

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25420129

研究課題名(和文) 空力抵抗低減のための理論的制御手法の開発

研究課題名(英文) Development of theoretical control methods for aerodynamic drag reduction

研究代表者

深淵 康二 (Fukagata, Koji)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：80361517

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、乗用車やトラック車両などの空力抵抗をさらに低減するため、壁に沿う乱流の摩擦抵抗や一般的な形状の物体周りの流れの制御に関する基礎理論を確立することである。壁乱流の摩擦抵抗低減に関しては、一様吹出し・吸込み制御および進行波状壁面変形制御の実用化に向けて克服すべき様々な効果の影響を数値シミュレーションによって検証するとともに、波長空間におけるモード解析を行った。また、任意形状の物体に働く空力抵抗の低減のために、まず圧力抵抗、摩擦抵抗やエネルギー散逸と流れ場の物理量との間を数学的に定式化し、それに基づく制御手法を提案し、円柱、角柱、および任意形状物体周りの流れにおいて検証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish basic theory on the control of friction drag of wall turbulence and a flow around general object in order to further reduce aerodynamic drag of cars and trucks. Regarding the reduction of the friction drag of the wall turbulence, we verified the effect of various effects to overcome toward practical application of uniform blowing and suction and traveling wave-like wall deformation by numerical simulation, and also conducted mode analysis in wavelength space. In order to reduce the aerodynamic drag acting on an object of an arbitrary shape, we first mathematically derived the relationship between pressure drag, friction drag, energy dissipation and the physical quantities in the flow field. Subsequently, we proposed a control method based on the derived relationship and verified it in the flows around a circular cylinder, a square cylinder, and an arbitrarily shaped object.

研究分野：流体工学

キーワード：流れの制御 空力抵抗 制御理論 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

今後長期的に持続可能な社会を構築するためには、エネルギーのさらなる有効利用および温室効果ガスの低減が必要である。そのためには、様々な物体に働く空力抵抗の低減による省エネルギー技術のための基礎理論の確立が肝要である。

流れの制御手法は、付加的な動力を必要としない受動制御と、それを必要とする能動制御に大別される。このうち、形状の最適化による受動制御は、スポーツカーあるいは新幹線・リニアモーターカーなどといった高速車両を対象に古くから研究開発が進められてきており、これが空力抵抗の低減に大きく寄与してきた。一方、能動制御に関しては、摩擦抵抗の低減あるいは剥離による圧力抵抗の低減に対して 1990 年代より積極的に研究が進められてきたが、未だ実用化には程遠い状態にある。

エネルギー利用効率の向上および温室効果ガス排出の大幅削減には、輸送の大部分を占める一般的な乗用車やトラック車両に関しても空力抵抗の低減を図る必要がある。もしこれら一般車両において空力抵抗が大幅に低減できれば、現行のガソリン車およびディーゼル車の燃費向上につながるのみならず、電気自動車においても航続距離の向上による一層の普及が期待できるはずである。

そして、このような空力抵抗の低減のためには、壁に沿う乱流の摩擦抵抗の低減および車両を構成する様々な形状の物体に働く空力抵抗の低減の双方が必須である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、先進的な流れの制御によって乗用車やトラック車両などの空力抵抗をさらに低減するため、壁に沿う乱流の摩擦抵抗の低減手法の提案・評価を行うとともに、一般的な形状の物体周りの流れの制御に関する基礎理論を確立することである。

壁に沿う乱流の摩擦抵抗低減に関しては、これまでに大きな抵抗低減効果が得られている一様吹出し・吸込み制御および進行波状壁面変形制御に着目し、実用化に向けて克服すべき様々な効果の影響を数値シミュレーションによって検証するとともに、制御理論に基づくフィードバック制御則からさらなる抵抗低減メカニズムに関する知見を得るために波長空間におけるモード解析を行う。

任意形状の物体に働く空力抵抗の低減のためには、まず圧力抵抗、摩擦抵抗やエネルギー散逸と流れ場の物理量との間の関係を数学的に定式化する。次にこの定式化に基づいて空力抵抗を最小とする制御入力を低次元モデル化手法、制御工学の理論、最適化手法、および流れの数値シミュレーション技術を総動員して求め、理論的なフィードバック制御側の構築を行う。さらにこのフィードバック制御の結果をもとに、センサを用いず、より実用化しやすいプレデターミンド制御

手法を提案する。

### 3. 研究の方法

壁に沿う乱流の摩擦抵抗低減および任意形状物体の抵抗低減のどちらの研究においても、数値シミュレーションの手法としては、比較的低レイノルズ数のケースに関しては乱流モデルを用いない直接数値シミュレーション (DNS) を、実用的な高レイノルズ数のケースに関してはラージエディシミュレーション (LES) あるいはレイノルズ平均 Navier-Stokes シミュレーション (RANS) を適宜使い分けた。また、波長空間におけるモード解析には、非線形項を外力項とするレゾルベント解析を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) 壁に沿う乱流の摩擦抵抗低減

最も実用化に近いと考えられる一様吹出し・吸込み制御に関しては、一様吹出し制御におけるレイノルズ数の違いによる抵抗低減効果の調査 (雑誌論文⑧)、一様吸込みと一様吹出しの組合せによる乱流遷移遅延と乱流摩擦抵抗低減の相乗効果の調査 (雑誌論文⑦)、一様吹出し制御を有限幅のスロットを用いて実装した際の効果の調査 (雑誌論文⑥)、粗面上の乱流に対する一様吹出しの抵抗低減効果の調査 (雑誌論文①) などを行った。これらの研究より、一様吹出し制御は実用的な高レイノルズ数条件下では有効であること、一様吸込みと一様吹出しの組合せでさらなる抵抗低減効果が見込めること、また有限幅のスロットを用いて吹出しを行った場合 (図 1) でもその効果は平均の吹出し速度で整理できることなどが明らかになった。さらに、粗面上の乱流に対しても一様吹出しが有効であることが分かった。

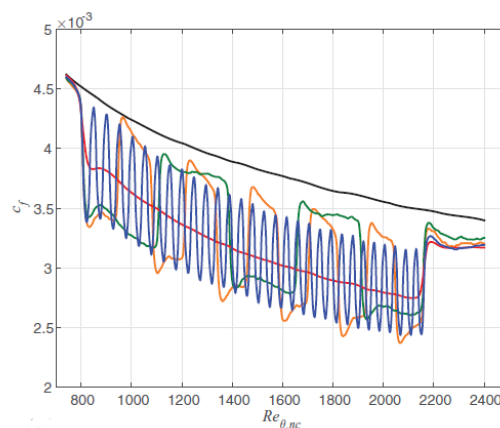


図 1 空間発達乱流境界層に対して有限幅のスロットを用いて吹出しを行った場合の局所壁面摩擦抵抗係数  $c_f$  の主流方向分布 (Kametani et al., *J. Turbul.*, 2016). 黒線は非制御時、赤線は一様吹出し制御時。緑・橙・青の各線は異なる幅のスロットを用いて吹出しを行った場合。

一様吹出し以外の乱流摩擦抵抗制御手法に関しては、進行波状壁面変形（雑誌論文④）や進行波状体積力（雑誌論文⑪）の効果や、超撥水面による摩擦抵抗低減における主流角度の依存性（雑誌論文⑤）、進行波状壁面変形による摩擦抵抗低減と伝熱促進の同時達成（雑誌論文④）などのそれぞれの効果について、DNSを用いて調査した。また、準最適制御のレゾルベント解析を行うことにより、新たな理論的抵抗低減制御戦略の構築を試みた（雑誌論文②, 学会発表③）。

## (2) 任意形状の物体に働く空力抵抗の低減

物体表面において測定可能な物理量と流れ場の情報の数学的関係を明らかにすべく、Navier-Stokes 方程式から出発し、

$$\varepsilon = -\int_V \frac{\partial k}{\partial t} dV + U_\infty (F_{DP} + F_{DF} + F_{D\phi}) + W_{id}$$

という恒等式を導出した（雑誌論文⑩）。ここに、 $\varepsilon$ は全散逸、 $k$ は乱流運動エネルギー、 $F_{DP}$ ,  $F_{DF}$ ,  $F_{D\phi}$ ,  $W_{id}$ はそれぞれ圧力抵抗、摩擦抵抗、制御入力（吹出し・吸込み）による付加的な抵抗、制御に理想的に必要なパワーであり、物体表面で計測可能な物理量のみを用いて記述できる（詳細は雑誌論文⑩参照）。この恒等式に基づいて準最適制御理論における評価関数を定義することにより、理論的な制御則を構築した。なお、準最適制御とはシステムが線形化できる短い時間幅における最適制御である。

全散逸を最小とするよう評価関数を定めて構築した制御側を円柱周りの流れに用いた場合、従来提案されている準最適制御よりも正味の動力を削減できることが分かり、その効果が確かめられた（図2）。

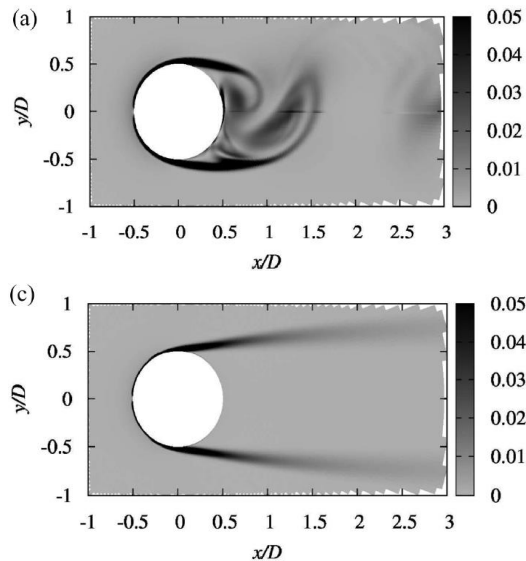


図2 全散逸を評価関数とした円柱周りの流れの準最適制御（Naito & Fukagata, *Phys. Rev. E*, 2014）。上段、下段はそれぞれ非制御時、制御時の瞬時渦度分布。

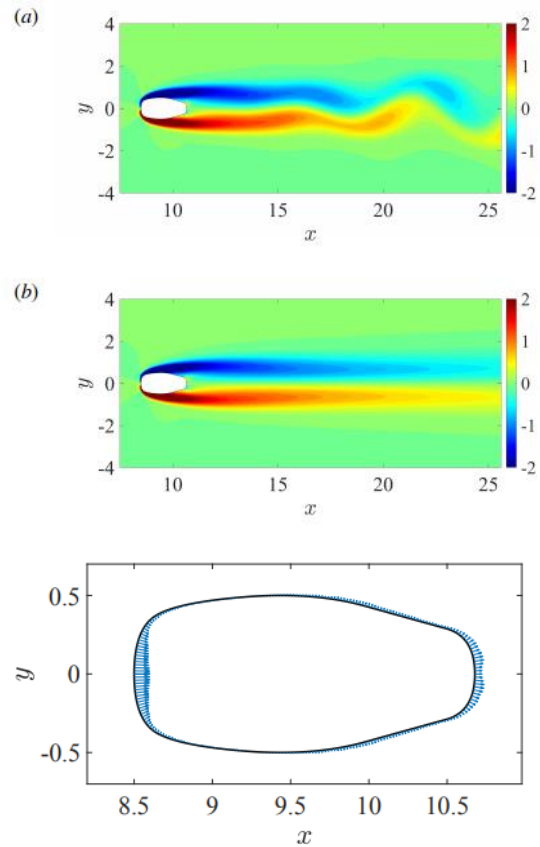


図3 圧力抗力を評価関数とした平滑化パンタグラフ舟体の準最適制御（村田ら, 2018）。上段、中段はそれぞれ非制御時、制御時の瞬時渦度分布、下段は理論的に求められた吹出し・吸込み分布。

また、同様の理論を円柱のように幾何学的点対称性の無い角柱（学会発表②）や平滑化パンタグラフ舟体（学会発表①）に拡張した。これらの場合には定式化そのものは円柱の場合と同様に行えることが分かり、またDNSを用いた制御効果の検証からも、構築した理論の妥当性が確かめられた（図3）。一方で、制御量を求めるために必要なインパルス応答場（速度・圧力場の、制御量に対するフレッシュ微分）を求める際の離散化誤差の影響を大きく受けることも分かり、その改善が今後の課題として残された。

さらに、円柱周りの流れに関しては低次元モデルを抽出し、そのダイナミクスに対して古典制御理論を適用し、古典制御理論の限界とその機構を明らかにした（雑誌論文⑫）。

また、制御入力としては、壁面からの吹出し・吸込みのみならず、プラズマアクチュエータを用いた制御の数値シミュレーションも行い、円柱周りの流れに対しては三次元攪乱による揚力変動抑制効果とそのメカニズムを調査し（雑誌論文⑬）、角柱周りの流れに関しては、長時間の数値積分に基づく随伴系の感度解析を行い、最適なプラズマアクチュエータ設置位置を理論的に示した（雑誌論文⑬）。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① E. Mori, M. Quadrio, and K. Fukagata, Turbulent drag reduction by uniform blowing over a two-dimensional roughness, *Flow Turbulence and Combustion*, 査読有, Vol. 99, 2017, pp. 765–785.  
DOI: 10.1007/s10494-017-9858-2
- ② S. Nakashima, K. Fukagata, and M. Luhar, Assessment of suboptimal control for turbulent skin friction reduction via resolvent analysis, *Journal of Fluid Mechanics*, 査読有, Vol. 828, 2017, pp. 496–526.  
DOI: 10.1017/jfm.2017.519
- ③ Y. Anzai, K. Fukagata, P. Meliga, E. Boujo, and F. Gallaire, Numerical simulation and sensitivity analysis of a low-Reynolds-number flow around a square cylinder controlled using plasma actuators, *Physical Review Fluids*, 査読有, Vol. 2, 2017, Paper 043901.  
DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.043901
- ④ K. Uchino, H. Mamori, and K. Fukagata, Heat transfer in fully developed turbulent channel flow with streamwise traveling wave-like wall deformation, *Journal of Thermal Science and Technology*, 査読有, Vol. 12, 2017, Paper JTST0003.  
DOI: 10.1299/jtst.2017jtst0003
- ⑤ S. Watanabe, H. Mamori, and K. Fukagata, Drag-reducing performance of obliquely aligned superhydrophobic surface in turbulent channel flow, *Fluid Dynamics Research*, 査読有, Vol. 49, 2017, Paper 025501.  
DOI: 10.1088/1873-7005/49/2/025501
- ⑥ Y. Kametani, K. Fukagata, R. Örlü, and P. Schlatter, Drag reduction in spatially developing turbulent boundary layers by spatially intermittent blowing at constant mass-flux, *Journal of Turbulence*, 査読有, Vol. 17, 2016, pp. 913–929.  
DOI: 10.1080/14685248.2016.1192285
- ⑦ D. Noguchi, K. Fukagata, and N. Tokugawa, Friction drag reduction of a spatially developing boundary layer using a combined uniform suction and blowing, *Journal of Fluid Science and Technology*, 査読有, Vol. 11, 2016, Paper JFST0004.  
DOI: 10.1299/jfst.2016jfst0004
- ⑧ Y. Kametani, K. Fukagata, R. Örlü, and P. Schlatter, Effect of uniform blowing/suction in a

turbulent boundary layer at moderate Reynolds number, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 査読有, Vol. 55, 2015, pp. 132–142.  
DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.05.019

⑨ Y. Kametani, M. Kawagoe, and K. Fukagata, Direct numerical simulation of a turbulent mixing layer with a perpendicularly oscillated inflow, *Journal of Fluid Science and Technology*, 査読有, Vol. 10, 2015, Paper JFST0004.  
DOI: 10.1299/jfst.2015jfst0004

⑩ H. Naito and K. Fukagata, Control of flow around a circular cylinder for minimizing energy dissipation, *Physical Review E*, 査読有, Vol. 90, 2014, Paper 053008.  
DOI: 10.1103/PhysRevE.90.053008

⑪ H. Mamori and K. Fukagata, Drag reduction effect by a wave-like wall-normal body force in a turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, 査読有, Vol. 26, 2014, Paper 115104.  
DOI: 10.1063/1.4901186

⑫ S. J. Illingworth, H. Naito, and K. Fukagata, Active control of vortex shedding: An explanation of the gain window, *Physical Review E*, 査読有, Vol. 90, 2014, Paper 043014.  
DOI: 10.1103/PhysRevE.90.043014

⑬ T. Igarashi, H. Naito, and K. Fukagata, Direct numerical simulation of flow around a circular cylinder controlled using plasma actuators, *Mathematical Problems in Engineering*, 査読有, Vol. 2014, 2014, Paper 591807.  
DOI: 10.1155/2014/591807

⑭ N. Tomiyama and K. Fukagata, Direct numerical simulation of drag reduction in a turbulent channel flow using spanwise traveling wave-like wall deformation, *Physics of Fluids*, 査読有, Vol. 25, 2013, Paper 105115.  
DOI: 10.1063/1.4826887

[学会発表] (計 16 件)

- ① 村田 高彬, 藤田 洋輔, 深瀬 康二, 光用 剛, パンタグラフ舟体周り流れの準最適制御, 日本機械学会関東学生会第 57 回学生員卒業研究発表講演会, 東京, 2018 年 3 月 16 日.
- ② Y. Fujita and K. Fukagata, Extension of suboptimal control theory for flow around a square cylinder, 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Denver, November 19–21, 2017.
- ③ A. Kawagoe, S. Nakashima, M. Luhar, and K. Fukagata, Proposal of control laws for turbulent friction drag reduction based on resolvent analysis, 16th European Turbulence Conference

(ETC16), Stockholm, August 21-24, 2017.

④K. Fukagata, Keynote Lecture: Flow control based on some integral relationships, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (AJK2015-FED), Seoul, July 26-31, 2015.

⑤K. Fukagata, Invited talk: Relaminarization of turbulent channel flow by pre-determined control, 2013 SIAM Annual Meeting, San Diego, July 8-12, 2013.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://kflab.jp>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

深潟 康二 (FUKAGATA, Koji)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：80361517