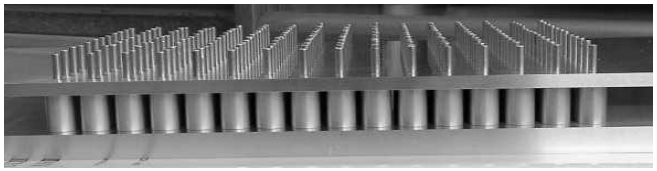
研究概要報告書

研究題目	散乱体の周期配列により形成されるソニック結晶による新しいスラブ型音響導波路ならびに音響回路の開発研究	報告書作成者	宮下 豊勝
研究従事者	宮下 豊勝		
研究目的	これまでに、いずれの方向を向いた平面波も伝搬することのできない周波数帯であるフル･バンドギャップを持つソニック結晶の提案、理論的･数値計算的考察、さらに実験的実現が発表されているが、その応用に関する成果がほとんど無い。その最大の理由は、(1) ソニック結晶で実現される音響バンドギャップ(Acoustic Band-gap: ABG)構造が、透過帯と阻止帯が伝搬方向に大きく依存して、フォトニック結晶で実現されているPhotonic Band-gap(PBG)のようには、単純ではないこと、(2) 2次元ソニック結晶の実サイズが特に一様な軸方向に大きくなり、種々の構造を持たせるには大きすぎ、一方、3次元ソニック結晶は構造的に製作困難であることによる。 本研究で我々が提案し発展させているスラブ型ソニック結晶は、これらの問題点を解決し、音響回路を構成するのに有力なソニック結晶と考えられる。それは、これまでの予備実験において-30dB 以下の深いバンドギャップが実現できていることと、薄型の2次元的構造を持つことから、平面的に音波の波長オーダーの構造で音響導波路を基本とする音響回路を集積的に構成できるからである。 具体的には、(1) スラブ型ソニック結晶を作る散乱体の周期構造に柔軟に音響導波路を構成できる仕掛けを持たせ、その構造において、(2) 十分深く明確な構造を持つフル･バンドギャップが実現できることを実験的に確認し、(3) 基本的な直線導波路のみならず、フォトニック結晶導波路と同様に、急峻な曲がり導波路を製作し、それらのフル･バンドギャップ帯における導波特性の実験的評価、さらに、(4) スラブ型ソニック結晶の中に結合導波路を構成し、導波モード間の結合がマイクロ波の方向性結合器のように達成できることを追求する。最後に、(5) これらの結果から音響回路の構成ができる条件と、これからの研究課題を明確にする。		
研究内容	上記の研究目的の具体的な項目にしたがって研究を進めた。その内容は以下に示す通りである。 (1) 2枚のアルミ板の間に、空気のスラブ層を作り、その間に散乱体の円柱配列を並べる方法として、まず細い(直径3mmの)穴を12mmの格子間隔で12×16点の正方格子点全てに空け、この格子点全てに3mmφのアルミ丸棒を配置した。これを芯として周りに金属カラーを被せることにより、所望の直径の円柱状散乱体を実現する方法を採用した。この方法の考案により、散乱体の直径に関わらず、散乱体の保持構造を替えないで、自由に散乱体の直径を変更できるようになった。望ましいフル･バンドギャップ構造を持つように散乱体の直径を調整するだけでなく、後に述べる導波路構造の調整においても不可欠なものとなっている。		

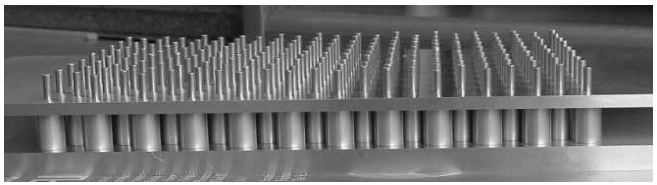
研究内容	(1) ((1 / 4)ページに記載) (2) 2次元ソニック結晶のバンドギャップ構造の数値計算結果(つまり充填率の条件)に合わせて、直径が 10mm の金属カラーを全ての格子点に装着し、正方格子の辺に沿った[100]方向の配置(説明書の図 1.(a))と、正方格子の対角線に沿った[110]方向の配置(説明書の図 1.(b))を作り、それぞれの音響透過率周波数特性を測定した。測定において、通常の研究室環境において 50～60dB の S/N を実現するために、8ms のバースト音波(トーン・バースト)を用い、周りの物体からの反射波を時間的に取り除き、バースト波を用いた場合につきまとう過渡現象が十分完了している時刻の応答波を数周期切り出し、カーブ・フィッティングも用いて、無響室における連続波による周波数特性測定と同様な条件を追求した。その結果得られた、このスラブ型ソニック結晶のバンドギャップ構造は、(説明書の)図1.(c)に示すようであり、散乱体が無い場合の透過波の強度に対して-30dB 以下の透過率が[100]と[110]のいずれの方向においても実現されている周波数領域から、フル・バンドギャップが 14.1kHz～18.7kHz の周波数帯において存在することが分かった。 (3) このスラブ型ソニック結晶に、その2列の散乱体の金属カラーを除去することにより、(説明書の)図 2.(a)に示すような曲がり導波路を形成した。入口と出口のインピーダンス整合を改善するために金属カラーを除去して導波路幅を実効的に傾斜した。また、音波の曲がりをスムーズにするために、その角の金属カラーを外側では追加し、内側では除去した。スラブ型の導波路入口に合った開口が 12mm×80mm の矩形で平面振動するツイータ(Fostex: FT7RP)を用いて音波を注入した。導波路内の音波閉じこめ効果を評価するために、図 2.(a)においてソニック結晶の下部外側に漏れてくる音波も同一の直径が約 10mm で 40kHz まで平坦な特性を持つマイクロホン(Earthworks: QTC-1)で測定した。その結果、図 2.(b)に示すように、フル・バンドギャップの低周波側において漏れ波が小さい領域、中央において導波が特に大きい領域が特徴的に得られた。前者の導波に対する漏れ波の比は-30dB であり、後者のそれは-20dB に止まったが、いずれも少ない放射で導波路に沿ってよく導波されて伝搬をしている。 (4) さらに、金属カラーの装着を適切に調節することにより、結合導波路を(説明書の)図 3.(a)に示すように構成した。2個の導波路から成り、図下側の第一の導波路は左下に導波路幅を傾斜させた入口を持ち、右にカーブしている。それに対して、第二の導波路は入口を持たず、第一の導波路と1列の散乱体で隔てられて平行し右に出口を持つ。つまり、エバネッセント波による結合により前者から後者にモード結合が起こることを期待した構造である。さて第一の導波路に音波をツイータにより注入し、それぞれの導波路の出口から出て来る音波の強さをマイクロホンにより測定した。その結果は、(説明書の)図 3.(b)に示すようであり、スラブ型ソニック結晶のフル・バンドギャップにおいて、両導波路に導波される音波が結合しながら伝搬していることが明確に分かる。特に 15.6kHz～16.8kHz の広い周波数領域において、3dB～4dB の結合導波路を構成していることが実測できた。

研究概要報告書

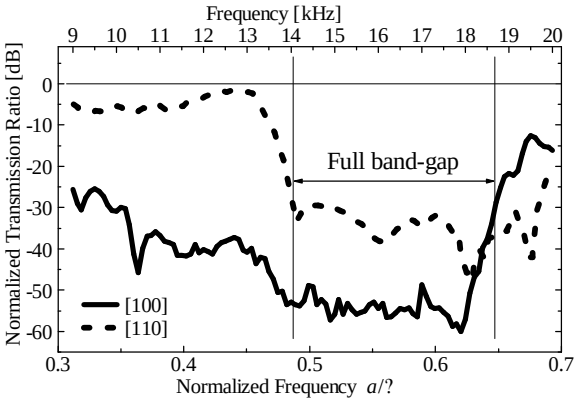
研究のポイント	新しい音響回路の構成部品として適した2次元ソニック結晶と、それから構成される様々な音響回路素子を実現することによって、音響集積回路が可能であることを具体的に示すことがこの研究の内容である。(電子)集積回路と比較して絶対的サイズは大きいが、対象とする波(電子回路では電磁波、この研究対象では音波)の波長を尺度として測るべきであり、ソニック結晶から作られる回路素子大きさは数波長以下であり、電子集積回路の極限的サイズに相当していることに注目しなければならない。したがって研究のポイントは、(1)音響集積回路に適した、薄型のソニック結晶、すなわちソニック結晶スラブを柔軟に構成する、すなわちソニック結晶を構成する散乱体の径を任意に調整できる構造で、完全なバンドギャップ特性を実現すること、(2)最も基本的な回路素子、すなわち音響導波路(電子回路では導線に相当する)を、直線形状のみならず、波長サイズの急峻な曲がりや閉曲線を描く円形・矩形の形状で、柔軟に構成できること、さらに、(3)導波路を用いた基本的音響回路素子である音響方向性結合器が、適切な結合度で構成できることを実験的に示すことである。
研究結果	本研究助成金を用いて、柔軟なソニック結晶スラブの構造を実現し、さらにスラブ構造に適した薄型開口ツゥイータとマイクロホンを購入し、上記の研究ポイントに絞って実験を行った。まず、(1)用いる波長より薄い条件を満たして、15mm 間隙で 2 枚のアルミ板を並べ、その間に外径が 10mm で高さが 15mm の金属カラーを周期的に配置した。ただし、全ての格子点に直径 3mm の金属円柱を設置し、それに種々の外径の金属カラーを刺すことができるように工夫した。この構造においてソニック結晶スラブが、14.1kHz～18.7kHz において、実験的には -30dB より深いフル・バンドギャップを持つことを計測した。(2)次に、急峻な 90 度曲がり導波路を構成し、そのフル・バンドギャップにおける導波と漏れ波のレベルを計測し、0.3kHz～0.5kHz の狭い帯域幅ではあるが、3 ヶ所において 20dB～30dB の導波対漏れ波の比を得た。(3)曲がり導波路に音波を注入し、それと平行する直線導波路への結合を計測し、15.6kHz～16.8kHz の広い帯域にわたって、3dB～4dB の方向性結合器が実現できている結果を得た。これらの実験から音響回路の基本的構成要素の可能性が得られた。
今後の課題	大きなサイズの音響スラブ導波路を作り、これまでに得られた音響導波路スラブを基本回路として、共振器と導波路の結合によるフィルター、導波路の分岐による分波器、さらに結合導波路による分波器等を構成し、音響回路を実現し、その特性を計測して示すことが今後の課題である。



(a) [100] 方向測定用スラブ型ソニック結晶

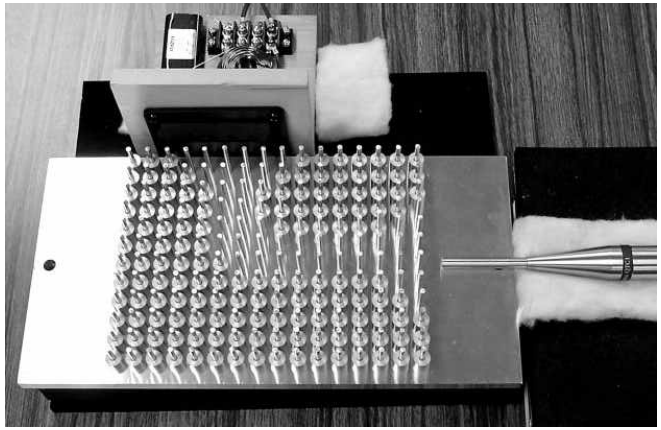


(b) [110] 方向測定用スラブ型ソニック結晶

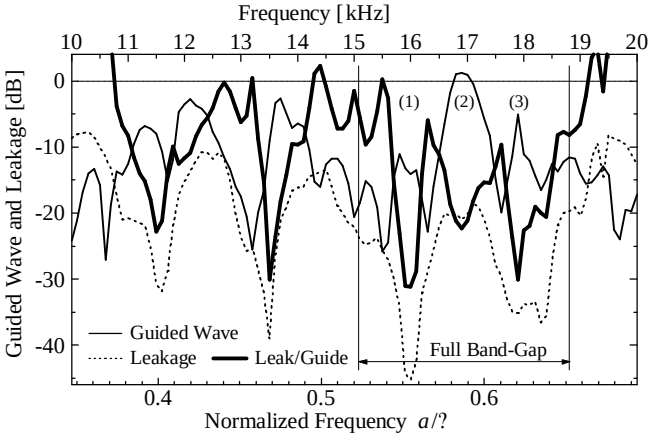


(c) スラブ型ソニック結晶のバンドギャップ特性

図 1. スラブ型導波路の構成とそのバンドギャップ特性

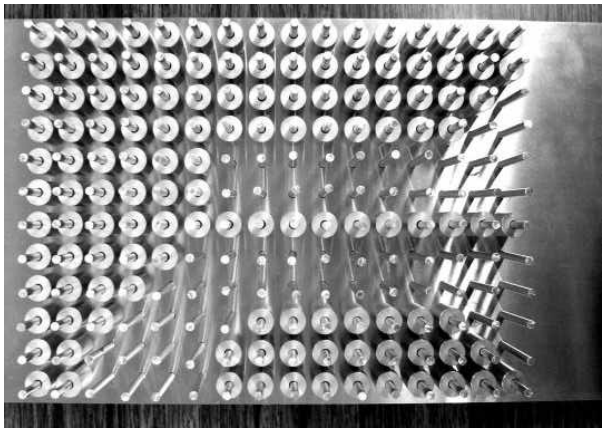


(a) ソニック結晶に構成した急峻な曲がり導波路

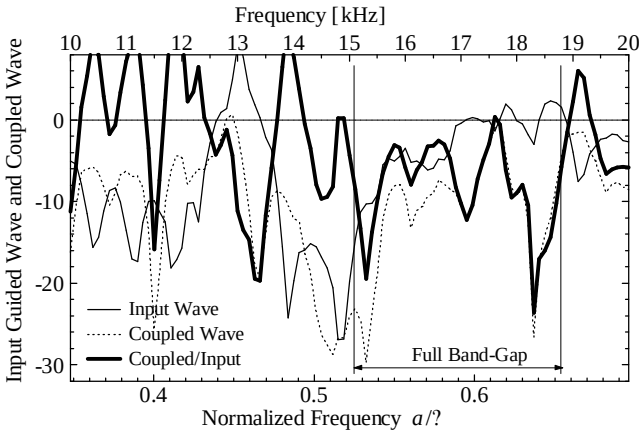


(b) 導波される波と漏れ波の測定結果

図 2. スラブ型導波路内に構成した急峻な曲がり導波路と、その導波特性の測定結果



(a) 結合導波路：下部入力、上部結合波



(b) 入力導波路出力と結合導波路出力の測定結果

図 3. スラブ型ソニック結晶に構成した音響結合導波路とその結合特性の測定結果