コラプシブルチューブ流れのヒステリシスと多価性*

山根隆志^{*1}, 折田豊樹^{*1}

Hysteresis and Multiplicity of Collapsible Tube Flow

Takashi YAMANE and Toyoki ORITA

The purpose of this research is to examine the details of hysteresis which appears in the pressure-flow relation of collapsible tubes such as veins exposed to negative transmural pressure. To exclude human error in setting the flow rate, an electric control valve was introduced and was automatically controlled with a personal computer. Tube deformation was measured simultaneously with a laser displacement meter to obtain the displacement distributions. The hysteresis in which the pressure drop for increasing flow is larger than that for decreasing flow can be seen in the range of low flow rate. The tube shows self-excited oscillations for increasing flow and does not oscillate for decreasing flow in the range of high flow rate. It was found that the hysteresis for the low flow range is caused not only by elastic hysteresis but also by fluid dynamic hysteresis. It was also found that the lack of state uniqueness in the high flow range is caused by multiplicity which is due to different initial conditions for a nonlinear system.

Key Words: Flow-Induced Vibration, Separation, Self-Excited Vibration, Bio-Fluid Mechanics

1. 緒 言

心臓バイパス手術時の脱血回路に接続された静脈など、相対内圧の下がった柔らかいチューブ内の流れでは、時として生じる振動現象が知られている。これを従来、コラプシブルチューブの流れと呼び、この振動現象以外にもチューブが柔らかいために生じるさまざまな現象に対して、工学的説明を与える数々の研究がなされてきたが、理論統一はされていない。実験的には静的不安定の存在⁽¹⁾、および自励振動に対しては周波数に依存した弾性ヒステリシスの影響⁽²⁾が指摘されている。解析的には、逆に、定常解を含む複数の安定動作点の存在^{(3)~(5)}も予測されている。

著者ら⁽⁶⁾は、これらの現象を実験的に検討してきたが、ここでは、より精密に実験操作を行うため電動比例制御弁を使用し、パーソナルコンピュータから準定常的に流量設定を行うことにした。特に実験の際、圧力-流量特性やチューブ変形特性にしばしば現れるヒステリシス、および自励振動の有無に現れる非一意性を中心に検討を加える。

2. おもな記号

A : チューブ断面積
 A_0 : 差圧がない場合のチューブ断面積
 h_1 : 上流落差
 h_2 : 下流落差
 P : チューブ内圧(ゲージ圧)
 P_1 : チューブ上流 200 mm での静圧(ゲージ圧)
 P_2 : チューブ下流 200 mm での静圧(ゲージ圧)
 P_e : チューブ外圧(ゲージ圧)
 Q_1 : 上流流量, 定常値は Q_0
 Q_2 : 下流流量, 定常値は Q_0
 R : 同一内外圧時のチューブ内半径
 X : チューブ下流端から上流へ測った距離
 Z : チューブ中心線から内壁までの距離

3. 装 置 概 要

図1に示すように、コラプシブルチューブとして、内径 7 mm 厚さ 1 mm 長さ 101 mm のシリコンチューブを、ゲージ圧 0~0.3 atm の加圧室内に置き、リザーバの静水圧で流れを与えている。下流には慣性等価長さ 1.68 m の剛体管が接続されており、シリコンチューブ前後はともに長さ 450 mm のアクリル剛体

* 平成5年1月20日 第3回バイオメカニクスカンファレンスにおいて講演, 原稿受付 平成5年6月30日.

*¹ 正員, 機械技術研究所エネルギー部(〒305 つくば市並木1-2).

管であるが、内壁は相互に滑らかに接続するよう配慮している。十分に上流に電動比例制御弁を置き、パーソナルコンピュータからボールバルブの角度を $90^\circ/255$ 間隔で設定でき、下流流量 Q_2 は電磁流量計で計測した。結果的には図2のように、時間間隔 7 s、流量増分約 0.04 L/min で流量設定を行ったことになる。流量増分については上記値の 4 倍までは結果にほとんど差が出ないことをあらかじめ確認した。また、図1中の各点の静圧は、シリコン油を封入した半導体圧力ゲージで計測した。チューブ中心線の表面変位は、パルスステージに搭載したレーザ変位計で計測した。変位計測も含め、最小流量から最大流量までの1往復計測には約1hを要した。

4. 実験結果

4.1 チューブ弾性則 静的なチューブ弾性則は、振動実験系をそのまま使用し、下流管出口にピペットを立て初期張力の影響を含めたままの計測を行った。2回実施した計測の結果が図3に示されているが、剛性がステップ状に変化する傾向のある、ヒステリシスを有するチューブ弾性則となっている。この弾性ヒステリシスは2回の計測に対して、再現性が高いといえる。

4.2 生じ得る現象 外圧を一定に保って流量を

上げていくと、シリコンチューブの形状は図4の写真のようになる。流れのない状態で、外圧によってつぶれていたチューブは上流から開いていくが、剛体管への接続端の直前のみがつぶれたまま残り、そのうち一定振動数の自励振動が始まり、高い流量に達してようやくチューブは開ききり振動は停止する。

この現象の変化を、外圧と流量に対して整理したものが、図5および図6である。二つの図に分けたのは、流量増加時と減少時では境界が少々異なるからであ

図3 弾性ヒステリシスを有するチューブ弾性則 (連続2回のデータ)

図1 コラプシブルチューブ実験装置(シリコンチューブ: $\phi 7 \times \phi 9 \times 101$, $h_1 = 2470$ mm, $h_2 = 1030$ mm)

図2 電動比例制御弁の動作(弁開度を定常流量値で表示)

図4 チューブの形状変化の例

る。この例では、外圧が 12 kPa 以下ではまったく振動しない。15 kPa 程度の低い外圧では、4~10 Hz の低次振動モードのみが現れる。20 kPa を超える高い外圧では、流量増加に伴って、まず 400 Hz 前後のブーという音が発生し、すぐ 20~30 Hz の高次振動域に入り、その後 4~10 Hz の低次振動域に移り、高流量に達して振動は停止する。図右端の最大流量は全落差によって制限されている。

一方、流量減少時には概して境界が左に寄っており、なんらかの理由によって、流量変化に対して現象が生じるのが遅れていることを示している。これが本報の検討項目の一つである。ただし、これらのマップを取得する際のバルブ開閉操作は手動で行ったため、電動バルブのような滑らかな操作が難しく、後に示す自動計測結果よりも、図 5 および図 6 のほうが振動領域が若干広がっていることをお断りしておく。また、高次・低次振動モードの混在がないとは断言できないが、

大部分のケースで卓越振動数が明りょうにステップ状に変化するのが観察されたので、図 5, 6 中には明確に境界線を付した。

ここに示したような振動モードが複数あることは、理論的にすでによく知られている⁽⁷⁾。本稿では、以下、振幅の小さい 400 Hz 前後の振動については議論せず、高次振動と低次振動をまとめて自励振動として扱って議論を進めることにする。

4・3 圧力-流量関係における非一意性 外圧一定

の条件下で、実施日および実施時間の異なる圧力-流量特性および変形特性のデータ、3 ケースを図 7 に示す。バルブに若干の機械的あそびがあるためか、最大流量値の設定再現性が良好でなく、最大流量付近の曲線に差が出ているが、現象そのものの再現性はよいといえよう。ただしいずれの場合も、事前に数 min の自励振動と 1 往復の流量増減を行った後に計測を開始したもので、しかも 4 h 以上の長時間計測を行わないよ

図 5 流量増加時の現象マップ

図 6 流量減少時の現象マップ

図 7 流量変化に対する現象の再現性(3 ケース)

う注意した。図7中、 $P1$ および $P2$ はチューブの上流圧および下流圧を 200/s で 1s サンプルングした平均値、 $P2_{rms}$ は下流圧力の標準偏差(振幅)、 Z/R は下流端から 10 mm 位置でのチューブ変位を示し、自然状態は $Z/R=1$ 、完全圧平状態は $Z/R=0$ に対応する。特徴的なことは、(1)流量 1~2 L/min で定常状態だが圧力差に一意性がないこと、および、(2)流量 2.5~3.5 L/min でチューブ変形の異なる振動状態と定常状態の両方があることが、振幅に相当する $P2_{rms}$ の曲線からわかる。これらは初期条件の違いからくる多価性によるものか、任意の中間値を取り得るヒステリシスによるものかを確認するため、流量折返し点を変えた実験を行った。図8に示すとおり 1.5~2.5 L/min の低流量で折り返した場合、任意の中間値を取っていることがわかる。したがって、これは何らかのヒ

ステリシスによるものと考えられる。2.5 L/min 以上の高流量で折り返した場合は、もとのパスを戻すだけで任意の中間値は取っていないため、こちらは振動状態と定常状態の多価性を示していると考えられる。

図9に示すように、異なる外圧条件でも類似のヒステリシス現象が現れていることがわかる。ただし、この場合は最大流量でも振動が停止するところまで到達せず、多価性については確認できない。

4.4 流れのヒステリシス ヒステリシスとはいっても、弾性ヒステリシスか流れのヒステリシスかが不明であるので、チューブ変形を比較してみた。図10および図11において、流量増加時と減少時の例えば 1.8 L/min における変位分布を比較するとわかるように、流量減少時より増加時のほうがスロートも含めてよく膨らんでいる。しかも図8および図9と対応づけ

図8 圧力-流量曲線に現れたヒステリシスおよび多価性 ($P_e=17.5$ kPa)

図9 圧力-流量曲線に現れたヒステリシスおよび多価性 ($P_e=19.6$ kPa)

図 10 ヒステリシス領域における流量増加時と減少時のチューブ変形の相違 ($P_e=17.5$ kPa)

図 12 多価領域における振動時および定常時のチューブ変形の類似性(自励振動時は時間平均を示す)

図 11 ヒステリシス領域における流量増加時と減少時のチューブ変形の相違 ($P_e=19.6$ kPa)

図 13 バルーンを用いた外圧トリガによる多価性の確認実験装置(シリコンチューブ: $\phi 7 \times \phi 9 \times 100$, $h_1=2630$ mm, $h_2=830$ mm, 慣性等価下流管長 1.96 m)

ると、膨らんだ形状のほうが圧力損失が大きいという一見逆説的な結果を示している。これは例えば以下のように説明することができよう。同一流量で比較するとき P_2 検出孔での全圧は厳密に同一であり、チューブの抵抗値を支配するスロート開度もほぼ同程度に達していると思われる。しかし弾性ヒステリシスの存在により、同一流量を達成するためには、流量増加時にはより高いスロート内圧がかかっているはずである。したがって、剛性の下がったチューブ上流側も膨らむ傾向を示し、摩擦損失が相対的に小さい本ケースでは、上流圧 P_1 も高い値を示していると考えられる。ただし流量増加時にスロート内圧が高いとはいっても、図 7 に示された数 kPa に達する圧力損失の差は、図 10 および図 11 に示されたようなスロート変形の差のみでは説明がつかない。むしろスロート変形には差がない。したがって、スロート下流でかなり大きな流れのヒステリシスが存在すると仮定しなければ、圧力損失のヒステリシスに対する説明が完了しない。この仮説は、ディフューザにおいて開き角を上げていくとき、まず非対称はく離ないし付着噴流が生じ圧力損失が最大に達した後、対称噴流となって圧力損失が低下する

現象⁽⁸⁾を、流量が増加する場合に拡張解釈したものである。非対称はく離と対称噴流との切換えにヒステリシスを有する点、および噴流化する前に大きな圧力損失を生じる点に共通性がある。著者らが可視化実験において強い非対称はく離を観察した⁽⁶⁾ことも若干の裏付けとなろう。層流・乱流間の遷移の影響については、チューブの周長と断面積で定義されるレイノルズ数 ($Re=4Q/\pi\nu D$) を検討してみた。レイノルズ数が 3000 に達するのは流量約 1 L/min であり、ここで非円形管内の流れが乱流に遷移するといわれる。よって、本実験でヒステリシスを示す状態はすべて乱流領域であると思われる。

4.5 振動・定常の多価性 一方、振動状態・定常状態の多価性が推察された、流量 2.5~3.5 L/min の領域でのチューブ変形が、図 12 に示されている。振動中の流量増加時よりも定常の流量減少時のほうが、平均変位でみてスロートがよりつぶれている傾向はあるが、大局的に大差はない。つまり、同一流量で圧力降下および変形がほぼ同じ状態であるにもかかわらず、振動状態と定常状態を取り得ること、すなわち初期値の違いによる動作状態の多価性が示されている。次に

図 14 外圧トリガによる状態の変化(流量は減少方向で設定, 3 ケースが振動状態へ移行)

図 15 外圧トリガによる状態の変化(流量は減少方向で設定, 2 ケースが振動状態へ移行)

この確認実験について述べる。類似現象は他の文献⁽⁹⁾にも報じられている。

5. 多価性の確認実験

ここにいう振動・定常の多価性が初期条件によるものであるとすると、チューブ外圧にトリガをかければ、状態が相互に入れ替わり得るはずである。そこで別途、図 13 のように、容積 12 300 cm³ の加圧室内に体積 270 cm³ のバルーンを入れ、空気コンプレッサでバルーン体積を三角波状に変化させる実験を行った。これによって、チューブ外圧は 3 kPa 程度変化し、チューブの初期条件が変化する。結果を図 14 および図 15 に示す。4 章までは下流圧が

$$P2 = 0.735Q^2 - 10.22 \text{ [kPa]}; Q2 \text{ [L/min]}$$

で表されるような下流剛体管の設定条件であったが、本節では

$$P2 = 1.222Q^2 - 7.86 \text{ [kPa]}; Q2 \text{ [L/min]}$$

で表される設定条件に変わっていることをお断りする。流量およびチューブ内外圧差(例えば $P2 - P_e$)が同一という条件では、図 15 が 4 章の $P_e = 17.5 \text{ kPa}$ にほぼ相当するとみていただきたい。図 15 のように、外圧がもとの状態に戻ったとき、状態が定常から振動へと移行している例がいくつも見いだされた。図 14 の下から 3 ケースおよび図 15 の下から 2 ケースがこれに相当する。逆に、振動から定常へと移行する場合もあった。この場合、外圧トリガ前後で、変形まではみていないが、流量・圧力についてはほぼもとどおりであった。これにより状態の多価性が確認された。

6. 結 言

電動比例制御弁を利用し、パーソナルコンピュータ

から準定常的に流量設定を行うことにより人為誤差を排除して、長い下流管を有するコラプシブルチューブの特性を詳細に検討した。圧力-流量特性やチューブ変形に、低流量域で現れる定常状態の非一意性は、弾性ヒステリシスおよび流れのヒステリシスの両者によるものであることがわかった。一方、流量増加時に振動し、流量減少時は定常であるという非一意性は、非線形系における初期条件の違いからくる多価性によるものと確認された。

文 献

- (1) Bertram, C.D., Unstable Equilibrium Behaviour in Collapsible Tubes, *J. Biomech.*, 19-1(1986), 61.
- (2) Bertram, C.D. and Raymond, C.J., Measurements of Wave Speed and Compliance in a Collapsible Tube During Self-Excited Oscillations: a Test of the Choking Hypothesis, *Med. Biol. Eng. Comput.*, 29-5(1991), 493.
- (3) Matsuzaki, Y. and Matsumoto, T., Flow in a Two-Dimensional Collapsible Channel with Rigid Inlet and Outlet, *Trans. ASME, J. Biomech. Eng.*, 111-3(1989), 180.
- (4) Reyn, W.J., Multiple Solutions and Flow Limitation for Steady Flow Through a Collapsible Tube Held Open at the Ends, *J. Fluid Mech.*, 174(1987), 467.
- (5) Jensen, O.E. and Pedley, T.J., The Existence of Steady Flow in a Collapsed Tube, *J. Fluid Mech.*, 206(1989), 339.
- (6) 山根・折田, コラプシブルチューブ流れの釣合点の安定性について, 機講論, No. 900-51(1990), 52.
- (7) Jensen, O.E., Instabilities of Flow in a Collapsed Tube, *J. Fluid Mech.*, 220(1990), 623.
- (8) 桜井, ターボ流体機械とディフューザ, (1983), 104, 日刊工業新聞.
- (9) 林・ほか 2 名, コラプシブルチューブの静特性に関する研究(第 2 報, 定常流の安定性), 機論, 58-549, B(1992), 1440.