

進行波状吹出し・吸込みを用いた 摩擦抵抗低減と伝熱促進の非相似制御¹

Dissimilar control for friction drag reduction and heat transfer augmentation
by traveling wave-like blowing and suction

学 東 孝祐 (慶大理工) 正 守 裕也 (慶大院)
正 深淵 康二 (慶大理工) 正 小尾 晋之介 (慶大理工)

Kosuke HIGASHI, Keio University, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa
Hiroya MAMORI, Keio University, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa
Koji FUKAGATA, Keio University, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa
Shinnosuke OBI, Keio University, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa

Key Words: Dissimilar control, Friction Drag Reduction, Heat Transfer Augmentation

1 背景・目的

近年エネルギーの有効利用が求められている．流体抵抗のうち，ガスタービンや熱交換器では大部分が摩擦抵抗によるものであると言われており，問題になっている．

Fukagata et al.[1] は平行平板間流れにおいて無次元化された摩擦抵抗の層流値からの増分 (ΔD) が

$$\Delta D = \frac{3}{2} \text{Re} \int_{-1}^1 (-\overline{u'v'})(-y)dy, \quad (1)$$

で表されることを導いた．ここで Re は中心速度およびチャンネル半幅で定義されたレイノルズ数， $-\overline{u'v'}$ は無次元化されたレイノルズせん断応力である．この知見をもとに，Min et al.[2] は進行波状吹出し・吸込みにより摩擦抵抗が低減できることを発見した．また，Fukagata et al.[3] は等温度差の平行平板間流れにおけるヌセルト数の層流値からの増分 (ΔNu) が

$$\Delta \text{Nu} = \frac{4}{3} \text{RePr} \int_{-1}^1 (-\overline{v'T'})dy, \quad (2)$$

となることを導いた．ここで Pr はプラントル数， $-\overline{v'T'}$ は無次元化された熱流束である．

壁面せん断応力と壁面熱流束には主流方向速度 u と温度 T の壁面勾配で表されるという相似性があり，また，ナビエ・ストークス式 (以下 N-S 式) とエネルギー式においても対流項および拡散項の u と T に関して相似性があるため，非相似な制御が困難となっている．

式 (1)，(2) を比較すると ΔD は $-\overline{u'v'}$ の重み付き積分で，一方 ΔNu は $-\overline{v'T'}$ の単なる積分で表されるため， $-\overline{u'v'}$ と $-\overline{v'T'}$ の分布を変えることで非相似制御の可能性が示される．本研究では，進行波状吹出し・吸込みにより二次元平行平板間流における摩擦抵抗低減と伝熱促進の同時達成を目指す．その際の制御効果については線形解析および式 (1)，(2) を用いて評価する．

2 解析手法

Fig. 1 に解析対象である二次元平行平板間流れを示す．この系はチャンネル半幅 δ ，中心速度 U_0 ，壁面間の温度

差 ΔT を用いて無次元化されている．基礎流れはポアズイコ流れとし，制御入力として，両壁面に進行波状吹出し・吸込み (v_w) を与える．連続の式，N-S 式，エネルギー式は壁面進行波とともに動く座標系では定常であると仮定する [4]．連続の式，N-S 式に $u = U + u'$ ， $v = v'$ ， $p = P + p'$ (ここに U, P は基礎流れ， u', v', p' は一次攪乱とする) を代入し，二次攪乱を無視すれば線形攪乱方程式が得られる．さらに x 方向にフーリエ変換， y 方向にチェビシェフ選点法 [5] で離散化すると

$$\mathbf{A}\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{b} \quad (3)$$

と，行列で表される．ここに \mathbf{A} はシステム行列， $\hat{\mathbf{q}}$ はフーリエ係数ベクトル， \mathbf{b} は境界条件を含むベクトルである．解 $\hat{\mathbf{q}}$ は式 (3) に左から \mathbf{A} の逆行列をかけることで求まり，逆フーリエ変換から攪乱 u', v', p' を得る [6]．この速度成分と式 (1) より ΔD が計算される．

次に，エネルギー式を二次精度中心差分で空間離散化し，反復法により定常解を求めることでこの速度場における温度場 T を求めた．温度の攪乱 T' は流れ方向の平均値 \bar{T} からのずれとして得られ，式 (2) から ΔNu が計算される．エネルギー効率 η を次のように定義する．

$$\eta = \frac{\text{Nu}/W}{\text{Nu}_0/W_0} \quad (4)$$

ここで， W は無次元化された消費エネルギー， Nu_0, W_0 はそれぞれ非相似制御時における値である． $\eta > 1$ の時，制御なしの場合より高い伝熱効率が得られる．

3 解析結果

Min et al.[2] の結果と同様に， $c < 0$ において， $\Delta D < 0$ となることから摩擦抵抗低減は上流方向進行波により達成されることが確認できた．一方， c によらず $\Delta \text{Nu} > 0$ であり，Bewley & Ziane[7] の理論的境界が示唆するように伝熱は制御を加えると常に促進した．

Fig. 2 に c と η の関係を示す．エネルギー効率は $-1 < c < -0.2$ のときに $\eta > 1$ となり，制御を加える前に比べて高い効率が得られる．また， $c = -0.285$ で効率は

最大値 ($\eta = 1.43$) であることがわかった。これは主に消費エネルギーが最小値となるためである。以下ではこの場合について詳述する。

Fig. 3 に壁面垂直方向のレイノルズ応力と熱流束分布を示す。Fig. 3 と式 (1), (2) より、摩擦抵抗低減は壁面付近で重み付きレイノルズせん断応力が負になっていることが要因となっており、また、伝熱促進は壁面付近での熱流束の増加が要因となっていることがわかる。

重み付きレイノルズせん断応力と熱流束の x 方向への分布を見るために、Fig4 に $-u'v'$ と $-v'T'$ の空間分布を示す。壁面付近での $-u'v'$ が上壁面では負の領域が、下壁面では正の領域が広がっており、これが抵抗低減に寄与しており、また、 $-v'T'$ では両壁面で正の領域が広がっており、これが伝熱促進に寄与している。

Fig. 5 に u', v', T' の分布を示す。 u' と v' の位相差はおよそ 90 度であるが、壁面付近ではそこから u' の位相進みが発生することにより $-u'v'$ に寄与していることがわかった。 v' と T' でも同様に位相差、壁面付近での T' の位相進みがあり、 $-v'T'$ に寄与している。また、高次の波数により T' の分布は不均一になっている。

4 結論

摩擦抵抗は上流方向への進行波を加えると低減し、伝熱は進行波の向きにかかわらず促進されることがわかった。よって、本条件下では摩擦抵抗低減と伝熱促進の非相似制御が可能であることがわかった。また、エネルギー効率には最大値があり、それは消費エネルギーが最小値をとるためであることがわかった。

参考文献

- [1] K. Fukagata et al., Phys. Fluids. **14**, L73-L76 (2002).
- [2] T. Min et al., J. Fluid Mech. **558**, 309-318 (2006).
- [3] K. Fukagata et al., Proc. TSFP-4 (2005), pp. 307-312.
- [4] 棚橋隆彦, 理工図書 連続体の力学 (2) (1986), pp. 214-216.
- [5] J. A. C. Weidmema & S. C. Reddy, ACM Tran. Math. Software **26**, 465-519 (2000).
- [6] 守裕也ら 日本流体力学会年会 (2008), Paper 33232.
- [7] T. R. Bewley & M. Ziane, IEEE Trans. Aut. Control **52**, 2118-2128 (2007).

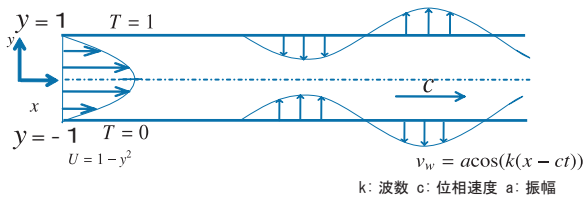


Fig. 1: The coordinate system and the traveling-wave-like control input.

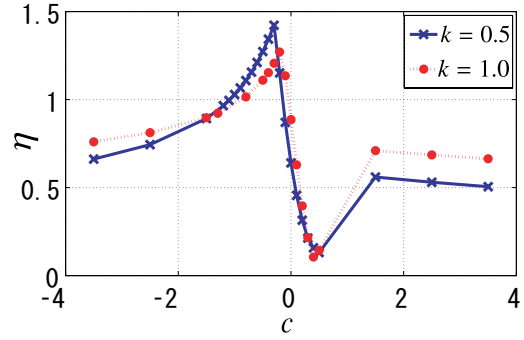


Fig. 2: The efficiency, η , by the traveling wave- as a function of wavespeed, c .

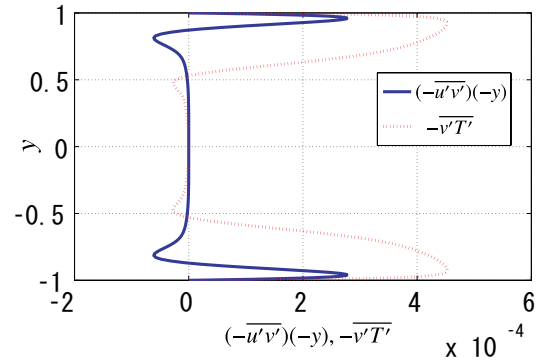


Fig. 3: The y weighted Reynolds shear stress and the turbulent heat flux at $k = 0.5$ and $c = -0.285$.

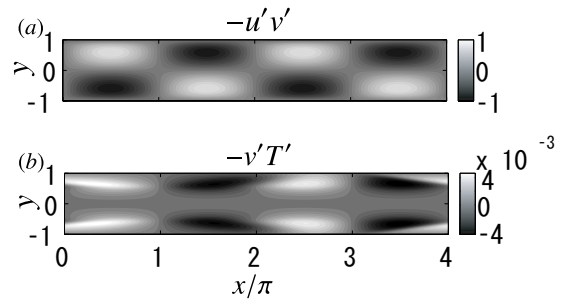


Fig. 4: Contours at $k = 0.5$ and $c = -0.285$; (a) $-u'v'$; (b) $-v'T'$.

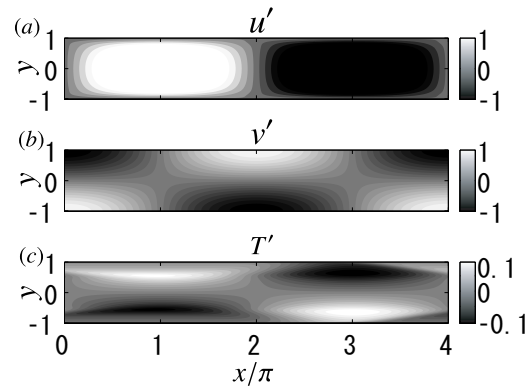


Fig. 5: Contours at $k = 0.5$ and $c = -0.285$; (a) u' ; (b) v' ; (c) T' .