円柱への二次元衝突噴流に関する研究*

(第1報, 円柱に近接して設置した平板の流れ場および円柱熱伝達への影響)

羽田 喜昭^{*1}, 土屋 良明^{*2}
倉澤 英夫^{*1}, 鈴木 健二郎^{*3}A Study on the Two-Dimensional Jet Impinging on a Circular Cylinder
(1st Report, Measurements of Flow-Field and Heat Transfer around a Circular
Cylinder Mounted near Two Flat Plates)Yoshiaki HANEDA, Yoshiaki TSUCHIYA,
Hideo KURASAWA and Kenjiro SUZUKI

Two-dimensional jet impingement onto a circular cylinder of 50 mm diameter was studied. Particular attention was paid to a case when the cylinder was located in the converging flow field formed between the two flat plates mounted symmetrically near the cylinder. Nozzle-to-cylinder distance was changed in three steps, mainly 3, 7 and 10 times the nozzle width (15 mm), and the jet velocity was changed in the range of 8~15 m/s. The effects of the narrower end of the converging flow space between the two plates and of the space between the cylinder and the plates on the flow-field and the heat transfer from cylinder were examined. In the case of relatively small cylinder-to-plate spacings, reattachment of the separated flow onto the cylinder surface was observed and the local Nusselt number was found to take a maximum near the reattachment point. Then, an increase by about 9~12% of mean Nusselt number was obtained.

Key Words: Jet Impingement, Heat Transfer, Heat Transfer Enhancement, Circular Cylinder, Flow Control

1. 結 言

衝突噴流による物体の加熱または冷却は、一様流による場合より供給流量が少なくすむことや局所的適用ができ、またそれゆえ熱伝達制御に適しているなどの利点があることから、工業上においてもその応用が注目されてきた。円柱に噴流を衝突させる場合の熱伝達あるいは物質伝達に関する研究^{(1)~(5)}に注目すると、円柱直径が噴出口スリット幅よりある程度大きい場合には、一様流中にある円柱の場合に比べて高い平均熱伝達率が得られることが報告されている。しかしながら、流れ場と円柱の相対的大小関係の影響やそれらを変更して噴流流れ場を制御することによる熱伝達への影響などについてはいまだ十分な検討がなされていない。また、噴流の制御に関しては、噴流自体の制御⁽⁶⁾⁽⁷⁾、噴出口付近に多孔板⁽⁸⁾⁽⁹⁾や丸棒⁽¹⁰⁾等を設置することによるせん断層の制御等について多数の報告例があるが、円柱まわりの流れ場を積極的に変える試みはいま

だ十分なされてはいない。

本研究では、円柱まわりの流れ場と熱伝達の制御例として、二次元噴流中に置かれた円柱に近接して2枚の平板を対称にしかも傾斜させて設置する場合に注目する。

本報では、噴流軸と平板がなす傾斜角度を一定に保って、円柱を比較的噴出口近くに置く場合について、円柱と平板間のすきまや2枚の平板間の間隔を変えた場合の実験結果について検討を加える。具体的には、円柱表面上の圧力分布の測定および油膜法による流れの可視化を円柱と平板上で行い、円柱まわりの熱伝達率の測定結果との関連について検討を施す。

2. おもな記号

h : 噴出口高さ mm

D : 円柱直径 mm

L : ノズル出口と円柱前方岐点間距離 mm

C : 円柱と平板間のすきま mm

B : 平板の最小間隔 mm

ϕ : 平板の半開き角度 °

ξ : 円柱・平板間最小すきま位置からの平板上距離 mm

θ : 円柱前方岐点からの角度 °

* 平成4年3月13日 北陸信越支部第29期総会講演会, 平成4年5月29日 第29回日本伝熱シンポジウムおよび平成4年9月30日 第70期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成5年6月2日。

^{*1} 正員, 長野工業高等専門学校 (〒381 長野市徳間 716)。

^{*2} 正員, 信州大学工学部 (〒380 長野市若里 500)。

^{*3} 正員, 京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

- U_o : 噴流出口速度 m/s
 C_p : 円柱の圧力係数 $= (P - P_\infty) / (1/2) \rho U_o^2$
 C_{pw} : 平板の圧力係数 $= (P - P_\infty) / (1/2) \rho U_o^2$
 P : 円柱または平板の表面圧力 Pa
 P_∞ : 周囲静止流体静圧 Pa
 Nu_θ : 円柱の局所ヌッセルト数
 Nu_m : 円柱の平均ヌッセルト数
 添字
 o: 前方岐点
 b: 後方岐点

3. 実験装置および方法

3.1 実験装置 図1に実験装置の概略図を示す。本実験装置では送風機の回転数制御により風速調整が可能であり、ディフューザ内には、その拡大角がやや大きいことに伴って生じる、流れのはく離による損失を軽減する目的で4枚の案内羽根が、また乱れ強度低減のため風洞整流部内には整流格子と4枚の金網が設置されている。正弦曲線形状に面積比1/20に絞られた二次元ノズルの噴出口は短辺 h が15 mmであり、長辺は $33h$ である。測定部には長辺と等しい間隔で設置した2枚の端板間に、半開き角 $\phi = 30^\circ$ で対向するように、2枚の平板を挟み込み、ノズル中心面と一致する両平板間の中心面上に直径 D が50 mmの円柱を設

図1 実験装置概略

図2 座標系および記号

置した。図2中には、後に用いる幾何形状パラメータも示してある。

圧力測定のために用いた円柱と平板には、それぞれ1個と40個の直径0.5 mmの静圧孔を設けた。また、熱伝達測定用の円柱には電気加熱のためステンレス鋼はく(幅20 mm, 厚さ30 μ m)をらせん状に12回巻き付け、はくの裏面に接するように直径0.1 mmの表面温度 T_w 測定用T形(CC)熱電対を固着した。円柱(アクリルパイプ)内部にはグラスウールが充てんされている。

3.2 実験方法 平板の半開き角度は $\phi = 30^\circ$ に固定し、円柱位置 L , 平板最小間隔 B , 平板と円柱間のすきま C を調節して、ノズルから空気流(速度 U_o)を噴出させて実験を行う。円柱まわりの圧力は 5° 間隔で、また平板上の圧力は5 mm間隔で傾斜マノメータにより測定した。円柱上および平板上での油膜法による流れの可視化には、酸化チタンを混入した流動パラフィンとオレイン酸の混合液を用いた。

熱伝達測定用円柱を円柱軸まわりに回転して 10° 間隔で表面温度 T_w を測定し、その値から局所熱伝達率 α を求めた。その定義式は、伝熱面面積 S のステンレス鋼はく全体での総発熱量を Q , 噴流温度を T_o とすると、 $\alpha = Q / (S(T_w - T_o))$ である。円柱表面からの熱放射および管内部への熱伝導による損失については、1%以下であると評価されたためこれを無視した。空気の熱伝導率を λ として、局所ヌッセルト数を、 $Nu_\theta = \alpha D / \lambda$ により求め、また Nu_θ の分布から円柱全表面に対する平均ヌッセルト数 Nu_m を求めた。

3.3 実験条件 本報では、平板最小間隔は $B/D = 0.32, 0.54, 0.73$ の3種類に変え、円柱と平板のすきまは $C/D \leq 1$ の範囲に限定した。円柱は自由噴流のポテンシャルコア領域およびその直後に相当する $L/h = 1, 3, 5$, および遷移領域の $L/h = 7$, 発達領域の $L/h = 10$ の位置に置いた。噴流出口速度は $U_o = 8 \sim 15$ m/s の範囲であり、これに対応する、円柱直径に基づくレイノルズ数は $Re_d = 2.6 \times 10^4 \sim 4.9 \times 10^4$ であった。

4. 実験結果および考察

自由噴流のポテンシャルコア領域は、約 $L/h \leq 4$ の範囲であり、噴流出口速度 U_o (15, 12.5 m/s) に対する噴流中心軸上速度 U_m の比は、 $L/h = 5, 7, 10$ でそれぞれ0.96, 0.87, 0.75であり、これらの速度を噴流到達速度として後に実験値の整理に使用する。なお発達領域では U_m/U_o は噴流軸上距離 x/h の $(-1/2)$ 乗に比例して減衰することが確かめられている。さらに、噴流の広がりを示す半値幅は、 $L/h = 10$ において約

1.3 h , またその位置でも噴出口の短辺にそう y 方向の速度分布は二次元噴流速度分布に一致しており, 長辺方向速度分布は, z 方向中央部の幅約 25 h の範囲で平らな分布をしている。なお, 噴流出口直後の主流方向乱れ強さは, 約 0.8% であった。

4.1 円柱まわりの圧力分布 円柱のみを自由噴流のポテンシャルコア領域あるいはその直後に置いた場合に測定した円柱表面圧力を, 周囲静止空間圧力との差を噴出口中心の動圧で無次元化した圧力係数 C_p の形で, 図 3 に例示した。いずれの L/h 値においても図 3 中に破線で示す熊田らの実験結果⁽²⁾ ときわめてよく一致している。 $\theta=90^\circ$ における円柱表面近傍から y 方向への速度分布が二次元壁面噴流の速度分布に類似していたことから, 彼らが推察したように円柱表面近傍の流れは, コアング効果により壁面噴流的となっていると考えられる。なお図は割愛するが, 自由噴流であれば遷移領域から発達領域に相当する $L/h=7, 10$ の場合にも, $\theta=50\sim 110^\circ$ における分布の平坦さに変化は生じるが, その他の点では図 3 の結果とほぼ同様な分布が得られた。

円柱位置を $L/h=3$ に固定し, 4 種類のすきま C の

図 3 円柱まわりの圧力分布(平板なし)

図 4 各すきま C における平板最小間隔 B の違いによる円柱圧力分布

値それぞれに対して平板最小間隔 B を変更した場合の圧力分布の比較を図 4 (a)～(d) に示す。最小流路幅は円柱と平板のすきまを 2 倍とした値 $2C$ と平板間の最小間隔 B の大小関係(図 2)によって決まり, $C/D=0.1$ の場合にはすきま $2C$ が最小流路幅となる。この場合には圧力係数 C_p は $\theta=90^\circ$ 付近で明確な正の極大値を示し, また円柱と平板のすきまが最小となる $\theta=120^\circ$ 付近で極小値を示す。この極大と極小は後述するように円柱まわりの流れの再付着と再はく離に対応している(図 8 参照)。図 4 (b) に示した $C/D=0.2$ の場合には, 2 平板の下流端において流路幅が最小となる $B/D=0.32$ のケースにおいて, C_p は $\theta=30^\circ$ 付近で極小値となり, また $\theta \geq 110^\circ$ において正圧で比較的变化が少ない分布を示す。この C_p の正圧部分は, 平板下流端で流れがせき止められることにより生じると考えられる。円柱と平板のすきま C が最小流路幅に一致する他の場合($2C < B$ を満足する場合)の分布には, $C/D=0.1$ の場合と同様の極大, 極小が認められる。しかし同様に $2C < B$ の場合でも $C/D=0.3, B/D=0.73$ の場合にはこれらの極値はみられない。なお $C/D=0.3$ においては, $B/D=0.32, 0.54$ の場合に平板下流端が最小流路幅($2C > B$)となる。このうち, 特に $B/D=0.32$ では分布は非対称であり, また実験時間中に θ の正領域と負領域の形状が, 互いに入れ替わることも認められた。いずれの B/D の値においても, $2C > B$ を満足している $C/D=1$ の場合, 特に $B/D=0.32$ において測定値が図示した範囲で著しく大きい変動を示した。また $B/D=0.73$ の場合には, 平板がない場合と同様な圧力分布を示している。以上のことから, 流路最小幅が B に一致する場合($2C > B$ の場合)には, 流れ場が B の値に強く依存することが示唆される。

図 5 に, $\theta=180^\circ$ における圧力係数(以下背圧係数) C_{pb} のすきま C に対する変化を, $L/h=3$ の場合について例示する。 C_{pb} は, 円柱と平板間のすきま部の流路面積と平板下流端でのそれが等しくなる条件($2C=B$)の近傍で最大となり, 平板による流れのせき止めの影響があることがうかがわれる。なお, 非対称な

図 5 円柱の背圧係数 C_{pb} とすきま C との関係

圧力分布が生じた場合の結果を図5中に黒塗り記号で示した。平板最小間隔が大きい $B/D=0.73$ の場合にはこの非対称分布は生じていない。

すきま C による圧力係数 C_p の分布形の変化を、 $B/D=0.73$, $L/h=3$ および 7 の場合について、図6(a), (b)に例示する。図6(a), (b)においてすきま C が最小流路幅に相当する ($2C < B$) のは、 $C/D \leq 0.3$ の範囲である。 $C/D=0.2$ の C_p 分布における $\theta=90^\circ$ 付近での極大および $\theta=120^\circ$ 付近での極小は、 $C/D=0.3$ ではみられず、すきまの大きさにより流れ場が変

(a) $L/h=3$ (b) $L/h=7$ 図6 すきま C の違いによる円柱圧力分布 (a) $L/h=3$ (b) $L/h=7$ 図7 すきま C の違いによる平板上圧力分布

化していることが認められる。なお、 $\theta=120^\circ$ 付近での極小は、後述する平板上の圧力分布 [図7(a), (b)] と可視化の結果(図9参照)からすると円柱からの流れの再はく離に対応すると考えられる。

4.2 平板の圧力分布 平板上圧力 C_{pw} の分布も、円柱まわりのそれと同様に、円柱と平板間のすきま C により変化する。 $B/D=0.73$, $L/h=3$ および 7 の場合の C_{pw} の測定結果例を、図7(a), (b)に示す。 $L/h=3$ の場合には、すきまが $C/D \leq 0.2$ の範囲では、 C_{pw} の極大は $\xi < 0$ 領域で生じ、 C の増大とともにその位置は下流へ移り、その値も小さくなる。また、すきまが最小となる位置 $\xi=0$ (円柱上では $\theta=120^\circ$) 付近に極小値がある。後述する可視化の結果(図9参照)も考慮に入れると、この極大値位置は平板上における流れの岐点であり、この位置と極小値位置との間で加速流が形成されていると推定される。一方、 $C/D=0.3$, 0.4 の場合には、広がりの大きい分布となっており、 C_{pw} の極大値位置は $\xi=0$ 付近、また $C/D=1$ では $\xi > 0$ となっている。 $L/h=7$ の場合にも同様な C_{pw} 分布の傾向が存在するが、同じ C 値での極大、極小位置や

図8 円柱まわりの流れの可視化(油膜法)

図9 平板上の流れの可視化(油膜法)

大きさには差異があり, L/h による流れ場の変化が小さいことが示唆される。

4.3 円柱まわりおよび平板上の流れの可視化

油膜法によって流れの様相を可視化した。図 6, 7 に示した実験条件の一部に対する結果を, 円柱表面について図 8 に, 平板面について図 9 に示す。図 8, 9 中の E1~E3 は, 写真観察の方向を表し, それぞれが異なる方向か, また流れのパターンも図 9 に示してある。 $C/D=0.1$ の場合には $\theta=39^\circ$ 付近で流れは円柱表面からはく離(図中の S. P)し, $\theta=90^\circ$ 付近で再付着(図 8, 9 中の R. A)し, さらに $\theta=130^\circ$ 付近で再びはく離(図 8, 9 中の R. S)している。これらの各位置は円柱表面上の圧力分布 [図 6 (a)] における, 極小, 極大および第 2 の極小位置と対応している。 $C/D=0.2$ の場合にも同様な流れ様式であるが, $C/D=0.4$ ではこれらと著しく異なり, 流れのはく離は $\theta=120^\circ$ 付近でのみ生じる。図 9 に示した $C/D=0.1, 0.2$ の場合の $\xi < 0$ の領域に認められる油膜上の細長い帯域は, 位置的に圧力分布の極大と対応し, 流れの分岐位置(岐線)である。この C/D の値の場合には, 流れの分岐のほか $\xi = 0$ の位置の直後にはく離が認められ, これらの点で $C/D=0.4$ の場合とは, 流れ様式が異なっている。なお, 平板境界層中に円柱を挿入した場合に, 流れ様式が $C/D \leq 0.3$ において, すきま値に依存して著しく変わることが報告されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

4.4 円柱の局所ヌッセルト数 平板を設置しな

図 10 円柱まわりの局所ヌッセルト数分布(平板なし)

図 11 速度の違いによる円柱まわりの局所ヌッセルト数分布(平板なし)

い場合における円柱表面上の局所ヌッセルト数 Nu_θ の分布を, $L/h=3$ の場合について図 10 にまた $L/h=7$ の場合について図 11 に示す。 $L/h=3$ の場合について噴流出口速度を一定(15 m/s)に保って行った 5 回の測定 of 平均値とそのときの最大, 最小値を示す。もっともばらつきが大きいのは, $\theta=0^\circ$ の位置であるがその大きさは $\pm 5\%$ 以内であった。この場合の Nu_θ は, $\theta=60^\circ$ 付近で極小値をとり, $\theta > 60^\circ$ の領域では比較的緩やかな変化をしている。それに対し $L/h=7$ の場合には, Nu_θ は, $\theta=120^\circ$ 付近まで単調に減少しており, 円柱寸法と噴流幅の相対的大きさの違いによって Nu_θ の分布形に違いが現れている。これは, 噴流幅が円柱径に対して大きくなると, コアング効果が弱まり⁽³⁾ 円柱まわりの圧力分布(図 3)の平坦部分に変化が生じるためである。

すきま C による局所ヌッセルト数分布の変化を $L/h=3, 7$ の各場合について図 12(a), (b) に例示する。図 12(a), (b) において $C/D \leq 0.2$ の範囲では Nu_θ の値は $\theta=60^\circ$ 付近で極小となり, $\theta=90 \sim 110^\circ$ で極大を示し, $\theta=130^\circ$ 付近で再び極小となる分布を示す。円柱上の圧力分布 [図 6 (a), (b)] および流れの可視化(図 8)の結果からして, これらの極値は円柱上の流れのはく離, 再付着, 再びはく離に対応すると考

(a) $L/h=3$

(b) $L/h=7$

図 12 すきま C の違いによる円柱まわりの局所ヌッセルト数分布

えられる。なお、 $L/h=3$ の場合には、 $C/D=0.04\sim0.1$ の範囲の極大値は、前方岐点における局所ヌッセルト数の値に比肩するほど大きく、また、 $L/h=7$ の場合には流れ場と同様に局所ヌッセルト数が、すきま $C/D=$

(a) 後方岐点のヌッセルト数

(b) 平均ヌッセルト数

図 13 $L/h=3$ におけるすきま C とヌッセルト数の関係

図 14 $L/h=7, 10$ におけるすきま C とヌッセルト数の関係

(a) $L/h=3$

(b) $L/h=7$

(c) $L/h=10$

図 15 レイノルズ数とヌッセルト数の関係

0.2 と 0.3 の間で著しく相違することが認められる。

4.5 円柱と平板間のすきま C とヌッセルト数

前方岐点と後方岐点における局所ヌッセルト数 Nu_o , Nu_b および平均ヌッセルト数 Nu_m のすきま C による変化を、 $L/h=3$ の場合について図 13(a), (b) に、また $L/h=7, 10$ の場合について図 14 に示す。 $L/h=3$ の場合における平均ヌッセルト数は、 B/D のいずれの値においても、すきま $C/D=0.06$ および 0.1 において、図 13 中に破線で示す平板がない場合のそれより大きいことが認められ、また同様な傾向が円柱後方岐点の局所ヌッセルト数の分布にもみられる。なお、一様流中に平行に置いた平板に近接して設置する円柱においても、 C/D の比が 0.05~0.1 の範囲で平均ヌッセルト数が最大となる^{(12)~(16)} ことが報告されている。一方、 $L/h=7$ および 10 の場合においては、平均ヌッセルト数が平板がない場合より明確に大きくはなく、また前方岐点での局所ヌッセルト数 Nu_o は小さい C/D 比においても平板がない場合より明らかに減少しており、 L/h の値により顕著な影響があることが認められる。 L/h の値によるこれらの差異については、今後の検討課題である。

4.6 レイノルズ数とヌッセルト数の関係 4.5

節において平均ヌッセルト数 Nu_m が最大となるとしたすきま比 ($C/D=0.06$ および 0.1) における、ヌッセルト数のレイノルズ数に対する依存性を、平板がない場合のそれとともに、図 15(a)~(c) に示す。図 15 中には、平均ヌッセルト数 Nu_m のほか前方後方両岐点における局所ヌッセルト数 (Nu_o および Nu_b) を示している。円柱挿入位置は、噴流の遷移領域に相当し流力的相似性は十分ではない⁽³⁾。しかし、レイノルズ数 (Re_a) の代表速度には、自由噴流中の円柱位置への到

達速度($L/h=3$ では噴出速度 U_0 に等しい)を用いた。図 15 中には、平板がない場合の結果には、その目安として破線を付した。 $L/h=3$ の場合の実線で示した平均ヌッセルト数 Nu_m の値は、本実験のレイノルズ数範囲で、平板がない場合に比べて 9~12% 大きい。この増加は Nu_0 で代表される後方岐点付近のヌッセルト数および $\theta=90\sim110^\circ$ 領域の局所ヌッセルト数極大値が平板の設置により大きくなることに起因している。

$L/h=7$ においては、二つのすきま比の場合とも Nu_m と Nu_0 には平板設置の影響は明確にみられないが、後方岐点ヌッセルト数 Nu_0 値にはむしろ平板設置による低下が認められる。この傾向は、噴出口と円柱の距離がさらに大きい $L/h=10$ においても認められる。なお、この場合には平板位置により Nu_m および Nu_0 ともに低下していることが認められる。

5. 結 言

傾斜角度を一定に設定した 2 枚の平板を近接して設置した円柱へ二次元噴流を衝突させた場合の流れ場および円柱熱伝達について実験的に検討した結果、次のことが明らかになった。

(1) 最小流路幅が、平板の最小間隔 B か、あるいは円柱と平板間のすきま C であるかによって流れ場は著しく異なる。円柱と平板間のすきま C が最小流路幅 ($2C < B$) となる場合には、流れ場は C 値に影響され、 $C/D \leq 0.2$ の範囲において、円柱表面上の圧力分布は、 $\theta=90^\circ$ 付近で極大値、また円柱と平板間のすきまが最小となる $\theta=120^\circ$ 付近で極小値となる。これらの極値位置は、円柱まわりの流れの再付着と再はく離位置にそれぞれほぼ対応する。しかし、 $C/D \geq 0.3$ の場合には、前述の両極値は存在せず、流れ場が異なる。

(2) 円柱の局所ヌッセルト数 Nu_0 は、円柱と平板間のすきま C 値に強く依存する。すなわち、 $2C < B$

において、 $C/D \leq 0.2$ の範囲では、 Nu_0 は、 $\theta=60^\circ$ と $\theta=130^\circ$ 付近で極小、また $\theta=100^\circ$ 付近で極大となる分布形を示す。これらの極小と極大位置付近は、円柱まわりの流れのはく離と再付着位置にそれぞれ対応する。

(3) 噴出口短辺 h に対する円柱とノズル間距離 L との比が $L/h=3$ においては、円柱まわりの平均ヌッセルト数は、 $C/D=0.1$ のとき極大になり、平板がない場合に比較して約 9~12% 大きくなる。しかし、 $L/h=7$ および $L/h=10$ では、平均ヌッセルト数は平板のない場合に比べて明らかに大きくはならない。

本研究では検討できなかった平板傾斜角度や円柱径を変える場合についての検討は今後の課題としたい。

文 献

- (1) Schuh, H. and Persson, B., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **7** (1964), 1257.
- (2) 熊田・ほか 2 名, 機論, **38**-315 (1972), 2915.
- (3) 熊田・ほか 3 名, 機論, **40**-330 (1974), 471.
- (4) 熊田・ほか 3 名, 機論, **42**-362 (1976), 3269.
- (5) Sparrow, E. M. and Alhomond, A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **27**-12 (1984), 2297.
- (6) 蒔田・ほか 2 名, 機論, **54**-504, B (1988), 1938.
- (7) 蒔田・ほか 2 名, 機論, **54**-504, B (1988), 1946.
- (8) AliKhan, M. M., ほか 2 名, 第 17 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1980), 7.
- (9) 栗間・ほか 2 名, 機論, **54**-503, B (1988), 1736.
- (10) 白浜・ほか 2 名, 機論, **57**-542, B (1991), 88.
- (11) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., *J. Fluid Mech.*, **89**-1 (1978), 33.
- (12) Marumo, E., ほか 2 名, *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **6**-4 (1985), 241.
- (13) 島田・ほか 2 名, 機論, **51**-465, B (1985), 1490.
- (14) Figueiredo, A. R. and Viegas, D. X., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31**-1 (1988), 47.
- (15) 相場・ほか 3 名, 機論, **51**-463, B (1985), 866.
- (16) Aiba, S., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **107** (1985), 916.