

二次元傾斜壁面密度噴流の乱流測定について

TURBULENCE MEASUREMENT OF TWO-DIMENSIONAL INCLINED WALL PLUME

福嶋祐介*・高島哲雄**

By Yusuke FUKUSHIMA and Tetsuo TAKASHIMA

The turbulent structure of inclined wall plume is investigated experimentally. The velocity distributions are measured by the laser doppler anemometer. In order to obtain the density difference, the saline water was sampled by the siphon and then the concentration of salinity is measured by the conductivity meter. Thus, the mean flow properties of the inclined wall plume are obtained. The turbulent flow properties such as Reynolds stresses, kinetic energy of turbulence, viscous dissipation rate and eddy viscosity, are also obtained. These experimental results are compared with the similarity solutions obtained coupling with the $k-\epsilon$ turbulence model. The agreement of experimental results and numerical calculations are fairly well except for the distribution of the viscous dissipation rate. It is concluded that the $k-\epsilon$ turbulence model can explain well mean flow properties and turbulent structure of inclined wall plumes.

Keywords: inclined wall plume, turbulent structure, similarity solution

1. 序 論

傾斜壁面密度噴流は、周囲流体と密度の異なる流体が傾斜した壁面に沿って上昇あるいは下降する流れである。このような流れは自然界で多く観測され、工学的にも重要である。傾斜壁面密度噴流については、Ellison・Turner¹⁾をはじめとする数多くの実験的研究がある^{2)~6)}。このうち1)~3)は、塩水あるいは温度差による密度流であり、4)~6)は、泥水による密度流を対象としたものである。

一方、傾斜壁面密度噴流を理論的に検討した研究もある。従来より主として行われてきた方法は、層積分法による解析である¹⁾。また、近年発達のためましい乱流モデルを用いた解析も行われている⁸⁾。Ljuboja・Rodi⁹⁾は、 $k-\epsilon$ モデルを発展させた代数応力モデルにより鉛直壁面密度噴流の解析を行い、Grella・Faeth²⁾の実験結果と比較している。

一般に傾斜壁面密度噴流は、流れの形成領域と確立領域とに分けられる。福嶋¹⁰⁾は、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて、

確立領域では流れが相似解をもつことを明らかにした。従来、壁面密度噴流の確立領域の流速分布、密度分布が相似解をもつことは知られていたが、乱流運動エネルギー k 、レイノルズ応力等の乱流特性量までもが相似になることを明らかにした意義は大きい。しかしながら、福嶋の論文では乱流特性量の実測値との比較が十分にはなされていない。

本研究の目的は、二成分レーザードップラー流速計を用いて傾斜壁面密度噴流の乱流構造を詳細に調べ、 $k-\epsilon$ 乱流モデルによる相似解の理論値と比較し、その妥当性を検討することにある。

2. 傾斜壁面密度噴流の相似解

福嶋は Fig.1 に示すような傾斜壁面密度噴流の相似解を求めている。解析を行うにあたり、次の仮定を行って

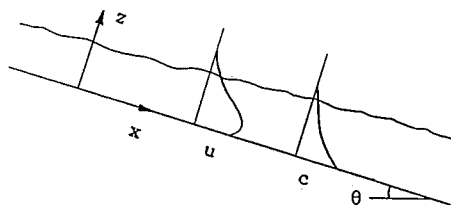


Fig.1 Definition sketch of inclined wall plume.

* 正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部建設系
(〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)

** 正会員 工修 INA 新土木研究所
(〒162 新宿区水道町22-1)

いる。半無限領域に密度 ρ_0 の流体が静止しており、これより密度の大きな密度 ρ の流体が傾斜面に沿って流下する場合を考える。流れは、二次元、非圧縮であり、十分に発達した乱流である。流入する流体と周囲流体は、乱流的作用により混合する。二流体の相対密度差は、小さくブーシネスク近似が成立する。流れの x 方向の変化は緩やかであり、境界層近似が成立する。

以上の前提のもとで、 k - ϵ 乱流モデルを用いた傾斜壁面密度噴流の相似解が次のように求められる。式の誘導は福嶋¹⁰⁾を参照されたい。

$$\eta = \frac{z}{x} \dots\dots\dots (1\cdot a)$$

$$u = (Rg \sin \theta Q_c / I)^{1/3} F'(\eta) \dots\dots\dots (1\cdot b)$$

$$c = \frac{(Q_c / I)^{2/3}}{(Rg \sin \theta)^{1/3}} \frac{1}{x} G(\eta) \dots\dots\dots (1\cdot c)$$

$$k = (Rg \sin \theta Q_c / I)^{2/3} K(\eta) \dots\dots\dots (1\cdot d)$$

$$\epsilon = (Rg \sin \theta Q_c / I) \frac{1}{x} E(\eta) \dots\dots\dots (1\cdot e)$$

ここで、 η は相似変数、 u 、 w は、それぞれ、流下方向とこれに直交する方向 (z 方向) の流速成分、 c は密度差の原因となるスカラー量 (塩分濃度、温度差など) である。 k 、 ϵ はそれぞれ、乱流運動エネルギー、分子粘性逸散率である。また、 F 、 G 、 K 、 E は、それぞれ、流関数 ψ 、 c 、 k 、 ϵ に対する相似関数であり、次式 (2) ~ (5) の連立常微分方程式より求められる。

$$FF'' + G + \nu_i F'' + \nu_t F''' = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$F'G + FG' + \frac{1}{\sigma_t} (\nu_i G' + \nu_t G'') = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$FK' + \frac{1}{\sigma_k} (\nu_i K' + \nu_t K'') + \nu_t F''^2 + \frac{1}{\sigma_t} \cot \theta \nu_t G' - E = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$F'E + FE' + \frac{1}{\sigma_\epsilon} (\nu_i E' + \nu_t E'') + c_{1\epsilon} \frac{E}{K} \left[\nu_t F''^2 + (1 - c_{3\epsilon}) \frac{1}{\sigma_t} \cot \theta \nu_t G' \right] - c_{2\epsilon} \frac{E^2}{K} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、プライムは η についての微分を表す。また、 $\nu_t = c_{\mu} K^2 / E$ は無次元の渦動粘性係数、 c_{μ} 、 σ_t 、 σ_k 、 σ_ϵ 、 $c_{1\epsilon}$ 、 $c_{2\epsilon}$ 、 $c_{3\epsilon}$ は、 k - ϵ 乱流モデルの係数であり、次のように同定されている^{8), 10)}。

$$c_{\mu} = 0.09 \quad \sigma_t = 1.0 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$c_{1\epsilon} = 1.44 \quad c_{2\epsilon} = 1.92 \quad c_{3\epsilon} = 1.0$$

また、 I は無次元の相対密度差のフラックスであり、次式により定義される。

$$I = \int_0^\infty F' G d\eta \dots\dots\dots (6)$$

境界条件は次のように与えられる。まず、壁面の境界条件として、乱流モデルの解析でよく用いられる壁関数法を用いる。

$$\frac{U_0}{U_*} = \frac{1}{x} \ln \eta_0 + A \dots\dots\dots (7)$$

$$F = 0 \quad G' = 0 \dots\dots\dots (8\cdot a, b)$$

$$\frac{K}{U_*^2} = \frac{1}{\sqrt{c_{\mu}}} \quad E = \frac{U_*^3}{k \eta_0} \dots\dots\dots (8\cdot c, d)$$

ここで、 U_* は壁面における無次元の摩擦速度、 U_0 、 η_0 は、それぞれ、壁面近傍の無次元流速と無次元座標値、 x はカルマン定数である。また、式 (7) の定数は滑らかな壁面に対し次のように与えられる。

$$A = \frac{1}{x} \ln Re_* / \eta_{1/2} + A_s \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $Re_* = u_* b_{1/2} / \nu$ 、 $\eta_{1/2}$ は無次元の流速の半値半幅、 $A_s = 5.5$ 、 ν は動粘性係数である。

$\eta = \infty$ での境界条件は、次のようになる。

$$\eta = \infty \text{ で、 } F' = G = K = E = 0 \dots\dots\dots (10)$$

3. 傾斜壁面密度噴流の実験

Fig. 2 に実験装置の概要を示す。実験装置は、幅 8.5 cm、長さ 180 cm のアクリル製の水槽に、角度 30° のアクリル製傾斜板を設置したものである。実験は水槽に真水を満たし、高さ 4 cm のスロットから傾斜板上に塩水を静かに流入させた。流速分布は、二成分レーザー Doppler 流速計を用いて一点についてのサンプリング間隔を 0.05 s とし、100 s 間の測定を行った。このため、主要な乱流特性量であるレイノルズ応力、乱れ運動エネルギー等の測定が可能となった。相対密度差の分布は、サイホンで取水した塩水を導電率計により測定し、密度差に換算することによって求めた。実験条件は、スロットの流出口での流速が $U_0 = 16.7$ cm/s、相対密度差 $\epsilon_0 = 0.0102$ で、流出口のレイノルズ数が $Re = 6660$ とした。測定は 1 回で行うことができないため、同一の水理条件で多数回の実験を行い、流速測定、濃度測定を行った。また、レーザー Doppler 流速計は、淡水と塩水の屈折率の違いにより、壁面から離れるほど焦点を合わせる事が難しくなる。このため予備実験により、流速の二次元性を確認し、壁面に近い点を測定点とした。

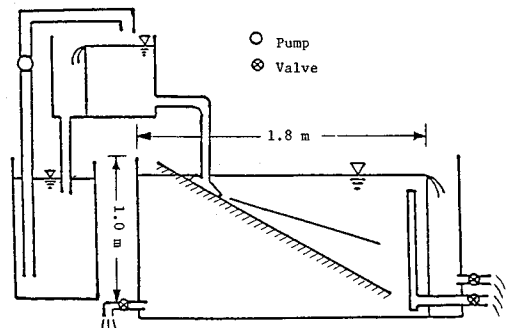


Fig. 2 Experimental apparatus.

4. 相似解と実験結果との比較

Fig. 3~8に相似解と実測値を式(1)を参考にして無次元形で比較した結果を示す。実測値は $x=30\text{ cm}$ と $x=35\text{ cm}$ のものである。Fig. 3は、流速分布の実測値

を理論値と比較したものである。理論値は実線で、 $x=30\text{ cm}$ の実測値は丸印で、 $x=35\text{ cm}$ の実測値は三角印で示している(Fig. 4~8も同じ)。最大流速の現われる付近で実測値は理論値に比べやや小さいが、これ以外のところでは両者の一致はかなりよい。

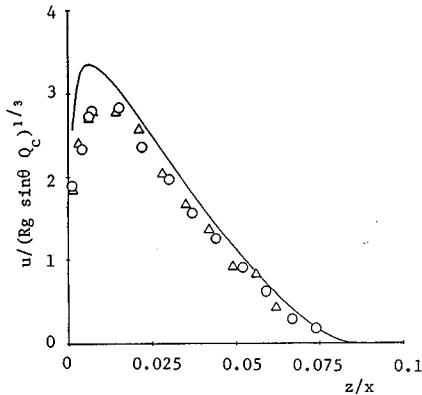


Fig. 3 Velocity distribution. Solid line indicates the similarity solution and the circle indicates experimental data at $x=30\text{ cm}$ and the triangle indicates data at $x=35\text{ cm}$.

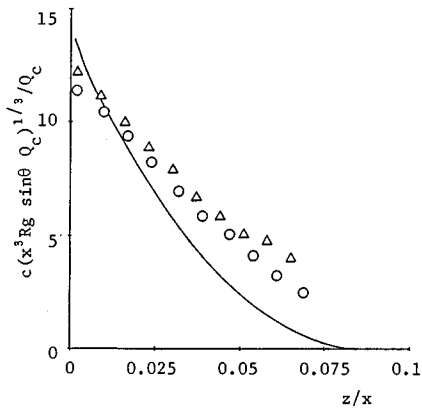


Fig. 4 Distribution of relative density difference.

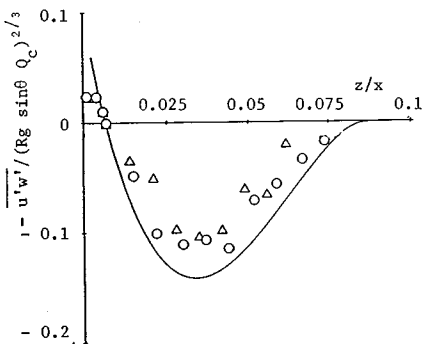


Fig. 5 Distribution of Reynolds stresses.

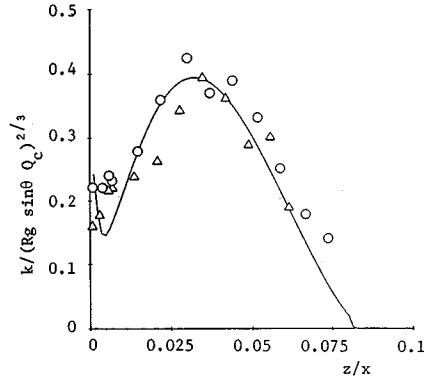


Fig. 6 Distribution of kinetic energy of turbulence.

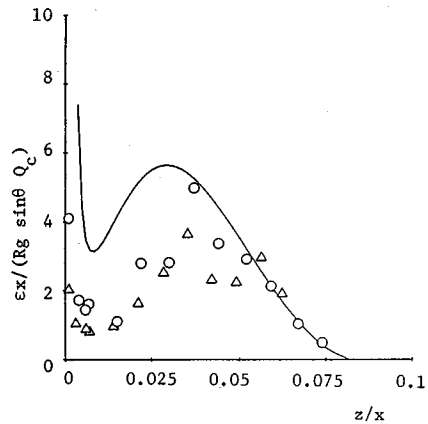


Fig. 7 Distribution of viscous dissipation rate of turbulence.

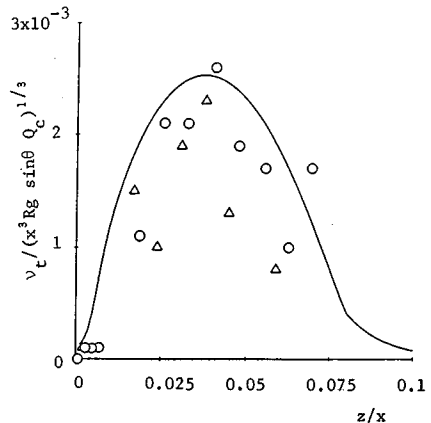


Fig. 8 Distribution of eddy viscosity.

Fig. 4 は、相対密度差の分布を比較したものである。この場合には、壁面付近を除いて実測値が理論値よりかなり大きい傾向にある。この理由は必ずしも明確ではないが、水路の長さが短く下流端から反射した塩水の逆流の影響が現われたものと推定される。

Fig. 5 はレイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ の実測値を理論値と比較したものである。この図から、レイノルズ応力については実測値と理論値の一致はかなりよいと判断される。

Fig. 6 は乱れ運動エネルギーを示したものである。ただし、乱れ運動エネルギーの実測値は、 $\sqrt{v'^2} = \sqrt{w'^2}$ として求めたものである。この場合の理論値は流れの全域にわたって実測値をかなり良く説明していることがわかる。

Fig. 7 は、分子粘性逸散率の測定値を理論値と比較したものである。慣性小領域内で乱れのパワースペクトルは次式で与えられる^{12), 13)}。

$$P(f) = Au^{3/2} (2\pi)^{-2/3} \varepsilon^{2/3} f^{-5/3} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 A は普遍定数 (=0.48) であり、 u は平均流速、 f は周波数である。これにより、分子粘性逸散率は、式 (11) により求めることができる。しかしながら、特に壁面に近い範囲で、流速のパワースペクトルはかなりばらついており $-5/3$ 乗則に従う範囲は小さい。したがって、これにより求めた分子粘性逸散率は余り精度が良くないと推定される。このため、分子粘性逸散率は壁付近で相似解よりかなり小さくなっている。

Fig. 8 は渦動粘性係数の測定値と相似解を比較したものである。渦動粘性係数の測定値はレイノルズ応力と流速分布から求めた。流速の微分とレイノルズ応力の測定精度はあまりよいとはいえず、これより求められる渦動粘性係数の精度は十分なものではない。実測値はかなりのばらつきがあり、 $x=30$ cm の結果は $x=35$ cm の結果に比べて多少大きめとなる傾向を示す。しかしながら、この図より渦動粘性係数の理論値は実測値の概略を説明していることがわかる。

5. 結 論

本研究は、二成分レーザー Doppler 流速計を用いて、傾斜角 30° の傾斜壁面密度噴流の乱流構造を詳細に調べ、さきに発表した流れの確立領域における相似解と比較したものである。この結果、相似解が平均流特性を十

分に説明するとともに、乱流特性量もまた相似解で表現できることを明らかにした。すなわち、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた流れの確立領域に対する相似解は、レイノルズ応力、乱れ運動エネルギー、渦動粘性係数の実測値をかなり良好に説明した。一方、相対密度差の分布、分子粘性逸散率の分布の一致度は余り良くない。これらの点については今後の検討課題としたい。

参 考 文 献

- 1) Ellison, T. H. and Turner, J. S. : Turbulent entrainment in stratified flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 6, pp. 423~448, 1959.
- 2) Grella, J. J. and Faeth, G. M. : Measurements in a two-dimensional thermal plume along a vertical adiabatic wall, *J. Fluid Mech.*, Vol. 71, part 4, pp. 701~710, 1975.
- 3) 椿東一郎・小松利光：傾斜 plume の流れと連行現象，第 23 回水理講演会論文集，pp. 415~422, 1979.
- 4) Middleton, G. V. : Experiment on density and turbidity currents II. Uniform flow of density current, *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 2, pp. 627~637, 1966.
- 5) 芦田和男・江頭進治：泥水密度流に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 237 号，pp. 37~50, 1975.
- 6) Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y. and Yu, W. : Experiments on turbidity currents over erodible bed, *J. of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 24, No. 4, 1986.
- 7) 福嶋祐介・福永和久・早川典生：鉛直壁面密度噴流に関する研究，第 28 回水理講演論文集，pp. 303~310, 1984.
- 8) Rodi, W. : Turbulence Models and Their Application in Hydraulics, State of the Arts Paper, IAHR, 1980.
- 9) Ljuboja, M. and Rodi, W. : Prediction of horizontal and vertical turbulent buoyant wall jet, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 103, pp. 343~349, 1981.
- 10) 福嶋祐介：乱流モデルによる傾斜壁面密度噴流の解析，土木学会論文集，第 399 号 / II-10, pp. 65~74, 1988.
- 11) 福嶋祐介・高島哲雄：下層密度流の形成領域の乱流モデルによる解析，第 33 回水理講演論文集，pp. 589~594, 1989.
- 12) 村岡浩爾・福島武彦：霞ヶ浦（西浦）の湖流，陸水域の富栄養化に関する総合研究（Ⅲ），p. 32, 1979.
- 13) Townsend, A. A. : The Structure of Turbulent Shear Flow, Cambridge University Press, 2nd Ed., p. 92, 1976.

(1989. 3. 6・受付)