

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：12605

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889018

研究課題名(和文) 進行波状制御による壁面乱流の再層流化メカニズムの解明

研究課題名(英文) Relaminarization phenomena by traveling wave-like control in wall turbulence

研究代表者

守 裕也 (Mamori, Hiroya)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・特任助教

研究者番号：80706383

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：乱流摩擦の低減制御は輸送エネルギー削減に貢献できると期待される。本研究では壁面乱流を再層流化する進行波状制御に着目した。この制御による再層流化現象のメカニズムははまだ解明されていないが、これまでの研究から制御の空間的な発達に摩擦抵抗低減に大きな影響を及ぼしていることが分かった。そこで本研究では、再層流化メカニズム解明を目的として数値シミュレーション及び室内実験を行った。数値シミュレーションからは下流域に移動するに従い徐々に渦が減少し、再層流化の過程を観察できた。一方、実験においては同様の傾向が得られたものの、下流域では振幅が減衰するため制御効果が減少することが分かった。

研究成果の概要(英文)：Skin-friction drag reduction control of wall turbulence is expected to contribute to reduce transport cost. In this study, a traveling wave-like control from walls is focused. The traveling control induces a relaminarization phenomenon in wall turbulence. Although a mechanism of the relaminarization phenomenon has not yet been elucidated, previous studies showed that the spatial development of the control effect played important role. Therefore, in this study we made numerical simulations and experiments in order to clarify the spatial development effect on the relaminarization phenomenon. The numerical simulation shows that vortical structure gradually decreases in the downstream direction and the process is clearly observed. Although a similar tendency is obtained in experiments, the control effect attenuates at the downstream region since the wave amplitude decreases.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流制御 抵抗低減 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題などに端を発した環境保全に対する関心の高まりや金融危機による経済の低迷など、現在人類が直面する様々な問題に対し、航空機やパイプラインなどにおける輸送コストの削減が解決への寄与になると期待されている。輸送機器におけるエネルギー損失は、物体の壁面と周囲の流体との間に生じる乱流摩擦抵抗が一つの原因であり、この乱流摩擦抵抗を低減させる制御技術の進歩により、輸送コストの削減及び省エネルギー化に多大なる貢献をもたらす。しかし物体表面周りの流れが乱流状態へと遷移すると、物体の壁面近傍には渦構造が現れ、これらが流体運動の非線形性が原因であることから乱流制御技術の確立は困難を伴うといわれている。

申請者は平行平板間の乱流において、壁面からの進行波状に吹出し・吸込みを与える制御に関し幅広く研究を行ってきた。非制御時には摩擦抵抗を増大させる原因である壁面近傍の乱流構造が、制御時には徐々に乱流構造やレイノルズせん断応力は低減し、長時間経過後には消失する層流状態にまで遷移させることができることを発見した。この様子を図1に示す。時間の経過とともに、乱流が層流へと遷移していく現象がわかる。この再層流化は摩擦抵抗が最小となりかつ制御効率が最大となり、本制御最大の利点である。

申請者はこの壁面進行波状制御について室内実験も行い、流れの抵抗低減効果を調査した。実験結果から、制御効果は下流方向に徐々に広がり、この空間的な発達が乱流抵抗低減に大きな役割を示すことが分かった。

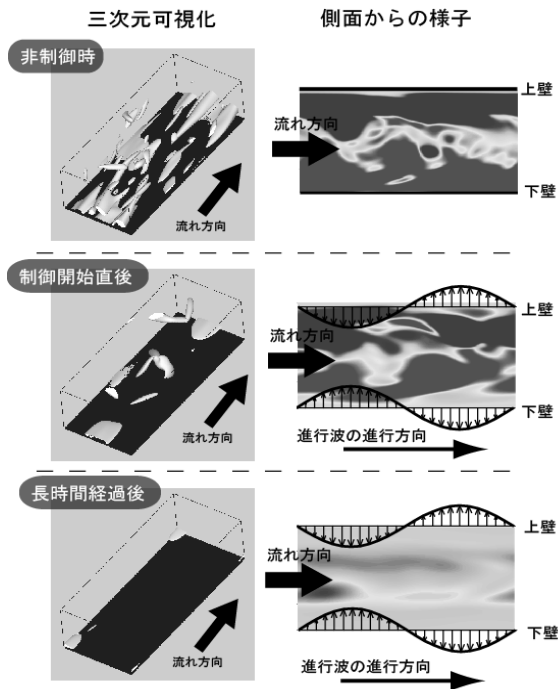


図1. 進行波状制御による再層流化

2. 研究の目的

本研究ではこれまでの背景を踏まえ、壁面乱流の摩擦抵抗低減を目指した進行波状制御について、その詳細な調査を目的とする。特に実験で示された、制御効果の空間発達の効果に着目した直接数値シミュレーション及び室内実験による研究を行う。

3. 研究の方法

本研究は直接数値シミュレーションと室内実験の双方を駆使して行う。本研究で用いる直接数値シミュレーションは、乱流モデル等を用いない為、信頼性の高い流れの統計量を取得できる利点がある。まずこの進行波制御において、制御入力の影響を調べる為に、この制御を支配する独立パラメータを変化させ摩擦抵抗や制御効率、再層流化の有無を調査する。そのうち特徴的なケースに関し、流れ方向に空間的に制御効果に変化していくことを考慮に入れつつ、乱流摩擦抵抗と壁面近傍の乱流構造の関係を明確にすることで、抵抗低減及び再層流化メカニズムを明らかにする。

室内実験においては、空間発達の効果をより明らかにする改良を行う。流れ方向の差圧計測、また粒子画像測定法を用いて流れの各種統計量を取得し、特に主流方向の流れの変化が明らかにした。また本実験を直接数値シミュレーションと比較した場合、流れを支配するパラメータであるレイノルズ数を変化させることが容易である。

平成25年度は、数値シミュレーションにおいては既存の周期境界を課した平行平板間乱流の計算コードを空間発達の効果が顕著に表れるようドライバー部及びメイン部を設けたものに改造し、制御効果の傾向を調査した(図3)。また、実験装置に関して室内風洞の下壁面にゴムシートを設置し、波が正弦波になるように調整を行った。なお作動流体は空気とした。振動発生器により生じた振動が、ゴムシート上を進行波が伝わるようになっている(図4)。

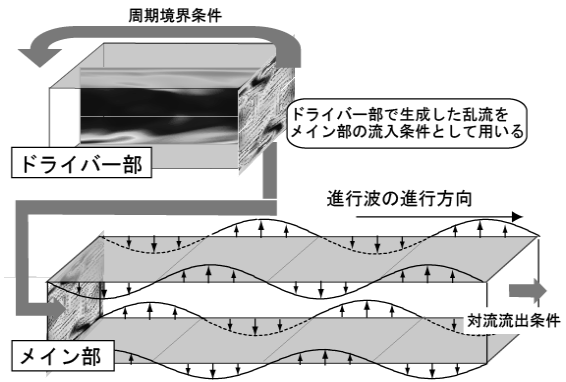


図2. DNSの計算領域

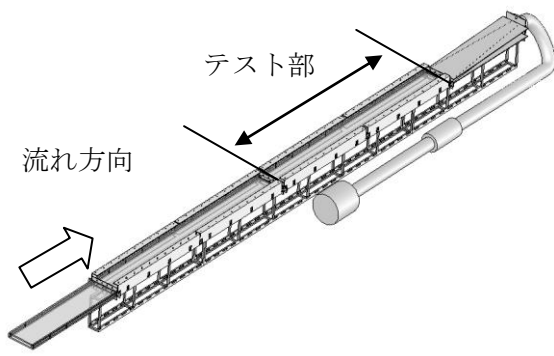


図 3. 本実験における平行平板間流の風洞

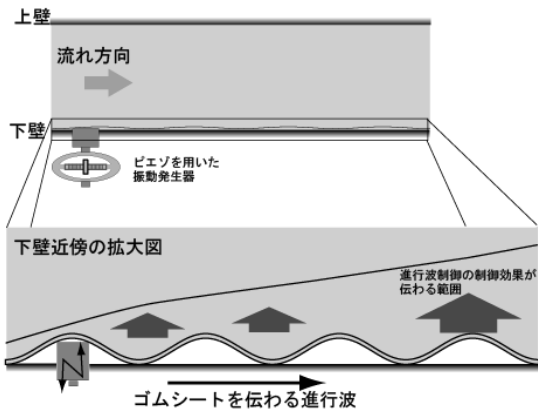


図 4. ゴムシートと振動発生器

平成 26 年度は、数値シミュレーションから空間的な発達と抵抗低減効果の関係を明らかにした。室内実験では、レイノルズ数依存性や振動発生器による周波数依存性を調査する。また、これらと合わせて進行波状外力の数値シミュレーションも行い、その制御効果を調査した。

#### 4. 研究成果

- ① 空間発達進行波についての調査を行った。図 5 に示すように、上流部では乱流渦が多くみられ、乱流状態を維持している。なお、壁面近傍に存在する平らな形状をした横渦はこの制御入力によって直接生成されるものである。他方、下流部において渦は減少し、周期境界条件下で見られたような再層流化に近い現象が生じていることもわかる。

図 6 に時間平均した流れの乱れの指標である乱れ強度を示す。流れ方向速度の乱れ成分は、流れ方向に周期的な構造が見られるが、壁面近傍の横渦の影響を受けていると考えられる。なお、このセル構造は短い統計時間での出力だったためと考えられる。

- ② 平行平板間乱流において、下壁に薄いゴムシート状に振動を伝播させることで進行波状壁面変形を作成し、乱流場へ与える制御効果の検証を行った。この結果、差圧計測からバルクレイノルズ数 3300

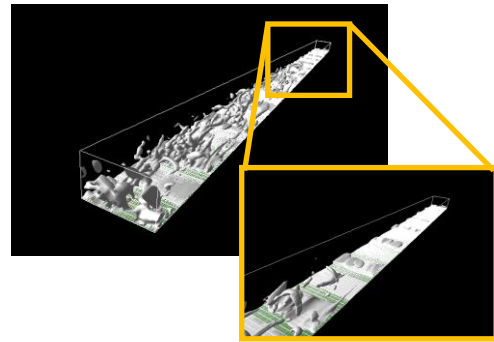


図 5. 制御時における渦構造の可視化。主流及び進行波の方向は手前から奥。

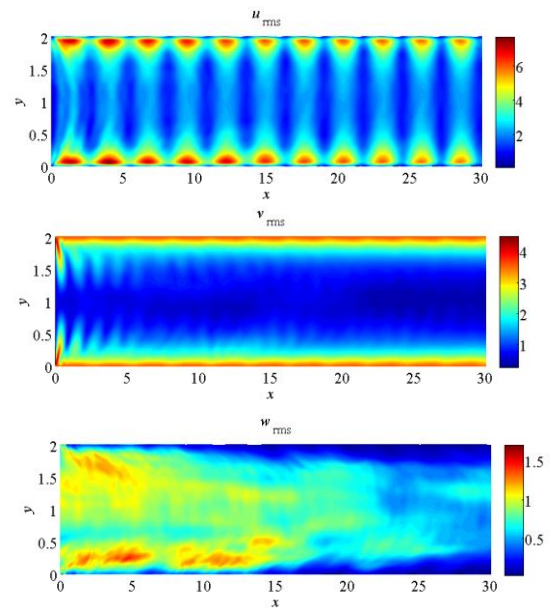


図 6. 制御時における時間平均された速度の RMS 値 (上段、流れ方向速度; 中段、壁垂直方向; 下段、スパン方向)。

において最大約 40% の抵抗低減効果を確認した。この効果はバルクレイノルズ数の増加に伴って進行波パラメータが効果的な範囲から外れてしまうため、非制御時の壁面摩擦係数に近づく。また PIV 計測から速度場に対して位相平均を行うことで各位相における速度変動の定量的な評価を行った。壁面近傍における速度変動は壁面の移動速度と概ね一致し、壁から離れた位置においても制御が生成する速度変動が確認できた。制御パラメータが異なるため値は異なるものの、特に位相平均速度分布およびレイノルズ応力の周期成分は過去の数値計算による調査と整合性のある分布が得られた。速度の 3 成分分解より、抵抗低減効果の主要因はレイノルズ応力のランダム成分の低減であることがわかった。一方周期成分は 2 次元的な分布を持つが、流れ方向に相殺されるため、抵抗低減に直接寄与しな

いことが分かった。

流れ場の空間発達の効果进行调查するため、PIV計測を上流域及び下流域の計2箇所です同時計測を行った。上流域においては制御効果がある範囲であったため摩擦抵抗低減に直結するレイノルズせん断応力の減少は確認された。一方、下流域では振動が減衰してしまう為、その効果は減少することが分かった。(Ishiwata et al, ETMM10, 2014; 石渡, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会2014)。

- ③ 吹出し吸込みだけではなく、外力を用いた進行波制御を調査した。図7のように、平行平板間流に波状に壁面垂直方向の外力を与え、それを進行させその制御効果を調査した。

吹出し吸込み時と同様に摩擦抵抗低減は発現したが、他方、期待されていた再層流化現象は発現しなかった。位相速度が0であるときに大きな抵抗低減率を示したが、大きなエネルギー削減率を有する再層流化現象は生じなかった(図8)。レイノルズせん断応力の分解により、制御により生じる横渦がレイノルズせん断応力を負にする事が分かった。この制御は直接実験できるわけではないが、プラズマアクチュエータを用いた制御などを実用化するうえで重要な知見となった(Mamori and Fukagata, Phys. Fluids, 2014; 守・深淵, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 2014)。

wall-normal body force

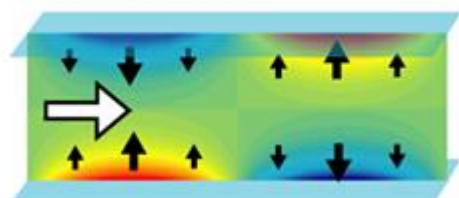


図7. 壁垂直方向外力を用いた制御

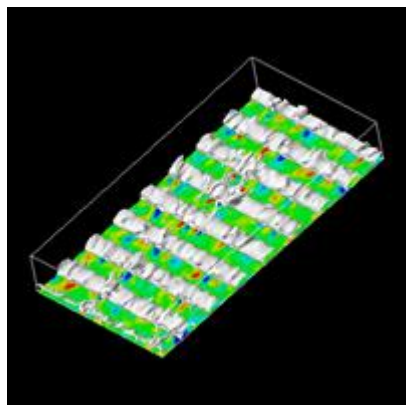


図8. 壁垂直方向外力を課した時の流れの様子。主流方向は左下から右上。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① H. Mamori and K. Fukagata, "Drag reduction effect by a wave-like wall-normal body force in a turbulent channel flow," Phys. Fluids, 26, 115104 (2014) 査読有 [dx.doi.org/10.1063/1.4901186](https://doi.org/10.1063/1.4901186).

[学会発表] (計 5 件)

- ① H. Mamori, K. Iwamoto, and A. Murata, "Drag reduction effect and relaminarization phenomena by traveling wave-like control in turbulent channel flow", Korea-Japan CFD Workshop 2014, Jinju, Korea, Nov. 13-14, 2014.
- ② 守裕也、深淵康二, 平行平板間乱流における進行波状外力による抵抗低減効果の直接数値計算」, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 富山大(富山), 2014年10月25日.
- ③ 石渡悠歩, 守裕也, 岩本薫, 村田章「進行波状壁面変形による壁面近傍の乱れ抑制効果のPIV計測」第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 富山大(富山), 2014年10月25日.
- ④ Y. Ishiwata, H. Mamori, K. Iwamoto, and A. Murata "PIV measurement for turbulent drag-reducing channel flow influenced by traveling wave-like wall deformation", 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM 10), Marbella, Spain, Sep. 17-19, 2014, S25, 6 pp.
- ⑤ 守裕也, 岩本薫, 村田章「壁面進行波状プレデターミンド制御による乱流摩擦抵抗低減及び再層流化現象」RIAM研究集会 壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割, 九州大学応用力学研究所(福岡), 2014年2月22日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] なし

[その他] なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

守 裕也(MAMORI, Hiroya)  
東京農工大学大学院工学府・特任助教  
研究者番号: 80706383