

渦による伝熱制御

京大工学研究科 鈴木健二郎 (Kenjiro Suzuki)

1. 緒言

本稿では、流れ方向に回転軸を有する縦渦と流れに直交するスパン方向に回転軸を有するスパン方向渦の両者を取り上げて、それが対流熱伝達にいかなる影響を及ぼすか、その影響を通じてどのような対流熱伝達の制御が可能なのか、について論じることとする。

2. 運動量輸送および熱輸送の非相似性

最初に、以下の議論に現れる運動量輸送と熱輸送の非相似性について述べて置く。流れに何らかの人為的な変更を加える際に、運動量輸送速度と熱輸送速度に差異が現れることを非相似性と定義する。とくに、両者が互いに異なる方向に変化する場合、例えば一方が増大し、他方が減少する場合には、その非相似性を強い非相似性と呼ぶこととする。平板乱

流境界層中に、平板に平行に、しかし流れに直交する姿勢で円柱を挿入してかく乱を与える流れ系は、受動的に乱れを強化する一例として、また回復性乱流の一つの典型として、あるいは乱流プロモータを用いた伝熱促進法の一つとして関心が高い(1)-(3)のものであるが、同時に初めて輸送現象の非相似性が見出された系としても興味深いものである。すなわち、この系の円柱下流域 ($x > 0$) では、平板面における熱伝達率 h は円柱の挿入によって増大するが、逆に平板面の摩擦係数 C_f は円柱の挿入によって低下することが観察される(4)-(7)。その1例を図1に示した。図中の h_0 は、円柱を挿入しない場合の通常境界層における熱伝達率である。図に見られる非相似性は、速度場と温度場を別個に制御できる可能性を示唆すると同時に、圧力損失が小さく伝熱特性が良好な熱交換器を開発できる可能性をも示唆する点で、検討に値する現象であると考えられる。なお、かかる強い非相似性が発現する位置の壁近傍領域では、流れの平均特性が変化を受けるだけでなく、乱流構造にも顕著な変化が生じる。特筆すべきことは、8象限分析法(8)を応用して各乱流要素運動の寄与を調べた結果によると、それぞれが円柱の挿入によって均等に強化されるのではなくて、通常壁近傍領域の運動量輸送や熱輸送に支配的な寄与をするとされるスweepやエジェクション運動よ

りも、高温外向きインタラクションや低温壁向きインタラクションが選択的により顕著に強化される(7)ことである。重要なのは、スweepやエジェクション運動は運動量輸送と熱輸送に相似的に寄与するが、上の2種類のインタラクション運動は熱輸送に正、運動量輸送に負、の寄与をする点である。

3. スパン方向渦

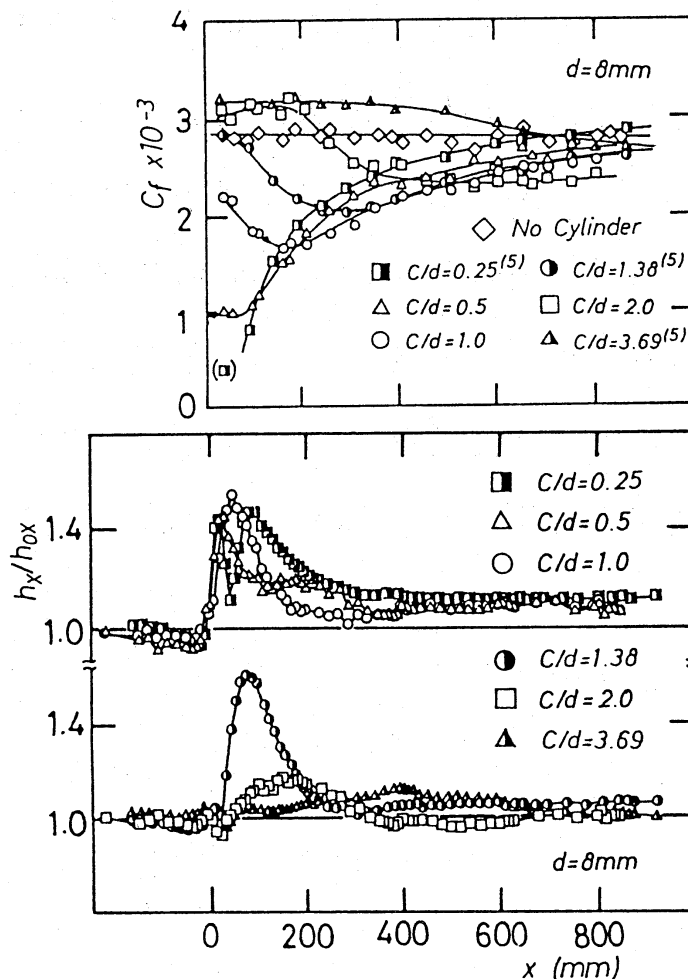


図1 円柱の挿入によって攪乱を与えた乱流境界層の摩擦係数と局所熱伝達率

カルマン渦が発生する点で、上の例と類似点があるチャンネル流中に角柱を挿入した系を取り上げる。ただし、問題を単純化するために、レイノルズ数は角柱を挿入しなければ定常な層流にとどまる範囲とする。この場合には、角柱から放出されるカルマン渦によって、その下流域には周期性の高い非定常流が現れる。この流れを2次元数値解析によって検討した。

角柱の下流域では、流れの非定常性によって伝熱促進が生じる。この流れ系では、角柱下流域において強い逆圧力勾配のもとでチャンネル壁に沿う高渦度層が剥離する。その下流端は、高渦度層から間欠的に千切れて孤立渦に発展する。この孤立渦はスパン方向渦の1種類であり、それはある区間にわたって渦度を弱めることなくチャンネル壁に沿って下流に移動するが、その際にその周りに流体の回転運動を誘起する。それはその下流域から孤立渦とチャンネル壁の間に新鮮な流体を巻き込む流体運動である。したがって、この孤立渦が通過する度に、各位置において壁近傍の流体温度勾配が大きくなる。すなわち、瞬間的な熱移動が促進される。この繰り返しによって時間平均としての伝熱特性も向上する。以上の伝熱面に及ぼす孤立渦の作用を洗濯効果⁽⁹⁾,⁽¹⁰⁾と呼ぶ。

図2に、断面内の平均流速で移動する座標から見た瞬間の

面摩擦係数は低下する。すなわち強い非相似性が瞬間的に実現される。スパン方向渦は、その洗濯効果を通じて伝熱促進の実現と非相似性の発現に有効である。

なお、この流れ系は、閉塞率が0.1以上であるとカルマン渦の交差運動が生じる(11)、(12)点でも興味深いものである。この交差運動は、先に述べた孤立渦と角柱から放出されるカルマン渦の一方とが、逆符号の渦度を有し、互いにチャンネル中心面を横切る成分を持つ速度で並進運動を行うことに基づく。このため、カルマン渦の交差運動は、孤立渦の発生と関連して生じる点で、上述した洗濯効果による伝熱促進と非相似性の発現と互いに相関する現象である。

類似した幾何形状の流れ系でレイノルズ数を20,000程度とした場合についても実験的検討を加えた(13)。レイノルズ数が高くなると、速度・温度信号中の不規則成分が顕著になり、記録された信号を直接処理しても内部流の場合にはインタラクション運動が選択的に強化されるか否かを判定するのは容易でない。そこで記録した信号にウェーブレット変換を施してカルマン渦の放出と同期する準周期成分を抽出し、同時に得られる位相情報を利用してそれから速度変動2成分と温度変動の平均的パターンを求めた。その結果、この場合にも先に指摘した2種類のインタラクション運動が重要な役割

を担っていることが明らかになった。すなわち、準周期性分はインタラクション運動を通じて非相似性を発現し、いっぽう不規則変動成分は輸送現象に相似的性質を付与するため、準周期成分の寄与をマスクする。この意味では、準周期成分と不規則成分を別々に取り扱う、したがってそのモデル化についても別個に取り扱う、ことが望ましい。

液体と気体の間で熱移動を行わせる熱交換器では、熱伝導率が小さい気体側の伝熱抵抗が液体側のそれよりかなり大きい。それゆえ、この種の熱交換器の総合伝熱性能を上げるには、気体側の伝熱性能を上げることが必要となる。その方策としては、(1) 拡大伝熱面(フィン)を使用する、(2) そのフィンの熱伝達の伝熱促進を図る、ことが挙げられる。フィンの伝熱促進のために、フィンを一定間隔ごとに分断するオフセットフィン等が使用される。このフィンでは、分断された各フィンの前縁から発達する薄い境界層の高い熱伝達すなわち境界層更新効果を利用する。

オフセットフィンの最小要素として3枚の薄板(フィン)を一定間隔で1列に並べた系(図3)を取り上げて、遷移レイノルズ数におけるその系の流れ場と温度場を2次元非定常数値解析によって解析した⁽¹⁴⁾。初段フィンの後流は、その中心面に垂直な方向に周期的に揺動する。そのため渦度の空

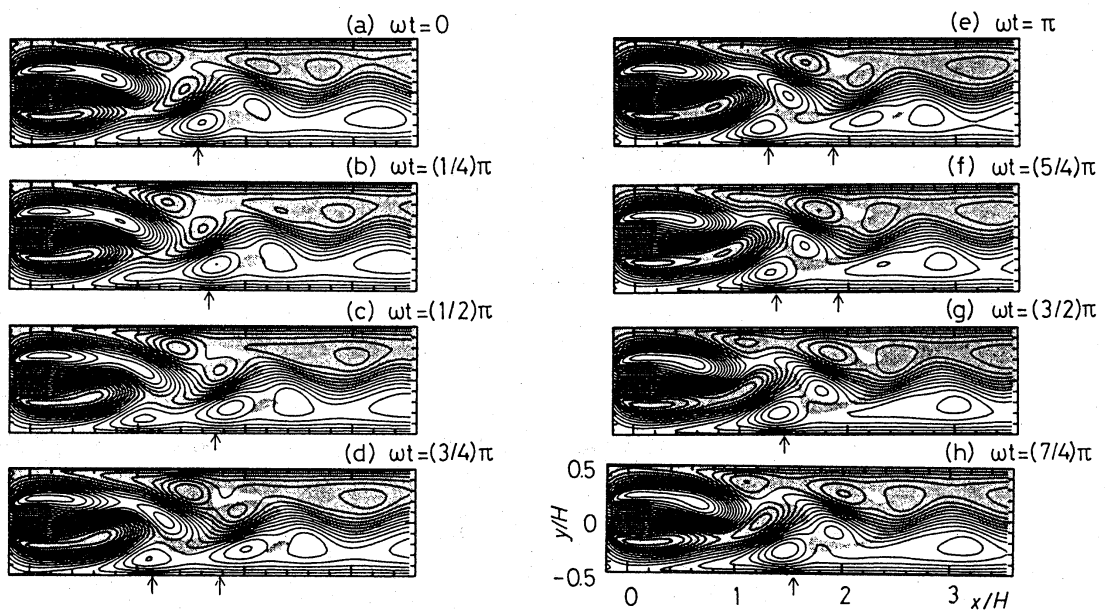


図2 瞬間の流線図（観察者は断面内平均速度で移動）

流線と瞬間ヌセルト数のピーク位置との関係を図示した。瞬間ヌセルト数のピーク位置の壁面近傍に、孤立渦により作られる回転運動（図では時計方向）が存在し、下流側から流体を巻き込んでいることが窺われる。この洗濯効果が有効に作用する瞬間には、壁近傍では流体の下流側からの巻き込みを引き起こす負の流速成分が平均流速に上乘せされ、そのため壁面上の速度勾配が低下する。したがって、その瞬間には壁

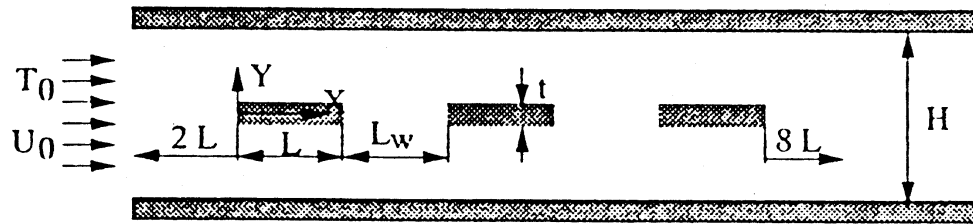


図3 3枚のインラインフィン要素

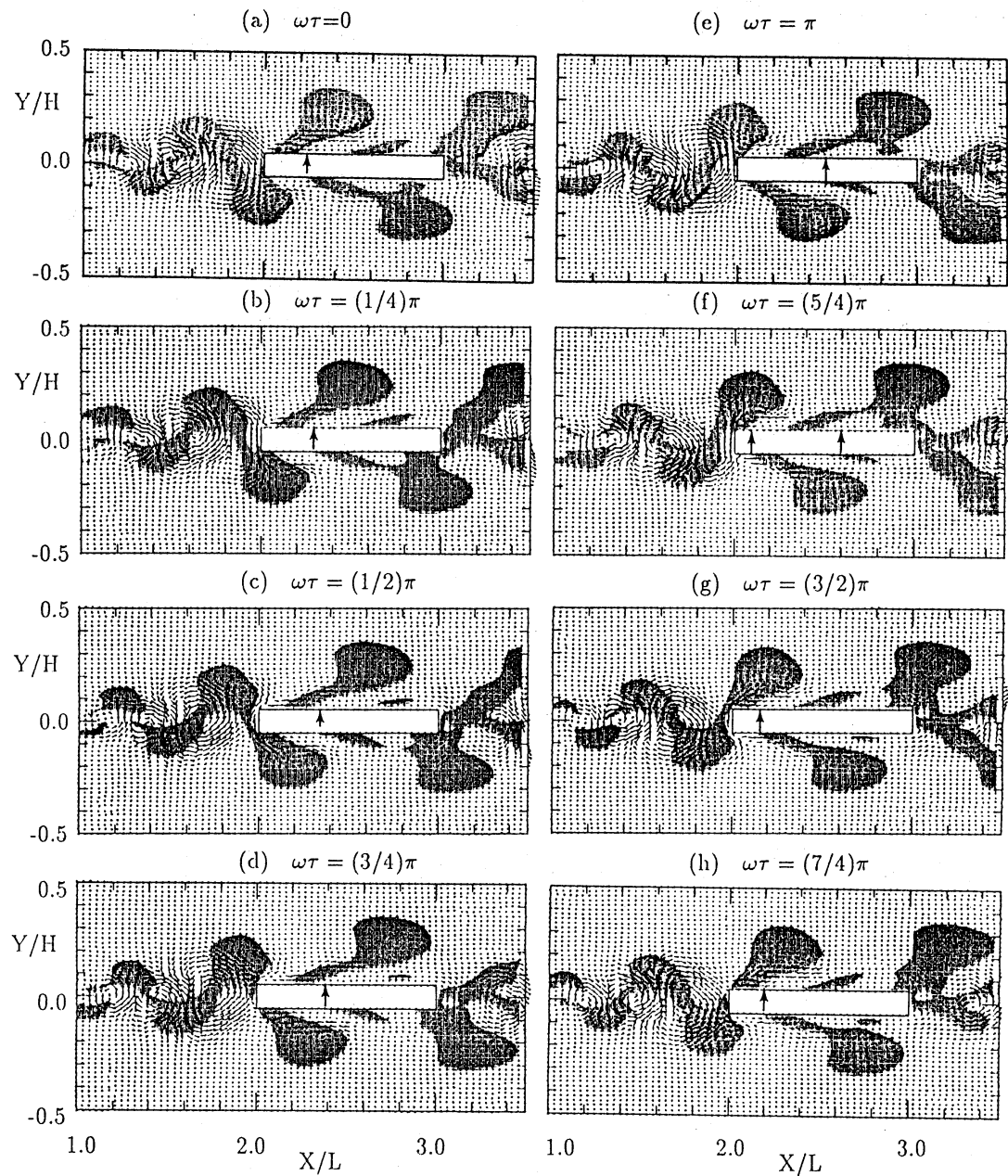


図4 フィン後流内の瞬間の変動速度場

間的不均一が起こり，それは交互に回転方向が異なる渦列に発展する．この様子は，瞬間の変動速度場をその速度ベクトル線図で示した図4で観察できる．図中の色の濃い部分は，瞬間温度が正の領域である．この渦列は，後流内の低速，高温の流体を主流中に排出し，主流の高速，低温の流体を後流内に巻き込むことによって，後流内の混合あるいはその発達を促進する(15)．このことは2段目フィンへの接近流の有効レイノルズ数を増大させ，また接近流と2段目フィンとの有効温度差をも増大させるので，2段目フィンの伝熱促進をもたらす．

いっぽう次々と2段目フィン前縁に到達する渦は，交互にフィンの両側に振り分けられ，それぞれのフィン側面に沿って下流に流れ去る．その際に前記の洗濯効果と同じ作用をそれぞれのフィン面に及ぼす．すなわち，この場合にも渦が通過する度にフィン面各部に伝熱促進と輸送現象の非相似性が発現する．フィン前縁に近い位置のフィン面近傍で，速度・温度信号をサンプルし，それに象限分析法を適用したところ，最初に紹介した攪乱を与えた平板乱流境界層での測定結果と同様に，低温壁向きインタラクションと高温外向きインタラクション運動の寄与（変動流速度成分に基づく見かけの応力や熱流束への寄与）が支配的であることが分かった(14)．

以上のことから，発生原因等の生い立ちが異なっても，伝熱面近傍に存在するスパン方向渦は，共通して伝熱促進と非相似性の発生に有効と推察される。

4. 縦渦による伝熱促進

円柱の挿入によって攪乱を与えた乱流境界層では，前記のように強い非相似性が観察されるが，円柱はそれ自身の形状抗力が大きいので，それを考慮した全運動量損失は低減しない。より抗力が小さく有効に非相似性が発現できる物体を見出すことは実際応用上からは重要である。この観点から，形状抗力が小さく，平板摩擦係数の低減にも有効なLEBU板 (Large Eddy Break Up Manipulator) が有効か否かを検討した。残念ながら熱伝達は摩擦係数と同様に低減を受けることが分かった⁽¹⁶⁾。このため，低下する熱伝達率を引き上げる方策

を模索する一貫として，渦発生体をLEBU板と組み合わせる方法について検討を加えた。その結果，三角翼形状の渦発生体は，LEBU板と組み合わせても有効であること，また縦渦はスパン方向には境界層厚さの3-4倍程度の距離しかカバー出来ないが，流れ方向にはかなり長い距離にわたって有効に伝熱促進をもたらすことが見出された⁽¹⁷⁾。この伝熱

促進は、縦渦の発生に伴って生じる横断面内の2次流によって主流中の高速、低温流体が伝熱面近傍にもたらされることにある(18)。筆者らは、以上の経験を発展させて、それをガスタービン翼の高性能冷却法の開発に応用すべく、斜め衝突噴流による縦渦の生成とそれを用いた内部流熱伝達の促進の研究を行っている(19)。研究は、現在も進行中であるが、かなり有望と考えられる。

文献

- (1) Marumo E, Suzuki K and Sato T, *J. Fluid Mechanics*, 87-1 (1978), pp.121-141.
- (2) Marumo E, Suzuki K and Sato T, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 6-4 (1985), pp.241-248
- (3) Kawaguchi Y, Suzuki K and Sato T, *Int. J. Heat and Fluid flow*, 6-4 (1985), pp.249-255.
- (4) Kawaguchi Y, Yano T and Suzuki K, *Proc. 8th Biennial Symp. on Turbulence*, (1983), pp.26-36.
- (5) 鈴木洋ほか3名, *機論B*, 55-519 (1989), pp.3333-3340.
- (6) Suzuki K, Suzuki H, Kikkawa Y, Kigawa H and Kawaguchi Y, *Turbulent Shear Flows 7*, (1991), pp.119-135, Springer-Verlag.
- (7) Suzuki H, Suzuki K and Sato T, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 31 (1988), pp.259-265.

- (8) Kawaguchi Y, Matsumori Y and Suzuki K, Proc. 9th Biennial Symp. on Turbulence, (1984), pp.28.1-28.10.
- (9) 鈴木洋ほか3名, 機論B, 57-536 (1991), pp.1403-1409.
- (10) Suzuki K and Suzuki H, Int. Annual Review of Heat Transfer, 5 (1993), pp.177-206, Begell House.
- (11) Suzuki H, Nishimura T, Fukutani K and Suzuki K, Int. J. Heat and Fluid Flow, 14 (1993), pp.2-9.
- (12) Suzuki K and Suzuki H, Int. J. Heat and Fluid Flow, 15-6 (1994), 426-437.
- (13) Yao M., Nakatani M. and Suzuki K., Int. J. Heat and Fluid Flow, 16 (1995), pp.389-397.
- (14) Suzuki K. Xi G. N. Inaoka, K. and Hagiwara Y., Int. J. Heat Mass Transfer, 37-1 (1994), pp.83-96.
- (15) Xi G.N. Hagiwara Y. and Sato, T., J. Enhanced Heat Transfer, 2-1/2, pp.23-32.
- (16) 稲岡恭二ほか4名, 機論B, 57-537 (1991), pp.1734-1739.
- (17) 稲岡恭二ほか4名, 機論B, 58-551 (1992), pp.2241-2247.
- (18) Inaoka K. and Suzuki K., Turbulent Shear Flows 9 (ed. F. Durst et al.), (1995), pp.365-382.
- (19) Suzuki K, Key-note paper at the 9th Int. Symp. on Transport Phenomena, Vol. 1 (1996), pp.72-83.