

A THEORETICAL STUDY ON ACOUSTIC WAVE RECTIFIERS

(音響波整流器に関する理論研究)

学位論文内容の要旨

特定の周波数帯域の音波を通すフィルターなどの音響波デバイスはすでに実用化されているが、ダイオードのように音響波を一方向だけに通すデバイスは未だに開発されていない。音響波の整流機構は理論・実験の両面から研究されているが、理論によりこれまでに提唱されている整流機構は実現が困難なものである。また、実験的に整流効果が認められるものであっても、その整流作用が著しく小さく、デバイスとしての機能は不十分である。本学位論文は、デバイスへの応用を目指した、音響波の新たな整流機構を提言するものである。

本学位論文は七章からなる。

第一章では研究の背景とともに、研究の目的が述べられている。

本研究では、音響波の波長が原子間距離より著しく長く、固体を弾性連続体と見なせる(長波長近似)場合を考え、音響波を弾性連続体における弾性波として取り扱う。本研究で考察する整流機構は、弾性波の散乱に因るため、第二章では、弾性体の力学、弾性波動およびその散乱における境界条件に関する概要が述べられている。

第三章では、本研究の対象となる音響波整流器のモデルを導入する。音響波が散乱体に衝突したとき、散乱体からの等方的な散乱や、回折現象、散乱波間の干渉効果が現れる。しかしながら、本研究では、波長が著しく短く、波動としての性質を無視できる場合に有効である幾何音響学に基づいて基本的なモデルを構築している。幾何音響学に基づいて導入された系は、幾何学的に非対称な散乱体を一次元に周期的に配置した構造をしている。具体的には、三角柱状の空孔を、等方弾性体中に一列に、かつ周期的に配置した構造である。空孔の軸方向に変位成分を有する横波が散乱体の軸に垂直に入射する場合を考えると、一方からの透過率が1であるのに対し、反対側から入射した場合の透過率が0.5であることが分かる。この構造により、整流効果が認められるが、これをさらに改善する目的で、2列の散乱体からなる構造を考える。なお、2列目の三角形の位置は一列目とは底辺の長さだけずらしている。このモデルについて、幾何音響学に基づいて音響波の透過率を求めると一方が0.5で、他方が0の完全な整流効果が期待できる。

固体中の音波は縦波と2つの横波がある。縦波と横波の1つは散乱体表面で散乱され

た場合、お互い部分的に変換される。このモード変換は重要であるが、整流機構の理解を難しくする。そのため、本研究で考察するモデルは、縦波と横波間のモード変換による複雑さを避け、整流機構の基本的な機能を明らかにするため、モード変換の生じない空孔の軸方向に変位成分を有する横波を想定している。

上述の整流効果の結果は幾何音響学近似によるものであり、音響波の波長が大きくなり、音響波が波動性を示す周波数領域では、上述の整流効果が失われる可能性がある。すなわち、散乱体からの指向性のある散乱が失われ、散乱波は円筒波となり、さらに幾何音響近似では現れない回折効果や散乱波間の干渉効果が透過に大きく影響を及ぼしてくる。本研究では、この波動としての振る舞いの影響を調べるため、FDTD 法に基づくコンピュータシミュレーションにより音響波の透過率を解析している。

第四章では、コンピュータシミュレーションに関わる FDTD 法の解説を行い、問題を適切に解くための境界条件について議論している。さらに、周波数依存の透過率の定式化と導出方法についても述べている。

第五章では、シミュレーションを実行するための初期条件に関する考察に始まり、上述した2つのモデルに関する透過率の評価を行っている。その結果、透過率が音波の入射の向きに依存して異なることが見いだされた(整流効果)。この機構は、散乱体の幾何学的異方性による音波の非等方的散乱に起因したものである。波動の回折効果を検証するため、散乱体の形状を変化させた場合における透過率の検証も行い、回折の効果が大きいことを確認した。2列の散乱体の方が、整流効果が良い傾向にあることに鑑み、上記の2つのモデルにさらに散乱体の列数を3および4に増加した系の整流効果を検証している。しかしながら、透過率が著しく低下するため、デバイスとしては不相当と判断している。なお、この整流現象には閾周波数が存在し、その振動数より低振動数の音響波ではこの整流効果は現れない。構造の周期性による散乱波の波数ベクトルの量子化が、その原因であることを明らかにしている。

第六章では、透過係数を用いて整流効率を定義し、整流の能力を定量的に評価している。その結果、散乱体が1列の場合より、2列の方が整流効率の良いことが明らかとなった。しかしながら、整流効率は2列の散乱体間の距離に依存するため、この間隔を変化させながら整流効率の周波数依存性を検証し、整流器として最適の間隔を見いだすことを行った。その結果、2列の散乱体が近接したモデルが最も良い整流効率を示すことを明らかにしている。

第七章では、この研究のまとめと今後の課題について述べている。

本研究は、非対称な散乱体による音響波の散乱への幾何学的な効果を利用した整流機構が有効であることを、数値シミュレーションを用いて明らかにした。本研究の成果は、モード変換を伴う場合の音響波の透過現象の解析の基礎を与え、さらに今後の音響波デバイス開発に大きく寄与するものと期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 西 口 規 彦
副 査 教 授 田 村 信一朗
副 査 教 授 馬 場 直 志
副 査 教 授 ライト B. オリバー

学 位 論 文 題 名

A THEORETICAL STUDY ON ACOUSTIC WAVE RECTIFIERS

(音響波整流器に関する理論研究)

特定の周波数帯域の音波を通すフィルターなどの音響波デバイスはすでに実用化されているが、ダイオードのように音響波を一方だけに通すデバイスは未だに開発されていない。音響波の整流機構は理論・実験の両面から研究されているが、理論によりこれまでに提唱されている整流機構は実現が困難なものである。また、実験的に整流効果が認められるものであっても、その整流作用が著しく小さく、デバイスとしての機能は不十分である。本学位論文は、デバイスへの応用を目指した、音響波の新たな整流機構を提言するものである。

本学位論文は七章からなる。

第一章では研究の背景とともに、研究の目的が述べられている。

本研究では、音響波の波長が原子間距離より著しく長く、固体を弾性連続体と見なせる(長波長近似)場合を考え、音響波を弾性連続体における弾性波として取り扱う。本研究で考察する整流機構は、弾性波の散乱に因るため、第二章では、弾性体の力学、弾性波動およびその散乱における境界条件に関する概要が述べられている。

第三章では、本研究の対象となる音響波整流器のモデルを導入する。音響波が散乱体に衝突したとき、散乱体からの等方的な散乱や、回折現象、散乱波間の干渉効果が現れる。しかしながら、本研究では、波長が著しく短く、波動としての性質を無視できる場合に有効である幾何音響学に基づいて基本的なモデルを構築している。幾何音響学に基づいて導入された系は、幾何学的に非対称な散乱体を一次元に周期的に配置した構造をしている。具体的には、三角柱状の空孔を、等方弾性体中に一列に、かつ周期的に配置した構造である。空孔の軸方向に変位成分を有する横波が散乱体の軸に垂直に入射する場合を考えると、一方からの透過率が1であるのに対し、反対側から入射した場合の透過率が0.5であることが分かる。この構造により、整流効果が認められるが、これをさらに改善する目的で、2列の散乱体からなる構造を考える。なお、2列目の三角形の位置は1列目とは底辺の長さだけずらしている。このモデルについて、幾何音響学に基づいて音響波の透過率を求めると一方が0.5で、他方が0の完全な整流効果が期待できる。

上述の整流効果の結果は幾何音響学近似によるものであり、音響波の波長が大きくなり、音響波

が波動性を示す周波数領域では、上述の整流効果が失われる可能性がある。すなわち、散乱体からの指向性のある散乱が失われ、散乱波は円筒波となり、さらに幾何音響近似では現れない回折効果や散乱波間の干渉効果が透過に大きく影響を及ぼしてくる。本研究では、この波動としての振る舞いの影響を調べるため、FDTD 法に基づくコンピュータシミュレーションにより音響波の透過率を解析している。

第四章では、コンピュータシミュレーションに関わる FDTD 法の解説を行い、問題を適切に解くための境界条件について議論している。さらに、周波数依存の透過率の定式化と導出方法についても述べている。

第五章では、シミュレーションを実行するための初期条件に関する考察に始まり、上述した 2 つのモデルに関する透過率の評価を行っている。その結果、透過率が音波の入射の向きに依存して異なることが見いだされた (整流効果)。この機構は、散乱体の幾何学的異方性による音波の非等方的散乱に起因したものである。波動の回折効果を検証するため、散乱体の形状を変化させた場合における透過率の検証も行い、回折の効果が大きいことを確認した。2 列の散乱体の方が、整流効果が良い傾向にあることに鑑み、上記の 2 つのモデルにさらに散乱体の列数を 3 および 4 に増加した系の整流効果を検証している。しかしながら、透過率が著しく低下するため、デバイスとしては不適当と判断している。なお、この整流現象には閾周波数が存在し、その振動数より低振動数の音響波ではこの整流効果は現れない。構造の周期性による散乱波の波数ベクトルの量子化が、その原因であることを明らかにしている。

第六章では、透過係数を用いて整流効率を定義し、整流の能力を定量的に評価している。その結果、散乱体が 1 列の場合より、2 列の方が整流効率の良いことが明らかとなった。しかしながら、整流効率は 2 列の散乱体間の距離に依存するため、この間隔を変化させながら整流効率の周波数依存性を検証し、整流器として最適の間隔を見いだすことを行った。その結果、2 列の散乱体が近接したモデルが最も良い整流効率を示すことを明らかにしている。

第七章では、この研究のまとめと今後の課題について述べている。

これを要するに、著者は、音響波の整流機構の新知見を得たものであり、応用物理学、特に音響波デバイスの開発に貢献するところ大なるものがある。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。