正方形柱まわりの流動と熱伝達*

五十嵐 保**

Fluid Flow and Heat Transfer around a Square Prism

by Tamotsu IGARASHI

Experimental investigations on the fluid flow and heat transfer around a square prism at angles of attack were carried out in the range of subcritical Reynolds numbers. The average heat transfer coefficients at angles of 0° and 45° were about 40% higher than the result of Hilpert. Characteristics of the average and local heat transfer were made clear for flow patterns in connection with the flow characteristics. The average heat transfer coefficient has a minimum value at 13° , then has a maximum value at $20^\circ \sim 25^\circ$. And the average heat transfer coefficient on rear surface of the prism is given by the rms values of the pressure fluctuations regardless of the attack angles.

Key Words: Convective Heat Transfer, Separated Flow, Reattachment Flow, Square Prism, Experimental Study

1. ま え が き

近年、く形柱に対する時間平均および変動流体力に関する数多くの実験的研究^{(1)~(10)}および数値解析的研究^{(11)~(14)}が蓄積されている。正方形柱まわりの流れは、迎え角により $0^\circ \leq \alpha \leq 13^\circ$ では前縁はく離したせん断層は側面に再付着せず（完全はく離形）、 $\alpha \geq 14^\circ$ では下面前面のせん断層が側面に再付着する（再付着形）ことは良く知られている。このような流れ場を呈する角柱は鈍い物体のはく離域の熱伝達とも関連して、伝熱の面からも興味ある物体である。しかし正方形柱まわりの熱伝達に関しては、約50年前の $\alpha = 0^\circ$ 、 45° の平均熱伝達の報告^{(15)~(17)}が知られるのみで、局所熱伝達に関する報告は見当たらない。そこで著者は正方形柱まわりの流動と熱伝達特性の関連を明らかにする第1段階として前報⁽¹⁸⁾で流れ特性に関する実験的研究を行った。本報では正方形柱の平均および局所熱伝達率を測定し、熱伝達特性と流れ特性との関連を明らかにする。

主 要 記 号

C : 定数
 C_D, C_L : 抵抗係数, 揚力係数 (代表長さ d で定義)
 C_p, C_{pb} : 圧力係数, 背圧係数
 C'_p : 変動圧力係数 $= \Delta p / 0.5 \rho u_0^2$
 d : 正方形断面の角柱の一辺の長さ
 d_w : 後流幅
 f : 放出うず周波数
 h, h_r, h_R : 局所, 後方岐点, 再付着点熱伝達率
 h_b, h_m : 背面, 全表面平均熱伝達率
 K : 背圧パラメータ $= (1 - C_{pb})^{1/2}$
 L_v : うず形成位置
 m, n : 定数
 N_u, N_{ux} : 局所ヌセルト数 $= hd/\lambda, hx/\lambda$
 N_{ub}, N_{um} : 平均ヌセルト数 $= h_b d/\lambda, h_m d/\lambda$
 p, p' : 壁面静圧, 変動圧力
 Δp : 変動圧力の rms 値 $= (\overline{p'^2})^{1/2}$
 Re, Re_x : レイノルズ数 $= u_0 d/\nu, u_0 x/\nu$
 S : ストローハル数 $= fd/u_0$
 u_0, u_∞ : 主流速度, 境界層外縁の速度
 u_s : はく離線上の速度 $= Ku_0$
 x : 前方岐点よりの距離, 側面上の位置

* 昭和58年11月21日 第922回講演会において講演, 原稿受付 昭和58年5月11日.

** 正員, 防衛大学校 (〒239 横須賀市走水1-10-20).

x_R, x_S : 再付着位置, はく離位置

α : 角柱の迎え角

λ, ν, ρ : 流体の熱伝導率, 動粘性係数, 密度

2. 実験装置および方法

供試模型および主要記号が図1に示してある。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った。正方形柱の辺長は 15, 20, 30 (29.2) mm の3種類で軸長は風洞と同じ 150 mm である。一様流速度は $6 \sim 30 \text{ m/s}$, この範囲内で主流乱れはほぼ 0.5% である。レイノルズ数範囲は $5.6 \times 10^3 \leq Re \leq 5.6 \times 10^4$ である。辺長 15, 20 mm の伝熱角柱はアルミニウム製で内部にヒータを内蔵した $\phi 12$ の黄銅パイプが挿入されている。 $\phi 0.1$ の C_u-C_o 熱電対で測定した最大表面温度差と表面温度と主流温度の温度差との比は 0.01 以下で、等温壁の条件がほぼ満足され、表面平均温度を用いて平均熱伝達率を求めた。辺長 30 mm の伝熱角柱はアクリル製でその全表面に厚さ 0.02 mm のステンレスはくを接着し伝熱面としている。これを通電加熱し、熱流束一定の条件のもとに局所熱伝達率を測定した。壁温は壁面上に埋込んだ計22個の $\phi 0.1$ の C_u-C_o 熱電対で測定した。以上三つの角柱に対し迎え角 $\alpha (0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ)$ と主流速度を変化させて平均および局所熱伝達率を測定した。更に前報⁽¹⁸⁾で明らかにされた流れ特性、すなわちストローハル数や時間平均圧力分布、変動圧力分布、また煙風洞や油膜法による表面流れの可視化と関連づけて議論する。

3. 実験結果および考察

3.1 平均熱伝達率 迎え角 $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ における等

図1 模型の主要記号

温壁の平均熱伝達率の実験結果が Jakob⁽¹⁵⁾ が引用した Reiher⁽¹⁶⁾ と Hilpert⁽¹⁷⁾ の結果と一緒に図2(a), (b)に示してある。なお $d = 30 \text{ mm}$ は局所熱伝達率から求めたものである。空気流中の種々の形状を有する二次元物体の平均熱伝達率は一般に次式で与えられる⁽¹⁵⁾。

$$Nu_m = CR_e^n \dots \dots \dots (1)$$

正方形柱に関する上述の結果の比較が表1にまとめられている。ここで Nu_m, Re の代表長さは辺長 d である。Jakob⁽¹⁵⁾ では代表長さは角柱と周の長さを等しくする円管の直径であり、式(1)の C の値は本報と異なる。 $\alpha = 0^\circ$ の場合ブロッケージ比の影響はほとんど現れず、本実験値は Reiher と Hilpert の中間の値を示し、Hilpert の値よりもほぼ 40% 高い。 $\alpha = 45^\circ$ ではわ

(a)

(b)

図2 平均熱伝達率 (等温壁)

表1 式(1)における定数 C と n の値 (等温壁)

Author	$Re = u_0 d / \nu$	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 45^\circ$	
		C	n	C	n
Reiher [16]	1960 ~ 6000	0.149	0.699	0.238	0.624
Hilpert [17]	3900 ~ 78500	0.085	0.675	0.201	0.588
Present Exp.	5600 ~ 56000	0.14	0.66	0.27	0.59

ずかにブロック比の影響が現れている。 $\alpha=0^\circ$ と同様本実験値は Hilpert よりも 40% ほど高く、むしろ Reiher の値に近い。ここで注目すべきは後述の 3・3 節で明かなように、 $d=30\text{ mm}$ の伝熱円柱の測定精度は十分であり、熱流束一定の条件での局所熱伝達率の平均値を用いた平均熱伝達率が等温壁の条件下における平均熱伝達率と一致していることである。また $\alpha=0^\circ$ では前面と背面は熱流束一定の条件でも結果的に等温壁になることから $d=15, 20\text{ mm}$ の実験精度も十分であると言える。以上の点から Eckert⁽¹⁹⁾ はじめ多くの書籍に引用されている Hilpert⁽¹⁷⁾ の実験結果は実際の値よりも 40% ほど低いと言わざるを得ない。 $\alpha=0^\circ, 45^\circ$ の場合の本実験のレイノルズ数の指数は Hilpert の指数とほぼ一致している。結局、空気流中の等温壁の平均熱伝達率は次式で与えられる。

$$\alpha=0^\circ: Nu_m = 0.14 Re_e^{0.66} \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha=45^\circ: Nu_m = 0.27 Re_e^{0.59} \dots\dots\dots (3)$$

図 3 は迎え角 α による平均熱伝達率の変化を示している。 $0^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$ までは α の増加とともに熱伝達率は減少している。 $\alpha=13^\circ$ で熱伝達率は増加し、 $\alpha=15^\circ$ で $\alpha=0^\circ$ の値とほぼ等しくなる。 α の増加とともに $\alpha=20^\circ \sim 25^\circ$ で最大値をとり以降徐々に減少し、 $\alpha \geq 35^\circ$ で再びわずかに増加している。図 4 は平均熱伝達率に対

図 3 迎え角による平均熱伝達率の変化

図 4 平均熱伝達におけるレイノルズ数 Re の指数 n の変化

するレイノルズ数 Re の指数 n の迎え角に対する変化を示している。 $\alpha=12^\circ$ で極小となり $\alpha=25^\circ$ で極大となり、平均熱伝達率の変化と同様の傾向を示している。

3・2 平均熱伝達率と流れ特性との関係 図 5 は煙風洞写真である。図 6～8 は流れの諸特性、背圧パラメータ K 、ストローハル数 S 、うず形成位置 L_v 、変動圧力の rms 値 C_p 、時間平均抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L の迎え角 α による変化を示している。なお、 L_v は流れの可視化より観察した上、下のはく離せん断層の交差位置である。前報⁽¹⁸⁾ によれば角柱まわりのフローパターンは迎え角 α により次のようにまとめられる。

- (1) $0^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$: 完全はく離対称流
- (2) $5^\circ < \alpha \leq 13^\circ$: 完全はく離非対称流

図 5 煙風洞写真 ($Re=11000$)

図 6 背圧パラメータ、ストローハル数、うず形成位置の変化

(3) $14^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$: 再付着流れ

(4) $35^\circ < \alpha \leq 45^\circ$: くさび流れ

いずれの特性量も互いに相関関係を示し、熱伝達特性と定性的傾向が一致している。 $\alpha = 12^\circ \sim 13^\circ$ において、うず形成位置は最も後退し、同時に後流幅も狭くなっている。このとき K , C_D , C_L , C_p は最小となり S は最大となる。熱伝達特性との定性的傾向の一致は変動圧力の rms 値 C_p が最も良い。

3.3 局所熱伝達率 まず熱流束一定の条件における局所熱伝達率測定円柱の精度チェックを行った。一般に頂角 ϕ を有するくさびの境界層外縁の速度は次式で与えられる⁽²⁰⁾。

$$u_\infty = Cx^m, \quad m = \phi / (2\pi - \phi) \quad (4)$$

本実験の $\alpha = 45^\circ$ は頂角 $\phi = 90^\circ$ のくさびと対応し、 $\alpha = 0^\circ$ は頂角 $\phi = 180^\circ$ のくさび、すなわち直交平板と対応する。前報⁽¹⁸⁾ の圧力分布から求めた境界層外縁速

度は図9に示すように、それぞれ次式で与えられる。

$$\alpha = 45^\circ: u_\infty/u_0 = 1.02(x/d)^{1/3} \quad (5a)$$

$$\alpha = 0^\circ: u_\infty/u_0 = 0.82x/(d/2) \quad (5b)$$

直交平板では熱流束一定の条件でも結果的に等温壁となり、局所熱伝達率は次式で与えられる⁽²⁰⁾。

$$\alpha = 0^\circ: Nu_x/\sqrt{Re_x} = 0.57 Pr^{0.4} \quad (6)$$

ここで $Re_x = u_\infty x/\nu$, Pr はプラントル数である。実験値と理論解、式(6)との比較が図10に示してある。両者は良く一致し、実験精度は十分である。

3.3.1 局所熱伝達率と流れ特性 図11は四つのフローパターンに対する局所熱伝達率を示している。 $\alpha = 0^\circ$ の場合前面、背面とも局所熱伝達率はほぼ一定で、背面のほうが熱伝達率は高い。側面では後縁付近の熱伝達率が著しく高く、背面よりも大きい。前縁に向かって熱伝達率は急激に減少し、面BA, CDに沿う強い逆流の存在を示している。 $\alpha = 10^\circ$ では $\alpha = 0^\circ$ に比較し面BC, CDでの熱伝達率が著しく低下し、平均熱伝達率の低下の原因となっている。 $\alpha = 20^\circ$ の場合、せん断層が再付着する面ABの熱伝達は著しく増加し、再付着点で極大となっている。はく離域の面BC, CDの熱伝達率も点Cがピークになり著しく増

図7 変動圧力

図8 抗力係数と揚力係数

図9 前面の境界層外縁速度

図10 前面の層流熱伝達 (熱流束一定)

図 11 局所熱伝達率分布 (熱流束一定)

図 12 下面 AB 上の油膜模様

加している。また面 DA でも前縁 A 付近で熱伝達率は著しく増加している。ほぼ全面にわたって熱伝達率の著しい増加を示している。 $\alpha = 35^\circ$ では面 AB 上に再付着による熱伝達率の極大値が認められるが、 $\alpha \geq 40^\circ$ ではくさび流れの様相を呈し、前方岐点 A、後方岐点 C で熱伝達率は最大となるが、レイノルズ数 Re が大きくなると前面よりも背面のほうが熱伝達率は大きい。これは前面の熱伝達率が $Nu \propto Re^{1/2}$ であるのに対し、背面では $Nu \propto Re^{2/3}$ であることによる。

図 12 は四つのフローパターンに対する下面 AB 上の油膜模様である。完全にくさびパターン I, II では下流側からの逆流の再付着とはく離点 S を示し、パターン III では点 A からのく離せん断層の再付着とはく離点 S を示し、パターン IV はくさび流れであることを示している。図 13, 14 はそれぞれ時間平均圧力および変動圧力分布である。迎え角 α の増加とともにパターン I から II へ移行すると面

図 13 圧力分布

AB, CD のプロファイルの対称性が次第にくずれ、パターン III になるとはく離域の面 BC, CD のプロファイルが対称的になる。はく離域の時間平均の負圧が大きいほど変動圧力の rms 値が大きい。せん断層の再付着面となる面 AB の変化が最も特徴的で、再付着点 X_R で C_p は極大値、 C_p は極小値となる。またはく離ほう内

のはく離点 X_s 近傍で C_p は極小値, C_p は極大値をとる。これに対し局所熱伝達率分布は再付着点 X_R はく離点 X_s 近傍で極大, 極小値をとっている。また常にはく離域となる面 BC も特徴的である。局所熱伝達率はパターン I, II では $-C_{pb}$ と同様ほぼ一定で, パターン III, IV では点 B から C に向かって $-C_{pb}$ と同様に著しく増加している。いずれの場合も熱伝達率は $-C_{pb}$, C_p の値の変化に対応している。上述の迎え角 α に対する全面の平均熱伝達率と局所熱伝達率との関係を整理する。パターン I では背面 BC の熱伝達率が高く支配的であるが, パターン II ではうず形成位置が後退し, 面 BC, CD での熱伝達率が低下し, 全面の平均熱伝達率の減少をもたらす。パターン III では再付着により面 AB の熱伝達率は著しく増加し, うず形成位置が背面に近づき, 面 BC, CD でも増加し, 全面の熱伝達率は著しく増加する。パターン IV では面 DA の熱伝達率がやや増加するものの面 AB の低下により全面の熱伝達率は減少する。

3.3.2 再付着位置の熱伝達 Ota ら⁽²¹⁾ によれば流れと平行に置かれた平板の再付着領域の極大ヌセルト数 h_R は前縁形状によらず, はく離点から再付着位置までの距離 x_R を代表長さとして次式で与えられる。

$$h_R x_R / \lambda = 0.0919 (u_0 x_R / \nu)^{0.734} \dots (7)$$

本実験の迎え角 $\alpha = 15^\circ \sim 25^\circ$ の場合の再付着面の極大熱伝達率について同様の整理を行った。結果は図 15 に示すように次式で与えられるが, 式(7)と比較的良好一致している。

$$h_R x_R / \lambda = 0.19 (u_0 x_R / \nu)^{2/3} \dots (8)$$

なおレイノルズ数の指数 $2/3$ であるが, 後方ステップに対する Seki ら⁽²²⁾ と結果と同じで妥当な値と思われる。

3.3.3 背面の熱伝達率 完全にはく離形のパターン I, II では背面 BC の局所熱伝達率はほぼ一定であった。そこで背面の局所熱伝達率が一定となる直交平板, 半円柱⁽²³⁾ や逆くさび (正三角柱)⁽²⁴⁾ と比較した。結果が図 16 に示してある。いずれの場合も背面の熱伝達率は次式で与えられる。

$$Nu_b = 0.17 Re^{2/3} \dots (9)$$

これは鈍い物体のはく離域の半理論式⁽²⁵⁾とも良く一致している。

$$Nu_b = 0.10 \{2 / (d_w / d)\}^{1/3} (K Re)^{2/3} \dots (10)$$

3.3.4 レイノルズ数の依存性 正方形柱各面のヌセルト数に対するレイノルズ数の依存性を調べた。前面 DA ではすべてのフローパターンに対し層流境界層が形成され $Nu \propto Re^{1/2}$ である。辺 AB の Nu はパター

ン I では $Nu \propto Re^{0.80}$, パターン II では $Nu \propto Re^{2/3-0.6}$, パターン III では $Nu \propto Re^{2/3}$, パターン IV では前面となり $Nu \propto Re^{1/2}$ である。このように逆流あるいははく離せん断層が再付着する辺 AB のレイノルズ数の依存性は場所によって変化しきわめて複雑である。また常にはく離域となる辺 BC, CD はすべてのパターンに対し $Nu \propto Re^{2/3}$ である。

3.4 変動圧力とはく離域の熱伝達 前報^{(26),(27)} では円柱のはく離せん断層や後流を小円柱やスプリッ

図 14 変動圧力分布

図 15 再付着面の極大熱伝達率

図 16 背面の熱伝達率

図 17 変動圧力の rms 値と背面の平均熱伝達率との関係

タブレートによりそれぞれ制御し、円柱の後方岐点 r あるいははく離点 S の変動圧力の rms 値 Δp_r , Δp_s がはく離域の熱伝達を支配する最も重要な因子であることを示した。すなわちウェーク制御の有無にかかわらず、この rms 値は円柱の後方岐点の熱伝達率 h_r あるいは背面の平均熱伝達率 h_b と一定の関係にあった。その後この関係は円柱直径によらず成り立ち⁽²⁸⁾、後方岐点の変動圧力の rms 値と熱伝達率の間には次の関係があることが明らかになった。

$$h_r = C \Delta p_r^{0.33} \dots\dots\dots (11)$$

$$C_{pr} = \Delta p_r / 0.5 \rho u_0^2 = 5.35 \times 10^{-4} R_e^{0.6} \dots\dots\dots (12)$$

また、直径方向に二次元流路を有するスリット円柱⁽²⁹⁾の背面の熱伝達も変動圧力の rms 値と一定の関係にあることを示した。このような点から前報⁽¹⁸⁾では正方形柱のはく離域の各辺の midpoint における変動圧力の rms 値 Δp と主流速度 u_0 との関係を求めた。その結果、次式の関係が得られた。

$$\text{完全はく離形: } \Delta p \propto u_0^{2.6} \dots\dots\dots (13 \cdot a)$$

$$\text{再付着形: } \Delta p \propto u_0^{2.3} \dots\dots\dots (13 \cdot b)$$

ただし完全はく離対称流のパターン I の側面のみ $\Delta p \propto u_0^{2.2}$ である。これら指数の差異は $3 \cdot 3 \cdot 4$ 項で述べた熱伝達率に対するレイノルズ数の指数の差異とも対応している。

以上の観点から常に背面となる辺 BC の midpoint の変動圧力の rms 値と辺 BC の平均熱伝達率の関係を求めた。結果は図 17 に示すとおり、完全はく離形のパターン I, II と再付着流れとくさび流れのパターン III, IV に大別され、迎え角に無関係に平均熱伝達率 h_b は変動圧力の rms 値と次式の関係にある。

$$h_b = C \Delta p^{0.31} \dots\dots\dots (14)$$

4. 結 論

迎え角のある正方形柱まわりの流動と熱伝達に関する実験的研究をレイノルズ数範囲 $5.6 \times 10^3 \leq R_e \leq 5.6 \times 10^4$ で行い、次の結論を得た。

(1) 平均熱伝達率 (等温壁) は流れの諸特性、背圧パラメータ、ストローハル数、うず形成位置、変動圧力、抗力、揚力係数と密接な関係にある。迎え角の変化に対し平均熱伝達率は $\alpha = 12^\circ \sim 13^\circ$ で極小、 $\alpha = 20^\circ \sim 25^\circ$ で極大となる。 $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ の平均熱伝達率は従来の Hilpert の値より 40 % ほど高い。

(2) 局所熱伝達率 (熱流束一定) 分布は、迎え角によるはく離せん断層の再付着や逆流の再付着に関連した四つのフローパターンに対応した特徴的な分布を示す。

(3) $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$ では前面よりも背面のほうが熱伝達率が高い。特に $\alpha = 0^\circ$ の背面の局所熱伝達率は一定で直交平板と同じ次式で与えられる。

$$Nu_x = 0.17 R_e^{2/3}$$

(4) 再付着領域の極大熱伝達率 h_R は再付着位置までの距離 x_R を代表長さとして次式で与えられる。

$$h_R x_R / \lambda = 0.19 (u_0 x_R / \nu)^{2/3}$$

(5) 背面のはく離域の平均熱伝達率は辺の midpoint の変動圧力の rms 値と定量的関係にあり、完全はく離形 ($\alpha \leq 13^\circ$)、再付着・くさび流れ形 ($\alpha \geq 14^\circ$) に大別され次式で表される。

$$h_b = C \Delta p^{0.31},$$

$$\alpha \leq 13^\circ : \Delta p \propto u_0^{2.6},$$

$$\alpha \geq 14^\circ : \Delta p \propto u_0^{2.3}.$$

文 献

- (1) Parkinson, G. V. and Brooks, N. P. H., *Trans. ASME*,

- Ser. E, 28-2(1961), 252.
- (2) Vickery, B. J., *J. Fluid Mech.*, 25(1966), 481.
- (3) 中口・ほか2名, 航学誌, 16-168(昭43), 1.
- (4) Bearman, P. W. and Trueman, D. M., *Aeronaut. Q.*, 23(1972), 229.
- (5) Lee, B. E., *J. Fluid Mech.*, 69(1975), 263.
- (6) Robertson, J. M., ほか3名, *J. Ind. Aerodynam.*, 2(1977), 345.
- (7) Sam, R. G., ほか2名, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 101-4(1979), 443.
- (8) 溝田・岡島, 土木論, 312(昭56), 39.
- (9) 溝田・岡島, 土木論, 312(昭56), 49.
- (10) Bearman, P. W. and Obasaju, E. D., *J. Fluid Mech.*, 119(1982), 297.
- (11) Okajima, A., *J. Fluid Mech.*, 123(1982), 379.
- (12) Davis, R. W. and Moore, E. F., *J. Fluid Mech.*, 116(1982), 475.
- (13) Nagano, S., ほか2名, *Comput. Fluids*, 10-4(1982), 243.
- (14) 坂田・ほか2名, 機論, 49-440, B(昭58), 801.
- (15) Jakob, M., *Heat Transfer*, 1(1949), 562, Wiley & Sons.
- (16) Reiher, H., *Forsch. Gebiete Ingenieurwes.*, No. 269(1925).
- (17) Hilpert, R., *Forsch. Gebiete Ingenieurwes.*, (1933), 215.
- (18) 五十嵐, 機械前刷(第921回), (昭58-9).
- (19) Eckert, E. R. G. and Drake, R. M., *Heat and Mass Transfer*, (1959), 243, McGraw-Hill.
- (20) 甲藤, 伝熱概論, (昭39), 72, 養賢堂.
- (21) Ota, T. and Kon, N., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22(1979), 197.
- (22) Seki, N., ほか2名, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19(1976), 700.
- (23) 五十嵐・ほか2名, 機論, 39-322(昭48), 1881.
- (24) 五十嵐・平田, 機論, 41-348(昭50), 2437.
- (25) Igarashi, T. and Hirata, M., *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf.*, 2(1974), 300.
- (26) 五十嵐, 冷凍, 56-648(昭56), 833.
- (27) 五十嵐, 機論, 49-439, B(昭58), 656.
- (28) Igarashi, T., *ASME - JSME Thermal Eng. Joint Conf. Proc.* 3(1983), 87.
- (29) 五十嵐, 機論, No. 830-3, (昭58-3), 94.

討 論

〔質問〕 馬 淵 幾 夫・熊 田 雅 弥

(岐阜大学工学部)

(1) 迎え角がある場合, d より投影長さ $[d(\sin \alpha + \cos \alpha)]$ を代表長さとするほうが一般的と思うがいかがか. 投影長さを代表長さすると S および L_v の α に対する変化は図6と異なってくるが, どちらが物理的に意味があるとお考えか.

(2) 図3と図6, 7の比較より, 「熱伝達特性との定性的傾向の一致は, C_p が最も良い」(1176ページ左欄7, 8行め以下)と判断することは容易でない. また結論(5)で h_0 と Δp の定量関係の成立を, 辺の midpoint の Δp を使って確認されているが, その物理的意味および局所値の対応についてお教え願いたい.

(3) 図11の $\alpha=20^\circ$ と $\alpha=35^\circ$ の AB 面の極大値は同質のものか. また図12のパターン I, II とパターン III のはく離点 S は流れの構造上相違があるのか.

〔回答〕 (1) 代表長さによる S の変化は文献(18)に示しているので参照されたい. たとえば代表長さを投影長さ L とすると完全にはく離形の $0 \leq \alpha < 14^\circ$ において α の増加に対し S は単調増加となり, 再付着形の $14^\circ \leq \alpha$ では S はほぼ一定値に近づく. ストローハル数に関するかぎり円柱や平板との対応などを考えると代表長さは投影長さ L のほうが一般的とは思いますが, 迎え角のある角柱のようにフローパターンが複雑に変化する場合, どちらが物理的に意味があるとは結論できないと思う. まして流れの諸特性や伝熱特性に対し, フローパターンの変化を考慮すると更に困難

な問題となる. 代表長さについては今後の課題と思う.

(2) 円柱の場合⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾ Δp ははく離点または後方岐点で代表させたことに関連してのご質問と思う. 迎え角のある角柱でははく離点での測定が困難であり, また後方岐点もはっきりしないなどの理由から局所熱伝達率分布や変動圧力分布を検討して決定した. すなわち迎え角 α に対して辺 BC の平均熱伝達は, 大雑把には辺 BC の midpoint の局所熱伝達率にはほぼ近似できることから, 変動圧力 Δp の代表値として辺 BC の midpoint を選んだまでである. なお辺 BC 上の局所値の対応については再付着流れおよびくさび流れのパターン III, IV が比較的良く,

$$h_x = C(\alpha) \Delta p_x^n$$

の関係が得られる.

(3) $\alpha=20^\circ, 35^\circ$ の AB 面の極大値はいずれも前縁 A からののはく離せん断層の再付着によるもので同質と考えている. またパターン I, II と, パターン III のはく離点 S 近傍の油膜模様を比較すると目立った相違は見られないが, パターン III のほうが二次元性が強いようである.

〔質問〕 太 田 照 和 (秋田大学鉱山学部)

(1) 図1, 2では Reiher, Hilpert の結果と代表寸法の取り方が異なったままで直接比較し, 議論をされており, 疑問を感じるが, どのようにお考えか.

(2) パターン I では α が 0° 以外をも含ませておられるが, 図8にも示されているように, $\alpha=5^\circ$ ではかなりの揚力を発生し, 非対称流れとなっているが,

対称流れとされたのはなぜか。あわせて、1177ページ欄 行めに記述されているパターン I, II の流れ模様の概略を示して頂くと理解しやすいと思われるが、いかがか。

(3) 図3に関する記述で、 $\alpha \geq 35^\circ$ でわずかに増加しているとされているが、 $\alpha = 20, 30^\circ$ ではそのような傾向はみられず、 30° では減少しているように思える。お考えをお示し願いたい。

(4) 1175ページ左欄4行めの伝熱円柱はまちがいでないか。また1178ページ左欄16~18行めの記述は図11(d)に関する記述と矛盾してはいないか。

〔回答〕 (1) 質問者は Reihner や Hilpert に当たらず、本文を誤解されての質問と思う。図1, 2および表1は代表長さの違いを補正して比較している。したがって Jakob⁽¹⁵⁾における Hilpert の C の値は表1の値と異なり $\alpha = 0^\circ$ では0.092, $\alpha = 45^\circ$ では0.222である。なおこの代表長さについて著名な幾つかの教科書に誤りが見られる。たとえば Holman (付1)ではプラントル数の影響を考慮しているが、代表長さを投影長さとして適用レイノルズ数範囲も C の値も補正せずに Hilpert の値をそのまま引用している。

(2) 厳密な意味では対称流れとは言えないが、幾つかの流れ特性の迎え角に対する変化の度合いが $\alpha = 5^\circ$ を境にやや異なり $0 \leq \alpha \leq 5^\circ$ ではその変化が比較的小さいことから $\alpha = 0^\circ$ の対称流れに近いという意味で対称流れとしている。付図1はその一例で、AB, CD面上の後縁BおよびC近傍の変動圧力波形である。 $\alpha = 5^\circ$ の波形は $\alpha = 0^\circ$ に類似で、後縁B, Cの両波形は対称的であるが、 $\alpha = 8 \sim 13^\circ$ の波形は非対称になっている。パターン I, II の流れ模様の概略は付図2のよう

(付1) Holman, J. P., *Heat Transfer*, (1981), McGraw-Hill.

$(p'/0.5\rho u_0^2)/\text{div}$, 10 ms/div
 $u_0 = 10 \text{ m/s}$, $d = 30 \text{ mm}$

付図1 後縁近傍の変動圧力波形

付図2 パターン I, II の流れの概略

に前縁Dからのはく離せん断層の逆流が後縁Cに間欠的に再付着する有無により分けている。

(3) 記述が不十分であったので1175ページ左欄下3~2行めを次のように訂正する。「…徐々に減少するが、 $Re \leq 2 \times 10^4$ の場合、 $\alpha \geq 35^\circ$ で再び増加する」

(4) ご指摘のとおりで「角柱」と訂正する。また後半については具体的なご指摘がないのでご質問の趣旨が分からないが、矛盾しているとは考えていない。