直角分岐枝管内に流体振動を誘起するはく離高せん断流*

山口隆平^{*1}, 島根丈二^{*2}, 斉藤修一^{*3}
平岡紀通^{*4}, 藤井 亀^{*5}, 早瀬敏幸^{*6}Mechanism of Periodical Fluid Oscillation Induced by Separating
High Shear Rate Flow in Side Branch of Right-Angle BranchRyuhei YAMAGUCHI^{*7}, Johji SHIMANE, Syuichi SAITO,
Norimichi HIRAOKA, Hisashi FUJII and Toshiyuki HAYASE^{*7} Department of Mechanical Engineering, Shibaura Institute of Technology,
3-9-14 Shibaura, Minato-ku, Tokyo, 108-8548 Japan

In the previous study, it has been clarified in the right-angle branch that the periodical oscillation flow is induced in the side branch and the Strouhal number based on the variables in the side branch is independent of the Reynolds number, the flow division ratio, and the radius of the side branch. This periodical oscillation appears along the boundary between two pairs of vortices with the opposite rotation at the cross section of the side branch across the separation flow. In the present study, another source of the periodical oscillation is experimentally clarified that the high shear rate flow is induced along the separation shearing layer between the separation flow of low velocity and the main flow with high velocity along the distal wall in the side branch since the high shear rate along this separation shearing layer is several times as large as that in the upstream trunk or in the downstream region of the side branch.

Key Words: Pipe Flow, Secondary Flow, Separation, Flow Induced Vibration, Right-Angle Branch, LDA, PIV, Biomechanics

1. 緒 論

枝管が主管とシャープエッジで接続された直角分岐管は流体輸送網の基本的な構成要素の一つであり, これまで乱流域におけるエネルギー損失に関して詳細に検討されている⁽¹⁾. 他方, 層流域の直角分岐では臨界レイノルズ数付近で分岐損失係数の急変が示されている⁽²⁾. これまで, 層流域の直角分岐流は, エネルギー的な視点よりも血行力学的な観点から着目されている⁽³⁾⁽⁴⁾.

著者らは, 前報⁽³⁾⁽⁶⁾において主管から枝管が直角に分岐し, 枝管入口が主管とシャープエッジで接続され,

十分上流で定常層流の直角分岐管流れを取り上げ, 枝管内流れに周期的な振動が発生することを明らかにした. この振動の発生要因として, 枝管内のはく離域と主流との間に発生する大小2対の渦の旋回流の境界に生じるせん断流の不安定性の可能性について指摘した. 分岐管内の振動現象がある条件下で普遍的な現象であることを調査するため, 主管から枝管への流量比, 枝管径, およびレイノルズ数の影響を実験的に検討し, 枝管内に生じる周期的振動発生 of の普遍性を立証した⁽⁷⁾.

本報では, 枝管内流れに発生する周期的な振動が, 大小2対の渦の間のせん断流に加え, 枝管中間面のはく離流と主流との間に発生するはく離せん断層に着目し, この層に沿うせん断流の不安定性が振動発生の要因である可能性について検討する.

おもな記号

 f : 枝管内流れの振動周波数 Hz n : はく離せん断層に垂直な座標 Q_T, Q_S : 主管上流および枝管内の流量 cm^3/s

* 原稿受付 2005年2月18日.

^{*1} 正員, 芝浦工業大学工学部(☎108-8548 東京都港区芝浦3-9-14).^{*2} 学生員, 芝浦工業大学大学院機械工学専攻(☎108-8548 東京都港区芝浦3-9-14).^{*3} SMC(株)(☎105-8659 東京都港区新橋1-16-1).^{*4} (株)フジマック(☎162-0004 東京都港区新橋5-14-5).^{*5} 芝浦工業大学工学部(☎108-8548 東京都港区芝浦3-9-14).^{*6} 正員, 東北大学流体科学研究所(☎980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1).

E-mail: yamaguti@sic.shibaura-it.ac.jp

q : はく離せん断層に接線方向の速度 cm/s

Re : 主管上流の諸量に基づくレイノルズ数
 $= 2UR_T/\nu$

R_T, R_S : 主管および枝管の半径 mm

R_V : 自己相関係数

St_S : 枝管内の諸量に基づくストローハル数
 $= 2fR_S/U_S$

U, U_S : 主管上流および枝管の断面平均速度 cm/s

u, v : x, y 方向速度成分 cm/s

x, y : 主管および枝管軸

ν : 作動流体の動粘度 cm^2/s

ρ : 作動流体の密度 g/cm^3

2. 実験装置および実験方法

2.1 流路モデル 流路モデルの概略、二次流れおよび分岐中間面の速度ベクトル等の測定断面を、図1に示す。本報では、おもに前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾と同じ主管半径 $R_T=12.2\text{ mm}$ 、枝管半径 $R_S=7\text{ mm}$ を取り上げるが、枝管半径 $R_S=4\text{ mm}$ についても示す。座標は主管軸を x 、枝管軸を y とし、両管軸を含む対称面を中間面と呼び、それぞれの速度成分を u, v とする。代表的な測定断面の座標を併記する。

また、PIV による分岐中間面の速度ベクトルから得られるはく離せん断層 (Separation shearing layer) を⁽⁶⁾、図1に示す。枝管内に発生する振動を測定するため、この層を横切って $\pm 1\text{ mm}$ の領域で 0.2 mm ごとに軸方向速度を測定する。この振動発生 の測定範囲は、枝管入口の断面 S_1 から S_5 までは $1\sim 2\text{ mm}$ ごとに測定する。作動流体として、流路材であるアクリルと同じ屈折率をもつよう化ナトリウム NaI の飽和水溶液 (質量混合比 水: $\text{NaI}=1:1.78$) を用いる。液温 296 K (23°C) の場合、この作動流体の物性値は屈折

率 1.49 、密度 $\rho=1.83\text{ g/cm}^3$ および動粘度 $\nu=1.58\times 10^{-2}\text{ cm}^2/\text{s}$ である。

2.2 PIV による速度ベクトルの測定 速度ベクトルは、出力 30 mJ のダブルパルス YAG レーザを光源とする相互相関 PIV を用いて測定した。パルス間隔は、条件によって $200\sim 1000\text{ }\mu\text{s}$ の間で設定した。パルス幅は $3\sim 5\text{ ns}$ である。パルス光は、シリンダリカルレンズにより幅 0.3 mm のシート状にし、モデル対称面に照射した。使用トレーサ粒子として、よう化ナトリウムの飽和水溶液と密度がほぼ等しいリキッドガス社製 MSF-10 M (粒径 $1.0\text{ }\mu\text{m}$) のシリカ粒子 ($\rho=1.80\text{ g/cm}^3$) を用いる。トレーサ粒子の散乱光は、解像度 1008×1018 ピクセルの CCD カメラ (Kodak ES 1.0) を用いて測定対象面に垂直方向から撮影した。画像処理は、Insight Ver. 3.3 により 50 組の画像の平均を行った。

枝管断面の二次流れ速度ベクトルの測定では、格子間隔を 0.3 mm ないし 0.5 mm で、中間面の測定では 0.5 mm ないし 1.0 mm 間隔で測定する。検査面積は、それぞれ $20\times 20\text{ mm}$ 、 $30\times 30\text{ mm}$ 程度である。

2.3 LDA による速度測定とスペクトル解析 速度分布を前方散乱形の二次元レーザドップラー流速計 (以後 LDA と呼ぶ) により測定する。使用した集光レンズの焦点距離は 122 mm であり、測定部となる焦点の大きさは大気中で直径 0.04 mm 、長さ 0.2 mm である。信号処理は FSA-3500 によった。散乱粒子として、粒径 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 程度の二酸化チタンを含む水溶性修正液を作動流体に数滴混入した。

測定では、レーザ光は中間面に垂直に入射する。中間面に平行および垂直な方向の空間分解能は、それぞれ焦点の大きさである 0.04 mm および 0.2 mm 程度と推定される。はく離せん断層を横切ったの軸方向速度測定では 0.2 mm ごとに行う。また、流速の周期的振動の測定では、各位置での軸方向速度を 2 ms の時間間隔で 40 s 取り込み、 20 K 個のデータを収集する。これら 20 K 個のデータのパワースペクトル解析および自己相関係数を求めることにより、流れの周期性を検討する。

3. 結果および考察

対象としたレイノルズ数は、前報に引き続き振動現象の現れやすい $Re=800$ である。

3.1 はく離域の二次流れ 前報⁽⁵⁾ では、枝管内の振動の発生要因として、はく離域を横切る枝管断面内に発生する同方向に回転する大小 2 対の渦の間の境界に沿ってせん断流が生じ、その流体力学的不安定性

Fig. 1 Schematic system of right-angle branch and typical measurement section ($R_S=7\text{ mm}$)

Fig. 2 Secondary velocity vector in side branch

により周期的な振動が発生する可能性を指摘した。PIVにより得られた結果から、この現象を示す。流量比 $Q_s/Q_T=0.25$, 0.50 の場合、はく離域を含む枝管断面 S_3 , S_5 , S_7 の二次流れ速度ベクトルを、それぞれ図 2(a), (b) に示す。はく離域の中央に位置する断面 S_3 では、中枢壁側に発生する小さな渦の拡大図も併記する。ここで、PW, DW は、それぞれ図 1 中の Proximal wall (中枢壁), Distal wall (末しょう壁) の略記である。

はく離域の中央に位置する断面 S_3 では、大小 2 対の対称な渦が発生し、小さな渦は断面 S_5 , S_7 では中枢壁側にわずかに残り、より下流ではこの渦は消滅していくと考えられる。このように、同方向に回転する 2 対の渦の境界ではせん断流が周期的振動の一因となることを示した⁽⁶⁾。この傾向は、枝管内流量の大きい $Q_s/Q_T=0.50$ でより顕著に現れる。

3・2 枝管中間面の速度とはく離せん断層 流量比 $Q_s/Q_T=0.25$, 0.50 の場合、分岐直後の枝管内中間面の速度ベクトルを、図 3 に示す。

中枢壁に沿ってはく離流が発生し、末しょう壁に沿う大きな速度の主流とはく離流の回りを流れる。したがって、速度の小さなはく離域の流れと速度の大きい主流との間には、図 3 に示す明らかなはく離せん断層

Fig. 3 Velocity vector and point with oscillation

が形成される。この層を挟む ± 1 mm の領域において 0.2 mm 間隔で軸方向速度 v を LDA で測定し、スペクトル解析の結果、軸方向速度に明りょうな周期的振動の発生した位置を●で示す。枝管入口断面では振動は発生しないが、入口から 4 mm で振動が発生し始める。より下流に行くにつれて振動発生点のはく離せん断層の両側に拡大する。この傾向は、流量比 0.25 , 0.50 の両条件とも同様である。

3・3 はく離せん断層に沿うスペクトル解析 振動が最も明りょうな S_3 断面に近い点 P_1 ($Q_s/Q_T=0.25$) と P_2 ($Q_s/Q_T=0.5$) を含む中間面上のスペクトル分布を、図 4 に示す。測定位置は、それぞれ図 3(a) および図 3(b) の点 P_1 および P_2 を通る分岐中間面を横切る枝管直径上にある。

はく離せん断層付近に明りょうな周期性のある振動発生点 P_1 ($Q_s/Q_T=0.25$) と点 P_2 ($Q_s/Q_T=0.5$) があり、中枢、末しょう壁側に行くにつれスペクトル分布はランダムとなる。点 P_1 ($Q_s/Q_T=0.25$) の周波数は $f=1.86$ Hz と点 P_2 ($Q_s/Q_T=0.5$) の周波数は $f=$

Fig. 4 Distribution of power spectrum at common median plane in side branch

(a) $Re=800, Q_s/Q_T=0.25, R_s=7 \text{ mm}, x/R_s=0.09, y/R_s=3.04$ at P_1 in Fig. 5(a)

(b) $Re=800, Q_s/Q_T=0.50, R_s=7 \text{ mm}, x/R_s=-0.010, y/R_s=3.04$ at P_2 in Fig. 5(b)

Fig. 5 Frequency analysis of axial velocity in side branch

5.76 Hzである。この周波数はそれぞれストローハル数 $St_s=0.63, 0.98$ に相当する。流量比 Q_s/Q_T の相違によってストローハル数は変化するが、これは平均ス

トローハル数 1.03, 標準偏差 0.32 に対して許容できるばらつきの範囲にあると考える⁽⁷⁾。図5に示すように点 P_1 と点 P_2 の速度の時間変動、スペクトル分布お

→: Magnitude of characteristic velocity $U=5.4$ cm/s

(a) $Q_s/Q_T=0.25$ at P_1

→: Magnitude of characteristic velocity $U=5.4$ cm/s

(b) $Q_s/Q_T=0.50$ at P_2

Fig. 6 Tangential velocity profile across separation shearing layer ($Re=800$, $R_s=7$ mm)

および自己相関係数から枝管内流れは周期的に振動していることが確認される。

3・4 はく離せん断層に沿う速度分布と振動発生
の要因 周期的振動が発生する点 P_1 ($Q_s/Q_T=0.25$) と点 P_2 ($Q_s/Q_T=0.5$) を通るはく離せん断層に平行な速度分布を図6に示す。この結果は、図3に示す速度ベクトルから、はく離せん断層の法線方向に位置する接線方向のベクトルを選択して得られた速度分布で、図6(a)のように速度分布に若干のばらつきをもっている。速度 Δq の大きさは図上部に記した主管上流の代表速度 U の大きさから、 Δh ははく離せん断層に垂直な厚さであり、その大きさは図左部に記した座標 n の Scale から比例で算出した。

図6に示すように、はく離せん断層を境にはく離域側の速度の小さな流れと、主流の大きな速度の流れ場となり、その境界のせん断速度(速度こう配)は極めて大きい。点 P_1 ($Q_s/Q_T=0.25$) ではせん断速度は 80 s^{-1} 、点 P_2 ($Q_s/Q_T=0.5$) では 296 s^{-1} となる。この値は、枝管下流の十分に発達したポアズイユ流れの壁上のせん断速度 24 s^{-1} ($Q_s/Q_T=0.25$)、 47 s^{-1} ($Q_s/Q_T=0.25$) の4倍ないし6倍の大きさである。

二次元の流れに対しては、一般に、速度の大きく異なる平行な二つの流れが合流するとき、合流時の速度

Fig. 7 Velocity vector and point with oscillation ($Re=800$, $Q_s/Q_T=0.25$, $R_s=4$ mm)

Fig. 8 Distribution of power spectrum at common median plane in side branch ($Re=800$, $Q_s/Q_T=0.25$, $R_s=4$ mm, $y/R_s=3.81$)

の不連続性から、合流後の二つの流れの境界面でせん断流が生じ、速度分布に変曲点をもつ流れの一般的な性質として、不安定になることが指摘されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本報で対象とした枝管内流れは複雑な三次元構造を有しているので、単純に二次元の結果をあてはめることはできないが、速度分布は点 P_1 、 P_2 の付近で明りょうな変曲点をもつことなどから、流れ場の周期的振動は、上記のせん断流の不安定と密接に関連していると考えられる。

同様に、枝管半径 $R_s=4$ mm、 $Re=800$ 、 $Q_s/Q_T=0.25$ の場合、中間面の速度ベクトルとはく離せん断層の点 P_3 を通る枝管直径上のスペクトル分布を、図7および図8に示す。前述の $R_s=7$ mm の場合と同様に、はく離せん断層を中心に明らかなスペクトルのピークが見られる。

また、はく離せん断層に沿う速度分布を図9に示

Fig. 9 Tangential velocity profile across separation shearing layer ($Re=800$, $Q_s/Q_T=0.25$, $R_s=4 \text{ mm}$, P_3)

す。せん断速度は、 117 s^{-1} であり、枝管下流のポアズイユ流れの壁のせん断速度(127 s^{-1})に匹敵する大きさを持ち、速度分布に変曲点をもつ。なお、図示しないが、流量比 $Q_s/Q_T=0.11$ の場合には、せん断速度は 65.7 s^{-1} である。

したがって、直角分岐枝管内流れの周期的振動は、枝管内のはく離域と主流との間に発生する大小2対の渦の旋回流の境界に発生するせん断流に加え、はく離せん断層を境界とする管壁のせん断速度に匹敵するか、それに倍する大きなせん断速度の二つの要因により発生すると考えられる。しかも、分岐部からのはく離領域と、二次流れに伴う2対の渦の発生領域は枝管入口に比較的近い領域にあり、実験で測定される速度の振動現象がいずれの原因によるものなのか、あるいは両者の影響を同程度に受けているもののかなどは、管内の詳細な測定により初めて明らかにし得るものであり、単純な二次元のはく離流の問題とは本質的に異なる。

しかしながら、流れの不安定から規則的な周期的振動が発生するメカニズムをより厳密に解明する余地があり、今後の課題とさせていただきます。

4. 結 論

本報では主管から枝管が直角に分岐し、枝管入口が主管とシャープエッジで接続され、主管十分上流で定

常層流の直角分岐管流れを対象とする。対象とした流れは、主として主管半径 $R_T=12.2 \text{ mm}$ 、枝管半径 $R_s=7 \text{ mm}$ 、レイノルズ数 $Re=800$ 、流量比 $Q_s/Q_T=0.25, 0.50$ の定常層流である。このとき、直角分岐枝管内に発生する周期的振動発生要因を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

定常層流で直角分岐の枝管内に発生する周期的振動は、直角分岐に起因する流体の普遍的振動現象と考えられる。直角分岐管の枝管内流れのこの周期的振動の発生要因として、大小2対の渦の間のせん断流に加え、枝管内のはく離流と主流との間に発生するはく離せん断層に沿って発生する大きなせん断速度が振動発生の新たな要因と考えられる。

本研究は、文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業(平成14年度-平成18年度)によった。関係各位に謝意を表す。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 管路・ダクトの抵抗(第2版), (1970), 86-89.
- (2) 東野文男・阿部賢一・桶田理喜・望月孝規, 非対称分岐管流に関する研究, 機論, 47-423, B (1981), 2139-2148.
- (3) Houle, S. and Roach, M. R., Flow Studies in a Rigid Model of an Aorto-Renal Junction, *Atherosclerosis*, 40 (1981), 231-244.
- (4) Yamamoto, T., Tanaka, H., Jones, C. J. H., Lever, M. J., Parker, K. H., Kimura, A., Hiramatsu, O., Ogasawara, Y., Tsujioka, K., Caro, C. C. G. and Kajiya, F., Blood Velocity Profiles in the Origin of the Canine Renal Artery and Their Relevance in the Localization and Development of Atherosclerosis, *Arterios. Thromb.*, 12 (1992), 626-632.
- (5) 山口隆平・高橋泰典・工藤奨・早瀬敏幸, 定常層流における直角分岐枝管内流れの周期的振動, 機論, 65-630, B (1999), 559-565.
- (6) 山口隆平・高橋泰典・工藤奨・早瀬敏幸, 定常層流における直角分岐枝管内流れの可視化, 機論, 65-634, B (1999), 1986-1991.
- (7) 山口隆平・工藤奨・天谷英昭・重田雅也・早瀬敏幸, 直角分岐管の分岐点回りの流れ構造と枝管内流れの周期的振動発生, 機論, 68-671, B (2002), 2014-2019.
- (8) 谷一郎, 流体力学の進歩 境界層, (1984), 139-156, 丸善.
- (9) Brown, G. L. and Roshko, A., On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers, *J. Fluid Mech.*, 64 (1974), 775-816.