

大規模数値計算データ解析に基づく摩擦抵抗低減機構の解明と制御

名古屋大学工学研究科 辻 義之

壁面に沿って発達する流れ（乱流境界層）には、様々な長さスケールを有する渦構造（組織的構造）が存在することが古くから知られ、境界層中の乱れエネルギーの生成や散逸に重要な役割をはたしている。

高レイノルズ数乱流実験と数値計算を同一体系で比較検討するための手法開発として、チャンネル乱流場($Re_\tau=2000$)を対象とした高精度乱流計測法、オイルフィルム法による底面せん断応力測定法、ならびに MPI 及び OpenMP によるハイブリッド並列化した直接数値計算手法の開発を実施し、その精度に関する比較検討をおこなってきた。その結果、平均速度、変動 rms 値の空間分布は実験と DNS の結果がよく一致することを確認した。Pre-multiplied spectrum 形状を比較したが、両者の一致は芳しくなかった。その原因は凍結乱流仮説の妥当性、大規模組織構造の影響、プローブ分解能の影響が考えられるが、個々の要因の定量的評価はできていない。DNS データに関しても、時間統計量を計算するには十分とは言えなかった。従って、より計算領域を大きくし、かつ長時間データの取得が必要である。

室内実験等で指摘されている外層の高レイノルズ数効果を検討するには、 $Re_\tau=2000$ のレイノルズ数は、まだ小さい値であり、より高いレイノルズ数の計算に取り組む必要性を確認した。実験データの信頼性を確認するため、数値計算との比較が必須であった。これらのデータ解析を進める過程で、大規模構造の抽出、可視化、統計量の算出をおこない、仮説の妥当性検証を継続しておこなっている。

数値計算データを用いた凍結乱流仮説の検証では、小スケールの速度変動に関してはおおむね成り立っていること、大きなスケールでは統計量が安定せず、正確な議論ができないことがわかった。凍結乱流仮説の検証には、より高いレイノルズ数の数値計算データと観測データが必要とされる。Townsend の attached eddy 仮説によれば、壁乱流中における大規模構造はエネルギースペクトルに -1 乗領域を形成する。観測データにもそのスペクトル型を確認した例が報告されている。

“外層に存在する大規模な流体構造が壁面近傍側全体の流れに影響を与えている” という仮説のもとで、下記に示す壁面近傍の流速変動に関する予測式が提案されている⁽¹⁾。

$$u_p^+(y^+) = u^* (1 + \beta u_{OL}^+) + \alpha u_{OL}^+ \quad (1)$$

$u_p^+(y^+)$ は各壁高さ y^+ における予測流速変動(出力)、 u_{OL}^+ は外層の大規模な流体構造に起因する流速変動(入力)を表しており、 u^* 、 α 、 β はその影響に関連したパラメータである。この予測式により、外層 1 点の流速変動から壁面近傍全体の流速変動を予測することができる。

予測式の予測精度検証を目的に DNS によって計算された完全発達チャンネル乱流場の外層の流速データから壁面近傍の流速変動を予測した。DNS は流体の計算手法の一種で、流体の支配方程式をモデル化することなく直接解いているため、精度に優れた計算手法である。解析対象には $Re_\tau = u_\tau h/\nu = 1000, 2000, 4000$ の流れ場を用いた(u_τ 、 h 、 ν はそれぞれ摩擦速度、チャンネル半幅、流体の動粘度)。予測式の入力には対数領域の外縁である $y^+ = 3.9\sqrt{Re_\tau}$ における流速データを用いた。予測された流速変動の統計量を DNS データにより直接計算された流速変動の統計量(真値)と比較することで予測式の予測精度を検証した。

直接数値計算では、時系列信号を取得している。時系列信号は凍結乱流仮説により空間信号に変換する。式(1)に本来の空間信号を代入した場合と凍結乱流仮説から変換された値を用いた場合には、壁近くの予測変動値に相違がみられた。従来、凍結乱流仮説は、1 点統計としてその成立の可否が議論されてきたが、対数領域外縁から壁近くへの乱流構造の寄与を考えると、凍結乱流仮説が大きなスケールの変動を正確に反映していないと考えられる。つまり、地上(壁面)から離れた位置での変動速度の情報を基に壁面近くの変動を予測する際には、凍結乱流仮説が何らかの影響を及ぼしていると考えられる。物理現象としては、地上(壁面)から離れた位置では、乱流構造はスパン方向に揺らぎながら下流へ移動してい

と考えられる。1点での流れ方向への速度変動には、凍結乱流仮説はよく成り立っていたが、対数領域の乱流構造との相互作用には、仮説が成り立たない要因が考えられる。対数領域外縁の大規模構造が壁近くに及ぼす影響と凍結乱流仮説の関連を調べる予定である。スパン方向への運動と乱流構造の形成を加味することで、仮説を新たに解釈できる可能性を考えたい。また、高レイノルズ数乱流の実験データを用いることで、式(1)の予測精度を確認し、気象スケールの乱流構造を考える手掛かりとしたい。

モデル式(1)における、 u^* は壁面の影響を受けない普遍的な速度変動と考えられており、そのような速度変動を機械学習を用いて統計性を調べることを過去2年間におこなった。具体的には、予測式に含まれる α 、 β の二種のパラメータの機械学習による算出の可否を確かめた後、予測式内の速度変動 u^* を確率過程によって算出し予測式内のパラメータとして代替する。これにより、少数の疎な計測データから壁面近傍全体の速度変動を再現するような（教師データとして利用することが期待できる）無限長のデータセットを作成することが出来ると考えられる。このような方向性で機械学習を用いてモデル式(1)のパラメータの決定と教師データの作成をおこなった（詳細については割愛する）。

昨年度は、モデル式に基づく大規模構造の制御と、壁面での抵抗低減の可能性を調べた。大気境界層を想定して、滑面と粗面での実験データを取得し、両者を予測式(1)の入力データとして用いた。粗面境界層では、壁面の凹凸により、摩擦抵抗は増大するものと思われるが、壁から離れた位置での大規模構造を制御することで、効率的に摩擦を低減できることを確認した。この結果は、大気乱流の制御にも何らかの可能性を示唆するものである。

大規模構造が発達した事による影響がないか、滑面と波状粗面における予測式のパラメータ α に着目することで検証した。 α は **Footprint**、つまり外層と内層における大規模なスケールの相関の大きさに由来するパラメータである。壁面近傍では波状粗面の方が **Footprint** の影響が強く、壁面から離れるにつれて同等になり、固定プローブ付近では滑面の方が強くなる事が昨年度の結果から確認できた。このことから、大規模構造の発達により、内層への影響が異なることが明らかになった。

波状粗面における壁面近傍の **Footprint** が大きいことから、大規模構造の制御によって摩擦抵抗を軽減できるかを検証した。予測式の入力である u_{OL}^+ に制御割合を考慮した倍率を適用することで振幅を抑制し、大規模構造に制御を与えた体系を再現した。滑面及び粗面における $Re_\tau = 1000, 1900$ の制御割合に対する抵抗低減効果の解析から、制御割合が増えると共に抵抗低減効果も増加している。また、レイノルズ数の増加に伴い抵抗低減効果も増大しており、その効果は粗面の方が最大約1%高いことが確認できた。

昨年度までの DNS データの解析から、大規模構造を制御することが壁面での抵抗低減に強く関与することがわかってきた。しかし、式(1)を介した壁近くでの構造の理解には限界があり、この点を今年度の解析の対象にした。式(1)は壁垂直(y)方向への変化のみを対象にしている。流れ場は平板上に発達する2次元境界層であるが、乱流構造は3次元となる。図1は壁近くの(x,z)平面での流れ方向速度の等値面を表している。黒色が低速領域をあらわす。低速領域は流れ方向(x)にまっすぐにはなっておらず、スパン(z)方向にゆらぎを持った構造となる。この構造をミャンダリングと呼ぶ。ミャンダリングは、大規模構造の **Footprint** が壁との相互作用で不安定化し、大きな速度勾配（摩擦抵抗）を生み出し、同時に変動速度の生成も担っていると予想される。前者はパラメータ α 、後者は β で見積もられる。しかし、ミャンダリングは、スパン方向に存在するため、y方向への変化のみを扱う式(1)の α 、 β では、十分に特徴づけられないことがわかった。大規模構造の制御を介して、ミャンダリングを抑えることが抵抗低減へつながり、その特徴の解明を引き続き、DNSデータに基づいておこなっていく。

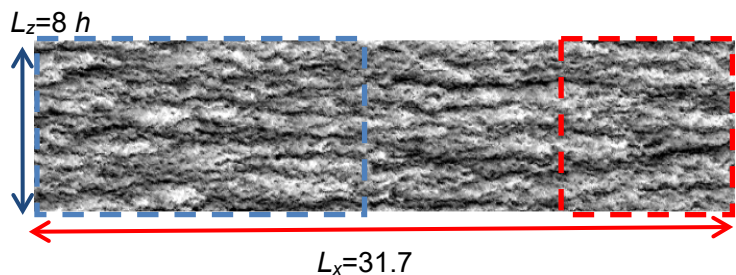


図1 壁近くでの流れ方向速度の等値面（黒色が低速領域、白色が高速領域）。

[1] R. Mathis, N. Hutchins and I. Marusic, “A predictive inner-outer model for streamwise turbulence statistics in wall-bounded flows”, J of Fluid Mechanics, (2011), pp. 537-566.