

透過性を有する平行平板間乱流の直接数値シミュレーション

静岡大学 大学院工学領域 数理システム工学系列

正会員

横嶋 哲

静岡大学 大学院総合科学技術研究科 数理システム工学コース

学生会員

○菅野 雅也

1. はじめに

浸透床や樹木群のように透過性を有する境界は水工水理学分野にも遍在する反面、その影響の理解は不透過な境界と比較して不十分である。著者らはこれまで、チャンネル乱流の境界にシンプルな透過性を付加した系を対象として、その抵抗特性や乱流変動について数値実験によって調べてきた¹⁻³⁾。本報は特に以下の2点について前報²⁾の改善を試みたものである：(i) 境界極近傍での境界法線方向空間解像度が十分ではない、および(ii) 全検討ケースで流れの駆動力を固定して境界の透過性を変化させたため、ケース間で流量が最大で数倍異なり、比較が困難となる。

2. 数値実験条件

対象流れを図1に示す。ベースは摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 150$ 、バルク・レイノルズ数 $Re_b = 2300$ の古典的チャンネル乱流であり、全てのケースでこの Re_b を瞬時レベルで一定に保つように、主流方向の流れ駆動力を制御した。計算領域は前報²⁾と同じく、チャンネル半幅を $\delta (= L_2/2)$ として $L_1 = 3.84\delta$ 、 $L_3 = 1.92\delta$ である。この直方体領域を、前報²⁾と比べて全方向に2倍の $576 \times 300 \times 288$ の立方体計算セル（サイズは $\delta/150$ ）に分割した。これは上述の $Re_\tau = 150$ 、 $Re_b = 2300$ の古典チャンネル乱流において計算格子幅を全方向に一律に1粘性長とすることを意味する。

検討したメッシュの幾何学特性を表2にまとめた。空隙率 $\phi \equiv S^2/(S+W)^2$ は境界上を空隙が占める割合を表す。空隙率を3段階（0.25, 0.44, 0.56）に変化させ、それぞれの空隙率に対してメッシュ間隔 S （空隙サイズ）を3段階に系統的に変化させ、計9種類のメッシュ状境界を対象とした。なお、メッシュ厚 D を全てのケースで0とすることで境界粗度の影響を排除し、透過性の影響のみを顕在化させた。M00-00は $S=0$ の古典的チャンネル乱流を意味する。

メッシュ境界は埋め込み境界（IB）法で表現した。数値計算の詳細は前報²⁾および文献5)を参照されたい。

3. 計算結果と考察

図3は各ケースで得られた摩擦レイノルズ数 Re_τ の時間平均値と標準偏差のメッシュ幾何学特性に対する依存性を表す。ただし標準偏差は2倍に拡大して表示した。これより、平板境界の空隙率 ϕ が増す、またはメッシュ間隔 S が狭いほど抵抗が増すことが明確に読み取れる。これらの知見は前報²⁾のものと一致する。以下

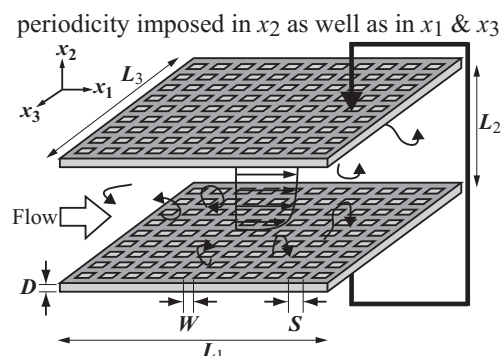


図1: メッシュ・チャンネル流の概略. 全方向に周期条件が課され、上下のメッシュは同一境界を指す. メッシュ間隔 $S=0$ の場合（ケース M00-00, 表2参照）には古典的なチャンネル乱流に帰着する。

図2: 検討対象としたメッシュ状境界の幾何学特性.

Case	ϕ	S/δ	W/δ	S^+	W^+
M00-00	0	0	∞	0	∞
M25-08	0.25	0.08	0.08	16.2	16.2
M25-16	0.25	0.16	0.16	28.8	28.8
M25-24	0.25	0.24	0.24	40.6	40.6
M44-11	0.44	0.11	0.05	33.1	16.5
M44-21	0.44	0.21	0.11	47.9	23.9
M44-32	0.44	0.32	0.16	61.8	30.9
M56-12	0.56	0.12	0.04	39.2	13.1
M56-24	0.56	0.24	0.08	59.0	19.7
M56-36	0.56	0.36	0.12	76.6	25.5

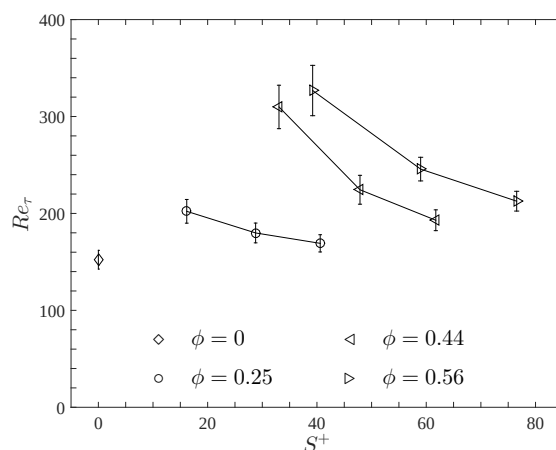


図3: 摩擦レイノルズ数の時間平均値（プロット）と標準偏差（エラーバー）の境界幾何学特性依存性。ただし標準偏差は2倍に拡大して表示。

キーワード 壁透過性, チャンネル乱流, 直接数値シミュレーション

連絡先 〒432-8561 浜松市中区城北3-5-1 静岡大学 工学部 数理システム工学科 Phone 053-478-1258

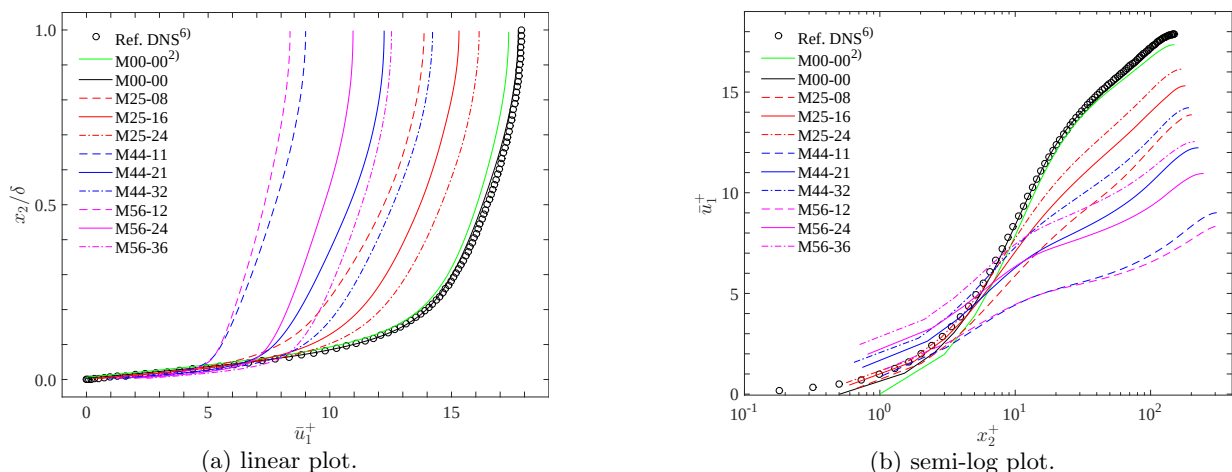


図 4: 平均主流速のメッシュ境界幾何学特性依存性.

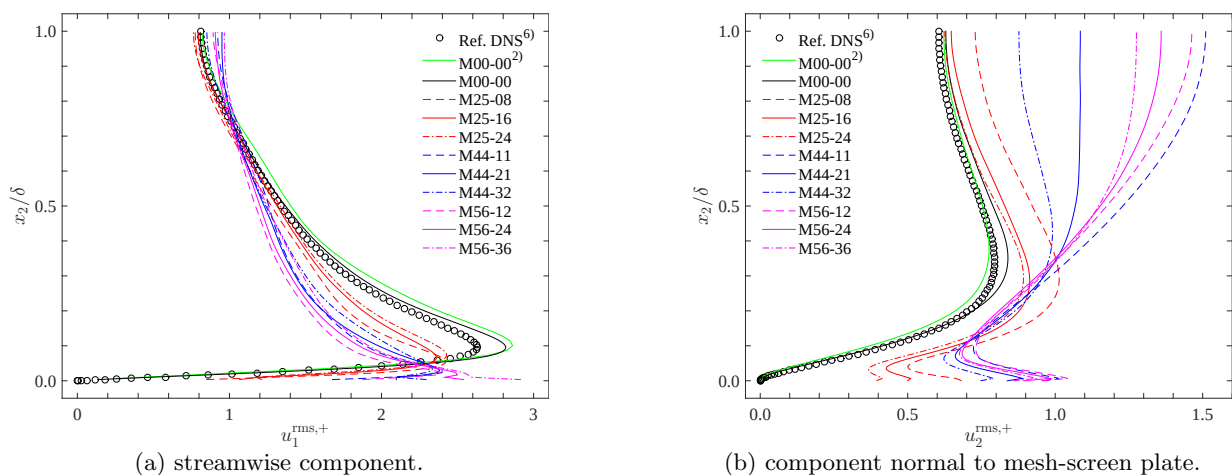


図 5: 乱れ強度のメッシュ境界幾何学特性依存性.

では、空隙率 ϕ が増す/メッシュ間隔 S が小さくなることを‘透過性が増す’と表現する。

図 4 は主流速のアンサンブル平均値の線形および片対数プロットを、図 5 は乱れ強度分布の主流方向および境界法線方向成分をそれぞれ表す。ここでは参照データとして、Iwamoto *et al.*⁶⁾ による通常のチャネル乱流 DNS 結果 ($Re_\tau = 150$)，および空間解像度が本報の半分である前報²⁾ で得られたケース M00-00 の結果も併せて表示した。また、これらの統計量は流体相と固相を区別せずに巨視的な立場から評価したものであることに留意されたい。ケース M00-00 について前報²⁾ と本報の結果を比較すると、空間解像度を 2 粘性長から 1 粘性長に上げることで、平均主流速、乱れ強度のいずれにおいても参照 DNS⁶⁾ により近い結果が得られた。なお主流方向乱れ強度のピーク値が過大に予測されている点は、空間解像度の問題ではなく、主流方向の計算領域 ($L_1 = 3.84\delta$) が不十分な点に起因している可能性がある。

流量は全ケースで一定であるものの、図 3 で示されたように‘透過性が増す’ほど摩擦速度が増加し、内層表示された主流速 $\bar{u}_1^+$ の値は小さくなる。他方で透過性境界に関わる興味深い巨視的物理量のひとつであるすべり速度は、抵抗の増加とは傾向が少し異なり、空隙率 ϕ が増す、またはメッシュ間隔 S が広いほど大きくなる傾向が読み取れる。主流方向乱れ強度 $u_1^{\text{rms},+}$ の境界上での値についても同様の振る舞いが見られた。しかしながら境界法線方向乱れ強度 $u_2^{\text{rms},+}$ の境界上での値は、図 3 の巨視的な抵抗と同じく、‘透過性が増す’につれて増加する傾向が認められた。また、‘透過性が増す’につれて流れのコア領域で $u_2^{\text{rms},+}$ が飛躍的に増加した。これより主流と垂直な断面内で混合が飛躍的に促進され、それが抵抗増大の一因となるという描像が導かれる。

参考文献: 1) Yokojima, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **80**, 033401, 2011. 2) 横嶋, 土木学会論文集 B1 (水工学), **72**(4), I.535, 2016. 3) 横嶋, ながれ, **35**(4), 307, 2016. 4) Uhlmann, *J. Comput. Phys.*, **209**, 448, 2005. 5) 横嶋, 京都大学 学術情報メディアセンター 全国共同利用版 [広報], **15**(2), 48, 2017. 6) Iwamoto, Suzuki & Kasagi, *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **23**, 678, 2002.