

氏名	か　　い　く　　ほう 夏　　毓　　鵬
学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）機械知能工学専攻
学位論文題目	コラプシブルチューブ内流れの自励振動に関する研究
指導教官	東北大学教授 林 叡
論文審査委員	主査 東北大学教授 林 叡 東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 猪岡 光 東北大学助教授 早瀬 敏幸

論 文 内 容 要 旨

循環系は人体内において最も重要な器官系の1つである。循環系は心臓、血管から構成され、心臓・血管系とも呼ばれている。人体では、安静時に全血液量の80%を貯蔵する静脈系は、動脈系からの血液を心臓に還流させる働きとともに循環血液量の調整と言う重要な役割を演じている。静脈血管壁自体は高い伸展性を持ち、また、静脈血管が薄いので外圧により容易に変形し、時にはつぶれた状態（圧平状態）になるのが特徴である。たとえば、十分高い内圧下では、静脈血管の断面は円形に保つが、伸展圧（ $p_e = \text{内圧} - \text{外圧}$ ）を減少していくと、その断面は円形から楕円に、続いて亜鈴状の形状を取り、最終的に完全閉塞に近づく。人体内におけるつぶれやすい管路は静脈血管のほか冠動脈があり、また圧力測定時、カフによって圧迫された動脈も圧平状態になると言われている。また、血管以外に気道、尿道などもつぶれやすい管路の一種である。このような外圧によって圧平されやすい管路をコラプシブルチューブという。この種の管路内に流体が存在すると、管路形状変化と流れの相互作用により極めて複雑な現象が生じることが知られている。

コラプシブルチューブ内流れに発生する自励振動、特にその発生機構について、これまで様々な説が提案され、それに関する実験的・理論的な研究が数多く行なわれてきた。それらの研究結果は、コラプシブルチューブ内流れに発生する自励振動が定性的に説明できることを示したが、未だに静特性、動特性を含む諸現象が十分明らかにされたとは言えない。また、実際の3次元な流れ場の構造、非定常はく離が自励振動におよぼす影響などに関しては、未知の部分が多く残されており、これまでに提案されている1次元数学モデルの妥当性に関する定量的な検討も十分には行われていない。

そこで、本研究は非定常な変形を伴うコラプシブルチューブ内流れを明らかにすることを目的とする。そのため、まず、チューブ内の流体が静止している条件下で、一様な外圧が作用した場合のチューブの3次元な変形に関する数値解析を行うとともに、その結果に基づいて、2つの1次元チューブモデルの妥当性について検討する。また、コラプシブルチューブ内流れに発生する自励振動の特性を詳細に測定し、チューブ初期ひずみの自励振動に及ぼす影響を実験的に検討する。

本論文はこれらの成果をまとめたものであり、以下に示す5章からなる。

第1章 緒論

第1章では、人体におけるコラプシブルチューブ内流れ、とくにコラプシブルチューブ内に発生する自励振動の重要性に触れ、これまでのコラプシブルチューブ内に発生する諸現象に関する過去の研究について、チューブ変形、チューブ内の流れ場、チューブ内流れに発生する自励振動などの面から述べた上に、本研究の意義と目的、および本論文の構成ならびに内容の概要に言及した。

第2章 コラプシブルチューブ変形の3次元数値計算に基づいた1次元チューブモデルの検討

第2章では、チューブ内の流体が静止している条件下で、一様な外圧が作用した場合のチューブの3次元変形を、有限要素解析手法であるLS-DYNA3Dを用いて計算を行った。その結果に基づいて、2つの1次元チューブモデルの妥当性について検討した。

数値計算に先立って、まず計算精度を確認するための予備計算を行った。チューブ両端の境界条件を自由支持とし、対象となるコラプシブルチューブに対して、円周方向分割数を種々の値について計算を行った。円周方向の分割数とチューブ中央における断面積との関係により、解の精度と計算時間を考慮し、適切な格子系を求めた。また、境界条件をチューブ両端自由支持とした $l=0.1\text{m}$ のチューブを用いて、種々の外圧について数値解析を行い、その結果を実験結果と比較して、有限要素法によるチューブのモデル化の妥当性を確認した。

次に、長さ 0.1m のチューブに対し、境界条件をチューブ両端固定支持として、種々の伸展圧について、3次元計算を行い、チューブ両端の拘束の影響について検討した。その結果、流れがない場合、十分長いチューブでは拘束の影響はチューブ両端近傍を除いて無視できることが明らかとなった。しかし、流れが存在する場合には、特に自励振動に伴うチューブの変形を取り扱う際には、拘束の影響は無視できない。そこで、理論モデルの妥当性を検証するため、両端の拘束の影響が強く現れる 0.03m のチューブの場合について、伸展圧が -2000Pa の場合のチューブ断面積の軸方向分布を、3次元有限要素モデルと2つの1次元モデルとを比較した。1次元膜モデルによるチューブ断面積の軸方向分布形状は、3次元計算の結果とかなり異なっているが、 90N/m の等価張力を与えると、3次元計算の結果とほぼ同程度の断面積変化が生じる。また、チューブ中央断面積の伸展圧による変化については、伸展圧が0に近い負の領域を除いて、初期張力が 90N/m の1次元膜モデルの結果は3次元計算結果と定性的によく一致する結果を与える。これにより、1次元膜モデルを用いた場合、実際のチューブに与えた初期張力が0の場合でも、3次元変形の復元力に相当する 90N/m 程度の等価膜張力を考慮すべきであることが分かった。1次元膜モデルの場合と同様に、1次元ビームモデルにおける等価ビーム厚さが求められた。これまでに定性的に評価されたチューブ変形した場合の復元力を定量的に評価した。

この2つの等価量の有効性を確認するため、3次元有限要素モデルと上2つの1次元モデルを、実験で用いたチューブ長 0.1m のコラプシブルチューブに適用し、チューブ内流れが存在しない場合のチューブ変形の数値計算結果を実験結果と比較した。3次元計算結果は実験結果とよい一致を示している。膜モデル、ビームモデルともに長さ 0.1m における実際のチューブ変形を定性的に表しているが、変形量は実際のチューブと比較すると小さい、これはこの2つの1次元モデルに用いられた等価膜張力と等価ビーム厚さは、自励振動発生時のチューブ変形を考慮して、チューブ長さが 0.03m の比較的短い場合について求められたことによるものと考えられる。したがって、以上の結果のみから膜モデルとビームモデルにおける等価膜張力と等価ビーム厚さの有効性を議論することは不十分であり、自励振動を含めた動的な場合を検討する必要がある。

第3章 一次元チューブモデルによる自励振動の検討

第3章では、前章で得られた等価膜張力および等価ビーム厚さを用いて、チューブに初期張力が作用しない場合の定常流および自励振動の場合について、1次元膜モデルおよび1次元ビームモデルによる計算結果を実験結果と比較しつつ、本論文で対象とする2つの1次元モデルの妥当性について検討した。

まず、自励振動の考察に先立って、コラプシブルチューブ内の流れが定常流となる場合について、実験結果と1次元モデルによる計算結果を比較した。1次元膜モデルとビームモデルによる計算結果は、それぞれ実験結果とよく一致している。これより、定常流の場合では、等価膜張力および等価ビーム厚さを用いることによって、チューブの変形を定性的に評価できた。

次に、自励振動の場合について、実験結果と2つの1次元モデルによる計算結果を比較して検討した。上流圧力の時間変化については、上流圧力の平均値については3つの場合ともほぼ同じ値になるが、振動波形を比較すると、実験結果では比較的大きな変化が現れた。これに対して、膜モデルの上流圧力の変化は小さい、一方、ビームモデルは実験結果と一致する圧力振動波形を示している。下流側圧力の時間変化について比較すると、ビームモデルのほうが膜モデルよりも実験結果の圧力変化をよく表している。また、上流側における流量の時間変化は、膜モデルによる流量の不規則的な変動に対して、ビームモデルのほうが周期的な振動を示している。下流側流量の時間変化については、ビームモデルは膜モデルより大きな流量振幅を有している。また、ビームモデルの場合では、逆流が生じている、これは実験の測定結果によく一致している。自励振動におけるチューブの断面積の軸方向分布変形について、2つの1次元モデルともに、定性的に実験結果と一致している。実験結果では、チューブの最大圧平部は計算結果に比べてより下流側にあるが、これは本モデルでは無視したチューブ面のせん断応力によるチューブ張力の軸方向変化の影響によるものと推察される。以上の結果より、本章の計算条件では、自励振動発生時のチューブ内流れの圧力と流量変動波形について、等価量を考えると、1次元膜モデルとビームモデルともに定性的に実際に近い結果を与えた。

第4章 コラプシブルチューブの自励振動におけるチューブ軸方向初期ひずみの影響

第4章では、チューブ軸方向初期ひずみが自励振動に及ぼす影響を検討するため、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実験により詳細に測定した。実験では、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。実験では軸方向初期ひずみを弾性限度内の0から26%の範囲内で変化させ、コラプシブルチューブ流れの自励振動における軸方向初期ひずみの影響を調べた。

チューブに軸方向初期ひずみを与えない場合、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ことがわかった。一方、チューブに軸方向初期ひずみを与える場合、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。流れに発生する自励振動に関して、上流側の流量と圧力には、全体的に大きな変化なかったが、下流側では、圧力振幅のチューブ取り付け長さによる変化には、流量が小さい場合、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。また流量が小さいほど圧力振幅の変化が大きい。流量振幅については、全体的に流量の増加とともに流量振幅は増加する傾向が現れた。流量が小さい場合、自励振動の周波数は取り付け長さ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。流量が大きい場合では、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。

また、本実験では、自励振動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調べた。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。それは、流量の増加にともなって、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種類の振動形態が存在する。なお、振動形態が変化する流量の値は、チューブ取り付け長さによって変化する。これは流量を固定してチューブ取り付け長さを変化させた場合と、チューブ取り付け長さを固定して流量を変化させた場合のそれぞれについて、自励振動の形態が相互に変化するを示している。

第5章 結論

第5章は本研究の結論であり、第2章から第4章までに得られた結果を要約し総括している。

審査結果の要旨

コラプシブルチューブ内流れは生体内の種々の流れと類似しており、チューブの変形と流れ場の干渉により複雑な現象が生じる。コラプシブルチューブ内流れに発生する自励振動については生体工学の分野で多くの研究がなされているが、振動の基本的な発生機構についても、現象を単純化した1次元モデルに基づく複数の説が存在し、実際の3次元的な現象との定量的な関連は未だ十分には明らかにされていない。

本論文は、自励振動の定量的な理解に不可欠なチューブの3次元的な変形に伴うチューブ復元力の影響を理論解析と実験により明らかにしたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、チューブ内の流体が静止している条件下で、一様な外圧が作用した場合のチューブの3次元的な変形を有限要素法により数値解析した。3次元計算の結果を用いて、チューブに作用する力のつり合いに関する1次元膜モデルおよび1次元ビームモデルについて、等価膜張力および等価ビーム厚さをそれぞれ求めた。この結果は、円筒形状のチューブの3次元的な変形における軸方向曲げ強さの増加を1次元モデルに取り込むことの必要性を指摘したものであり、重要な成果である。

第3章では、コラプシブルチューブ内の定常流および自励振動について、等価膜張力および等価ビーム厚さを用いた1次元モデルの妥当性を、実験結果と比較することにより検討した。その結果、等価膜張力および等価ビーム厚さを用いることにより、従来ではモデルが破綻するチューブの初期張力が小さい場合でも、自励振動が再現できることを明らかにしている。

第4章では、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、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明らかにした。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するを示した。これらは有用な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、コラプシブルチューブ内流れに発生する自励振動において、チューブの3次元的な変形に伴うチューブ復元力の影響を理論解析と実験により明らかにしたもので、生体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。