

3次元ランダム粗さを有する壁面の革新的な流動抵抗予測に向けた実験的研究

Experimental study toward the prediction of skin friction of three-dimensional rough surfaces.

大阪府立大学 工学研究科 機械系専攻機械工学分野 助教 桑田 祐丞

Department of mechanical engineering, assistant professor, Yusuke Kuwata

要旨

産業分野において、壁面のほとんどは流体力学的には滑らかとは言えず、製造プロセスや経年劣化によって生じる微細な表面粗さでさえも摩擦抵抗を増大させ、機械製品の大幅な性能・寿命低下をもたらす。本研究では、3次元ランダム粗面に接する流動の計測結果を基に、任意形状の3次元ランダム粗さに接する流動を予測する独自開発の物理モデルの評価を行った。物理モデルは時間・空間的に平均化を行った系における流動方程式を基に立式しており、粗さによる平均流のブロッキング、乱れ応力の減衰過程をモデル化している。開発を行った物理モデルは、実験データの傾向をよく再現しており、任意の3次元ランダム粗面の摩擦抵抗の予測に優れた手法であることが確認された。

1. 研究背景

表面粗さは、製品の加工や製作段階で生じる他、表面処理の経年劣化や汚染によっても生じる。例えば、船底に付着する海洋生物、熱交換器に付着する錆や汚れ、内燃機関に堆積する不燃物質、高温高压のガスタービン表面の欠損や不燃物の堆積などが挙げられる。このような表面粗さは、例え微小な物であっても、流動抵抗や伝熱性能を大きく変化させ、機械製品の大幅な性能・寿命低下をもたらすことが報告されている。例えば、大型船舶の表面に付着した0.1mm程度の藻でさえも、燃費を10%も悪化させ、10mm程度のフジツボ等が付着すると、燃費は80%も悪化する報告されている⁽¹⁾。表面粗さが流動場に与える影響を理解することは、機械製品のメンテナンス工期の最適化に役立つ他、実際の運用状態における機器の性能予測、経年劣化に伴う性能低下の予測・対策に役立てることが可能となる。

表面粗さを有する壁面(粗面)に生じる壁面摩擦抵抗の予測に関しては、相当粗さを用い

た代数式による予測が一般的である。しかし、相当粗さは、粗さの高さスケール以外にも、粗さの波長、高さの確立分布等の影響を受けるために、任意の3次元ランダム粗面の相当粗さを見積もることは決して容易なことではない。また、従来の方法では、無限に広い粗面平板上の十分に発達した流れを仮定して壁面摩擦抵抗を予測する。したがって、従来の方法では、実際の流体機械において、表面粗さが機器の性能に与える影響を予測することは原理的に不可能である。

そこで、本研究は、従来の方法の汎用性・適用範囲を飛躍的に向上させるために、時間・空間的に平均化を行った系における流動方程式を基にした物理モデルによる壁面摩擦係数の予測法を提案する。本助成期間においては、波長や粗さ高さの確立密度分布を様々に変えた粗面を対象とした壁面摩擦抵抗の計測実験を行い、物理モデルの妥当性検証を行う。

2. 実験方法

本実験は作動流体を水として、オーバーヘッドタンク、整流装置、矩形流路、ポンプから成る循環流路系（図1参照）にて行う。高さ3400mmに水面が位置するオーバーヘッドタンクから、整流装置に流れが流入し、整流装置内部のハニカムによって流れが層流化された後に、矩形流路に流入する。矩形流路にて十分に流れを発達させ、計測区間にて圧力計測・速度計測を行う。矩形流路からノズルを通じて流出した流れは、流量計を通過後、ポンプによって汲み上げられ、オーバーヘッドタンクへと戻る。矩形流路は、高さ50mm、幅400mm、長さ5000mmとなっており、片側の壁面には粗面を敷き詰めている。流入面から4000mmの助走区間を経た後、2次元性が十分に担保された流路中央における速度分布をレーザー計測によって得る。また、矩形流路の後方2000mmの区間では、マノメータを用いて差圧を計測することで、壁面摩擦係数を計測した。実験対象とした流れは、レイノルズ数は5000～30000程度の完全発達乱流である。

本研究では、粗面の波長や高さの確立分布の影響を幅広く調査することを目的としており、粗面の波長を表す有効勾配⁽²⁾ ES:

$$ES = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{\partial h}{\partial x} \right| dx$$

粗面要素の確立密度分布に関する量であるひずみ度SK:

$$Sk = \frac{1}{h_{rms}^2} \int_0^L (h - h_m)^3 dx$$

を様々に変えた粗面を作成した。ここで、 L は粗面長さ、 h は粗面高さ、 h_m は粗面の平均高さ、 h_{rms} は粗面の根2乗平均高さを表す。本研究では、粗面の高さスケールである根2乗平均高さを0.85mmに固定して、有効勾配ESを0.09から0.72の範囲、ひずみ度SKを±0.4とした

8種類の粗面を対象とした。これらは所定のパラメータとなるように設計されており、3Dプリンタにて作成した。図2～4に対象とした粗面の一例を示す。図2は有効勾配の最小のケース ($ES = 0.09$) を表しており、比較的緩やかな粗さを持つ。いっぽう、図3、4は有効勾配が大きく ($ES = 0.36$)、ひずみ度Skが異なる粗面を示している。図3、4の粗面ともに粗さの平均的な波長は同程度だが、図3のひずみ度正の粗面は山型の粗面となり、図4のひずみ度負の粗面は谷型の粗面となっている。

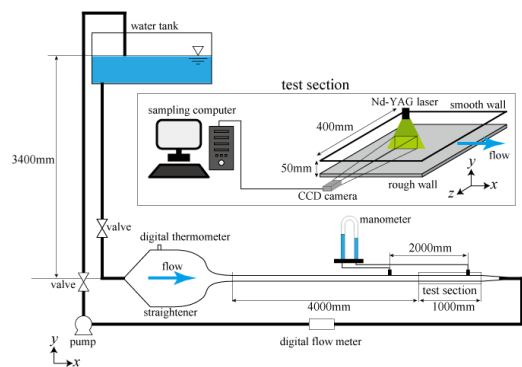


図1： 実験装置の概略



図2：実験対象の粗面 ($ES \approx 0.09, Sk = +0.4$)

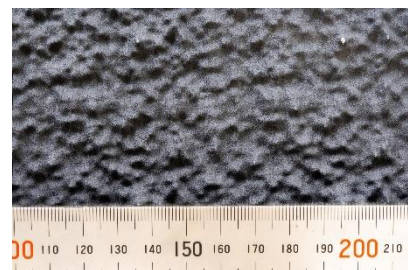


図3： 実験対象の粗面 ($ES \approx 0.36, Sk = +0.4$)

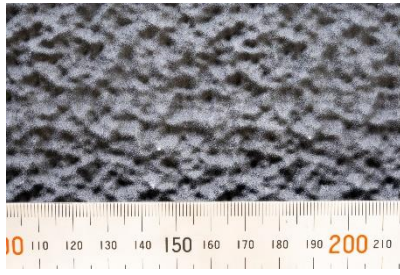


図 4： 実験対象の粗面 ($ES \approx 0.36, Sk = -0.4$)

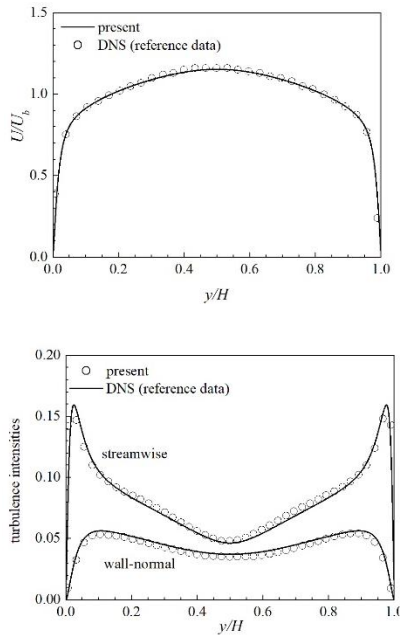


図 5： 滑面における参照データ⁽³⁾との比較。上図平均速度分布の比較，下図乱流強度の比較。図中の U_b はバルク速度を表す。

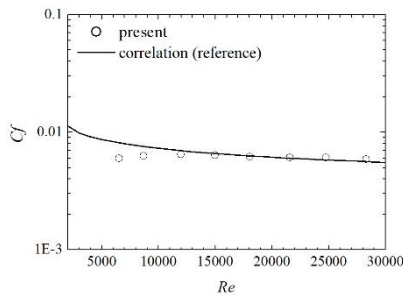


図 6： 滑面の壁面摩擦係数の計測結果と経験式⁽⁴⁾との比較。

3. 妥当性検証

本研究期間では、実験精度の向上を目的として、矩形ダクト流路補強、矩形ダクト内の圧力調整用のバルブを新設した。これまで、本研究の実験装置は、矩形流路内に非常に高い圧力が加わり、流路壁が変形してしまい、理想的な計測が出来なかった。そこで、本研究期間では、流路全体に渡って補強を施した上で、流路内の圧力を大気圧とほぼ同程度なるように、バルブを用いて圧力を制御した。改良を施した流路を用いて流速分布を測定した結果を参照データと比較した結果を図5に示す。平均的な速度分布のみならず、乱流強度も参照データ⁽³⁾と非常に良い一致が得られることが確認された。また、圧力計測から得られた壁面摩擦係数においても、幅広いレイノルズ数条件において既往の経験式⁽⁴⁾と一致することが確認され、実験の妥当性が示された。

また、レーザーを用いた速度計測の妥当性を示すために、緩やかな山型粗面ケース ($ES = 0.09, SK = +0.4$) と、急峻な山型粗面ケース ($ES = 0.72, SK = +0.4$) において、数値解析結果との比較を図7に示す。図7(a)より、緩やかな粗面 ($ES = 0.09$) に比べて、急峻な粗面 ($ES = 0.72$) では粗面近傍で強い壁面摩擦が働き、速度分布に非対称性が見られことが数値解析によって示されているが、本実験はこの傾向をよく再現できていることが確認された。また、図7(b)より、急峻な粗面近傍では非常に強い乱れの応力 (レイノルズ応力) が生じるが、この傾向に関しても実験データは、数値解析の結果と良く一致している。これらの結果から、本研究で行ったレーザーを用いた速度計測や、圧力計測は非常に高い精度で行えていることが確認された。

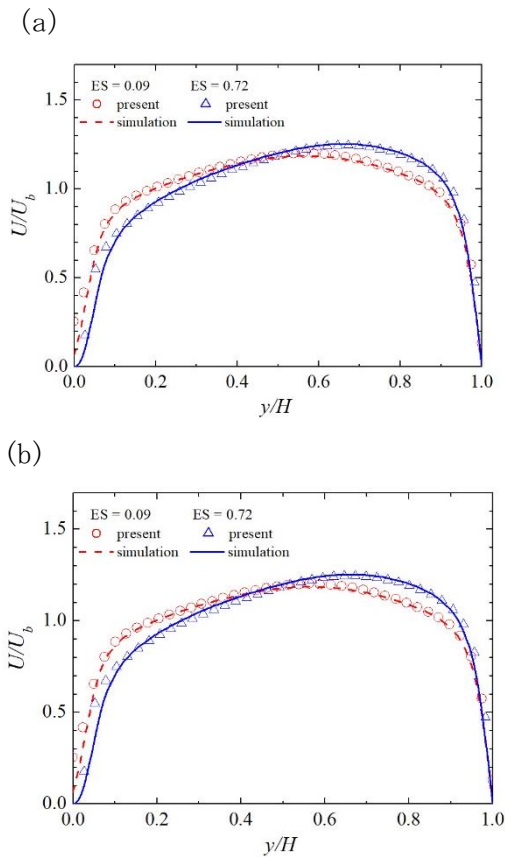


図7：実験結果と数値解析結果との比較。
 (a) は平均速度分布，(b) はレイノルズ応力分布を示す。図中の u', v' は x, y 方向の乱流変動速度を示し， (\quad) はアンサンブル平均を施した量を示す。

4. 実験結果

4. 1 壁面摩擦係数

本実験のレーザー計測・圧力計測実験で得られた壁面摩擦係数 C_f をまとめた結果を図8に示す。図より，すべての粗面ケースで滑面より大きな摩擦係数が得られていることが分かる。摩擦係数は，有効勾配 (ES) が大きくなるにつれて大きくなっており，特にESが0.09から0.36の間で大きな変化が起きていることが分かる。また，図8 (a, b)より，ひずみ度が正 ($Sk = +0.4$) の粗面では，負 ($Sk = -0.4$) の粗面に比べて C_f が大きいことが分かる。これらの結果から， C_f は急峻な山型粗面で大きく

なることが分かった。しかし，レーザー計測と圧力計測で得られた結果との間には未だにギャップがある。今後は，2つの計測結果の精度についてより詳細に調査を行う。

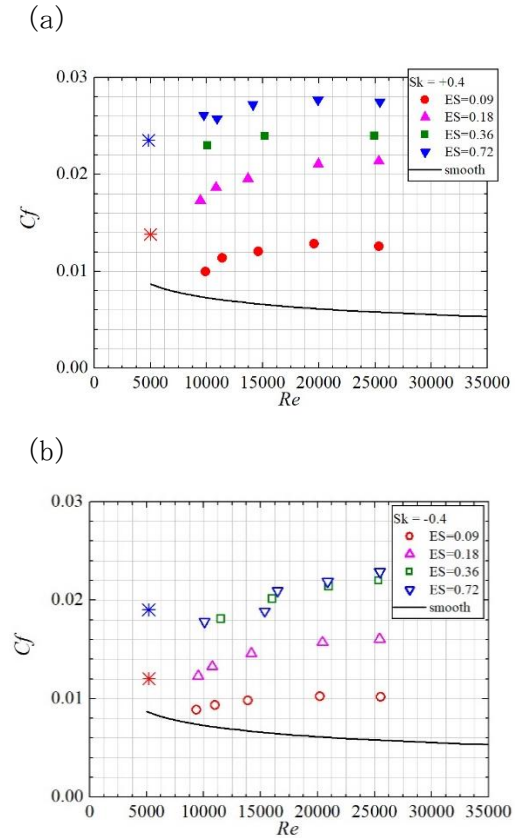


図8：壁面摩擦係数。(a)はひずみ度正の粗面，(b)はひずみ度負の粗面の結果を示す。米印はレーザー計測によって得られた結果から求めた値を示す。滑面の結果には経験式⁽⁴⁾を示している。

4. 2 物理モデルとの比較

図9に物理モデル⁽⁵⁾で得られた C_f ，実験値と比較した結果を示す。図中のシンボルは図8と同じである。物理モデルで得られた結果は，実験で得られた結果と同様に，有効勾配ESが大きくなるにつれて C_f が大きくなっており，ひずみ度正の粗面で大きな C_f が得られている。予測値は実験値と比べて全体的に30%程度過小に見積もってしまっているが，比較的良好

な予測が行えていることが確認できる。

最後に、図10に物理モデルで得られた粗面近傍の速度分布を示す。本研究では対象とした物理モデルは、壁面摩擦係数以外にも、速度や乱れ量の空間分布を予測できるというメリットがある。図10より、予測された平均速度分布には強い非対称性が見られ、平均速度分布の最大位置は滑面側 ($y/H = 1$) にシフトしている様子が確認できる。また、有効勾配が大きくなるにつれて非対称性が強くなっていることが確認できる。さらに、図10(b)より、有効勾配の大きく、ひずみ度が負のケースにおいて、粗面近傍の平均速度の減少が顕著であり、実験の傾向を定性的に再現していることが確認された。

5. まとめ

3次元ランダム粗さを有する壁面の革新的な流動抵抗予測に向けて、実験データの取得と物理モデルの検証を行った。実験装置の改良により、壁面摩擦抵抗や速度分布を高い精度で計測することが可能となった。物理モデルによって壁面摩擦係数は、実際の計測結果を良好に再現しており、物理モデルは3次元ランダム粗面の壁面摩擦係数を高い精度で予測可能であることが立証された。

6. 参考文献

- [1] M.P. Shultz, Biofouling, vol. 23(5), pp.331 – 341 (2007).
- [2] E. Napoli et al., J. Fluid. Mech, vol.613, pp.385-394 (2008).
- [3] K. Iwamoto et al, Database of Fully Developed Channel Flow-THTLAB Internal Report (2002).
- [4] R.B.Dean, J. Fluids Engng.,Vol.100(2), pp.215-223 (1978).
- [5] Y. Kuwata et al., Int. J. Heat Fluid Flow, vol.77,

pp.186-201 (2019).

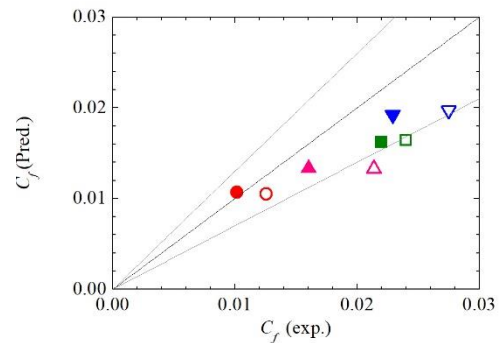
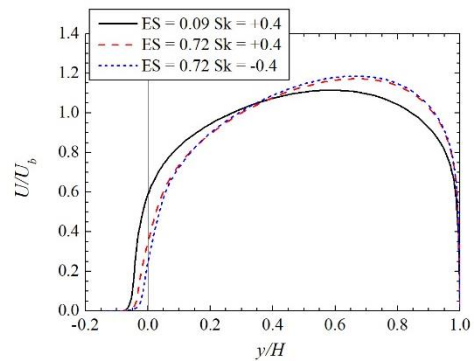


図9：Re = 25000における壁面摩擦係数の比較。横軸には実験値，縦軸には予測値を示している。黒の細線は、実験値=予測値を示し、灰色の細線は±30%を示している。

(a)



(b)

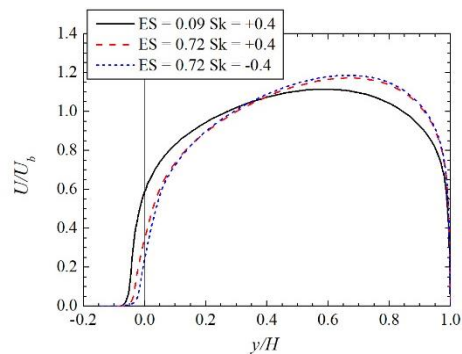


図10：物理モデルにより予測された平均速度分布。(a)は全体の分布，(b)は粗面近傍を拡大したものを示している。なお、 $y/H = 1$ は滑面を示し、原点 ($y/H = 0$) は粗面の平均高さ位置としている。