

1130. 周期配列ブロックを有する矩形断面管路内の乱流計測

杉山均1,*,羽田誠秀1

Experimental Analysis of Turbulent Flow in a Rectangular Duct with Arrays of Blocks by using Laser-Doppler Velocimeter

Hitoshi SUGIYAMA and Nobuhide HANEDA

An experimental study of developing flow in a rectangular duct with arrays of blocks was carried out at the Reynolds number of 3.26×10^4 by using a Laser-Doppler velocimeter. The total amount of ten blocks are staggered each other and upstream tangent with rectangular cross section are set to obtain fully developed turbulent flow. The test section duct with blocks was placed at distance of 40.5 times hydraulic diameter from the duct inlet. Three components of mean velocity and the five components of the six Reynolds stresses were measured at nine different locations to clarify the development of turbulent structure. The measurement has been performed in the flow region between number 7 and number 8 blocks. As a result of this experimental study, it was pointed out as a characteristic feature that the two peaks of streamwise velocity were generated in the central and wall side regions respectively. The measurements of secondary flow vectors suggest that this phenomenon is caused by transforming lower velocity fluid to upward of block from leading edge of block and the large values of secondary flow, which reach maximum percentage of 50% for mean bulk velocity, are produced at leading edge and wake region of block. Adding to this, separated and reattached flows are observed in wake region of blocks and the distributions of three normal stresses indicate a strong intensity near the reattachment region. The distributions of Reynolds shear stress show the opposite sign region, which is owing to streamwise velocity distorted by secondary flow.

KEYWORDS: turbulent flow, secondary flow, separation, Reynolds stress, laser-Doppler velocimeter, roughened wall, rectangular configuration, rectangular cross section

I. 緒 言

一様流中に置かれた平板面に突起を設けると,はく離再 付着現象、強いせん断層の存在など、流れは複雑に変化す る。特に乱流場においては、その突起形状によって流れは 大きく変化する。例えば、突起高さが管路代表スケールに 対して非常に小さいときは、壁面近傍の乱れの非等方性を 助長することにより、断面平均速度の2~5%程度の第2 種2次流れが、その管路断面内に形成される。また、こ の第2種2次流れは非円形断面を有する直線管路内の乱 流場においても形成され、断面内のコーナ部に向かって流 れを形成することよりコーナ流れとも呼ばれる。一方,突 起高さが大きいときには、圧力勾配により生成される2 次流れが支配的となり、2次流れ強度、流動パターンとも 第2種2次流れと比べ大きく変化する。こうした管路壁 に突起を設ける手法は、伝熱促進を図るための最も簡便か つ代表的な手段であり,原子力工学のみならず多くの分野 にて活用されている。また、こうした粗面壁を有する流れ 場は、電子機器類の冷却問題とも関連し、工学的にも重要 な流れ場である。したがって,これまでいくつかの研究が 報告されている。本研究では,特に管路壁に比較的高い突 起が設けられた流れ場を対象とした。

伝熱促進を意図とした実験の場合、管路壁に設置される 相さ要素は,管路幅と同一長で,流れ方向に複数配列,流 れ方向と直交する向きに周期的に配列させた実験が多数を 占めるのに対して、例えば、電子機器部品の冷却問題を扱 う場合には、立方体、直方体形状で模擬した電子機器を管 路壁に配置した実験が多くを占める。前者の場合、例え ば、ガスタービン動翼の冷却問題を扱った Han ら^{1,2)}の研 究が挙げられる。彼らは、粗さ要素形状、配列ピッチなど が圧力損失、ヌセルト数に及ぼす影響を実験的に明らかに した。五十嵐ら^{3,4)}は、粗さ要素に角柱を用いて系統的な 実験を行い、熱伝達特性と流動特性との関係を報告してい る。彼らが粗面壁近傍の熱移動現象を対象としたのに対し, Liou-Wu-Chang⁵⁾は、矩形断面管路の上下壁に11列の正方 形断面の粗さ要素を周期配列し,その3次元管路内の乱 流構造をレーザー・ドップラー流速計により計測した。時 間平均速度分布, レイノルズ応力分布, 2次流れベクトル 等を比較的詳細に報告している。同時に彼らは、上下壁に 1列6)および2列7)の粗さ要素のみを設けた場合の結果も 報告している。

一方,電子機器部品の冷却問題を対象とした研究に関し,柳田ら⁸⁾は,矩形断面管路の壁面に直方体の発熱体を

¹ 宇都宮大学大学院工学研究科エネルギー環境科学専攻(Energy and Environ. Sci., Graduate School of Eng., Utsunomiya Univ.) (2001年 8月10日 受理; 2001年 9月28日 査読通過)

^{*} 著者連絡先: Tel. & Fax. 028-689-6031, E-mail: sugiyama@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1列に並べた場合の表面熱伝達率の計測を報告している。 彼らの実験が,直方体ブロックが1列に配置された実験 であるのに対し,松島ら⁹⁾は,ブロックを碁盤目状,千鳥 状に複数列配列した場合の実験を行い,圧力損失の予測式 を提示している。さらにSparrowら¹⁰⁾は,碁盤目状に複 数配列されたブロック群に,流れを横断するように障壁が 設けられた場合,あるいはブロック群の中にブロックの欠 けが発生した場合の熱伝達率,圧力損失の測定結果を報告 している。以上に示した実験結果は,ブロック列に沿った 圧力損失,熱伝達率の測定結果を提示しているに留まり, その3次元流動挙動を詳細に測定した報告例は,先に示 した伝熱促進を意図した報告例と比較すると少ない。

粗さ要素を管路幅と同一長で,流れ方向に複数列,流れ 方向と直交する向きに配列させた場合と,電子機器部品の 冷却問題のように,立方体,直方体形状で模擬したブロッ クを管路壁に配列させた場合とでは,流れは大きく異なる ものと思われる。特に両者で異なる点として,断面内圧力 分布が後者の場合,大きく変化することから2次流れの 生成に相違が見られるものと推測される。こうした2次 流れは熱,物質移動に寄与し,その2次流れ強度,2次流 れにより循環流の方向などの3次元流動挙動を明らかに することは,研究ばかりでなく工業的にも意義あるもので ある。

以上のような研究経緯から、本研究では、矩形断面管路 の上下壁に直方体形状のブロックを2列ずつ、上下壁で 合計4列のブロック群を設けた流れ場を対象とし、その3 次元流動挙動を実験的に明らかにすることを目的とする。 上下壁に設けたブロックは流れ方向に千鳥状となるように 配列した。計測に際してはレーザー・ドップラー流速計に より、レイノルズ応力分布も含めた3次元乱流計測を行 う。

II. 実験方法

1. 実験装置

Fig.1に実験装置の構成図を示す。作動流体には水を 用い,循環流路を形成している。ポンプより吐出された水 はポンプ吐出側の弁により流量調節され,装置下部の直管 パイプに設けられたオリフィスにより流量管理がなされ る。その後,格子板,縮流部を経て矩形断面管路に流入す る。流路は矩形断面形状をしており,その長辺は200 mm,短辺は40 mm,長短辺比は5 である。本実験にて 対象とした周期配列ブロックが設けられた管路は,⑥に示 す Test section 部に設置されている。Test section 上流部 には完全発達乱流を得るため40.5 D_h ($D_h = 66.67$ mm)の 長さに相当する矩形断面直管部が設置されている。ここで, D_h は矩形断面形状で算出した水力直径である。さらに Test section 部下流には7.5 D_h の直管部を設けた。

Fig.2に Test section 部に設置された周期配列ブロックの概略図,ならびに座標系を示す。座標系は主流方向を



Pump, ② Main valve, ③ Honeycomb, ④ Contraction,
Straight duct, ⑥ Test section, ⑦ Reservoir, ⑧ Orifice plate

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



Fig. 2 Square duct with staggered blocks and definition of coordinate system

*X*₁, 水平方向, 垂直方向をそれぞれ *X*₂, *X*₃ と定義した。 座標原点は流路入口から 40.5 Dh の上壁側とした。ブロッ ク群はこの座標原点から下流に設置され、矩形断面内の上 下壁にそれぞれ2列配置した。ブロックは上下壁にて配 列位置が異なり、流れ方向に千鳥状に配列した。さらにブ ロックは X_1 - X_2 軸平面内で10列配置され、下壁部に設け られた最上流部のブロックを第1番ブロック,最後に設 けられたブロックを第10番ブロックとする。測定は第7, 8番ブロックにて行った。このときブロックは周期的に配 列し、1周期の間隔は、図に示すように、120mmであ る。したがってブロック群が配置された長さは 600 mm となる。Fig.3は実験に供したブロック形状を示したも のであり、長辺を有する面が流れと直交する面となる。図 に示すように、ブロック壁は設置壁面と角度を持って接続 する。流れと直交するブロック前面および後面は下壁に対 し69°,ブロック側壁は55.5°の傾斜面を有する。



Fig. 3 Configuration of block



Fig. 4 Location of measuring cross section

測定領域は Fig. 2 の斜線部にあたる 1/2 断面とした。 このとき、主流方向速度の測定結果から系の対称性を確認 した。また,乱流計測位置は Fig. 4 に示す Station ①~ ⑧の8断面とし、はく離領域測定のため*X*₁-*X*₃断面に設 けられた Station ⑨, ⑩断面における速度ベクトルの計測 も行った。Station ①~⑧は、原点座標からそれぞれ $X_1/$ $D_{h} = 5.65, 5.85, 6.05, 6.30, 6.55, 6.75, 6.95, 7.20$ に位置する X_2 - X_3 断面に相当し, Station ⑨, ⑩は, $X_2/D_h = 0.75$, 1.18に位置する X1-X3 断面を示している。管路は透明ア クリル板により製作し、配列されたブロックのうち、測定 領域に位置するブロックは板厚1mmのアクリル板を用い 型成形により製作した。その後,上下壁面に段差のないよ う接着した。さらにこの Test section 部は,その全体が 直方体形状の水槽に没する構造とし、測定管路の壁面近傍 における入射レーザー光の屈折を極力抑え、同時に正確な 位置決めを確保した。

2. 計測システム

計測装置は、2Wのアルゴンイオンレーザー光源, FFT タイプ信号処理器,測定時間ステップを決めるタイ マーユニット,プローブ,パーソナルコンピュータより構 成された2次元レーザー・ドップラー流速計である。 レーザー光源より発振されたレーザービームは,分光光学 系で51.5 nm (Green)と488 nm (Blue)の2本のビームに 分光,ブラックセル(80 MHz)で周波数シフトされた後, 伝送用光ファイバによりプローブに送られる。プローブは 500 mm×200 mm×200 mmの可動範囲を持つ3次元トラ バース装置に装着されており,トラバース装置の最小可動 範囲は0.1 mmである。レーザー・ドップラー流速計に関 しては別報¹¹⁾にて詳述した。

3. 実験条件

実験に関しては、実験装置が循環流路構造で水温上昇を 伴うため温度が一定となるまで循環させ、温度一定(水温 40℃)となってから測定を開始した。測定の際のレイノル ズ数は,断面内主流方向平均速度(U_b =0.321 m/s),矩形 断面における水力直径 D_h ,動粘性係数 vにより定義され る値で3.26×10⁴ である。また測定ポイントは,1/2 断面 当たり112点とし,乱流特性量の変化が顕著な壁面近傍に て密になるよう設定した。計測の不確かさ(2 乗和平方根 モデル)¹²⁾は,時間平均速度については±1.3%(約95%包 括度),主流方向変動速度 $\overline{u_1^2/U_b^2}$ については±5.45%, 断面方向変動速度 $\overline{u_2^2/U_b^2}$, $\overline{u_3^2/U_b^2}$ については±3.76%(約 95%包括度)である。

III. 結果と考察

1. Station ①~⑧の測定結果

Fig. 5 は Station ①~⑧における主流方向速度等値線の 測定結果である。測定値は断面内の平均速度 U_b にて無次 元化した。測定結果から全体的傾向として主流方向速度の 最大値は,管路中央側に生成されること,また比較的大き な値を有する流れが管路中央部と側壁側に存在し,ブロッ クの突起平面近傍には低速の流体が存在することがわかる。 Station ①もこうした傾向を示す。この断面で上壁側に比 較的大きな領域で低速領域が存在するが,これは上壁に設 けられた第6番ブロック後流に形成する,はく離流に依 存するものと解釈できる。この低速領域は,ブロック短辺 長の中央に位置する Station ②断面においては減少する。 Station ③,④はブロック後流に位置し,下壁部側で1.0の 等値ラインが壁面から離れて存在するのは,はく離領域が 下壁近傍に存在するためである。

Station ⑤の断面は、上壁に配置された第8番ブロック 前縁に位置し、上下壁の違いはあるがStation ①の位置に 相当する。周期的流れが形成されているとすると両者の等 値線分布は一致することになる。本実験で両者を比較する と、定量的には多少差が認められるものの、その分布は類 似の速度分布を示す結果となった。この点は、さらに下流 に位置するStation ⑥、⑦でもほぼ同様に指摘できる。し たがって、この領域では周期的な流れが形成されていると 思われる。

ブロックが設けられると、ブロックと壁面との流路面積 が減少することにより、主流方向速度が増大するものと思 われるが、Fig.5の結果が示すように、ブロックと壁面間 の主流方向速度は増速されない。これは、断面内に生成さ れる2次流れに起因する。Fig.6にその2次流れの測定 結果を示す。Station①の2次流れ分布から理解されるよ うに、この断面ではブロックから管路内部に向かう速度の 大きな2次流れが生成され、この2次流れは壁面近傍の 低速流体を、ブロック上方に移流する。その結果、ブロッ クと壁面間で挟まれた領域には低速領域が形成されること になり、主流方向速度は断面内で2つのピークを有する ことになる。また、2次流れ強度はブロック前縁にて最大 で断面平均速度の50%程度の値に達する。Station②に至 ると、2次流れは大きく減衰し、ブロック側から上壁に向



Fig. 5 Distributions of streamwise velocity



Fig. 6 Distributions of secondary flow

かう2次流れが生成される。この2次流れはさらに下流 のStation ③,④では、その方向を逆転しブロックに向か う流れを形成する。特にStation④では、2次流れは大き な値を有する下降流を形成し、その大きさにおいて Station①における2次流れ強度に相当する。以上の結果 が示すように、2次流れによる移流、拡散現象はブロック 前縁、ブロック後流で顕著である。また、Station④で特 徴的な点として、上壁面近傍に管路中心に向かう2次流 れと側壁に向かう2次流れが存在する点を指摘できる。

Station ⑤における 2 次流れ速度分布は、上下壁の違い を別にすれば、Station ①における 2 次流れとほぼ類似の 分布を形成している。この傾向は Station ⑥~⑧において も同様であり、現象的には Station ①~④における流れが 再現されているものと考えられる。この意味から周期的な 流れが形成されているものと思われる。

Figs. 7~9 はそれぞれ主流方向(X_1 軸),水平方向(X_2 軸),鉛直方向(X_3 軸)の垂直応力測定結果である。Fig. 9 の測定結果において,陰影にて示した領域は、レーザー光 の屈折などにより十分な計測が行われず,データが欠落し た領域を示している。測定値は断面内平均速度にて無次元 化した。Fig. 7 の Station ①では上下壁に比較的高い値が 存在し、上壁側で最大値を有する。この断面の上壁は第6 番ブロックの後流に生成されるはく離領域に位置し、この はく離領域の影響を受けて高い値を示す。この傾向は Station ⑤においても、同様に認められる。Station ②では 上壁の値は減衰し、はく離領域に相当する Station ④にお いて、再度比較的高い値が上下両壁で認められる。周期的 な流れが形成されているとすると、Station ①~④の分布 は Station ⑤~⑧における分布と類似の分布を有すること になるが、水平方向、鉛直方向の垂直応力分布は、定量的 な一致までは至らないが、この点を比較的満足する分布と なった。Fig. 8 から水平方向の垂直応力は、Station ①、 ⑤のブロック前面および Station ④、⑧のはく離領域にて 高い値を示す点を特徴的な現象として指摘できる。

鉛直方向の垂直応力は、その乱れを抑制する効果が弱い 管路側壁にて大きな値を有することが予測されるが、Fig. 9の結果から理解されるように、上下壁面近傍にて大きな 値を有する。これははく離流に起因するものであり、こう した粗面壁管路の特徴の一つともいえる。

Figs. 10, 11はせん断応力 $\overline{u_1u_2}$, $\overline{u_1u_3}$ の計測結果を示し たものである。ただし垂直応力同様, Station ①~⑧にお ける結果を示した。せん断応力の特徴は, 異符号領域を形 成する点にあり, したがってゼロラインが必ず存在する。 せん断応力 $\overline{u_1u_2}$ の場合には,上下壁を結ぶようにブロッ ク中央部,ブロック両端部近くにゼロラインが存在する。 一方, せん断応力 $\overline{u_1u_3}$ は左右側壁を結ぶようにゼロライ ンが形成される。



Fig. 7 Distributions of streamwise normal stress

123



Fig. 8 Distributions of horizontal normal stress



Fig. 9 Distributions of vertical normal stress

(18)



Fig. 10 Distributions of shear stress $\overline{u_1u_2}$



Fig. 11 Distributions of shear stress $\overline{u_1u_3}$



Fig. 12 Vectors of streamwise velocity

こうした異符号領域の生成は,2次流れにより主流方向 速度が歪まされる結果であり,非円形断面を有する直線管 路の実験にて報告されている¹³⁾。Station ①~④を Station ⑤~⑧と対比させると,定量的には差があるものの傾向は 類似している。

2. Station ⑨, ⑪の測定結果

Fig. 12は Station ⑨, ⑩における *X*₁ 軸方向, *X*₃ 軸方 向平均速度をベクトル図にて示した結果である。図より明 らかなように、ブロック後流部に、はく離領域が形成され ていることがわかる。側壁に近い Station ⑩ではこのはく 離流は存在せず、ブロック幅全体にわたりはく離領域が形 成されるわけではなく、ブロック幅より小さな領域で、は く離領域は形成される。また、ブロック前縁から上面に注 目すると、流れは形状に沿って流れ、ブロック上面ではく 離流を形成することはない。本実験のように、ブロック前 縁を壁面に対して直角とするのではなく、僅かな斜面とす ることより、ブロック上面ではく離流のない安定な流れが 形成される。一方、ブロック後縁に形成されるはく離流の 再付着点近傍では, 垂直応力値は大きな値を示し, 伝熱促 進に寄与することを考え合わせると、圧力損失を極力抑 え,熱伝達促進を図ろうとする場合,ブロック前縁は傾斜 面を有し,ブロック後縁は直角面を有する形状が得策であ ることを推察できる。

IV. 結 論

矩形断面を有する直線管路の上下壁面に粗さ要素として のブロック群を設けた流れ場を対象に、レーザー・ドップ ラー流速計を用いてその3次元流動の乱流計測を行い以 下の結論を得た。

- (1) 主流方向の平均速度分布は,管路中心部側と側壁側 とで流速の速い領域を形成し,2つのピーク値を有す る分布となる。
- (2) ブロックと上壁面,あるいは下壁面とで挟まれた領 域には2次流れにより主流方向速度の低速領域が形 成される。
- (3) 2次流れはブロック前縁とブロック後流で大きな値 を有する。ブロック前縁では最大で断面平均速度の 50%程度の値を有する。
- (4) 各方向の垂直応力は、上下壁面近傍にて高い値を示し、この傾向ははく離領域近傍にて顕著である。
- (5) せん断応力分布は、ゼロラインを挟んだ異符号領域 を形成する。そのゼロラインは、せん断応力 <u>u1u2</u>の 場合に鉛直方向に、<u>u1u3</u>の場合には水平方向に形成 される。

〔記 号〕

D_h:矩形断面管路での水力直径

- $Re: レイノルズ数 = U_b D_h/v$
- *u_i*:*i*方向時間変動速度成分
- $\overline{u_i u_j}$: レイノルズ応力
- U_b:断面内主流方向平均速度
- U_i: i 方向時間平均速度分布
- X_i:物理平面上のi方向座標軸
- *ρ*:密度
- v:動粘性係数

一参考文献一

- J. C. Han, L. R. Glicksman, W. M. Rohsenow, Int. J. Heat Mass Transfer, 21, 1143~1156 (1978).
- J. C. Han, P. R. Chandra, S. C. Lau, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 110, 91~98(1988).
- 3) 五十嵐 保, 高崎博美, 機論 B, 56[531], 3431~3438(1990).
- 4) 高崎博美, 五十嵐 保, 機論 B, 59[562], 2021~2027(1993).
- T.-M. Liou, Y.-Y. Wu, Y. Chang, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 115, 109~114(1993).
- T.-M. Liou, C.-F. Kao, Trans. ASME, J. Fluids Eng., 110, 373~379(1988).
- T.-M. Liou, Y. Chang, D.-W. Hwang, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **112**, 302~310(1990).
- 8) 柳田武彦,中山恒,根本武夫,機論B,50[453],1294~ 1302(1984).
- 9) 松島 均, 柳田武彦, 中山 恒, 機論 B, 59[560], 1244~1251 (1993).
- E. M. Sparrow, J. E. Niethammer, A. Chaboki, Int. J. Heat Mass Transfer, 25, 961~973(1982).
- 11) 杉山 均,秋山光庸,八鍬喜規,若山英樹, 機論 B, 60[571], 842~848(1994).
- 12) 日本機械学会訳,計測の不確かさ,丸善,(1987).
- A. Melling, J. H. Whitelaw, J. Fluid Mech., 78, 289~315 (1976).