

等温度差チャネル流における進行波状吹出し・吸込みを用いた 摩擦抵抗低減と伝熱促進の同時制御

Simultaneous control for friction drag reduction and heat transfer augmentation by traveling wave-like blowing/suction in a constant-temperature -difference channel flow

伝学 *東 孝祐 (慶大院) 守 裕也 (慶大院)
機正 深潟 康二 (慶大) 伝正 小尾 晋之介 (慶大)

Kosuke HIGASHI¹, Hiroya MAMORI¹, Koji FUKAGATA¹ and Shinnosuke Obi¹
¹Dept. Eng., Keio Univ., 3-14-1, Hiyoshi, Yokohama 223-8522

We investigate the possibility of simultaneous control for friction drag reduction and heat transfer augmentation by traveling wave-like blowing/suction in a constant-temperature-difference channel flow. It is found by a linear analysis that downstream traveling waves can reduce the skin-friction drag and traveling waves can always augment the heat transfer. The heat transfer efficiency is maximized when the input energy is minimized. The simultaneous control effect in a turbulent channel flow is also verified by means of direct numerical simulation.

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

1. 背景・目的

エネルギー有効利用の一つの手段として流体抵抗の低減が考えられる。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いる。

完全発達した平行平板間流れにおいては、無次元化された摩擦抵抗の層流値 ($D_{lam} = 2$) からの増分 (ΔD) は

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

と表される[1]。ここで Re は中心速度およびチャ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、 y はチャネル中心からの壁垂直方向座標である。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層流値以下になることを発見した。また、Bewley & Ziane[3]は等温度差条件での平行平板間流れにおいて、制御を加えると伝熱は常に促進することを数学的に証明した。さらに、Fukagata et al.[4]は等温度差平行平板間流れにおけるヌセルト数の層流値 ($\text{Nu}_{lam} = 1$) からの増分 (ΔNu) が

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

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 (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、通常は非相似な制御が困難となっている[5]。

Min et al.[2]の制御を用いると摩擦抵抗は層流値以下になり、Bewley & Ziane[3]によると、いかなる制御によってもヌセルト数は常に層流値以上になる。即ち、Min et al.[2]の制御を行うことで摩擦抵抗を低減し、伝熱を促進するという非相似制御が達成できると考えられる。

そこで、本研究では進行波状吹出し・吸込みにより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。さらに三次元乱流における直接数値シミュレーション (DNS) により非相似制御効果を確認する。

2. 解析手法

Figure 1 に解析対象である平行平板間流れを示す。この系はチャネル半幅 δ 、中心速度 U_0 、壁面間の温度 ΔT で無次元化されている。また、 u, v, p は x 方向、 y 方向速度、および圧力である。基礎流れはポワズイユ流れとし、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[6]。連続の式、N-S 式の速度と圧力の一次攪乱を微小、二次の攪乱成分を無視すると線形攪乱方程式が得られる。さらに x 方向に周期的であるため、フーリエ変換を施し、 y 方向にチェビシェフ選点法[7]を用いて離散化し、

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

と行列的に表される。ここに \mathbf{A} はシステム行列、 $\hat{\mathbf{q}} = (\hat{u}, \hat{v}, \hat{p})$ 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[8]。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。

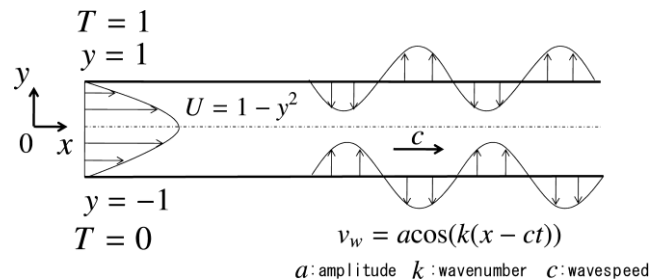


Fig. 1: The coordinate system and the traveling wave-like control input.

三次元乱流に対しては DNS コード[9][10]を用いた制御効果の評価を行った。連続の式、および N-S 式をスタガード格子系エネルギー保存二次中心差分法[11]を用いて空間離散化し、3 次省メモリ型ルンゲクッタ、クランクニコルソン法を用いて時間微分した。速度・圧力カップリングには Δ 型フラクショナル・ステップ法を用いている。求められた速度場、温度場より ΔD と ΔNu はそれぞれ式(1), (2)を用いて計算される。

また、エネルギー効率 η を次のように定義する。

$$\eta = \frac{Nu/W}{Nu_0/W_0} \quad (4)$$

ここに 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ことを表している。

3. 解析結果

Figure 2 にレイノルズ数 $Re = U_0\delta/\nu = 2000$ の場合の波数 $k = 0.5, 1.0$ 時の摩擦抵抗の増分 ΔD とヌセルト数の増分 ΔNu を示す。摩擦抵抗は Min et al.[2]の結果と同様に進行波の位相速度 $c < 0$ 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、伝熱は進行波の位相速度 c によらず $\Delta Nu > 0$ となり、Bewley & Ziane[3]の理論的限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。

また、摩擦抵抗は壁面付近で重み付きレイノルズせん断応力が負の値をとることで低減し、伝熱は壁面近傍で温度速度相関が正の値をとることで促進することがわかった。

エネルギー効率は $-1 < c < -0.2$ の時に $\eta > 1$ 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。

Figure 3 にレイノルズ数 $Re = U_0\delta/\nu = 4600$ の場合の DNS

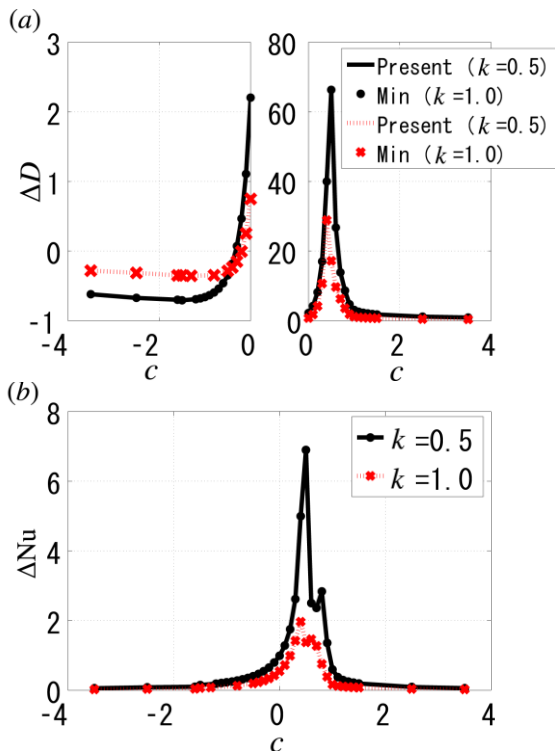


Fig. 2: Control effect: (a) drag increment, ΔD ; (b) heat transfer increment, ΔNu (linear analysis at $Re = 2000$).

における摩擦抵抗の増分 ΔD とヌセルト数の増分 ΔNu を示す。乱流下においても摩擦抵抗は進行波の位相速度 $c < 0$ において、制御を加えると非制御の時よりも低減した。また、伝熱は進行波の位相速度 c によらず、制御を加えると常に促進することが確認できた。よって、三次元乱流においても非相対制御効果を確認できた。

4. 結論

等温度差チャンネル流において、進行波状吹き出し・吸込みによる摩擦抵抗低減と伝熱促進の非相対制御に関する数値解析を行った。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対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 $k = 0.5, c = -0.285$ 時に最大値 ($\eta = 1.43$) 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。さらに、DNS でも同様の非相対制御効果が確認できた。

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] T. R. Bewley & Ziane, IEEE Trans. Aut. Control **52**, 2118-2128 (2007).
- [4] K. Fukagata et al., Proc. TSFP-4 (2005), pp. 307-312.
- [5] M. Yokoo et al. Proc. THMT-3 (2002), pp. 949-956.
- [6] 棚橋隆彦, 理工図書 連続体の力学(2) (1986), pp. 214-216.
- [7] J. A. C. Weidmaman & S. C. Reddy, ACM Trans. Math. Software **26**, 465-519 (2000)
- [8] 守裕也ら 日本流体力学会年会 (2008), Paper 33232.
- [9] K. Fukagata & N. Kasagi, J. Comput. Phys. **181**, 478-498 (2002)
- [10] K. Fukagata et al. Phys. Fluids **18**, 051703 (2006).
- [11] 梶島岳夫, 日本機械学会論文集(B編), **65**, 633, 103-108 (1999).

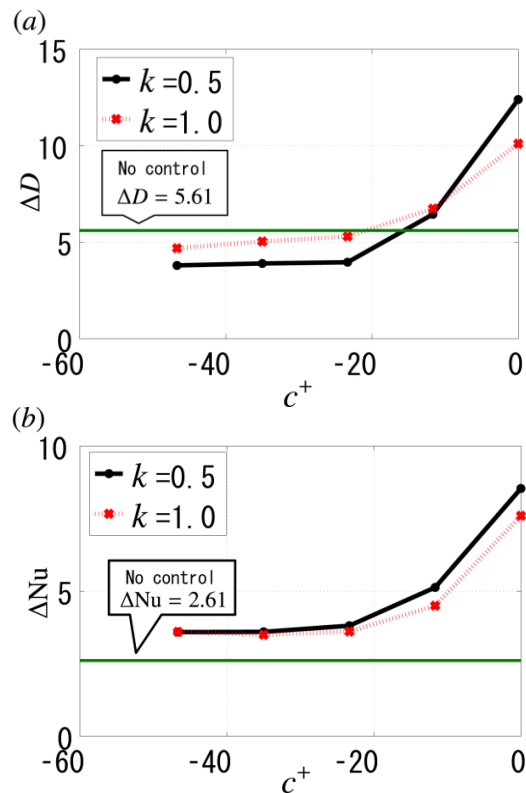


Fig. 3: Control effect: (a) drag increment, ΔD ; (b) heat transfer increment, ΔNu (DNS at $Re = 4600$).