

多成分ホットフィルム流速計による開水路流れの乱れ計測 について

京大防災研 正員 今 本 博 健
京大防災研 正員 オ上 野 鉄 男

乱流現象の研究における乱れ計測の重要性についてはいまさら指摘されるまでもないが、水流の乱れ計測については種々の困難性が附随し、乱れに関する十分なデータが蓄積されたとはいえない状態にある。ホットフィルム流速計は気流に対するホットワイヤ流速計を水流用に改良したものであって、とくに室内実験などの小スケールの流れを対象とする場合には、現在のところ、もっとも秀れたものの一つであると考えられる。以下においてはホットフィルム流速計による多成分乱れ計測の原理について考察するとともに、開水路流れにおける実測結果より、その適用性について明らかにしようとするものである。

1. 多成分ホットフィルム流速計の原理

ホットフィルム流速計の方向応答特性はセンサーと流速との相対的な位置関係によって決定される。たとえば、cylindrical sensor の場合、センサーに垂直な流速成分がもっとも有効に作用し、接線方向の流速成分は二次的な効果しかもたない。Champagne¹⁾らによると、センサーと α の傾き(yaw angle)をもつ流速 U と有効流速 U_e との関係はつぎのように表わされる。

$$U_e^2 = U^2 (\cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha) \quad (1)$$

ここに、 k は接線流速の効果を示すもので、センサーの機質、センサーの長さとの直径との比などによって決まる。また、センサーの支持部の存在のため、pitch angle θ によっても応答特性は異なってくる。

以上のように、ホットフィルム流速計はセンサーに沿った方向の流れに対しても若干の応答をするが、簡単のため、センサーに垂直な流速成分のみに応答し、流速と出力との関係はリニアであると仮定する。流速と出力との関係は、一般に、つぎのように表わされる。

$$E^2 / R = E_0^2 / R + \alpha U^n \quad (2)$$

ここに、 R はセンサーの作動抵抗、 E および E_0 は流速 U および0に対応する出力電圧、 α および n は定数である。 n は通常0.5程度の値をとるため、流速と出力との間のリニア性は成立しないが、リニアライザーを用いることにより後者の仮定を満足させることができる。

さて、流速 V の x 、 y 、 z 方向の成分をそれぞれ u 、 v 、 w とし、センサーの方向成分を l_x 、 l_y 、 l_z とすると、 u 、 v 、 w に
 応答する有効長さ l_u 、 l_v 、 l_w はそれぞれつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} l_u &= \alpha_u \sqrt{l_y^2 + l_z^2} \\ l_v &= \alpha_v \sqrt{l_x^2 + l_z^2} \\ l_w &= \alpha_w \sqrt{l_x^2 + l_y^2} \end{aligned} \quad (3)$$

出力 E はつぎようになる。

$$E = \beta (l_u u + l_v v + l_w w) \quad (4)$$

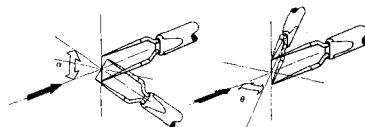


図-1 yaw angle α および pitch angle θ

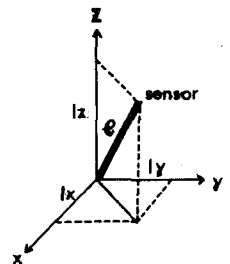


図-2 センサーの方向成分

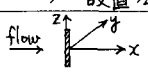
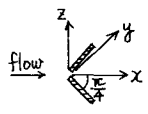
ここに、 β は単位長さ当りの出力であって、設定作動抵抗などの作動状態によって定まる定数である。また、(3)の α は流速とセンサーとの相対角度によって定まり、 ± 1 の値をとる。 α はつぎのようにして決定することができる。

いま、平均流の方向を z とし、乱れ速度 u, v, w はいずれも平均流速 U に比し十分小さいとすると、 $\alpha_u = 1$ となる。また、センサー l と xz 平面および xy 平面とのなす角度をそれぞれ θ_v, θ_w とすると、 $|\sin \theta_v| > \frac{|w|}{U}, |\sin \theta_w| > \frac{|v|}{U}$ のとき (θ はそれぞれの平面から反時計回りを正とし、 $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ である)。

$$\theta_v \geq 0 \text{ に対して } \alpha_v = +1, \quad \theta_w \geq 0 \text{ に対して } \alpha_w = +1 \tag{5}$$

となる。また、 θ_v あるいは θ_w が小さく0に近い場合、センサーの v あるいは w に対する応答は方向性を失ない、 v あるいは w の絶対値に対して応答することになる。以上の結果を用いて、センサーの種々の組合せに対する応答特性を示すと表-1のようになる。表-1に示された設置法以外のものについてもまったく同様にして、センサーの方向応答特性を算定することができる。

表-1 センサーの方向応答特性
(プローブの軸を平均流の方向に一致させ xz 平面内にセンサーを設置した場合)

	センサー設置法	l_x, l_y, l_z	θ_v, θ_w	l_u, l_v, l_w	E
1成分センサー		$l_x = l_y = 0$ $l_z = l$	$\theta_v = 0$	$l_u = l_v = l$ $l_w = 0$	$E = \beta l (u + v)$
2成分センサー		I: $l_x = l_z = \frac{l}{\sqrt{2}}$ $l_y = 0$	$\theta_v = 0$ $\theta_w = \frac{\pi}{4}$	$l_u = l_w = \frac{l}{\sqrt{2}}$ $l_v = l$	$E_1 = \beta l (\frac{u}{\sqrt{2}} + v - \frac{w}{\sqrt{2}})$
		II: $l_x = l_z = \frac{l}{\sqrt{2}}$ $l_y = 0$	$\theta_v = 0$ $\theta_w = -\frac{\pi}{4}$	$l_u = l_w = \frac{l}{\sqrt{2}}$ $l_v = l$	$E_2 = \beta l (\frac{u}{\sqrt{2}} + v + \frac{w}{\sqrt{2}})$

2. 2成分ホットフィルム流速計による乱れ計測

2成分ホットフィルム流速計を用いて、流れ方向および鉛直方向の乱れを測定した結果を図-3に示す。この図にみられるように、流れ方向の乱れの強さについては1成分ホットフィルム流速計とかなりよい一致を示しており、また、Reynolds 応力の測定結果よりみて、かなりの精度で u および w の測定ができているものと考えられる。スペクトルの測定については現在整理中であり、さらに詳細に検討する予定である。なお、3成分の乱れ計測についても現在準備中である。

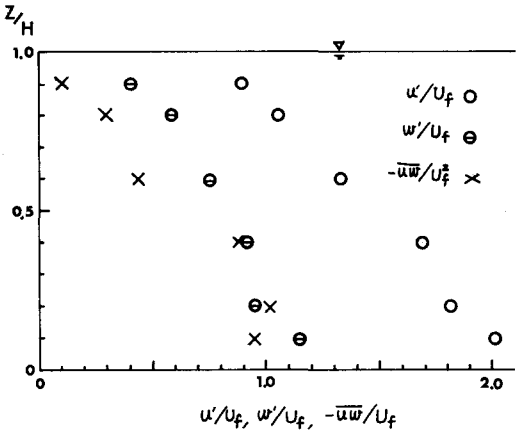


図-3 2成分ホットフィルム流速計による乱れ計測結果

1) Champagne, F.H., "Turbulence Measurement with Inclined Hot wires", Boeing Scientific Research Labo, Flight Sci. Labo., Rep. No.103, 1965.