

機関番号：12601

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246036

研究課題名 (和文) 壁乱流能動制御の進化型開発基礎研究

研究課題名 (英文) Evolutional Fundamental Study on Active Control of Wall Turbulence

研究代表者

笠木 伸英 (KASAGI NOBUHIDE)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：80107531

研究成果の概要 (和文)：

人類社会は、エネルギー資源の枯渇、環境保全等の地球規模の課題に直面しており、熱流体システムのより一層の高効率化が望まれている。乱流制御は、運動量/熱/物質の輸送現象、騒音、化学反応の操作を通じて、熱流体機器の効率を格段に向上させる可能性を秘めている。本研究では、最も基礎的な系である壁乱流を対象とし、能動制御の中でも、流れの状態に依らず、予め決められた制御入力を与えるプレディターミンド制御に着目し、抵抗低減効果、伝熱促進効果の飛躍的な向上を目指した基礎研究を実施した。具体的には、エネルギー削減の観点から、省エネルギー率、制御利得という新たな制御指標を導入し、既存の制御則を再評価すると共に、進行波状の制御入力が抵抗低減に与える効果について、詳細な解析を行った。また、これまで内部流において蓄積された制御指針を外部流に応用し、乱流境界層における新たな制御指針を得た。また、伝熱と摩擦の非相似制御を目的とし、速度場とスカラー場の支配方程式、及び境界条件に立ち返って、非相似伝熱促進が生じるためのシナリオを整理した。更に、制御理論を応用することで、単純なプレディターミンド制御入力によって、有意な非相似伝熱促進が可能であることを実証した。

研究成果の概要 (英文)：

Facing the global issues such as depletion of energy resources and environmental deterioration, highly advanced technology of turbulence control is ever more needed. Turbulence control opens up new possibilities to achieve far greater efficiency and least environmental impact of various thermal-fluid systems supporting the human society through the manipulation and modification of momentum/heat/mass transfer, noise as well as chemical reaction. In the present study, we focused on one of the most canonical flows, i.e., wall turbulence and associated transport phenomena. We particularly aimed at developing innovative predetermined controls to drastically reduce skin friction drag and enhance heat/mass transfer. Specifically, we introduced new control indices such as the net energy saving rate and the control gain in order to evaluate cost effectiveness of existing control strategies and also a newly proposed traveling wave-like wall blowing/suction. We also applied uniform blowing/suction to a turbulent boundary layer to obtain general control strategies for spatially developing flows. For heat/mass transfer enhancement, we reexamined the governing equations and boundary conditions for the velocity and scalar fields in order to clarify possible scenarios for dissimilar heat transfer enhancement control. By applying the optimal control theory, we demonstrated that the dissimilar control is possible with a simple open-loop control strategy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	19,100,000	5,730,000	24,830,000
平成21年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
平成22年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
年度			
年度			
総計	38,200,000	11,460,000	49,660,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流，流体制御，能動制御，数値シミュレーション，MEMS

1. 研究開始当初の背景

乱流研究は既に長い歴史を有するが、その強い非線形性と広いスケール範囲のために、依然として困難な研究課題である。近年、計算機の発達と共に乱流現象の数値予測は著しい発展を遂げたが、産業や環境との関わりにおいて強く望まれる乱流の制御は、未踏の学術課題と言える。局所、時々刻々の熱流動状態に応じた制御入力を与えるフィードバック制御では、リブレット等の受動デバイスに比べ、乱流現象のより自在な制御が可能である。研究代表者らは、2005年にフィードバック制御システムによる壁乱流の摩擦抵抗低減を世界で始めて実験室実験において成功した。しかし、その実現には、壁面近傍に生成される微細な渦構造に対して、個別の制御入力を加えるために、100個以上の微小なセンサー・アクチュエータ群で制御壁面を敷き詰め、更にそれらを統合する制御システムを構築する必要があった。上記の背景から、フィードバック制御の高い制御効果を保ちつつ、制御系を簡素化しようとする試みが始まりつつあった。例えば、予め決められたモードで制御入力を加えるプレデターミンド制御では、その単純さにも拘わらず、フィードバック制御と同等の摩擦抵抗低減が得られている。ただし、主流と同程度の制御入力を要し、大部分の場合、正味のエネルギー利得は負となることが、既存のプレデターミンド制御則の致命的な欠点であった。また、それまでは抵抗低減率が主に用いられてきたが、エネルギー削減という観点から、制御則の評価指標を考える必要性があった。一方、工学応用では、摩擦抵抗低減だけでなく、伝熱促進の要求も多い。しかし、研究開始当初においては、様々な境界条件において摩擦と伝熱の同時制御を実現するための有効な制

御指針は得られていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、センサ群が不要であり、単純な制御系によって、高い制御効果を得るプレデターミンド制御を機器の設計上も経済的にもより有利と考え、フィードバック制御と同様、もしくはそれ以上の正味のエネルギー利得を実現する革新的プレデターミンド法構築の方法論の確立を最終目標とした。一般に、乱流せん断流は、壁や自由界面等の境界に沿う界面せん断流と、境界の拘束が無い自由せん断流に大別されるが、本研究では、界面せん断流れに焦点を絞った。界面せん断流制御の工学応用では、壁面摩擦・騒音低減や熱・物質輸送の促進が求められる。これらの自在な制御により、航空機、船舶などの輸送機器の省エネルギー、熱機関の発電効率の向上、化学プラントにおける熱流体機器の性能向上、環境負荷低減など、多大な貢献が期待できる。そこで本研究では、壁面摩擦と界面における熱・物質輸送の制御を検討の対象とした。更に、従来の制御手法は、主に完全発達流において構築されており、工学的に重要な境界層流れ等の空間発達流への適用性については、殆ど知見が得られていなかった。本研究では、平行平板間乱流、及び乱流境界層の高レイノルズ数数値計算を行い、乱流場の空間発達が制御効果に及ぼす影響を解明し、それを考慮した制御則の構築を行うこととした。

3. 研究の方法

本研究では、現実の系において能動制御によりエネルギー削減を達成することを目的とし、その観点から制御則の評価指標を確立する。壁乱流摩擦抵抗低減制御、界面における乱流熱・物質輸送制御の課題に対し、理論的

研究、直接数値シミュレーション (DNS) など数理的研究を行い、熱流動場の構造と機構に関する基礎的知見を蓄積する。速度場不変量に基づく理論解析等を進めることで普遍的な知識の抽出を試みると同時に、最適化能動制御を各熱流動場に適用することにより、制御入力熱流動場に与える力学的影響を詳細に調査する。次に、それらの知見に基づいてシステムの簡素化と制御則の精緻化を進めて、革新的なプレディターミンド制御則の確立を目指す。また、それらの制御法を実験的に実証、評価するために、制御計測システムの開発・評価を行う。

4. 研究成果

現実のシステムにおいて正味のエネルギー利得を実現するという観点から、正味のエネルギー削減率と制御利得という新しい2つの評価指標を導入し、既存の制御則を評価した(Kasagi et al., 2009)。その結果、正味のエネルギー利得の観点では、フィードバック制御とプレディターミンド制御は同程度の制御効果を得られる一方、制御利得の観点ではプレディターミンド制御は一般に大きく劣ることを示した。また、任意の断面形状を持つ周期的な管内における制御された流れに関するエネルギーバランスを導出し、ポンプ動力と制御動力の和が4つの寄与に分解できることを示した。さらに、直管を含む一定曲率の場合に制御によって達成できる最小の必要動力は同じレイノルズ数のストークス流の散逸率であることを数学的に証明した(Fukagata et al., 2009)。

フィードバック制御では、壁近傍のレイノルズ応力の不変量に着目し、壁面近傍の各速度成分に対して仮想的な減衰力を与える数値シミュレーションを行った。その結果、壁面近傍のスペン方向速度の減衰が摩擦抵抗低減に有効であることを示した。更に、より現実的な制御則を目指して、壁面流れ方向せん断応力のみを制御入力として、壁面スペン方向速度変動を減衰させる制御則を開発した。本制御則は、従来提案されている壁面流れ方向せん断応力に基づく制御則の中でも、最も大きな制御効果を得られることが分かった(Frohnepfel et al., 2010)。また、 $Re_{\square} = 640$ のチャンネル乱流において、大規模構造に相当する長波長成分のみを理想的に抑制した場合と、壁面近傍渦構造に相当する短波長成分のみを抑制した場合の直接数値シミュレーションを行った。短波長成分を抑制した場合には長波長成分はあまり影響を受けないのに対し、長波長成分を抑制した場合には短波長成分の乱れが増大し、結果として制御効率が低下することが分かった(小林ら, 2009)。

抵抗低減を目的としたプレディターミンド制御則の開発では、時間的、及び空間的な

周期を持つスペン方向速度擾乱が壁面摩擦抵抗低減に及ぼす影響を調査した。その結果、時間的、空間的制御のいずれの場合においても摩擦抵抗低減に関して、最適な周期、及び波長が存在することを示し、両者は壁面近傍の準秩序構造の対流速度を考慮すると、ほぼ同等の時間スケールに対応することを示した。また、空間的制御の方が、より少ない投入エネルギーで大きな摩擦抵抗低減が得られることが分かり、その結果、正味のエネルギー削減率、制御利得の両面において、より良い制御成績が得られることが分かった(焼野ら, 2010)。

また、圧力勾配無しチャンネル壁面にぜん動運動を加えたものと、これと同じ速度を持つ吹出し・吸込み速度を持つ壁面進行波を加えたものを比較した。どちらの場合にも一方向の流速が得られたが、ぜん動運動と吹出し・吸込みでは誘起される流れが逆方向となることが示され、その機構がモデルおよび弱非線形理論を用いて説明された(Hoepffner & Fukagata, 2009)。この結果を受けて、進行波状吹出し・吸込み制御を加えたチャンネル層流の線形解析を行った。レイノルズ数、進行波の波数および位相速度を変化させて解析を行った結果、影響される層の厚さはストークス第2問題と同様にスケールリングできること、また摩擦抵抗低減/増加は、非粘性場の位相と壁面近傍の位相シフトの符号の関係によって決まることを明らかにした(Mamori et al. 2010)。更に、 $Re_b = 5600$ のチャンネル乱流に進行波状壁面変形を加えたDNSを行い、下流方向進行波で再層流化することが分かった。また、大振幅の壁面変形では乱流状態と層流状態が周期的に繰り返すことがわかった(村井・深淵 2010)。

一様吹出し/吸込みを伴う空間発達境界層のDNSを行った。チャンネルの場合(Sumitani & Kasagi, 1995)と同様、吹出しではレイノルズ応力は増加するが摩擦抵抗が減少し、吸込みではその逆となった。空間発達境界層に対するFIK式を用いて各項の寄与が定量的に示された(Kametani & Fukagata, 2011)。

また、ハードウェア開発においては、MEMS技術を用いることで、従来例のないサブミリメートルスケールのプラズマアクチュエータの製作に成功し、単体アクチュエータの性能評価実験を行い、アクチュエータのサイズが誘起流速に与える影響を調査した。また、同時にアクチュエータ周りのプラズマ反応/拡散を考慮した数値計算スキームを確立し、実験結果と定性的な一致を確認した(Okouti et al., 2009)。更に、MEMS技術を用いて、多数の小型プラズマ・アクチュエータを製作し、アクチュエータ群により制御壁を敷き詰めることにより、上述の空間周期制御入力を模擬し、その制御効果の実験的検証を

試みた。その結果、数値計算で仮定された制御入力と同等の入力を流体に付与できることを示した (Okouti et al., 2010)。

伝熱と摩擦の同時制御に関しては、運動量とエネルギーの支配方程式、境界条件に立ち返り、摩擦と伝熱の非相似を生み出す因子を整理した (Kasagi et al., 2011)。その結果、平均の方程式に基づく制御と変動量の方程式に基づく制御を提案した。また、後者については、準最適制御理論に基づく制御入力は、主流方向進行波の性質を持つことを示し、その知見に基づきプレディターミンド制御則を提案した (Hasegawa & Kasagi, 2011)。また、ポワズイユ+等温度差、ポワズイユ+様発熱、クエット+等温度差、どの場合でも進行波状吹出し・吸込みによって伝熱と摩擦の非相似制御が可能であることが数値シミュレーションにより分かった (Higashi et al., 2010)。

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 8 件)

1. Fukagata, K., Sugiyama, K. & Kasagi, N., On the lower bound of net driving power in controlled duct flows, *Physica D*, 査読有, Vol. 238, pp. 1082-1086, 2009
2. Hoepffner, J. & Fukagata, K., Pumping or drag reduction?, *Journal of Fluid Mechanics*, 査読有, Vol. 635, pp. 171-187, 2009
3. 小林道央, 深瀉康二, 笠木伸英, 大規模乱流構造の制御による摩擦抵抗低減効果に関する検討, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 75B, pp. 635-641, 2009.
4. Frohnapfel, B., Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Friction drag reduction through damping of the near-wall spanwise velocity fluctuation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 査読有, Vol. 31, pp. 434-441, 2010.
5. Mamori, H., Fukagata, K. & Hoepffner, J., The phase relationship in laminar channel flow controlled by travelling wave-like blowing or suction, *Physical Review E*, 査読有, Vol. 81, Art. 046304, 2010.
6. 焼野藍子, 長谷川洋介, 笠木伸英, 時空間周期性を有する壁乱流プレディターミンド制御の摩擦抵抗低減機構, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 76B, pp. 356-361, 2010.
7. Kasagi, N., Hasegawa, Y., Fukagata, K. & Iwamoto, K., Control of turbulent transport: less friction and more heat transfer, *ASME Journal of Heat Transfer*, 査読有, in print.
8. Kametani, Y. & Fukagata, K., Direct numerical simulation of spatially developing turbulent boundary layer with uniform blowing or suction, *Journal of Fluid Mechanics*, 査読有, accepted.

9. Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Dissimilar control of momentum and heat transfer in a fully developed turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 査読有, accepted.

[学会発表] (計 29 件)

1. Frohnapfel, B., Lammers, P., Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Flow control by small scale turbulence modifications in the near-wall region, 22nd Int. Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Aug. 24 2008, Adelaide.
2. Fukagata, K., Kobayashi, M. & Kasagi, N., Manipulation of the large-scale structure in wall turbulence for turbulent wall-friction-drag reduction, 7th Int. Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurement, June 4, 2008, Cyprus.
3. Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Effects of spanwise wall disturbance on heat and momentum transfer in turbulent channel flow, 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Oct. 13, 2008, Sapporo.
4. Mamori, H., Fukagata, K., Hoepffner, J. & Obi, S., Linear analysis of drag reduction in channel flow by wall heating/cooling, 7th EUROMECH Fluid Mech. Conf., July 14, 2008, Manchester.
5. 焼野藍子, 長谷川洋介, 笠木伸英, 時間的周期性を有する制御入力の壁乱流構造に与える影響, 第 22 回数値流体力学シンポジウム, 2008 年 12 月 17 日, 東京.
6. 守裕也, 深瀉康二, オブフナージェローム, 小尾晋之介, 平行平板間流における進行波状体積力による摩擦抵抗低減効果の線形解析, 日本流体力学会 2008, 2008 年 9 月 4 日, 神戸.
7. Frohnapfel, B., Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Friction drag reduction through damping of the near-wall spanwise velocity fluctuation, 6th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009 年 6 月 22 日-24, Seoul
8. Yakeno, A., Hasegawa, Y. & Kasagi, N., Spatio-temporally periodic control for turbulent friction drag reduction, 6th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009 年 6 月 22 日-24, Seoul.
9. Mamori, H., Fukagata, K., Hoepffner, J. & Obi, S., Drag reduction in channel flow by traveling wave-like surface heating/cooling, 6th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009 年 6 月 22 日-24, Seoul.
10. Souma, A., Iwamoto, K. & Murata, A., Experimental investigation of pump

- control for drag reduction in pulsating turbulent pipe flow, 6th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009年6月22日-24, Seoul.
11. Okochi, S., Kasagi, N., Suzuki, Y. & Ito, S., Development of micro plasma actuator for active flow control, 7th World Conf. Exp. Heat Transfer, Fluid Mech. and Thermodynamics, 2009年6月28日-7月3日, Krakow.
 12. Iwamoto, K., Active pump control of turbulent flow for drag reduction (招待講演), Research Institute for Mathematical Sciences Workshop, Mathematics and Physics across the Diversity of Turbulence Phenomena, 2009年7月9日, 東京
 13. Kasagi, N., Hasegawa, Y. & Fukagata, K., Toward cost-effective control of wall turbulence for skin friction drag reduction (招待講演), 12th Euromech European Turbulence Conference, 2009年9月7-10日, Marburg.
 14. Frohnappfel, B., Hasegawa, Y., Kasagi, N. & Große, S., Estimation of the spanwise wall shear stress based on upstream information for wall turbulence control, 12th Euromech European Turbulence Conference, 2009年9月7-10日, Marburg.
 15. 深湯 康二, 乱流摩擦抵抗低減のためのフィードバック制御システム (招待講演), 日本機械学会 2009 年度年次大会, ワークショップ「流体関連機器研究のパラダイムシフトはできるか? ~研究・開発成功へのシナリオ~, 2009年9月16日, 盛岡
 16. Kametani, Y., Fukagata, K. & Obi, S., Direct numerical simulation of traveling wave control in spatially developing turbulent boundary layer, The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, 2009年10月20日-22日, Jeju.
 17. Iwamoto, K., Morino, Y. & Murata, A., Direct numerical simulation for drag reduction by pulsating turbulent pipe flow, The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, 2009年10月20日-22日, Jeju
 18. Fukagata, K., Evolutionary optimization of a compliant surface for turbulent friction drag reduction (招待講演), 2nd Int. Workshops on Advances in Computational Mechanics, 2010年3月29-31日, 横浜
 19. Kasagi, N., Hasegawa, Y., Fukagata, K., Iwamoto, K., Control of Turbulence Transport -Less Friction and More Heat Transfer- (招待講演), 14th Int. Heat Transfer Conference, 2010年8月8-13日, Washington
 20. Hasegawa, Y., Kasagi, N., Dissimilar Control of Momentum and Heat Transfer in Turbulent Channel Flow, 8th Euromech Fluid Mechanics Conf. (EFMC8), 2010年9月13-16日, Bad Reichenhall
 21. Frohnappfel, B., Hasegawa, Y., Kasagi, N., Flow Control for Skin Friction Drag Reduction based on Sensing of the Streamwise Wall-Shear Stress, 8th Euromech Fluid Mechanics Conf. (EFMC8), 2010年9月13-16日, Bad Reichenhall
 22. Kametani Y., Fukagata, K., Numerical simulation of friction drag reduction control in spatially developing boundary layer, 8th Euromech Fluid Mechanics Conf. (EFMC8), 2010年9月13-16日, Bad Reichenhall
 23. Frohnappfel, B., Stroh, A., Hasegawa, Y., Kasagi, N., Feedback Control of Wall Turbulence for Drag Reduction with Finite Spatial and Temporal Resolution American Physical Society, 58th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, 2010年11月21-23日, Long Beach
 24. Yakeno, A., Hasegawa, Y., Kasagi, N., Interpretation of the Optimal Frequency for Skin Friction Drag Reduction with Spanwise Wall-Oscillation Control, 8th Int. ERCOFTAC Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM8), 2010年6月9-11日, Marseille
 25. Okochi, S., Hasegawa, Y., Kasagi, N. and Suzuki, Y., Active Control of Near-Wall Turbulence with Periodic Forcing by Plasma Actuator, 8th Int. ERCOFTAC Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM8), 2010年6月9-11日, Marseille
 26. 中西 李緒, 守 裕也, 深湯 康二, 進行波状壁面変形を用いたチャネル乱流の再層流化, 日本機械学会第 88 期流体工学部門講演会, 2010年10月30日-31日, 米沢
 27. 村井 泰仁, 深湯 康二, プラズマアクチュエータを用いた進行波状吹出しによる乱流摩擦抵抗低減の数値シミュレーション, 日本機械学会第 88 期流体工学部門講演会, 2010年10月30日-31日, 米沢
 28. 亀谷 幸憲, 深湯 康二, 空間発達乱流境界

層における壁面加熱による摩擦抵抗低減の数值シミュレーション, 日本機械学会第88期流体工学部門講演会, 2010年10月30日-31日, 米沢

29. Higashi, K., Mamori, H., Fukagata, K., Simultaneous control for friction drag reduction and heat transfer augmentation by traveling wave-like blowing/suction, 7th Int. Conf. on Flow Dynamics, 2010年11月1日-3日, Sendai

[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

http://www.thtlab.t.u-tokyo.ac.jp/users/hasegawa/active_control/index-j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠木 伸英 (KASAGI NOBUHIDE)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 80107531

(2) 研究分担者

鈴木 雄二 (SUZUKI YUJI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 80222066
深淵 康二 (FUKAGATA KOJI)
慶応義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80361517
岩本 薫 (IWAMOTO KAORU)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 50408712
長谷川 洋介 (HASEGAWA YOSUKE)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 30396783

(3) 連携研究者

なし