

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289037

研究課題名(和文)革新的対流伝熱促進の数理と実践

研究課題名(英文) Mathematics and Practice of Innovative Convection Heat Transfer Enhancement

研究代表者

長谷川 洋介 (HASEGAWA, YOSUKE)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：30396783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、内部流において、壁面熱流束と壁面摩擦の非相似制御を実現するために、最適制御理論の応用を行った。まず、理想的な壁面からの吹き出し/吸い込みを制御入力として、その時空間分布の最適化を行った。更に、得られた制御入力を詳細に解析することによって、単純なプレディターミンド制御による非相似伝熱促進を実証すると共に、最適な進行波入力のスケーリングを明らかにした。次に、上記の手法を発展させることにより、複雑伝熱面の形状最適化手法を構築した。レベルセット関数により伝熱面形状を表現し、その空間分布を最適化するように定式化することにより、任意の複雑3次元伝熱面の最適化を実現し、その有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：We apply optimal control theory in order to achieve dissimilarity between wall friction and wall heat flux in internal flows. First, we consider ideal wall blowing/suction as a control input and the optimization of its spatio-temporal distribution is conducted. By analyzing the obtained optimal control input, we develop a simple predetermined control strategy for dissimilar heat transfer enhancement. In addition, we clarify the scaling of the optimal traveling wave-like control input. Next, we extend the above approach to the shape optimization of complex heat transfer surfaces. By representing heat transfer surface with a level-set function, its spatial distribution is optimized so as to minimize a prescribed cost functional. It is demonstrated that the proposed scheme is promising in optimizing complex interfaces in a wide variety of engineering applications.

研究分野：熱流体工学

キーワード：滞留

1. 研究開始当初の背景

現代社会は、熱エネルギー、電気エネルギー、化学エネルギー、機械エネルギー等の相互変換の上に成立しており、流れやそれに伴う熱・物質輸送現象を自在に制御することは、エネルギー機器の有効利用、省エネルギーを推し進める上で、極めて重要である。

一般に、内部流において、流れと熱の移動が混在する場合に、系の不可逆損失(すなわち、エントロピー)を最小化しようとする二つの極限が考えられる。いずれの場合も圧力損失を最小にしつつ、

- 1) 熱伝達率を無限大にする
- 2) 熱伝達率を限りなくゼロにすることが求められる。ここで、前者1)は伝熱促進技術、後者2)は完全断熱技術に相当する。中でも、本研究では、1)の場合に注目する。この時、基礎研究の観点でも困難、かつ興味深い課題に直面する。

流れとそれに伴う温度場の支配方程式は、いずれも移流拡散方程式に支配されていることから、両者の相似性は高いことが古くから知られている(レイノルズ相似則)。このことは、壁面と流体間の運動量輸送(すなわち圧力損失)と伝熱を独立に制御することが困難であることを示唆する。1)のケースでは、圧力損失を抑えつつ、伝熱を促進する必要であり、非相似伝熱制御に関する知見が求められる。

しかし、一般に熱流動現象は、マルチスケール性、強非線形性を有し、これを自在に制御することは容易では無い。近年、研究代表者のグループでは、現代制御理論を熱流体现象に応用することにより、世界に先駆けて、非相似伝熱制御の実証に成功した。この例に代表されるように、制御理論に基づく熱流動場の制御は極めて有効である一方で、依然としてその適用条件は限られており、想定される制御入力も壁面からの吹き出し/吸い込みを仮定する等、実用化に向けて解決しなければならない課題は多い。

2. 研究の目的

本研究では、これまで限定的な流れ場において適用されてきた最適制御理論に基づく非相似伝熱制御を異なるレイノルズ数の乱流場に適用し、より普遍的な指針を得る。次に、得られた最適制御入力から普遍的な制御入力を抽出し、より単純な能動制御であるプレディターミンド制御則を導き、その有効性を示す。更に、工学応用を想定し、制御理論に基づく形状最適化のための数学的枠組みを構築する。具体的には、2次元の波状伝熱面の最適化のアルゴリズムを構築した後、任意の3次元形状の最適化アルゴリズムを構築し、実証する。

3. 研究の方法

3. 1. 最適制御理論に基づく能動制御

最も基礎的な熱流動場として、図1に示す

ような平行平板間乱流場を考える。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する。この時、熱流動場の支配方程式は、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。摩擦レイノルズ数は、 $Re_\tau = 100, 150, 300$  と変化させた。この時、バルク流量とチャンネル半幅で無次元化されたレイノルズ数は、 $Re = 1452, 2293, 4980$  である。本計算では、圧力勾配を調節することにより、流量一定を実現する一方、流体内部に一樣な発熱を仮定することで、温度場を駆動する。また、速度と温度は、壁面でゼロとする。この時、流れ場と温度場の駆動力は相似形となるため、非相似伝熱促進が最も難しい条件となる(Hasegawa & Kasagi, 2011)。

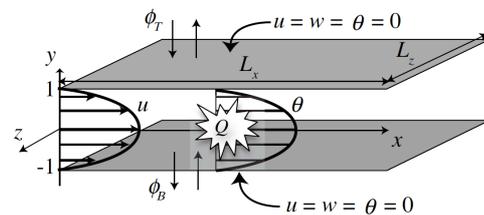


図1 計算領域と座標系

制御効果の評価指標として、流動抵抗を壁面摩擦係数  $C_f$  で評価する。同様に壁面熱流束をスタントン数  $St$  により評価する。主流速度分布と温度分布が相似である場合には、 $2St = Cf$  が成立することを考慮し、非相似因子を  $A = 2St / Cf$  で定義する。本研究の目的は、少ない圧力損失で伝熱を高めることであり、すなわち、 $A$  をできる限り高めることである。制御入力は、壁面からの吹き出し/吸い込みとし、その時空間分布は、最適制御理論に基づき決定した。(Yamamoto et al. (2013))

3. 2. 複雑3次元伝熱面の決定論的最適化

前節で用いた最適制御理論を受動制御へ拡張した。研究対象として、著者らのグループによって以前に提案された斜波状壁面を考える(図2)。上記の伝熱面形状を用いることにより、低レイノルズ数域においても、有効に渦運動を誘起し、伝熱促進が可能であることが知られている。本研究では、定常層流を対象として、壁面上の全ての格子点に自由度を与えて、最適制御理論に基づき、形状を最適化することを考える。

まずは、水平面内からの変位量  $\eta$  を制御パラメータとして、その最適化を行う。最適化アルゴリズムについては、Hasegawa & Shikazono (2014)を参考にされたい。

上記のように、水平面からの変位量を用いて最適化する場合、大きな変形やトポロジーの変化への対応は不可能である。そこで、より一般的な任意の3次元界面の形状最適化を行うために、レベルセット関数を用いて、3次元界面を表現し、これを制御パラメータとして、形状最適化のアルゴリズムを導出し

た. その詳細は, 亀谷, 長谷川 (2016) で報告している.

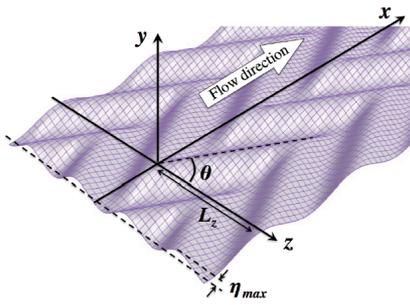


図2 対象とする斜波状壁面

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 最適制御に基づくチャンネル乱流の能動制御

異なるレイノルズ数において, 最適制御を施した際の制御効果を表1に示す. 摩擦係数, 及びスタント数は, 全て非制御時における値で無次元化している. 本研究では, 制御入力 $\phi_{rms}$ の大きさ, コスト関数に含まれる制御コストの重み係数の結果として決まるため, 厳密に同じ大きさでの比較は難しい. しかし, 今回, 対象とするレイノルズ数範囲では, 顕著なレイノルズ数効果は確認されず, いずれのレイノルズ数においても, 抵抗低減効果と伝熱促進効果が同時に確認されており, 非相似因子も1より大きくすることに成功している.

表1 異なるレイノルズ数における制御効果

Re	$\phi_{rms}$	$C_f / C_{f0}$	$St / St_0$	A
1452	0.17	0.80	1.52	3.86
2284	0.02	0.78	1.28	1.68
2284	0.03	0.76	1.58	2.12
4980	0.03	0.90	1.54	1.81

制御入力の時間発展を詳細に解析した結果, いずれのレイノルズ数においても, 最適制御入力は, スパン方向にほぼ一応で, 流れ方向進行波の特徴を有することが明らかになった. 更に, 進行波の波長は, 各レイノルズ数の非制御時における粘性長さで凡そ250となり, その進行速度はバルク流速の凡そ30%程度であることが分かった.

次に, 上記の得られた最適制御入力に関する知見に基づき, 単純な正弦波状の進行波を加えることによる, プレディターミンド制御を試みた. 最適制御入力に従って, 進行波の位相速度を主流の30%に固定し, 波長を系統的に変化させた. その結果得られた非相似因子を図3に示す. いずれのレイノルズ数においても, 非相似因子は, 波長が200-300付近でピークを持っており, これは最適制御により得られた進行波の波長と良い一致を示している. 以上の結果より, 最適制御理論により得られた制御入力に基づき, 単純なプレディターミンド制御を開発し, 非相似伝熱促進を実証すると共に, 最適進行波のスケーリ

ングを明らかにすることに成功した.

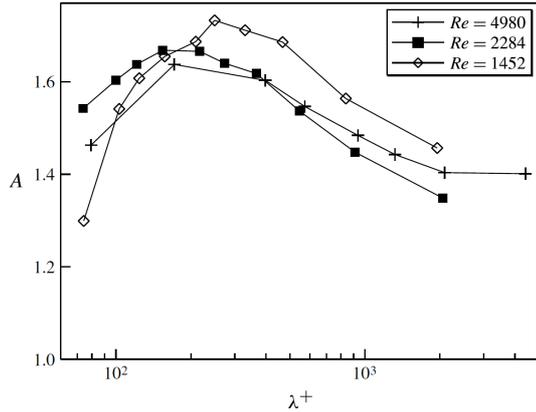


図3 異なる波長の進行波制御入力が非相似因子に与える影響

##### 4. 2. 三次元伝熱面の形状最適化

次に, 前節で用いた最適制御理論を図2示す斜波状壁面の形状最適化へ応用した. 図2に示す初期形状において, 変形量の標準偏差を系統的に大きくした際の伝熱と圧力損失を図4に赤線で示す. 縦軸は, 非制御時の値で無次元化されたヌセルト数, 横軸は摩擦係数である. 壁面振幅が大きくなるに従って, 伝熱増進が実現される一方, 圧力損失がより顕著に増加することが分かる. 変形量が $\eta_{rms} / \delta = 0.30$ を初期形状として, 形状最適化を行った結果を黒線で示す. コスト関数に含まれる圧力損失と伝熱の重みを等しくした今回のケースでは, 最適化によって最終的には平滑面へと収束する. しかし, その過程において, 黒線は, 赤線よりも常に上側に位置し, このことは, 同一の圧力損失において, 伝熱増進が実現できていることが分かる. 実際に, 非相似因子では, 1.25倍程度増加した.

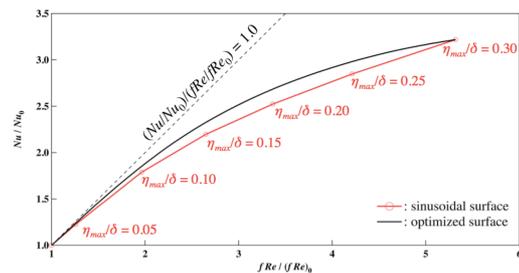


図4 異なる形状の伝熱・圧力損失特性

初期の伝熱面形状と図4の黒線上の最適伝熱面形状を図5 a), b)に示す. これより, 最適形状では, 凸部が平坦化される一方で, 凹部は大きく変化しないことが分かる.

上記の手法では, 伝熱面は平滑面からの変位量で定義されているため, 複雑な3次元伝熱面への拡張が困難である. そこで, 同様の問題に対して, 伝熱面形状をレベル・セット関数により表現し, その3次元空間分布を制御変数として, 最適化を行った. 初期形状と最適形状を図6 a), b)に示す. レベルセット

関数を用いることによって、左右の壁面や伝熱面の大変形を扱うことが可能となった。この場合においても、コスト関数は単調減少しており、任意の3次元伝熱面の最適化ツールを構築することに成功した。

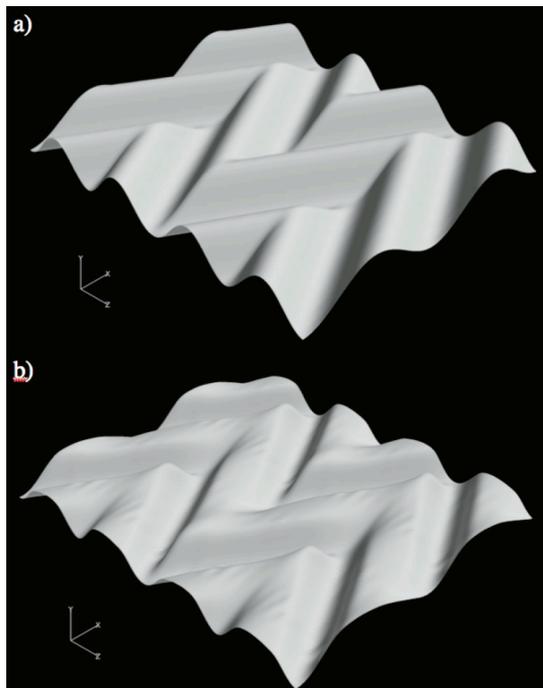


図5 a)初期伝熱面形状と b)最適形状

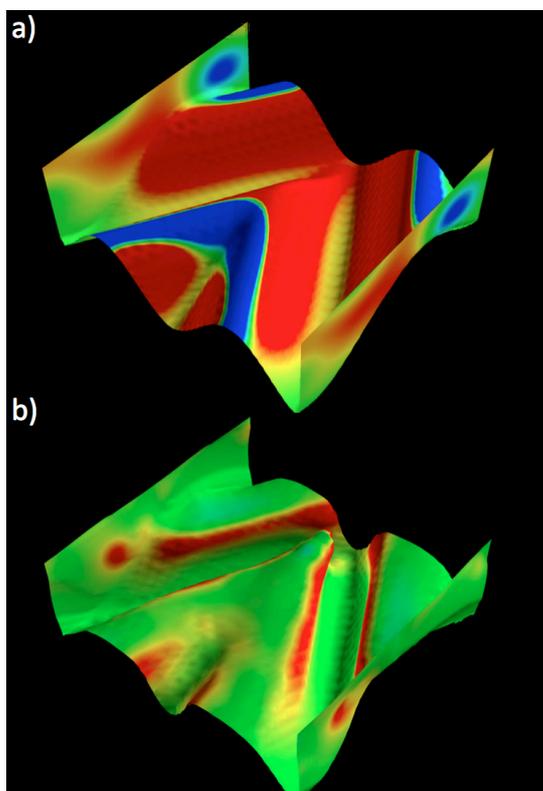


図6 レベルセット法を用いた  
伝熱面形状最適化

本手法は、多孔質形状のような複雑な3次元形状の最適化に容易に応用できるため（亀谷、長谷川、2016）、本研究で対象する熱交換に限

らず、燃料電池や二次電池の多孔質電極構造最適化や蓄熱デバイスにおける形状最適化など幅広い応用が期待できる。

#### 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 9件）

1. Yamamoto, A., Hasegawa, Y. & Kasagi, N. "Optimal Control of Dissimilar Heat and Momentum Transfer in a Fully Developed Turbulent Channel Flow" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 733, pp. 189-220 (2013) doi:10.1017/jfm.2013.436 (査読有り)
2. Cimarelli, A., Frohnappfel, B., Hasegawa, Y., de Angelis, E. & Quadrio, M. "Prediction of Turbulence Control for Arbitrary Periodic Spanwise Wall Movement" *Physics of Fluids*, Vol. 25, 075102 (2012) doi:10.1063/1.4813807 (査読有り)
3. Yakeno, A., Hasegawa, Y. & Kasagi, N. "Modification of Quasi-Streamwise Vortical Structure in a Drag-Reduced Turbulent Channel Flow" *Physics of Fluids*, Vol. 26, 085109 (2014) doi:10.1063/1.4893903 (査読有り)
4. Sun, X., Hasegawa, Y., Kohno H., Jiao, Z., Hayakawa, K, Okita, K. & Shikazono, N. "Calculation of Contact Angles at Triple Phase Boundary in Solid Oxide Fuel Cell Anode Using Level-Set Method" *Material Characterization*, Vol. 96, pp.100-107 (2014) doi: 10.1016/j.matchar.2014.07.020 (査読有り)
5. Hasegawa, Y., Quadrio, M. & Frohnappfel, B. "Numerical Simulation of Turbulent Duct Flows with Constant Power Input" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 750, pp.191-209 (2014)doi: 10.1017/jfm.2014.269 (査読有り)
6. Tuerk, S., Daschiel, G., Stroh, A., Hasegawa, Y., & Frohnappfel, B. "Turbulent Flow over Superhydrophobic Surfaces with Streamwise Grooves" *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 747, pp.186-217 (2014)doi: 10.1017/jfm.2014.137 (査読有り)
7. Quadrio, M., Frohnappfel, B. & Hasegawa, Y. "Does the Choicd of Forcing Term Affect DNS of Turbulent Channel Flow?" *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 55 No. 2, pp. 286-293 (2015)doi: 10.1016/j.euromechflu.2015.09.005

- (査読有り)
8. Stroh, A., Frohnapfel, B., Schlatter, P. & Hasegawa, Y. "A comparison of opposition control in turbulent boundary layer and turbulent channel flow" *Physics of Fluids*, Vol. 27, 075101 (2015) doi:10.1063/1.4923234 (査読あり)
  9. Muramatsu, K., Youn, Y., Han, Y., Hasegawa, Y. & Shikazono, N. "Numerical Study on the effect of initial flow velocity on Liquid Film Thickness of Accelerated Slug Flow in a Micro Tube" *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 54, pp. 77-86 (2015) doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.04.005

[学会発表] (計 13件)

1. 亀谷幸憲, 長谷川洋介, 高伝熱・低圧力損失のための随伴解析を用いた3次元伝熱面の形状最適化, 第53回伝熱シンポジウム, 大阪, 2016年5月24-26日
2. Hasegawa, Y., Frohnapfel, B. & Quadrio, M. "Direct numerical simulation of turbulent flows at constant power input" 14th European Turbulence Conference, Lyon, France, Sept. 1-4 (2013)
3. Yakeno, Y., Hasegawa, Y. & Kasagi, N. "Phase dependency of near-wall streamwise vortices and associated Reynolds shear stresses close to spanwise oscillating wall" 14th European Turbulence Conference, Lyon, France, Sept. 1-4 (2013)
4. Stroh, A., Hasegawa, Y. & Frohnapfel, B. "Reactive Control of Spatially Developing Turbulent Boundary Layer" 14th European Turbulence Conference, Lyon, France, Sept. 1-4 (2013)
5. Hasegawa, Y., Tuerk, S., Stroh, A., Daschiel, G. & Frohnapfel, B. "Secondary Motion in Turbulent Flows Over Superhydrophobic Surfaces" 8th Int. Symp. on Turbulent Shear Flow Phenomena (TSFP8), Poitiers, France, Aug. 28-30 (2013)
6. Cimarelli, A., Frohnapfel, B., Hasegawa, Y., De Angelis, E. & Quadrio, M. "Turbulent Skin-Friction Drag Reduction by Spanwise Wall Oscillation with Generic Temporal Waveform" 8th Int. Symp. on Turbulent Shear Flow Phenomena (TSFP8), Poitiers, France, Aug. 28-30 (2013)
7. Hasegawa, Y. "Optimal control of heat and fluid flow for efficient energy utilization" (invited lecture), Multiple Shooting and Time Domain Decomposition Methods, Heidelberg University, May 6-8 (2013)
8. Stroh, A., Hasegawa, Y., Schlatter, P. & Frohnapfel, B. "Influence of locally applied control on spatial development of turbulent boundary layer" 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 2014, Don Carlos Resort, Marbella, Spain, Sept. 17-19 (2014)
9. Hasegawa, Y. & Shikazono, N. "Model-based optimization of three-dimensional complex structure for heat transfer enhancement in single-phase flows" 15th International Heat Transfer Conference (IHTC015), Kyoto, Japan, Aug. 10-15 (2014)
10. Muramatsu, K., Youn, Y., Han, Y., Yokoyama, K., Hasegawa, Y. & Shikazono, N. "Study on liquid film thickness of accelerated slug flow in micro tubes" 15th International Heat Transfer Conference (IHTC015), Kyoto, Japan, Aug. 10-15 (2014)
11. Hasegawa, Y., Stroh, A., Tuerk, S., Daschiel, G. & Frohnapfel, B. "Turbulent drag reduction over superhydrophobic surface" Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, Sendai, Japan, April. 13-16 (2014)
12. Sekiguchi, W., Cerizza, D., Tsukahara, T. & Hasegawa, Y., "Estimation of Scalar Source Strength Based on Sensor Information by Adjoint Analysis in Turbulence", the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT015), Busan, Korea, Nov. 22-25 (2015)
13. Cerizza, D., Sekiguchi, W., Tsukahara, T. & Hasegawa, Y., "Reconstruction of time-varying scalar source intensity based on sensing signal in turbulent channel flow", 8th International Symposium on Turbulent Heat and Mass Transfer 8 (THMT15), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Sept. 15-18 (2015)
14. Stroh, A., Hasegawa, Y., Kriegseis, J. & Frohnapfel, B., "Wave-Length-Dependent Rearrangement of Secondary Vortices over Superhydrophobic Surfaces with Streamwise Grooves" 9th International Symposium on Turbulent and Shear Flow Phenomena (TSFP-9), Melbourne, Australia, June 30-July 3 (2015)

[図書] (計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 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・准教授  
研究者番号：30396783

### (2) 研究分担者

鹿園 直毅 (SHIKAZONO NAOKI)  
東京大学・生産技術研究所・教授  
研究者番号：30345087