

壁乱流における大規模組織構造と凍結乱流仮説の数値的研究

京都大学工学研究科 山本義暢
 名古屋大学工学研究科 辻 義之
 名古屋大学情報基盤センター 石井克哉
 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。近年、直接数値計算（DNS）の結果から、スパン方向へ時空間的に揺らぎながら、流れ方向へ 20δ （ δ は境界層厚さ）程度の大きさをもつ構造が対数領域から粘性低層に存在することが、豪州の研究グループにより報告されている。このようなスパン方向への運動を含み、流れ方向へ大きなスケールを持つ構造は、従来の組織構造の概念を超えるもので **Super Structure** (SS と略記する) と名付けられた。SS は乱流境界層中の平均速度プロファイルのみならず、運動量やエネルギーの輸送にも大きな影響を与えることが予想される。

SS が注目された背景には、対数領域や外層の大規模構造が壁近く粘性低層まで影響を及ぼすこと、階層構造や普遍則との関連が 1 つの要因と考えられる。壁近くでは低速のストリーク構造が存在すること、ストリークの時間空間的なゆらぎが壁近くの物理のみからではなく、対数領域や外層近くのフットプリントとしての理解が可能になったのは、数値計算による詳細な可視化画像の比較によるところが大きい。

一方、実験や観測では、特定の場を除き、空間的な情報を得ることは困難である。空間の数点に設置した計測プローブからは、時間信号のみが取得されるが、そこからは空間的な構造を正確に予測できるかどうかは不明である。通常の見方として、局所の平均流速を用いて時間軸を空間座標軸に変換することがおこなわれる。この方法は、実験流体力学の分野では「凍結乱流仮説」と呼ばれる。凍結乱流仮説はスペクトルなどの統計量に関しては近似的に成り立つことが受け入れられているが、SS のような大規模構造が仮説にどのように影響するのかを定量的に明らかにしたい。凍結乱流仮説を検証することは、室内での乱流実験のみならず大気乱流などの観測データ（時系列）を空間スケールに変換して解釈するための新たな知見を与えてくれる。

計算はチャンネル流路を対象とし、フーリエスペクトル法（壁垂直法は 2 次の FDM）をもちいておこなった。計算領域は、流れ方向を x 、壁垂直方向 y 、スパン方向 z として、 $(L_x, L_y, L_z) = (51.2h, 2h, 6.4h)$ に設定し、レイノルズ数は $R_\tau = 1000$ とした。また、同一体系での実験をおこない比較対照する。データのサンプリング間隔は 0.21（タイムステップ間隔： $\cdot t = 0.021 \rightarrow 10$ ステップに 1 回記録）とし、サンプリング個数を 5000 個 ($T = 1050$) を 1 セットとして、時系列データを収録した。2 セットまで計算が終了しているが、統計量の計算には更なる計算をする必要がある。現在、データ解析の途中であるが、凍結乱流仮説は壁乱流に限れば、統計量のみならず瞬時データに関しても十分に精度の高い近似法と考えられる。壁近くの波数スペクトルは、凍結乱流仮説より計算されるスペクトルとよく一致する。

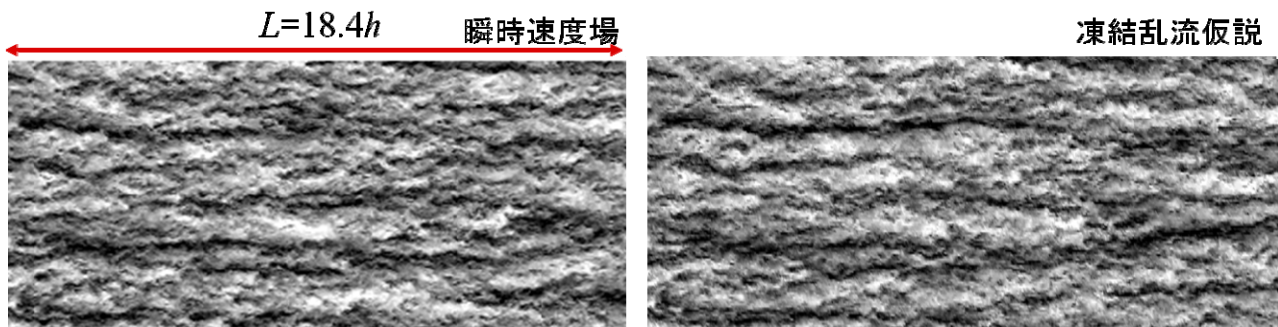


図1 壁近く ($y^+ = 150$) における流れ方向速度の等値面（流れは左から右へ）。低速から高速を黒色から白色で表示してある。低速（黒色）の流れ方向に伸びた構造が SS に相当する。流れ場（チャンネル）の高さ h とし、計算領域の一部を示してある。