二つのリブを設置した二次元流路内乱流伝熱の DNS DNS Study on Turbulent Heat Transfer in a Two-Dimensional Channel with Two Ribs

○学 三浦 貴広 (新大) 正 松原 幸治 (新大) 学 川合 孝治 (新大)
Takahiro Miura, Koji Matsubara and Koji Kawai, Niigata University, Ikarashi-2nocho, Nishi-ku, Niigata

Direct numerical simulation was performed for flow and heat transfer in a channel with two ribs attached to one wall. Inlet condition was the fully developed flow, and spatially establishing behavior of field values was obtained. Heat transfer is deteriorated in stagnated flow regimes in the gap between two ribs and behind the second rib, while good performance of heat transfer occurs at upper surface of ribs and at the wall downstream from back side of the second rib. There is discrepancy between reattachment point and peak Nusselt number, but the latter is consisted with turbulence promotion and thus enhanced transfer of heat from the wall.

Key Words: Heat Transfer, Turbulent Flow, Channel Flow, Turbulence Promoter, DNS

1. 緒言

壁面にリブを設置すると流動制御や伝熱促進が可能であるため、壁面に周期的にリブを配置した場合の発達領域に対して実験と DNS^{(1),(2)}が行われている。いっぽう、最初の数段のリブに見られる発達過程での現象や、少数のリブを伝熱面に配した場合の下流側の現象については、後ろ向きステップ流⁽³⁾や乱流促進体に関する研究例^{(4),(5),(6)}が一部参考になるが、形状的な違いから不明な点も少なくない。

本研究では、発達乱流が流入する二次元流路の壁面上に一つまたは二つのリブを付設した場合を取り上げ、DNSにより熱流動場を検討する。

2. 計算手法

計算対象の概略図を図1に示す。単一または二つのリブを設置した二次元流路において、発達した流れ場と温度場が流入する場合を想定する。流路入り口の境界条件として、流れ方向の周期性を仮定した DNS によって得た平滑流路内発達乱流を与えた。リブ付流路の流出条件は自由流出とした。二つの流路において、壁面では滑りなし条件、 z 方向に周期境界条件を用いる。温度の境界条件は、下壁面およびリブで等温加熱、上壁面で等温冷却とし、浮力の影響は無視した。

非圧縮性流体の連続の式、Navier-Stokes 方程式およびエネルギー方程式を支配方程式とし、フラクショナルステップ型アルゴリズムで、空間差分に4次精度中心差分、時間差分にクランクニコルソン法を適用する。

計算条件はレイノルズ数 $Re_\tau = u_{\tau 0} \delta / \nu$ が150、プラントル数 Pr は0.71とした。ここで、 $u_{\tau 0}$ は平滑流路の平均壁面摩擦速度、 δ はチャネル半幅、 ν は動粘性係数である。リブ形状は長野ら⁽¹⁾の計算ケースの1つと同じであり、図2に示した通りである。残りの計算条件を表1に示す。第1リブ上流端において格子が最密となるように x, y 方向に不等間隔格子を用いた。

3. 計算結果および考察

以下では、特に断らない限り二つのリブを配した結果に注目する。図3に次式で定義したヌセルト数 $Nu^{(1)}$ の下壁での分布を平滑流路での平均値と共に示す。

$$Nu = \frac{4q_w d}{(T_w - \langle T \rangle) \lambda} \quad (1)$$

ここで、 q_w は壁面熱流束、 T_w は壁温、 λ は熱伝導率、 d は

Fig.1 Computational domain

Fig.2 Rib size

Table 1 Computational conditions

	Inlet part	Rib part
Grid number ($N_x \times N_y \times N_z$)	32×92×32	384×92×32
Spatial resolution (Δx^+)	18.8	0.938 ~ 18.8
Spatial resolution (Δy^+)	1.00 ~ 14.1	
Spatial resolution (Δz^+)	10.0	
Time resolution (Δt^+)	3.00×10^{-3}	

壁面からレイノルズせん断応力が零になる点までの距離を表し、 $\langle T \rangle$ は距離 d にわたるバルク平均温度を表す。図4と図5には、平均速度と平均温度の分布をそれぞれ示した。これらの図において、二つのリブの間隙および第2リブ背面近傍では、流動の停滞により温度勾配が小さくなり、熱伝達が悪くなっている。前者においては、周期的にリブを配置した場合⁽¹⁾と比較してヌセルト数がかなり低い値をとっていた。これは第1リブへの流れの衝突による排除効果に起因する。しかしながら、二つのリブ表面と第2リブ下流側の広い領域 $x/\delta \geq 2$ でヌセルト数が大きくなっており、顕著な伝熱促進効果が認められる。

表2に、最下流リブ背面からの再付着点距離 X_R とヌセルト数が極大値をとる距離 X_p をリブ一つでの計算結果と共に示す。リブ一つでの計算は第2リブを取り除いた以外、計算条件は同一である。バックステップ流れ⁽³⁾においては、再付着点付近でヌセルト数が極大となると報告されている

が、本計算では再付着点距離の約2倍の位置においてヌセルト数が極大となり大きく異なる。

図6、図7に乱流エネルギー、壁面垂直方向の乱流熱流束の下壁近くでの分布を $x/\delta = 1, 2, 3, 4$ および平滑流路について示す。バックステップ流れでは再付着点近傍で最も乱れが強くなり次第に減衰する⁽³⁾が、本計算では再付着点から $11.3H$ 下流に相当する $x/\delta = 3$ でも乱れが強くなり、乱流熱流束は再付着点付近である $x/\delta = 2$ よりも大きな値をとる。これは先に見た流路壁上での伝熱促進と符合する。再付着点と乱流促進領域がずれる理由については今後の検討に譲る。

(a) Around the two ribs

(b) Downstream of the 2nd rib

Fig.3 Local Nusselt number on the bottom wall

(a) Around the two ribs

(b) Downstream of the 2nd rib

Fig.4 Mean velocity vector

Fig.5 Contour-line of mean temperature

参考文献

- (1)長野ら, 機論 (B 編), **70**-689 (2004), 229-236.
- (2)Leonardi, S. et al., Trans. J. Fluid Mech., **491** (2003), 229-238.
- (3)Vogel, J. C. and Eaton, J. K., Trans. ASME, J. Heat Transf., **107** (1985), 922-929.
- (4)鈴木ら, 機論 (B 編), **54**-503 (1988), 1716-1722.
- (5)稲岡ら, 機論 (B 編), **58**-551 (1992), 1523-1529.
- (6)矢尾ら, 機論 (B 編), **60**-576 (1994), 2819-2825.

Table 2

	One rib	Two ribs
Flow reattachment length (X_R)	$10.3H$	$8.7H$
Maximum Nusselt number length (X_p)	$17H$	$20H$

(H : Height of rib)

Fig.6 Profiles of turbulence energy

Fig.7 Profiles of wall-normal turbulent heat flux