

学位論文題名

非線形音響波の伝播と音響流

学位論文内容の要旨

地中や海中の測量や、非破壊検査、または医療などの分野への応用や環境問題などの要請から、音響波についてさまざまな研究がなされている。これらの大半は通常の線形波動方程式によって音響波の伝播を記述できるが、一部には音響波の振幅が大きいために流体の支配方程式系に含まれる非線形項の効果を無視し得ない場合も存在する。それらは現実に医療分野での衝撃波の応用などにみられる。このような有限振幅の音響波の弱非線形伝播を取り扱う学問分野は非線形音響学 (nonlinear acoustics) と呼ばれている。この分野は将来の研究の発展とともに応用技術の多角化が期待されるが、そのためには非線形音響波の振る舞いについての詳細な理解が得られていなければならない。

本論文で取り扱う代表的な非線形現象は「音響流の励起」と「衝撃波の形成」である。まず、音響流 (acoustic streaming) は音響波に付随して励起される媒質の非波動的な、質量の移動をともなう流れである。物理的に非常に興味深い現象であるので、音響流に関しては古くから多くの研究がなされてきた。これらの音響流の発生は (非線形効果に加うるに) 本質的に散逸効果に起因している。これに対し、本論文の音響流ではその発生に一切散逸効果が介在しないという点で上記の音響流と異なっている。衝撃波 (shock wave) とは、よく知られているようにそれを介して圧力、密度、流速などの物理量が不連続的といってよいほど急峻に変化する強い圧縮波のことで、その極めて薄い層内において非常に大きな運動エネルギーの散逸が起こっている。非線形音響学では弱非線形波動を扱うため、衝撃波は通常の気体力学で議論の対象になるものに比べ、非常に弱く、また、その形成のためには音波は非常に長い距離を伝播しなければならない。

本研究では、 z 軸方向には一様な二次元の音源から、周囲の理想気体中に放射される外向きに進行する二次元波の弱非線形伝播と音源近傍に励起される音響流の挙動に関して解析する。音源としては振動する剛体円柱と静止平面壁上で振動する膜の二種を考え、これらの音源は定常的な正弦振動を行い、それによって放射される音波は音源のスケールと同程度の波長をもつと想定する。このような音響波は強い指向性をもつ。

また、非線形効果が端的に現れる、散逸効果に対して非線形効果が相対的に大きい極限に問題を設定する。類似の解析例は過去に振動円柱の問題には存在するが、そこでは音響流と衝撃波の発展が調べられていないなど不十分な点があり、膜の問題に至っては類似の解析例が全くみられないとよい。本論文は以下の6章で構成される。

第1章は序論であり、本論文の取り扱う問題を明らかにするとともに、研究目的および周辺の研究との関連や、また、解析の結果として明らかになる非線形現象などについて簡潔に解説を行っている。

第2章では、非線形平面音響波の伝播過程について概説し、解析に用いられる数学的な技法についても記す。また、古くから知られている音響流についての3つの代表的な研究を紹介し、それらの音響流の発生機構に流体の散逸性の効果がどのように関わっているのかを説明する。

第3章では衝撃波形成以前の基礎方程式である非線形波動方程式の導出を行う。また、後半では振動する円柱の問題と剛体壁面上で振動する帯状の膜の問題とのそれぞれにおいて音源上での境界条件を与える。

第4章では、剛体円柱の振動によって周囲の理想気体中に放射される非線形音響波の問題が取り扱われる。この章の前半部分で音響流の流れ関数が求められる。この流れ関数にもとづいて、与える角振動数の違いによって励起される音響流の流れパターンは二種類存在することが明らかにされる。また、この音響流は圧縮性と非線形性のみ起因する発生機構をもつ。後半部分では接続漸近展開法 (method of matched asymptotic expansion) によって遠方における音響波の非線形伝播を記述する遠方場の解が確定する。遠方場では衝撃波が形成され、等面積則を用いた解析によると、全体の波形は鋸歯状波 (sawtooth wave) へと発展することが判る。この指向性をもつ鋸歯状波は、十分に遠方では一様な振幅の円筒鋸歯状波に漸近することが示される。

第5章では剛体壁面上の振動膜から放射される二次元非線形音響波の伝播が調べられる。本章では、得られる解が格段に簡単な形式となり、定性的な音響波の振る舞いを調べる上で有利であるために、二次元膜を音源に選ぶ。放射される音波の指向性は方向角と角振動数とに依存する複雑な関数になり、角振動数が大きくなると音波はビーム状になる傾向を示す。音源となる膜の近傍には円柱の場合と同様に、散逸性に起因しない音響流が励起され、角振動数の違いによって二通りの流れパターンをもつ。この問題での衝撃波形成位置は、角振動数を大きくすると、円柱の問題の場合には角振動数に逆比例して音源に近づくのに対して、その三乗に逆比例して音源に近づく。また、遠方での音響波の振る舞いは複雑な音波の指向性を反映したものであるが、最終的に漸近する鋸歯状波は、やはり一様な振幅の円筒鋸歯状波へと向かうことが示される。

第6章は結論で、円筒と膜の問題の解析結果をまとめ、両者の比較も行う。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 上 良 紀
副 査 教 授 田 村 信 一 朗
副 査 教 授 木 谷 勝
副 査 教 授 飯 田 誠 一

学 位 論 文 題 名

非線形音響波の伝播と音響流

音波の伝播過程に現れる非線形現象を研究対象とする非線形音響学の分野において、波形歪みによる衝撃波の形成と発展の過程および音響流の二つは、興味深くかつ重要な研究課題となっている。これらに関しては、これまでに多くの理論的な研究がなされてきているが、非線形問題特有の数学的取り扱いの難しさのために、いまだ十分に解明されたという状況には至っていない。とりわけ、多次元波に関する研究は、今後の発展によるところが大きい。

本論文は、上述の二つの非線形現象に着目し、定常的な正弦振動を行う二次元の音源、すなわち振動円柱と膜から、周囲の理想気体中に放射される強い指向性をもつ二次元波に対して、それぞれの弱非線形伝播とそれが音源近傍に励起する音響流を詳細に理論解析し、結果をまとめたもので、6章より構成されている。

第1章は序論であり、本論文の取り扱う問題を明らかにするとともに、研究目的および周辺の研究との関連や、また、解析の結果として明らかになる非線形現象などについて簡潔に解説を行っている。

第2章では、すでによく知られている非線形平面音響波の伝播過程について、その物理的な描像を概説している。また、古くから知られている音響流についての3つの代表的な研究を紹介し、それらの音響流の発生機構に流体の散逸性の効果がどのように関わっているのかを説明している。

第3章では衝撃波形成以前の基礎方程式である非線形波動方程式を導出し、問題の定式化を行っている。また、後半では振動する円柱の問題と剛体壁面上で振動する帯状の膜の問題とのそれぞれにおける音源上での境界条件を与えている。

第4章では、剛体円柱の振動によって周囲の理想気体中に放射される非線形音響波について調べている。まず、音源の近傍に現れる音響流が解析される。これまでは質量流の定常成分である音響流は、流体の粘性と非線形性の効果によって励起されるも

のと理解されていたが、本論文では振動する音源の近傍で第二近似解に粘性に起因しない定常な質量流れが存在することを確認し、これが流体の圧縮性と非線形性の効果のみによって励起される音響流であることを指摘している。また、この音響流は、無次元化された音源の振動数の大小によって、全く異なる二つのフロー・パターン(質量流の流線図形)をもつことを明らかにしている。ついで、接続漸近展開法によって音響波の非線形伝播を記述する遠方場の解をもとめている。その結果、過去に繰り返り込みの方法によって得られた方位角方向の速度成分の解が不正確であったことが判明する。音源近傍では正弦波形であった音響波は、遠方では非線形効果の累積によって徐々に波形を歪ませて、やがて衝撃波を形成する。衝撃波形成後の伝播に対しては、等面積則を用いた解析によって、全体の波形は鋸歯状波へと発展することを導いている。この指向性をもつ鋸歯状波は、さらに遠方に進むと一様な振幅の円筒鋸歯状波に漸近することが示されている。

第5章では剛体壁面上の振動膜から放射される二次元非線形音響波の伝播が調べられている。解析結果を列挙すると以下のようなになる。放射される音波の振幅は方位角と角振動数とに依存する複雑な関数になり、角振動数が大きくなると音波はビーム状になる傾向を示す。音源となる膜の近傍には円柱の場合と同様に、散逸性に起因しない音響流が励起され、角振動数の違いによって二通りの流れパターンをもつ。この問題での衝撃波形成位置は、角振動数を大きくすると、円柱の問題の場合には角振動数に逆比例して音源に近づくのに対して、その三乗に逆比例して音源に近づく。また、遠方での音響波の振る舞いは複雑な音波の指向性を反映したものであるが、それにも関わらず非常に遠い所では音響波は、やはり一様な振幅の円筒鋸歯状波へと漸近する。

第6章は結論で、円筒と膜の問題の解析結果をまとめ、二つの結果の比較を行い、かつ問題点を指摘している。

以上のように本論文は、音波の伝播にともなう非線形現象を解析し、理論上および工学的応用上有益な数多くの新知見を得ており、非線形音響学と応用物理学の進歩に寄与するところ大である。

よって、本論文は、北海道大学博士(工学)の学位論文として受理に値するものと認める。