

円筒音波および球面音波の非線形共鳴現象の理論

学位論文内容の要旨

従来より音波の工学的な応用として、超音波による画像診断や結石の破碎などの医療の分野での応用や非破壊検査、超音波洗浄、超音波による流速測定などの工業的な応用がよく知られているが、近年、とくに大振幅の音波を利用した熱音響エンジン・冷凍機や音響コンプレッサーといったデバイスの研究・開発が盛んになっている。これらの技術を実用化するにあたっては、装置の高出力化・高効率化の観点からそこで利用する音波の振幅を少しでも大きくすることが望まれる。その方法のひとつとして、音波の共鳴現象を利用した振幅の増幅が注目されている。

ある音源から入力される音波によって定在音場が形成されている系において、音源の振動数が特定の値となると、またはその近傍で、定在音波の振幅が極めて大きくなることがある。この現象を音波の共鳴とよぶ。音波の共鳴における最大の特徴は、音源から入力される音波の振幅が微小であったとしても、共鳴によって極めて大振幅の音場が形成されうることにある。しかし、音波の伝播は本質的に非線形の現象であるため、大振幅音波の伝播過程にはさまざまな非線形現象があらわれる。音波の伝播に伴う波形歪みと衝撃波の形成もそのひとつである。このような有限振幅音波の非線形伝播を取り扱う学問分野は非線形音響学とよばれる。非線形音響学における数多くの先駆的な研究により、共鳴管内に励起される平面音波の大振幅共鳴現象は、気体のエネルギー散逸の効果が小さいときには必ず衝撃波をともなうということが理論的・実験的にあきらかにされている。そして、ひとたび衝撃波が形成されると衝撃波面において強いエネルギー散逸がおこるために、共鳴による音波の振幅の増幅はある一定値で飽和してしまう。一方で、円筒音波や球面音波の共鳴現象では、衝撃波の形成が抑制されるために平面音波よりもさらに振幅の大きな共鳴振動が実現可能であることが知られている。しかし、円筒音波や球面音波の伝播は、音響学において非常に基本的な問題であるにも関わらず、その共鳴に関する理論的な研究はわずかに定常振動解についての研究があるのみで、そこに現れる非線形現象の多くは未解明のままであった。

このような観点から、本研究は円筒音波や球面音波の幾何学的な形態に着目し、その共鳴現象に現れる特徴的な非線形現象を理論的に解明することを目的としている。二重円筒あるいは二重球殻を導入し、その内部の環状領域に励起される共鳴音波を考察の対象とすることで、内部の円柱(球)と外側の円筒(球殻)の半径の比を変化させることによって中空の単純な円筒(球殻)内に励起される共鳴波から平面波の共鳴現象までを包括的に取り扱うことが可能となる。さらに、これによって音場の幾何学的な形状が共鳴音波のふるまいに対して与える影響を定量的に評価することができる。本論文は以下の6章から構成されている。

第1章は序論であり、音波の共鳴現象に対する明確な定義を与え、そこに現れる非線形現象についての簡単な解説を行うとともに、研究の目的および音響学における本研究の位置付けと既存の研究との関連についての概観がなされる。また、本研究の構成が示される。

第2章では対象とする二重円筒と二重球殻を定義し、問題の定式化を行う。ここではまず円筒音波や球面音波の非線形共鳴現象を特徴付けるパラメータとして、気体の粘性や非線形性、音場の幾何学的な形状を指定する重要な無次元パラメータを導入する。つづいて気体の運動を支配する流体力学の基礎方程式系を導入し、弱い散逸効果を含んだ非線形の波動方程式を導出する。また、問題に対応する初期条件と境界条件が与えられる。

本論文の主要な部分は以下の第3章から第5章によって構成される。まず第3章では、同軸円筒と同心球殻内の理想気体中に励起される、衝撃波を含まない弱非線形共鳴音波についての理論解析がなされる。ここでは第2章で導出された非線形の波動方程式について、漸近展開法の一つである多重尺度法を適用し、音源である外部円筒および外部球殻の脈動の周期に対してゆっくりとした振幅の変調を含む共鳴波の振幅方程式を導出する。この方程式を用いて、位相平面上における共鳴波の振幅のふるまいについての議論を行う。これにより振幅の変調の周期をはじめとする共鳴波のふるまいが内部円柱と外部円筒の半径の比に強く依存すること、振幅の変調には音波のもつ非線形性と共鳴音場の幾何形状に起因する分散性が本質的な役割を果たしていることが示される。ここで得られた結果は、既存の研究によって知られていた定常振動解を含んでいる。さらに、この定常振動解についてもより詳細な議論がなされ、その結果として detuning と呼ばれる音源の駆動振動数と系の固有振動数のずれに対する定常振動解の振幅の応答や幾何学パラメータに対する定常振動解の依存性があきらかにされる。

第4章では、同軸二重円筒内に励起される大振幅の共鳴音波を Navier-Stokes 方程式および Euler 方程式を数値的に解くことによって、衝撃波の形成を含んだ音波の非線形発展に対する解析を行う。さらに、衝撃波形成の条件や衝撃波面におけるエネルギー散逸をともなった準定常振動状態についての詳細な議論を行う。衝撃波を精度良く捕らえるために、数値計算には高次精度の風上差分法を用いている。

第5章は、内部円柱と外部円筒の中心軸がずれた偏心円筒の中に励起される音波の共鳴問題を扱う。ここでは、第3章ならびに第4章で得られた結果に加えて、共鳴波のふるまいに対する音場の角度依存性の影響についての考察を行う。この角度に関する依存性によって音波の共鳴には異なる2つの振動モードが現れること、内部円柱における波面の非一様な反射により、円筒内に動径のみならず角度にも依存する音場の分布が形成されることが示される。これらの現象に対して、第2章において定義された幾何学パラメータと円筒の偏心率は極めて大きな影響をおよぼす。

第6章は結論であり、本研究の総括と将来的な展望について述べる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	大島伸行
副査	教授	藤川重雄
副査	教授	武田靖
副査	准教授	矢野猛

学位論文題名

円筒音波および球面音波の非線形共鳴現象の理論

近年、音波の工学的な応用として大振幅の音波を利用した熱音響エンジン・冷凍機や音響コンプレッサーといったデバイスの研究・開発の取り組みの中で、音波の共鳴現象を利用した振幅の増幅が注目されている。非線形音響学における先駆的な研究により、共鳴管内に励起される平面音波の大振幅共鳴現象は理論的・実験的に明らかにされてきたが、円筒音波や球面音波の共鳴に関する理論的な研究はわずかに定常非線形振動解についての研究があるのみで、それ以外の多様な非線形現象のほとんどは未解明のままであった。

本研究は円筒音波や球面音波の幾何学的な形態に着目し、その共鳴現象に現れる特徴的な非線形現象を理論的に解明することを目的としている。二重円筒あるいは二重球殻の内部の環状領域に励起される共鳴音波を対象とすることで、内部の円柱(球)と外側の円筒(球殻)の半径の比を変化させることによって中空の単純な円筒(球殻)内に励起される共鳴波から平面波の共鳴現象までを包括的に取り扱うことを可能とした。これによって音場の幾何学的な形状に起因する性質が共鳴音波のふるまいに対して与える影響を定量的に評価している。

本論文は以下の6章から構成されている。

第1章は序論であり、音波の共鳴現象に対する明確な定義を与え、そこに現れる非線形現象についての簡単な解説を行うとともに、研究の目的および音響学における本研究の位置付けと既存の研究との関連についての概観がなされ、また、本論文の構成が示されている。

第2章では対象とする二重円筒と二重球殻を定義し、問題の定式化が行われる。ここではまず円筒音波や球面音波の非線形共鳴現象を特徴付けるパラメータとして、気体の粘性や非線形性、音場の幾何学的な形状を指定する重要な無次元パラメータを導入し、つづいて気体の運動を支配する流体力学の基礎方程式系に基づいて弱い散逸効果を含んだ非線形の波動方程式を導出するとともに、問題に対応する初期条件と境界条件を与えている。

第3章では、同軸円筒と同心球殻内の理想気体中に励起される衝撃波を含まない弱非線形共鳴音波についての理論解析がなされている。ここでは第2章で導出された非線形の波動方程式について、漸近展開法の一つである多重尺度法を適用し、音源である外部円筒および外部球殻の脈動の周期に対してゆっくりとした振幅の変調を含む共鳴波の振幅方程式を導出した。この方程式を用いて、共鳴波の振幅の非線形な時間発展についての議論を行った。これにより振幅の変調の周期をはじ

めとする共鳴波のふるまいが内部円柱と外部円筒の半径の比に強く依存すること、振幅の変調には音波のもつ非線形性と共鳴音場の幾何形状に起因する分散性が本質的な役割を果たしていることが示された。ここで得られた結果は、既存の研究によって知られていた定常振動解を含んでおり、さらに、この定常振動解についてもより詳細な議論がなされ、その結果として detuning と呼ばれる音源の駆動振動数と系の固有振動数のずれに対する定常振動解の振幅の応答や幾何学パラメータに対する定常振動解の依存性があきらかにされた。

第4章では、同軸二重円筒内に励起される大振幅の共鳴音波を Navier-Stokes 方程式および Euler 方程式を数値的に解くことによって、衝撃波の形成と成長を含んだ音波の非線形発展に対する解析が行われている。衝撃波形成の条件や衝撃波面におけるエネルギー散逸をともなった準定常振動状態についての詳細な議論がなされ、衝撃波を精度良く捕らえるために、数値計算には高次精度の風上差分法が用いられている。

第5章は、内部円柱と外部円筒の中心軸がずれた偏心円筒の中に励起される音波の共鳴問題を扱っている。ここでは、第3章ならびに第4章で得られた結果に加えて、共鳴波のふるまいに対する音場の角度依存性の影響についての考察が行われた。この角度に関する依存性によって音波の共鳴には異なる2つの振動モードが現れること、内部円柱における波面の非一様な反射により、円筒内に動径のみならず角度にも依存する音場が形成されることが示された。これらの現象に対して、第2章において定義された幾何学パラメータと円筒の偏心率は極めて大きな影響をおよぼすことが示された。

第6章は結論であり、本研究の総括と将来的な展望について述べられている。

以上のように本論文は、円筒音波および球面音波の非線形共鳴現象を解析することで共鳴音波の非線形性や分散性に起因する諸現象の解明等の理論上および工学的応用上有益な新知見を得ており、さらに非線形音響学と機械工学の進歩に寄与するところ大であるといえる。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。