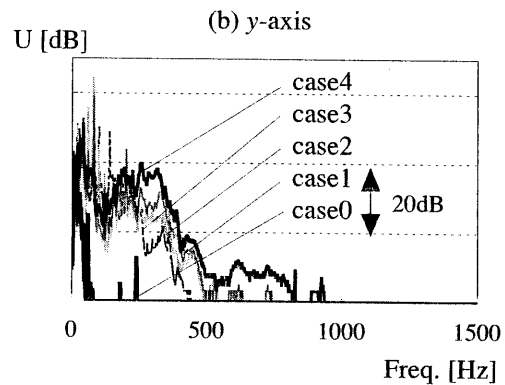
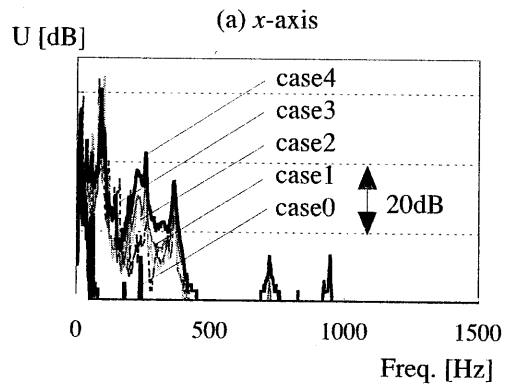


Fig.8 Relationship between noise and moving speed.

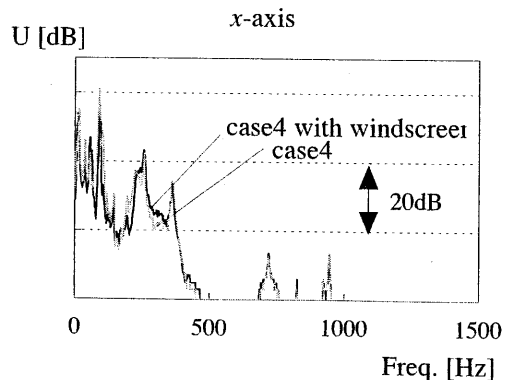


Fig.9 Comparison of noise between pu sensor with and without windscreen.

の周波数特性を示す。センサ回転時のノイズは、500Hz以下の低周波数域で大きく、125Hzで約40dB、250Hzで約20dB増加した。uセンサ静止時と回転時のノイズの振幅の度数分布をFig.6に示す。センサ静止時は二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。

続いて、センサの移動速度と発生するノイズの関係を検討する。センサの移動にはFig.7に示すようにマイクロホン回転装置 (B&K3923) を用い、回転半径および回転周期の変化により移動速度 (接線速度) を変化させた。検討に用いた回転半径、回転周期および移動速度 (接線速度) をTable 1に示す。case1, 2は回転周期が同一で回転半径を変化させ、case2~4は回転半径が同一で回転周期を変化させることで移動速度を変化させている。Fig.11に示すxおよびyの両方向でそれぞれcase1~4の移動を行う。

x方向、y方向それぞれの、移動速度とノイズの周波数特性との関係をFig.8に示す。静止時 (case0) に比べ、移動時は移動速度によらず明らかにノイズが大きい。また、移動速度によらず500Hz以下でノイズが現れている。さらに、ピークディップによる多少の入れ替わりがあるものの、case4で最大、case1で最小となっている。本センサを移動させて使用する

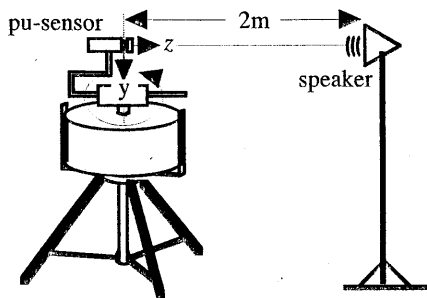


Fig.10 Settings for the measurement (x-z plan)

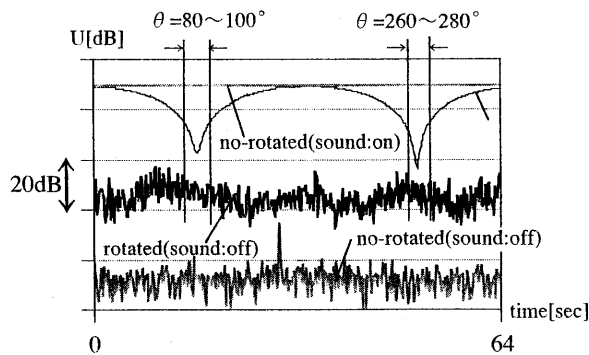


Fig.11 Characteristics of u-sensor when rotated or no-rotated(with/out sound source) at 250Hz

with and without windscreen.

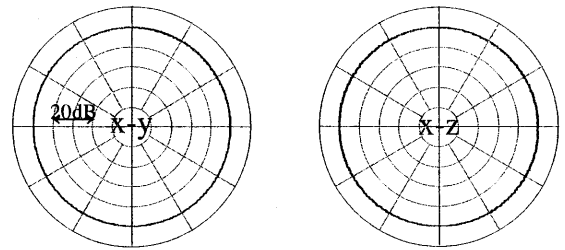


Fig. 12 Directivities of Microflow, p-sensors at 1 kHz.

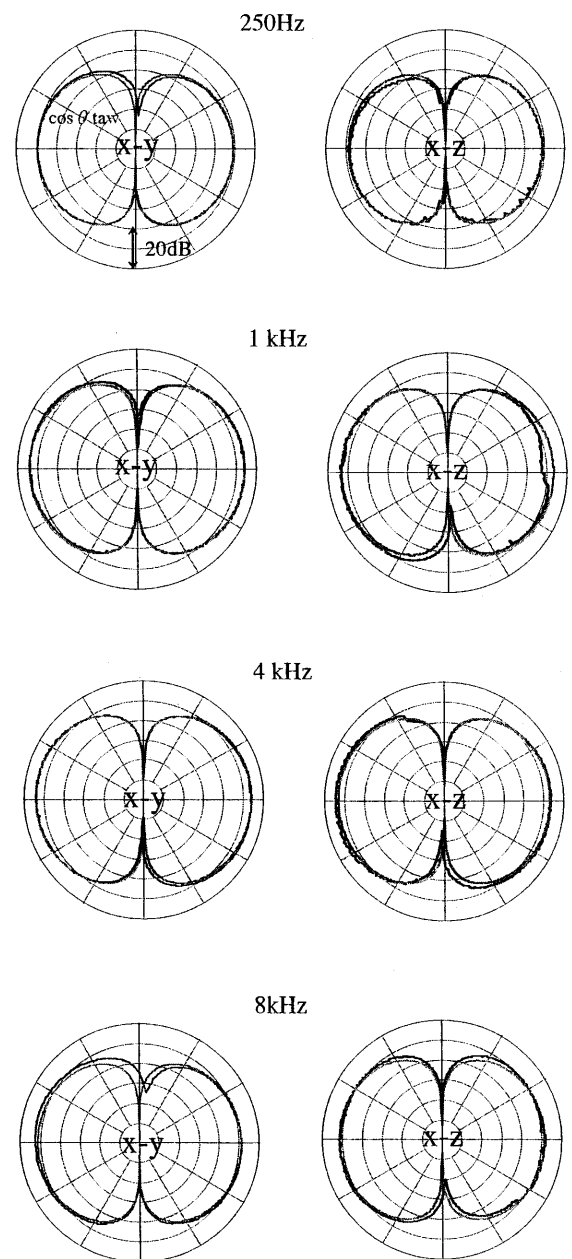


Fig. 13 Directivities of Microflow u-sensor at various frequencies.

場合や、気流のある場所で使用する場合は、特に500Hz以下のS/N比の確認が重要である。

最後に、 $x$ 方向にcase4で移動した場合の、防風スクリーン (RION WS10) の有無によるノイズの相違をFig.9に示す。今回の検討範囲では、防風スクリーンによる効果は見られなかった。

## 2.4 pu センサの指向性

### 2.4.1 実験概要

$u$ センサの指向性は、Microflow社のマニュアルの中でも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、 $p, u$ 両センサの周波数毎の指向性を測定した。Fig.1に示す $x, y, z$ 軸に対し、 $x-y, x-z$ 二平面の指向性を測定する。一例としてFig.10に $x-z$ 平面に関する実験概要を示す。マイクロホン回転装置の回転の中心にセンサを設置し、音源はセンサから2mの位置に固定した。なお、音源には250~8kHzの1oct.bandの中心周波数の純音を用いる。

### 2.4.2 結果・考察

前節の検討をふまえ、まず、センサ回転時のS/N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.11に示す。比較のため、音源なしの場合も併せて示している。なお、前節の結果より250Hzは測定周波数の中で最もS/N比が悪いものと予想される。しかし、センサ回転時のS/N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 $p$ センサの指向性測定結果の一例として1kHzをFig.12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。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、250~8kHzの $u$ センサの指向性をFig.13に示す。両平面ともに $90^\circ, 270^\circ$ 付近を除き、周波数に関わらず $\cos\theta$ 則に概ね従う指向性となることが示された。

## 3. インパルス応答の測定への応用

### 3.1 インパルス応答測定法

本章では、 $pu$ センサを用いたインパルス応答の測

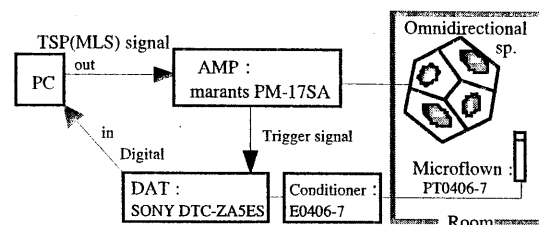


Fig.14 Block diagram of measurement system using TSP or MLS method

定を試みる。線形時不変系で、あるシステムに信号 $x(t)$ が入力された場合、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 $n(t)$ の和と仮定される。ここで、 $n(t)$ に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も含まれる。前章で示されたように、 $u$ センサは $p$ センサに比し自己ノイズが大きく特に注意が必要であると考えられる。

### 3.2 測定手法の概要

本研究では、現在建築音響の現場でインパルス応答の測定に一般的に用いられている、MLS法及びTSP法<sup>12)</sup>を利用し、音圧と粒子速度のインパルス応答(以下、 $hp(t), hu(t)$ 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.14に示す。両手法とも同期加算により、インパルス応答のS/N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。

### 3.3 MLS及びTSP法による測定結果

まず、同期加算5回の $hp(t), hu(t)$ をそれぞれ5 set連続測定した。測定は大分大学の無響室(約70m<sup>3</sup>)、残響室(約168m<sup>3</sup>)、福祉環境工学棟会議室(約260m<sup>3</sup>)の3室で行った。

測定した $hp(t), hu(t)$ およびそれぞれの減衰曲線の一例をFig.15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。TSP法、MLS法両手法間および5set測定毎の相関係数の平均値は、 $hp(t), hu(t)$ ともに0.959以上となり、十分な再現性が確認されたと考える。

続いて、同期加算による $hp(t)$ と $hu(t)$ のノイズ除去に関する比較を行う。使用した同期加算回数は0.1,

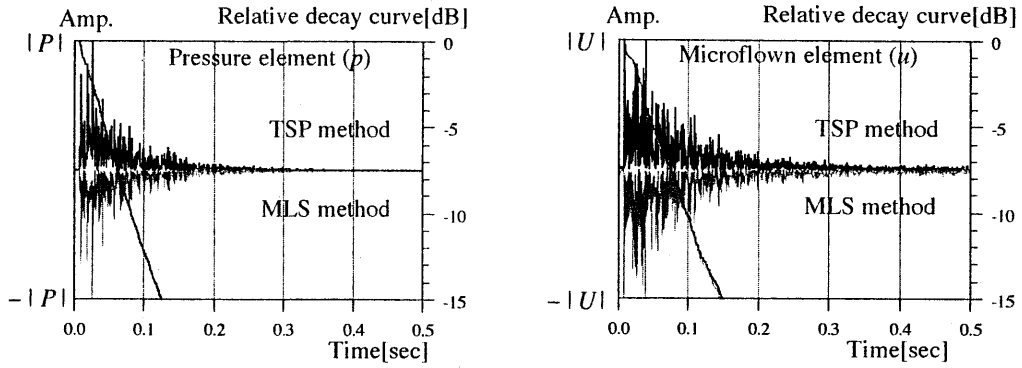


Fig.15 Comparison of measured impulse responses and decay curves using p-u sensor (TSP and MLS method)

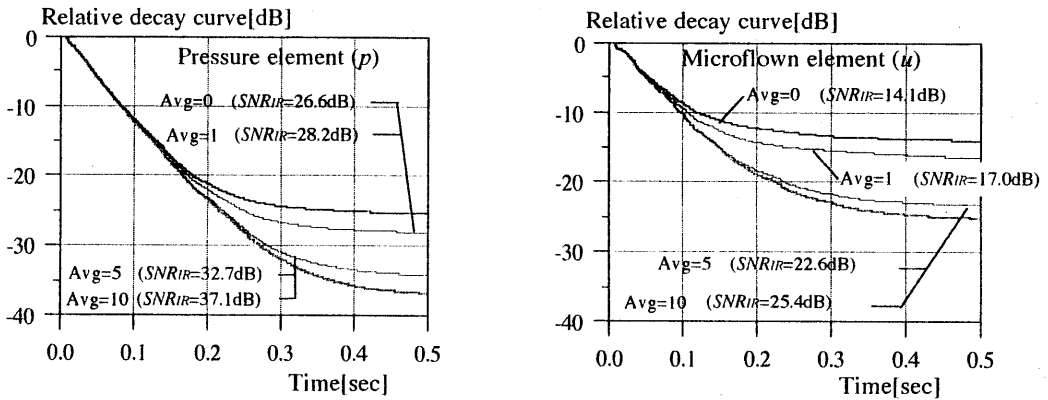


Fig.16 Comparison of decay curves using p-u sensor (TSP method)

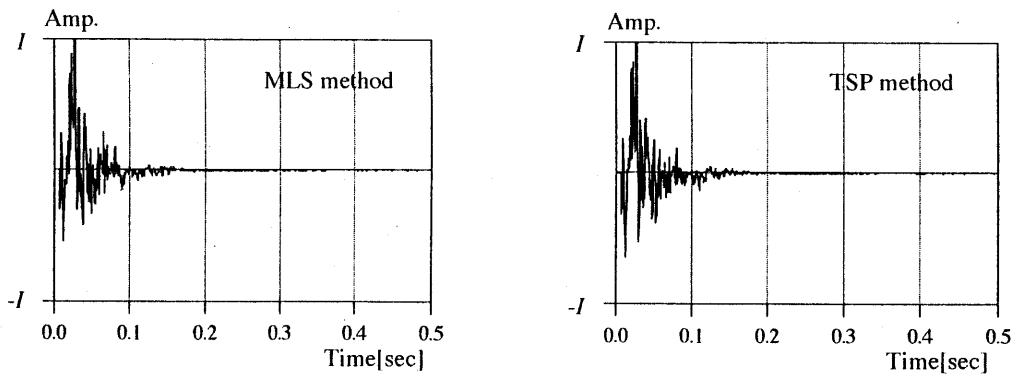


Fig.17 Impulse responses of intensity using p-u sensor (TSP and MLS method)

5,10回の4種である。 $hp(t)$ 、 $hu(t)$ から求めたS/N比 ( $SNR_{IR}^{13}$ )と減衰曲線をFig.16に示す。同期加算が同一の $hp(t)$ の $SNR_{IR}$ と $hu(t)$ の $SNR_{IR}$ との間には約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、同期加算による $n(t)$ の

低減は、 $hp(t)$ と $hu(t)$ 共に同程度の効果が得られ、同期加算5回で約6dBの $SNR_{IR}$ の向上がみられた。以上より、 $hu(t)$ は $hp(t)$ に比べ多くの同期加算回数を必要とするものの、本センサにより測定可能と考える。最後に、試行的に $hp(t)$ 、 $hu(t)$ からインテンシティの

インパルス応答(以下、 $h_f(t)$ と表す)を算出した。 $h_f(t)$ を以下に定義する。

$$h_f(t) = \langle pu^* \rangle_{\Delta t} \quad (4)$$

ここで、 $\langle \rangle_{\Delta t}$ は時間 $\Delta t$ でのアンサンブル平均を表す。 $\Delta t=0.005\text{sec}$ で算出した結果をFig.17に示す。TSP法、MLS法両手法間の $h_f(t)$ の相関係数の平均値は0.83である。 $h_f(t)$ の算出方法やその利用方法については今後の検討課題とする。

## 4. 材料の吸音特性測定への応用

### 4.1 垂直入射インピーダンスの測定

音響管を用い、puセンサによる垂直入射インピーダンスの測定を行う。Fig. 2に示す管内の $x = L$ に測定試料が設置されたとすると、試料の垂直入射インピーダンス $z$ は、

$$z = -\frac{H_m(x)\cos k(L-x) - ipc \sin k(L-x)}{iH_m(x)\sin k(L-x) - \rho c \cos k(L-x)} \quad (5)$$

で求められる。ただし、 $H_m(x) = P_m(x)/U_m(x)$ 。厚さ50 mmのグラスウールの測定結果を、Fig. 18で2マイクロホン法による測定結果<sup>1)</sup>およびMikiの式による計算結果<sup>14)</sup>と比較する。300Hz以下の実部で多少の差異は認められるものの、三者は良く一致しており、puセンサによるインピーダンス測定結果の妥当性が示されたと考える。

### 4.2 材料周辺の音響インテンシティの検討

残響室内で4台の音源スピーカから無相関ノイズを

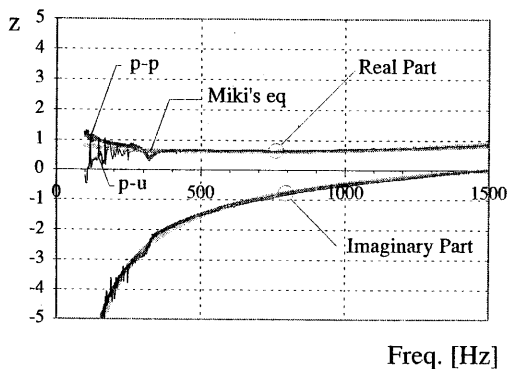


Fig.18 Comparison of normal acoustic impedance ratio. (Miki's eq. vs. by pp or by pu sensors)

出力し、室中央部に設置した試料上方1 cm の6点(10 cm 間隔 $2 \times 3$ の格子点)でアクティブ及びリアクティブインテンシティを求めた。試料は900mm $\times$ 1800mmのグラスウール(厚さ50mmと25mmの二種、それぞれGW50、GW25と略記)にコンクリート素面を加えた3種とした。なお試料中央部でEA-Noise法<sup>1)</sup>を適用するとGW50とGW25の吸音特性が安定的に得られ、かつ、両センサ方式で値が概ね一致することを予め確認している(Fig. 19)。アクティブベクトルインテンシティ計測結果の一部をFig. 20に示す。吸音が大なほど材料への入射角が小さく垂直入射に近くなっている。

## 5. 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報告した。また、建築材料の吸音特性の測定へ適用し、結果の妥当性を示した。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) Yasuo Takahashi, Toru Otsuru, Reiji Tomiku : In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise, Applied Acoustics, Vol. 66, Issue 7, pp. 845-865, 2005
- 2) 大鶴徹, 高橋康夫, 富来礼次, 鍋田健二 : アンビエントノイズを用いた材の吸音特性のIn Situ測定

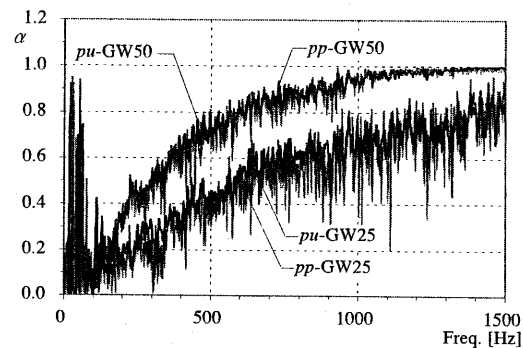


Fig.19 Sound absorption coefficients of GW50 and GW25 measured by EA-noise method with pp or pu sensors.

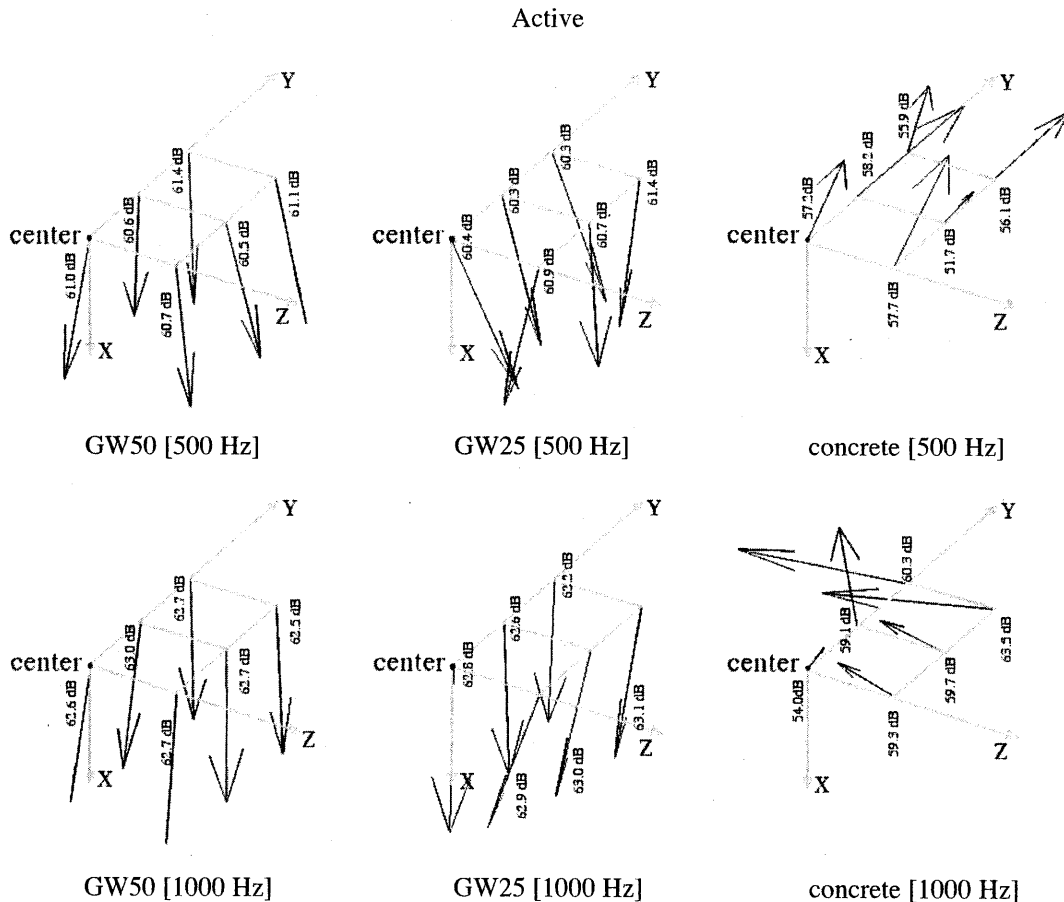


Fig. 20 Active-vector-intensity levels around samples(GW50, GW25, Concrete), 1/3 Oct. bands centered at 500 and 1000 Hz

法-*p-u*センサを用いた検討-, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 1095-1096, 2004年9月

3) 大鶴徹, 富来礼次, 高橋康夫: アンビエントノイズを利用した材料の吸音特性の*in-situ*測定に関する研究-*pp*センサおよび*pu*センサによる検討-, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp. 857-858, 2005年3月

4) 大鶴徹, 富来礼次, 猪頭惇: アンビエントノイズを利用した材料の吸音特性の*in-situ*測定に関する研究-*pu*センサの基本特性とその応用-, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 1013-1014, 2005年9月

5) H-E de Bree, et al., The Microflown: a novel device measuring acoustical flows, *Sensors and Actuators A* 54, pp. 552-557, 1996

6) Iwase, T., Yoshihisa, K., Measuring Method of Sound Reflection and Absorption Characteristics Based on the Particle Velocity and its Applications to Measurements on Such as Drainage Pavement of Road Surface, *Inter-noise2003*, pp. 697-704, 2003.

7) Jacobsen, F., de Bree. H-E., Intensity-based sound

power determination under adverse sound field conditions: p-p probes versus p-u probes, *ICSV12(CD-ROM)*, 2005.

8) Jacobse, F., de Bree, H-E, A comparison of two different sound intensity measurement principles, *J. Acoust Soc. Am.*, 118(3), pp. 1510-1517, 2005

9) Jacobse, F., de Bree, H-E, Near field acoustic holography with particle velocity transducers, *J. Acoust Soc. Am.*, 118(5), pp. 3139-3144, 2005

10) Microflown Technologies, Manual Microflown PU-Probe model A, ver.1.0.6, 2002

11) H-E de Bree et al., Sound intensity measurements with the Microflown sensors, *Inter-Noise2004*

12) 佐藤史明: 室内音響インパルス応答の測定技術, 日本音響学会誌58巻10号, pp. 669-676, 2002

13) 内之浦祐樹, 大鶴徹, 富来礼次, 高橋康夫, 豊増美喜, 山本みどり: 室内音響インパルス応答の測定誤差に関する研究-背景雑音に起因する測定誤差に関する数値実験-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp. 137-138, 2003年9月

14) Miki, Y. : Acoustical Properties of Porous Materials - Generalizations of Empirical Models-, *J. Acoust. Soc. Jan. (E)*, Vol.11, No.1, pp.25-28, 1990. 1