

壁温がステップ状に変化するチャンネル乱流の数値解析

Numerical analysis of channel turbulence with stepwise changes in wall temperature

永岡 真 (Nagaoka Makoto)

本研究課題は熱（温度）による乱流特性の変化を利用して乱流摩擦損失の低減法を探索、導出し、摩擦抵抗低減デバイスとしての実用化に向けた設計指針を得ることを目的としている。これは流体機器や高速移動体などの性能向上や再生可能エネルギーの有効利用にも直結する技術となる。本年度は、壁温分布と乱流特性の関係を解明するためのシミュレーションモデルを構築するために、壁温がステップ状に変化するチャンネル乱流の摩擦および熱伝達の解析を実施した。

計算は温度変化を伴うため圧縮性流体を扱う必要がある。ベースコードには OpenFoam の rhoPimpleFoam を用い、ラージエディシミュレーション (LES) で解析した。なお、このコードおよび用いた計算法、設定した計算格子（解像度）については、通常の等温の発達したチャンネル乱流および上下面に温度差がある場合のチャンネル流れの乱流諸量および乱流熱伝達特性の計算結果が、他の論文で示された直接数値シミュレーション (DNS) の結果と比べて定量的に遜色のないことを検証済みである。

本計算では、図 1 に示すように上流部に等温壁（温度 $T_0=300\text{K}$ ）の発達したチャンネル内乱流場を生成するドライバ部を設け、下流部の下面壁のみ一定の高温（ $T_H=600\text{K}$ ）に設定した。計算領域はチャンネル半幅 h に対して、ドライバ部長さは $8h$ ，高温部長さは $24h$ ，スパン(z)方向に $3h$ とした。計算条件は、等温部での摩擦速度を代表速度としたレイノルズ数で $Re_\tau=456$ ，バルク流れのレイノルズ数で $Re_b=7486$ とした。初期値には全域等温条件での十分発達した乱流場を与え、その後、壁温設定のみ変えて無次元時刻(tU_b/h)で 369 まで計算し平均値を求めた。

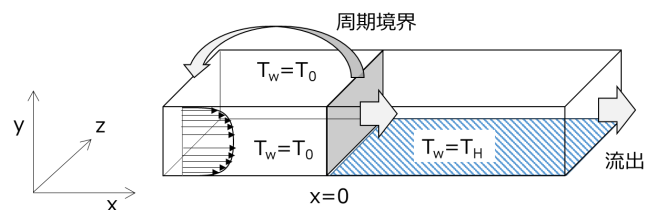


図 1 シミュレーションモデル設定

図 2 に主流(x)方向の平均壁面せん断応力と熱流束を示す。壁温がステップ状に変化する $x=0$ 地点で急激に熱流束は上昇し、その後単調に減少し、 $x=1.6\text{m}$ 以降でほぼ一定となる。壁面せん断応力も同様に $x=0$ で急増し最大値となるが、興味深いのはその下流では熱流束のように単調現象ではなく、 $x=1.2$ 付近で等温（上流）領域よりもやや低い極小値をとる。

図 3 に主流方向の断面瞬時速度ベクトルと温度分布を示す。上流部となる図 3(a)は等温の発達乱流場をとなっており、上下面付近には、とも同じ強さとスケールの渦が形成されているのに対して、図 3 (d)では壁温度差のある発達乱流の結果と同様、すなわち高

温(下)壁側の渦構造は大きく、低温(上)壁へと熱が移動するとともに運動量も輸送される様子が見られる。図 3(b)から(d)まで温度境界層が厚くなっていく様子がみられるが、速度分布を詳細に比較すると、図 3(c), (d)での等方的な渦に対して、図 3 (b)では高温壁近傍での流速が大きくスパン(z)方向の流れが強くなるが、高さ(y)方向の流れが抑制されるような運動量の分配がみられる。 $x=0\sim0.2\text{m}$ 付近では、速度境界層の乱流の変調と、温度境界層の発達により熱と流れの相似則が崩れる領域があることがわかる。このような特性を利用し面内の温度分布を断続的に繰返し変化させたり、時間的に周期変化させることにより乱流渦の y 方向のスケールを抑制することで摩擦低減を図れる可能性が示唆される。

今後、境界条件の与え方を拡張することで、高温と低温を断続的な壁面分布を与えた場合や、動的に変化させることにより本仮説を実証する。

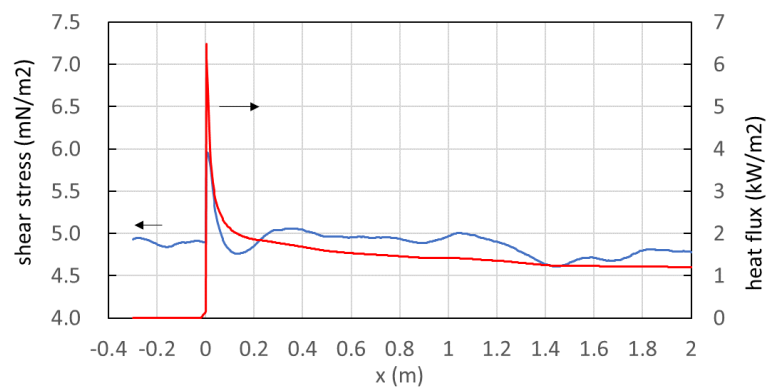


図 2 主流方向の平均壁面せん断応力と熱流束分布

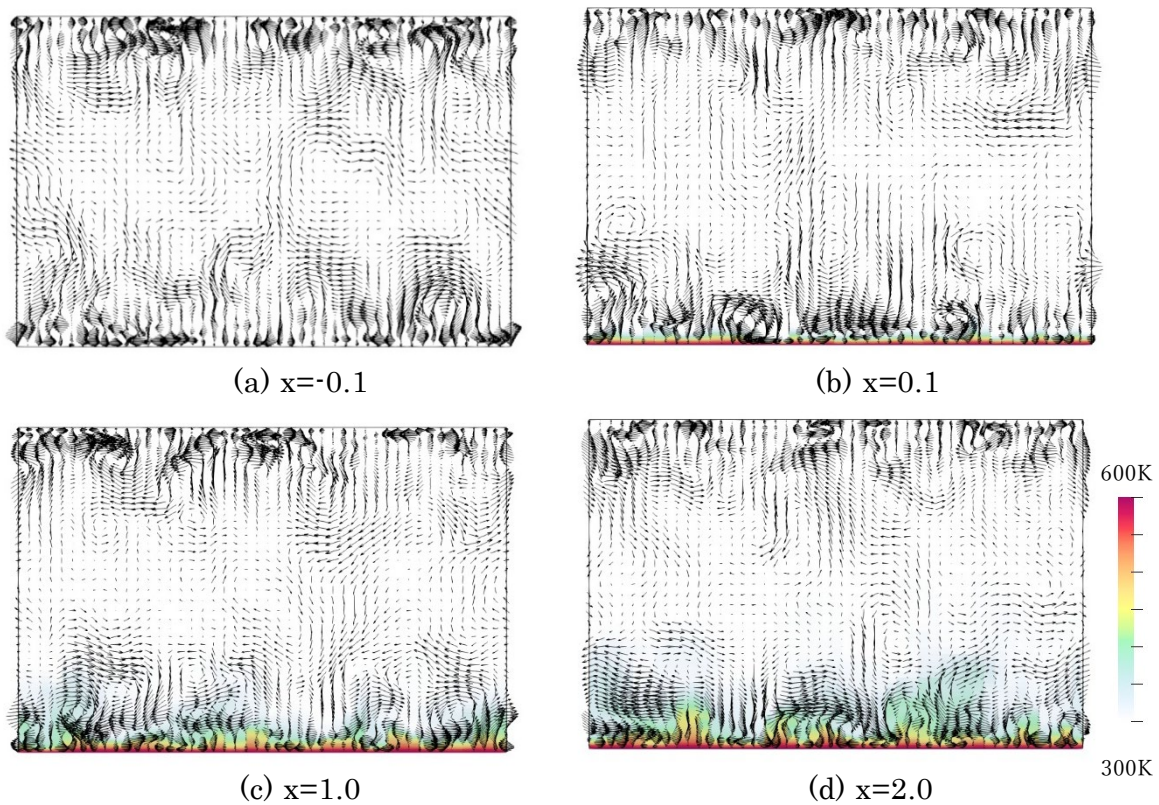


図 3 チャンネル断面の瞬時速度ベクトルと温度分布