

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760176

研究課題名（和文）壁乱流における伝熱促進と摩擦抵抗低減の最適非相似制御

 研究課題名（英文）Optimal Dissimilar Control for Heat Transfer Enhancement
and Friction Drag Reduction in Wall Turbulence

研究代表者

長谷川 洋介 (HASEGAWA YOSUKE)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：30396783

研究成果の概要（和文）：

熱流体機器の高効率化に向けて、圧力損失を抑制しつつ、熱・物質輸送を促進することは、基礎的、且つ重要な課題である。本研究では、最も基礎的な系として平行平板間完全発達乱流場を対象として、運動量とスカラー輸送方程式、及び壁面境界条件に立ち返り、数学的な観点から速度場とスカラー場の非相似性を生み出す因子を整理した。この知見に基づき、最適制御理論を用いて壁面からの吹き出し／吸い込みの時空間分布を最適化することによって、世界に先駆けて抵抗低減と伝熱促進の同時達成を実現した。更に、得られた最適制御分布は、流れ方向に伝播する進行波の様相を呈することを示した。この知見に基づき、流れ場のセンシングを必要としない単純な開ループ制御則を提案した。

研究成果の概要（英文）：

Enhancing heat and mass transfer with suppressing pressure drop is fundamentally important for improving efficiencies of energy devices. In the present study, we revisit the governing equations and boundary conditions for momentum and scalar transfer in order to clarify possible scenarios for dissimilar heat transfer enhancement in a fully developed channel flow. Based on these knowledge, we first demonstrate simultaneous achievement of friction drag reduction and heat transfer enhancement by determining the spatio-temporal distribuion of wall blowing/suction based on the optimal control theory. We also show that the resultant optimal control input exhibits a traveling wave-like property in the streamwise direction. We eventually propose a simple open-loop strategy for dissimilar heat transfer enhancement.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：対流，伝熱促進，抵抗低減，最適制御理論

1. 研究開始当初の背景

現代社会は、熱と電気/力学的エネルギーの相互変換の上に成り立っており、伝熱技術はエネルギー機器開発を支える根幹技術である。近年、化学プラントや自動車等における中低温廃熱の有効利用や空調/給湯用ヒートポンプ高性能化のニーズが高まる中で、改めて伝熱促進技術が注目されている。

一般に、伝熱促進では伝熱面の拡大が有効であるが、同時に、熱交換器の大型化に伴うコストの増大、圧力損失の増加を招く。実際、これまで伝熱促進技術として、渦発生器、リブ付き管、オフセットフィン、波状管等が提案されているものの、いずれの手法においても、伝熱促進の割合以上に圧力損失を増加する傾向にある。今後、圧力損失を極力抑えつつも、飛躍的な伝熱促進を実現すること（非相似伝熱促進）が望まれる。

近年、Kasagi ら (2010) は平行平板間完全発達乱流場において、運動量と熱の輸送方程式に立ち返り、伝熱と圧力損失の非相似性が生じるシナリオを整理した。そのうち、ベクトルとスカラーの本質的な違いに基づく制御は、最も普遍的な制御指針を与えるものと注目される。この物理的洞察に基づき、Hasegawa & Kasagi (2011) は、平均化された運動量と熱の輸送方程式が同形となる理想的な系において、準最適制御理論に基づき壁面吹き出し/吸い込みの時空間分布を最適化することで、有意な非相似伝熱促進効果を実証した。

2. 研究の目的

上述の準最適制御理論では、短時間の熱流動ダイナミクスのみを考慮し、次の計算ステップにおけるコスト汎関数を最小化するように制御入力を決する。従って、得られた制御入力は必ずしも長い制御対象区間における最適解ではない。

そこで、本研究では、最適制御理論を用いて、有限の制御対象区間におけるダイナミクスを考慮した制御入力の最適化を行う。準最適制御理論と最適制御理論で得られた制御入力、及び制御効果の違いを明らかにすると共に、普遍的な非相似伝熱促進の制御指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

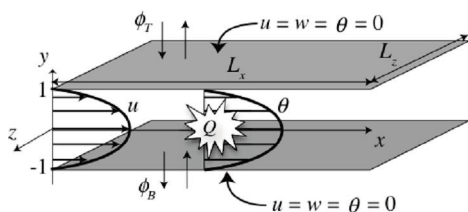


図1 計算領域と座標系

最も基礎的な熱流動場として、図1に示す、平行平板間完全発達乱流場を考える。流れ方向、壁面鉛直方向、スパン方向をそれぞれ x , y , z とし、 $y=0$ はチャンネル中心に位置する。温度場はパッシブスカラーとし、物性値の温度依存性は十分小さいとして無視する。この時、熱流動場の支配方程式は、非圧 Navier-Stokes 方程式、連続の式、そしてエネルギーの輸送方程式となる。

工学応用では様々な伝熱条件が存在するが、本研究では平均の運動量と熱の輸送方程式が同形となる理想的な系を考える。すなわち、発熱項を空間的に一様とし、その値を流体を駆動する平均圧力勾配と等しいとする。

また、本研究ではプラントル数 $Pr = 1.0$ を仮定する。その結果、平均化した流れ方向運動量とエネルギーの輸送方程式は、完全に相似形となる。

壁面境界条件として、流れ場に対しては滑りなし条件、また温度場に対して温度一定条件を課す。また、制御入力として、壁から吹き出し/吸い込みを仮定する。ただし、各壁面において、瞬時の正味の吹き出し量は常にゼロとする。

本研究では、制御の有無に依らず、流れ方向速度と温度の境界条件は相似になるよう意図的に系を設定している。この場合、平均化された流れ方向運動量と温度の輸送方程式、及び境界条件が完全に相似となるため、非相似伝熱促進が最も難しい系となる。またこの時、速度と温度の非相似性を生み出す因子は、速度場に対する連続の式の制約のみとなるため、制御機構の解析が容易であると共に、より普遍的な制御指針が得られるという利点がある。

本研究では、擬スペクトル法を用いて、直接数値シミュレーションにより解く。計算手法の詳細は、Hasegawa & Kasagi (2011) を参照されたい。流れ場は流量一定条件とし、レイノルズ数を $Re = 2287$ とした。この条件は、非制御時の摩擦速度に基づく摩擦レイノルズ数では 150 に対応する。

流量一定条件では、ポンプ動力は圧力損失と比例するので、その評価指標として摩擦係数 C_f を定義する。また、伝熱の指標としては Stanton 数 St を定義する。平均の速度分布と温度分布が相似であれば $2St = C_f$ が成立することを考慮し、非相似因子 $A = 2St/C_f$ を定義する。物理的には、 A はポンプ動力あたりの伝熱量を表す。本研究の目的は A を 1 より可能な限り大きくすることである。

本研究では、制御入力の決定において、準最適制御 (Hasegawa & Kasagi, 2011)、及び最適制御 (Hasegawa et al., 2012) をそれぞれ適用し、制御対象区間が制御効果に与える影響を調査した。

4. 研究成果

時刻 $t = 0$ において制御入力を加えた際の C_f と St の時系列データを図 2 に示す。尚、全ての値は非制御時の値 C_{f0} 、及び St_0 で正規化されている。黒線は非制御時の値、青線と赤線はそれぞれ準最適制御、及び最適制御を適用した結果を示す。準最適制御では、 C_f 、 St 共に非制御時より増加しているが、 St の増加率の方が顕著であることから、非相似伝熱促進が達成されていることが分かる。一方、最適制御では C_f は非制御時に対して 20% 以上低減する一方、 St は 2 倍以上増加している。著者の知る限り、平均の運動量と熱の輸送方程式が相似に近い系において、伝熱促進と抵抗低減を同時に達成したのは本研究が初めてである。

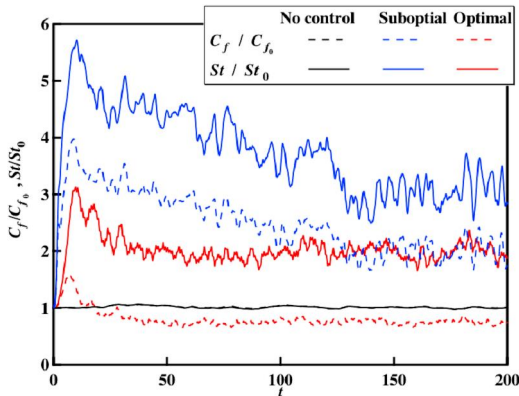


図 2 摩擦係数 C_f と Stanton 数 St の時系列データ

次に、相似因子 $A = 2St/C_f$ の時系列データを図 3 に示す。非制御時では $A \sim 1$ が成立しており、運動量輸送と熱輸送の相似性が極めて高いことが分かる。これに対して、準最適制御を適用した場合は $A = 1.5$ であり、更に最適制御の場合には $A = 2.5$ 以上の値が得られた。

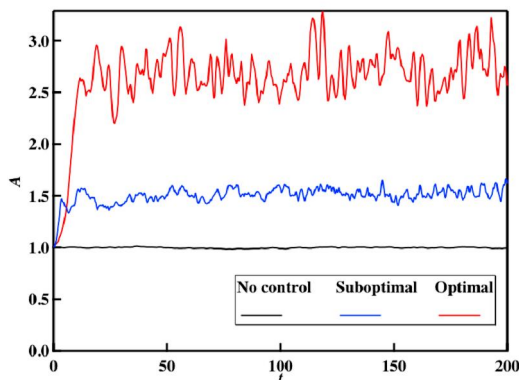


図 3 相似因子 $A = 2St/C_f$ の時系列データ

準最適制御、及び最適制御により決定された壁面吹き出し/吸い込みの瞬時の空間分布をそれぞれ図 4 a), b) に示す。興味深いこ

とに、いずれの制御においても、制御入力はスパン方向にほぼ一様で、流れ方向に周期的な波の様相を呈していることが分かる。時間発展の可視化より、これらの波はその形状を維持しつつ、ほぼ一定速度(バルク流速の 30% 程度)で下流方向に伝播し、制御入力は上下壁でほぼ対称、すなわち、上下壁における吹き出しの流れ方向位置はほぼ一致する (varicose モード) ことが確認された。

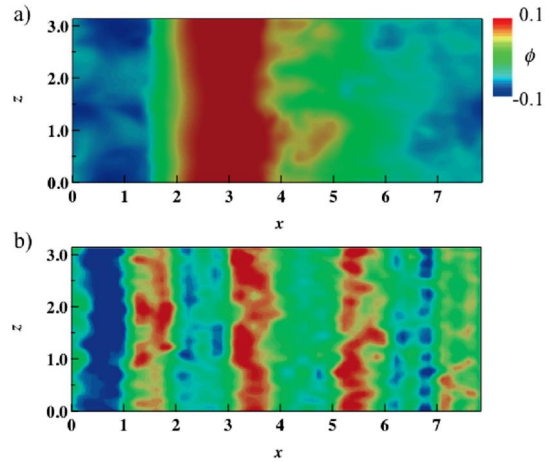


図 4 瞬時の制御入力空間分布

a) 準最適制御, b) 最適制御

一般に、乱流場は空間的にランダムに変動するため、最適制御入力もそれに応じてランダムな分布を持つことが多い。これに対して、本研究ではいずれの制御においても、制御入力として進行波が得られた。このような秩序的な制御入力を抽出するために、本研究では、条件付き抽出を適用した。具体的には、

- (1) 瞬時の制御入力をスパン方向に平均し
- (2) 得られた分布の吹き出し量のピーク位置を決定した後、
- (3) 十分に長い時間、上記のピーク位置に関して制御入力を平均する。

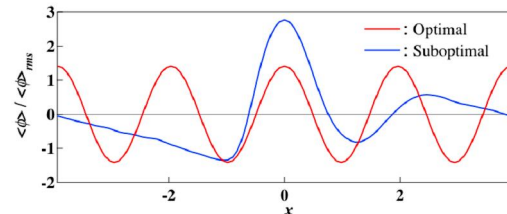


図 5 条件付き抽出された制御入力秩序成分

その結果、得られた準最適、及び最適制御入力の秩序成分の流れ方向分布を図 5 に示す。尚、いずれの分布も RMS 値で正規化されている。青線で示す準最適制御入力の秩序成分は、狭い領域で強い吹き出しが生じており、その上流部分では比較的弱い吸い込みが広範囲に分布している。一方、赤線で示される最適制御入力の秩序成分は、単一の正弦波であり、今回の計算条件では計算領域に 4 波長が存

在するモードに対応する。この波長は、非制御時の粘性長さスケールでは凡そ 300 程度となる。

一般に準最適、及び最適制御では、全計算領域の熱流動場の情報に基づき制御入力決定されるため、工学応用は難しい。しかし、今回得られた最適制御入力は、単純な進行波が支配的であるため、前節で得られた秩序成分のみを制御入力として与えることにより、開ループ制御による非相似伝熱促進の可能性がある。開ループ制御では、瞬時の熱流動場の情報を必要とせず、予め決められた制御入力のみを付与するためより現実的な制御則と考えられる。

既に述べたように、準最適制御、及び最適制御で得られた進行波は凡そ主流の 30% の速度で下流方向に伝播することが確認されたため、本研究では、図 5 に示した進行波分布を最適計算で得られた位相速度で移動させることによって、開ループ制御を試みた。最適制御計算の結果に従い、制御入力は上下壁で対称 (varicose モード) とし、制御入力の強度は最適制御計算における秩序成分の RMS 値に統一して $\Delta_{rms} = 0.043$ とした。得られた制御結果を Table 1 下段に示す。

Table 1 制御結果

	ϕ_{RMS}	C_f/C_{f0}	St/St_0	A
最適制御	0.051	0.757	2.02	2.72
準最適制御	0.050	2.03	3.05	1.51
開ループ制御 (最適)	0.043	2.01	3.06	1.55
開ループ制御 (準最適)	0.043	2.58	3.53	1.38

いずれの最適化手法を用いた場合においても、開ループ制御にすることで、制御効果は低下する傾向があるものの、依然として有意な非相似伝熱促進効果が確認される。特に、最適制御に基づく開ループ制御の制御効果は、準最適制御における制御効果とほぼ同等の効果が得られている。後者では、計算領域の全ての熱流動場の情報に基づき制御入力を決定していることを考慮すると、最適制御に基づく開ループ制御では、その単純な制御則にも拘らず、大きな制御効果が得られていると言える。

また、最適制御に基づく開ループ制御の方が、より高い制御効果を達成していることから、有限の制御対象区間におけるダイナミクスを考慮することにより、より制御効果の高い秩序成分が得られたことが分かった。

以上より、本研究の主な結論を以下に纏める。平均の流れ方向運動量と熱の輸送方程式、及び境界条件が同形となる平行平板間乱流場において、ポンプ動力あたりの伝熱量を最大化することを目的として、準最適制御理論、及び最適制御理論に基づき壁面吹き出し/吸い込み分布を決定した。その結果、有限の

制御対象区間におけるダイナミクスを考慮した最適制御において、より高い制御効果が得られ、抵抗低減と伝熱促進の同時達成が確認された。

また、いずれの制御においても、制御入力として下流方向に伝播する波が得られた。

この知見を基に、下流方向進行波を用いた開ループ制御則を提案し、高い制御効果を実証した。より具体的には、最適制御に基づく開ループ制御では、吹き出し/吸い込みの強度が主流の 4% 程度の時に、伝熱が凡そ 3 倍に増加する一方で、圧力損失は 2 倍程度の上昇に留まった。これら一連の結果は、進行波制御は、非相似伝熱促進における普遍的、且つ効果的な制御指針であることを示している。

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 7 件)

1. Stroh, A., Frohnafel, B., Hasegawa, Y., Kasagi, N. & Tropea, C. "The Influence of Frequency Limited and Noise Contaminated Sensing on Reactive Turbulence Control Schemes" *Journal of Turbulence*, Vol. 13, No. 16, pp.1-15 (2012) doi:10.1080/14685248.2012.679343(査読有り)
2. Frohnafel, B., Hasegawa, Y. & Quadrio, M. "Money versus Time: Evaluation of Flow Control in terms of Energy Consumption and Convenience" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 700, pp. 406-418 (2012) doi:10.1017/jfm.2012.139(査読有り)
3. Ricco, P., Ottonelli, C., Hasegawa, Y. & Quadrio, M. "Changes in Turbulent Dissipation in a Channel Flow with Oscillating Walls" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 700, pp. 77-104 (2012) doi:10.1017/jfm.2012.97(査読有り)
4. Kasagi, N., Hasegawa, Y., Fukagata, K. & Iwamoto, K. "Control of Turbulent Transport: Less Friction and More Heat Transfer" *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 134, 031009 (2012) doi:10.1115/1.4005151(査読有り)
5. Hasegawa, Y., Frohnafel, B. & Kasagi, N. "Effects of Spatially Varying Slip Length on Friction Drag Reduction in Wall Turbulence" *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 318, 022028 (2012) doi:10.1088/1742-6596/318/2/0

- 2028(査読有り)
6. Frohnapfel, B., Jovanovic, J., Hasegawa, Y. & Kasagi, N. "Theoretical Considerations about Near-Wall Turbulence and Resulting Flow Control Schemes" *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM)*, Vol. 10, pp. 743-746 (2011) doi:10.1002/pamm.201010352(査読有り)
 7. Hasegawa, Y. & Kasagi, N. "Dissimilar Control of Momentum and Heat Transfer in a Fully Developed Turbulent Channel Flow" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 683, pp. 57-93 (2011) doi:10.1017/jfm.2011.248(査読有り)

[学会発表] (計 18 件)

1. Hasegawa, Y., Yamamoto, A., Shikazono, N. & Kasagi, N. "Optimal Traveling Wave for Dissimilar Heat Transfer Enhancement in a Fully Developed Turbulent Channel Flow" *Joint ERCOFTAC-PLASMAERO Public Workshop*, Toulouse, France, Dec. 10-12 (2012)
2. Ricco, P., Ottonelli, C., Hasegawa, Y. & Quadrio, M. "Near-Wall Enstrophy Generation in a Drag-Reduced Turbulent Channel Flow with Spanwise Wall Oscillation" *Joint ERCOFTAC-PLASMAERO Public Workshop*, Toulouse, France, Dec. 10-12 (2012)
3. Quadrio, M., Frohnapfel, B. & Hasegawa, Y. "Comparing Various Drag-Reduction Techniques in the Money-vs-Time Framework" *Joint ERCOFTAC-PLASMAERO Public Workshop*, Toulouse, France, Dec. 10-12 (2012)
4. 長谷川 洋介, 鹿園 直毅 "層流における伝熱促進のための壁面形状最適化" 日本機械学会 熱工学コンファレンス, 熊本, pp. 393-394, 2012年11月17-18日
5. Hasegawa, Y., Yamamoto, A. & Kasagi, N. "The Nature of Optimal and Suboptimal Controls in Dissimilar Heat and Momentum Turbulent Transport" *7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT2012)*, Palermo, Sicily, Italy, Sept. 24-27 (2012)
6. 長谷川 洋介, 山本 彬, 笠木 伸英, 鹿園 直毅 "壁乱流における運動量と熱輸送の最適非相似制御" 日本流体力学会年会, 高知, 2012年9月16-18日
7. Ricco, P., Ottonelli, C., Hasegawa, Y. & Quadrio, M. "The Drag-reduction Oscillating-wall Problem: new insight after 20 years" *9th European Fluid Mechanics Conference (EFMC9)*, Rome, Italy, Sept. 9-13 (2012)
8. Hasegawa, Y., Frohnapfel, B. & Quadrio, M. "Reevaluation of Control Performance for Turbulent Skin Friction Drag Reduction in terms of Energy Saving and Convenience" *9th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements (ETMM9)*, Thessaloniki, Greece, Jun. 6-8 (2012)
9. Stroh, A., Hasegawa, Y. & Frohnapfel, B. "Arrangement of Sensors and Actuators in Reactive Turbulence Control Schemes" *9th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements (ETMM9)*, Thessaloniki, Greece, Jun. 6-8 (2012)
10. Cimarelli, A., Frohnapfel, B., Hasegawa, Y., De Angelis, E. & Quadrio, M. "Non-Sinusoidal Wall Oscillation for Drag Recution" *83rd Annual Meeting of the International Associate of Applied Mathematics and Mechanics*, Darmstadt, Germany, Mar. 26-30 (2012)
11. Frohnapfel, B., Hasegawa, Y. & Quadrio, M. "Assessment of Flow Control Techniques in Terms of Time and Energy Savings" *83rd Annual Meeting of the International Associate of Applied Mathematics and Mechanics*, Darmstadt, Germany, Mar. 26-30 (2012)
12. Stroh, A., Simon, R., Hasegawa, Y., Frohnapfel, B., Khujadze, G. & Oberlack, M. "Reactive Turbulence Control Schemes in a Spatially Developing Turbulent Boundary Layer" *83rd Annual Meeting of the International Associate of Applied Mathematics and Mechanics*, Darmstadt, Germany, Mar. 26-30 (2012)
13. Türk, S., Dachiel, G., Hasegawa, Y. & Frohnapfel, B. "On the Effect of Superhydrophobic Surfaces in Turbulent Channel Flow" *83rd Annual Meeting of the International Associate of Applied Mathematics and Mechanics*, Darmstadt, Germany, Mar. 26-30 (2012)
14. Hasegawa, Y., Frohnapfel, B. & Quadrio, M. "On the Evaluation of Control Performance in Drag Reducing Flows" *64th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Baltimore,

- U.S.A., Nov. 20-22 (2011)
15. Yamamoto, A., Hasegawa, Y. & Kasagi, N. "Simultaneous Achievement of Drag Reduction and Heat Transfer Augmentation in Wall Turbulence by Optimal Control Theory" *64th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Baltimore, U.S.A., Nov. 20-22 (2011)
 16. Hasegawa, Y., Frohnapfel, B. & Kasagi, N. "Effects of Spatially Varying Slip Length on Friction Drag Reduction in Wall Turbulence" *13th European Turbulence Conference (ETC13)*, Warsaw, Poland, Sept. 12-15, No. 133 (2011)
 17. Stroh, A., Frohnapfel, B., Hasegawa, Y., Kasagi, N. & Tropea, C. "The Influence of Sensors with Limited Frequency Resolution and Noise Pollution in Reactive Control Schemes" *6th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP6)*, Ottawa, Canada, July 28-31, PC2P (2011)
 18. Hasegawa, Y. & Kasagi, N. "Mechanism of Dissimilar Momentum and Heat Transfer Induced by a Traveling Wave-Like Blowing/Suction in Turbulent Channel Flow" *6th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP6)*, Ottawa, Canada, July 28-31, P35P (2011)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：熱交換器
発明者：鹿園直毅, 長谷川洋介
権利者：東京大学
種類：特許
番号：特願 2012-251290
出願年月日：2012 年 11 月 15 日
国内外の別：国内

名称：熱交換器
発明者：鹿園直毅, 長谷川洋介
権利者：東京大学
種類：特許
番号：特願 2012-251291
出願年月日：2012 年 11 月 15 日

○取得状況 (計 0 件)

[その他]
ホームページ等 特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 洋介 (HASEGAWA YOSUKE)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号：30396783