コラプシブルチューブの自励的圧力脈動に関する実験的研究*

堀 川 幸 治^{*1}, 原 文 雄^{*2}Experimental Study on Self-Excited Pressure
Oscillations in a Collapsible Tube

Kohji HORIKAWA and Fumio HARA

This paper deals with vibrational characteristics of self-excited pressure oscillations generated in a collapsible tube when the internal water flow rate becomes large and the transmural pressure is sufficient to produce a large deformation in the tube crosssection. Experiments were performed for various values of internal water flow rate, tube length and transmural pressure; and two types of self-excited pressure oscillations were found. One was low-frequency oscillation having a large pressure amplitude occurred when the transmural pressure was medium, and the other was high-frequency oscillation with moderate amplitude occurring when the transmural pressure was large. Theoretical investigation based on Ohba's theory revealed that the low-frequency oscillation is the same type as that already reported but the high-frequency one is a new type of self-excited oscillation in a collapsible tube.

Key Words: Vibration, Self-Excited Oscillation, Collapsible Tube, Low Frequency Oscillation, High-Frequency Oscillation

1. 結 言

現在、心臓の心内修復を行うためには心臓停止をと
もなう開心手術が必要である。このために、開心手術
中は全身への血液循環を保つための人工心臓、および
血液の酸素化を行うための人工肺を合わせた人工心肺
装置により生命の維持がなされる。

このとき、右心房より血液を抜き取る脱血は上下大
静脈に注射針のような脱血カニューラを挿入して行わ
れる。両大静脈より流れてた血液は Y 字管で連結さ
れ、人工心肺装置に送り込まれ、そこで酸素化が行わ
れた後、大腿部の大静脈に挿入された送血カニューラ
から体内に戻される。ところが、動脈を経て毛細血管
を通過し、さらに静脈、大静脈を経て右心房に達する
と血圧は数 mmHg まで下がる。そこで、十分な血液量
を維持するために人工心肺装置内でローラポンプによ
り人工的な吸引による脱血が行われる。吸引すると血
圧はいっそう下がるため、静脈血管がつぶれて（コラ
プス）、血液流に振動が生じる。振動流が発生すると、
静脈壁の振動により神経反射を介して腎機能が低下し

振動持続の時間が長びくほど尿量が減少する傾向が認
められる。また振動流が長時間発生した症例に高度の
溶血が生じる。よって、心内修復手術中はこの不安定
振動が発生しないように、細心の注意が必要である。

これまでに、東京女子医大の辻⁽¹⁾のグループによ
り、心臓のバイパス手術の間の上下大静脈と血液流の
2~3 Hz の低周波振動について報告がなされている。
また名古屋大の松崎⁽²⁾、関西大の大場⁽³⁾らのグループ
によって低周波振動の実験および理論について報告が
なされている。

国外の研究としては 1969 年と Conrad のコラプシ
ブルチューブ内の圧力・流量特性の研究で、自励振動
の発生が報告された⁽⁴⁾。その後、Pedley⁽⁵⁾、Cancelli⁽⁶⁾、
Shapiro⁽⁷⁾、Bertram⁽⁸⁾らの理論と実験の研究が報告
されている。1982 年に Bertram⁽⁹⁾は、極めて低い周波
数の振動と高周波振動の 2 タイプが存在することを報
告した。

本研究では、コラプシブルチューブとしてシリコン
チューブを用いチューブ内流体の自励的な圧力脈動に
関する実験を行った。その結果、Bertram が発見した
タイプと異なる低周波振動および高周波振動という二
つの異なった振動様態の存在を確かめたのでここに報
告をする。

* 原稿受付 平成 2 年 5 月 8 日。

^{*1} ソニー(株) (〒141 東京都品川区北品川 6-7-35)。^{*2} 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂 1-3)。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験装置 図1に本実験装置のシステム概略図を示す。本実験で用いたコラプシブルチューブは、内径8mm、肉厚1mmのシリコンチューブである。そのチューブ長は70mm～180mmまで9種類である。このコラプシブルチューブは両端を二つのアルミ合金製の剛パイプに密着してはめ込まれ、密閉容器(チェンバ)内に水平に張られている。また剛パイプは流路パイプにネジどめされている。

水は上部にある水タンクより、パイプ内を自由落下し、90°エルボで水平方向に流れの方向を変え、助走区間、剛パイプを通り、コラプシブルチューブ内を通過し、さらに剛パイプを通り、下部の受けタンクに出る。ここから、インバータ制御の三相交流のモートルポンプを使用して上部水タンクに揚水される。なお、上部水タンクは二重構造になっており、落下パイプおよび揚水パイプは内側タンクに連結されている。内側タンクの水を外側タンクにオーバーフローさせて、内側タンクの水位が一定に保たれるようになっている。またオーバーフローした水は、そのまま排水パイプを通して下部受けタンクに排水される。

パイプおよびチェンバ密閉容器は観察を容易に行えるように透明アクリル製としてある。チェンバ内圧はエアー・コンプレッサにより加圧され、バルブの開閉により、圧力を調整する。

本実験装置においては、コラプシブルチューブの上・下流端の圧力変動、チェンバ内圧力 P_e 、およびパイプ内水流量 Q を測定する。上・下流端の圧力変動、チェンバ内圧力はひずみ式圧力変換器で測定する。また流路下流端でメスシリンダとストップウォッチを用いて、体積流量を3回測定して、その平均値を平均水

流量とする。

2.2 実験方法 90°エルボ上部にあるバルブの開度を調節し初期流量(チェンバ内を加圧せず、チューブが初期の円形断面形状を保った状態の流量)を設定した後、水を流しエアー・コンプレッサを用いてチェンバ内圧力のある一定の値に保つ。チェンバ内圧力を圧力センサを用いて測定し、その測定値をマルチボルトメータに出力する。チェンバ内圧力を一定に保ったまま、コラプシブルチューブ上流端圧力変動および下流端圧力変動を圧力センサで測定し、A/Dコンバータを介してコンピュータに取り込む。また平均水流量を測定する。次にチェンバ内圧力を変化させて、同様に圧力変動、流量を測定する。

実験でのパラメータとして、チューブ長 L と初期流量およびチェンバ内圧力 P_e の三つをとる。

2.3 データ処理 圧力変動のデータは、サンプリングタイム5ms、データ総数2048点でA/D変換を行いコンピュータに取り込む。さらにFFT解析を行いRMS値、卓越振動数を計算する。

3. 実験結果

ここでは低周波振動と高周波振動の生波形をまず示し、実験でのチューブ内の流れの特性、不安定振動の発生に影響を与えるパラメータ、不安定振動の特性について述べる。

3.1 低周波振動と高周波振動の生波形 低周波振動の生波形を図2に、高周波振動の生波形を図3に示す。図2と図3で、チューブ長は100mm、初期流量は120cm³/sであるが、図2ではチェンバ内圧力 P_e =15.7kPa、図3では P_e =23.5kPaである。

3.2 不安定振動の発生に影響を与えるパラメータ

(1) チューブ長の影響

初期流量120cm³/sの場合に対して、横軸にチューブ長 L 、縦軸にチェンバ内圧力 P_e をとり、低周波振

図1 実験装置のシステム概略図

図2 低周波圧力脈動の生波形

動と高周波振動の発生範囲を示したグラフを図4に示す。このグラフよりわかるように、ある程度のチューブ長がないと低周波振動が起きないことがわかる。また、チューブ長が大きくなると、より低いチェンバ内圧力でも低周波振動が起きることがわかる。

(2) 初期流量の影響

横軸に初期流量、縦軸にチェンバ内圧力を取り低周波振動と高周波振動の発生範囲を示したグラフを $L=160$ mm の場合について図5に示す。このグラフよ

図3 高周波圧力脈動の生波形

図4 自励的圧力脈動の発生領域 (縦軸: チェンバ内圧 P_c , 横軸: チューブ長 L)

図5 自励的圧力脈動の発生領域 (縦軸: チェンバ内圧 P_c , 横軸: 初期流量 Q_0)

り、ある程度以上の流量がないと、低周波振動が起きないことがわかる。

3.3 不安定振動の特性

(1) 上流側圧力変動 RMS 値

チューブ長=100 mm, 初期流量=120 cm³/s の場合に対して、横軸にチェンバ内圧力 P_c , 縦軸に上流側圧力変動 RMS 値をとったグラフを図6に示す。図6より低周波振動の発生と同時に上流側圧力変動 RMS 値も跳ね上がり、その後高周波振動の発生とともに圧力変動 RMS 値が不連続に激しく下がりその後は単調に減少していくことがわかる。

また、高周波振動時の圧力変動 RMS 値は、低周波振動時に比べて小さい値を示している。

(2) 下流側圧力変動 RMS 値

図6と同一の条件の場合について、横軸にチェンバ内圧力 P_c , 縦軸に下流側 RMS 値をとったグラフを図7に示す。不安定振動が起きる前は、当然圧力変動 RMS 値はほぼ零であるが、低周波振動の発生と同時に圧力変動 RMS 値も跳ね上がり、徐々に値が上昇してチェンバ内圧力がある値になると、高周波振動が発

図6 チューブ上流端圧力脈動の RMS 値とチェンバ内圧 P_c (横軸)

図7 チューブ下流端圧力脈動の RMS 値とチェンバ内圧 P_c (横軸)

生し、それと同時に、圧力変動 RMS 値も不連続に急激に減少する。その後、また徐々に圧力変動 RMS 値が上昇していき、ある点でピークをむかえたのち、圧力変動 RMS 値は減少し高周波振動も消滅する。

(3) 圧力変動卓越振動数

図 6 と同一の条件の場合について、横軸にチェンバ内圧力 P_e 、縦軸に圧力変動卓越振動数をとったグラフを図 8 に示す。グラフよりわかるように、チェンバ内圧力が上昇すると、15 kPa 前後で低周波振動が発生し 18 Hz 前後の振動数が卓越する。さらにチェンバ内圧力をあげると、20 kPa 前後で高周波振動が発生し 30~40 Hz の振動数が卓越する。そしてチェンバ内圧力が 25 kPa 前後の値になると、信号がホワイトノイズ状になり、卓越した振動数がなくなる。

(4) 位相差

図 6 と同一の条件の場合について、横軸にチェンバ内圧力 P_e 、縦軸に上流側の圧力脈動と下流側の圧力脈動との位相差をとったグラフを図 9 に示す。ここでは、上流側を基準にし、下流側をみたときの卓越振動数での位相差で、位相遅れを正にしている。図よりわかるように、低周波振動が起こると位相進みが起こり、チェンバ内圧力の上昇とともに進みが小さくなっていく。そして、高周波振動が発生すると、不連続に位相差が変化し、またチェンバ内圧力の上昇とともに、位相進みが小さくなっていく。

以上(1)から(4)の結果他のチューブ長と初期流量に関する実験においても不安定振動が発生すると同様であったことを追記しておく。

4. 理論的考察

本実験における圧力脈動変動の理論的考察を大場の理論⁽³⁾に基づいて行う。

(1) チューブ内の流れは一次元流れである。

図 8 圧力脈動の卓越振動数(Hz)とチェンバ内圧 P_e (横軸)

(2) 粘性係数が一定である。

これらの仮定を考慮すると、連続の式は次のように表すことができる。

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A u)}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、運動方程式は次のように表せる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{A\rho} \tau_w W \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで

ρ : 流体密度, p : 流体の圧力

A : チューブ断面積, τ_w : 壁面せん断応力

u : 流れの平均速度, W : チューブ周囲長

チューブ内の波動の伝ば速度 $\bar{c}$ を次のように定義する。

$$\bar{c}^2 = \frac{A dp}{\rho dA} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、壁面せん断応力 τ_w は次のように表せる。

$$\tau_w = \frac{\lambda}{4} \frac{1}{2} \rho u^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 λ は摩擦係数である。チューブを滑らかな円管であると考えれば、 λ はレイノルズ数の関数として表せる。乱流での $C_m = 0.3164$, $m = 0.25$ を用いて

$$\lambda = \frac{(\nu)^m}{(ud)^m} C_m \quad \dots\dots\dots (5)$$

と書ける。 ν : 動粘性係数, d : チューブ径, 式(3), (4), (5)を式(2)に代入する。

ここで、定数 C_i を

$$C_i = \frac{W}{8} C_m \frac{(\nu A)^m}{d^m}$$

とおけば、式(2)は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\bar{c}^2}{A} \frac{\partial A}{\partial x} - C_i A^{-(1+m)} u^{2-m} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。また、 u, A を平均量と変動成分の和とし、変動成分の二乗項以上を省略すると、

図 9 上・下流端の圧力脈動の位相差とチェンバ内圧 P_e (上流端を基準, 位相遅れを正)

$$u = \bar{u} + u'(x, t)$$

$$A = \bar{A} + A'(x, t)$$

より、式(1)は、 ρ を一定と仮定して

$$\frac{\partial A'}{\partial t} + \bar{A} \frac{\partial u'}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial A'}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)'$$

また式(7)は

$$\begin{aligned} \frac{\partial u'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} = & -\frac{\bar{c}^2}{\bar{A}} \frac{\partial A'}{\partial x} - C_t \frac{\bar{u}^{2-m}}{\bar{A}^{1+m}} \\ & \times \{1 - (1+m)A'/\bar{A} + (2-m)u'/\bar{u}\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

(a) $L=100$ mm, $Q_0=120$ cm³/s

(b) $L=130$ mm, $Q_0=120$ cm³/s

(c) $L=160$ mm, $Q_0=130$ cm³/s

図 10 式(17)の評価点 [C/L (縦軸) と A (横軸)]

式(1)', (9)を、 $z=x-\bar{u}t$ の相対座標で表し、 A' を消去すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} - \bar{c}^2 \frac{\partial^2 u'}{\partial z^2} + C_t \frac{\bar{u}^{2-m}}{\bar{A}^{1+m}} \times \left\{ (2-m) \frac{\partial u'}{\partial t} \right. \\ \left. + (1+m) \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial z} \right\} = 0 \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

となる。また

$$u' = u_A \exp[at + j(kz - \omega t)] \quad \dots\dots\dots (11)$$

とおき、式(11)を式(10)に代入すると式(11)が式(10)の解となるためには、代入した式の実部と虚部がともに零になることが必要である。よって

$$\alpha^2 - \omega^2 + \bar{c}^2 k^2 + \gamma \alpha (2-m) = 0 \quad (12)$$

$$-2\alpha\omega + \gamma[-(2-m)\omega + (1+m)\bar{u}k] = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\gamma = C_t \frac{\bar{u}^{1-m}}{\bar{A}^{1+m}}$$

の2式が必要な条件である。もしも、 α が負の場合、式(11)より、時間の経過と共に変動成分は小さくなり安定することがわかる。逆に α が正の場合には、変動成分が成長し、流れが不安定になることがわかる。式(12)、(13)より α が正になる条件は

$$\bar{c}^2 < \frac{(1+m)^2}{(2-m)^2} \bar{u}^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

よって式(14)が流れを不安定にする条件である。ところで、チューブのコンプライアンスは次のように表せる。

$$C = \frac{d(LA)}{dP_{tr}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

L : チューブ長

P_{tr} : トランスミューラル圧 $= p - P_e$

P_e : チェンバ内圧力

このコンプライアンスを用いて、波動の伝ば速度 $\bar{c}$ は次のように表せる

$$\bar{c}^2 = \frac{AL}{\rho C} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式(14)、(16)に $\bar{u} = Q/A$ (Q : 流量)を用いると

$$\frac{C}{L} > \frac{(2-m)^2}{(1+m)^2} \frac{A^3}{\rho Q^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、不等式の左辺を実験値より求め、右辺の計算値と比較を行う。ここで実験値を式(15)より算定する。算定方法は、まず次のチューブ則⁽⁶⁾を用いてトランスミューラル圧とチューブ断面積の関係を導く。チューブ則は次のように表される。

$$P_{tr} = K_p \{1 - (A/A_0)^{-1.5}\} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$K_p = \frac{E(h/R_0)^3}{12(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

K_p : 定数

E : 縦弾性係数

R_0 : 変形前のチューブ内半径

h : 肉厚

ν : ポアソン比

上式よりチューブ断面積を導く。導いたチューブ断面積とトランスミューラル圧の各々の算定値の差をとり商をつくり式(15)の近似値とする。

以上によって求めた式(17)の左辺の実験値と右辺の計算値を比較したものを、チューブ長が $L=100$ mm, 初期流量が $120 \text{ cm}^3/\text{s}$; $L=130$ mm, $120 \text{ cm}^3/\text{s}$; および $L=160$ mm, で初期流量が $130 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合に対して、図 10(a), (b), (c)に示す。各点(○)が実験により求めたコンプライアンスの算定値、曲線が流量 Q をパラメータにとった式(17)右辺の計算値である。印(●, ■, ▲)の付いた点が各々低周波振動, 高周波振動, ホワイトノイズが発生する点である。この臨界点での臨界流量 Q_{cri} とそのときの断面積を右辺に代入し計算値と測定値が一致する点が従来提言されている振動である。本実験では、それが低周波振動に相当する(●印)、ところが従来の式に当てはまらない高周波振動(■印)が確認された。

5. 結 言

本装置による実験では、コラプシブルチューブに対し低周波振動および高周波振動の2種類の振動が確認された。従来提言されているコラプシブルチューブの振動は、本実験の低周波振動にあたり、新たに高周波振動の存在を示した。

文 献

- (1) 辻・ほか8名, 人工臓器, 7-2(1978), 435-438.
- (2) Matsuzaki, Y., *Self-excited Oscillation of a Collapsible Tube Conveying Fluid* *Frontiers in Biomechanics*, (1986), 342-350.
- (3) Ohba, K., ほか2名, *Technol. Rep. Kansai Univ.*, No. 26 (1985), 1-6.
- (4) Conrad, W. A., *IEEE Trans. Bio-Medical Eng.*, PME-16-4(1986), 284-295.
- (5) Pedley, T. J., *J. Biomechanics*, 15-1(1982), 39-50.
- (6) Cancelli, C., *J. Fluid Mech.*, 157(1985), 375-404.
- (7) Shapiro, A. H., ほか3名, *J. Fluid Mech.*, 109(1981), 367-389.
- (8) Bertram, C. D., *J. Fluid Mech.*, 130(1983), 315-345.
- (9) Bertram C. D., *J. Biomechanics*, 15-3(1982), 223-224.