

## カノニカル乱流の大規模直接計算とモデリングによる応用計算

石原 卓（名古屋大学 大学院工学研究科附属計算科学連携教育研究センター）

### 1. はじめに

地球環境問題に限らず、自然・工学の多くの分野で現れる乱流は、巨大な自由度を有する非線形なシステムである。このような巨大自由度の流動現象の予測技術向上のためには、乱流の超多自由度系としての性質の物理・数理的な解明とその知見に基づく応用が必要不可欠である。本プロジェクトでは、地球シミュレータ（ES）を駆使して、乱流の規範的（カノニカル）な問題の大規模直接数値計算（DNS）を実施し、高  $Re$  乱流現象の解明を行うことを目的とする。また、得られた高  $Re$  乱流データベースおよび知見を共有して、環境問題に寄与する流れを含む複雑流動現象の大規模 LES を行い、現象解明とともに基礎的な知見の応用を目指している。

平成 27 年度は、特に、基礎分野では、高レイノルズ数壁乱流の直接数値計算（DNS）データベースの解析を実施し、応用分野では、大規模 LES 解析の大気に関わる環境・減災問題への展開を実施した。

### 2. 高レイノルズ数壁乱流の DNS

我々のグループでは、地球シミュレータ上でスペクトル法（フーリエ・チェビシエフタウ法）を用いて平行平板間乱流の大規模な直接数値計算（最大格子点数  $2048 \times 1536 \times 2048$ ）を実施し、壁摩擦速度に基づくレイノルズ数の最大  $Re \tau = 5120$  のデータベースを構築している<sup>1)</sup>。平成 27 年度は、そのデータを用いて（1）渦の組織構造の解析と可視化、（2）二点速度相関についての統計解析を行った。

#### 2.1 渦の組織構造の解析と可視化

乱流の大規模な直接数値計算により、レイノルズ数 ( $Re$ ) の大きい乱流中には管状の微細渦が密集した薄い層状のクラスターが存在し、その層状領域を横切る方向の速度差が乱流の速度変動の rms 値程度となる強い剪断があることが確認されている<sup>2)</sup>。 $Re$  が十分に高い壁乱流には、同様な渦組織構造が存在することが示唆されていた。そこで、本研究で構築し

たデータ ( $Re \tau = 5120$ ) を解析・可視化したところ、 $y^+ = 0(1000)$  の対数領域において、流れ方向に平行な薄い領域に強い渦が集中し、強い剪断が生じていることが確認できた（図 1）。

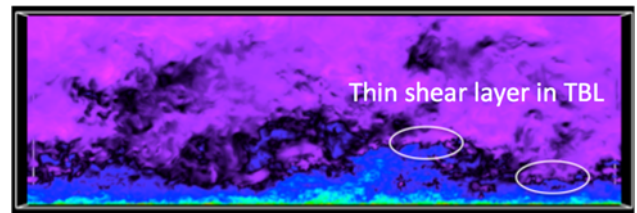


図 1.  $Re \tau = 5120$  の平行平板間乱流で確認された、流れ方向に平行な薄い領域の強い剪断

#### 2.2 二点速度相関の解析

DNS データの解析により  $Re \tau = 5120$  の平行平板間乱流では平均流とエネルギー散逸率が  $U^+(y^+) = (1/\kappa) \log y^+ + C$ ,  $\epsilon^+ = 1/( \kappa y^+ )$ , となる対数則の成立する  $y$  の範囲 ( $50 < y^+ < 1000$ ) が存在する。ここで、 $+$  は壁摩擦速度と粘性率を用いた規格化である。テイラー長は二点速度相関  $Q_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{r}) \equiv \langle u_i(\mathbf{x}) u_j(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \rangle$  によって  $2Q_{ii}(\mathbf{x}; 0)/\lambda_{ij}(\mathbf{x})^2 = -[\partial^2 Q_{ii}(\mathbf{x}; \mathbf{r}) / \partial r_j \partial r_j]_{r=0}$  と定義される。DNS データの解析により、テイラー長  $\lambda_{ij}$  は対数則の領域で  $y^{1/2}$  のようにスケールすることがわかった。また変位が  $\mathbf{r}$  で与えられる 2 点の  $r \sim y$  での速度相関の  $\mathbf{r}$  依存性が近似的に  $r/y$  を通じて表せることが示唆された。

### 3. 大規模 LES 解析の大気に関わる環境・減災問題への展開

応用分野では、実大気に関わる環境問題と防災問題の解決をめざし、乱流の数値モデルを用いて温度成層境界層あるいは都市乱流境界層を対象とした数値計算を実施した。得られた乱流場をベースに、都市域における乱流渦の物質濃度の輸送過程への影響、高濃度域の非定常的特性、航空機の後方に残留した組織的な縦渦の散逸過程などを解明した。

円柱状の構造物は、周囲の流れが乱流遷移状態となるが、その状態の風の作用力が正確に把握されている訳ではない。表面を粗くす

るなどして乱流遷移を早めて風洞実験により、擬似的に作用力が見積もられている。より直接的に再現したモデルを用いて円柱構造物へ作用する風力を解析した結果を以下に示す。

高解像度格子を用いた臨界レイノルズ数域における円柱まわり流れのLES解析を実施した。これまでの解析<sup>3)</sup>と比べて、スパン方向の解析領域を4倍とし、長さ8D(D:円柱直径)約9億点の格子を採用した。

その結果、スパン方向に8Dの長い円柱モデルにおいても、円柱の片サイドではスパン方向の至る所で、剥離・乱流遷移・再付着が発生し、逆サイドでは層流状態が生じる現象が確認された(図2)。すなわち、乱流遷移するサイドはスパン方向に入れ替わることはなく、同じサイドであり、また、時間的にも維持されている。

臨界域における、片サイドで生じる乱流遷移現象は、流れが斜めに剥離・再付着し、循環域がスパン方向に大きく歪んだ性状(円柱直径の1/4~1/3程度の長さスケール)を示すことを、これまで明らかにしてきた<sup>3)</sup>。本解析では、その要因となる曲面上を発達する境界層の不安定性に起因する流れ方向に軸をもつ縦渦構造がスパン方向に繰り返し現れることが確認できた(図3)。

一方、これまで臨界域における円柱の非対称流れ発生時の後流構造や変動揚力の特性に関しては明らかになっていない。スパン方向の長さを長くした本解析により、乱流遷移し斜めに強く巻き込んだ後流渦がスパン方向に大きくずれる現象が明瞭に確認された(図4)。乱流遷移サイドの局所的な後流渦の巻き込みは周期的な局所揚力変動をもたらす。ただし、スパン方向に巻き込みのタイミングが異なるためトータルの揚力変動は小さくなる(図5)。

#### 文献

- 1) K. Morishita, T. Ishihara, Y. Kaneda, Small-scale statistics in direct numerical simulation of turbulent channel flow at high-Reynolds number. J. Phys.: Conference Series, 318, 022016-1-6, 2011.
- 2) T. Ishihara, Y. Kaneda, J.C.R. Hunt, Thin Shear Layers in High Reynolds Number Turbulence—DNS Results, Flow Turbulence

Combust (2013) 91:895-929

- 3) Y. ONO and T. TAMURA: LES of the flow around a circular cylinder in the critical Reynolds number region, -Study on asymmetric characteristics of flow and lift -, 10<sup>th</sup> International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements-ETMM10, S14-3.

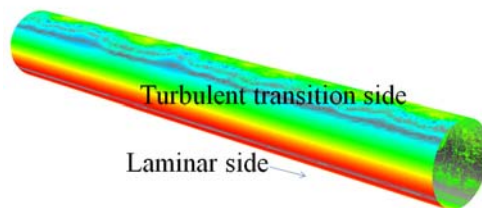


図2 円柱表面の瞬間風圧分布

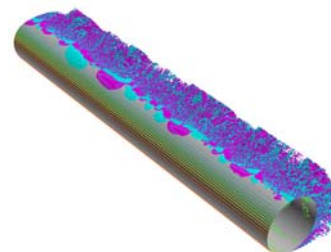


図3 剥離域風上の不安定渦構造  $\omega_x$  の等値面図



図4 非対称流れにおける後流の三次元構造 圧力の等値面図

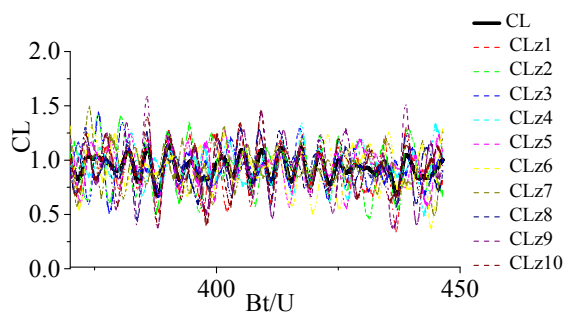


図5 揚力の時刻歴波形