

Tripping wire を有する円柱まわりの 強制対流熱伝達の挙動について

相 場 真 也・土 田 一

Heat Transfer around a single cylinder
with thin tripping wire in cross flow

Shinya Aiba and Hajime Tsuchida

(昭和51年10月29日受理)

- 記号 C_p ; 円柱表面圧力係数 $(P-P_\infty)/(\frac{1}{2}\rho U_\infty^2)$
 d ; 円柱直径
 h_θ ; 局所熱伝達率
 I ; 電流
 Nu ; ヌセルト数
 Num ; 平均ヌセルト数
 P ; 円柱表面静圧
 Red ; レイノルズ数 $U_\infty \cdot d/\nu$
 S ; 加熱面積
 T ; 温度
 U_∞ ; 主流速度
 \bar{u} ; 速度
 $\sqrt{\overline{u'^2}}$; $r \cdot m \cdot s$ 乱れ
 $\sqrt{\overline{u'^2}}/U_\infty = Tu$; 乱れ強さ
 V ; 電圧
 x ; 円柱中心から下流方向への水平距離
 y ; 円柱中心から主流に直角方向の距離
 δ ; 円柱表面に対する垂直距離
 θ ; 角度
 λ ; 熱伝導率
 ν ; 動粘性係数
 ρ ; 密度
 添字 ∞ ; 主流
 w ; 壁

1. 緒 言

従来より円柱まわりの熱伝達に関する研究は数多くあり^{(1)~(4)}、引続いて種々の角度より研究がなされている^{(5)~(7)}が、未だ不明の点が残されているようである。それは、はくり点以降の流れが複雑(非ポテンシャル、ローテーションでしかも流れが非定常的な性格がある)

であることにもよるが、多数の研究者によって得られたデータ間にかかなりの相異があることもその原因の一つになっている。その相異の主なものとは風洞特性(主流乱れ)、テストピースに対する wall effect(主にブロックージ比)の違い、表面粗さの仕上げ程度、熱損失の見積り、主流温度の変動によるデータの不正確さなどが挙げられる。

単円柱の熱伝達は流体の物性値であるプラントル数と Re 数(主に直径円柱に基づく)の関係で整理され、これまでの研究のほとんどが臨界領域以前の亜臨界域のものである。臨界域あるいは超臨界領域の実験は大規模な設備を必要とするかブロックージ比が大きい形でしか行えないことがこれらの領域の研究があまり多くない原因と考えられる。

従前より主流に乱れを与えよるとか、円柱のはくり点近傍に tripping wire を取付けることにより比較的低 Re 数で臨界域、超臨界域の流れを実現出来ることはよく知られている。一方、円柱表面に凹凸をつけることにより熱伝達の向上を計ることは古くから行われていて、極端な場合がフィン付円柱等の形となって実際のな面で用いられている。これらの場合は大体境界層より粗面の頂が飛び出している形態が多く熱伝達も向上するが、流体力学的抵抗もそれに比例して増大するというのが普通のものである。

Schmidt & Wenner の報告⁽¹⁾にみられごとく、直径100 mm の円柱に 1.5 mm ϕ の tripping wire を前方よどみ点より $\pm 75^\circ$ の位置に取りつけて実験を行っている例もあるが、wire は境界層より飛び出していて境界層の制御という点からは若干はずれているように思われる。また、Achenbach は円柱表面に pyramidal surface-roughness になるようにネットをはりつけ熱伝達の実験⁽⁶⁾を行っているが、流れとの関連に於いて完全に臨界、超

界領域の解明がなされたとは云えないように思われる。さらにブロック比も 0.167 と比較的大となっていることからその効果と roughness のそれと重畳しているようにも思える。

著者等は、これらの領域の熱伝達と流れの関係をより詳細に調べる目的で、円柱の前方よみ点より $\pm 65^\circ$ の位置に、その位置の境界層内に埋没するような細線をはり、熱伝達、圧力、速度及び乱れの分布の測定を $Red = 1.5 \times 10^4 \sim 5.20 \times 10^4$ の範囲で行い検討を加えた。

2. 実験装置

実験は高さ 325mm, 巾 225mm の測定断面を有する風洞 (絞り比 5.0) にて行われた。主流乱れ, $\sqrt{u'^2}/U_\infty$ は実験を通して最大 0.7% 程度であった。

熱伝達は直径 26 mm ϕ の塩化ビニールパイプに厚さ 0.05mm, 巾 20mm のステンレス箔をスパイラルに巻きつけ、通電加熱して測定を行った⁽⁹⁾。パイプ内は軸方向の熱伝導の損失を極力押えるため、ウレタンフォームを充填した。損失はこの他表面からのふくしゃ及びヒーターへのリード線からのものがあるが、これらの総量は 1% 以下であった。tripping wire (以下 T, W と略称する) は前方よみ点から $\pm 65^\circ$ の位置に 0.1mm ϕ の釣糸を円柱軸と平行に張った。この実験範囲の Re 数では wire はこの位置での境界層内に埋没している状態である⁽⁹⁾。なお, Nu 数は次式で定義されている。

$$h_\theta = V \cdot I / (T_w - T_\infty) \cdot S$$

$$Nu_\theta = h_\theta \cdot d / \lambda$$

圧力分布の測定は合成樹脂を成形した外径 26mm の円柱に 0.5mm ϕ の測定孔を 8ヶ所にあけ静圧を測定することによって行った。また、テストピースは軸のまわりに回転出来るようにされている。

乱れ、速度分布の測定は 0.05mm の直径のタングステンホットワイヤーを円柱軸と平行になるようにして測定した。T, W は熱伝達と同様の直径のものが同位置に固定されている。なお、圧力分布、流れ場の速度、乱れ分布の測定は供試円柱を非加熱の状態で行った。

3. 結果と検討

3.1 熱伝達

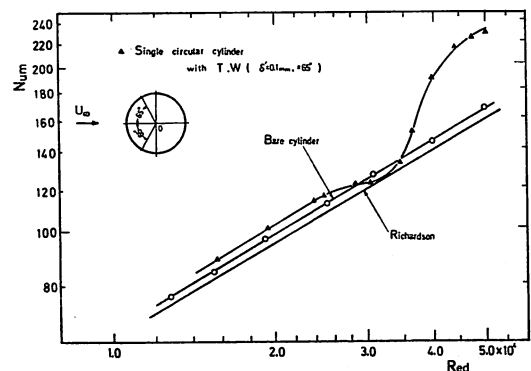
tripping wire (T, W) なしのテストピースにより、実験精度を確かめるため熱伝達の実験を行った。図 1 は従軸に平均ヌセルト数 Nu_m をとり、横軸に Re 数をとっている。他者との比較のため Richardson の結果⁽⁴⁾をも併せ示した。彼の結果より数%高い値を示しているものの、著者等のそれは風洞壁の効果を修正していないこ

とを勘案するとほぼよい一致を示していると考えてよい。

図中には、さらに、T, W をつけた場合の平均ヌセルト数の変化を示している。 $Red \leq 2.7 \times 10^4$ では、単円柱の場合より数%高い値となっているが、単円柱と同じ勾配で Re 数に対して直線的に変化している。この領域は T, W の効果が比較的少く、亜臨界域での単円柱の伝熱機構と大差ないと考えてよい。以後、この領域を subcritical region (sbc 領域と以下略記する) と呼ぶことにする。Re 数が上記領域を越えると Re 数により Nu 数が変化しない領域をへて、単円柱の Nu 数に比し 35~40% も高い値を示す領域が現出する。この増加は図 2 に示されているように、主に円柱後方の熱伝達の特性的変化によるものである。これは後述するように、T, W の取り付けにより、超臨界領域に近い流れが円柱まわりにもたらされた結果である。この領域を super critical region (以下 spc 領域と略称) と称することにする。sbc 領域から spc 領域への遷移領域は以下に述べるように臨界領域に近い流れの挙動を示す事から critical region (以下 c 領域と略記) と称することにする。次に、各領域の伝熱特性について詳述する。

sbc 領域 ($Red \leq 2.7 \times 10^4$) に於いては、前述の如く本質的には単円柱の亜臨界域の伝熱特性と大差ないが、T, W の取り付けにより図 2 に示す如く、円柱前面の熱伝達が若干悪く後方で単円柱のそれより良くなっている。前面が悪くなっている理由は wire が境界層を持ち上げて厚くする結果で、後方で良いのは wire の存在がウエーク中の流れにある種の攪乱を与える結果によるものと考えられる。

単円柱の場合の臨界領域は風洞特性にもよるが、 $Red = 10^5$ 以上で現われるのであるが、T, W の取り付けによりこの実験では大体 $Red = 2.8 \times 10^4$ でこの領域に近い流れになったことになる。図 2 にみられるごとく、この領



図—1

域では円柱前面に於いて単円柱の熱伝達より悪く、しかも後方に於いても単円柱のそれと大差ない。sbc, spc の領域では円柱前面では単円柱のそれより若干低めの値となるが、ほとんど大差ない程度でありながら、後方でかなり高い値となっているため平均ヌセルト数でも単円柱のそれより大きい値となっていた。よく知られているように、単円柱の臨界 Re 数では円柱後方に Separation bubble が形成される。この場合に於いても、それに似た流れが形成されその影響により以上のような結果になったものと思われる。流れとの関連については 3.2, 3.3

で再度述べることにする。

spc 領域では $\theta=70^\circ$ 近傍から同一の Re 数の単円柱に比し、急激に大きな Nu 数になり、 $\theta=120^\circ$ 附近に極値をもち $\theta=180^\circ$ まで増大している。Schmidt & Wenner⁽¹⁾ によると、高 Re 数になると乱流はくり点 ($\theta=115^\circ$) 附近で Nu 数の極大値があらわれることを報告しているが、この場合も彼等と似た結果となっている。

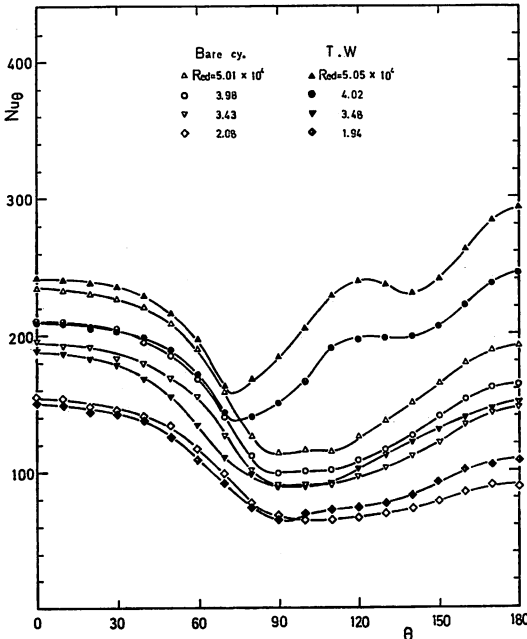
円柱前方、後方よどみ点の Nu 数の Re 数に対する変化を図 3 に示したが、前記 3 領域の伝熱特性をより明確にあらわしていることがわかる。

3.2 速度分布, 乱れ分布

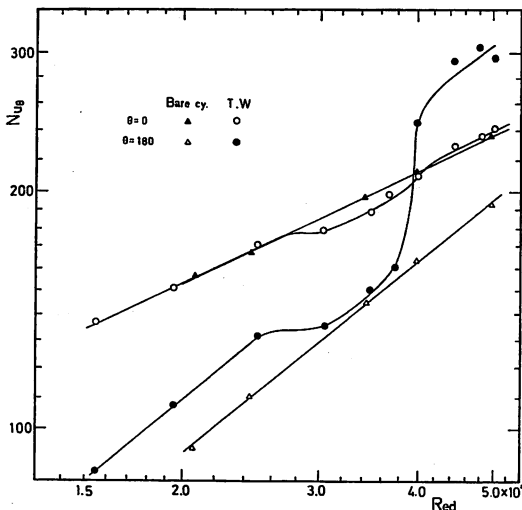
鈍頭物体後方の領域の如き低速度、高乱れの場合での速度、乱れの測定には種々問題があり難かしいとされているが、熱伝達と流れの関係を定性的に知る目的に対しては、ホットワイヤーアネモメーターによる方法は有効であると考えられる。

図 4 は単円柱に T.W を付けた場合のウェークの速度、乱れ分布を示したものである。測定位置は円柱中心から後流方向に $x/d=1.0$ のもので near wake と呼ばれる領域の中に入る。流れの方向の修正は両分布とも行っていない単なるアネモメーターの読みから無次化して示したものである。図でわかるように、sbc 領域の速度、乱れ分布は c 領域のそれと大差ないが、後者の領域に入っている $Red=3.13 \times 10^4$ の場合のウェークの巾が $Red=2.35 \times 10^4$ のそれより若干広がっていることが注目される。このような事実は $x/d=0.77$ でも認められた。なお、ウェークの巾の定義は文献⁽⁴⁾により行った。 $Red=4.81 \times 10^4$ の場合は前 2 者と比較してその分布が非常に異なり（若干円柱中心を境にして非対称が出ているものの……）、しかも、ウェークの巾が極端に狭くなっている。このことは 3.1 で述べた如く、はくり点が円柱後方につれ込んでいる結果を示し、超臨界領域に近い流れが円柱のまわりに存在していることを示す根拠の一つと考えた。

図 5 は円柱まわりの速度、乱れの分布を示したものである。測定は円柱軸と平行になるようにホットワイヤーを円柱表面に対して垂直に $\delta=0.5\text{mm}$ の距離でトランプして行ったものである。 $\theta=65^\circ$ の位置に T.W があがあるため、境界層が若干ふくらんで $\theta=60^\circ$ 附近に速度の陥没がみられるがいつれの Re 数に於いても、前方よどみ点から θ が増すにつれて速度が増加している。ポテンシャル流れの場合は理論的には $\theta=90^\circ$ で $U_\theta/U_\infty=2$ となるはずであるが、最大でもこの場合は 1.2 程度である。 $Red=2.25 \times 10^4$, 3.12×10^4 の場合は $\theta=90^\circ$ 附近から、 $Red=4.79 \times 10^4$ の場合は $\theta=115^\circ$ から θ が大になるにしたがって低下している。乱れ強さについては $\theta=$



図一 2



図一 3

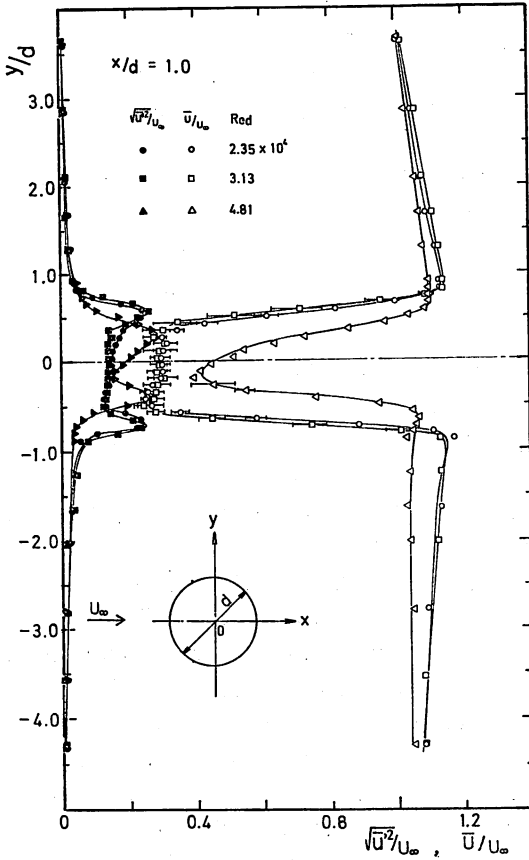


図-4

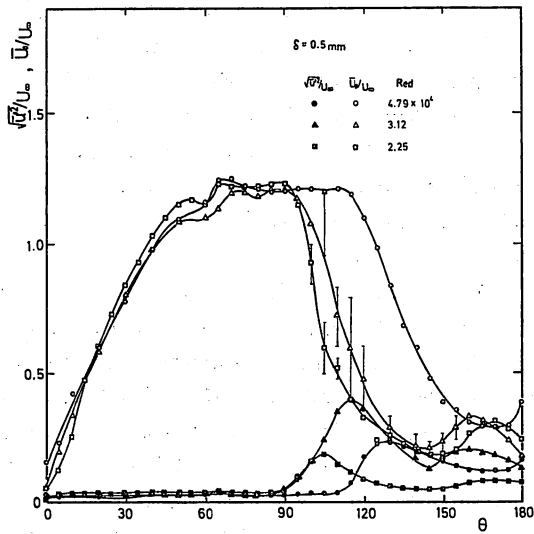


図-5

0° からこれらの速度が急に小になる位置までは数%以下で推移しているが、これらの角度で急に大きな値になり始めている。すなわち、この位置では、はくりが生じ、

プローブが低速、高乱れ領域すなわちウエーク内の値をとらえ始めていることを示している。Red=2.2×10⁴、3.12×10⁴ の場合は層流はくりが90° 附近、Red=4.79×10⁴ の場合は乱流はくりがθ=115° 近傍で生じているものと理解される。また、Red=3.12×10⁴ の場合はとくにこのはくりに降の速度変動が激しい。Red=4.79×10⁴ の場合は、T・W 以降乱流境界層に遷移し(θ=65°~θ=115° まで U_θ/U_∞ が高い値を示していること、 Nu_θ が大であったことから)、その後乱流はくりにしているものと考えられる。

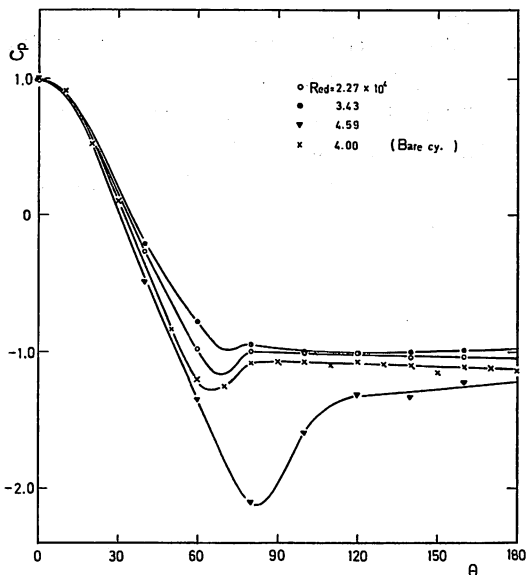
3.1 で述べたように、この領域での熱伝達の分布に於いて、この角度の近傍で極大値をもっていた。θ=115° 附近から後方よどみ点まで他の Re 数の場合と比較して若干大きな速度となっているが、乱れ強さは特別大となっていないことに注目しておく必要がある。

3.3 圧力分布

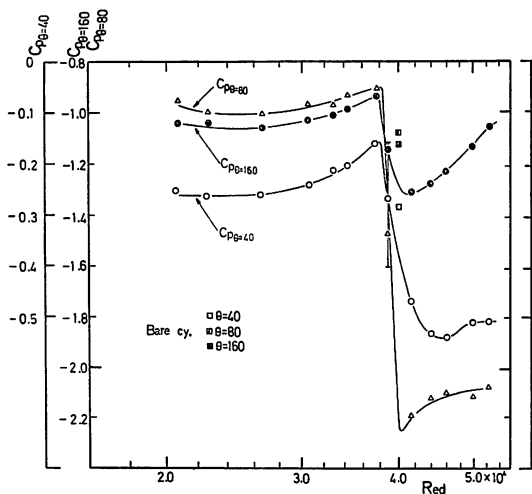
図6に圧力分布の測定例を示す。単円柱の分布は亜臨界領域の一般に知られている結果に極めて近く抗力係数は1.12であった。T・Wを有する場合の分布はRe数によって変化するが、Red=2.27×10⁴、Red=3.43×10⁴ の場合は全周にわたって単円柱のそれより高いC_pを示し逆にRed=4.59×10⁴ のそれは低い値となっている。c領域に於いて、円柱前面の熱伝達が単円柱のそれより低い値になったことは3.1で述べた通りであるが、この圧力分布からより明確にその理由が了解される。円柱後方(θ=90°~140°)の分布が若干凹型になっていること、3.2で述べたようにウエークの中がsbc領域のそれより広がっていること、速度分布の測定で層流はくりに降の速度変動が非常に大であったことはこの附近に separation bubble に近い流れが存在していることを示している。この bubble により円柱前の層流境界層が厚くされ、円柱前面の熱伝達を悪化させたものと考えられる。このことは円柱前面の静圧分布が他の Re 数、単円柱の静圧分布と比較して高いものになっていることから裏付けられている。

sbc領域の場合もT・Wの影響により円柱前面での静圧は単円柱の場合よりも若干大となっていることからやはり表面に沿う流れが単円柱のそれより小であることが予想される。このような傾向はSchmidt & Wenner⁽¹⁾の熱伝達の実験に於いて単円柱の前面の熱伝達より、T・W付の円柱前面のそれが悪くなっていることが認められることからこの予想の正当性を裏付けていると解釈される。

spc領域の場合は全周にわたって単円柱のそれよりC_pが低い値になっていて、とくにθ=80°近傍に於いて著し



図一6



図一7

い。また、 $\theta=115^\circ$ 附近にはくり点の特徴が認められ、前2領域の流れの構造とは完全に異なっていることがわかる。なお、図示していないが、c領域から、spc領域に移行するRe数では、この両領域にまたがるように大きくCp値が変動するのが各角度位置で観察された。

なお、図7に $\theta=40^\circ, 80^\circ$ 及び 160° の位置のCpのRe数による変化を示した。Red=3.80×10⁴附近でCp値が急変していることがこの図からも理解出来、流れの急変が推定されよう。

4. 総 め

tripping wire を円柱のはくり点近傍に取り付けるこ

昭和52年2月

とにより、比較的低数Reで単円柱の臨界領域に近い流れが実現され、その領域の流れと熱伝達の間係をかなり定性的に把握出来た。すなわち、 $Red \leq 2.7 \times 10^4$ では平均ヌセルト数が単円柱よりも若干大になるが、これはT・Wの存在により円柱前方では境界層が厚くされ、熱伝達が悪く、後方に於いてはその存在により円柱後方のウェークに対してある種の攪乱を与えて熱伝達を良くし、円柱全周では数%単円柱より増加させることがわかった。ただし、本質的にはこの範囲のRe数では単円柱の亜臨界領域の熱伝達の機構と大差ないものと思われる。

$2.8 \times 10^4 \leq Red < 3.8 \times 10^4$ ではT・Wの存在により、円柱後方($\theta=90^\circ \sim 140^\circ$)に separation bubble に近い流れが形成され、これが円柱前面の境界層をとくに厚くし、同時にウェークの巾を大にしている。その結果、円柱前方に於いては単円柱より熱伝達がかんり悪く、後方に於いてもウェークの巾の増大により他の領域のそれに比し、熱移動が不活潑になり、平均値ではRe数によっては単円柱より低い値さえ現われている結果をまねいている。

$Red \geq 3.8 \times 10^4$ では単円柱に比し、平均Nu数で35%~40%程度の増加になっていることが注目される。Achenbach⁸⁾は、超臨界領域の熱伝達の急増の原因として乱れを上げているが、乱れを実測していないことから未だ不明である。著者等の測定結果によると円柱後方の壁近傍の乱れ強さは前の2領域の結果と大差なく、速度がやや大であることだけは判明したが、この領域での熱伝達の増大の機構の解明は今後に残された大きな課題であると考えられる。

終りにこの実験を行うにあたり、実験装置の作成に協力して戴いた秋田高専機械工場の技官の諸氏に心から感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Schmidt, E., and Wenner, K., Forschung, 12, 1941, 65.
- (2) Van der Hegge Zienen, B.G., Applied Scientific Research, Section A, vol. 7, 1958, pp. 205~223.
- (3) Giedt, W. H., Trans. ASME. vol. 71, 1949, pp. 375~381.
- (4) Richardson, P. D., Chemical Engineering Science, vol. 18, 1963, pp. 149~155.
- (5) Petrie, A. M., International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.18, 1975, pp. 131~137.
- (6) Petrie, A. M., International Journal of Heat

- and Mass Transfer, vol. 15, 1972, pp. 1497~1513.
- (7) Boulos, M. I., and Pei, C. T., International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 17, 1974, pp. 767~783.
- (8) Achenbach, E., Proceedings of Fifth International Heat Transfer Conference, vol. 2, 1974, pp. 229~233.
- (9) Aiba, S., and Yamazaki, Y., Trans. ASME, vol. 98, 1976, pp. 503~508.
- (10) Schlichting, H., Boundary Layer theory, 6th Ed., p. 160. McGraw-Hill
- (11) 上田・田中, 機論, 41卷 350号 (昭50-10), 2853~2866.