

# 超音波風速計による非等温室内気流計測

## —温度変動が風速および温度計測に及ぼす影響—

Measurement of Buoyancy-Affected Room Airflow with Ultrasonic Anemometer

—Influence of Temperature Fluctuation on Measurement of Velocity and Temperature—

村上 周三\*・加藤 信介\*\*・北澤 智一\*\*・崔 棟 皓\*\*

Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO, Tomokazu KITAZAWA and Dongho CHOI

### 1. はじめに

超音波風速計は複雑な3次元室内気流を計測するための有力な測器の1つである。従来より、これを用いて室内気流の乱流性状の詳細な解析が行われている。小林等<sup>1)</sup>は閉鎖的空間内の乱流性状について、また宗像等<sup>2)</sup>は実在するクリンルーム内の乱流性状について3次元超音波風速計を用いて詳細な検討を行っている。

超音波風速計は、非等温気流においても各種乱流統計量算出のための変動風速、変動空気温度を計測する測器として有力な候補と考えられる。今回、これを用いて模型室内の非等温気流を対象とし変動風速の計測を行い、その結果を検討した<sup>3)</sup>。

用いた送受時分割(ワンヘッド)方式超音波3次元風速計(スパン5cm, 図1(1))による風速測定では平均風速に関しては妥当な結果が得られたが、変動風速に関しては特に温度勾配の大きい場所で精度の低い結果を得た。

### 2. ドライヤーを利用した温風測定実験

#### 2.1 ワンヘッド方式の場合(図2)

室内気流計測用のワンヘッド方式超音波風速計を用いて市販のヘアドライヤーによる温風の測定を行う<sup>(1)</sup>。浮力による乱流エネルギー $k$ の生産の影響をチェックするために吹出気流は鉛直上向きと下向きの場合の2種類で、それぞれヒーターをON, OFFさせた時のドライヤー

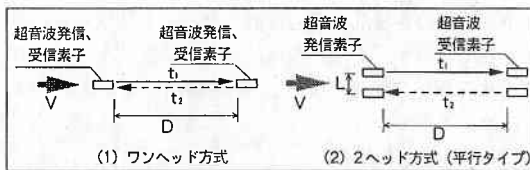


図1 超音波風速計ワンヘッド方式と2ヘッド方式の比較

\*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

\*\*東京大学生産技術研究所 第5部

の吹出気流を測定する。吹出気流の測定結果を図2に示す。吹出噴流の方向に拘らずヒーターをONさせるとOFFの場合に比べて風速変動の指示値は著しく大きくなり、等温時の計測値とはまったく異なる異常な結果を示す。これは室内非等温実験の結果と対応するもので切替時間内の温度変動に基づく誤差を示している。

#### 2.2 2ヘッド方式<sup>(2)</sup>の場合(図3)

主に屋外風を測定対象とする2ヘッド方式超音波風速計(平行タイプ, 3次元, スパン20cm, 図1(2))を用いて非等温流れ場を測定した結果を図3に示す。実験は

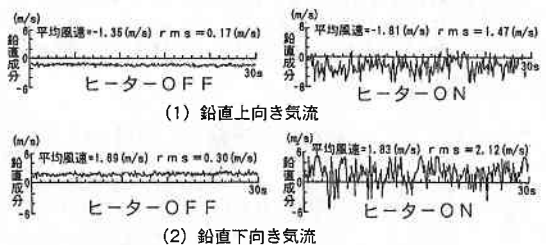


図2 ワンヘッド方式における風速時系列データ

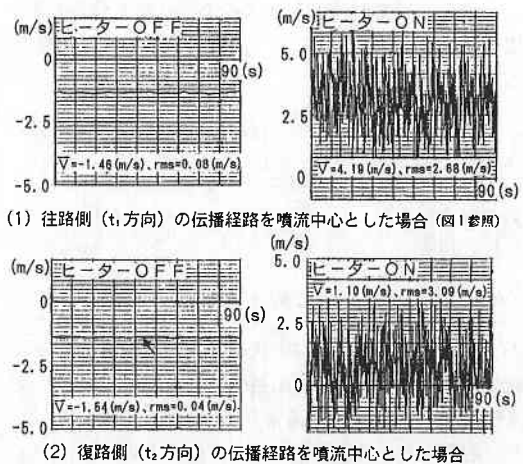


図3 2ヘッド方式における風速時系列データ

## 研究速報

ワンヘッド方式に準じて行う。2ヘッド方式では図1(2)に示すように超音波の伝播路が往復で一致しない(この場合 $L \approx 4$  cm)。実験はこの両者の伝播路に対しそれぞれ往路側(図3(1))、復路側(図3(2))が噴流の中心となるようにして2ケース行う。両ケースともヒーターをON, OFFさせる。吹出気流は鉛直下向きである。往路側、復路側ともヒーターOFFの場合に比べONの場合は風速変動の指示値が著しく大きくなり異常な値を示す。またヒーターONの時、噴流が往路側の中心を通った場合と復路側の中心を通った場合を比較すると両者の平均風速の指示値はまったく異なる。これは後述するように2組の伝播経路における風速、温度が大きく異なるため生じる誤差を示しており、式(3)の $C_1, C_2$ の測定誤差に起因する。

3. 超音波風速計の測定原理と誤差要因<sup>4),5)</sup>

超音波風速計は周知のように2点間を互いに逆行する超音波信号の伝播速度差を検出し、風速ならびに音速(流体温度)を計測する。図1に示すように伝播軸成分の流速を $V$ とすると伝播時間 $t_1, t_2$ は(1), (2)式のように表される。

$$t_1 = D_1 / (C_1 + V_1) \quad (1) \quad t_2 = D_2 / (C_2 - V_2) \quad (2)$$

また、(1), (2)式より風速 $V_A$ 、音速 $C_A$ は(3), (4)式のように算出される。

$$V_A = (V_1 + V_2) / 2 = 1/2 (D_1/t_1 - D_2/t_2) - (C_1 - C_2) / 2 \quad (3)$$

$$C_A = (C_1 + C_2) / 2 = 1/2 (D_1/t_1 + D_2/t_2) - (V_1 - V_2) / 2 \quad (4)$$

(3), (4)式はスパン長 $D_1, D_2$ および風速 $V_1, V_2$ 、音速 $C_1, C_2$ が同一であれば(5), (6)式のように簡略化される。実用の測器では(5), (6)式により風速、音速の算出がなされる。

$$V_A = (D/2) (1/t_1 - 1/t_2) \quad (5)$$

$$C_A = (D/2) (1/t_1 + 1/t_2) \quad (6)$$

空気の場合、温度 $T_{SV}$ は音速 $C_A$ より(7)式を用いて算出される。

$$C_A = 20.067 (T_{SV})^{1/2} \quad (7)^{3)}$$

図1(1)のようにワンヘッド方式超音波風速計は1つの風速成分を測定するのに1組の送受波器を用いており、送波と受波を一定時間毎(通常9 ms程度)に切り替えて交互に超音波パルスを発信させるものである。したがってスパン長 $D_1, D_2$ や2組の伝播経路は完全に一致する

が、風速 $V_1, V_2$ および音速 $C_1, C_2$ の同一性は保障されない。したがって風速算定の場合、(3), (5)式の比較で明らかのように $(C_1 - C_2) / 2$ の存在が誤差となる。また、音速(流体温度)算定の場合、(4), (6)式の比較から $(V_1 - V_2) / 2$ が誤差となる。一方、2組の送受波器を用いる方式(図1(2))では、超音波信号は同時に発信されているが2組の伝播経路が同地点でないため、やはり風速 $V_1, V_2$ および音速 $C_1, C_2$ の同一性は保障されない。したがって、ワンヘッド方式と同様に $(C_1 - C_2) / 2, (V_1 - V_2) / 2$ の差異が風速、音速算定の際の誤差となる。また、ヘッドサポートに十分な剛性が保障できないためスパン長 $D_1, D_2$ に微小な差が生じ測定精度に少なからぬ影響を与えることもある。

4. 室内非等温実験における風速測定例<sup>3)</sup>

## 4.1 測定結果

風速はワンヘッド方式超音波風速計(スパン5 cm)、温度はT型( $C_U - C_D$ )熱電対で測定した。実験の詳細は文献3を参照されたい。結果の諸量は無次元化して示す<sup>4)</sup>。図4, 5に非等温の風速ベクトル分布と温度分布を示す。床吹出口Aからは27°C, 2 m/s, 内部発熱体上部の吹出口Bからは63°C, 0.8 m/sの吹出空気が鉛直上向きに吹き出され、その中間位置で両者は衝突し、その付近では温度の空間勾配が大きくなっている。図6に等温と非等温のスカラー風速分布と乱流エネルギー $k$ の分布を示す。スカラー風速 $U$ は等温と非等温とでは大きな違いはない。また、測定された平均風速は、同じ流れ場を対象として行った数値シミュレーション結果とも一致<sup>3)</sup>、妥当な値と判断される。一方、乱流エネルギー $k$ の指示値は非等温の場合、温度の空間勾配が大きい所( $X=3.3 \sim 5.8$ の上部付近)で著しく大きい値となる。非等温時、乱流エネルギー $k$ の値が著しく大きな値を示す測定点(たとえば $X=5.0, Z=6.0$ 付近)の変動風速と、同じ地点の等温時の変動風速の時系列データを図7に示す。非等温の場合、風速値は短い周期で大きな変動を示し、等温の場合と比べ明らかに異常である。

## 4.2 非等温実験における特徴スケールの算定

乱流数値解析および実験値により温度勾配の大きい所と小さい所の各種乱流量の特徴スケールを見積もった結果を表1に示す。また、各種乱流量の特徴スケールの算定方法を以下に示す。まず、 $\theta^2$ の局所平衡を(8)式のように仮定する。

$$\varepsilon_\theta = P_\theta / 2 \quad (8)$$

次に、温度変動の時間スケール $T_\theta$ と速度変動の時間スケール $T_u$ の比 $R$ を0.8とする((9)式)。

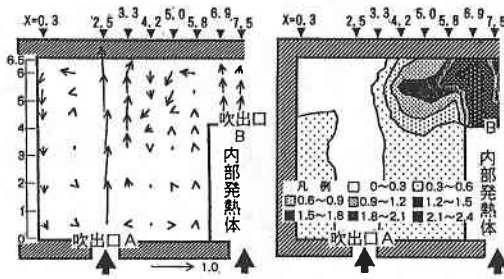


図4 風速ベクトル分布 (非等温)<sup>(4)</sup> 図5 温度分布<sup>(4)</sup>

一方、速度変動のスケール  $u$  は  $k$  ( $u = \sqrt{2/3k}$ ) より、速度変動の長さスケール  $l$  は(12式より算出した。

$$l = C_u k^{2/3} / \varepsilon \quad (C_u : 0.09) \quad (12)$$

なお、 $k$ ,  $\frac{\partial \theta}{\partial x_i}$  は実験値、 $\varepsilon$ ,  $\overline{\theta^2}$  は数値計算結果の値を用いた。ただし、温度勾配の大きい所の  $k$  は数値計算の値を用いた。また、 $\Delta C$  は(7式)を利用して求める。温度勾配の大きい所では  $\sqrt{\overline{\theta^2}}$  は  $2.9^\circ\text{C}$ 、これは温度変化に対応する音速の変化  $\Delta C$  に換算して約  $2 \text{ m/s}$  になる。また、速度変動のスケール  $u$  は  $0.2 \text{ m/s}$  であり  $\Delta C/u$  の値は 10 程度である。温度勾配の小さい所では  $\sqrt{\overline{\theta^2}}$  は  $0.3^\circ\text{C}$ 、 $\Delta C$  に換算すると約  $0.2 \text{ m/s}$  である。  $u$  は  $0.1 \text{ m/s}$  で  $\Delta C$  とほぼ同一オーダーである。温度変動のタイムスケール  $T_\theta$  は温度勾配の大きな所では 1 秒、温度勾配の小さな所では 6 秒である。また、乱れの長さスケール  $l$  は両地点ともほぼスパン長  $D$  (5 cm) に対応するが、温度勾配の大きい所では超音波風速計のスパン長 5 cm よりやや小さく 3 cm である。

### 5. 考察

超音波風速計では(5), (6)式のように  $V_A$ ,  $C_A$  をスパン長  $D_1$ ,  $D_2$  および風速  $V_1$ ,  $V_2$ , 音速  $C_1$ ,  $C_2$  が同一であるとして算出する。ワンヘッド方式の場合、一定時間毎に超音波パルスを交互に発信させているため音速  $C_1$ ,  $C_2$  および風速  $V_1$ ,  $V_2$  は完全に同一ではない。風速算出の際、温度勾配の大きな所で切替時間内に温度変動があった場合、音速  $C_1$ ,  $C_2$  は変化し、(3式)に示すように  $(C_1 - C_2)/2$  の存在が誤差となる。室内気流では音速  $C$  が風速  $V$  の 100~1000 倍以上の値をとることが普通であり、 $C_1$ ,  $C_2$  が変動すれば、これに基づく誤差は相対的にかなり大きくなる。また、音速 (温度) 算定の際、(4式)に示すように  $(V_1 - V_2)/2$  が誤差となるが風速算定の場合とは逆に室内気流では風速は音速より十分小さいのでその影響は小さい。一方、2ヘッド方式は超音波信号を同時に発信させているが2組の伝播経路が同地点にないため、風速および温度の空間勾配の大きい所では両経路における風速、温度 (音速) は大きく異なる。この音速  $C_1$ ,  $C_2$ , 風速  $V_1$ ,  $V_2$  の差異により風速および温度算定に誤差が生じる。

今回、室内非等温実験の風速測定では温度勾配の大きい所で  $T_\theta$  が 1 秒前後で  $\sqrt{\overline{\theta^2}}$  が  $3^\circ\text{C}$  程度である。  $T_\theta$  は切替時間 (9 ms) の約 100 倍あるが、室内気流では一般に  $\theta$  の数百 Hz までの高周波成分の寄与は大きく、これに基づく高周波の音速  $C$  の変動は避けられないので風速測定に対する  $\sqrt{\overline{\theta^2}}$  の影響がかなり大きくなるものと考えられる。なお、ワンヘッド方式では平均風速、平均

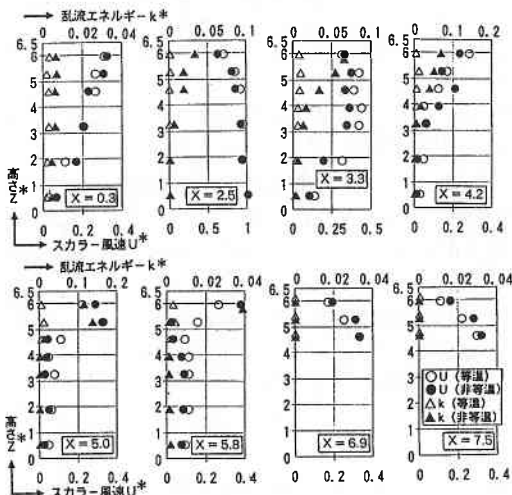


図6 スカラー風速Uと乱流エネルギーkの鉛直分布 (等温, 非等温)<sup>(4)</sup>

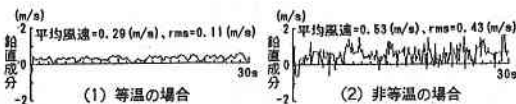


図7 非等温よが大きい所の風速時系列データ ( $x=5.0$ ,  $z=6.0$ )

表1 非等温場の各種乱流量と特徴スケール

算出場所	スケール	$\sqrt{\overline{\theta^2}}$ (°C)	$T_\theta$ (s)	$\Delta C$ (m/s)	$u$ (m/s)	$T_u$ (s)	$l$ (m)
温度勾配大 ( $X=4.2, Z=6.0$ 付近)		2.9	1.1	2.0	0.2	1.4	0.03
温度勾配小 ( $X=4.2, Z=2.0$ 付近)		0.3	6.2	0.2	0.1	7.8	0.07

$$R = T_\theta / T_u = \{(\overline{\theta^2}/2)/\varepsilon_\theta\} / (k/\varepsilon) = 0.8 \quad (9)$$

よって、(8), (9)式より  $\overline{\theta^2}$  は(10式)より評価される。

$$\overline{\theta^2} = R (k/\varepsilon) P_\theta \quad (10)$$

ここで、 $P_\theta$  は(11式)のように表される。

$$P_\theta = -2u_i \overline{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (11)$$

研究速報

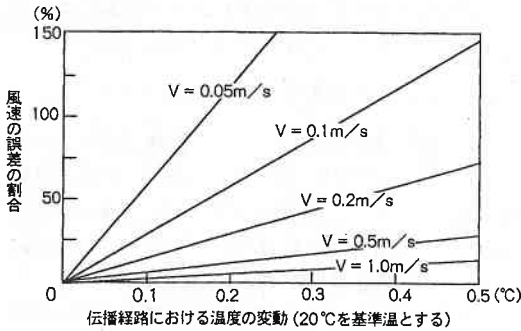


図8 温度変動の影響による誤差

(ワンヘッド方式の場合は時間変動)  
 (2ヘッド方式の場合は空間変動)

〈記号表〉

$t_1, t_2$ : 伝播時間 (s)  $D$ : 送受波素子間の距離 (m)  $L$ : 伝播経路の間隔 (m)  $V$ : 風速の超音波伝播軸成分 (m/s)  $V_A, C_A$ : 逆行する超音波信号の伝播速度差から算出した風速および音速(瞬時値に近いもの) (m/s)  $\bar{V}, C_1, C_2$ : 時間平均値 (m/s)  $T_{SV}$ : 音仮温度 (K)  $U$ : スカラー風速 (m/s)  $k$ : 乱流エネルギー ( $m^2/s^2$ )  $u = \sqrt{2/3k}$ : 速度変動のスケール (m/s)  $T_u$ : 速度変動の時間スケール (s)  $l$ : 変動速度の長さスケール (m)  $\theta$ : 平均温度 ( $^{\circ}C$ )  $\theta$ : 温度の変動成分 ( $^{\circ}C$ )  $P_{\theta}$ :  $\theta^2$  の生産項 ( $^{\circ}C^2/s$ )  $\epsilon_{\theta}$ :  $\theta^2$  の散逸 ( $^{\circ}C^2/s$ )  $T_{\theta}$ : 温度変動の時間スケール (s)  $R$ :  $T_{\theta}$  と  $T_u$  の比  $\Delta C$ : 温度変化に対応する音速変化 (m/s)

注

- (1) ドライヤーは吹出口直径は4 cm, 吹出風速約4 m/s, 吹出温度約70°C. ワンヘッド方式では吹出口から約20cm, 2ヘッド方式では約35cm離れた所で測定を行った.
- (2) この超音波風速計は2組の伝播経路が平行になっているタイプである.他にクロスタイプがあるが,今回はクロスタイプでの測定は行っていない.
- (3) 音速は温度の他に水蒸気圧や大気圧により変化するが,この超音波風速計では(7)式のように音速  $C$  が,水蒸気圧,大気圧の影響を無視した温度(これを音仮温度  $T_{SV}$  と呼ぶ)の平方根に比例するとして  $T_{SV}$  を求める.
- (4) 文献3のCasel-1,2の結果.結果の諸量は吹出口A幅  $L_0$  (133mm),吹出口Aの吹出風速(2 m/s), (吸込-吹出口A)温度差  $\theta_0$  が無次元化.

温度  $\bar{V}, \bar{C}$  は温度変動の影響を受けない.なぜなら時間平均の(3), (4)式を考える時,  $\bar{C}_1, \bar{C}_2$  および  $\bar{V}_1, \bar{V}_2$  は

等しいからである.しかし,2ヘッド方式の場合,室内暖房気流のように風速,温度に大きな空間勾配のある場所では  $\bar{C}_1, \bar{C}_2$  および  $\bar{V}_1, \bar{V}_2$  に差異が生じ,  $\bar{V}, \bar{C}$  さえも精度よく算定することができないが生じる.

図8に誤差の要因となる  $(C_1 - C_2)/2$  が風速測定結果に与える影響を示す.室内気流では場所によりかなり高周波の温度変動があるものと想定されるので,横軸に示す程度の温度変動は予想しておくべきである.風速が遅い時,温度変動により風速値に大きな誤差が生じる.

6.まとめ

- 1) ワンヘッド方式超音波風速計は平均風速,平均温度を正しく測定するが,室内暖房気流のような温度変動が大きい所では切替時間内の温度変動により変動風速,変動温度を精度よく測定することができない.
- 2) したがってワンヘッド方式超音波風速計を用いて非等温気流の計測をおこなう場合,風速変動と温度変動(音速変動)のスケールをあらかじめ検討しておく必要がある.
- 3) 今回の非等温室内気流の実験では  $\Delta C/u$  の値は10程度になり,このような所では風速変動の指示値が著しく大きくなり異常な計測値を示した.
- 4) 2ヘッド方式(平行タイプ)超音波風速計は室内暖房気流のような速度勾配,温度勾配が著しく大きい箇所においては,風速変動,温度変動のみならず時間平均値も精度よく測定することが困難となる.

(1993年6月30日受理)

参考文献

- 1) 勝田,村上,小林,「閉鎖的空間の気流性状に関する研究(第1報 空間中央の乱れ性状)」,日本建築学会論文報告書,昭和50年8月
- 2) 村上,加藤,宗像,「クリンルーム内の気流性状に関する研究(その4)」,日本建築学会大会学術講演梗概集,昭和59年10月
- 3) 村上,加藤,田中,北澤,崔,「床吹出OA空間における効率的顕熱排出に関する研究(その7,8)」,1991年,空気調和,衛生工学会大会論文集
- 4) 「日本風工学会誌 No.42」日本風工学会,1990年
- 5) Hanafusa, T., T. Fujitani, Y. Kobori, 「A New Type Sonic Anemometer-Thermometer for Field Operation」, Papers in Meteor. and Geophy., 33, 1982