CO₂ 噴流拡散場の速度 2 成分・濃度同時測定と結合統計量の解析

Simultaneous measurements and analysis of joint statistics of two velocity components and concentration for CO₂ jet diffusion field

酒井康彦 (名大工) ○佐藤淳也 (名大院)
中垣輝之 (名大院) 櫛田武広 (名大工)

Yasuhiko SAKAI, Nagoya University, Furouchou, Chikusa-ku, Nagoya
Junya SATO, Graduate School of Nagoya University
Teruyuki NAKAGAKI, Graduate School of Nagoya University
Takehiro KUSHIDA, Nagoya University

keywords : CO₂-air mixture, Three hot-wire probe, Volumetric concentration, Mass fraction concentration, Two velocity components, Simultaneous measurements, Jet, Grid turbulence

1. 緒論

空気乱流中のガス拡散問題は、工業的流れから自然流れに至るまで、広い範囲で見られ盛んに研究されている。本研究ではその中でも空気中における CO₂ ガスの乱流拡散に着目し、その濃度と速度の同時測定法の開発を行った。測定には周波数応答の良い熱線流速計を応用することとした。

2. 各加熱比での熱線出力電圧の変化と濃度依存性

Fig.1、2 は CO₂ 濃度と熱線の加熱比の違いによる出力電圧の変化の様子を示している。Fig.1(a) は $\varepsilon_R = (R_w - R_0)/R_0$ で表される抵抗加熱比 ε_R が 0.5 (低加熱比) の場合、Fig.1(b) は ε_R が 1.4 (高加熱比) の場合の流速と熱線の出力電圧の関係を表している。これを見ると、各流速における熱線の出力電圧は濃度に依存していることが分かり、その関係が低加熱比と高加熱比とは逆転していることが見てとれる。したがって、加熱比をうまく調整すると、各濃度の校正曲線がほぼ一致し、濃度依存性がなくなると考えられる。例えば、Fig.2 は ε_R を約 0.7 にした場合の 0% と 100% の CO₂ ガスに対する校正曲線を示したものであり、両者がほぼ一致していることが分かる。これを用いれば、濃度に関係なく、熱線の出力電圧から一意的に流速を決定できる。この方法は Chassaing(1979)⁽¹⁾ により提唱されている。

Fig. 1: Calibration curves for the gas mixture (air-CO₂) flow

Fig. 2: Calibration curves for the gas mixture (air-CO₂) flow

3. 濃度・速度 2 成分の同時測定の原理

3.1 3 本式熱線プローブ

本研究では、X プローブと I 型プローブを組み合わせた 3 本式熱線プローブを使用した (Fig.3)。X プローブは低加熱比 ($\varepsilon_R = 0.5$) に、I 型プローブは濃度依存のない加熱比 (約 0.7) に設定した。また、熱線には白金線 (線径 5 μ m) を用いた。X プローブ熱線を 1, 2、I 型プローブ熱線を 3 と番号付けする。

Fig. 3: Sketch of a three-sensor hot-wire probe

Fig. 4: Definition of some angles

3.2 有効速度

熱線が一樣流 U の中に Fig.4 で示す角度 ϕ で置かれている時、熱線の熱損失は熱線に垂直な速度成分 $U \cos \phi$ のみではなく接線方向成分 $U \sin \phi$ にも影響を受ける。

3.2.1 数式による定義 有効速度 U_{eff} を角度 ϕ の関数として表す表現式は様々あるが、Hinze⁽²⁾ によって示された次式を用いた。

$$U_{\text{eff}} = U(\cos^2 \phi + k^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \quad (1)$$

ただし k は平行成分 $U \sin \phi$ の影響度を表す係数であり、校正により決定されなければならない。

X プローブに関して Fig.4 に示すように角度 θ, β_1, β_2 をとると、幾何変換により熱線 1, 2 に対して式 (1) は次式で表される。

$$U_{1\text{eff}} = U(\cos^2(\beta_1 - \theta) + k_1^2 \sin^2(\beta_1 - \theta))^{1/2} = U f_1(\theta) \quad (2)$$

$$U_{2\text{eff}} = U(\cos^2(\beta_2 + \theta) + k_2^2 \sin^2(\beta_2 + \theta))^{1/2} = U f_2(\theta) \quad (3)$$

3.2.2 校正曲線から求める X プローブの 2 本の熱線 1、2 を、それぞれその熱線の最大迎え角において校正を行う。校正によって熱線 1, 2 の出力電圧 E_1, E_2 と速度 U は 6 次の多項式によって近似される。

$$U = \sum_{N=0}^6 a_{N,i} E_i^N \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

次に、前述の角度 θ の流速ベクトルが存在する時、熱線の出力電圧をもとに式 (4) から各熱線における有効速度が求まる。

$$U_{\text{ieff}} = \sum_{N=0}^6 a_{N,i} E_{\theta,i}^N \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

3.3 熱線の角度特性の濃度依存性の検証

実験によって k の濃度依存性について調べた。較正用ノズル出口にXプローブを設置し、空気または CO_2 をそれぞれ 10 m/s で噴出させ、角度 θ に関しては -45° から 45° まで回転させて熱線の出力電圧を測定した。式 (5) から有効速度を求め、角度 θ との関係を図 5 に示した。 CO_2 濃度 0、40、100% の結果が $k=0.2$ の曲線上にのっており、 k は濃度に依存しないことが見てとれる。

Fig. 5: The proof of independency for k on the concentration

したがって、式 (2)、(3) から導き出される有効速度の比 (式 (6)) は CO_2 濃度に依存しないことが言える。これによって濃度に関係なく流速ベクトルの角度 θ が決定される。また熱線の角度の較正は空気流でおこなうだけでよい。

$$\frac{U_{1\text{eff}}}{U_{2\text{eff}}} = \frac{(\cos^2(\beta_1 - \theta) + k_1^2 \sin^2(\beta_1 - \theta))^{1/2}}{(\cos^2(\beta_2 + \theta) + k_2^2 \sin^2(\beta_2 + \theta))^{1/2}} = \frac{f_1(\theta)}{f_2(\theta)} \quad (6)$$

3.4 軸方向速度 u 、半径方向速度 v の決定方法

Fig.5 から k は濃度に依存しないことが分かったので、 $f_1(\theta)$ 、 $f_2(\theta)$ も濃度に依存しないことが言え、式 (6) より、濃度に関係なく有効速度の比は一定であるといえる。したがって、式 (6) の θ に関する非線型方程式を解けば濃度と流速ベクトルの大きさ U に関係なく θ が決定される。一方、熱線 3 (I 型プローブ) の出力電圧 E_3 から濃度に関係なく U が直接決定される。以上より、軸方向速度 u 、半径方向速度 v は次式で決定される。

$$u = U \cos \theta \quad v = U \sin \theta \quad (7)$$

3.5 濃度 c の決定方法

決定された θ と、式 (2)、(3) より導き出される次式を用いて、各濃度の時の較正データから流速ベクトルの大きさ $U^{(j)}$ ($j = 0, 20, \dots, 100\%$) をそれぞれ求める。

$$U^{(j)} = \frac{U_{1\text{eff}}^{(j)} + U_{2\text{eff}}^{(j)}}{f_1(\theta) + f_2(\theta)} \quad (8)$$

この格子点 ($U^{(j)}, j$) ($j = 0, 20, \dots, 100\%$) を利用し、 E_3 より決定された U から CO_2 濃度 c が決定される。

4. 格子乱流中の CO_2 噴流拡散場の濃度・速度 2 成分同時測定

速度 2 成分・濃度同時測定システムを用いて、格子乱流中の CO_2 軸対称噴流で速度・濃度同時測定をおこなった。測定系の概略を図 6 に示す。噴流出口下流 3 断面での物質フラックス ($\langle cu \rangle$)、 $\langle cv \rangle$ をそれぞれ Fig.7、Fig.8 に示す。軸方向の乱流物質フラックス ($\langle cu \rangle$) (Fig.7) は各断面とも分布形状がほぼ相似となり、また他の研究者の結果とも傾向が一致し

ている。半径方向の乱流物質フラックス ($\langle cv \rangle$) (Fig.8) は各断面ごとに点対称な分布となっており、また、他の研究者ともピークを取る位置など分布傾向が一致している。したがって、本測定法が有効であると考えられる。

Fig. 6: The sketch of the test section

Fig. 7: Radial profiles of axial turbulent scalar flux

Fig. 8: Radial profiles of radial turbulent scalar flux

引用文献

- (1) P. Chassaing: Melange turbulent de gaz inertes dans un jet de tube libre. *These Doc. Sciences 42, Inst. Nat. Poly. de Toulouse.*, (1979)
- (2) O.J. Hinze: *Turbulence* (McGraw-Hill, second edition, 1975)
- (3) Chevray, R. and Tutu, N.K.: Intermittency and preferential transport of heat in a round jet. *J. Fluid Mech.* 88, 133-160 (1978)
- (4) N.R. Panchapakesan & J.L. Lumley: Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Part 2. helium jet. *J. Fluid Mech.* 246, 225-247 (1993)
- (5) Pietri, L., Amielh, M., Anselmetti, F.: Simultaneous measurement of temperature and velocity fluctuations in a slightly heated jet combining a cold wire Laser Doppler Anemometry. *Int. J. Heat and Fluid Flow* 21, 22-26. (2000)