



# 音の世界の結晶と 音波の薄型回路の開発

龍谷大学 理工学部 電子情報学科  
教授 工学博士

宮下 豊勝

## 1. 音の世界の結晶「ソニック結晶」とは？

“音の世界の結晶”という表現を初めて聞いたとき、皆さんは何を連想しますか？「結晶」となると、元々自然界で作られるダイヤモンドやルビーのような宝石を頭に浮かべ、「音の世界」と「結晶」に結び付きが無いように思われるかもしれませんが、そこで、自然の結晶はどのような構造を持っている、「音」もその一つである「波」に対して、どのような性質を持っているのか考えてみますと、“音の世界の結晶”という名称に納得すると同時に、この結晶の意義を理解して頂けるとおもいます。まずX線回折による結晶の方位測定に用いられるBragg反射を思い出してみましょう。図1(a)に示しますように、結晶を形成している規則正しい原子配列の1列目からのX線の反射と2列目からのX線の反射は、その経路差がX線の波長の整数倍に等しいと強め合い、

それから外れると弱め合い急激に小さくなります。つまり波と強く関わる「結晶」とは、反射体が波の半波長程度の間隔で規則正しく並んだモノということができます。そこで、光の波長で、マイクロ波の波長で、超音波の波長で、または音波の波長で、例えば図1(b)に示すように人工的に、それらの波を反射（一般的に散乱）する物体を周期的に並べますと、それぞれの波にとって立派な「結晶」となるという訳です。これらを、「自然（の）結晶」に対して、総称的に「人工（の）結晶」とも、また光やマイクロ波、つまり電磁波に関わる「フォトニック結晶」、音波・超音波に関わる「ソニック結晶」、さらに固体中の弾性波に関わる「フォノン結晶」と、個別の名称を付けて呼ばれています。すこし脇道に逸れますが、モルフォチョウの展示を見たことがありますか？見る方向によって、この蝶の羽の強い反射色が虹色に変わるのでありますが、この羽の微細構

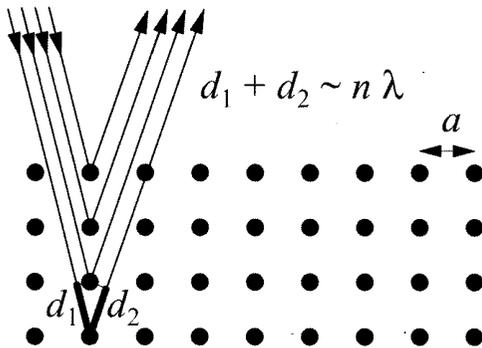


図1(a) Bragg反射

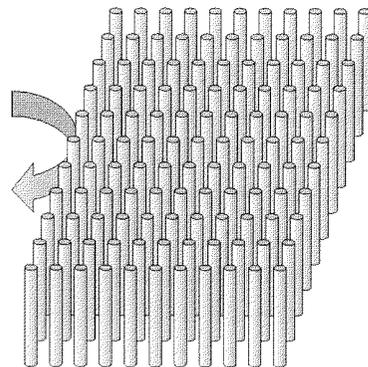


図1(b) 人工結晶

造は、まさにフォトニック結晶になっています。

さて、これらの人工結晶は、次に比較しますように、自然結晶よりずっと興味深い性質を持っています。

#### 自然結晶：

- ・原子または格子の配列の数は、1 mm立方の結晶一辺で $10^6$ 個のオーダーであり、事実上無限に大きい周期配列である。
- ・Bragg反射する波長帯（または周波数帯）であるバンドギャップ幅は狭く、入射方向によってX線が強め合って反射する周波数が異なり、自然結晶においてはバンドギャップの重なりは無い。
- ・干渉は起こるが、反射波や透過波は幾何光学的に伝搬すると考えることができる。

#### 人工結晶：

- ・散乱体または格子の一辺の配列数は基本的には10~20個程度である。
- ・入射方向が変わっても、つまり異なる結晶面に向かって波が入射しても、それらが強く散乱される周波数帯（バンドギャップ）に共通する領域（それをフル・バンドギャップと呼ぶ）が存在し得る。
- ・異なる屈折率をもつ2つの物体が一様な境界で接する場合の全反射の現象とは、反射率が100%であること、さらにエバネッセント波を伴うことは同じであるが、フル・バンドギャップにおいては入射角依存性が無いという特徴を持つ。

つまり、図1 (b)に示しますように正方格子を成して並んだ周期構造の左正面（[100]方向）に垂直に音の平面波を入射した場合でも、また対角線（[110]）方向に入射した場合でも、共に100%散乱される周波数帯（フル・バンドギャップ）が存在する条件：その一つはホスト媒質と散乱体の音に関する物質パラメータの組み合わせ、二つ目は構造パラメータ、すなわち結晶格子の種類（正方格子、三角格子、蜂の巣状格子…）と格子間隔( $a$ )に対する散乱体の半径( $r$ )が、我々の研究も含めて、見付けられています。

このような基礎の上に、ソニック結晶を具体的に実現し、それを用いて音響導波路を製作し、その特性を評価しました。さらに、これをコンパクトな薄型にして、機能性のある薄型音響回路の可能性を追求したのが、本研究のテーマです。

## 2. ソニック結晶の実現

とにかく、アクリル樹脂丸棒を空気中に並べて図1 (b)のような構造を作り、ソニック結晶を実現しました。キーポイントは、計算機シミュレーションによっても確かめましたが、基本格子の面積( $a^2$ )に占める散乱体の断面積( $\pi r^2$ )の割合である充填率を十分大きく0.5以上にすることと、音波の波面を結晶に真っ直ぐ向いている平面波に限ることも含めて、使用波長の波にとって2次元構造になるように工夫することでした。長さが30cmで、半径が10.2mmのアクリル樹

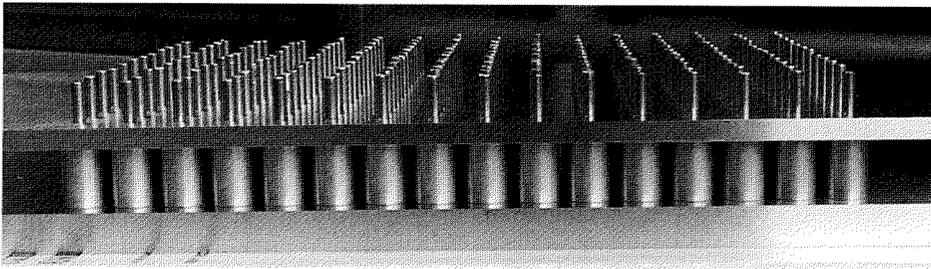


図2 薄型スラブ構造ソニック結晶

脂丸棒を格子間隔24.0mmで、 $10 \times 11$ 個並べて作ったソニック結晶は、7.0kHz～9.5kHzにフル・バンドギャップを持つことを実測しました。このソニック結晶の充填率は0.567です。

このソニック結晶に音の導波路を形成し、その基本特性の測定も行いましたが、3次元空間に長い棒を並べて実現した2次元構造は、さらに複雑な構造を作り機能的にするには不都合であることは明らかでした。そこで、次に述べるように薄型スラブ構造を考案しました。

### 3. スラブ型ソニック結晶への発展

使用する音波の波長より狭い間隔で2枚のアルミニウム金属板を平行に配置して作ったスラブ型音響導波路内に、アルミニウム金属円柱の周期配列を作りました。その一つを図2に示します。このソニック結晶には、さらに散乱体を直線または曲線に沿って取り除くことにより音響導波路を形成し、しかも散乱体の半径を調節することができる工夫を凝らしてあります。結晶格子には直径3.0mmの細いアルミ棒が常に在り、その周りに外径の異なる金属カラーを付けることができます。つまり、格子間隔が12.0mmであるのに対して、散乱体の半径を任意に1.5mmから6.0mmまで自由に変えた構造を作ることができます。この工夫は、次に述べる音響導波路のインピーダンス整合と結合導波路の形成において重要になります。図2に示す構造において、15.1kHz～18.8kHzの周波数帯においてフル・バンドギャッ

プが存在することを実測しました。この周波数は、先に述べたアクリル樹脂丸棒を並べて作った2次元ソニック結晶のフル・バンドギャップの約2倍になっています。これは、人工結晶の格子間隔を $1/2$ にすると対応する波の波長も $1/2$ になるというスケーリング則が当てはまっていることを示しており、このスラブ型ソニック結晶が2次元ソニック結晶と同様の性質を持つことを期待させます。

### 4. 音響導波路・結合導波路の実現

さて、この研究の最も大きな成果である波長程度の急峻な曲がりを含む音響導波路を、図3(a)に示します。この写真は、スラブ型導波路を形成している2枚のアルミニウム板の内、上側の板を外して内部構造を見せています。金属カラーを2列幅で取り去ることにより、急峻な曲がりをもつ音響導波路を形成し、さらに入口と出口を広げ、インピーダンス整合をより良くすることにより、音波の出入りにおける反射を低減しています。周波数を10kHz～20kHzにわたり変化させながら、矩形開口ツイータから平面波面をもつ音波を上部入口から導波路内に注入し、右側の導波路出口まで導波された音波の振幅を、直径が5.5mmの開口をもつマイクロフォンで計測しました。同時に結晶下部に漏れ出る音波の振幅も測定しました。音波伝搬の様子を実際に見ることはできませんが、この研究における理論解析の有力な手段として開発しました、有限差分時間領

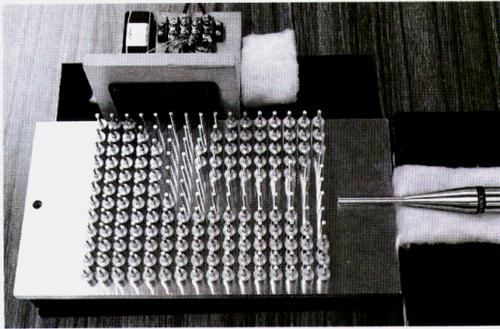


図 3 (a) 急峻な曲がりを持つ音響導波路

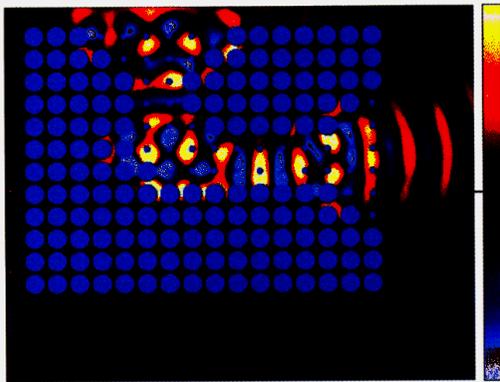


図 3 (b) 急峻な曲がり導波路を伝搬する音波 (FDTD法によるシミュレーション)

域 (FDTD) 法による波動伝搬シミュレーション計算で得られた音圧分布の例を図 3 (b) に示します。周波数が 17.3kHz の場合です。右端のカラーバーに示しますように、赤系統の色が正、青系統の色が負の音圧値を、それぞれ示しています。急峻な曲がりにおいても、音波が導波路内によく閉じ込められ、導波された音波が右出口から自由空間に出ていく様子がよく分かります。我々の理論的研究においては、場の分布を計算の進行と同時に常時表示し、波動伝搬の時間的推移の考察ができるようにしています。この導波される割合と同時に、曲がりを超えて結晶下方に漏れた音波の振幅を実測し、得られた伝搬特性を図 3 (c) に示します。フル・バンドギャップ内に注目しているのですが、特に、17kHz 付

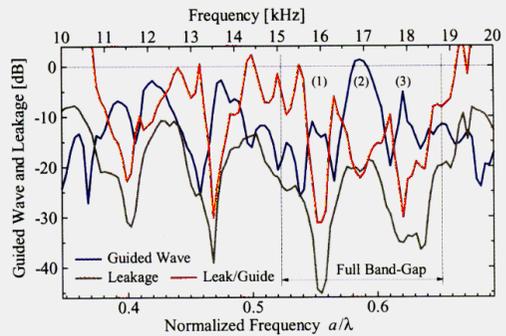


図 3 (c) 実測された導波特性

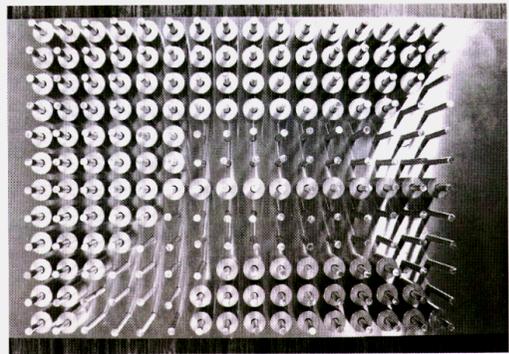


図 4 音響結合導波路

近を中心とする (2) とグラフ中に記している周波数領域において、導波された波の振幅は周期構造が無いスラブ導波路の場合とほぼ同じレベル、すなわち 0 dB になっており、一方、漏れ波の振幅は -22dB の値になっていることが読み取れます。

結合導波路を図 4 に示しますようにソニック結晶中に形成しました。左下の入口から一つ目の導波路に音波を注入し、右前方に曲がりながら伝搬させ自由空間に出します。一方、その導波路に沿って、左側が閉じた二つ目の導波路を形成し、一つ目の導波路を伝搬する音波と結合して成長しながら右出口に向かって伝搬する音波に注目しました。実測結果は、フル・バンドギャップ内の 15.6kHz~16.8kHz にわたって一様に、-3~-4 dB の結合係数を示しました。

すなわち、立派な方向性結合器を実現することができました。

## 5. 音響回路への発展

スラブ型音響結合導波路に至るまで、フレキシブルに構成できるソニック結晶を実現することができましたので、この成果を用いて、図5に示すような結合導波路または方向性結合器による音波の分岐や、リング共振器との組み合わせによる音波のフィルター等の基本回路を導波路で結合した音響回路を構成することができる展望が開けました。その研究成果を近未来に発表する予定です。

## 6. 結びと将来展望

ソニック結晶を薄いスラブ型にすると同時に、散乱体の大きさを自由に変化させながら、フレキシブルに導波路さらに結合導波路を構成できる仕組みを考案し、その基本特性を実験的に実証することができました。このことから、新しく提案したスラブ型ソニック結晶が音響集積回路としての将来性をもつことも明確になりました。

音のみでなく、広い周波数範囲にわたる超音波への発展の可能性が、「波は世界の大きさを、その波長を単位として測る」という性質そのも

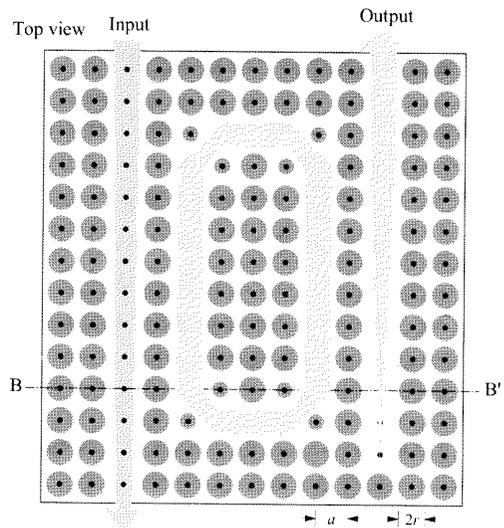


図5 音響回路の例

のでもあるスケーリング則により保証されています。さらに、この性質を用いて、製作も実験も容易である波動と周波数を用いて基本的な特性を検討した後に、最終的な条件で人工結晶を製作することができます。

これらの成果は、2004年8月にモンリオールで開催された2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 50th Anniversary Conference において、詳しく発表しました。