コラプシブルチューブの自励振動におけるチューブの
軸方向初期ひずみの影響*夏 毓 鵬^{*1}, 早 瀬 敏 幸^{*2}
林 叡^{*2}, 濱 谷 剛^{*2}

Effect of Initial Axial Strain of Collapsible Tube on Self-Excited Oscillation

Yupeng XIA, Toshiyuki HAYASE^{*3},
Satoru HAYASHI and Tsuyoshi HAMAYA^{*3} Tohoku University, Institute of Fluid Science, Katahira 2-1-1, Aoba-ku Sendai, 980-8577 Japan

In this paper an experiment was performed to investigate the dynamic characteristics of a collapsible tube flow. The effect of initial axial strain of the tube on the self-excited oscillation was studied by changing the initial stretch of a silicone rubber tube for various values of the flow rate. The frequency and the amplitude of pressure and flow rate oscillation at the upstream and the downstream ends were measured. The characteristics of the self-excited oscillation were strongly related to the initial strain in a range of lower flow rate and lower initial stretch. Three different types of oscillation were observed in the present condition. The type of the oscillation changes to the other one due to variation of the initial axial strain of the tube or the supply flow rate.

Key Words: Biomechanics, Collapsible Tube, Self-Excited Oscillation, Initial Axial Strain

1. 結 言

コラプシブルチューブは、血管、気道、尿道などの生体器官に類似した特性を持ち、生体内に発生する多くの現象と関わっているため、従来から生体工学の分野で、数多くの研究がなされている⁽¹⁾。その中で、外圧によって圧平されたチューブ内に流れを与えるとき発生する自励振動は、興味深い問題であり、その発生機構に関して、圧平部の非定常はく離の影響に基づいた1次元数学モデルや⁽²⁾⁽³⁾、流体の粘性損失が本質的であるとし、はく離の影響を無視した1次元モデルが示されている⁽⁴⁾。また、最近ではチューブの3次元変形を考慮した数値解析により、複雑な流れ場の構造を解析しようとする試みもなされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。しかし、実際の流れ場の詳細や、チューブの諸元が自励振動に及ぼす影響などに関して、未解決の問題が多く残されている。

コラプシブルチューブ内流れにおけるチューブの張

力の影響に関しては、主に実験的な考察が従来行われているが、多くは定常流に関するものである。Bertram⁽⁷⁾は、有限長のシリコンゴムチューブの管軸に沿う断面積変化をカテーテルを用いた電気抵抗法により測定し、チューブ張力を変化させた場合のチューブ側の軸方向変化を調べた。また、Kececioglu⁽⁸⁾らは、軸方向に一定な張力を受け、伸展圧により部分的につぶれている薄肉チューブ内の定常な超臨界状態の流れを実験により考察した。桜井らは、管に軸方向初期ひずみを与えた後に寸法が同一となるような5種類の管路を用いて、自励振動に及ぼす管軸張力の影響を実験的に調べた⁽⁹⁾。チューブの伸び率が25%程度までのかなり広い範囲での張力の影響が定性的に明らかにされたが、チューブの個体差の影響が含まれており、自励振動に与えるチューブ張力の影響は未だ十分理解されたとは言い難い。そこで、本論文では、コラプシブルチューブのチューブ長を弾性限度内で種々に変化させ、供給流量をパラメータとして、発生する自励振動の特性を詳細に測定し、チューブ軸方向初期ひずみが自励振動に及ぼす影響を実験的に検討した。

* 原稿受付 1998年12月28日。

^{*1} 学生員、東北大学大学院 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)。

^{*2} 正員、東北大学流体科学研究所。
E-mail: hayase@ifs.tohoku.ac.jp

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2. おもな記号

f : 自励振動の発振周波数	[Hz]
l_0 : チューブの自然長	[m]
l : チューブの取り付け長さ	[m]
p : 圧力	[Pa]
p_e : チューブ外圧	[Pa]
Q : 流量	[m ³ /s]
Q_m : 平均流量	[m ³ /s]
t : 時間	[s]
T : 自励振動の周期	[s]
Δp : 自励振動の圧力振幅	[Pa]
ΔQ : 自励振動の流量振幅	[m ³ /s]
添え字	
d : 下流側剛体管における量	
u : 上流側剛体管における量	

3. 実験装置および方法

コラプシブルチューブ系の実験装置の概略図を図1に示す。流路は上流から、定水頭水槽、流量調節用の可変絞り、上流剛体管、コラプシブルチューブ、下流剛体管、ならびに下流端の絞り抵抗で構成されている。

自然長 0.1m のシリコンゴムチューブを水を一部満たしたアクリル製の密閉容器中に設置し、取り付け長さ l を変化させることによって、チューブに軸方向初期ひずみを与えた。実験では初期ひずみを弾性限度内の 26% の範囲内で変化させ、コラプシブルチューブ内流れの自励振動における初期ひずみの影響を調べた。

コラプシブルチューブに印加する外圧 p_e は、密閉容器内の水頭と空気圧により一定値に設定した。空気は

コンプレッサにより加圧され、密閉水槽に送られる。水槽に取り付けられた圧力調節用バルブを用いて一定の外圧を維持する。また外圧は水槽に接続したマンメータによって測定した。作動流体は水を用い、定水頭水槽（ヘッド 4.0m）から供給され、上流側の可変絞りで流量を調節される。自励振動における作動流体の流量および圧力は、上流、下流側の超音波トランジット流量計（Transonic Systems Inc. 製，T260），圧力センサ（豊田工機製，PD104）により測定し，FFT アナライザ（小野測器製，CF-350）を用いて振動波形の解析を行った。なお，自励振動におけるコラプシブルチューブ変形の映像を高速ビデオカメラ（フォトロン製，HVC-SL）により撮影し，チューブの変形挙動を調べた。主な実験条件を表1に示す。

4. 実験結果と考察

実験では，外圧 p_e を一定値（4kPa）に保ち，自然長 $l_0=0.1\text{m}$ のコラプシブルチューブの取り付け長さ l を弾性限度内で種々の大きさに設定し，流量を変化させた場合に，コラプシブルチューブ流れに発生する自励振動について調べた。本実験では，軸方向初期ひずみを与えたときのチューブ断面の初期形状は，外圧が小さい範囲では円形を維持しているが，外圧の増加とともに圧平し，非対称な断面形状となる。また，本論文では，自励振動の断面形状のモードに関して，全てチューブ周方向に最低次の 180° 回転対称のモードを対象とする⁶⁾。

4・1 自励振動波形の比較 まず，2種類のチューブ取り付け長さ l の場合について，発生する自励振

Fig.2 Deformation of the collapsible tube during one period of self-excited oscillation ($Q_m=30\text{cm}^3/\text{s}$).

動の特徴を比較する．図2は自励振動の1周期 T の間の各時刻に対して，高速ビデオによりチューブの横方向から撮影した映像である．図2(a)のチューブ取り付け長さ $l=99\text{mm}$ ($l/l_0=0.99$) の場合は， $t/T=0.59$ の時刻において，チューブが最もつぶされ，下流側剛体管に接続される部分のチューブ膜が剛体管の入口付近まで吸い込まれている．また，チューブ全体に対して，チューブ変形が下流端付近の狭い範囲内で生じているのわかる．一方，5%の軸方向初期ひずみをもつ図2(b)の $l=105\text{mm}$ ($l/l_0=1.05$) の場合には，チューブの変形する範囲はかなり上流側まで広がっている．時刻 $t/T=0.44$ ではチューブが最もつぶれて，チューブの下流端部分は下流側剛体管近くまで引張られているものの，吸い込まれることはない．これはチューブに与える軸方向初期ひずみの増加によって軸方向張力が大きくなり，チューブの垂直方向復元力が増加したためと考えられる．図2(a)において，チューブがつぶれていない状態から圧平されるまでの時間 ($t/T=0.0$ から $t/T=0.59$ まで) は自励振動1周期の約60%におよび，その後，急激に膨張する ($t/T=0.59$ から $t/T=0.82$) ．

また，図では明らかではないが，チューブの膨張とともに，チューブ膜上流へ伝播する波動が観察された．この波動はチューブが圧平した際に生じた圧力波によるものと考えられる⁹⁾．しかし，この波動は速やかに

減衰し， $t/T=1.0$ の時刻には，チューブは完全な円管状になり，次の振動周期へ移行する．これに対して図2(b)

Table1 Experimental conditions

Collapsible tube	
Outer diameter	10.0mm
Thickness	0.4mm
Natural length	100.0mm
Young's modulus	$3.4 \times 10^6 \text{Pa}$
Upstream rigid pipe	
Inner diameter	8.0mm
Length	1050mm
Pressure measurement location measured from the downstream end.	220mm
Flow rate measurement location measured from the downstream end.	1020mm
Downstream rigid pipe	
Inner diameter	8.0mm
Length	300mm
Pressure measurement location measured from the upstream end.	220mm
Flow rate measurement location measured from the upstream end.	260mm
External pressure	$4.0 \times 10^3 \text{Pa}$
Exit load resistance	$2.84 \times 10^{11} \text{Pa}^2/\text{m}^6$

Fig.3 Variation of pressure and flow rate during self-excited oscillation in the same condition as Fig.2 ($Q_m=30\text{cm}^3/\text{s}$).

の $l/l_0=1.05$ の場合は、 $t/T=0.0$ から $t/T=0.44$ までの自励振動周期の約 45% の範囲にわたってチューブがつぶされ、その後のチューブの膨張は $l/l_0=0.99$ の場合と比べて緩慢である。また、チューブの変形にともなって発生する波動の減衰が小さくなり、自励振動周期の 50% 以上にわたって持続する。すなわち、時刻 $t/T=0.44$ で生じた波動は $t/T=1.0$ でも完全に減衰せず、チューブが完全な円筒状に戻らないまま次の振動周期へ移向する。

図 3 はチューブの上流、下流側の剛体管における圧力と流量の振動波形を、上の 2 つの軸方向初期ひずみの場合について比較したものである。上図の圧力の時間変動に注目すると、図 3(a) の $l/l_0=0.99$ の場合は上流圧力（図中の破線）に図 3(b) の $l/l_0=1.05$ の場合より大きな変動が見られる。これはチューブが圧平する過程において、下流端付近のチューブ膜が剛体管に吸い込まれ、流路が瞬間的に閉塞されることによるものと考えられる。下流側圧力（上図中の実線）については、 $l/l_0=0.99$ の場合に大きな圧力振幅を有し、圧力は最小値まで減少した後、急激に増加し、これに伴って高周波の振動が現れる。しかし、 $l/l_0=1.05$ の場合には圧力振幅は $l/l_0=0.99$ の場合の 1/5 程度と小さく、高周波成分も現れない。

図 3 の下図のチューブ下流側における流量の時間変化（図中の実線）に関しては、図よりどちらの場合も下流側剛体管内に逆流が生じていることが分かる。この逆流の原因は、チューブの圧平により流量が減少した後、チューブの膨張によってチューブ下流端付近の体積が急激に増加するため、下流側剛体管内の流体が

上流部へ引き戻されるためと考えられる。図 3(a) と (b) の流量の時間変化について、周波数は異なるものの、振動波形自体は同じように見えるが、実際はそれぞれ異なる性質を持っている。この点については、4・3 節で説明する。

4・2 軸方向初期ひずみによる自励振動の変化 チューブの軸方向初期ひずみの自励振動への影響をさらに詳しく検討するため、チューブ取り付け長さ l について $98\text{mm} \leq l \leq 110\text{mm}$ ($0.98 \leq l/l_0 \leq 1.10$) の範囲内では 1mm おきに、 $110\text{mm} < l \leq 126\text{mm}$ ($1.10 < l/l_0 \leq 1.26$) の範囲では 2mm おきに設定し、流量を自励振動が発生する流量範囲内で $5\text{cm}^3/\text{s}$ おきに变化させて実験を行った。実験において、 $Q_m=20\text{cm}^3/\text{s}$ 以下と $Q_m=95\text{cm}^3/\text{s}$ 以上の範囲では自励振動の発生は見られず、 $25\text{cm}^3/\text{s} < Q_m \leq 90\text{cm}^3/\text{s}$ の範囲では全てのチューブ取り付け長さについて自励振動が発生した。チューブの取り付け長さによる自励振動の発生範囲の差は本実験条件では $5\text{cm}^3/\text{s}$ 以内であった。

図 4 は自励振動発生時の上流側と下流側剛体管内の圧力振幅および流量振幅のチューブ取り付け長さ l による変化を示したものである。図 4(a) の上流側の圧力および流量振幅の変化を見ると、図 4(b) の下流側のそれらの振幅に比べて全て小さな値を示している。図 4(b) 上図の圧力振幅のチューブ取り付け長さによる変化について、 $Q_m=50\text{cm}^3/\text{s}$ 以下の場合では、取り付け長さ l の増加によって圧力振幅が減少した後ほぼ一定となる。また Q_m が小さいほど圧力振幅の変化が大きい。 $Q_m=60\text{cm}^3/\text{s}$ 以上の場合は、 $l=99\text{mm}$ ($l/l_0=0.99$) から

(a) Upstream rigid pipe

(b) Downstream rigid pipe

Fig. 4 Variation of oscillation amplitude with initial tube stretch.

Fig. 5 Frequency of self-excited oscillation with initial tube stretch.

$l=112\text{mm}$ ($l/l_0=1.12$) の範囲内で圧力振幅はほぼ一定の大きな値をもつ。これは圧力変動の高周波成分によるものである [図 3(a) 上図参照]、この高周波成分はチューブ取り付け長さの増加に伴って $112\text{mm} \leq l \leq 116\text{mm}$ の範囲で急激に小さくなり、圧力振幅もその後

ほぼ一定な値に落ち着く。

図 4(b) 下図の流量振幅について見ると、全体的に流量の増加とともに流量振幅は増加する。 $Q=40\sim 70\text{cm}^3/\text{s}$ の範囲ではチューブ取り付け長さの増加によって流量振幅が減少する傾向が見られた。

次に、図 4(a) 上図の上流側の圧力振幅について見ると、 $Q=70\text{cm}^3/\text{s}$ 以上では $98\text{mm} \leq l \leq 110\text{mm}$ ($0.98 \leq l/l_0 \leq 1.10$) の範囲内でチューブ取り付け長さとともに圧力振幅が緩やかに増加した後、ほぼ一定値となった。これに対して、 $Q=60\text{cm}^3/\text{s}$ 以下で特に $Q=40\text{cm}^3/\text{s}$ の場合は、上流圧力振幅に相対的に大きな変化が現れた。これは自励振動が発生する際、上流へ伝播する圧力波によるものと考えられる。今回の実験で、この圧力波は $Q \leq 25\text{cm}^3/\text{s}$ の範囲ではほとんど見られず、 $25\text{cm}^3/\text{s} < Q \leq 50\text{cm}^3/\text{s}$ では、上流、下流ともに不規則的になり [図 7(b) 参照]、その後流量の増加につれ、周期的に変わり振幅もほぼ一定となる [図 7(c) 参照]。また、上流より下流の方が常に高い振幅を示している [図 7 参照]。圧力波の伝播は次節で述べる自励振動の形態と

も関連していると考えられるが、その詳細については不明である。

図 4(a)下図の上流側流量振幅については、取り付け長さ l によって、 $l \leq 105\text{mm}$ ($l/l_0 \leq 1.05$) の範囲内で小さな変動を示したものの、全体的に大きな変化は見られなかった。

図 5 に取り付け長さ l による自励振動の周波数の変化を示す。流量が小さい場合、自励振動の振動数は l の増加とともに速やかに減少した後、ほぼ一定の値におちつく。流量の増加につれ、取り付け長さ l に対する周波数の減少率はだんだん緩やかになり、全体の減少量も小さくなる。 Q が $70\text{cm}^3/\text{s}$ 以上の場合では、周波数のチューブ取り付け長さによる変化はほとんど同じになる。

以上の結果より、コラプシブルチューブ内に発生する自励振動は、流量と軸方向の初期ひずみが小さい場

合に、軸方向ひずみの変化に対して大きな影響を受けることが明らかとなった。

4・3 自励振動形態の分類

図 6 は自励振動周波数と下流側の圧力振幅の流量による変化を種々のチューブ取り付け長さに対して示したものである。図 6(a) において、今回行った実験範囲内では、全てのチューブの取り付け長さ l について、同様な周波数の変化が現れた。すなわち、流量の増加にともなう、最初振動数は減少した後、増加し、その後一定値となる。この流量による振動数変化に対応して特徴的な 3 種類の振動形態が観察された。それらを、図 6(a),(b)中に A, B, C の記号で示す（これ以後 A 型、B 型、C 型振動と呼ぶ）。A 型振動は流量の低い範囲で発生する振動で、チューブが完全に膨らむことなく、常につぶれたままで振動する。この種の振動はフラッターと呼ばれている⁽⁷⁾。B 型振動は、流量を変化させた場合、最小の周波数に対

(a) Frequency

(b) Downstream pressure amplitude

Fig.6 Variation of oscillation characteristics with flow rate.

(a) A-type oscillation ($Q_m=20\text{cm}^3/\text{s}$)

(b) B-type oscillation ($Q_m=35\text{cm}^3/\text{s}$)

(c) C-type oscillation ($Q_m=80\text{cm}^3/\text{s}$)

Fig.7 Comparison of pressure and flow rate during different types of self-excited oscillations ($l=126\text{mm}$).

応する振動で、自励振動に伴う波動の伝播が最も明瞭に現れる [図 2(b)参照]。C 型振動は流量の高い範囲内に発生する自励振動で、高い周波数と大きな下流側圧力振幅および流量振幅を持ち、これらの特性は流量にほとんど依存しない。また、C 型振動ではチューブを伝播する波動が速やかに減衰する。図 6(b)の下流側圧力振幅の供給流量による変化を見ると、A 型、B 型、C 型振動の順に圧力振幅が増加していることがわかる。

図 7 にチューブ取り付け長さ $l=126\text{mm}$ の場合について、A, B, C 型振動の振動波形を示す。図 7(a) の A 型振動の場合は、上流圧力がほとんど変化せず、下流圧力も比較的小さい振幅で振動している。また下流側の流量の時間変化は、のこぎり波状の振動波形を有している。これに対して、図 7(b) の B 型振動の場合では、上流圧力波形に不規則な高周波が現れる、これは圧力波動の伝播によるものと考えられる。下流側の圧力は A 型と類似の矩形の振動波形となっているが、振幅は A 型よりも大きい。下流側の流量は緩やかに最大値まで増加した後、速やかに最小値まで減少する。流量の増加する過程は振動の 90% 以上に及んでいる。図 7(c) の C 型振動は、A 型振動と B 型振動の場合に比べると、上流・下流側圧力波形がともに大きな振幅を有し、下流側では圧力の増加に伴って高周波成分が現れている。下流側流量の変化は最初に速やかに増加して、振動しながら最大値まで達し、その後急激に減少する。流量の増加する時間は自励振動の全過程の 50% になっている。また、C 型振動の場合のみ、上流側の流量変動が見られる。なお、A 型振動と B 型振動の間、または B 型振動と C 型振動の間の条件では、それぞれの中間の振動形態となる。4・1 節の図 2(a) は C 型振動であり、(b) は B 型振動の振動波形に対応している。

最後にチューブ取り付け長さ l と流量 Q を変化させた場合の、自励振動の特徴の変化について考察する。図 6 から分かるように、振動形態が変化する流量 Q の値は、チューブ取り付け長さによって変化する。これは流量 Q を固定して l を変化させた場合と、 l を固定し

て流量 Q を変化させた場合のそれぞれについて、振動形態の変化がおりうることを示している。

5. 結 言

コラプシブルチューブ内流れの自励振動における、チューブ軸方向初期ひずみの影響を実験により調べた。すなわち、チューブに作用する外圧を一定に保ち、種々のチューブの取り付け長さについて、供給流量を変化させ、自励振動発生時のチューブ上流側および下流側剛体管内の圧力変動と流量変動、ならびにチューブ変形を測定した。その結果、チューブ内流れの自励振動に与える軸方向初期ひずみの変化の影響は、流量と軸方向初期ひずみがそれぞれ小さいほど大きいことが明らかとなった。また、本実験範囲内では、自励振動形態を 3 種類に分類することができ、流量と軸方向初期ひずみをそれぞれ変化させると、自励振動の形態が相互に変化しうることを示した。

おわりに、実験装置の製作に当たって東北大学流体科学研究所 渡辺努技官、伏見保男技官に協力いただいたこと、また、実験の遂行に当たっては、学部 4 年生坂下重人君の協力を得たことを記して謝意を表する。

参考文献

- (1) Kamm, R. D. and Pedley, T. J., *Trans ASME, J. Biomech. Eng.*, **111**, (1989), 177-179.
- (2) Cancelli, C. and Pedley, T. J., *J. Fluid Mech.*, **157**, (1985), 375-404.
- (3) Matsuzaki, Y. and Matsumoto, T., *Trans ASME, J. Biomech. Eng.*, **111**, (1989), 180-184.
- (4) Hayashi, S., Hayase, T., and Kawamura, H., *Trans ASME, J. Biomech. Eng.*, **120**, (1998), 468-475.
- (5) Heil, M., *Third World Congress of Biomechanics*, 35a, (1998), 35.
- (6) 夏・早瀬・林・濱谷, 機論, **65-630, B**, (1999), 497-504.
- (7) Bertram, C. D., *J. Biomech.*, **20-9**, (1987), 863-876.
- (8) Kececioglu, I., McClurken, M. E., Kamm, R. D., and Shapiro, A. H., *J. Fluid Mech.*, **109**, (1981), 367-389.
- (9) Sakurai, A., Ohba, K., Futagami, Y. and Tsujimoto, M., *JSME International Journal*, **39**, (1996), 361-367.