

確率的予測法を用いた凍結乱流仮説における大規模構造の予測

名古屋大学工学研究科 辻 義之

山梨大学工学部 山本義暢

名古屋大学情報基盤センター 高橋一郎

地球水循環研究センター 坪木和久

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に基づき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ると考えられる。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引き続き調べていく予定である。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本年度はおこなった。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た。機械学習のアルゴリズムとしてニューラルネットワーク(NN)を用いる。NNは、3入力からなる入力層が1層、1出力を持つ出力層が1層で線形の活性化関数を持つような単層のニューラルネットワークを考えると、その入力と出力を表す式は $y = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + b$ となる。ここで、簡便のために式変形をすると、 $u_p^+ = \alpha u_{OL}^+(y_0^+, \theta_L) + \beta u^* u_{OL}^+(y_0^+, \theta_L) + u^*$ となる。つまり、入力が $u_{OL}^+(y_0^+, \theta_L)$ 、 $u^* u_{OL}^+(y_0^+, \theta_L)$ 、 u^* で出力が u_p^+ となる単層のニューラルネットワークを構築し学習を進めることで、各種重みおよびバイアスが $w_1 = \alpha$ 、 $w_2 = \beta$ 、 $w_3 = 1$ 、 $b = 0$ が期待できる。

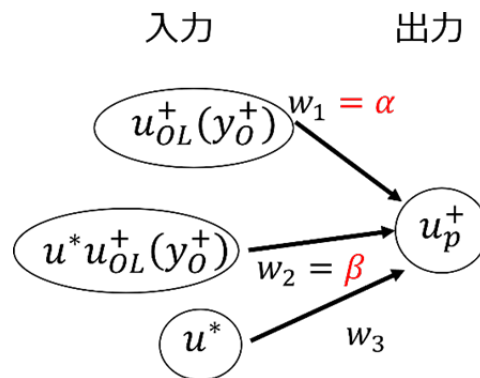


図1 機械学習モデル

この学習モデルを図1に示す。機械学習より算出した α 、 β は、本来の方法で算出した値と同等の値となった。算出の過程でかかる時間は大幅に短縮された。予測式を利用した大規模な教師データ生成については、確率過程としてOrnstein-Uhlenbeck過程を用いた。その詳細については、来年度の継続課題として進めていく予定である。

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

・論文（査読付、査読付国際会議論文を含む）

Yu Wang and Yoshiyuki Tsuji, Meandering motions and their relation to the energy spectrum in turbulent shear flows, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 98 (2022) 109064.

[//doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2022.109064](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2022.109064)