

報告番号

※ 乙	甲
--------	---

 第 2436号

主論文の要旨

題名 弾性円管と流体の連成波動

氏名 浦田喜彦

主論文の要旨

報告番号	※甲第 乙	号	氏名	浦田喜彦
------	----------	---	----	------

流体輸送や圧力伝達などの目的で種々の機械や工業施設に広く用いられている流体管路においては水撃や油撃、あるいは脈動などと呼ばれる波動現象が生じることがある。多くの場合に有害なこれらの波動現象の発生を予測し、挙動を制御することは機械などの性能と安全性を確保するために非常に重要である。そのためには波の性質を知ることが必要であり、多くの研究が行われてきたが、管の弾性変形が無視できない場合については基本的な知識がまだ十分に確立されてはいない状況にある。従来の研究においては流体を中心に扱うことが多かったが、弾性管と流体はそれぞれ独立に波動の媒質であり得るから、両者の運動が連成する現象として考えなければ広い範囲の問題の中には統一的な理解が困難になる場合も生じる。そこで本研究では弾性管-流体系に生じる波動をとくに連成波動と呼ぶことにして、管と流体の方程式を連立させて連成波の伝ばに関する性質を解析的に調べ、一部の主要な結果については実験的にも調べた。

本論文は9章から成る。第1章「緒論」と第9章「結論」を除く7章が研究内容であるが、これを便宜上第1編「解析的研究」と第2編「実験的研究」とに分けた。以下、順に要約して説明する。

第1章「緒論」では本研究の趣旨および本研究に関連する従来の研究について述べ、本論文の構成と内容を簡単に紹介した。また、基本的な記号の説明も行った。

第1編は第2章から第6章までである。

第2章「流体が非粘性の場合の基礎的解析」では、管の基礎式に精密なHerrmann-Mirskyの円筒かく理論を、流体の基礎式に三次元・線形の非粘性流体の方程式を用い、両者を管内壁における半径方向速度の連続性などの条件下で連立させて連成波の分散性などについて解析的に調べた。また、管に三次元弾性論を用いてさらに精密化した計算を行い、その結果を基準にして従来から用いられている波の伝ば速度の近似式の精度と適用限界も調べた。本章の結果は本研究を通じての基礎となるものであるが、主要な点をまとめるとつぎのようになる。

(1) 連成波の各モードは非連成の管および流体の各波動モードの特徴を各波長域ごとに受け継ぎながら全体としては固有の分散性を示す。

(2) 連成波の一次モードは長波長域ではほぼ非分散的でエネルギー分布などからみて流体が主な役割を果たし、位相速度は管の弾性の影響により、流体中の音速より小さ

主論文の要旨

報告番号	※甲第 乙	号	氏名
			浦田喜彦
<p>くなる。波長が管径の数倍から数分の一までの領域では管の半径方向の運動が大きくなるために著しい分散性を示す。</p> <p>(3) 二次モードは長波長域ではほぼ管の縦波としての性質を示し、やはり非分散的で位相速度も弾性棒を伝わる縦波のものに近いが、波長が短くなると一次モードと同様に分散性が現われてしだいに流体が主な役割を果たすモードに変化する。</p> <p>(4) 三次以上の高次モードは位相速度に若干の違いはあるが、性質は剛管内流体の二次以上のモードと類似したものになる。</p> <p>(5) 管内に平均流れがあるときにはエネルギー分布などからみて流体が主な役割を果たす領域では位相速度は平均流れの影響をほとんど直接的に受けるが、管が主である領域では平均流れの影響は小さい。</p> <p>(6) 一次、二次モードの波長が管平均半径の約20倍以上の領域では非分散的であるために伝ば速度を簡単な近似式で計算することができる。</p> <p>第3章「流体に粘性がある場合の基礎的解析」では第2章の解析に流体粘性を加えて検討した。その主な結果は</p> <p>(1) まず、管が剛体のときの粘性流体の圧縮性の波動の減衰は波長が管内半径より大きい領域では主に管壁に接してできる薄い境界層内の摩擦によって生じる。この領域では $\delta \propto \sqrt{N/\omega}$ の近似が成立する。ただし、δ は対数減衰率、N は流体動粘度、ω は波の角振動数である。波長が非常に大きくなると、すなわち振動数が非常に小さくなると境界層が厚くなり、管路全面を覆うようになるので波の性質は大きく変化し前述の近似式も成立しなくなる。</p> <p>(2) 境界層を伴わない自由空間の平面波では対数減衰率の振動数や動粘度に対する依存傾向は管内波動とは全く異なり、大きさもはるかに小さい。このことから管内波動においては境界層が非常に大きな役割を果たしていることがわかる。</p> <p>(3) 連成波の一次、二次モードの波長が管平均半径の約20倍以上の領域での減衰は剛管の場合と同じく、管内壁付近にできる境界層内の摩擦が主因である。</p> <p>(4) 剛管内粘性流体の一次モード、連成波の一次、二次モードの対数減衰率と粘性による位相速度の低下率との間には著しい平行的な関係がみられる。これは波動の主たる変位とそれに作用する粘性による摩擦力との間に約 $\pi/4$ rad の位相差があるということで説明できる。</p>			

主論文の要旨

報告番号	※甲第 乙	号	氏名	浦田喜彦
<p>第4章「管路の振動数応答の近似計算式」では第3章の解析を簡単化して粘性流体を含む弾性円管路の振動数応答を能率的に計算する方法について検討した。2種類の近似式を導いたが、そのうちの一つは管の半径方向慣性力などを省略したもので、第3章の精密な計算値との比較で検証したところ、管平均半径の約20倍以上の領域の連成波の一次、二次モードに対してよい精度を持つことが明らかになった。また、一次モードだけを対象にしたさらに簡単な近似式についても検討したが、これは精度は劣るが、管の縦振動、すなわち連成波の二次モードの発生のない条件下では十分に使用が可能である。さらにはじめの近似式において管材の弾性係数を複素数化して管材の内部摩擦が連成波動の減衰に与える影響についても検討した。内部摩擦は弾性体のひずみを通して発現するので連成波のポテンシャルエネルギーのうち、管のひずみエネルギーの占める割合の大きい管肉厚の大きい場合の二次モードで影響が最も大きくなるが、金属管の場合には流体粘性との比較において無視できることが多いと考えられる。</p> <p>第5章「管の境界条件に関する検討」では境界条件が合理性を欠かない範囲で任意に与えられたときの波動の精密な解析の方法についてや、一般的な観点から考察した。</p> <p>(1) 連成波動に限らず、一般の一次元的な波動系の方程式の解は実波数を持つ伝ば項(伝ばモード)と、波数が複素数あるいは純虚数になり、波として伝わる性質に欠ける非伝ば項(非伝ばモード)とに分類できる。</p> <p>(2) 一般解の構成にはすべての伝ば項と非伝ば項が必要であり、基礎式に三次元理論を用いると解は普通は無級数の形になる。</p> <p>(3) 非伝ば項は境界の近傍においてのみ大きな値を持ち、境界から離れると急速に値を減じる。それゆえ、境界からある程度離れた領域では波の挙動は実質的に伝ば項だけに支配されることになる。</p> <p>(4) 連成波の低振動数域における伝ばモードは一次、二次モードだけである。他の解はすべて非伝ばモードである。非伝ば項は管端近傍の流体粒子速度や圧力の分布の詳細、あるいは拘束状態の違いによる管の変形のしかたの相違などを表わすものである。</p> <p>(5) 連成波の非伝ば項は機械工学で普通に問題となるような比較的低い振動数域では境界からの到達距離がきわめて小さいのでそれらを見捨てても管全長にわたるような波の挙動にはほとんど影響しない。これが第2章、第4章で一次、二次モードだけ</p>				

主論文の要旨

報告番号

※甲第
乙

号

氏名

浦田喜彦

を対象にした近似式を導いたことの妥当性の理論的根拠の一つとなる。

第6章「非軸対称モードに関する検討」では連成波の非軸対称モードは管の横振動のモードを除いて低振動数域ではすべて非伝ば的であり、横振動の発生のない条件下では連成波を軸対称問題として扱ってよいことを示した。

第2編は第7章と第8章である。

第7章は「伝ば速度の振動数依存性」、すなわち分散性についての実験である。水を封入した黄銅管の一端から正弦波を有限整数周期だけ発射し、他端でこれを受波してパルスの伝ば時間をシンクロスコープ像の写真上で測定した。測定値の分布は第2章の方法による連成波の群速度の計算値とかなりよく一致した。しかし、実験ではパルス先端の速度を求めたために測定値は群速度そのものにはならず、一部に測定値と計算値の定量的な一致がやゝ不十分な領域があった。

第8章「連成波動の減衰」は第3章、第4章の理論の実験的確認である。まず、円管内空気を伝わる音波の減衰をパルス法と共振法で調べた。この場合、管の弾性の影響はない。対数減衰率の分布は理論と定性的によく一致したが、実験の方が約47%大きくなる。これは、粘性以外に、流体が気体の場合には圧力変化に伴って温度変化が生じ、ほゞ定温の管壁との間に発生する熱伝導も減衰の原因となるため、これを考慮して理論の補正を行ったところ、理論と実験はよく一致した。また、連成波についてはグリセリン水溶液を封入した黄銅管の縦振動の減衰を測定した。減衰率の実験値と第4章の近似式による値は実験精度の劣る一部を除いてよく一致した。この実験によって第3章、第4章の理論的検討がほぼ妥当であることが明らかになった。

第9章「結論」では第2章から第8章までの結果を要約して述べた。

なお、第2章で伝ば速度の近似式の精度の検討の基準に用いた管に三次元弾性論を適用した連成波の伝ば速度の厳密値の求め方は付録Iに記した。また、本研究では管が流体中に没していたり、固体中に埋め込まれていたりする場合を想定して管外壁に接する物質があるときに連成波が受ける影響についても解析的に調べたが、その結果を付録IIに述べた。