

Analysis of turbulence structure over the d- and k-type roughness

○ 永井尚教 (阪大院), 三宅裕 (阪大院), 辻本公一 (阪大院) 中地克 (クボタ)

Naonori NAGAI, Yutaka MIYAKE, Koichi TSUJIMOTO and Masaru NAKAJI
Dept. Mech. Eng., Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

A Direct numerical simulation(DNS) is conducted for a turbulent channel flow having a rough wall and a smooth wall using spectral method. On the rough wall, rib elements are placed for spanwise direction with some extent streamwisely, which are realized by virtual forcing to satisfy adhesive condition on the rib's surface, based on the numerical treatment proposed by D.Goldstein *et al.*(1994). The rib's height (h^+) is 20^+ , that means transitional regime of rough-wall flow. Global Reynolds number nondimensionalized wall-friction velocity and half channel width is 150. Two types of roughness element are examined, *i.e.*, d- and k- type roughness. As visualizing the coherent structures such as coherent vortex and streaky structure, they are observed above the rib element although the rib element modulate strongly turbulence phenomena over the wall.

1. 緒言

壁近傍乱流の組織構造に関する維持生成機構の研究はDNSにより大きく進展した。しかし、ほとんどは滑面壁を対象としたもので、実用上、重要な粗面壁近傍の組織渦構造および熱輸送の理解はまだ十分ではない。平滑面乱流では壁近傍の運動量交換や熱輸送に関し、主流方向に軸を持つ縦渦が支配的であることが、いくつかの研究から明らかにされている。しかし、粗面壁の場合、壁近傍では必ずしも成熟した縦渦が整然とは形成されず、滑面壁の知見に基づく説明は適用できない。最近、筆者らは粗面乱流のDNS^{1,2,3)}を開始し、流れ場の平均特性・組織構造の解析を行った結果、壁近傍における乱れの変更是壁遠方場には影響せず、流路幅スケールでその特性が整理されること、粗さ要素上部では発達した縦渦の数は減り、壁遠方場の乱流特性が壁近傍へ進展してくることを示した。さらに本研究では粗さ要素が壁近傍の流れ場に与える影響を評価するため、異なる二種類の粗面乱流のDNSを行う。粗さ要素として、スパン方向にリブを配置し、流れ方向に配置間隔を変え、代表的なd,k型の粗さ要素を模擬する。本報ではこれら要素の配置間隔の違いが与える乱流特性への影響について報告する。

2. 計算方法

2.1 計算条件 計算は平均圧力勾配を一定とし、スペクトル法によるDNSで行なった。座標系は主流方向、壁面垂直方向、スパン方向にそれぞれ x, y, z とし、各速度成分を u, v, w とする。境界条件は x, z 方向に周期条件、壁面上で粘着条件を課す。計算条件を表1にまとめる。各種物理量の時間平均量に $[-]$ 、変動成分に $[']$ 、壁指標で整理した量に $[+]$ を付して表す。

Table 1: Calculation condition (Case 1)

	Streamwise	Wall normal	Spanwise
Length (wall unit)	$2\pi H$ (942)	$2H$ (300)	πH (471)
Grid number	256	257	128
Grid separation	3.68	$0.011 \sim 1.84$	3.68
Reynolds number	$Re_\tau = H\bar{u}_\tau/\nu = 150$		

2.2 粗さ要素モデル 粗さ要素として矩形状のリブを片側の壁面にのみ配置する。筆者らのスペクトル法の計算コード⁴⁾上でリブ形状を正確に表現するため、Goldstein⁵⁾の方法を採用する。これはリブ表面上の各

格子点 \mathbf{x}_s において次式(1)の外力 \mathbf{f} を時々刻々変化させ、リブ表面上の粘着条件を実現する方法である。

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_s, t) = \alpha \int_0^t \mathbf{U}(\mathbf{x}_s, t') dt' + \beta \mathbf{U}(\mathbf{x}_s, t) \quad (1)$$

ここで α, β は負の任意定数である。この方法では非物理的振動を抑えるため、非線形項 $\mathbf{u} \times \boldsymbol{\Omega}$ と外力項 \mathbf{f} に次式(2)でLow pass filterを施す⁵⁾。

$$K = e^{\xi_2(n_x/N_x)\xi_1} e^{\xi_2(n_y/N_y)\xi_1} e^{\xi_2(n_z/N_z)\xi_1} \quad (2)$$

ここで (n_x, n_y, n_z) はそれぞれ (x, y, z) 方向の波数モード、 (N_x, N_y, N_z) は各方向の全モード数である。また、 ξ_1, ξ_2 も任意の定数で、 $\xi_1 = 20, \xi_2 = -1$ とした。リブの高さは $h = 0.133H$ ($h^+ = h\bar{u}_\tau/\nu = 20$)とし、この高さは完全粗面 ($h^+ > 70$) に対し遷移領域に属する。リブを図1のように等間隔に、8本(k型の場合)、16本(d型)配置した。

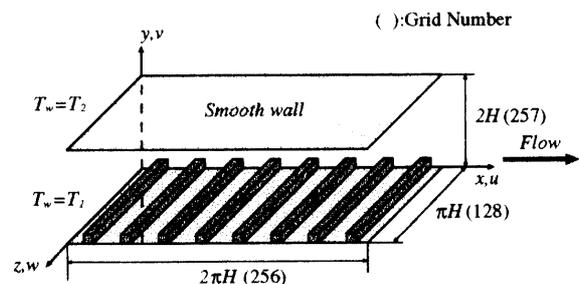


Fig. 1: Computational volume (Case 1)

3. 計算結果

3.1 流れ場の平均特性

平均流速の分布を図2に示す。参考のため $Re_\tau = 150, 395$ の平滑面の場合も加えた。粗面乱流の場合、対数域における直線を平滑面の場合と平行にするため、原点の修正を行なっている。リブによる形状抵抗のため流量は同じレイノルズ数 ($Re_\tau = 150$) と比べ、k型の場合60%まで減少する。流れはリブの影響で平滑面壁側に偏り、乱流せん断応力がゼロとなる位置 H_r で無次元化した粗面壁側のレイノルズ数は $Re_{\tau,r} = 210$ (k型), 203(d型)になる。また、対数域での平滑面の速度分布からの下方へのズレは $\Delta U^+ = 8$ (d型), 4(k型)となり、粗さ高さで整理された実験結果のパラッキの範囲

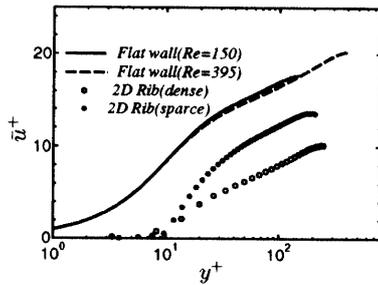
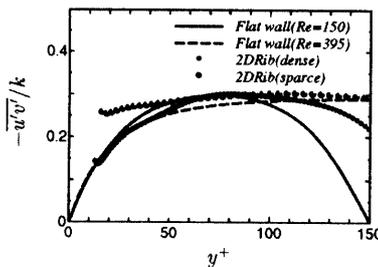


Fig. 2: Mean streamwise velocity

Fig. 3: Structure parameter $-\overline{u'v'}/k$

にある⁶⁾。図3に乱流せん断応力と乱れエネルギーの比 $-\overline{u'v'}/k$ の壁垂直方向分布を示す。k型の場合、壁遠方の特性が壁近傍に進展してくる様子が確認されるが、d型の場合、壁近傍では通常の平滑面と似た特性を示す。k型の場合は壁近傍への遠方構造の進展に起因する比較的大規模構造スケールによる乱流せん断応力の生成が行われる。しかし、d型の場合、要素上部の粘着条件が強く作用するため、リブ上部の平均せん断応力が強く、それにより発生する縦渦のような壁近傍の要素渦構造により乱流せん断応力の生成が行われることを示している。

3.2 流れ場の構造 粗面の場合の壁近傍には強いストリークは見られず、壁から離れた位置にまで広がる粗大ストリークが形成される。この粗大ストリーク構造は比較的高いレイノルズ数での壁から離れた位置での特徴的構造で、筆者らの砂粒粗さを模擬した粗面乱流 ($Re_\tau = 400$) の結果²⁾においても観察されている。図4はk型粗面の場合の主流変動速度のspan方向相関を、壁からの一定の高さで求めた等値線の分布を示している。滑面の場合、相関が負となるピーク位置が $y^+ = 200$ 辺りに見られるが、粗面の場合、このピークが壁に近づき $y^+ = 70$ 辺りになる。すなわち、粗面の場合、近傍構造が破壊され、壁遠方構造が壁に近づく様子がわかる。この特性は図3とも対応している。k型の場合の瞬時の速度勾配テンソルの第二不変量 ($Q^+ \geq 0.02$) を可視化すると(図5)、リブ上流側を基点として強いspan方向渦が生成され、その一部がリブ上面付近からせん断力により主流方向に引き伸ばされる。滑面の場合、壁近傍での縦渦の発生には成熟したストリーク構造が崩壊することによるもの、すでに存在する縦渦の周囲に新たに渦が再生するなど、縦渦の形成に関しいくつかのストリークが提案されているが、粗面の場合、これらの定見は当てはまらず、粗面前方で不安定なせん断層がリブを乗り越え、崩壊し、渦構造が形成される様子が観察される。一方d型の場合、壁近傍のリブ角部を起因とする大規模な渦構造の形成やk型の場合に観察されるリブ上流側の強いspan方向渦も見られるが主流方向に引き伸ばされた縦渦も多

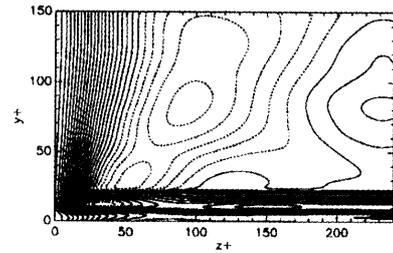
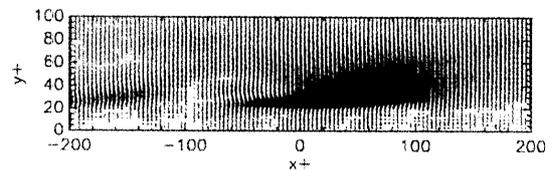


Fig. 4: Contour plot of two-point correlation with spanwise separation for the streamwise fluctuating velocity

Fig. 5: Coherent structure over the rough wall (k-type; $Q^+ \geq 0.02$)Fig. 6: Conditional averaged structure over the rough wall on $x-y$ plane (d-type)

く観察される。ここで、d型の場合について条件抽出し平均化された流れ場の主流方向断面ベクトル図を図6に示す。壁垂直方向速度の歪度の分布は要素上で吹き降ろしが優位であることを示すことから、要素上部 $\delta y = 15$ の位置の歪度 $S_v \leq -15$ および $\partial u / \partial x \geq 0$ で条件抽出を行った。図から、リブ上部では吹き下ろしによるイベントはリブ間隔を超えたスケールを有する。この様子はリブの角近傍であることをさらに付加した場合も同様である。一方、k型の場合、条件抽出するとイベントはスポット状で、かつリブ上部以下に起こる大規模な循環流れも同時に抽出される。

結言

2種類のリブを配置した粗面乱流のDNSを行い、平均特性と乱流構造について調べた結果、k型の場合、要素形状を反映した大規模なイベントが形成されるが、d型の場合、要素上部では要素の配置間隔を超える比較的滑面に近いイベントの発生と乱流構造がk型と滑面が混在したものであることを示した。

文献

- 1) 縣康明, 三宅裕, 辻本公一, 第12回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (1999), pp 121-122.
- 2) 三宅裕, 辻本公一, 縣康明, 機論B編 65-633 (1999), pp. 109-116.
- 3) 中地克, 三宅裕, 辻本公一, 第13回数値流体力学シンポジウム講演論文集 CD-Rom版 (1999).
- 4) 三宅裕, 辻本公一, 機論B編 61-587 (1995), pp. 2401.
- 5) D.Goldstein, R.Handler and L.Sirovich, *J.Fluid Mech.*, **302** (1995), pp. 333-376.
- 6) M.R.aupach, R.A.Antonia & S.Rajagopalan, *Appel. Mech. Rev.* **44-1** (1991), 1