

神戸大学大学院自然科学研究科 学生員 ○前田 和裕
 神戸大学大学院自然科学研究科 正会員 中山 昭彦

1. はじめに

乱流予測計算法は LES 法の開発、応用等がなされ、精度、汎用性ともに向上してきているが、工学、環境科学で重要な高 Re 数、複雑乱流に適用する場合、粘性底層を解像出来るほどの LES 計算は依然困難である。LES 計算の場合、境界条件に粘着条件を用いたり、壁面近傍は計算領域に入らず計算第一点目を対数則領域に置き、瞬時速度分布に対数則を用いる方法¹⁾、あるいは一般的壁法則を適用する方法²⁾、またさらに解像度の粗い計算ではべき乗則を用いたりしている。本研究では予測計算法、特に LES 計算に必要であろう相似則に重点を置き、熱線プローブを用いた多点同時測定により壁近傍の瞬時、空間平均速度分布の特性を調べた。特に、瞬時速度分布が“Off-the-wall”境界条件として使えるような相似性を示すのか、また空間平均の相似性はあるのか、それはフィルター幅にどう影響されるのかといった問題を対象としている。

2. 実験

実験は断面 $2.6m \times 2.0m$ 、長さ $20m$ の測定部を持つ、吹き出し型風洞の、試験区間床面に発達する境界層内で行なった。また、実験は図-1 に示すように、2 本の X 型プローブと 9 本の I 型プローブとを組み合わせたレークを用いて境界層内層の瞬時主流速度 u の分布と遷移層内の壁直角方向速度成分 v と横方向速度成分 w の同時測定を行なった。

外部流は $U_e = 1.2m/sec$ から $U_e = 1.6m/sec$ で、序走距離を約 $3m$ と約 $15m$ にとることで低 Re 数と高 Re 数のケースを設定した。測定ケースと境界層の概要は表-1 に示す。

3. 実験結果

図-2 が実験により得られた瞬時速度分布とその平均速度分布を対数プロットしたものである。2 つのケースについてそれぞれ u 及び y を、平均流速の対数プロットから求める平均摩擦速度 U_τ と、壁面に最も近い 2 点の瞬時流速より壁面勾配をもとめ算出した瞬時摩擦速度 u_τ との 2 つの

摩擦速度を用いて無次元化を行なった。平均速度は白抜き○で示され、壁法則として線形則と対数則とを実線で示している。瞬時速度分布は壁法則の回りで大きく変動しており、 y^+ が約 30 以下の領域では瞬時摩擦速度の変化に応じて変動しているものの、それ以上の対数則領域では対数則を交差する変曲点をもつ分布を示しているのが分かる。 u_τ を用いて、無次元化された瞬時速度分布については、 $y^+ (=u_\tau y / \nu)$ が 10 以下で線形則に収束するものの、対数則領域では逆に変化が大きく、相似性は見られない。このことから、従来から言われるような LES 計算の近似境界条件としての壁面摩擦応力 τ_w と u の相関が壁面近くでは確認できるが、壁より遠ざかるにつれてその精度は悪くなることが分かる。LES 計算では格子の大きさにより空間平均した速度場の計算を行うことから、Taylor の凍結乱流仮定を用いて時間平均を空間平均と解釈し、瞬時速度分布に平均時間の幅を変えてフィルタリングしたものを図-3 に示す。また、摩擦速度に関してもフィルター平均された摩擦速度 $\langle u_\tau \rangle$ と平均摩擦速度 U_τ を用いて、 u 及び y の無次元化を行なっている。2 つのケースともに $\Delta t^+ = 50$ では図-2 の瞬時速度分布との差異は見られず、 $\Delta t^+ = 100$ 以降から、 U_τ スケールプロットについて

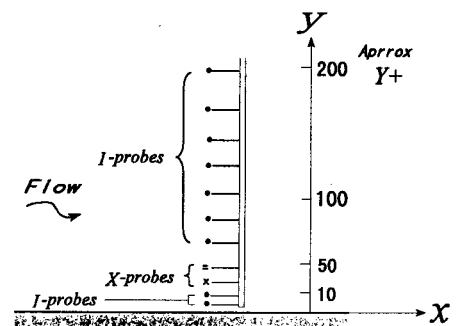


図-1 熱線レークを用いた境界層の計測

表-1 測定ケース

測定ケース	$U, m/s$	θ, mm	Re_θ	C_f
ケース 1	1.6	5.3	590	0.0051
ケース 2	1.2	39.2	3900	0.0036

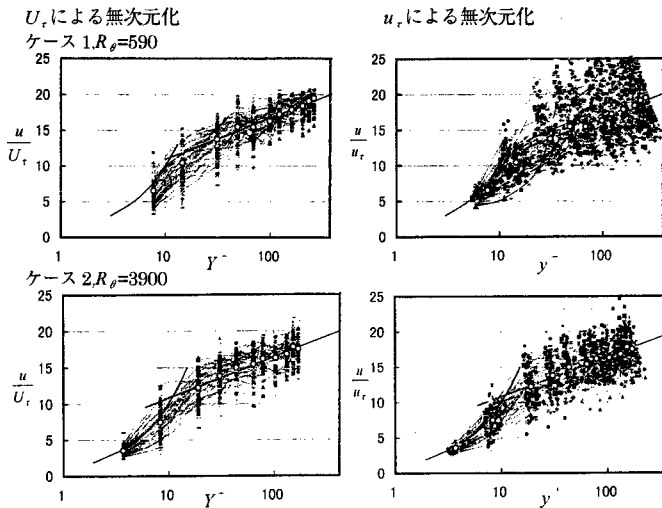


図-2 瞬時流速分布の対数則プロット

幅 Δr^+ が約 150 でようやく $\langle y^+ \rangle = 30$ 辺りまで相似域が広がり、対数則が使えるようになる。この Δr^+ を Taylor 仮説を用い空間スケールに直すと $\Delta x^+ = 1800$ で、相似域の幅は流れ方向の空間フィルター幅の約 1/60 となり、壁に接する格子の縦横比が 60 あればこの対数則が使えることになる。低 Re 数でのシミュレーションにおいては、空間解像度がこれより良い可能性があるので、対数則よりも線形則を用いるのが良いかもしれない。

は対数則領域で、 $\langle u_\tau \rangle$ スケールプロットでは線形則領域で相似性が強まることが伺える。

4. 考察

壁近傍瞬時流れ場は 3 次元の大規模渦構造をもっており相似性を見出すのは非常に難しいが、流れ方向あるいは時間方向にフィルターをかけるとある程度の相似性が現れる。しかし、その相似性の程度と領域はフィルター幅とスケールに依存し、 U_τ で無次元化したものは相似性が外層から現れるため境界条件に適しているとは言い難い。フィルターをかけた摩擦速度 $\langle u_\tau \rangle$ で無次元化したものは相似性が壁面から現れるので境界条件に適しているように思われる。しかし、フィルター

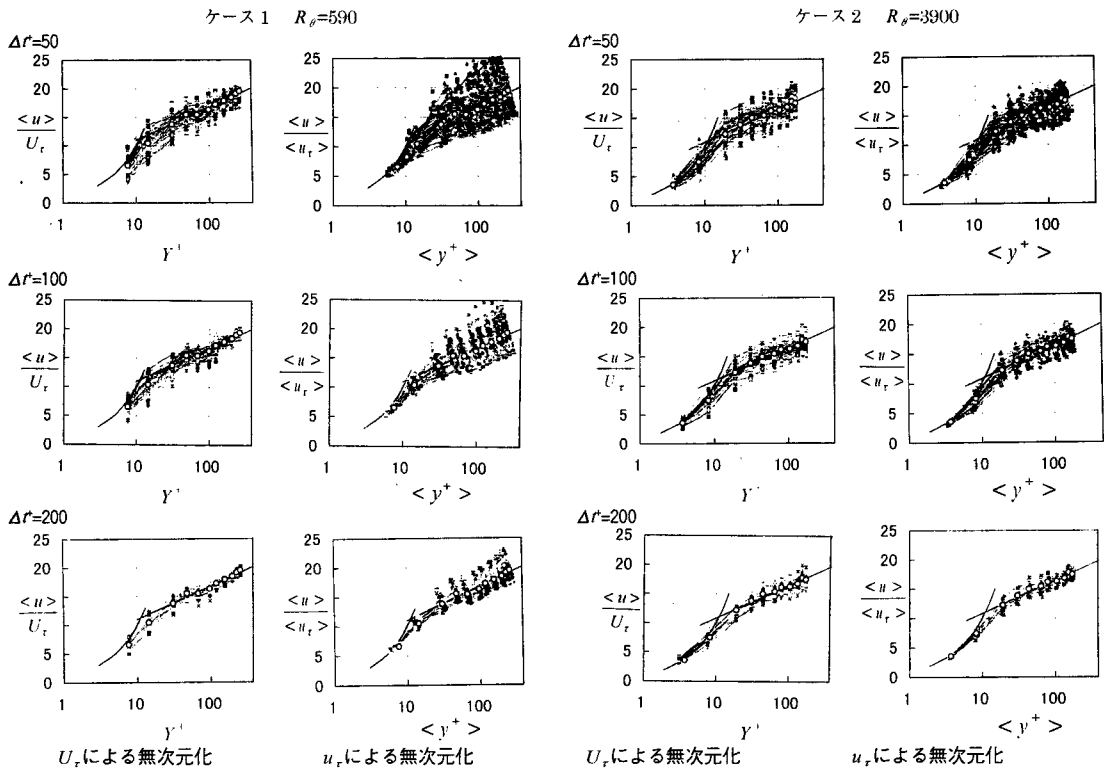


図-3 フィルター平均された速度分布

参考文献

- 1) U. Piomelli, J. Ferziger, and P. Moin: New approximate boundary conditions for large eddy simulations of wall-bounded flows, *Phys. Fluids*, A, Vol. 1, pp. 1061–1068, 1989.
- 2) 森西洋平・小林敏雄: 人工壁面境界条件を用いた LES の構成およびその評価, 機械学会論文集 B, 57 巻, pp. 115–121, 1991.