

A208 斜交波状面の伝熱促進効果に関する研究

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF OBLIQUE-WAVE SURFACE

© 福田 健太郎 (東大院), 鹿園 直毅 (東大工)

©Kentaro FUKUDA, Naoki SHIKAZONO

Department of Mechanical Engineering, Tokyo University, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

Heat transfer enhancement effect of oblique-wave surface is evaluated using numerical simulation. The effects of wavelength, wave amplitude, wave reflection length and Reynolds number on heat transfer and pressure loss characteristics are investigated. It is found that when Re is over 240, the heat transfer coefficient of oblique-wave surface is significantly enhanced to 2 or 3 times as that of flat surface while the j/f factor of oblique-wave surface remains nearly equal to that of flat surface.

Keywords: Heat Exchanger, Heat Transfer Enhancement, Oblique-Wave Surface, Heat Transfer Coefficient, j/f Factor

1. 緒言

現在、層流熱伝達の促進法として、一般的に前縁効果を用いたルーバフィンが広く用いられている。ルーバフィンはその促進原理から、低速でも大きな伝熱促進効果が得られるが、ゴミ、凝縮水、霜等による目詰まりや圧力損失が大きい等の課題がある。近年、前縁効果を用いない層流熱伝達促進法として斜交波状面を用いた伝熱促進技術が提案されている[1][2]。正方形および長方形ダクトの上下壁面に斜交波状面を用いることで、層流域での伝熱と圧力損失特性を顕著に向上できることが示されている。しかしながら、上記の知見は発達した流れに対するものであり、実際の熱交換器に適用する際には入口助走区間を含めた領域での伝熱促進が重要となる。

以上のような背景を鑑み、本研究では斜交波状面の熱交換器への適用を想定し、入口助走区間を含むチャンネル流れの解析を行い、その性能を評価する。性能向上に寄与するパラメータを明らかにし、高性能熱交換器の設計指針を得ることを目的とする。

2. 計算手法およびパラメータ

Figure 1 に計算領域を示す。流れ方向、スパン方向、高さ方向をそれぞれ x, y, z 方向とし、チャンネル部入口を $x=0$ とする。解析領域は、 x, y, z 方向にそれぞれ $L_x \times \delta \times r$ の長さをもつチャンネル部および、 x 方向にそれぞれ $L_{x,front}$, $L_{x,rear}$ の長さをもつ上流空気部、下流空気部の3領域からなる。

Figure 2 にチャンネル部での波状形状を示す。上下壁の変位量 y_w は次式により与えた。

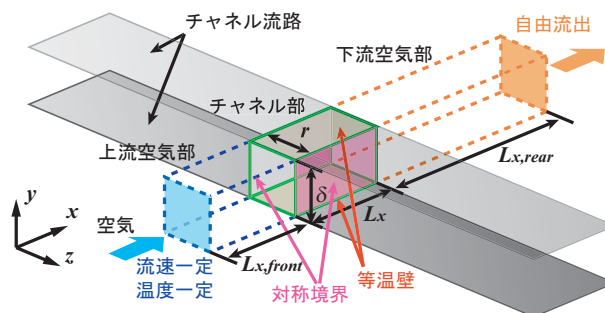


Fig.1 Computational Domain

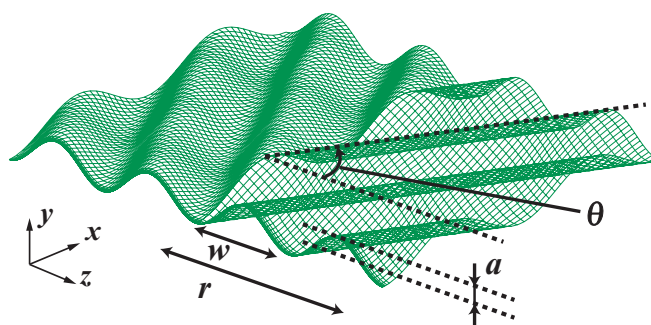


Fig.2 Oblique-Wave Shape and Parameters

$$y_w = a \cos \frac{2\pi}{w} (z - x / \tan \theta) \quad (1)$$

ここで、 w は波状形状の波長、 a は波状形状の振幅、 θ は傾き角を示す。傾き角 θ は、Morimoto ら[1]により圧力損失と熱伝達のバランスが良いと報告されている 60° とした。本研究では、チャンネル高さおよびチャンネル部流れ方向長さを、それぞれ $\delta = 1.3$,

$L_x = 20$ と固定し、チャンネル高さで無次元化した波長 w/δ , 振幅 a/δ , 折り返し長さ r/δ を変化させ、それぞれが熱伝達率と圧力損失に与える影響を評価した。

解析には FLUENT6.2 を用いた。作動流体は空気を仮定し、プラントル数は 0.717 とした。流れは非圧縮、定常とし、物性値は一定、上下壁の板厚は無視した。境界条件は、上流空気部入口に風速一定および温度一定、下流空気部出口に自由流出、チャンネル部上下壁に等温壁 ($T_{wall} > T_{in}$)、スパン方向に対称境界の条件をそれぞれ与えた。本計算では、前面風速 U_f およびチャンネル高さ δ で定義されたレイノルズ数が $Re = 82, 246, 411$ の 3 通りで解析を行った。

3. 計算結果および考察

3.1 斜交波状面の性能評価

Figure 3 に、波長を $w/\delta = 0.5 \sim 2.0$, 振幅を $a/\delta = 0.05 \sim 0.25$, 折り返し長さを $r/\delta = 0.25 \sim 2.0$ の間で変化させた場合の斜交波状面の性能比較を示す。横軸は平均熱伝達率 h , 縦軸は j/f 因子である。それぞれ同じチャンネル高さ δ をもつ平行平板での解析結果 h_{flat} , $(j/f)_{flat}$ で除してある。なお、熱伝達率は投影面積を伝熱面積として定義した。レイノルズ数 $Re = 82$ では熱伝達率は増加するものの、いずれの形状でも j/f 因子が平板に比べ減少し、十分な伝熱促進効果が得られていない。一方、レイノルズ数 $Re = 246$ および $Re = 411$ では、平板と同程度の j/f 因子を維持しつつ熱伝達率を 2~3 倍程度に向上させることができる。このような性能向上に寄与する形状パラメータを明らかにするため、レイノルズ数を $Re = 246, 411$ の条件で、振幅 w および折り返し長さ r の影響を評価する。

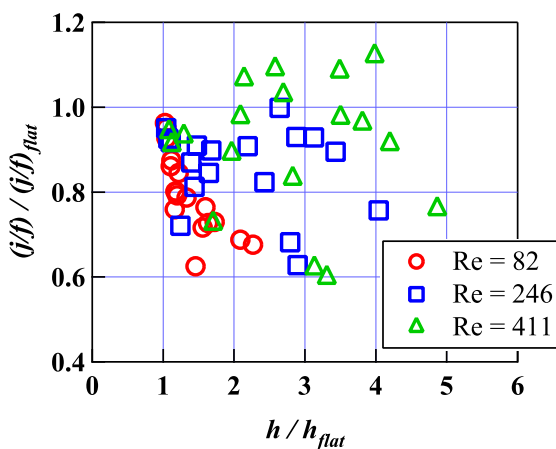


Fig.3 Heat Transfer Coefficient and j/f Factor at $Re = 82, 246, 411$

3.2 振幅の影響

波長が $w/\delta = 0.5, 1.0, 2.0$ の 3 ケースについて、振幅 a/δ の影響を調べた。折り返し長さ r は上記の 3 ケースに対し、それぞれ $r/\delta = 0.5, 1.0, 2.0$ とした。

Figure 4 に、波長が $w/\delta = 1.0$ で振幅が $a/\delta = 0.1, 0.15, 0.2$ における y - z 断面内の速度ベクトルおよび等温線を示す。レイノルズ数はいずれも $Re = 246$ である。振幅が大きくなるほど二次流れが強まり、チャンネル中央部の低温空気が高温の壁面近くに移動することで熱伝達が促進される。

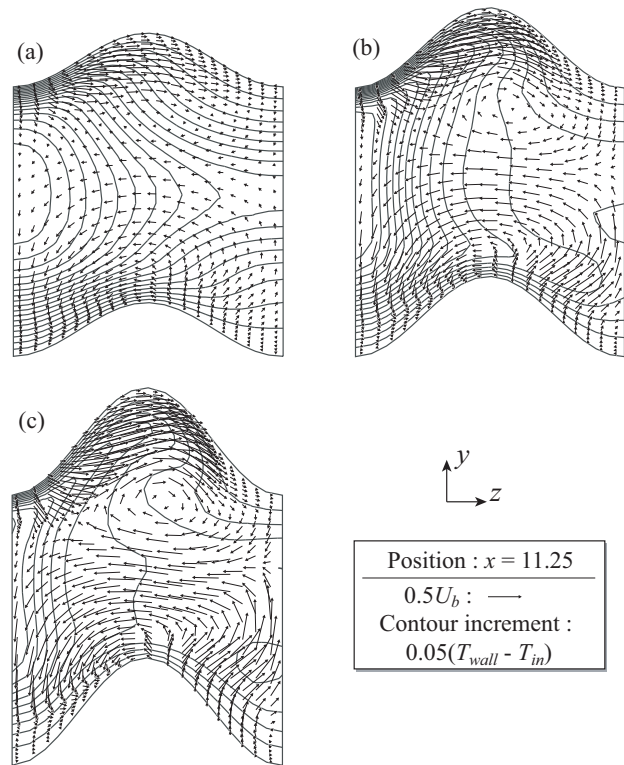


Fig.4 Velocity Vectors and Iso-Contours of Temperatures in y - z Planes at $x = 11.25$ for $w/\delta = 1.0, r/\delta = 1.0, Re = 246$: (a) $a/\delta = 0.1$, (b) $a/\delta = 0.15$, (c) $a/\delta = 0.2$

Figure 5 に熱伝達率および j/f 因子と振幅との関係を示す。横軸は、振幅と波長の比 (以下アスペクト比と呼ぶ) a/w である。いずれの波長でもアスペクト比の増加とともに熱伝達率も増加する。一方、 j/f 因子には波長およびレイノルズ数に依存した最適値が存在する。レイノルズ数 $Re = 246$ では波長 $w/\delta = 1.0$, $Re = 411$ では波長 $w/\delta = 0.5$ の形状において、それぞれアスペクト比 $a/w = 0.15, 0.2$ 付近で j/f 因子が大きく増加し、平板と同程度かそれ以上となる。あるアスペクト比で j/f 因子が最大値をとるのは、アスペクト比の増加に伴って二次流れが強まるが、アスペクト比をさらに増加させると剥離による圧力損失が顕著になるためである。また、レイノルズ数によ

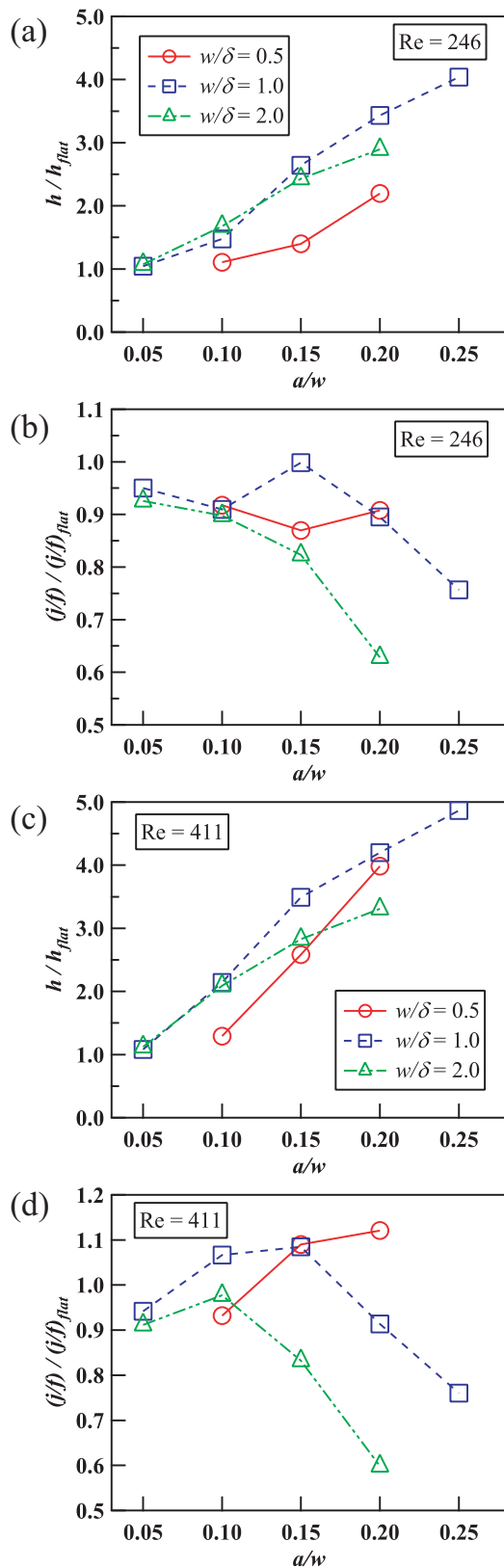


Fig.5 Effect of Wavelength and Aspect Ratio for $r/w = 1$:
 (a) Average Heat Transfer Coefficient at $Re = 246$,
 (b) jff Factor at $Re = 246$,
 (c) Average Heat Transfer Coefficient at $Re = 411$,
 (d) jff Factor at $Re = 411$

って最適な波長が変化するのは、レイノルズ数が大きい場合は振幅や波長が小さくても十分強い二次流れが形成されるためである。

3.3 折り返し長さの影響

波長, 振幅が $(w/\delta, a/\delta) = (0.5, 0.1), (1.0, 0.2)$ の 2 形状に対して, 折り返し長さ r/δ の影響を評価した. Figure 6 に $(w/\delta, a/\delta) = (1.0, 0.2)$ の形状で折り返し長さが $r/\delta = 0.5, 1.0, 2.0$ における $y-z$ 断面内の速度ベクトルおよび等温面を示す. Fig.6(a) の折り返し長さが波長に比べて短い場合, 折り返し長さが波長と等しい場合に見られる循環構造の二次流れが形成されず, 特に下壁面近傍での二次流れが弱く温度勾配も小さいことが分かる. 一方, Fig.6(c) の折り返し長さが波長に比べて長い場合, 循環構造の二次流れは生じるもののスパン方向長さが長い為, 特に図右側上下壁面近傍での二次流れが, 折り返し長さが波長と等しい場合に比べて弱いことが分かる.

Figure 7 に, 熱伝達率および jff 因子と折り返し長さとの関係を示す. 横軸は, 折り返し長さと波長の比 (以下折り返し比と呼ぶ) r/w を示す. 熱伝達率は形状やレイノルズ数によらず, 折り返し比は $r/w = 1.0$, すなわち波長と同程度の折り返し長さをもつ波状形状で最大値をとる. jff 因子は, 波長 $w/\delta = 0.5$ では折り返し比 $r/w = 1$, 波長 $w/\delta = 1.0$ では折り返し比 $r/w = 1.0 \sim 2.0$ 付近で最大値をとる.

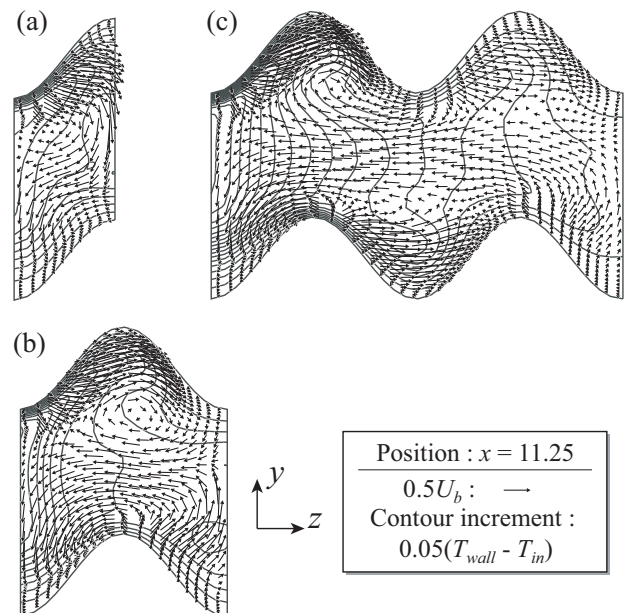


Fig.6 Velocity Vectors and Iso-Contours of Temperatures in $y-z$ Planes at $x = 11.25$ for $w/\delta = 1.0, a/\delta = 0.2, Re = 246$: (a) $r/\delta = 0.5$, (b) $r/\delta = 1.0$, (c) $r/\delta = 2.0$

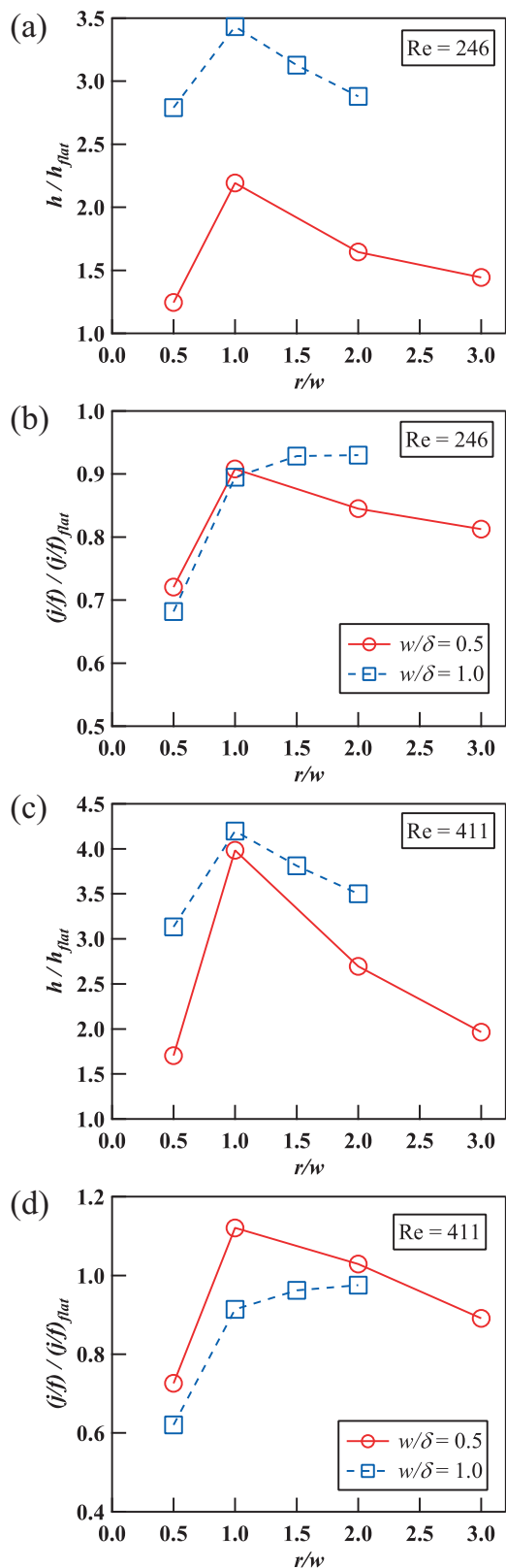


Fig.7 Effect of Wavelength and Return Ratio for $a/w = 0.2$: (a) Average Heat Transfer Coefficient at $Re = 246$, (b) j/f Factor at $Re = 246$, (c) Average Heat Transfer Coefficient at $Re = 411$, (d) j/f Factor at $Re = 411$

4. 結論

入口助走区間を含む斜交波状面流路の熱流動数値解析を行い、波状形状の波長、振幅、折り返し長さの熱伝達率および圧力損失特性に及ぼす影響を評価した。その結果、以下の知見を得た。

1. 入口助走区間を含む斜交波状面流路においても、レイノルズ数が 240 程度以上の領域で、平板に比べ 2 ~ 3 倍の熱伝達率を平板と同程度の j/f 因子で実現できる。
2. j/f 因子の向上には最適な波長、振幅が存在し、 $Re = 246$ では波長が $w/\delta = 1.0$ 、振幅が $a/\delta = 0.15$ 、 $Re = 411$ では波長が $w/\delta = 0.5$ 、振幅が $a/\delta = 0.1$ 程度である。折り返し長さは波長と同程度で熱伝達率、 j/f 因子ともに顕著に向上する。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京大学笠木伸英教授、鈴木雄二准教授、現日産自動車(株)鈴木江祥典氏、東京大学大学院崎下佳賢氏、東芝キャリア(株)本郷一郎氏、同長岡良明氏、同大野裕司氏から貴重な御助言を得た。ここに記して謝意を表す。

NOMENCLATURE

L_x	: Flow direction length of channel region
$L_{x,front}$: Flow direction length of inlet region
$L_{x,front}$: Flow direction length of outlet region
δ	: Channel height
w	: Wave length
a	: Wave amplitude
r	: Reflection length
θ	: Oblique angle
U_f	: Frontal velocity
T_{wall}	: Temperature of wall
T_{in}	: Temperature at channel inlet
Re	: Reynolds number ($=U_f \delta / \nu$)
h	: Average heat transfer coefficient
h_{flat}	: Average heat transfer coefficient of a flat surface
j/f	: j/f factor
$(j/f)_{flat}$: j/f factor of a flat surface

REFERENCES

- [1] Morimoto, K., Suzuki, Y. and Kasagi, N., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **70**-698 (2004), pp. 114-121. (in Japanese)
- [2] Suzue, Y., Morimoto, K., Shikazono, N., Suzuki, Y. and Kasagi, N., Proc. 13th International Heat Transfer Conference, Sydney, HEX-24.