

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

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・制御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、乱流境界層の大規模直接数値シミュレーション (DNS) を実行し、壁乱流の性質を理解するための解析を実施した。ここでは、乱流境界層の乱流・非乱流界面に着目したデータ解析によって得られた知見が、翼周りの流れの制御に応用され、飛行機設計に活用された事例を紹介する。

キーワード：高レイノルズ数乱流, 大規模直接数値計算, 乱流境界層, 乱流・非乱流界面, ブロッキング機構, 乱流制御

1. 乱流境界層の DNS

我々のグループでは、非一様な高レイノルズ数乱流の性質を理解するため、乱流境界層等の直接数値シミュレーション (DNS) のスペクトル法に基づくコードを開発し、地球シミュレータを用いて、大規模な DNS を行い壁近傍の非一様な乱流場の統計的性質を理解するためのデータ解析を実施してきた。乱流境界層の DNS コードは、周期境界の流れ方向にFRINGE領域を導入して、フーリエ・ヤコビ多項式展開を用いたものである [1,2]。表 1 は問題サイズを示す。

FRINGE領域では境界層の厚さを薄くするため、そのすぐ後方のデータは使えない。しかし、FRINGE領域から十分に離れた後流では、FRINGE領域の影響の少ない、運動量厚さもしくは R_θ のみに依存する統計量を得ることが出来ることが確認済である。

2. 乱流境界層の乱流・非乱流界面の解析

上記の乱流境界層 DNS で得られた乱流場の壁近傍の渦度を可視化したものが図 1 である。図より渦度が有限の値を取る領域と極めて小さい値を取る領域のシャープな境界 (乱流・非乱流界面と呼ぶことにする) が存在することが分かる。図で見られる乱流・非乱流界面を抽出するため、渦度の大きさの閾値を $\alpha U_\infty / \delta$ とし、適当な値の α に対し、この閾値以上の最も外側の点 (壁から離れた点) の集合を乱流・非乱流界面と定めることにした。いくつかの α の値に対して定まった界面からの距離を一定にして計算した渦度の大きさの条件付き平均を図 2 に示す。図より $\alpha \sim 0.7$ において、渦度の大きさの条件付き平均が (1) 界面で変化が大きい、(2) 界面近傍でピークを持たない、(3) 乱流側でほぼ一定の条件を満たすことが分かる。図 1 に $\alpha \sim 0.7$ として決定した界面の位置を示す。渦度がシャープ

表 1 乱流境界層 DNS における領域サイズ、格子点数と運動量厚さに基づくレイノルズ数

格子点数 ($N_x \times N_y \times N_z$)	流れ方向	スパン方向	運動量厚さに基づくレイノルズ数 R_θ
1920 × 256 × 384	1.2	0.09	344~1130
4608 × 512 × 768	1.2	0.09	835~2443

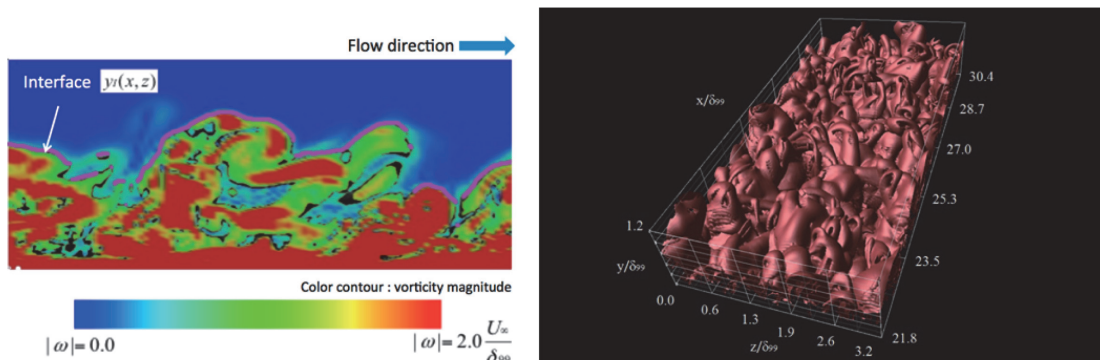


図 1 (左) 乱流境界層 DNS によって得られた $R_\theta=900$ 付近の壁近傍の渦度の大きさの等高線図 ([2] より)。(右) 乱流境界層の乱流・非乱流界面 (渦度の絶対値が $\omega=\alpha U_\infty / \delta$ 、 $\alpha=0.7$ となる等値面)。

に変化すると思われる位置とほぼ一致することが分かる。図1には界面の3次元空間における形状も示した。

こうして決定した界面からの壁垂直方向の距離の関数として、渦度のスパン方向成分の条件付き平均を解析した結果は、非乱流・乱流の遷移領域がテイラー長の厚さをもち、その表層部にコルモゴロフ長でスケールする渦あり・渦なしの遷移領域があることを示した。また、条件付き平均を用いて定義される条件付き速度揺らぎの2点相関関数を計算したところ、図3のように、界面近傍で急激に小さくなることが分かった [2,3]。

このような振る舞いは、理論的に示唆されていた [4] が乱流境界層の乱流・非乱流界面で実測されたのは文献 [2] が初めてである。なお、高レイノルズ数乱流中で観察された、渦のクラスタが形成する薄い剪断層のシャープな境界でも同様な速度相関の急激な減少が観察されている [5]。どちらも相関が界面を横切って急激に小さくなるものの0にはならず有限の値にとどまっている。これは適当な範囲の長さスケールの速度変動はブロックし、それ以外は通過させるような働きが界面にあることを示唆している。

3. ブロッキング機構の応用

上記の乱流・非乱流界面における速度変動の選択的なブロッキング機構の実証により、M. Brazaらのグループは、適当は外力を能動的に適当に与えることにより界面の形状を制御できるのではないかという発想を持つに至った [6]。そして、翼の後端部を振動させることにより、乱流・非乱流界面の形状を安定化させ、後流の乱流領域を狭くすることを試みた (図4参照) [6,7]。結果として、その効果が確認され、現在、飛行機の翼の設計に応用され、抵抗や騒音の低減のためにブロッキング機構が活用されている [8]。

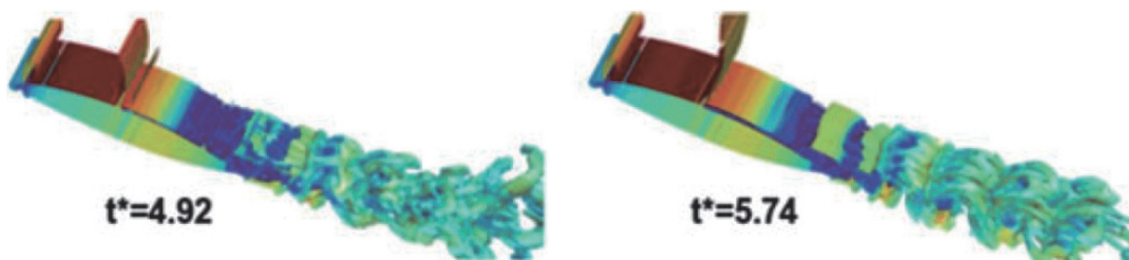


図4 翼周りのパフェット現象と乱流境界層及び翼後流の相互作用の数値計算の例 ([7]より)。ブロッキング機能を活用して、翼上の乱流境界層の乱流・非乱流界面を安定化させることにより、翼後流を薄く抑え、抵抗や騒音を小さくできると考えた飛行機の開発が行われている [6,7,8]。

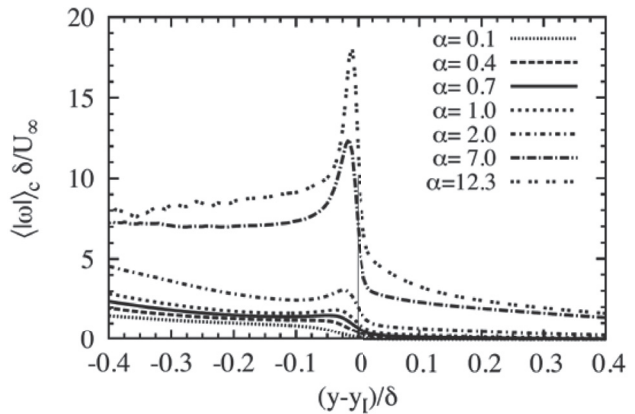


図2 渦度の絶対値の乱流・非乱流界面近傍の条件付き平均の関数 α 依存性 ([2]より)。

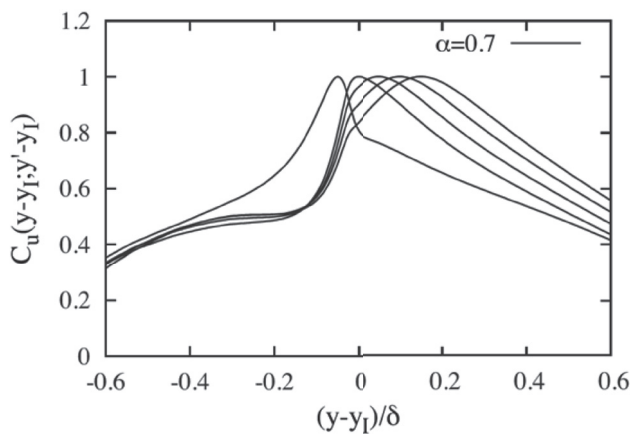


図3 流れ方向速度の変動成分の条件付き二点相関 [2, 3]。 $y-y_1 < 0$ が乱流側である。

文献

- [1] P. R. Spalart and J. H. Watmuff, Experimental and numerical study of a turbulent boundary layer with pressure gradients, *Journal of Fluid Mechanics* 249, 337–371 (1993).
- [2] Takashi Ishihara, Hiroki Ogasawara, Julian C. R. Hunt, Analysis of conditional statistics obtained near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers, *Journal of Fluids and Structures*, 53, 50-57 (2015)
- [3] Takashi Ishihara, Koji Morishita, and Julian C. R. Hunt, Three types of thin shear layers observed in high Re turbulence, *Proceeding of IMA Conference on Turbulence, Waves and Mixing*, King' s College Cambridge, UK (2016) pp 5-8
- [4] J. C. R. Hunt, P. A. Durbin, Perturbed vortical layers and shear sheltering, *Fluid Dynamics Research* 24, 375–404 (1999).
- [5] Takashi Ishihara, Yukio Kaneda, J. C. R. Hunt, Thin Shear Layers in High Reynolds Number Turbulence - DNS Results, *Flow Turbulence Combust*, 91, 895–929 (2013)
- [6] Damien Szubert, Fernando Grossi, Antonio Jimenez Garcia, Yannick Hoarau, Julian C.R. Hunt, Marianna Braza, Shock-vortex shear-layer interaction in the transonic flow around a supercritical airfoil at high Reynolds number in buffet conditions, *Journal of Fluids and Structures*, 55, 276-302 (2015)
- [7] Julian C.R. Hunt, Takashi Ishihara, Damien Szubert, Ioannis Asproulas, Yannick Hoarau and Marianna Braza, Turbulence Near Interfaces - Modelling and Simulations, *Advances in Fluid-Structure Interaction*, Volume 133, pp 283-292 (2016)
- [8] Isabelle Bellin, Des ailes profilées comme celles d'un rapace, *La Recherche*, vol. 517, 51-54 (2016).

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

Author

Takashi Ishihara Graduate School of Engineering, Nagoya University

Turbulence in many fields of nature and engineering is a non-linear system with huge degree of freedom. To improve prediction and control technologies of complex turbulence phenomena, 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 performed large-scale direct numerical simulations (DNS) of turbulent boundary layers (TBL) using a spectral method and studied the properties of turbulent/non-turbulent interface of the TBL. Conditional statistics near the turbulent/non-turbulent interface showed that the interface acts as barrier to the external and internal velocity fluctuations. This blocking mechanism is now being used for developing wings of airplane that can reduce drag and noise.

Keywords: High-resolution DNS, turbulent boundary layer, turbulent/non-turbulent interface, blocking mechanism, turbulence control

1. Direct numerical simulation (DNS) of turbulent boundary layers

To study the fundamental nature of turbulent boundary layers (TBL), we developed its DNS code for the ES based on a spectral method that uses Fourier series and Jacobi polynomials. Here we introduced a fringe region to suppress the thickness of the TBL and to use the periodic boundary condition in the streamwise direction.[1] We optimized the code and performed the DNS of TBLs using the ES. The number of grid points are $1920 \times 256 \times 384$ for $R_\theta = 344 \sim 1130$ and $4608 \times 512 \times 768$ for $R_\theta = 835 \sim 2443$, where R_θ is the Reynolds number based on the momentum thickness θ . The effect of the fringe region on the statistics of the TBL was studied and it was found that the effect is small if the distance from the fringe is over $300\theta_0$ in downstream. Here θ_0 is the momentum thickness at the exit of the fringe region. We use the TBL database generated by the above DNS for the analysis in this study.

2. Analysis of turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers

Turbulent/non-turbulent interface was determined using an appropriate threshold of vorticity amplitude the conditional statistics near the interface was studied.[2,3] The results showed that the interfacial layer has an inertia-viscous double structure that consists of a turbulent sub-layer with a thickness of the order of the Taylor micro-scale and its outer boundary with a thickness of the order of the Kolmogorov length scale. Also, it showed that conditional cross correlations of the streamwise or

the wall-normal velocity fluctuations change sharply across the interface. This result is consistent with the blocking mechanism of the interface.[4]

3. Turbulence control based on the blocking mechanism of the T/NT interface

By taking into account the eddy blocking mechanism, Szubert et al considered a stochastic forcing to lead to thinning of the turbulent/non-turbulent interfaces within the separated boundary layer and the shear layers. [5,6] Their study suggest that, by thinning the shear layers, both at the outer edge of the turbulent boundary layers and the wake, we can control the velocity profiles, and wall pressure distribution of the transonic flow around a supercritical airfoil at high Reynolds number. Such turbulence control based on the eddy blocking mechanism is being used in the development of airfoil on airplanes. [7]

References

- [1] P. R. Spalart and J. H. Watmuff, Experimental and numerical study of a turbulent boundary layer with pressure gradients, *Journal of Fluid Mechanics* 249, 337–371 (1993).
- [2] Takashi Ishihara, Hiroki Ogasawara, Julian C. R. Hunt, Analysis of conditional statistics obtained near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers, *Journal of Fluids and Structures*, 53, 50-57 (2015).
- [3] Takashi Ishihara, Koji Morishita, and Julian C. R. Hunt, Three types of thin shear layers observed in high Re turbulence, *Proceeding of IMA Conference on Turbulence*,

Waves and Mixing, King's College Cambridge, UK (2016)
pp 5-8.

- [4] J. C. R. Hunt, P. A. Durbin, Perturbed vortical layers and shear sheltering, *Fluid Dynamics Research* 24, 375–404 (1999).
- [5] Damien Szubert, Fernando Grossi, Antonio Jimenez Garcia, Yannick Hoarau, Julian C.R. Hunt, Marianna Braza, Shock-vortex shear-layer interaction in the transonic flow around a supercritical airfoil at high Reynolds number in buffet conditions, *Journal of Fluids and Structures*, 55, 276-302 (2015).
- [6] Julian C.R. Hunt, Takashi Ishihara, Damien Szubert, Ioannis Asproulias, Yannick Hoarau and Marianna Braza, Turbulence Near Interfaces - Modelling and Simulations, *Advances in Fluid-Structure Interaction*, Volume 133, pp 283-292 (2016).
- [7] Isabelle Bellin, Des ailes profilées comme celles d'un rapace, *La Recherche*, vol. 517, 51-54 (2016).

