円柱まわりの熱伝達に対するトリッピングワイヤの影響*
(流れに対して非対称に固定された場合)相 場 眞 也*¹

Heat Transfer around a Circular Cylinder with a Single Tripping Wire

Shinya AIBA

An experimental study was conducted on the heat transfer under the condition of constant heat flux around a circular cylinder with a single tripping-wire for various diameters, which was affixed at various positions from the forward stagnation point of the cylinder. The testing fluid was air and the Reynolds number Re , based on the cylinder diameter, ranged from 1.2×10^4 to 6.2×10^4 . Especially investigated are the relations between the heat transfer around the rear face of the cylinder and the flow of the near wake. It is found that the heat transfer around the rear face decreases with increasing of the length of the vortex formation region.

Key Words: Convective Heat Transfer, Circular Cylinder, Tripping Wire, Near Wake, Wake Width, Length of Vortex Formation Region

1. 結 言

円柱まわりの熱伝達を促進させる試みは古くは中村らによって行われている。直径 26.8~28 mm の円柱に高さ 6~14 mm の 1, 2 枚のひれを種々の角度に取付けた研究を行っているが⁽¹⁾, ひれの高さが高いため、流れからの汚れの問題が避けられない。また、Johnson らは同様の目的で、切欠きのある伝熱促進体を円柱表面に取付けた研究を行っているが⁽²⁾, 上で指摘した難点がある。一方、著者は以前境界層厚さのオーダのトリッピングワイヤ(以下 T.W.と省略する)による円柱まわりの熱伝達の測定を行っている。すなわち、前方岐点から $\pm 65^\circ$ の位置に 0.12 mm ϕ の 2 本の T.W.を対称に固定し、レイノルズ数を $1.2 \times 10^4 \sim 5.2 \times 10^4$ の範囲で変化させ熱伝達特性を明らかにした⁽³⁾。

比較的最近、藤田らは円柱まわりの伝熱特性に及ぼす T.W.の効果について、T.W.の取付角 θ_T , T.W.の直径 d_0 を変えて組織立った研究を行っているが⁽⁴⁾, レイノルズ数の影響は明らかにされていない。また、円柱の熱伝達特性に及ぼす T.W.の効果は従来の

bluff-body の流れ特性と熱伝達特性との関係を変えるものではないとしている。しかしながら、従来、bluff-body の一般的特性と考えられている一つに後流幅が広いと円柱背面の熱伝達が低下する性質があることが知られているにもかかわらず⁽⁵⁾, 藤田らの結果は逆の傾向を示しているなど、なお、T.W.を有する円柱まわりの伝熱特性には不明な点が存在している。

以上のような背景から、円柱まわりの熱伝達に対する T.W.の効果をより明白にするとともに、熱伝達の促進と同時に 2 本の T.W.の場合より流動抵抗の減少を図る目的で、円柱の片側のみに T.W.を取付け実験を行った。T.W.は 0.12, 0.33, 0.55, 1.1 mm の 4 種類を用い、種々の角度に T.W.を取付け、レイノルズ数 $Re = 1.2 \times 10^4 \sim 6.2 \times 10^4$ の範囲で変化させて測定を行い、特に円柱背面の伝熱挙動を近傍後流の流れ場、温度場の測定結果から明らかにしようとしたものである。

主要記号

C_p : 圧力係数 $= (P - P_\infty) / (1/2) \rho U^2$

d_0 : トリッピングワイヤの直径

D : 円柱直径

D_w : 後流幅

* 原稿受付 平成 2 年 7 月 18 日。

*¹ 正員、秋田工業高等専門学校 (〒011 秋田市飯島文京町 1-1)。

- h : 熱伝達率
 k : 背圧パラメータ
 l_f : 渦形成領域の長さ
 Nu : ヌッセルト数 $= hD/\lambda$
 P : 静圧
 Re : レイノルズ数 $= U_\infty D/\nu$
 t : 温度
 T : 無次元温度 $= (t - t_\infty)/(t_f - t_\infty)$
 U : 速度
 $\sqrt{U^2}/U_\infty$: 乱れ強さ
 x : 流れ方向の長さ
 y : 流れに直角方向の長さ
 θ : 角度
 θ_r : トリッピングワイヤの取付位置
 λ, ν, ρ : 空気の熱伝導率, 動粘性係数, 密度
添字
 f : 円柱前面
 m : 平均
 r : 円柱背面 ($\theta = \pm 180^\circ$)
 ∞ : 主流

2. 実験装置および方法

高さ 325 mm, 幅 225 mm のく形断面を試験部とする吹出し形風洞で実験を行った。図 1 に供試円柱の記号と座標系を示してある。円柱を試験部に設置した状態における主流乱れは 0.7% 程度である⁽³⁾。円柱直径 D は 25.4 mm であるのでブロック比は 0.08 である。T.W. は取付角 $\theta_r = 0 \sim -90^\circ$ の範囲で主に実験が行われた ($-90 \sim -180^\circ$ に取付けた場合は滑面円柱の結果とほぼ同一の結果を示した)。T.W. の直径 d_0 は前述のように, 0.12, 0.33, 0.55, 1.1 mm の直径のナイロン糸を用いている。熱伝達の測定は, アクリル樹脂管に厚さ 50 μm , 幅 20 mm のステンレフはくをスパイラルに 7 巻きし通電加熱して行った。アクリル樹脂管の内部は発泡ウレタンフォームを充てんしてある。円柱表面温度はステンレフはくの裏面に, 0.065 mm ϕ の銅-コンスタンタン熱電対を 10° ごとに埋め込み測定した。圧力分布は 0.5 mm の圧力孔を有する熱伝達測定用円柱とは別の円柱を用いて測定した。また, 円柱後流の速度場は直径 0.005 mm の I 形熱線プローブにより直線化回路を有する熱線流速計で測定した。温度場は直径 0.065 mm の銅-コンスタンタン熱電対にて測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 局所熱伝達分布とその分類 図 2 に局所熱伝達率分布の一例を示す。 $Re = 5.16 \times 10^4 \sim 6.38 \times 10^4$ の結果で, 縦軸は $Nu_0/Re^{1/2}$ で整理し, 角度 θ による変化を示している。滑面円柱の結果 ($Re = 6.1 \times 10^4$) は破線で示してある。T.W. の取付角 $\theta_r = -20^\circ$, $d_0/D = 0.022$ の場合は滑面円柱 (以下, b.c. と略記する) の分布と類似している。取付位置 θ_r が -20° より上流側にある場合は T.W. の直径 d_0 によらず, このような傾向となる。ただし, d_0 が大きいほど, 取付位置付近の Nu_0 がいくぶん低下する。このことは円柱軸に対称に 2 本の T.W. を取付けた藤田らの結果⁽⁴⁾ と同一である。また, Re 数が小さい範囲や小さい直径の T.W. の場合は b.c. の結果に類似してくる。具体的なことは後述することにし, b.c. に類似する分布を示すものを以後パターン I と称することにする。次に, $\theta = -80^\circ$ 付近に極大値を示す, $\theta_r = -45^\circ$ の結果 (Δ 印) について記述する。これは T.W. から直接はく離れた流れが, この付近に再付着するためで, もちろん円柱上下に T.W. を置いた藤田らの結果でも認められている⁽⁴⁾。T.W. を置かない上側の熱伝達率分布は, b.c. の場合とほぼ同一である (円柱背面の熱伝達率がいくぶん低下するが)。このような分布が現れる範囲は比較的狭く, $\theta_r = -20$

図 1 座標系と記号

図 2 局所ヌッセルト数分布の例

～ -65° であり、 d_0 が小さいほど下流側にシフトする。また、 Re 数が小さいとピーク値は低下し(図3)、範囲は狭くなる傾向を示す(図6参照)。さらにまた、 d_0/D がある大きさ以上でないと明確に現れなくなる。このようなパターンをIIと称することにする。このパターンの特徴はT.W.以降に Nu_θ の鋭いピークが現れることであるが、このピーク値は $d_0/D, Re$ が一定であれば θ_T によっても変わる(図7参照)。

▽印で示してあるパターンIIIは円柱前面ではb.c.とほぼ同一の挙動を示す(ただし、取付位置前後でいくぶん熱伝達率が低下する)が、円柱背面でb.c.の場合と比較して熱伝達率が大きくなっている。ここで、注目すべき点はT.W.のない側の熱伝達も向上していることである。特に、 $\theta > 80^\circ$ 以降において顕著である。しかし、 Re 数が小さいと円柱背面の熱伝達率は図ほど大きくはならない(図4)。したがって、パターンIII

図3 パターンIIにおける Nu_θ - Re 数の変化例

図4 パターンIIIにおける Nu_θ - Re 数の変化例

の定義を明確にしておく必要がある。すなわち、円柱後方岐点($\theta = \pm 180^\circ$)の熱伝達率が前方岐点のそれを上まわる場合をパターンIIIと称することにする。したがって、 Re 数が小さいとIIIのパターンはこの研究で扱った実験範囲では生じない場合がある。

図5はパターンIIとパターンIIIの各場合($d_0/D = 0.022, Re = 5.1 \times 10^4$)の代表的な圧力分布を示したものである。 $\theta_T = -45^\circ$ の場合はT.W.の下流において、二つの極小値が存在し、これらの間にT.W.の上端からはく離れた流れの付着による極大値が存在している。このピークは図2に示した局所熱伝達率分布のピークの位置と一致している。また、円柱自身から流れがはく離する位置(下側の)は、藤田らの結果と同様b.c.の場合よりかなり下流であることがわかる(はく離点の位置 θ_s の決定は藤田ら⁽⁴⁾と同様に行うと、 $\theta_s \sim -110^\circ$ である)。また、背圧は滑面円柱の場合より高くなっており、T.W.をおかない側にも及んでいる。

パターンIIIに対応する $\theta_T = -60^\circ$ の場合は円柱上側ではb.c.の分布に類似している。しかし、円柱下側ではT.W.から流れが直接はく離するため、 θ が -60° より下流で、b.c.の C_p より小さい値を示しているが形状抵抗係数 C_D はb.c.のそれ($C_D \sim 1.2$)よりやや大きい程度で1.27となっている。

図6(a)～(c)には熱伝達率分布のパターンI, II, IIIの分類に関する Re 数による変化の例を示してある。 $Re = 2.2 \times 10^4$ の場合 $d_0/D = 0.013$ ($d_0 = 0.33\text{mm}$)、 $\theta_T = -50 \sim -55^\circ$ でIIのパターンが現れ始め、 $d_0/D \geq 0.022, \theta_T = -30 \sim -50^\circ$ 近傍で明確になる。この Re 数では d_0/D が大きくともIIIのパターンは認められなかった。 Re 数がこれよりさらに小さいとIIの領域は縮小し、例えば $Re = 1.2 \times 10^4$ では、 $d_0/D = 0.044$ の場合でも、 θ_T の範囲は $-40 \sim -50^\circ$ であり、 $d_0/D \leq 0.022$

図5 圧力分布

図 6 パターンの Re 数による分類の変化 図 7 $Nu_p, Nu_r - \theta_r$ の関係 図 8 $Nu_p, Nu_r - Re$ の関係

ではIIのパターンもみられない。図6(b)に示してあるように、 $Re = 3.1 \times 10^4$ ではIIの領域が $d_0/D = 0.005$ まで拡大し、IIIのパターンも $d_0/D > 0.022$ で認められるようになる。 $Re = 4 \times 10^4, d_0/D = 0.005$ の場合は、 $\theta_r = -50 \sim -65^\circ$ の範囲に拡大し、しかも $d_0/D > 0.022$ では $\theta_r = -20^\circ$ とかなり上流側で観測されるようになる。図6(c)の $Re = 5 \times 10^4$ では特に $d_0/D \leq 0.022$ でIIの領域が拡大している様子がわかる。さらに、IIIの領域もまた図6(b)の場合より広がっている。 $Re > 5 \times 10^4$ では図6(c)の場合とあまり変わらない。図6(c)には藤田らの結果も比較のため、破線でIIの領域を示してある。本実験の場合と同一の Re 数であるが、IIの領域の出現が比較的下流で生じている。この相違はT.W.の固定の条件による。なお、図6の各パターンの接する部分では $\theta = 5^\circ$ 程度の幅で、パターンの遷移領域が存在する。

パターンIIの場合は藤田らも示しているように⁽⁴⁾、熱伝達が向上し、抗力係数も低下する。そこで、この場

合の局所熱伝達特性についてさらに付言する。図7は $d_0/D = 0.044, Re = 5.1 \times 10^4$ の場合における Nu_p と円柱背面の熱伝達率 $Nu_r(\theta = -180^\circ)$ とT.W.の取付角 θ_r の関係を示したものである。 $\theta_r \sim -20^\circ$ 近傍からパターンIIとなり、 $\theta_r = -45^\circ$ 付近で消滅する。しかも、 Nu_p の最大値が存在し、この場合は $\theta_r = -35 \sim -40^\circ$ 近傍にあることがわかる。また、 Nu_p と Nu_r には逆比例の関係が存在することも認められる。

図8は Nu_p, Nu_r と Re 数の関係を $d_0/D = 0.013$ の場合について示したものである。 $\theta_r = -45^\circ$ の Nu_p は、 $Re \sim 3 \times 10^4$ 近傍から顕在化し、 Re 数の増加とともに増加していることがわかる。 Nu_r は Nu_p が認められない $Re < 2.5 \times 10^4$ ではb.c.の Nu_r とほぼ同一であるが、 $Re > 2.5 \times 10^4$ では Re 数が増加しても Nu_r は増加しない領域が存在し、 $Re > 4 \times 10^4$ では再び Re の増加とともに Nu_r が増加する。同じ Nu_r でも $\theta_r = -65^\circ$ の場合はb.c.の Nu_r と同様に Re の増加とともに

に単調に増加していることがわかる(b.c.の Nu_r より最大20%程度大きい値となる). $Re > 3 \times 10^4$ において, $\theta_r = -45^\circ$ の場合の Nu_r と $\theta_r = -65^\circ$ の Nu_r では, 最大60%程度の差異が生じている. 次に, この点に焦点を絞り, 円柱の近傍後流の流れ場, 温度場の測定結果を基に円柱背面の伝熱特性について述べる.

これまで二次元鈍頭物体の背面の熱伝達率 Nu_r は次式で表されるとされている⁽⁵⁾.

$$Nu_r = 0.10 \{2/(D_w/D)\}^{1/3} (kRe)^{2/3} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, D_w は後流幅, k は背圧係数 C_{pb} で次式のように与えられる背圧パラメータである.

$$k = (1 - C_{pb})^{1/2}, C_{pb} = (p_b - p_\infty)/(1/2)\rho U_\infty^2$$

ブロックage比が零のとき, 滑面円柱の場合の k は1.48, 無次元後流幅 $D_w/D = 1.02$ の値をとる⁽⁴⁾. 藤田らの実験によれば k は1.3~1.6であり, この変化による Nu_r の変化は比較的少なく, たかだか15%ほどである. 一方, 藤田らの Nu_r は $Re = 5 \times 10^4$ の場合で120から290まで変化している. したがって, 上式によって円柱背面の熱伝達特性が規定されるとすれば, この変化は D_w/D の効果ということになる. しかるに, 式(1)によれば, D_w/D が大きいほど Nu_r は小さくしなければならない. にもかかわらず, 逆の傾向を示している. すなわち, D_w/D が小さい場合(パターンIIに相当)のほうが, D_w/D が大きい場合(パターンIIIに相当)より Nu_r は大きな値をとっている⁽⁴⁾. したがって,

藤田らが推察しているごとく, T.W.を有する場合は一般に鈍頭物体の場合に成立するとされている式(1)のような関係は成立しない.

3.2 近傍後流の流れ場と温度場 図9(a)~(c)は熱線流速計を用いて測定した速度, 乱れ強さの分布の測定結果($Re = 5 \times 10^4$)を示したもので, 図9(a)は滑面円柱の場合を示したものである. 図9(b)はパターンIIに相当する場合の結果で, 速度欠損部の回復が図9(a)の場合より遅く, しかも, 後流幅が著しく狭いことがわかる($y/D > 0$ ではb.c.の場合と大差ないが, $y/D < 0$ で著しい). また, 乱れ強さの分布からは全般的に乱れ強さがb.c.の場合より小さな値を取っていることがわかる. 図9(c)はパターンIIIに相当する場合の結果で, 速度欠損部の回復がb.c.の場合より早く, さらに $y/D < 0$ で後流幅が, 図9(b)の場合より著しく広いことがわかる. また, 乱れ強さも図9(b)の場合より全般的に大きい(近傍後流の同一の位置において比較した場合). 図10は図9に示した乱れ強さの分布において, 各位置 x/D における乱れ強さ $\sqrt{U'^2}/U_\infty$ のピークとなる点を結んで表わした後流幅の変化を示したものである. 円柱軸より上側($y/D > 0$)では, b.c., $\theta_r = -45^\circ$ (パターンIIに相当), $\theta_r = -60^\circ$ (パターンIII)の各場合の差異は少ない. しかし, 円柱軸より下側($y/D < 0$)ではT.W.の効果が明りよ

図9 速度分布と乱れ強さの測定例

うにあらわれていることがわかる。 $\theta_r = -45^\circ$ の場合は、後流幅 $D_w/D = 0.96$ ($x/D = 1.0$ で定義) と、他と比較して著しく狭く、しかも渦形成領域の長さ l_f/D (後流幅が最も狭い場所で定義) が他の場合より大きく約 1.9 程度である。b.c. の場合はこの渦形成領域の長さ $l_f/D = 1.75$ 、後流幅 $D_w/D = 1.08$ であり、 $\theta_r = -45^\circ$ の場合より後流幅は広い。 $\theta_r = -60^\circ$ の場合 (パターン III に相当) は後流幅 $D_w/D = 1.15$ と広く、 l_f/D は約 1.45 と三者のなかでは最も小さい結果となっている。一般に渦形成領域の長さが増加すると、円柱背面の圧力係数の増加をもたらす⁽⁶⁾。事実パターン II では C_{p0} が大きい。前述のように後流幅が狭いと熱伝達が向上するという従来の考え方があるが、それ以上に l_f/D が大きいと熱伝達率は向上しない。III のパターンでは D_w/D が大きいにもかかわらず l_f/D が小さいことが Nu_r の増加に寄与しているものと考えられる。一方、円柱背面の熱伝達は、主流から連行された流れが伝熱面に達し、熱移動が行まわれることから、円柱背面に近づく流れの温度分布の挙動を知ることは重要である。

図 11 は $Re = 5 \times 10^4$, $x/D = 1.0$ の断面における温度分布を示したものである。温度 T は次式のように定義している。

$$T = (t - t_\infty) / (t_f - t_\infty)$$

ここで、 t_∞ は主流温度、 t_f は円柱前方岐点 ($\theta = 0$) の温度である。b.c. の結果 (Δ 印) は x 軸に対称で、 $\sqrt{U^2}/U_\infty$ のピークの位置と T のピークの位置はほぼ一致している。 $\theta_r = -45^\circ$ の場合は $y/D > -0.5$ の範囲で、b.c. の場合より温度が高い。しかし、b.c. の場合と同様 $\sqrt{U^2}/U_\infty$ のピークの位置と T のピークの位置は大体一致している。しかし、パターン III に相当する $\theta_r = -60^\circ$ の場合は、前二者と著しく異なり、円柱軸の上側、下側とも T のピークの位置は、 $\sqrt{U^2}/U_\infty$ のピークの位置より、円柱軸側に存在している。また、前二者より温度が低いことがわかる。以上のような近傍後流の流れ場と温度場との違いのほか、パターン III の場合は T.W. の上端から直接流れがはく離してしまうため、パターン II の場合に比較して伝熱面から受けとる熱量が少ない。したがって、円柱背面に連行される流れの温度が低い結果となる。逆にパターン II の場合は、 $\theta \sim -110^\circ$ 近傍ではく離していることと T.W. 以降で熱伝達が極めて大きいことから、近傍後流の温度がパターン III に比較して著しく高くなっている。このことも円柱背面の伝熱面温度にいくぶん影響を与えている。

図 12 は $Re = 5 \times 10^4$ の場合の流れ方向 ($y/D = 0$) の温度分布の測定例を示したものである。当然のことながら、円柱に近いほど温度が高く、円柱から離れるにしたがって急激に低下する。ただ、 $\theta_r = -45^\circ$ の温度が最も高く、 $\theta_r = -60^\circ$ の場合は b.c. の場合より低い結果となっている。また、いずれも円柱背面より急激に T が減少し、その後あまり変化しない領域が存在し、次にステップ状に T が低下し主流温度に近づく。このようにステップ状に温度が低下する少し上流側の位置 (矢印で示してある) が前述の渦形成領域の長さが相当している。このことは逆に渦形成領域の長さの簡便な測定に役立つことを示している。

3.3 円柱背面の熱伝達 3.2 節で述べたように、T.W. を有する円柱背面の熱伝達は $k, D_w/D$ よりも渦形成領域の長さ l_f/D が重要な因子である。そこで、 $Nu_r / 0.1 \{2 / (D_w/D)\}^{1/3} (kRe)^{2/3}$ を G とおき、これを縦軸にとり、 l_f/D による変化を示したものが図 13 であ

図 10 後流幅の変化

図 11 近傍後流における温度分布 ($Re = 5 \times 10^4$, $x/D = 1.0$)

る。図13に用いた実測値の一例を表1に示してあり(⊖, ⊕, ●印の結果), Nu_r は結局次式で与えられる。

$$Nu_r = 0.183 \{2/(D_w/D)\}^{1/3} (kRe)^{2/3} (l_r/D)^{-1.38} \quad \dots\dots\dots (2)$$

3・4 平均熱伝達率 図14は $\theta_T = -45^\circ, d_0/D = 0.022$ の場合における平均ヌセルト数 Nu_m の Re 数に対する依存性を示したものである。円柱の上半分($\theta = 0 \sim +180^\circ$) すなわち T.W.を置いていない側と T.W.のある下半分($\theta = 0 \sim -180^\circ$)の結果を b.c.の結果とともに示してある。 $Re = 2.5 \times 10^4$ 付近で Nu_m の変化の挙動がいくぶん変わるの、図8に示したように円柱背面の熱伝達率の変化に影響されていることによるものである。T.W.のない上側の結果は、b.c.のそれとあまり変わらないが、T.W.のある下側では最大30%程度 b.c.の結果より Nu_m は増大している。したがって、円柱全体では15%程度の向上が見込めることを示している。一方、パターンIIIに属する $\theta_T = -60^\circ$ の例を図15に示してある。この場合は図14に示した場合と異なり、T.W.をおかない上半分でも、下側とほぼ同じ程度熱伝達率が向上している(最大20%程度で、これは2本のT.W.を有する藤田らの結果と同程度で

ある)。3・2節で述べたようにこれは、円柱背面での主流の連行がT.W.をおかない側の円柱背面にも影響を及ぼして、熱伝達を向上させているからである。

4. 結 言

1本のトリッピングワイヤを流れ方向(x 方向)に対して非対称に円柱に取付け、その位置 θ_T 、トリッピングワイヤの直径 d_0 および Re 数を変えて、円柱まわりの熱伝達特性(特に円柱背面)について検討を加えた。実験範囲で得られた主な結果は次のようである。

(1) 熱伝達分布のパターンを3種類に分類し T.W.の直径、取付角度、レイノルズ数によるパターンの変化を図6のように明らかにした。

(2) パターンIの場合は滑面円柱の熱伝達分布と

表1 $Nu_r, D_w/D, k$ の測定例

	b. c.	$\theta_T = -45^\circ$	$\theta_T = -60^\circ$
Nu_r	190	170	260
D_w/D	1.08	0.96	1.14
k	1.52	1.45	1.55

図12 後流の流れ方向の温度変化 ($Re = 5 \times 10^4, y/D = 0$)

図14 Nu_m - Re 数の関係(パターンIIの例)

図13 G - l_r/D の関係

図15 Nu_m - Re 数の関係(パターンIIIの例)

あまり変わらない。また、パターンIIの場合はT.W.の下流にT.W.からはく離れた流れが付着し、熱伝達を局所的に増加させる。しかし、T.W.をおかない側の熱伝達分布は滑面円柱の場合とあまり変わらない。パターンIIIの場合はT.W.のある側はもちろん、T.W.のない側においても円柱背面の熱伝達分布が滑面円柱の場合と著しく異なり、熱伝達が向上する。

(3) T.W.を有する円柱背面の伝熱特性は後流幅や背圧パラメータ以上に渦形成領域の長さに影響される。

(4) 円柱全体の平均熱伝達率はパターンIIでは最大15%、パターンIIIではT.W.のない側もある側と同

じ程度に熱伝達が向上し最大20%増加する。

終わりに、この研究に協力された本校元学生 三村 創、宮田岳志、近藤宏之の各氏に対し心からなる謝意を表す。

文 献

- (1) 中村・ほか2名, 機論, 22-116, 第2部, (1957), 253.
- (2) Johnson, T. R. and Joubert, P. N., *Trans. ASME, Ser. C*, 91-1(1969), 91.
- (3) Aiba, S., ほか2名, *Wärme Stoffübertrag.*, 12(1979), 221.
- (4) 藤田・ほか2名, 機論, 51-464, B(1985), 1334.
- (5) 例えば, 五十嵐, 機論, 49-439, B(1983), 656.
- (6) 有江・ほか4名, 機論, 46-408, B(1980), 1427.