コラプシブルチューブのチューブ変形と流動および自励振動特性に関する研究

氏　　　名	西山　　等
生 年 月 日	
本　　　籍	京都府
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第414号
学位授与の日付	平成13年3月22日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第4条第1項）
学位授与の題目	コラプシブルチューブのチューブ変形と流動および自励振動特性に関する研究
論文審査委員(主査)	岡島　厚（工学部・教授）
論文審査委員(副査)	上野　久儀（工学部・教授）石田　啓（工学部・教授） 佐藤　秀紀（工学部・教授）木村　繁男（工学部・教授）

学 位 論 文 要 旨

Summary

Flow in a collapsible tube exhibits various complicated phenomena, such as self-excited oscillation, due to interaction between flow and tube deformation. It is fundamentally important to clarify static characteristics on cross-sectional deformation of tube. Cross-sectional shapes of tube deformation caused by transmural pressure were examined by numerical simulation and image processing. To examine basic characteristics of some kinds of tubes, natural frequencies of the tubes were measured expermentally in non-flowing condition. Moreover, the natural frequencies of the tubes were calculated by simple analysis in consideration of the propagation of the pressure wave. The analytical value of the natural frequency almost coincided with the experimental value. In order to investigate flow characteristics and self-excited oscillation of collapsible tubes, experiments were carried out for the tubes, as parameters of down stream transmural pressure and flow-rate. The characteristics of flow and self-excited oscillation are greatly different dependent on deformation form of tube and amplitude of self-excited oscillation. The phenomena of self-excited oscillations are verified to be classified into three regions; small, intermediate and large amplitude region. In the low flow-rate stage contains small amplitude region, even if the tube inner diameter or tube thickness is different, it was found similalities of the flow and self-excite oscillation characteristics. Frequency of self-excited oscillation is nealy equal to the natural frequency in the small amplitude region.

1．まえがき

コラプシブルチューブとは管内圧に比べて管外圧が相対的に高いとき容易につぶれ変形を起こす弾性管のことであり，生体内の静脈，冠状動脈，気道，尿道などはこのような性質をもっている．コラプシブルチューブに流体が流れるとき，チューブ内の流れの変化とチューブの変形が互いに干渉して，複雑な静的・動的現象が生じる．生体内のコラプシブルチューブに生じる現象の中で特に重要な問題は，心臓手術の際に用いる人工心肺装置の脱血回路に接続された大静脈に生じる自励振動である．大静脈に自励振動が生じると大量に赤血球が破壊され，また神経反射を介して尿量が減少して患者に悪影響を及ぼすので，充分な血流量を確保しながらも大静脈に振動が生じないように細心の注意を要する．このような臨床医学上の問題に対して，単純化された物理モデルを対象として工学的にコラプシブルチューブのチューブ変形や流動特性，自励振動特性の詳細を追究して，これによって得られた成果から脱血流量の制御や自励振動の抑制・防止のための基礎的な知見を提供することにより，臨床医学の進展に寄与しなければならない．そのためには，より一般性のあるチューブの変形特性，流動特性，自励振動特性の把

握が必要となる．そこで，本研究では，コラプシブルチューブの変形，流動，自励振動の諸特性を明らかにして，さらに，種々な断面寸法を有するチューブに対してこれらの特性の相似性を検討した．

2． コラプシブルチューブ断面変形の数値シミュレーション

コラプシブルチューブはそのしなやかさに起因して，種々の外力に応じて容易に大変形を起こす．したがって，ある静的環境下に置かれたコラプシブルチューブの断面変形状態を定量的に明らかにすることは，コラプシブルチューブの基礎特性を知るうえで重要なことである．そこで，チューブ内に流動がない場合の経壁圧（管内圧一管外圧）変化に伴うチューブ断面形状の変化および断面形状生成の裏付けとなるチューブ壁上の曲げモーメント，せん断力，張力の周方向分布を数値シミュレーションにより求めた．計算対象のチューブは初期断面形状が真円で，チューブ内径に対しチューブ肉厚が極めて薄く，完全弾性体であり，チューブが変形してもその周長は変化しないとした．変形の支配方程式は，チューブ断面壁の微小要素に作用する曲げモーメント，せん断力および張力のつり合いから導出した．支配方程式は数学的には常微分方程式の２点境界値問題に属し，解法として射撃法を用いた．その結果，経壁圧の臨界値まではチューブ断面の変形は生じないが，経壁圧が臨界値を越えると経壁圧の負の方向への増加に伴って断面形状が真円形，楕円形，小判形，落花生の殻形のように変化することを明らかにし，また，チューブ壁に沿う曲げモーメント，せん断力，張力は，すべての周方向位置で経壁圧が負の方向に大きいほどその絶対値が大きくなり，また，曲げモーメント，せん断力，張力の相互関係は，変形の長軸側対称軸から短軸側対称軸への周方向位置の変化に伴って曲げモーメントは減少し，せん断力および張力は増加するが，曲げモーメントが負の値に転じるとせん断力は減少するものの張力はあまり変化しないことを明らかにした．

3．コラプシブルチューブの断面変形と管法則

現実に存在するコラプシブルチューブの断面形状は，経壁圧が作用してない状態において厳密に真円形であることはほとんどなく，真円形に近い楕円形あるいは種々な程度の楕円形であることがほとんどである．そこで，現実に存在するコラプシブルチューブの断面変形特性を実験によって定量的に明らかにするために，コラプシブルチューブとして薄肉のゴム製チューブを用い，経壁圧作用下の断面形状を非接触で捉えることのできる画像計測法を構築して，これによって得られた結果を数値シミュレーションの結果と比較検討した．チューブ断面の画像計測法は，試験水槽内に水平に設置されたコラプシブルチューブの管軸に対して直角方向からレーザーライトシートを照射して計測断面を高輝度化し，斜め方向から計測断面をCCDカメラで撮影した画像について，撮影角度および光の屈折の影響を補正してチューブ断面形状を求めるものである．画像計測によって得られた経壁圧作用下のチューブ断面形状は，数値シミュレーション結果とおよそ一致するものであった．さらに，数値シミュレーションおよび画像計測法によって得られたチューブ断面形状からチューブ断面積を算出し，また，経壁圧作用下のチューブ断面積を求めるための一手法である排除体積法を種々な断面寸法を有するコラプシブルチューブに適用して，断面変形特性としての管法則（経壁圧とチューブ断面積の関係）を求めた．これらの現実に存在するコラプシブルチューブの管法則の結果として，経壁圧が負の方向に小さいときチューブ断面積は初期断面積に近い値をとるが，経壁圧がある一定の値より負の方向に大きくなると，経壁圧の変化に対してチューブ断面積の変化が大きくなり，さらに大きい経壁圧下では経壁圧変化に対してチューブ断面積はあまり変化しないことを明らかにした．さらには，種々な肉厚，内径を有する供試チューブの管法則に相似性が存在することを明らかにした．

4．コラプシブルチューブの固有振動特性

経壁圧作用下のコラプシブルチューブに流体が流れるとき，ある条件下ではチューブに自励振動が発生する．そこで，コラプシブルチューブ流れの自励振動特性検討のための基礎特性を把握するため，コラプシブルチューブに経壁圧が負荷され，チューブ内に流動がない静的状態でのチューブの固有振動数を強制加振実験および圧力波の伝播速度を考慮した近似解析により求めた．強制加振実験では，コラプ

シブルチューブに接続した剛管端にビニル膜を設置し，ビニル膜を加振器で強制加振してチューブを微弱な程度で振動させ，それに伴うチューブ内圧のrms値の卓越する加振周波数をチューブの固有振動数とした．近似解析では，コラプシブルチューブの固有振動数は圧力波の伝播速度と密接に関係すると考え，チューブ内が静止流体で満たされた場合の一次元の波動方程式を導出して，これをもとにチューブの固有振動数を求めた．結果として，チューブの固有振動数は，チューブの肉厚／内径の比が大きいほど，また，経壁圧が負の方向に大きいほど高くなることや近似解析によって求まるチューブの固有振動数は実験結果をおよそ再現するものであることを明らかにした．

5．コラプシブルチューブの流動および自励振動特性

コラプシブルチューブ流れは，チューブ内流れとチューブ変形が互いに干渉する連成系である．したがって，このような系の特徴を把握するためには流量変化に伴うチューブの空間的な変形状態や自励振動の発生形態と流動特性としての時間平均的なチューブ上・下流間圧力差と流量の関係および自励振動特性としての自励振動周波数と流量の関係を関連づけて明らかにしなければならない．そこで，肉厚，内径の異なる種々な供試チューブについて下流側経壁圧一定条件下で流量を変化させ，これらを明らかにする実験を行った．また，流動特性や自励振動特性の相似性を検討するために，基準圧力，基準流量を導入した．なお，基準圧力はチューブ剛性を圧力値で表したものとして定義し，基準流量はチューブ断面の対向壁が点接触した状態でのチューブ断面積とその状態での圧力波の伝播速度に等しい流体速度の積として定義した．結果として，以下のことを明らかにした．流量が少ないときには自励振動は発生せず，流量増加とともにチューブ上流側から初期のつぶれが回復してチューブ下流側にスロートが形成され，このときチューブ上・下流間圧力差は流量増加とともに増大する．さらに，流量を増すとチューブ下流側に微小振幅の自励振動が発生する．このとき流量増加に対してチューブ上・下流間圧力差の増加は極めて緩やかとなるが，自励振動周波数は低下する．流量が基準流量を超えると，チューブ下流側で発生した自励振動の振幅が中程度に大きくなってチューブ上流側まで影響を与え，チューブ上・下流間圧力差，自励振動周波数は急激に増加する．なお，このときスロートの下流流れに瞬時的な逆流が生じる．さらに大きい流量では，自励振動が大振幅になり，チューブ上・下流間圧力差や自励振動周波数は流量増加に対してもほぼ一定の値をとる．このときには，スロートの下流流れに瞬時的なキャビテーションが発生する．流動特性や自励振動特性の相似性に関して，種々な断面寸法を有する供試チューブの基準流量以下の低流量域における流量とチューブ上・下流間圧力差の関係には相似性が認められた．また，種々な供試チューブの自励振動周波数についても基準流量以下の自励振動の微小振幅域でそれぞれのチューブの固有振動数にほぼ等しくなることから，この領域での自励振動特性に相似性が認められた．しかしながら，基準流量以上の流量域では自励振動の振動振幅が大きくなるとともに，スロートの下流流れに逆流やキャビテーションが発生することから現象的に複雑となり，流動特性や自励振動特性に相似性は認められなかった．

6．まとめ

本研究では，コラプシブルチューブのチューブ変形と流動および自励振動特性の詳細を明らかにし，種々な断面寸法を有する供試チューブに対してこれらの特性の相似性の存在を見い出した．これによりコラプシブルチューブに生じる現象のアウトラインの予測はある程度可能となるが，チューブに生じる自励振動の発生メカニズムや発生条件を解明するには至っておらず，継続的に研究を遂行する必要がある．

学位論文審査結果の要旨

平成13年1月25日，1月30日第1，2回学位論文審査委員会を開催し，1月30日口頭発表を行い，同日最終の審査委員会を開催した。協議の結果，以下の通り判定した。申請者は，昭和59年3月，金沢大学大学院工学研究科機械工学第二専攻を修了し，平成9年10月，国立舞鶴高等工業専門学校から本研究科地球環境科学専攻に社会入学した。申請論文は，生体内の静脈，冠状動脈，気道，尿道などで管内圧に比べて管外圧が相対的に高いとき容易につぶれて変形を起こす弾性管であるコラプシブルチューブの変形と流動，そして心臓手術の際に用いる人口心肺装置の脱血回路に接続された大静脈などにおいて生じる自励振動特性に関して研究している。このような医学上の問題に対し，コラプシブルチューブの断面変形の計測のための画像計測法を構築し，チューブ断面形状の数値シミュレーション結果と比較し，経壁圧作用下のコラプシブルチューブの種々な条件下におけるチューブの空間的，時間的変形や自励振動の発生形態を基準圧力，基準流量を導入して整理，考察した。そして脱血流量の制御や自励振動の抑制・防止のためコラプシブルチューブに生じるチューブ変形，流動，自励振動等の諸特性を明らかにし，種々な条件下におけるコラプシブルチューブの自励振動の諸特性を定式化し，振動回避，抑制のための極めて有用な基礎的資料を得た。本論文は，コラプシブルチューブのチューブ変形と流動及び自励振動特性に関する基礎研究として工学と医学の複合分野において貢献するところ大きく，博士(工学)に値するものと認定する。