

格子乱流に重ね合わされた温度混合層

学 *矢代 一男 (新潟大) 村松 聡 (新潟大)
 学 桑原 浩久 (新潟大院) 正 前川 博 (新潟大)
 正 小林 睦夫 (新潟大) 正 高野 剛 (新潟大)

1. まえがき

格子乱流に重ね合わされた温度場は乱流熱輸送現象の基礎研究においてしばしば採り上げられてきたが、研究の目的と視点は研究者によりかなり異なっている。本研究では、階段状の温度場の境目に生ずるいわゆる温度混合層において一点二重・三重相関の測定を行い、実験データに基づき乱流熱流束輸送方程式中の二つの未知相関のモデルを検訂する。

2. 支配方程式

図1のように乱流格子上に原点を有する直角座標系を用い、境界層近似を行えば、エネルギー式と乱流熱流束輸送方程式は次のように書ける。

$$U_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1} = - \frac{\partial \overline{u_2 \theta}}{\partial x_2} \quad (1)$$

$$U_1 \frac{\partial \overline{u_2 \theta}}{\partial x_1} = - \overline{u_2} \frac{\partial \theta}{\partial x_2} - \frac{\partial (\overline{u_2 \theta} + \overline{P \theta})}{\partial x_2} + \frac{P}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x_2} - (\nu + \alpha) \frac{\partial^2 \overline{u_2 \theta}}{\partial x_2^2}$$

(対流) (生成) (吸収) (圧力変動相関) (消費)

ここに、 ρ, ν, α : 流体の密度、動粘度、熱拡散率、 U_1 : 平均速度、 θ : $x_2 = -\infty$ における温度を基準とする平均温度、 u_i : 速度変動の*i*成分、 P : 圧力変動、 θ : 温度変動、 $\bar{\cdot}$: t の時間平均。

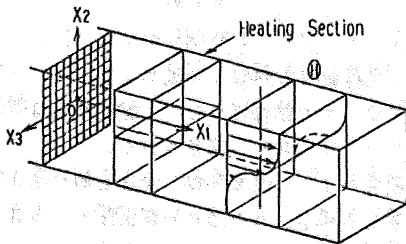


図1. 温度場と座標系

3. 実験

丸棒直径8mm, メッシュ30mmの正方形格子と加熱部を通過した平均速度10.1m/sの空気流中で平均温度および速度・温度変動の一点二重・三重相関の縦(x_2)の分布を測定した。階段状の温度分布は、直径0.6mmのニクロム線を格子下流0.265~0.41mの範囲で14行12列に並べた加熱部により与えた。

4. 実験結果および考察

4.1 平均温度と乱流熱流束 乱流熱拡散率 α_T が一定の場合、式(1)の特解として次式が得られる。

$$\theta = \frac{\theta_\infty}{2} \int_{-\infty}^{x_2} e^{-\eta^2} d\eta \quad (3)$$

ここに、 θ_∞ : $x_2 = \infty$ における θ

$$\eta^2 = 2\alpha_T x_1 / U_1 \quad (4)$$

式(3)は誤差関数に外ならず、 η^2 は対応する正規分布の分散である。図2に示すように、各断面上の θ の分布は適当な η を用いるとき式(3)でよく近似できた。また、 η^2 と x_1 がほぼ直線関係にあることも確認された。式(1)を x_2 につき積分することにより次式を得る。

$$\overline{u_2 \theta} = -U_1 \frac{d}{dx_1} \int_{-\infty}^{x_2} \theta dx_2 \quad (5)$$

上式に θ の実験値を代入して計算した $\overline{u_2 \theta}$ と θ の実験値を比較して図3に示す。両者の分布はほぼ相似ではあるが、値は約2倍異なる。本研究では、熱線安定温度作動させ、温度の感度に静的検定値を用いた。しかし、プローブの熱慣性のため動的感度は静的感度と大きく異なる可能性もあり、これが実験誤差の主原因になっていると推察される。したがって、今後、この点を明らかにする必要がある。図3には、動的感

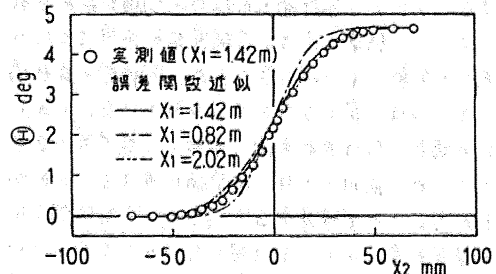


図2. 平均温度の x_2 方向分布

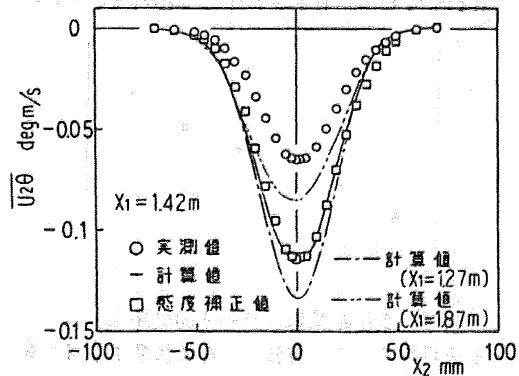


図3. 乱流熱流束 $\overline{u_2 \theta}$ の x_2 方向分布

度を静的感度の約1/2と推定したときの実験値も併記した。

4.2 圧力温度勾配相関モデルの検証 この相関は乱流混合による乱流熱流束の消滅を表す。レイノルズ数とペクレ数が高い通常の乱流では、消散項は局所寄与仮説により無視できるから、圧力温度勾配相関は特に精度よくモデル化されねばならない。

平均速度が一樣な流れ中の均質乱れに対して、次式のようなモデルが多くの研究者により採用されている。

$$\frac{P}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x_1} = -C_T \frac{\epsilon}{R} \overline{u_1 \theta} \quad \text{----- (6)}$$

ここに、 R : 乱流エネルギー、 ϵ : R の消散率、 C_T : 乱れの構造に依存する経験定数。

このモデルの検証を行う場合、圧力温度勾配相関は直接測定できないので、乱流熱流束の収支から間接的に求める必要がある。しかし、各点での収支計算は大きい誤差を伴いがちなので、各測定断面全域の収支を求めた。

式(2)と(6)を x_2 につき積分すれば次式を得る。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{P}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x_1} dx_2 = U_1 \frac{d}{dx_1} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{u_1 \theta} dx_2 + \overline{u_1^2} \theta_{\infty} \quad \text{--- (7)}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{P}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x_1} dx_2 = -C_T \frac{\epsilon}{R} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{u_1 \theta} dx_2 \quad \text{--- (8)}$$

上の二式の値は実験値から計算できるので、両者を等置することにより各断面上の C_T の平均値が求められる。図4にこの結果を示す。各研究者が推奨する C_T の値は流れの形態により相当異なるが、同種類の流れ場に対して、 C_T は一定であると考えられている。しかし、本研究の場合、 C_T は流れ方向に増加し、最下流の測定断面でようやく前川・小林の推奨値に達することが図からわかる。この実験事実も式(6)のような時間スケールの選択が常に正しいとは限らないことを示している。したがって、温度場の時間スケールが関与する可能性の検討も含めて、将来この原因を究明する必要がある。

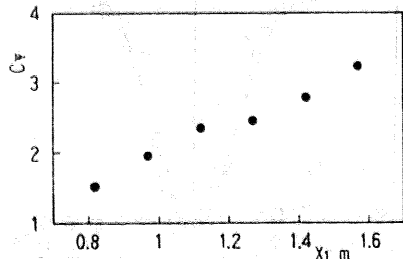


図4. モデル定数 C_T の x_1 方向分布

4.3 乱流拡散モデルの検証 乱流拡散を表す三重相関に対して提案されているモデルはほとんど勾配型であり、Owen⁽²⁾による次式で代表される。

$$\overline{u_1^2 \theta} = -2 C_t \frac{R}{\epsilon} \overline{u_1^2} \frac{\partial \overline{u_1 \theta}}{\partial x_2} \quad \text{--- (9)}$$

彼は経験定数 C_t に対して0.2を推奨した。

上式を x_2 について積分すれば次のようになる。

$$\int_0^{x_2} \overline{u_1^2 \theta} dx_2 = -2 C_t \frac{R}{\epsilon} \overline{u_1^2} [\overline{u_1 \theta}]_0^{x_2} \quad \text{--- (10)}$$

このモデルの検証は、圧力温度勾配相関の場合と同様に、上式を用いて各断面上の平均値について行った。

式(10)の両辺に実験値を代入して求めた C_t の最適値は約0.19となり、Owenの推奨値とよく一致した。前述のように温度変動を含む相関の実験値は温度の感度の誤差を含むが、誤差は式(10)において相殺されるので、 C_t の実験値は正しく求められる。式(10)の両辺の値を比較した図5から、Owenのモデルの成立を確認できる。

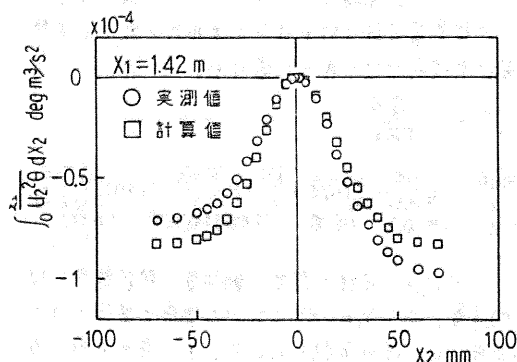


図5. $\int_0^{x_2} \overline{u_1^2 \theta} dx_2$ の実験値とモデルの比較

5. まとめ

本研究により次のことが明らかになった。

- (1) 定温度作動する熱線温度センサーとして用いる場合、プローブの熱慣性のため、動的感度は静的感度よりかなり小さくなると推察される。
- (2) 本研究のように速度変動と温度変動の発生時刻が大きく異なる場合、圧力温度勾配相関のふるまいは速度場の時間スケールだけでは決まらない。そのため、モデルの改良が必要である。
- (3) 速度・温度三重相関に関するOwenのモデルは経験定数の値を含めて、本実験結果とよく一致した。

参考文献

- (1) 前川・小林, 乱流熱伝達の模型に関する基礎的研究, 機論, 43-370, B (昭52-6)
- (2) Owen, R.G., An analytical turbulent transport model applied to nonisothermal fully-developed duct flows, PhD Thesis, Dept. Mech. Engrg., Pennsylvania State Univ., (1973)