

層流における伝熱促進のための壁面形状最適化

Shape Optimization of Solid Surface for Heat Transfer Enhancement in Laminar Flow

○正 長谷川 洋介 (東大) 正 鹿園 直毅 (東大)

Yosuke Hasegawa and Naoki Shikazono

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505

The adjoint-based shape optimization is applied to a parallel channel with oblique waves, which was found to be quite promising for enhancing heat transfer in single-phase laminar flow with relatively small pressure penalty. It is found that the optimized wall geometry further increases the heat transfer rate by around 8 % from that achieved by the existing oblique wave, while the pressure loss is kept unchanged. Meanwhile, the same optimization procedure is also applied to an initially random surface. The resultant optimized surface exhibits a property of oblique waves. This implies that an oblique wavy surface is optimal for achieving dissimilar heat transfer enhancement while suppressing the pressure loss.

Key Words: shape optimization, single-phase flow, heat transfer, pressure loss

1. 背景

現代社会は、熱と電気/機械エネルギーの相互変換の上に成り立っており、エネルギー機器の更なる高効率化に向けて、固体-流体間における伝熱現象の自在な制御は、基盤技術である。空調機等で見られるレイノルズ数で 100 程度の熱交換器では、前縁効果を利用したルーバーフィン等が広く用いられるが、産業用ラジエータ、給湯用ヒートポンプ等、新たなエネルギー機器のニーズに対応するためには、より高いレイノルズ数域での伝熱促進技術が必要とされており、依然として研究例が少ないのが現状である。

近年、斜交波状壁を伝熱面に用いることで、層流域の伝熱・圧力損失特性を著しく向上できることが報告されている⁽¹⁾。これにより伝熱面ピッチを確保することが可能となり、ゴミ、凝縮液等の目詰まりに伴う性能劣化も起きにくいという利点もある。この形状は、2 次流れを誘起することで伝熱を促進しつつ、剥離を防ぐことで圧力損失を低減するという物理的洞察に基づき提案され、その後、随伴解析を用いた形状最適化により、更なる性能向上が確認された⁽²⁾。上記の研究例では、正方形ダクトの上下壁面に斜波状壁を適用しているが、一般に平行平板の方が伝熱・圧力損失特性が高く、工学応用上は有利である。斜交波状面の平行平板への適用も行われ、高い伝熱・圧力損失特性が確認されたが^(3,4)、形状最適化には至っていない。本研究では、斜波状壁面を平行平板流に適用し、その伝熱・圧力損失特性を明らかにすると共に、随伴解析による形状最適化を行い、更なる性能向上のための設計指針を得ることを目的とする。

2. 計算条件, 手法

本研究で対象とする斜交波状壁面の幾何学形状、及び座標系を図 1 に示す。上下の平板間距離を H として、両壁面に同一の斜交波状変形を付与した。過去の研究例に基づき、スパン方向周期 $W = 2H$ 、斜交波角度 θ を 60 度とした。作動流体は非圧縮流とし、物性値の温度依存性は無いとして、温度場はパンプスカラーとして扱う。完全発達層流域を対象とし、熱流動場は定常とした。以上より、熱流動場の支配方程式は、以下に示す Navier-Stokes の式、連続の式、エネルギー輸送方程式である。

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

$$u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = Q + \frac{1}{\text{Pr Re}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j}. \quad (3)$$

本研究では、流れ場に圧力勾配一定条件を課した。従って、圧力勾配に基づく壁面摩擦速度 u_τ とチャネル半幅 ($H/2$) で定義される摩擦レイノルズ数を $Re = 20$ で一定とした。これは平滑面におけるバルク流速 U_b と平板間距離 H に基づくレイノルズ数では、 $Re_b = U_b H / \nu = 267$ に対応する。

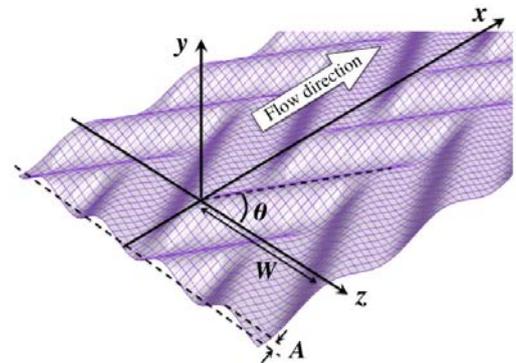


Fig 1. Coordinate system and geometry of heat transfer surface.

現実には、様々な熱的境界条件が考えられるが、本研究では、伝熱促進に関する普遍的な知見を得るため、下記の理想的な系を考える。まず、温度場の支配方程式(3)に現れる発熱項 Q を速度場に付与する平均圧力勾配と等しいとする。

$$Q = -\frac{\partial p}{\partial x}. \quad (3)$$

ここで、上付きのバーは流れ方向の平均を表す。また、プラントル数を $\text{Pr} = 1.0$ とする。更に、壁面境界条件についても、速度場と温度場の相似性を考慮し、両壁で $u_i = \theta = 0$ を課す。上記の条件下では、流れ方向速度成分と温度の支配方程式、壁面境界条件が同形となり、伝熱と圧力損失を独立に変化させることが最も難しい系となる。この時、両者の差を生み出す因子は、速度場に対する連続の式(2)の制約のみとなり、ベクトル量とスカラー量の違いに基づく普遍的な制御則を抽出できるという利点がある⁽⁵⁾。

壁面形状の周期性を考慮し、流れ方向、及びスパン方向

について、一周期分の領域に関して、擬スペクトル法により式(1)から(3)を解いた。流れ方向、壁垂直方向、スパン方向に用いたモード数は(16,17,32)であり、全方向に2倍のモードを用いても結果が変わらないことを確認した。

3. 随伴解析による形状最適化

本研究では、随伴解析に基づく壁面形状の最適化を行う。随伴解析では、まずコスト関数を定義し、それを最小化するように制御入力(本研究では壁面形状 η)が更新される。計算手法の詳細については、他の文献を参照されたい⁽²⁾。以下のようにコスト関数 J を定義する。

$$J = -\frac{C_u}{V} \int u dV + \frac{C_\theta}{V} \int \theta dV + \frac{C_\eta}{S} \int \eta^2 dS + \frac{C_{d\eta}}{S} \int (\nabla \eta)^2 dS. \quad (2)$$

ここで、 V , S は、計算体積、及び上下壁の面積である。第一項はバルク流速、第2項はバルク温度を表す。本研究では、平均圧力勾配、及び発熱項を一定に保つため、バルク流速の増加は圧力損失の低減、一方、バルク温度の減少は伝熱促進を表す。従って、第一項の符号を負とすることにより、圧力損失を抑え、伝熱を増進させる伝熱面形状を探索する。第3項は変形量 η 、第4項は変形勾配のコストに対応する。各項に含まれる定数は、相対的な利得、及び損失を表し、それぞれ $C_u = C_\theta = 1.0$, $C_\eta = C_{d\eta} = 0.2$ とした。

4. 結果

図2に、斜交波状面の振幅を $A/H = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ と系統的に変化させた際の圧力損失、及び熱伝達率を丸付き線で示す。横軸は、摩擦係数 f とバルクレイノルズ数 Re_b の積、また、縦軸はヌセルト数 Nu であり、それぞれ平滑面の値で正規化されている。尚、図中の下付きの0は、平滑面の値を表す。

斜波状壁面の振幅が大きくなるに従い、伝熱と圧力損失共に増加する傾向が確認できる。また、対角を結ぶ点線は、伝熱と圧力損失が同比率で増加する状態 $((Nu/fRe_b)/(Nu/fRe_b)_0 = 1.0)$ に対応しており、本条件では振幅の増加に伴い、圧力損失の増加率の方が顕著となる。

次に、上述の斜交波状壁の振幅が $A/H = 0.25$ 、及び 0.30 の場合を初期形状とし、式(2)で定義したコスト関数の下、壁面形状の最適化を行った。横軸を収束回数として、コスト関数 J 、バルク速度 U_b 、バルク温度 θ_b 、及び非相似因子 $(Nu/Nu_0)/(fRe_b/(fRe_b)_0)$ の値の推移を図3に示す。収束回数の増加に伴い、コスト関数が単調に減少する様子が分かる。その結果、バルク温度とバルク速度の差が減少し、非相似因子の値も向上する。最適化された伝熱面における伝熱、及び圧力損失性能を図2に十字付き線で示す。本研究で用いた斜交波状壁面では、振幅が小さい程、非相似因子が向上する。そのため、コスト関数(2)の下で形状最適化を行った場合、最終的には平滑面に収束する。しかし、平滑面に推移する過程で、最適化された伝熱面は斜交波状壁に比べて、高い伝熱性能を示すことが確認できる。具体的には、同じ圧力損失 $(fRe_b/(fRe_b)_0 = 3.5$ 付近)において、今回最適化された伝熱面では Nu が8%、同様に、 $Nu/Nu_0 = 3.4$ 付近では、 fRe_b が10%低減することが確認された。

これまで、斜交波状面を初期条件として形状最適化を行ってきたが、それとは全く異なる形状が最適である可能性も考えられる。そこで、全くランダムな壁面形状を初期条件として、同様の手順で壁面形状の最適化を行った。その結果得られた形状は、斜交波状面の様相を呈することが確認された。この事実は、斜交波状壁は最適形状に近いことを示唆しており、大変興味深い。最適計算で得られた斜交

波状面の波長、角度等の幾何学パラメータは、流動条件やコスト関数に依存すると考えられる。講演では、様々なコスト関数の下に形状最適化を行い、伝熱促進に関するより一般的な設計指針について考察する。

5. 結論

従来研究において、高い伝熱、及び圧力損失性能を有することが報告されている斜交波状壁面に対して、本研究では随伴解析に基づく形状最適化を行い、更なる性能向上を確認した。

また、ランダムな壁面形状を初期条件として最適化を行った結果、斜交波状壁面の性質を持つ壁面形状が得られた。随伴解析では、研究者の直感に頼らずに支配方程式に基づく形状最適化が可能であり、既存の伝熱促進技術を凌駕する新たな伝熱面の開発が期待される。

参考文献

- (1)森本, 他, 機論 (B編), **70**-698 (2004), 2604.
- (2)Morimoto, K. et al., J. Therm. Sci. Tech., **56**-1 (2010), 24.
- (3)Suzue, Y. et al., Int. Heat Trans. Conf., (2006), HEX-24.
- (4)福田, 鹿園, 日本冷凍空調学会講演論文集, (2007), 293.
- (5) Hasegawa, Y., Kasagi, N., J. Fluid. Mech., **683** (2011), 57.

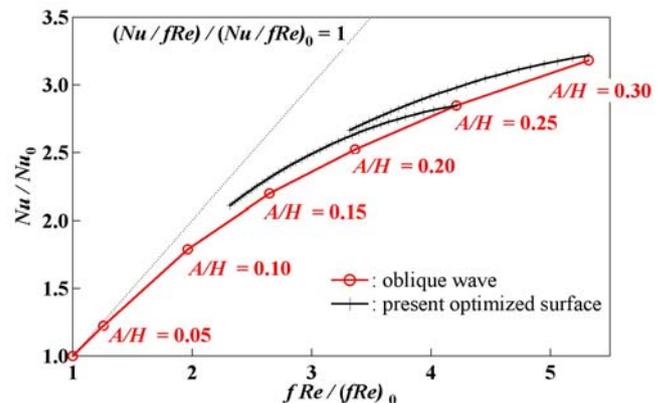


Fig. 2 Nu and fRe normalized by those at a flat surface.

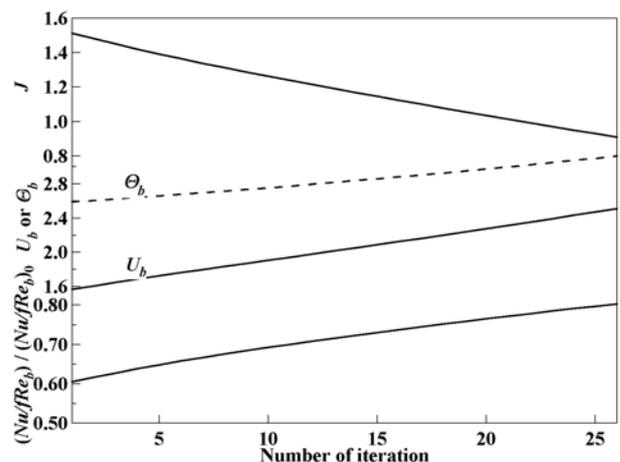


Fig. 3 Cost functional J , bulk mean velocity U_b , bulk mean temperature θ_b and analogy factor $(Nu/fRe_b)/(Nu/fRe_b)_0$ as a function of number of iteration in adjoint-based optimization.