

衝突平面噴流群によるフィードバック熱伝達制御

Feedback Control of Heat Transfer by Impinging Planar Two Jets

80221948 片山智章(Tomoaki Katayama) Supervisor 菱田公一(Koichi Hishida)

1. 緒論

衝突噴流は加熱・冷却・乾燥といった幅広いプロセスで用いられており^[1]、混合促進や熱伝達促進・制御を目的とした数多くの研究が行なわれてきている^[2]。これまでの研究では流れ場に円柱や多孔板を挿入し渦構造を変化させ熱伝達促進を図った受動制御や、音波・MEMS を用いて渦構造操作・混合制御を図った能動制御が試みられてきた。しかし、以上の噴流制御の多くは単独噴流を用いたものであり、実際工業上用いられている噴流群を対象とし熱伝達制御を行った研究例は見当たらない。また、能動制御においては一定周期の擾乱を流動場に与え続けるものが見られる程度であり、瞬時の流れ場・衝突壁面上の情報を基に入力を変化させるフィードバック制御を行った研究例はほとんど無い。そこで本研究では衝突噴流群を対象として噴流間の相互干渉を利用し、個々の噴流に微小擾乱を付加することで、衝突壁面温度のフィードバック制御システムの確立を目指す。

2. 実験装置および実験条件

Fig.1 に実験装置の概略及び座標系を示す。作動流体である水は間隔 $s(=36\text{mm})$ 離れた2つの二次元ノズル($B=10\text{mm}$, アスペクト比 10)から二次元噴流群として噴出され、下流の加熱衝突平板に衝突する。流動場には二次元性を維持するために仕切り版(side plate)が設置されている。加熱平板には厚さ $20\mu\text{m}$ のステンレス箔を短冊状に貼り付け、直流通電加熱によって等熱流束の伝熱面とした。加熱平板の中央のステンレス箔裏面に、熱電対をよどみ点から 10mm 間隔で計 11 箇所設置し衝突壁面の温度計測を行った。主流の噴出の際にはノズルの出口両端に取り付けられた幅 $p(=0.5\text{mm})$ の微細なスリットから微量の流体を噴出し、励起を行った。励起にはステッピングモータを用いており、回転運動を上下運動に変換した後、シリンジ及びチューブを介して励起用スリットへと伝え、主流に対し流体の噴出・吸込を行なった。この4つのステッピングモータはD/Aコンバータからの電圧により、等速でそれぞれ独立して操作される。励起パターンは全てのスリットから流体の噴出・吸込を行なう全励起(Full excitation mode)と左右片側の噴流のみ励起を行なう片側励起(Single-sided excitation mode)の計3パターンで行なった。本研究の実験条件を Table.1 に示す。ストローハル数 $St(=f_{ex}BV_0)$ は励起周波数 f_{ex} とノズル出口平均流速およびノズル幅を代表値として求めた。励起強度 $A_{ex}(=p \cdot M_{ex}B \cdot M_0)$ は噴流主流の運動量 M_0 と主流を流していない場合にスリットより噴出する流れの運動量 M_{ex} の比として定義した。速度計測にはPIV(Particle Image Velocimetry)を用いた。熱伝達率の評価にはヌセルト数 $Nu_B(=q_w B / \lambda(T_w - T_b))$ を用いた。水の熱伝導率 λ 、熱流束 q_w は定数であり、熱電対により得られた壁面温度と周囲流体の温度差 $(T_w - T_b)$ から算出した。

3. 励起による熱伝達特性及び流動構造の変化

励起パターンによる熱伝達率分布の変化を Fig.2 に、全励起時の位相平均速度ベクトル図を Fig.3 に示す。Fig.3 より励

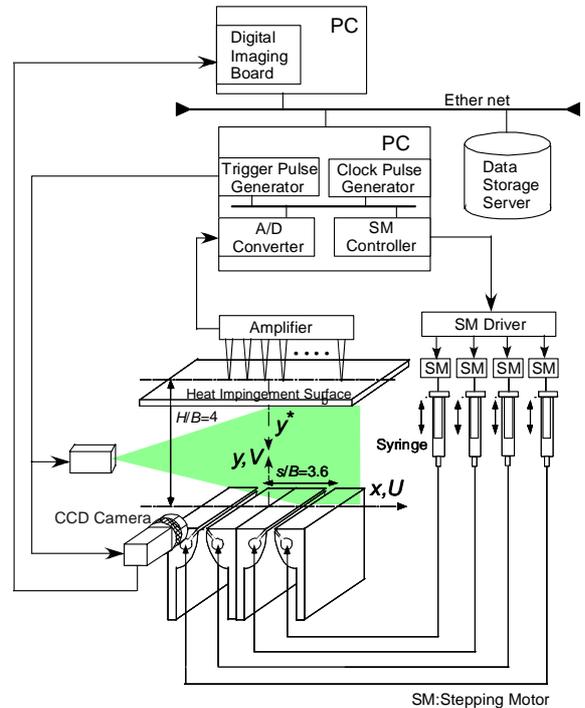


Fig.1 Experimental apparatus and coordinate system

Table 1 Experimental conditions.

Nozzle spacing	s/B	3.6
Reynolds number	Re_B	500
Nozzle-to-plate distance	H/B	4
Wall heat flux	q_w	4.8 kW/m^2
Strouhal number	St	$0.22, 0.67, 1.0$
Excitation amplitude	A_{ex}	$4.8 \times 10^{-3} (st=0.22)$
		$14.5 \times 10^{-3} (st=0.67)$
		$24.2 \times 10^{-3} (st=1.0)$

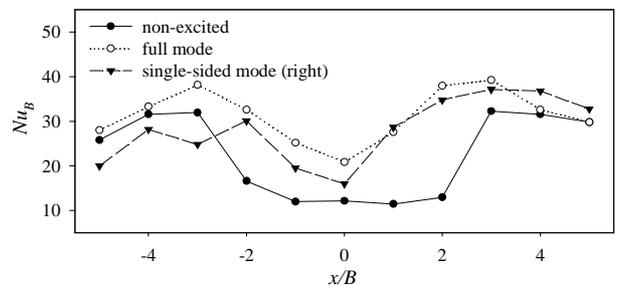


Fig.2 Effect of excitation pattern on the local Nu_B distributions

起によりノズル近傍において周期的に大規模な渦構造が生成され再循環領域で滞留している流体を再度、主流へと取り込んでいることが確認される。また外側せん断層の渦構造は壁噴流に沿って輸送される。Fig.2 より非励起時の局所ヌセルト

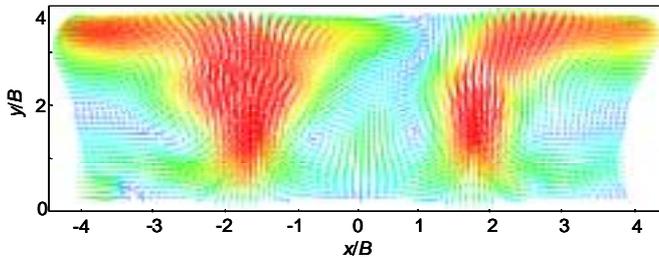


Fig.3 Phase averaged velocity vector maps under full excitation mode

数はノズル直下よりやや外側の位置で極大値を、よどみ点で極小値を取る鞍状分布となる。壁面によって加熱された壁面噴流同士がよどみ点付近で衝突することにより、滞留が生じるために熱伝達が抑制され、鞍状の分布を形成する。全励起時には励起により生じた大規模渦が再循環領域に滞留した高温流体を排出するためヌセルト数の極大値の位置がやや内側へと移動している。また、励起により生成された渦は渦合体やエネルギー・カスケードにより大規模渦や小スケールの渦となり壁面に到達する。これらの渦が壁面近傍の温度境界層を剥離し、熱輸送を活発にするため非励起時に比べ全体的に熱伝達率は促進されている。片側励起時は励起の行われた噴流側において熱伝達が促進され、励起の行われていない噴流側では熱伝達が抑制されている。励起により大規模渦構造を伴った噴流が壁面に衝突後、壁面噴流(cross flow)となり、もう一方からの噴流が壁面に到達するのを妨げているため励起の行われていない噴流側で熱伝達が抑制される。

4. 時空間熱伝達率分布制御

4.1 制御系の構成

上記で得られた知見を基に壁面熱伝達率分布形状の制御を試みた。Fig.4 に制御アルゴリズムのブロック図を示す。制御の目標は壁面の温度を一樣することであり、目標温度を30とした。コントローラに壁面温度の目標値分布を与え、熱電対により得られた1秒間の移動時間平均壁面温度と、予め得られてある各励起パターンの熱伝達率から、励起により得られる壁面温度を予測し目標温度との誤差を算出した。制御の評価には熱伝対で計測した壁面温度各点の移動時間平均温度の二乗平均誤差の和を用い以下のように定義し、評価関数が減少するように制御を行った。

$$F = \sum_{i=0}^{11} \sqrt{(T_w - T_{tar})^2} \quad (T_w: \text{壁面温度} \quad T_{tar}: \text{目標温度})$$

4.2 制御結果

Fig.5 にフィードバック制御時(Feedback controlled)、一定入力の全励起のみ行った時(uncontrolled)の評価関数を示す。フィードバック制御時には定常偏差は残るものの、目標の壁面温度分布に収束していくことが確認される。これに対して全励起のみを行った場合では励起開始から15秒程度まではフィードバック制御時と同様に評価関数が減少しているがその後また目標温度分布から離れ、目標に収束せず大きな定常偏差が残っている。Fig.6 に実際の壁面温度分布を示す。励起開始から20秒まではどちらも同様に目標値分布に近づいていくが、その後一定入力の全励起のみ行った場合では壁面温度を目標値よりもさらに下げ続けるため目標値から離れ、評価関数が増加する。フィードバック制御時には励起のパターンを切り替えることで目標の壁面温度分布形状を維持している。Fig.2 より全励起時には比較的一様な熱伝達率分布形状が得られることが分かっているが、フィードバック制御を行うこ

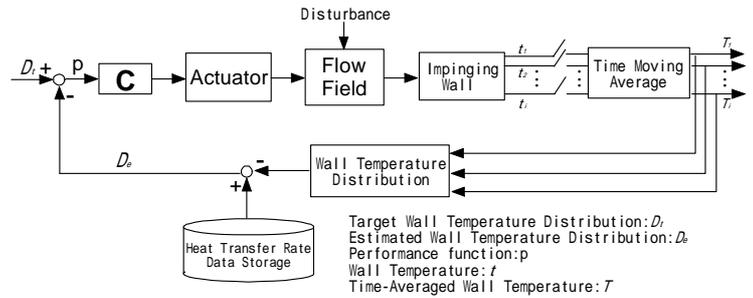


Fig.4 Block Diagram for the Control of the wall temperature

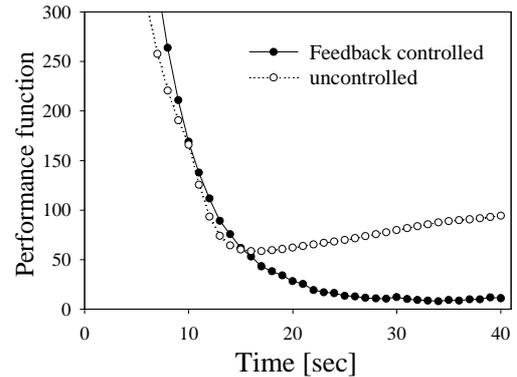
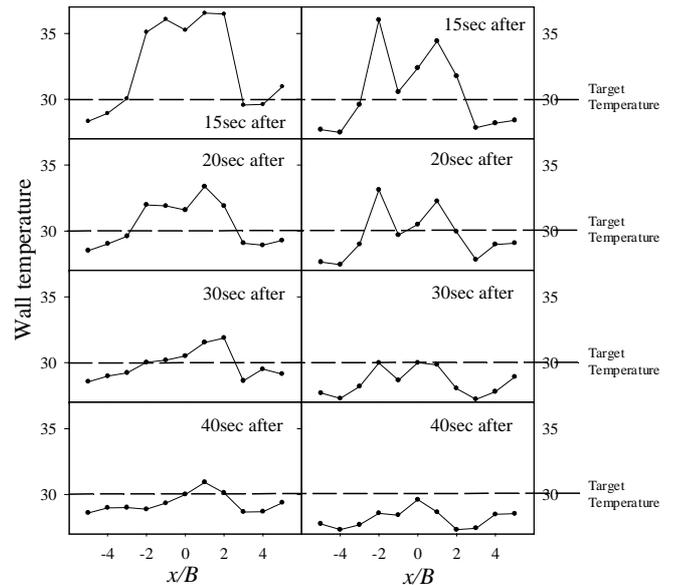


Fig.5 Time variation of performance function



(a) Feedback controlled (b) uncontrolled
Fig.6 Time series of wall temperature

とにより、さらに高い精度で目標温度分布に近い形状が得られた。

5. 結言

本研究の励起装置・方法は局所熱伝達の制御に有効であることが示された。壁面温度情報を基に、壁面熱伝達率分布のフィードバック制御を行った所、励起のみ行った場合に比べ2倍近い精度で所望の熱伝達率分布が得られた。本制御手法により局所熱伝達の時空間制御が可能であることが示された。

参考文献

[1] Martin, H., *Adv. Heat Transfer*, **13** (1977), 1.
[2] Viskanta, R., *Exp. Thermal & Fluid Sci.*, **6** (1993), 111.