

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

課題責任者

石原 卓 名古屋大学 大学院工学研究科

著者

石原 卓 名古屋大学 大学院工学研究科

田村 哲郎 東京工業大学 大学院総合理工学研究科

自然と工学の多くの分野における乱流は、自由の巨大な程度に非線形システムである。巨大自由度を有する複雑な乱流現象の予測技術を向上させるためには、乱流の物理的および数学的な理解に基づいて、応用問題を考慮することが不可欠である。このプロジェクトでは、地球シミュレータを使用することによって、乱流の標準的な問題の大規模直接数値シミュレーション (DNS) を実行し、高レイノルズ数乱流データベースと知識を共有して、複雑な環境流動現象の大規模 LES を行った。2015 年度には、基礎分野において、高レイノルズ数壁乱流における渦の組織構造を理解するために、我々は、チャンネル乱流と乱流境界層の DNS データベースの可視化と解析を行った。また、応用分野では、環境問題に関連する流動現象の一連の大規模 LES を行った。特に、我々は詳細に臨界レイノルズ数における円柱背後の三次元流れ構造の数値解析を実施した。その結果、高レイノルズ数壁乱流では対数速度領域において流れ方向の速度の急激な変化を伴う層状の渦組織構造があることを発見した。また、円柱背後の流れ解析では、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できた。

キーワード：高レイノルズ数乱流、大規模直接数値計算、渦組織構造、乱流境界層、LES、都市型乱流境界層

1. 平行平板間乱流と乱流境界層の DNS データ解析

平行平板間乱流 (TCF) [1] と乱流境界層 (TBL) [2] の直接数値計算 (DNS) データが3つの異なるタイプの薄い剪断層、すなわち、乱流境界層の乱流・非乱流界面 (T/NT)、乱流境界層内部の剪断層 (T/T)、および 緩和層の内部の壁近傍の剪断層 (T/W)、の性質を調べるために使われた。TCF データは、対数速度分布領域中の壁からの距離 $y^+ = O(1000)$ において、流れ方向の速度に大きなジャンプを伴う、層状の渦の組織構造が観察されることを示した。乱流境界層の DNS データ解析により、適当に規格化した渦度を用いることにより、乱流境界層の T/NT と T/W の場所が定義できることが分かった。その解析の結果、乱流境界層外側の縁にある T/NT の平均的な高さは 0.8δ (δ は境界層厚さ) であり、一方、T/W の平均的な高さは壁単位で 10 のオーダーであった。TBL データの解析 [2] は、テイラー長のオーダーの厚さをもつ T/NT 遷移領域はその外側の縁にコルモゴロフ長でスケールする渦あり / 渦なし遷移層 (スーパーレイヤー) を有することを示している。TBL データの解析は、T/W における速度変動の非相関は T/NT 界面における非相関より強いことを示した。

2. 大規模 LES 解析の大気に関わる環境・減災問題への展開

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。ここでは、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が解析された。以下にその結果を示す。

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 [3] 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 1)。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 $1/4 \sim 1/3$ 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 [3]。本解析により、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て確認される (図 2)。

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的には明らかとはなっていない。スパン方向の長さを長くした本解析により、乱流

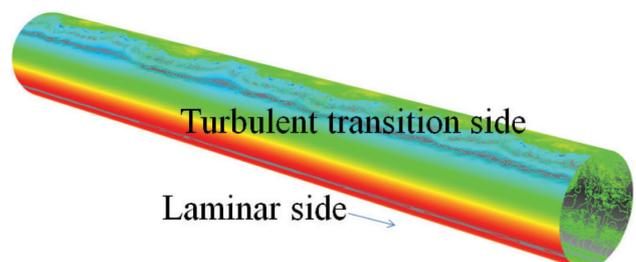


図 1 円柱表面の瞬間圧力分布。

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 (図3)、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4)。

さらに、隅角部に丸みを与えた二次元角柱を一樣流中に設置し、LES解析を実施した (図5、6)。レイノルズ数が臨界領域を超えると、円柱同様、抗力の低減が確認された。隅角部の丸みから剥がれた流れは直後に再付着し、小さい separation bubble を形成している。その後、側面に沿って乱流境界層を発達させ、後方の隅角部から再度剥がれ、後方に渦を放出している。後方で渦のスケールは、亜臨界の場合に比べて小さい。

また、大気乱流境界層の特性およびその内部に発生した組織的縦渦の挙動に関する LES 解析を行った (図7)。熱的安定度と大気境界層乱流を考慮し、航空機の後方に発生した乱気流渦の滑走路付近における減衰挙動を把握するため、中立境界層、安定境界層、対流境界層を対象に、運動方程式に外力項を導入することで固体表面付近に後

方乱気流を模した強い渦対を設定した。その結果、安定度によって異なる渦対の減衰機構を調べた。対流境界層には強い乱れが随所で渦の減衰を速める機構があり、安定境界層では乱れが少ないために減衰が遅く、さらに地表面でできる局所的な境界層が剥離して渦を包み込むために減衰が緩やかに進むことを明らかにした。



図3 瞬間圧力等値面。

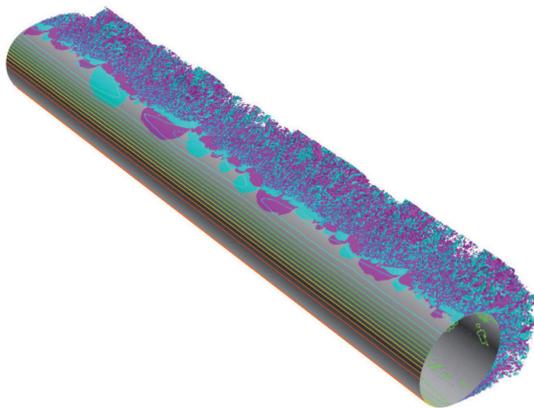


図2 渦度等値面。

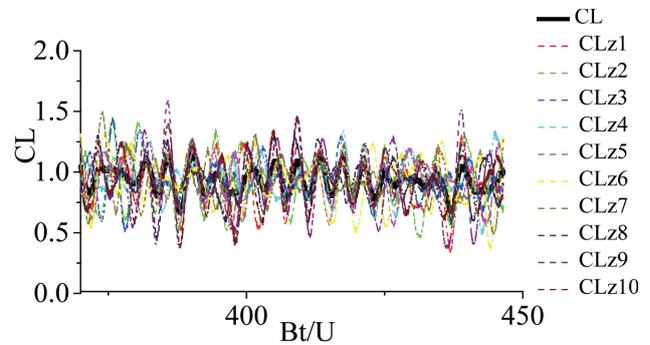


図4 揚力係数と断面揚力係数の時間変化。

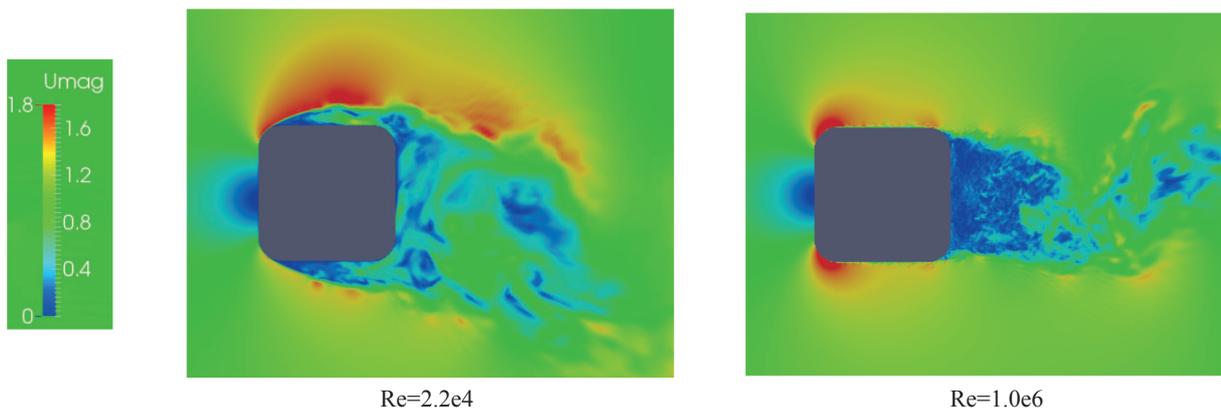


図5 流速絶対値の瞬間分布 (角に丸みを有する角柱)。

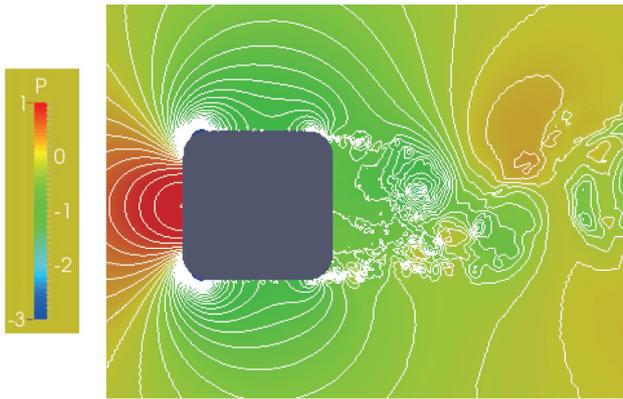


図6 瞬間圧力分布（角に丸みを有する角柱、 $Re=10^6$ ）。

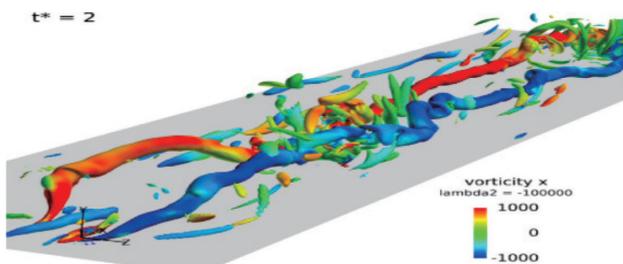


図7 対流境界層中の縦渦の挙動。

文献

- [1] K. Morishita, T. Ishihara, and Y. Kaneda, “Small-scale statistics in direct numerical simulation of turbulent channel flow at high-Reynolds number,” J. Physics: Conference series 318(2011) 022016.
- [2] T. Ishihara, H. Ogasawara, and J.C.R. Hunt, “ Analysis of conditional statistics obtained near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers,” J. Fluid. Struct. 53,50-57. 2015.
- [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 -,” 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements-ETMM10, S14-3. 2014.

Large-scale Direct Numerical Simulations of Fundamental Turbulent Flows and Application to Modeling of Engineering Turbulent Flows

Project Representative

Takashi Ishihara Graduate School of Engineering, Nagoya University

Authors

Takashi Ishihara Graduate School of Engineering, Nagoya University

Tetsuro Tamura Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Turbulence in many fields of nature and engineering is a non-linear system with huge degree of freedom. To improve prediction technologies of complex turbulence phenomena of huge degree of freedom, it is essential to consider application problems on the basis of the physical and mathematical understanding of turbulence. In this project, by using the Earth Simulator, we perform large-scale direct numerical simulations (DNS) of canonical problems of turbulence and carry out large-scale LES of complex environmental flow phenomena, with sharing high Reynolds-number turbulence databases and knowledge. In 2015, in the basic fields, to understand vortical structures in high Reynolds-number wall-bounded turbulence, we have conducted an analysis of the DNS databases of turbulent channel flows and turbulent boundary layers. Also, in the field of application, we have performed a series of large-scale LES of flow phenomena that are related to the environment issues. In particular, we studied the 3D flow structure behind a cylinder in the critical Reynolds number in detail.

Keywords: High-resolution DNS, turbulent boundary layer, LES, urban turbulent boundary layer, flow past a cylinder

1. DNS data analysis of Turbulent boundary Layer and Turbulent Channel Flow

DNS data of turbulent channel flow (TCF) [1] and turbulent boundary layer (TBL) [2] are used to study the properties of three different types of thin shear layers; at the outer edge (T/NT), in the interior (T/T) and within the buffer layer near the wall (T/W). The TCF data shows that sharp vortical cluster layers with big streamwise velocity jumps are observed at $y^+ = O(1000)$ in the log-law region. By an appropriate thresholding based on normalized vorticity, we can define the locations of T/NT and T/W layers of the TBL. The average height of the T/NT outer interfaces is 0.8δ (δ is boundary layer thickness) while that of the T/W interface is of the order of 10 wall units. Analysis of the TBL data [2] has shown that the T/NT transient region with thickness of the order of the Taylor-micro scale has rotational/irrotational transient superlayer that scales with the Kolmogorov length at the outer edge. The TBL data shows that decorrelation of velocity fluctuation is stronger at the T/W interface than at the T/NT interface.

2. Application of LES of Turbulent Flows to Urban Environmental and Strong Wind Disaster Problems

In this research, we carried out LES analysis of the flow around a circular cylinder in the critical Reynolds number using the large-scale domain and the high-resolution mesh.

The domain size in the span-wise direction is set to $8D$ (D : diameter of a circular cylinder), which is 4 times of our previous computations. The total grid points are approximately 900 million. As a result, it was revealed that the flow separation, turbulence transition, and reattachment occur on only same side, even in the case using long domain size $8D$ in the span-wise direction. Namely, the separation bubbles are formed everywhere in the span direction $8D$ on the one side of the cylinder, while a laminar flow state is maintained on the other side. The side that the flow transits to turbulence is always same and is not changed in the span-wise direction.

In contrast to the previous computations [3], The present computations clearly show the strong and slant vortices are formed in the wake affected by the span-wise wavy separation bubble. Furthermore, it is clarified that the locations of the vortex formation widely vary in the span-wise direction. Consequently, the local lift forces are largely fluctuating associated with strong vortex formation. On the other hand, the fluctuation of the total lift becomes small because of the different timing of the vortex formation in the span-wise direction. We also carried out the flow around the square cylinder with rounded corners in uniform flow. The Reynolds number effects actually exist and at Reynolds number equal to 10^6 we can recognize the attached flow on the side surface of cylinder. Very small separation bubbles are formed after the rounded corners. The separating flows become turbulent and range in the critical regime. The

vortices in the wake have the small size compared to ones in the subcritical regime at Reynolds number equal to 2.2×10^4 .

References

- [1] K. Morishita, T. Ishihara, and Y. Kaneda, “Small-scale statistics in direct numerical simulation of turbulent channel flow at high-Reynolds number,” J. Physics: Conference series 318(2011) 022016.
- [2] T. Ishihara, H. Ogasawara, and J.C.R. Hunt, “ Analysis of conditional statistics obtained near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers,” J. Fluid. Struct. 53,50-57. 2015.
- [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 -,” 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements-ETMM10, S14-3. 2014.

