わずかな傾き角のある長方形断面柱まわりの流動と熱伝達* (断面辺長比5の場合)

五十嵐 保*¹, 真弓 康次*²

Fluid Flow and Heat Transfer around a Rectangular Cylinder with Small Inclined Angle (The Case of a Width/Height Ratio of a Section of 5)

Tamotsu IGARASHI and Yasuji MAYUMI

Experimental investigations on the fluid flow and the heat transfer from a rectangular cylinder at an angle of attack to the air stream were carried out in the range of $2\,560 \leq Re \leq 12\,800$. The width/height ratio c/d of the section was 5.0 and the angle α ranged from 0 to 20°. At $\alpha=0^\circ$, the separated shear layers reattach to the upper and lower faces intermittently. At $\alpha \geq 5^\circ$, the lower shear layer reattaches on the lower face. The reattachment flow becomes turbulent, while the flow is laminar at $\alpha > 15^\circ$. The local heat transfer coefficients around the cylinder become clear in connection with the flow characteristics. The local heat transfers on the reattachment face, and the upper and rear faces are given by the same form as $Nu = CRe^{2/3}$. The constant C decreases with an increase in α at $\alpha > 5^\circ$. Finally, the maximum average heat transfer is obtained between 0 and 5°.

Key Words: Forced Convection, Heat Transfer, Rectangular Cylinder, Separation, Reattachment, Flow Visualization, Turbulence, Strouhal Number

1. ま え が き

一様流中におかれた長方形断面柱の空力特性は特定の辺長比 c/d で急変する。すなわち辺長比を増加させると $c/d=0.67$ で抗力係数が鋭い極値をとり、 $c/d=2.8$ および 6.0 付近でストローハル数が不連続的に増加する^{(1)~(3)}。五十嵐は $c/d \leq 4.0$ の長方形断面柱まわりの流れ特性⁽⁴⁾ および熱伝達⁽⁵⁾⁽⁶⁾、迎え角のある正方形柱まわりの流れ⁽⁷⁾ と熱伝達⁽⁸⁾ について報告した。辺長比が10以上の長方形断面柱はオフセットフィン形やルーバフィン形熱交換器の要素である。最近熱交換器の高性能化を目指して、実験および数値計算による角柱まわりの流れと熱伝達の研究が活発に行われている^{(9)~(13)}。伊藤⁽¹⁴⁾ によれば傾斜ルーバコルゲートフィンの最適ルーバ配置は傾き角 5° である。しかし流れと熱伝達の関連は明らかにされていない。

なお太陽熱の集光器に関連して傾斜した平板⁽¹⁵⁾ や辺長比4から10の長方形断面柱上面のはく離・再付着面の局所熱伝達特性の報告^{(16)~(18)} があるが、流れと熱伝達の関連は十分に議論されていない。

本研究では基礎データの蓄積を目的として、わずかに傾き角のある辺長比5の長方形断面柱まわりの流動と局所・平均熱伝達特性を調べた。特に再付着面におけるはく離・再付着流れと熱伝達の関連、はく離領域の熱伝達特性や変動圧力係数の関連についても従来の報告⁽⁶⁾⁽¹⁹⁾ と比較した。

記 号

C : 定数
 c, d : 長方形柱の流れ方向の辺長および厚さ
 Cp_b : 背圧係数
 Cp' : 変動圧力係数 $= \Delta p / 0.5 \rho U^2$
 d^* : 主流と直角方向の長方形柱の投影長さ
 d_w : 後流幅
 f : うず放出周波数
 h : 局所熱伝達率
 $\bar{h}, h_m$: 各面および全表面の平均熱伝達率
 Nu_x : 平板前面の局所ヌッセルト数 $= hX/\lambda$
 $\bar{Nu}, Nu_m$: 各面および全表面の平均ヌッセルト数
 $\bar{Nu} = \bar{h}d/\lambda, Nu_m = h_md/\lambda$
 $\bar{Nu}_b, \bar{Nu}_{bc}$: 背面の平均ヌッセルト数
 $\bar{Nu}_b = \bar{h}_bd/\lambda, \bar{Nu}_{bc} = \bar{h}_bc/\lambda$
 Δp : 変動圧力の rms 値

* 平成2年11月1日 熱工学講演会において講演、原稿受付
平成3年1月7日。

*¹ 正員、防衛大学校 (〒239 横須賀市走水 1-10-20)。

*² 学生員、防衛大学校理工学研究科。

Re : レイノルズ数 $Re = Ud/\nu$

Re_c, Re_x : レイノルズ数 $Re_c = Uc/\nu$, $Re_x = U_\infty X/\nu$

S, S^*, S^{**} : ストローハル数 $S = fd/U$, $S^* = fd^*/U$, $S^{**} = fd^*/U_s$

U, U_∞ : 主流速度, 境界層外縁の速度

U_s : はく離直後のせん断層速度 $= U\sqrt{1-C_p}$

$\bar{u}, \Delta u$: 時間平均速度, 変動速度の rms 値

X : 角柱の前方岐点または前縁からの距離

α : 傾き角

λ : 流体の熱伝導率

ν, ρ : 流体の動粘性係数, 密度

添字

f, s, b, R : 前面, 上面, 背面, 下面

m : 全表面

R, s : 再付着点, はく離点

2. 実験装置および方法

座標系と主要記号を図1に示す。実験は測定部断面 $400 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 長さ 800 mm の二次元吹出し低速風洞で行われた。長方形柱は辺長 $c = 50 \text{ mm}$, 厚さ $d = 10 \text{ mm}$ である。長方形柱の傾き角 α は $0 \sim 20^\circ$ まで変化させた。一様流速度は $U = 4 \sim 20 \text{ m/s}$, この範囲内で主流乱れはほぼ 0.4% である。したがって厚さ d を代表長さとしたレイノルズ数は $Re = Ud/\nu = 2560 \sim 12800$ の範囲である。まず煙風洞と油膜法による流れの可視化を行った。次に角柱上面の速度および乱れ

図1 座標系と記号

図2 伝熱模型の精度

分布をI形熱線流速計で測定した。また角柱背面の背圧係数と変動圧力係数および後流うずのストローハル数も求めた。伝熱用模型はアクリル製で全表面に厚さ 0.01 mm のステンレスはくを接着し, 両端に電極が設けてある。これを熱流束一定の条件で通電加熱した。壁温は壁面上 $2, 3 \text{ mm}$ 間隔に埋め込んだ $\phi 0.1 \text{ C-C}$ 熱電対で測定した。

熱伝達率測定の予備実験として, 長方形柱を流れに直交させて前面の層流熱伝達および背面のはく離域の熱伝達を測定した。得られた結果は図2に示すように従来の結果⁽⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾とよく一致した。伝熱模型の測定精度は 5% 以内であることが確認された。

3. 実験結果および考察

3.1 流れの可視化 爆風洞による長方形柱まわりの流れの可視化を図3に, 油膜法による表面流れの可視化の一例を図4に示す。長方形柱が流れと平行な $\alpha = 0^\circ$ の場合, 上下はく離せん断層が後縁近くの壁面に再付着(R)し前縁はく離泡が両面に形成されている。しかし, この再付着現象は定常的ではなく, 間欠的再付着である。またはく離泡内の逆流のはく離線(S)が明りょうに現れている。傾き角 $\alpha \geq 5^\circ$ では上側のせん断層は再付着しない。上下せん断層の幅, すなわち

図3 煙風洞による角柱まわりの流れの可視化

図4 油膜法による表面流れの可視化

後流幅 d_w は傾き角 α が增大すると拡大する。うず形成位置は $\alpha=15^\circ$ までは後退し、 $\alpha=20^\circ$ で前進している。下側のせん断層は定常的に再付着し、再付着点位置は傾き角 α の増大とともに前進する。下面の再付着位置 X_R は、はく離泡内のはく離位置 X_S および後流幅 d_w の傾き角 α による変化を図5に示す。 X_S は傾き角によらずほぼ $X_R/2$ であり、正方形柱の結果⁽⁷⁾と一致している。特に $\alpha=5, 10^\circ$ では再付着位置およびはく離位置が明りょうである。 α が増大するとはく離泡は次第に小さくなる。

3.2 速度分布および乱れ分布 長方形柱まわりの平均速度および乱れ分布を図6に示す。また最大乱れ度、すなわちせん断層中心の軌跡も点線で示した。 $\alpha=0^\circ$ の場合再付着点下流でも最大乱れ位置は壁面に平行で再付着が間欠的であることを裏づけている。最大乱れ度は20%を上回り、壁面近傍でも10~15%である。 $\alpha \geq 5^\circ$ では、上側せん断層と上面間のはく離領域は平均速度は $\bar{u}/U \leq 0.2$ のよどみ域となっている。下面の再付着点の下流は乱れ度20%を超えている。傾き角が増大すると、はく離泡が小さくなり乱れ度は減少する。 $\alpha=20^\circ$ では再付着流れは乱れ度1%以下の層流となる。

図5 後流幅と再付着点の傾き角による変化

図6 速度分布および乱れ分布

3.3 背圧係数と変動圧力係数 背面BCの中心の背圧係数と変動圧力係数ははく離領域の流動と熱伝達に密接に関連している⁽¹⁹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図7に示す背圧係数 C_{pb} の値は $0 \leq \alpha \leq 10^\circ$ 、 $15^\circ \leq \alpha$ の範囲で α に比例して増加している。このような背圧係数の減少は長方形柱の投影長さ d^* あるいは後流幅 d_w の増加と密接に関連している。また変動圧力係数 C_{pb}' の値は α の増加とともに急激に増加し、 $\alpha=5^\circ$ 前後で極大値をとった後激減し、 $\alpha > 10^\circ$ では $\alpha=0^\circ$ の値よりも減少している。この変動圧力の変化は背面BCからうず形成位置の距離の変化と関連している。すなわちうず形成位置が背面BCに最も接近する $\alpha=5^\circ$ で C_{pb} の値は極大値をとる。したがって、背面BCの熱伝達率は $\alpha=5^\circ$ のとき最大になることが予想される⁽⁶⁾。

3.4 ストローハル数 長方形柱の後流うず放出数の傾き角による変化を図8に示した。ストローハル数 S は傾き角 $\alpha \leq 5^\circ$ ではほぼ一定で、 $\alpha > 5^\circ$ では α の増大とともに減少している。このうず放出数の減少は長方形柱の投影長さ d^* の増大が主因と考えられる。そこで d^* を代表長さとした次式で定義されるスト

図7 背圧係数と変動圧力係数

図8 ストローハル数

ーハル数 $S^* = fd^*/U$ および再付着面のはく離せん断層の速度 U_s で定義される修正ストローハル数 $S^{**} = fd^*/U_s$ で整理した結果も図8に示した。 $\alpha < 10^\circ$ では S^* は α の増加とともに単調増加し、 $\alpha = 10 \sim 15^\circ$ ではほぼ一定値 0.19 をとっている。修正ストローハル数 S^{**} の値は傾き角 $\alpha = 5 \sim 20^\circ$ の範囲でほぼ 0.14 前後の値である。下面側では、前縁はく離せん断層は再付着流れとなり、下面後縁では $\alpha = 10^\circ$ 前後で乱流はく離から層流はく離となる。これが後流うず放出数に影響している。

3・5 局所熱伝達特性 局所熱伝達率分布の一例を図9(a)～(d)に示す。傾き角 $\alpha = 0^\circ$ の場合、前面の熱伝達率は背面の値を上回り、両面の熱伝達率の大小関係は辺長比4の場合⁽⁶⁾と逆転している。これは長方形柱の辺長比が4から5になると、再付着位置が後端近傍から上流側へ移動し、その後流の圧力・速度変動成分が急激に減衰し、背面の熱伝達率が著しく減少

するためである。上・下面は再付着領域 R で最大熱伝達率を示し、はく離泡内のはく離点 S のやや前方で最小熱伝達率を示している。なお熱伝達分布における最大値がなだらかなピークで、 $\alpha = 5 \sim 15^\circ$ の鋭いピークと対照的である。これは先述の間欠的再付着と定常的再付着の差異による。傾き角 α が増加すると、流れの岐点、すなわち前面の極大熱伝達率の位置は前縁 A に近づく。背面ではうず形成領域に最も近い後縁 C が高い熱伝達率を示し、背面 BC と上面 CD の後縁近傍が対称的な鋭いピーク値をとる。このピーク値は再付着点のピーク値とほぼ等しく、 $\alpha = 5^\circ$ では上回っている。傾き角 α による上・下面、すなわちはく離面と再付着面の熱伝達率分布の変化を図10に示す。はく離面では傾き角 α の増加とともにはく離領域が拡大し、うず形成領域が後退するため全領域で熱伝達率が低下している。再付着面の熱伝達率は傾き角が 0° から 5° になると、再付着領域とその上流側で増加している。 $\alpha =$

図9 局所熱伝達率分布

10° のとき前縁近傍の熱伝達率の変化は少なく、再付着領域の下流で著しく低下している。 $\alpha=15, 20^\circ$ では再付着点の極大熱伝達率およびその下流の熱伝達率がさらに低下している。この熱伝達率の低下は前縁 A からはく離せん断層の振舞いに関連し、図 6 に示したはく離泡の減少による再付着流の乱れ度の減少に起因している。 $\alpha=20^\circ$ の場合、正方形柱の場合⁽⁸⁾と同様、

図 10 局所熱伝達率分布の傾き角による変化

(a)

(b)

図 11 各面の平均熱伝達率

長方形柱の対角線 AC および BD に関して、ほぼ対称分布になっている。すなわち、前面の層流域 DA, AB 面と背面のはく離領域 BC, CD 面の熱伝達率がほぼ等しい。

3・6 平均熱伝達特性 平均熱伝達特性に対するレイノルズ数の依存性を調べた。図 11(a), (b) は α による下面の平均ヌッセルト数の変化および $\alpha=20^\circ$ の各面の平均ヌッセルト数を示す。前面では $\alpha=20^\circ$ 以外は層流熱伝達の式 $\overline{Nu}_f = C_f Re^{0.5}$ を満足しない。下面は傾き角によりはく離・再付着流れ、くさび流れと変化して次式の関係にある。

$$\overline{Nu}_R = C_R Re^{2/3} (\alpha < 15^\circ), \quad \overline{Nu}_R = C_R Re^{1/2} (\alpha = 20^\circ) \quad \dots\dots\dots (1)$$

また上面および背面は常にはく離領域となり、従来の結果⁽¹⁹⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾と同様、平均ヌッセルト数は次の一般関係式で与えられる。

$$\overline{Nu}_b = C_b Re^{2/3} \quad (\alpha = 0 \sim 20^\circ) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\overline{Nu}_s = C_s Re^{2/3} \quad (\alpha = 5 \sim 20^\circ) \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式の定数 C_R, C_b, C_s の α による変化を図 12 に示した。後述の C_b の予測値も示してある。傾き角 α が 5° 以上に増加すると各面の平均ヌッセルト数は低下す

図 12 傾き角に対する平均熱伝達率の定数 C_s, C_R, C_b の変化

図 13 全表面の平均熱伝達率

図 14 背面の熱伝達と変動圧力係数の関係

る。結局、 $\alpha=0^\circ$ の場合は上・下面においては離・再付着流れとなり両面で伝熱促進され、 $\alpha=5^\circ$ の場合は再付着面の大部分が乱流境界層となり伝熱促進される。

全表面の平均ヌッセルト数を図 13 に示す。傾き角 $\alpha=0\sim10^\circ$ に対し平均ヌッセルト数は次式で与えられる。

$$Nu_m = C_m Re^{2/3} \quad (\alpha=0\sim10^\circ, Re > 4 \times 10^3) \quad \dots\dots\dots (4)$$

特に $\alpha=0\sim5^\circ$ では $C_m=0.085$ であるが、この値は辺長比 4 の場合の $C_m=0.095$ よりやや小さい。全表面の平均熱伝達率は傾き角 $\alpha=0\sim5^\circ$ が最適傾き角である。これは伊藤⁽¹⁴⁾ が傾斜ルーパの最適配置として一様流に対し 5° の傾きと結論しているのと同じである。なお、この最適傾き角は、離・再付着による熱伝達率の最大値を与えるものであり、辺長比によらない。

3.7 背面の熱伝達と変動圧力係数の関係 はく離領域の熱伝達は後流特性⁽¹⁹⁾ あるいは背面の変動圧力係数⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾ と密接な関係にある。背面 BC の平均ヌッセルト数および定数 C_b は次式で与えられる。

$$\overline{Nu_b} = 0.10 [2/(d_w/d)]^{1/3} [(U_s/U) Re]^{2/3} \quad \dots\dots (5)$$

$$C_b = 0.126 [(1 - C_{pb})/(d_w/d)]^{1/3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図 5, 6 の結果を上式に代入し、求めた予測値 C_b が図 12 に示してある。予測値は実験値に比べて $\alpha=0, 5^\circ$ ではやや高めであるが、 $\alpha \geq 10^\circ$ では一致している。

次に $\alpha=0, 5^\circ$ の平均ヌッセルト数とレイノルズ数および変動圧力係数の関係を図 14 に示す。図 14 の実線は次式で与えられる辺長比 $c/d=2.0\sim4.0$ 、 $\alpha=0^\circ$ の結果⁽⁶⁾ である。両者はほぼ一致している。

$$\overline{Nu_b} = 1.4 (\sqrt{C_p} Re)^{0.48} \quad \dots\dots\dots (7)$$

4. 結 論

一様流中におかれた辺長比 5 の長方形柱まわりの流

動と局所および平均熱伝達特性を傾き角 $\alpha=0\sim20^\circ$ 、 $Re=2\,600\sim12\,800$ の範囲で調べた。得られた主要結果は次のとおりである。

(1) $\alpha=0^\circ$ の場合、上下両面のはく離・再付着は周期的である。 $\alpha \geq 5^\circ$ では上面は完全にはく離領域、下面は安定した再付着領域である。

(2) 再付着面において再付着点の下流は乱れ度 20% を超える乱流である。 $\alpha \geq 15^\circ$ では前縁はく離泡が小さくなり再付着流れは層流である。

(3) 前面の熱伝達は流れの岐点の揺動により $\alpha < 20^\circ$ では層流熱伝達とならない。

(4) 下面の熱伝達は傾き角が $\alpha > 5^\circ$ に増加すると減少する。ヌッセルト数 Nu は $\alpha=0\sim15^\circ$ でははく離・再付着流れで $Re^{2/3}$ に比例し、 $\alpha=20^\circ$ ではくさび流れとなり $Re^{1/2}$ に比例する。

(5) 背面と上面の熱伝達は傾き角が増加すると減少し、常にはく離領域であるから Nu は $Re^{2/3}$ に比例する。 $\alpha \geq 10^\circ$ の背面の熱伝達は従来の式と一致した。

(6) $\alpha=0, 5^\circ$ の背面の熱伝達率は、辺長比 2~4、 $\alpha=0^\circ$ と同様変動圧力係数を導入した次式で与えられる。

$$\overline{Nu_b} = 1.4 (\sqrt{C_p} Re)^{0.48}$$

(7) 全表面の平均熱伝達は $\alpha=0\sim5^\circ$ のとき最も高い。

文 献

- (1) 中口・橋本・武藤, 航空宇宙学会誌, 16-168 (1967), 1.
- (2) 岡島・ほか 3 名, 機論, 49-447, B (1983), 2551.
- (3) 岡島・ほか 3 名, 機論, 56-523, B (1990), 577.
- (4) 五十嵐, 機論, 50-460, B (1984), 3185.
- (5) 五十嵐, 機論, 50-463, B (1984), 965.
- (6) 五十嵐, 機論, 52-480, B (1986), 3011.
- (7) 五十嵐, 機論, 50-449, B (1984), 210.
- (8) 五十嵐, 機論, 50-452, B (1984), 1173.
- (9) 田中・ほか 3 名, 機論, 49-442, B (1983), 1204.
- (10) 鈴木・ほか 3 名, 機論, 55-516, B (1989), 2457.
- (11) 平松・ほか 2 名, 機論, 55-519, B (1989), 3449.
- (12) 喜・ほか 3 名, 機論, 55-519, B (1989), 3507.
- (13) 須賀・青木, 機論, 56-531, B (1990), 3279.
- (14) 伊藤, 機械の研究, 40-3 (1988), 369.
- (15) Sparrow, E. M. and Tien, K. K., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 99 (1977), 507.
- (16) Test, F. L. and Lessmann, R. C., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 102 (1980), 146.
- (17) McCormick, D. C., Lessmann, R. C. and Test, F. L., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 106 (1984), 276.
- (18) Motwani, D. G., Gaitonde, U. N. and Sukhatme, S. P., *J. Heat Transf.*, 107 (1985), 307.
- (19) Igarashi, T. and Hirata, M., *Proc. Int. Heat Transf. Conf.*, 2 (1974), 300.
- (20) 五十嵐・高崎, 機論, 56-523, B (1990), 780.