

TSUBAME 共同利用 令和1年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 流動摩擦抵抗予測法の構築に向けた粗面乱流直接数値解析

英文: Direct Numerical Simulation of rough wall turbulence toward the prediction of rough wall skin friction

利用課題責任者: 桑田 祐丞

First name Surname: Yusuke Kuwata

所属: 大阪府立大学

Affiliation: Osaka Prefecture University

URL: <http://www2.me.osakafu-u.ac.jp/htlab/>

邦文抄録(300 字程度)

粗さの特微量であるひずみ度や有効勾配の複合的な影響を調査するために、粗面の高さを固定して粗さの特微量を系統的に変化させた粗面を用いて、粗面乱流の直接数値解析を行った。解析は3次元27方向速度の多緩和時間格子ボルツマン法を用いて行い、局所細密格子法によって計算コストの低減を図った。ひずみ度が正で有効勾配が大きな粗面、つまり急峻な起伏を持つ山が支配的な粗面において、壁面摩擦係数が大きくなることが分かった。また、ひずみ度が壁面摩擦抵抗に与える影響は有効勾配の大きさに関わらず現れるが、急峻な起伏を有する有効勾配が大きな粗面において、ひずみ度の影響が強く表れることが明らかになった。

英文抄録(100 words 程度)

Combined effect of the skewness and effective slope of the rough surface is studied by means of the direct numerical simulations of turbulence over systematically varied rough surfaces. The simulations are performed by the D3Q27 multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method, and zonal grid refinement technique is used to circumvent the high cost of simulating rough wall turbulence. The skin friction coefficient of the rough surface is found to be larger for the surface with the positive skewness and large effective slope value, which represents the steep peak-dominated surface. The influence of the skewness on rough wall turbulence emerges irrespective of the effective slope value; however, the influence of the skewness is more substantial for the surface with the large effective slope.

*Keywords: rough wall turbulence, lattice Boltzmann, grid refinement, surface topology, direct numerical simulation*

背景と目的

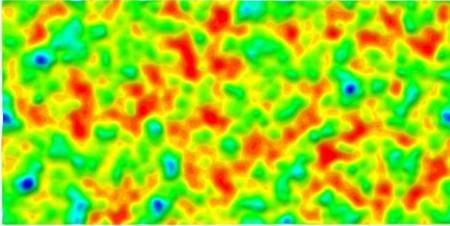
一般的に壁面は流体力学的に滑らかとみなすことができず、たとえ微小な粗さであっても粗さによって流動抵抗が増えることが知られている。表面粗さは表面仕上げ等の加工によって生じるものに加えて、表面の腐食、塗料の劣化などの経年劣化によって引き起こされ、これらは流体機械の性能を低下させることが知られている。表面粗さは、根二乗平均粗さなどの高さに関連する量に加えて、粗さ要素の確立密度分布に関連するひずみ度や波長に関連する有効勾配などによって特徴づけられ、粗さに起因する流動抵抗の増加もこれらの特微量の影響を強く受けることが報告されている[1, 2]。しかし、既往の研究の多くはこれらの特微量の個別の影響を調べたもの

が多く、特微量の複合的な影響を議論された例は少ない。本研究では、これらの特微量を系統的に変えた粗面を用いて、粗面乱流の直接数値解析を実施する。得られた結果より、これらの特微量が壁面摩擦係数増大に与える複合的な影響について議論を行う。

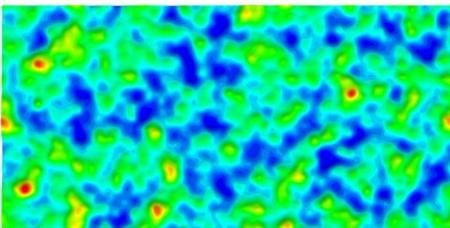
概要

粗面乱流に関する研究の多くは、粗面の幾何的な特微量の1つに着目し、摩擦抵抗等のスケーリングを行うものがほとんどである。しかし実際には、様々な粗面の特微量が複雑に影響しあうことで、摩擦抵抗が変化するため、粗面乱流理解するためには

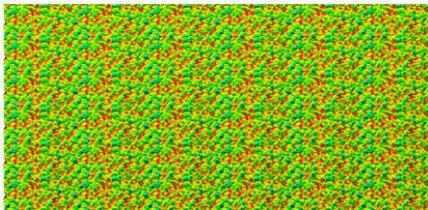
(a) ひずみ度 +0.5, 有効勾配0.1



(b) ひずみ度 -0.5, 有効勾配0.1



(c) ひずみ度 +0.5, 有効勾配0.6



(d) ひずみ度 -0.5, 有効勾配0.6

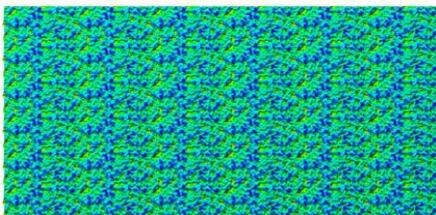


図1 粗面高さを固定してひずみ度と有効勾配を変化させた粗面

個々の粗面特徴量の影響を調査するのみでは不十分である。本研究では、粗面乱流などの複雑な構造の壁面を高効率・高精度に扱うことが可能であるD3Q27多緩和時間格子ボルツマン法プログラム[3]を用いて、粗面乱流構造を直接計算格子で解像する

直接数値解析を実施する。解析対象の粗面は図1に示すようなランダム粗面である。この粗面は様々なサイズの双曲関数型の回転体から構成されており、数値的に生成したものである。オリジナル粗面(図1 a)の粗面高さを反転することで、ひずみ度の符号が反転した粗面(図1 b)を作成した。また、粗面幅を縮小した粗面を敷き詰めることで有効勾配を大きくした粗面(図1 c,d)を作成した。それぞれのひずみ度は0.5, -0.5となり、有効勾配は0.1と0.6とした。なお、有効勾配0.1は波状面として分類され、0.6では粗面として分類される[2]。

解析系は図2に示すように2次元平行平板流の半分の領域を模擬したオープンチャンネルを対象とし、下壁には粗面、上壁には滑り条件を適用しており、主流(x)・スパン方向(z)には周期境界条件としており、主流方向に圧力勾配を付与することで流体を駆動した。半チャンネル幅と摩擦速度を基にしたレイノルズ数で600として解析を行った。局所細密格子法を用いて粗面近傍には解像度の高い格子を用いており、総計算格子点数は約3億点となった。なお、解析コードはMPI並列を行うことで複数GPU解析が可能であり、1ケースあたり28並列で解析をおこなった。

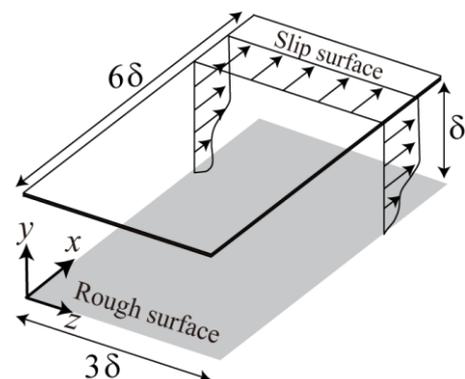


図2 粗面オープンチャンネル流れの解析系

## 結果および考察

粗面近傍における瞬時の乱流渦を可視化した結果を図3に示す。粗面近傍より活発な乱流渦が生成されており、微細な渦構造まで格子解像されていることが確認できる。粗面乱流では、主流方向に伸びたストリーク構造の発達には粗さによって妨げられるために、一般的な滑面乱流で見られるような乱流渦構造と比べて、秩序性が失われた乱流渦構造となっている。

つぎに、図4に粗面の摩擦速度で無次元化した平均速度分布を示す。比較の為、滑面の直接解析結果[4]を示している。どの粗面ケースにおいても、粗面壁近傍で主流速度が減速しており、平均速度分布は滑面の結果と比べて下方にシフトしていることが分かる。これは、粗面に生じる摩擦抵抗の増大を意味しており、ひずみ度が正のケース(山が支配的な粗面)と有効勾配が大きなケース(急峻な粗面)で特に顕著にみられることが分かる。

最後に、粗面の壁面摩擦係数を滑面の値で除した結果を表1に示す。壁面摩擦係数はどのケースにおいても増加しており、ひずみ度が正の有効勾配が大きなケースでは摩擦係数は滑面と比べて2.8倍程度になっていることが分かる。有効勾配に関わらず、ひずみ度が正のケースでは負のケースに比べて壁面摩擦係数が大きい。有効勾配が小さなケースではひずみ度の正負で10%ほどしか摩擦係数が変化しないのに対して、有効勾配が大きなケースではその値は30%ほどになる。つまり、有効勾配が大き

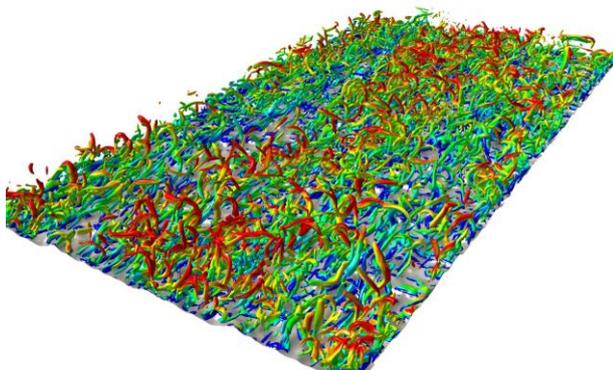


図3 粗面近傍における瞬時乱流渦構造の可視化結果。コンターは瞬時主流速度を表しており、赤は高速領域、青は低速領域を示している。

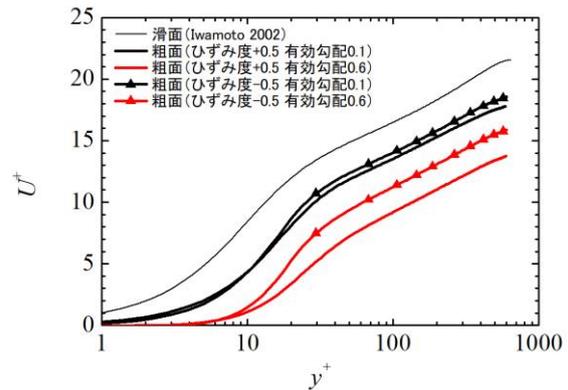


図4 摩擦速度で無次元化した主流平均速度分布。比較の為、滑面の直接数値解析結果[4]を示している。

表1 滑面との壁面摩擦係数比

	有効勾配 0.1	有効勾配 0.6
ひずみ度 +0.5	1.49	2.82
ひずみ度 -0.5	1.47	2.15

なケースほどひずみ度の影響がより顕著に表れることが明らかになった。

## まとめ、今後の課題

粗面の特徴量であるひずみ度や有効勾配を系統的に変えた粗面を用いて、粗面乱流の直接数値解析を実施、特徴量の複合的な影響について議論を行った。ひずみ度が正で有効勾配が大きな粗面、つまり急峻な起伏を持つ山が支配的な粗面において、粗面壁の摩擦抵抗が大きくなることが分かった。また、ひずみ度の影響は有効勾配に関わらず現れるが、急峻な起伏を有する有効勾配が大きな粗面において、ひずみ度の影響が強く表れることが明らかになった。今後は、これら粗面特徴量の複合的な影響を取り入れることで、粗面効果を予測する相関式の構築を行う。

## 参考文献

[1] Flack, Karen A., and Michael P. Schultz. Journal

of Fluids Engineering 132.4 (2010).

[2] Napoli, E., Vincenzo Armenio, and M. De Marchis.

Journal of Fluid Mechanics 613 (2008): 385-394.

[3] Suga, Kazuhiko, et al. Computers & Mathematics with Applications 69.6 (2015): 518-529.

[4] Iwamoto, K., Suzuki, Y. & Kasagi, N. 2002

Database of fully developed channel

flow-thtlab internal report no. ILR-0201, THTLAB,

Dept. of Mech. Engng., The Univ. of Tokyo.