

# 振動透過抑制可能な複合材ラティス構造

Composite Lattice Structure for suppression of vibration transmission

船場 海斗<sup>1</sup>, 水上 孝一<sup>1</sup>, 古賀 洋一郎<sup>2</sup>

Kaito FUNABA<sup>1</sup>, Koichi MIZUKAMI<sup>1</sup>, Yoichiro KOGA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>愛媛大学, <sup>2</sup>3D Printing Corporation

<sup>1</sup>Ehime University, <sup>2</sup>3D Printing Corporation

## 【要約】

本研究は、振動抑制が可能なメタマテリアルの材料に連続炭素繊維を使用し、その繊維量が構造の比剛性と振動特性に与える影響を調査したものである。振動抑制を実現するために、反共振を利用した Inertial Amplification というバンドギャップ生成のメカニズムを使用した。連続炭素繊維の量を適切に選択することにより、高い比剛性と広いバンドギャップ幅の両立が可能である。また、材料に炭素繊維の短繊維を含有するナイロンを使用したときに比べ炭素連続繊維を使用することで、比剛性、バンドギャップ幅ともに向上した。

キーワード:メタマテリアル, 炭素繊維, 振動減衰, バンドギャップ, 3D プリンティング

## 【Abstract】

In this study, we made a metamaterial that can suppress vibration transmission with continuous carbon fiber, and the effect of the amount of fiber on the specific stiffness and vibration characteristics of the structure was investigated. In order to realize vibration transmission suppression, we used a bandgap generation system called Inertial Amplification that uses antiresonance. By appropriately selecting the amount of continuous carbon fibers, it is possible to achieve both high specific stiffness and a wide bandgap. Furthermore, the specific stiffness and bandgap width were improved by using continuous carbon fiber compared to when nylon containing short carbon fiber was used as the material.

Keywords:metamaterial, carbon fiber, vibration attenuation, bandgap, 3D printing

## 1. 序論

振動抑制が可能な音響メタマテリアルで、代表的なメカニズムに Bragg 反射と局所共振がある。同じサイズで比較すると、Bragg 反射はバンドギャップの周波数帯は高いが幅が広く、局所共振はバンドギャップの周波数帯は低い幅が狭いという特徴を持っている。機械振動を抑制したいと考えた場合、低周波に幅広いバンドギャップが要求され、この代表的な 2 つのメカニズムでは困難である。また構造材として使う場合、剛性と軽量性も要求される。

近年、低周波に幅広い周波数帯のバンドギャップを達成するために、反共振を利用した Inertial Amplification(IA)というメカニズムが模索されている。従来、低周波の振動を抑制するには質量を大きくする必要があったが、IA では小さな質量でも低周波で幅広い周波数帯の振動抑制が可能である。この構造を炭素繊維強化プラスチック(CFRP)で印刷し、CFRP が比剛性と振動抑制機能にどのような影響を与えるか調査した。

## 2. 剛性解析

有限要素法ソフトウェア ANSYS を使用して解析を行った。剛性解析の目的は、炭素繊維(CF)の幅を変えたときの構造の剛性を取得し、比剛性を算出することで、その構造の性能を評価することである。

図 2.1 に解析モデルを示す。IA のメカニズムを三角

形の各辺に組み込んだ三角形を 2×5 で配置したものである。色によって異なる物性値を定義し、本解析では Onyx と一方向 CFRP を定義した。Onyx とは短繊維の炭素繊維が含有されたナイロンのことであり、Onyx はプリント経路が一方向に揃っている場合と、直交して積層されている場合で、材料物性が異なるため、一方向 Onyx と直交積層 Onyx を使い分ける必要がある。また、CFRP はプリント経路が一方向のときの物性値を定義した。

CF を入れることによる剛性の影響を調べるため、CF と Onyx の 2 種を構成材料とした場合と、Onyx のみを構成材料とした場合の 2 つのモデルで解析を行った。図 2.2 にプリント経路を示す。構成材料を CF と Onyx の 2 種とした場合は、赤色、水色、紫色のエリアにはそれぞれ一方向 CFRP、一方向 Onyx、直交積層 Onyx の物性値を定義した。

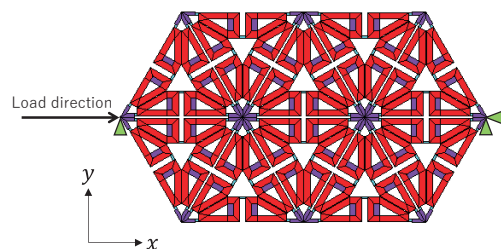


図 2.1. 剛性解析モデル.

図 2.3 に解析モデル生成時に用いた変数を示し、それらの変数の値を表 2.1 に示す。式(2.1)~(2.4)に示すように、 $l_t$ は三角形の一辺の長さを表しており、 $t_a$ ,  $t_b$ ,  $t_c$ はモデルの形状を決める変数である。

$$l_t = 2(l_1 + l_2 + l_3) + l_4 \quad (2.1)$$

$$t_a = b \tan 30^\circ \quad (2.2)$$

$$t_b = (l_3 - l_5) \tan 30^\circ \quad (2.3)$$

$$t_c = b / \cos 30^\circ \quad (2.4)$$

荷重を与えるとき、モデルが回転するのを防ぐために変位についての境界条件を定義した。図 2.1 の右側に緑色の三角形が 2 つあるが、これは  $x$ ,  $y$  方向の変位をそれぞれ 0 にしていることを意味している。左側は  $y$  方向の変位のみ 0 にした。また、荷重は左側から 1000 N を与え、荷重を与えた節点の変位から剛性を算出した。

比剛性は、式(2.5)に示すように剛性  $K$  を質量  $M$  で除した値とする。

$$(\text{Specific stiffness}) = K/M \quad (2.5)$$

剛性が高く、質量が小さいほど比剛性の値は大きくなり、性能が良いことを意味する。

図 2.4 と図 2.5 に  $b$  の幅を変えたときの剛性と比剛性を示す。図 2.4 をみると、ある一定の幅から剛性に影響を与えないことがわかった。これは  $b$  が 2 mm を超えると、CF を剛体と見なせるためだと考えられる。図 2.5 では、比剛性にピークが見られる。 $b$  を太くすると剛性は高くなるが、それだけ質量も増加する。比剛性のピークを越えると、剛性は変わらず質量のみが増加するため、比剛性は減少する。よってこの形状では、比剛性を高めるためには、最適な  $b$  の幅が存在し、その最適な  $b$  で CF を使用することで、Onyx のみと比べて比剛性は 1.5 倍に向上する。

### 3. 固有振動数解析

剛性解析同様、CF の幅を変えて解析を行った。固有振動数解析の目的は、 $x$ ,  $y$  方向に伝播する弾性波の分散曲線を取得することである。

図 3.1 に解析モデルの全体図を示す。解析モデルの変数および寸法は図 2.3, 表 2.1 と同じものを定義した。 $x$ ,  $y$  方向に伝播する弾性波の分散曲線を取得するため、図 3.2 に示すように、赤線、青線それぞれ向かい合う端面に対して式(3.1), 式(3.2)の Bloch 周期境界条件を適用した。

$$U(x, y) = U(x + l_t, y) e^{ik \cdot a} \quad (3.1)$$

$$U(x, y) = U(x + l_t/2, y + \sqrt{3}l_t/2) e^{ik \cdot a} \quad (3.2)$$

ここで、 $\mathbf{k}$  は波数ベクトル、 $\mathbf{a}$  は周期ベクトルである。式(3.1), 式(3.2)は複素数が含まれており、ANSYS で変位の実数部と虚数部を考慮するために、オーバーラッピングメッシュ法<sup>[2]</sup>を使用した。

本解析は 2 次元解析であるため、波数ベクトルは  $x$ ,  $y$  平面内に限定される。また、ユニットセルの対称性から、図 3.3 に示す第一ブリルアンゾーンの  $\Gamma - K - M$  の範囲内の波数ベクトルのみを考慮すれば十分である。 $\Gamma - K - M$  に沿った波数ベクトルについて固有振動数を取

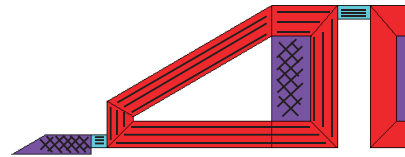


図 2.2. 一方向 CFRP と Onyx のプリント経路

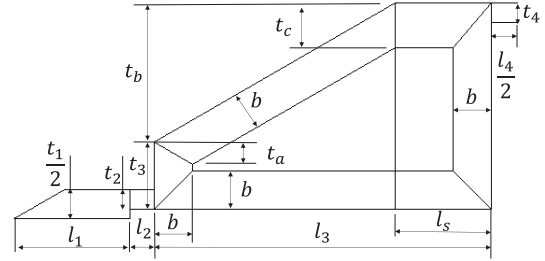


図 2.3. 剛性解析モデルの設計変数。

表 2.1. 剛性解析モデルの変数の値

|            |      |
|------------|------|
| $b$ [mm]   | 2.8  |
| $t_1$ [mm] | 4.2  |
| $l_1$ [mm] | 8.4  |
| $t_2$ [mm] | 1.4  |
| $l_2$ [mm] | 1.75 |
| $t_3$ [mm] | 4.9  |
| $l_3$ [mm] | 24.5 |
| $t_4$ [mm] | 1.4  |
| $l_4$ [mm] | 3.5  |
| $l_5$ [mm] | 7    |

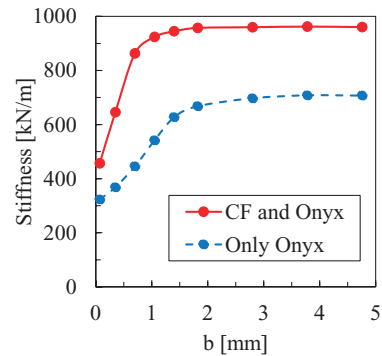


図 2.4.  $b$  の幅と構造剛性の関係。

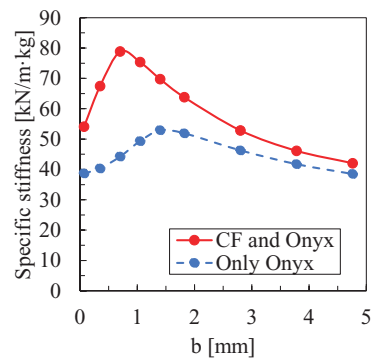


図 2.5.  $b$  の幅と構造比剛性の関係。

得し、波数とそれに対応する固有振動数をグラフにプロットすることにより、分散曲線を取得した。

図 3.4(a)に構成材料を CF と Onyx としたときの分散曲線を示し、図 3.4(b)に構成材料を Onyx のみとしたときの分散曲線を示す。一番低い周波数のバンドギャップに注目するため、以降バンドギャップは一番低周波にあるバンドギャップを指す。図 3.5 に  $b$  の幅を変えたときの、バンドギャップ上限・下限の周波数  $f_{top}$ ,  $f_{bot}$  を示す。構成材料が CF と Onyx の場合、 $b$  が 0.7 mm 付近までは  $b$  の幅が大きくなるにつれて、 $f_{top}$ ,  $f_{bot}$  ともに増加し、バンドギャップの幅も広がっている。しかし、 $b$  は 0.7 mm 以上になると  $f_{top}$ ,  $f_{bot}$  およびバンドギャップの幅は少しずつ現象しており、 $b$  の幅はバンドギャップの幅にも影響を与えている。構成材料が Onyx のみの場合も、弾性率が大きく異なるため、 $f_{top}$  のピークの位置に差異が見られるが、曲線としては同じ挙動を示している。

バンドギャップの性能を評価するために、バンドギャップの相対的な広さ BGW [%] を式(3.3)で定義する。

$$BGW [\%] = \frac{f_{top} - f_{bot}}{(f_{top} + f_{bot})/2} \times 100 \quad (3.3)$$

BGW はバンドギャップの幅を、バンドギャップの中心周波数で割った値となっている。バンドギャップの幅が大きく、中心周波数が低いほど大きな値となり、性能が良

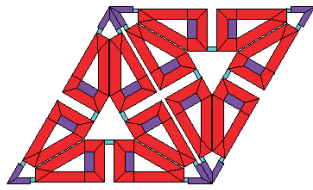


図 3.1. 固有振動数解析モデル。

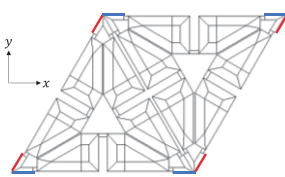


図 3.2. 周期境界条件。

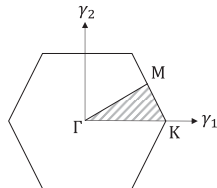
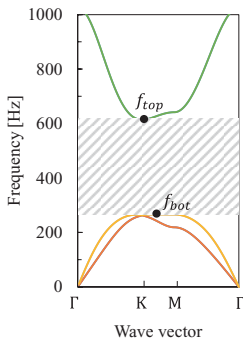
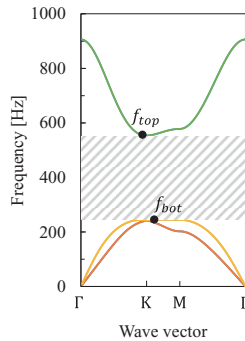


図 3.3. ブリルアンゾーン。



(a) CF and Onyx.



(b) Only Onyx.

図 3.4. 分散曲線 (a)構成材料を CF と Onyx にしたとき。  
(b) 構成材料を Onyx のみにしたとき。

いことを意味する。図 3.6 に  $b$  の幅を変えたときの BGW 値を示す。構成材料が CF と Onyx では、 $b$  が 0.7 mm のとき、BGW は 85.5 % で最大となり Onyx と比べて 1.5 倍に向上している。また、 $b$  が 2 mm を超えると BGW はほぼ収束する。構成材料が Onyx のみのとき BGW にピークは見られないが、 $b$  が 2 mm を超えると BGW はほぼ収束している。これは BGW を変えずに軽量化できることを意味する。

#### 4. 周波数応答解析

周波数応答解析の目的は、バンドギャップと同じ位置で振動減衰が起きているかを確認することである。

図 4.1 に解析モデルを示す。剛性解析のモデルと寸法は同じである。解析モデル左端部を  $x$  軸、 $y$  軸方向にそれぞれ  $10^{-6}$  mm 変位させ、右端部で変位を取得し伝達率を計算した。伝達率は式(4.1)で定義した。

$$(\text{Transmissibility}) = 20 \log_{10} \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (4.1)$$

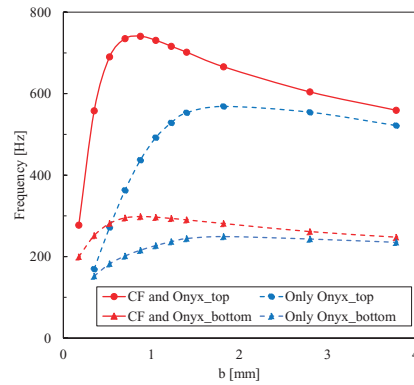


図 3.5.  $b$  の幅とバンドギャップ周波数の関係。

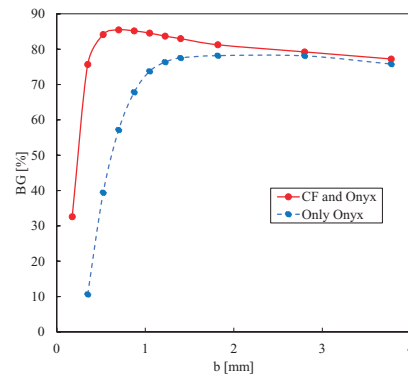


図 3.6.  $b$  の幅と BGW の関係。

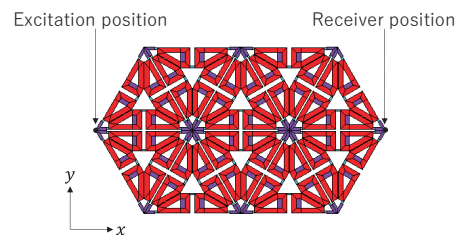


図 4.1. 周波数応答解析モデル。

ここで、 $U_{in}$ は左端部の入力変位、 $U_{out}$ は右端部の変位である。また、 $x$ 軸方向加振の場合は右端部の $y$ 方向変位を0とし、 $y$ 軸方向加振の場合は右端部の $x$ 方向変位を0とした。

図 4.2, 図 4.3 に、2 つの構成材料パターンの振動透過挙動を示す。材料を変えても、振動減衰できる周波数帯は変わらない。また、分散曲線から得られたバンドギャップの周波数帯と一致している。

## 5. 振動特性実験

$b$ が2.8 mmと3.78 mmの試験体を複合材 3D プリント Mark Two(Markforged)で CF を入れて印刷し、振動特性について実験を行った。図 5.1 に 3D プリントで作製した、 $b$ が2.8 mmの試験体を示す。加振面を確保するために、端面にコの字型のブロックを印刷した。

試験体のコの字型ブロック部にワックスを塗り、加速度センサを接着した。また、加振器と試験体は糸で吊り、地面やジグに振動が伝わりにくいようにした。

図 5.2 に実験結果を示す。振動減衰が確認できた周波数帯は、 $b$ を変えてもほぼ同じであった。この結果は固有振動数解析より得られた結果と一致している。しかし、バンドギャップと振動減衰が確認された周波数帯は異なっており、原因として樹脂の吸水やフィラメント付近での空隙により、解析で用いた弾性率が実物と異な

っている可能性が考えられる。

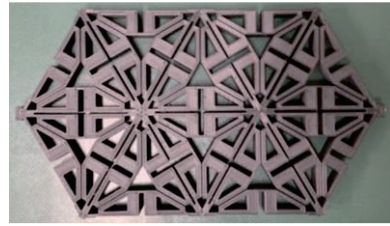


図 5.1. CF を使用して作製した試験体。

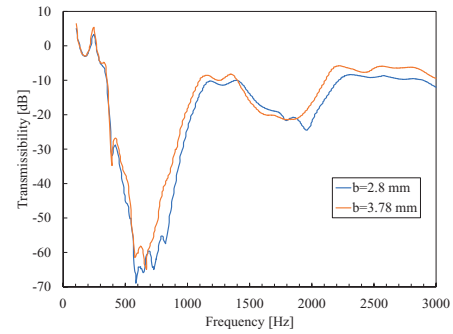


図 5.2. 振動特性実験の結果。

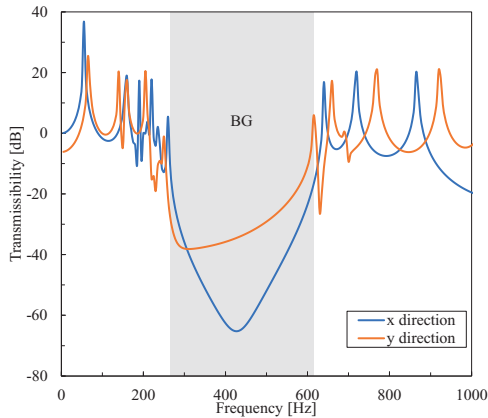


図 4.2. 構成材料を CF と Onyx にしたときの周波数応答。

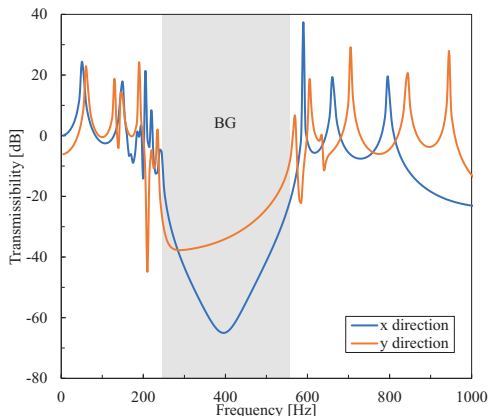


図 4.3. 構成材料を Onyx のみにしたときの周波数応答。

## 6. 結論

今回のモデルでは、比剛性が最大となる $b$ の寸法が存在し、CF を入れたモデルの比剛性は、Onyx のみに比べ、1.5 倍に向上する。固有振動数解析では BGW という式を定義して、バンドギャップの評価を行ったが、剛性解析同様、BGW が最大となる $b$ の寸法が存在する。また、CF を使うことで、 $b$ の幅を小さくできるためさらなる軽量化ができ、高いBGWも得ることができる。周波数応答解析では振動透過挙動が、分散曲線から得られたバンドギャップと一致していることを確認した。

振動特性実験では、 $b$ の幅が異なる2つの試験体で実験を行い、CF を入れたモデルでも振動減衰が可能であることがわかった。

## 参考文献

1. S. Taniker, C. Yilmaz, “Design analysis and experimental investigation of three-dimensional structures with inertial amplification induced vibration stop bands”, International Journal of Solids and Structures, (2015), pp.1–10
2. M. Aberg and P. Gudmundson, “The usage of standard finite element codes for computation of dispersion relations in materials with periodic microstructure”, Acoustical Society of America, vol. 109, 221907(2016), pp.1–4