

数値計算による H 型流路内乱流熱伝達現象に関する研究

Numerical study on turbulent heat transfer in H-shaped channel flow

- 永井義男, 斎藤寛之, 名古屋工業大学大学院, 名古屋市昭和区御器所町
保浦知也, 田川正人, 名古屋工業大学
服部博文, E-mail : hattori@nitech.ac.jp

Y. Nagai, H. Saito, T. Houra, M. Tagawa and H. Hattori

Department of Electrical and Mechanical Engineering,

Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

In this study, a Large Eddy Simulation (LES) of H-type mixing turbulent channel flow has been carried out in order to observe a turbulent heat transfer phenomena in the complex flow field such an H-type channel, in which both the counter and parallel flows with heat transfer are applied for the inlet velocity condition. Also, the different thermal conditions are applied at the inlet of channels to observe the effect of inlet thermal conditions. In the mixing part of the channels, the recirculation region can be observed in all cases, where the symmetric recirculation regions are yielded in the case of parallel flow, and a recirculation region with two secondary regions can be observed in the case of counter flow. Thus, it can be seen that the turbulent mixing process and heat transfer are remarkably affected by these phenomena from LES results. As for the effect of inlet thermal condition, slightly different distributions of mean temperature by the different inlet thermal conditions are found in the mixing part. Therefore, the LES presents a turbulent heat transfer phenomena in the complex flow field such an H-type channel in detail.

1. 緒言

地下鉄のトンネル内で列車が走行すると、ピストン作用によって乱気流（乱流）が生じる。この気流が駅構内へと流入し、さらに駅構内の空気を流出させることで乱流混合現象が生じる。この混合ではトンネル内部の熱を駅構内へと輸送し、また駅構内の冷気を流出させるため、駅構内での気流の発生に加え冷房効果を損ねるといった問題が存在する [1]。そのため、2つの流路間を接続した際の乱流場における速度場や熱の乱流混合過程を把握することが必要である。この問題に対する解析方法として、実験的手法と計算的手法が考えられるが、本研究では、より詳細な乱流混合現象が観察できる計算的手法により解析を行う。計算的手法では、方程式をモデル化することなく解くことで高精度な解が得られる直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation: DNS) が有効だと考えられるが、計算負荷の観点から DNS を行うことが難しい。そこで、将来的に地下鉄トンネルのようなスケールの大きな乱流熱伝達・混合場の解析を目指し、乱流諸量を大小の渦に分解し、格子スケール以下 (Sub-Grid Scale: SGS) の渦をモデルとして与えることで計算を行う大規模渦シミュレーション (Large Eddy Simulation: LES) を実行することが、このような場における有益かつ現実的な計算的解析だと考えられる。

そこで、本研究では、地下鉄トンネルを単純模擬化した、2つのチャネル間流れの流路途中を接続して混合部を設けた H 型混合流路の LES を実行することで、流路内部の乱流熱伝達・混合現象の詳細を調査することを目的とする。ここでは、チャネル流れの流入速度条件を、同一方向（並行流）と逆方向（対向流）に流入させた場合

や、流入温度条件を一様温度とした場合と、発達して空間分布及び温度乱れを持つ場合を比較することで、これら入口条件の差異が与える乱流熱混合への影響についての考察を行う。

2. 計算手法

本研究における LES の支配方程式は浮力を考慮しない非圧縮と仮定し、Boussinesq 近似を施した熱流体の運動方程式 (Navier-Stokes 方程式) と連続の式、及びエネルギー式に対してフィルター操作を施したものである [2] [3]。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{2}{Re_b} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{2}{Pr Re_b} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{ij} (= \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$ は SGS 応力項、 $q_i (= \overline{u_i \theta} - \bar{u}_i \bar{\theta})$ は SGS 熱流束項であり、これらの SGS モデルは次のような渦粘性表現に基づき与えられる [2]。

$$\tau_{ij}^* = -2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} = -\nu_{SGS} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$q_j = -\alpha_{SGS} \bar{G}_j = -\alpha_{SGS} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} \quad (5)$$

ここで、 $\tau_{ij}^* = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}$ であり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。式 (4) における速度場 SGS モデルには Mixed-Time-Scale (MTS) モデル (以下 MTSn モデル) を [4]、式 (5) における温度場 SGS モデルには 0 方程式モデルを用いた。

Tab. 1: Computational method and conditions

Grid		Staggered grid
Coupling algorithm		Fractional step method
Spatial scheme		2nd-order central difference
SGS Model	Velocity	MTSn model
	Thermal	0 equation model
Domain size ($x \times y \times z$)	Driver	$3.2D \times D \times 1.6D$
	Main	$5D \times 3D \times 1.6D$
Grid points ($x \times y \times z$)	Driver	$64 \times 48 \times 64$
	Main	$320 \times 160 \times 64$
Time Advancement	Viscous term	Crank-Nicolson Method
	Others	Adams-Bashforth Method

図 1 に計算対象及び計算領域を示す。主計算部では平行に設置された 2 本の主管 (main channel 1,2) とそれらを接続する混合部 (Mix channel) で構成し、主管にそれぞれのドライバー部で生成された完全発達乱流場を流入させる。レイノルズ数は、代表長さとして主管のチャンネル全幅 D を、代表速度は主管のバルク速度 U_b として $Re_b = U_b D / \nu = 5650$ としている。温度に関しては、一方の主管から T_h 、もう一方から T_c の温度場を流入させ、それぞれに温度乱れの無い一様な温度分布を与える条件 (一様温度条件) と、内部発熱項をエネルギー方程式に適用し、空間分布及び温度乱れを生じさせた条件 (内部発熱条件) を設定した。空間温度分布を生じさせた場合では、ドライバー部のバルク温度 T_b で無次元化し、一方の主管で高温 $T_h = \theta^* / T_b$ 、もう一方で低温 $T_c = (\theta^* - T_b) / T_b$ と定義した。ここで、混合流路内の局所温度 T として、無次元温度は $\theta = (T - T_c) / (T_h - T_c)$ としている。プラントル数 $Pr = \nu / \alpha$ は作動流体に空気を想定して 0.71 とする。計算方法と格子点数を表 ?? に示す。境界条件はドライバ部、主計算部共に全壁面で滑りなし条件 ($u = v = w = 0$)、スパン方向に周期境界条件、流出境界に対流流出条件を課した。温度場はドライバ部で一様温度条件 (UMT) 及

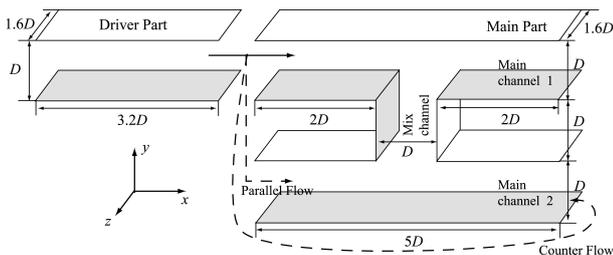


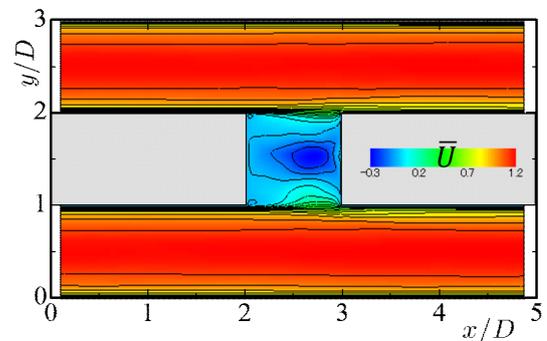
Fig. 1: Flow contiguation and domain

び一様内部発熱条件 (TEG), 主計算部では断熱条件とする。計算格子は x と y 方向は不等間隔格子, z 方向は等間隔格子とした。

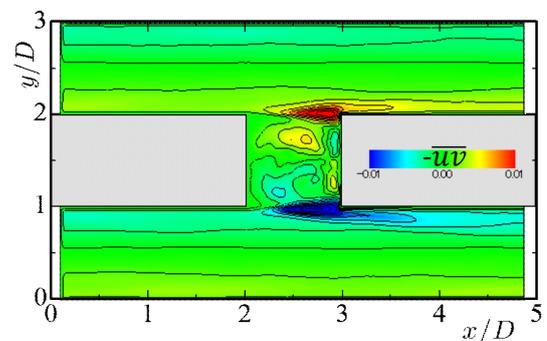
3. 結果と考察

3.1 流入方向による流れの特性

まず、速度場において各流入条件での流れの特性について記す。並行流と対向流の場合の平均主流方向速度とレイノルズ応力分布を図 2, 3 にそれぞれ示し、また、混合部内の流線を図 4 に示す。ここで、主管から混合部への流入は主流下流側から生じている事がわかる。並行流の混合部では主流方向に対象的な循環領域が生成されている。この循環中心は混合部中央から下流方向にずれている。一方、対向流では混合部全体の循環に加え、上流角部付近で微小な再循環領域を形成している。この再循環領域では乱流熱流束が発生しないため、乱流による混合促進がされないという知見が得られている [5]。ここで乱流エネルギー分布である図 5 に着目すると、主管と混合部の境界面付近において流れ下流側で乱流が促進されていることが観測できる。また、並行流では混合部中心において乱流が促進される。これは二つの循環領域が隣接することが影響すると考えられる。一方、対向流では乱流が生成されないため、乱流混合による影響は並行流

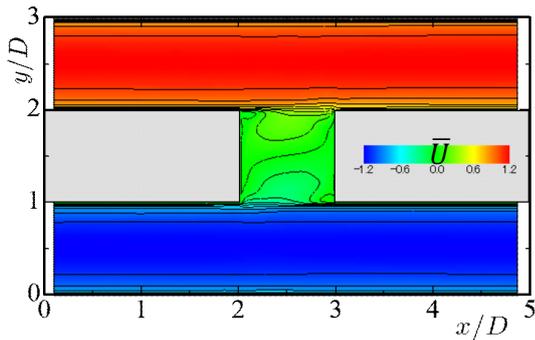


(a) Mean velocity

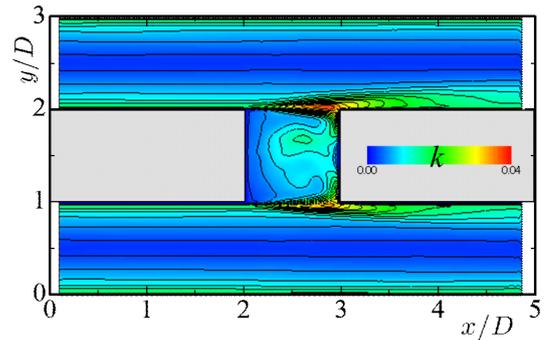


(b) Reynolds shear stress

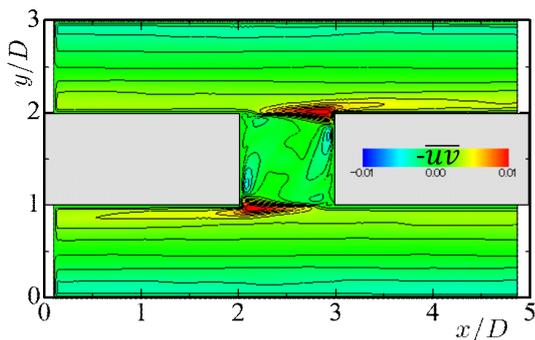
Fig. 2: Distributions of Turbulent quantities (Parallel flow)



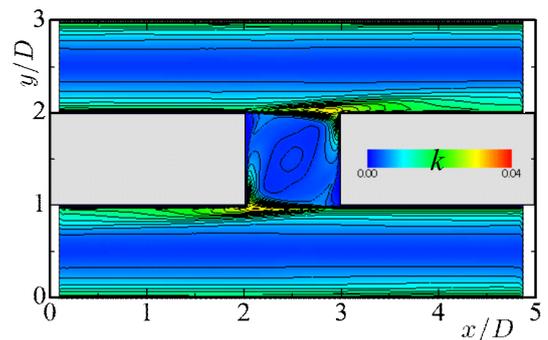
(a) Mean velocity



(a) Parallel flow



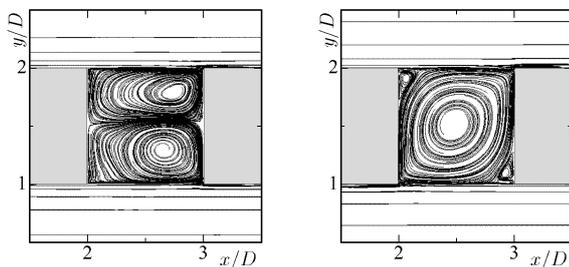
(b) Reynolds shear stress



(b) Counter flow

Fig. 3: Distributions of Turbulent quantities (Counter flow)

Fig. 5: Distributions of Turbulence energy



(a) Parallel flow

(b) Counter flow

Fig. 4: Streamlines of H-Type channel flows

より小さいと考えられる。

3.2 並行流による乱流熱伝達現象の特性

図 6 は並行流の平均温度分布 $\bar{\theta}$ 及び乱流熱流束分布のそれぞれの結果を示す。図 6(a) に示した平均温度分布では、流入温度条件によって混合部内部の温度に差が見られる。これは混合部へ流入、流出する流れが主管と混合部の境界付近のみであり、主管中心部付近 ($y/D = 0.5, 1.5$) の熱量が流入されないため、混合部内の平均温度は小さくなっていると考えられる。また、主流下流側壁面 ($x/D = 3.0$) から上流側 ($x/D = 2.0$) に向けて混合されていることが分かる。図 6(b) に示す主流方向乱流熱流束 $-\overline{u\theta}$ では主流と混合部境界面付近で混合が促進されており、混合部内での乱流熱伝達量は小さい。また、図 7(b) では低温

側主管の後流では壁面近傍の主流方向乱流熱流束分布が低減されていることが分かる。これは流入時に温度分布が存在する際、高温側主管では低温である壁面近傍の熱の流出が生じるのに対し、低温側主管では熱が流入されており、温度分布の均一化が促進されているためと考えられる。図 6(c) に示す壁面垂直方向乱流熱流束 $\overline{v\theta}$ では $x/D = 2.75$ において混合中央の混合が促進されていることが分かる。これは未混合状態の流れの合流点付近での熱伝達が促進されていることを意味する。

3.3 対向流による乱流熱伝達現象の特性

図 7(a) に示した平均温度分布では並行流同様流入温度分布の有無により混合部内の温度分布が変化している。また、混合部内に着目すると、 $x/D = 2.25 \sim 2.75$ では壁面垂直方向温度分布が逆転していることが分かる。これは図 7(b), (c) に示されるように、乱流熱流束を見ると混合部内での乱流熱伝達は微小である事がわかる。したがって、乱流熱伝達による流入温度の混合が促進されない状態で混合部内を循環しているためと考えられる。このように、対向流では混合部内で一つの循環領域が大部分を占めるため、混合部における乱流による熱伝達の促進は小さいと考えられる。

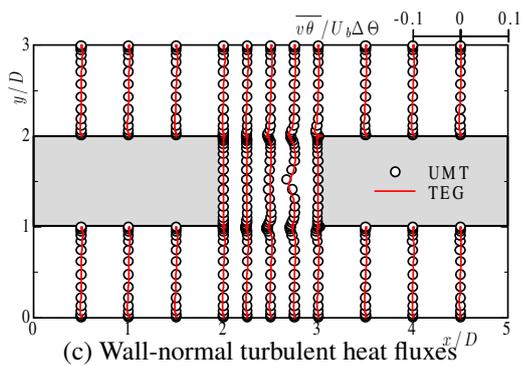
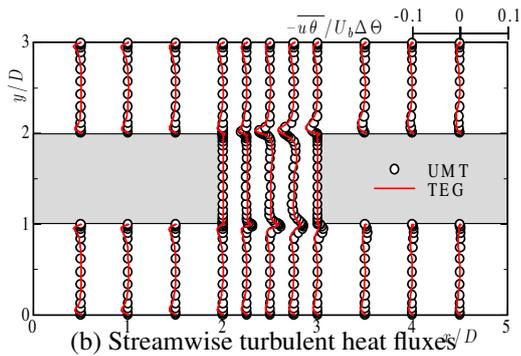
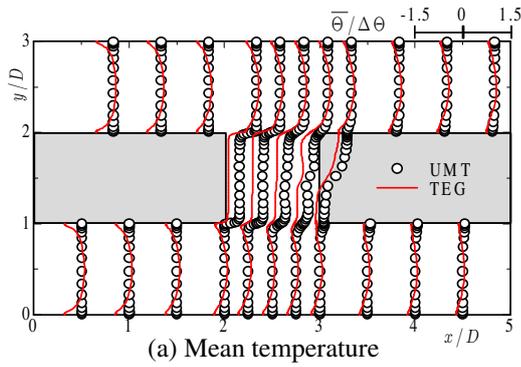


Fig. 6: Distribution of turbulent quantities in thermal field (Parallel flow)

4. 結言

本研究では、流入方向と入口温度条件を変化させた H 型流路内乱流熱伝達・混合場の LES を実施し、乱流熱伝達・混合構造の解析を行った。混合部周辺の速度場の乱流現象に関して着目すると、主管と混合部の境界面付近で乱流が促進されることが確認された。並行流においては循環領域が対称に生成され、これが影響し合うため混合部中心付近で乱流が促進される。一方、対向流では混合部全体での循環に加え、主流上流側壁面近傍で再循環領域が観察された。温度場において、乱流が促進される混合部の境界面で温度混合の促進がされる。流入温度分布の有無では、主管の中央部分の熱が影響しないため、混合部内部の混合温度にさいが生じる結果となった。並行流では、混合部中心付近の乱流が促進される領域で乱流熱伝達が促進された。一方、対向流では混合部内の乱流熱伝達現象の影響は小さく、温度混合が促進されないこ

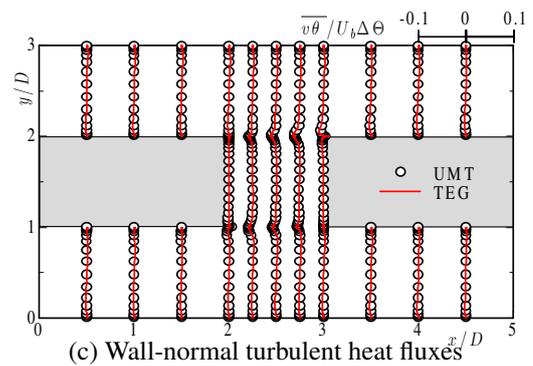
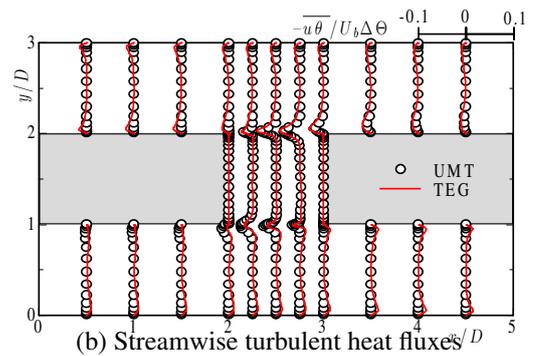
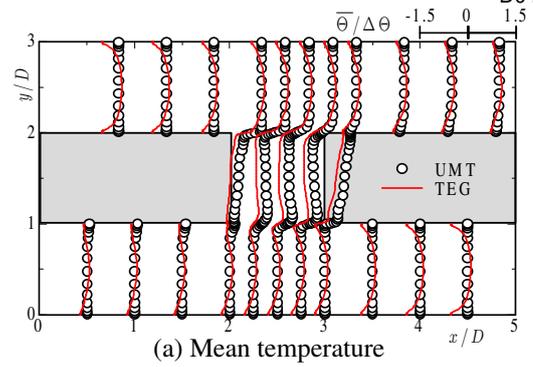


Fig. 7: Distributions of turbulent quantities in thermal field (Counter flow)

とが確認された。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人鉄道総合技術研究所との共同研究による。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] Y. Sugihara, T. Shiratori, and Y. Matsudaira. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 64, No 616, pp 138-144, 1997.
- [2] Inagaki, M., Kondoh, T. and Nagano, Y., 2005, *Trans. ASME, J. Fluids Engng.*, **127**, pp. 1-13.
- [3] Inagaki, M., Hattori, H. and Nagano, Y., 2012, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **34**, pp. 47-61.
- [4] Inagaki, M., 2011, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **32**, pp. 26-40.
- [5] Hirota, M., Mohri, E., Asano, H. and Goto, H. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **31.5**, pp. 776-784, 2005.