

令和 4 年度（2022 年度） 修士論文

# 超小型衛星の一次構造による振動環境緩和 手法の提案

Research on Mitigating Vibration Environment with Satellite's Primary Structures

東京都立大学大学院

システムデザイン研究科 システムデザイン専攻

航空宇宙システム工学域 博士前期課程

学修番号 21863623

氏名 白井 健太郎

指導教員 佐原 宏典 教授

令和 5 年（2023 年）1 月 27 日



# 摘要

超小型衛星はロケットでの打上時および、振動試験において過酷な振動環境に晒される。主に人工衛星のロードパスとなる一次構造は、強度と剛性を確保しつつ 軽量化と低価格を同時に得るために、アルミ製のハニカムサンドイッチパネル(以下、ハニカムパネル)を採用している。故に衛星構体が高い比剛性を有するため、振動が減衰されることなくロケットインタフェースを介して衛星内部へ伝搬し、搭載機器などに致命的な損傷を与える。これに耐えうるために、超小型衛星の特徴である低価格で短期間での開発が可能であるという利点を大きく阻害している。これに対して過去の衛星ではボルト締結部にポリイミドテープの接着層の粘弾性由来の振動のエネルギーを熱エネルギーに変換することによる振動減衰特性によって振動応答の低減の効果を得た。しかしながらこの対策では、特定の搭載機器や共振点の振動衝撃抑制に限られており、搭載機器ごと及び共振点ごとの個々の繊細な調整が必要となってしまう。他にも重厚な構造部材や振動を抑制する吸振器・減衰器を適用するなど重量や容積といった貴重な搭載リソースを消費してしまい、設計自由度を低減させてしまう。それに対し本研究では、シミュレーションや実験において提案手法の振動減衰特性を取得し、搭載リソースを消費することなく、幅広い周波数帯において振動減衰効果を有する新たなハニカムパネル構造の有効性を明らかにすることを目的とした。そこで柔軟な粘弾性材料を用いたハニカムパネルを提案し振動減衰特性を確認し、有効性の確認を行った。柔軟な粘弾性材料は内部摩擦などにより運動エネルギーが熱エネルギーに変換され、応力-ひずみ線図において応力の負荷時と除荷時でひずみ経路が異なり、エネルギー散逸が発生する。これらの原理より、変形しやすい柔軟な粘弾性材料をダンパとしてハニカムパネルに適用する。

一般的にハニカムパネルは、高剛性のエポキシ接着剤を塗布した薄板(スキン材)でハニカムコアを挟み込むように構成されている。ボルト締結部には集中荷重によるコア材の破損を防ぐため、アルミ製のブロックを用いる。本研究では従来ハニカムパネルの構成に対して接着剤をそれぞれ柔軟な粘弾性材料に置き換える。またシミュレーションと実験によって従来のハニカムパネルと減衰特性を比較し有効性を評価した。まず従来の高剛性の接着剤を柔軟な粘弾性材料に置き換えたものについて記す。弾性エポキシ接着剤および、従来のものより柔らかい中間的な硬さのエポキシ接着剤を、それぞれ使用した粘弾性接着剤ハニカムパネルの製作を行った。シミュレーションはハニカムパネルをモデリングする際、ハニカムコアのセルを再現すると計算コストが非常に大きいため、中実の板材としてモデリングを行い、Gibson's Equation を用いた等価板厚法を用いて計算コストを削減したうえで行った。解析条件は8箇所ボルト締結部の円周を固定とし、固定-自由端とした片持ち板のモーダル解析および自由端の応答倍率を取得する周波数応答解析にて結果の予測を行った。振動試験では解析と同様の拘束条件で治具に取り付け、自由端から 3mm の点を加速度の観測点としてデータを取得し、周波数範囲は 20~2000Hz、掃引速度 2oct/min、加振加速度 0.5G 定レベル(治具上で制御)で振動試験を行い、結果として応答倍率-周波数[Hz]の共振曲線を示した。従来の高剛性エポキシ接着剤を使用したハニカムパネルの結果と比較すると柔軟なシリコン系接着剤を使用したハニカムパネルは全周波数において、減衰効果を確認できた。本研究では、柔軟な粘弾性材料をダンパとして用いたハニカムパネルにおいてシミュレータと実験によって振動減衰効果を確認することができた。また弾性エポキシ接着剤を使用したハニカムパネルにおいては広範囲の周波数帯において減衰効果の確認ができ従来手法よりも有効であることを明らかにした。



# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 打上時の振動環境と対策 .....	1
1.2 研究目的 .....	4
1.3 粘弾性接着剤ハニカムパネル .....	5
<b>第 2 章 評価手法</b>	<b>6</b>
2.1 動解析シミュレータ .....	6
2.1.1 モード解析 .....	6
2.1.2 周波数応答解析 .....	10
2.2 ハーフパワー法を用いた減衰比の推定 .....	10
2.3 ハニカムパネルの等価板厚法 .....	11
<b>第 3 章 粘弾性接着剤ハニカムパネル</b>	<b>13</b>
3.1 ハニカムパネルの製作方法 .....	13
3.1.1 表面処理 .....	13
3.1.2 接着 .....	13
3.1.3 ハニカムパネルの成形 .....	14
3.2 ハニカムパネルの設計 .....	15
3.3 構造解析シミュレーション .....	17
3.3.1 解析目的 .....	17
3.3.2 モデルの構成 .....	18
3.3.3 物性値 .....	19
3.3.4 解析条件 .....	22
3.3.5 メッシュ .....	23
3.3.6 モーダル解析の結果 .....	24
3.3.7 周波数応答解析の結果 .....	33
3.4 振動試験 .....	34
3.4.1 実験目的 .....	34
3.4.2 実験方法 .....	34
3.4.3 振動試験の結果と考察 .....	39
<b>第 4 章 結論</b>	<b>43</b>
4.1 結論 .....	43
4.2 今後の課題 .....	43
<b>参考文献</b>	<b>44</b>
<b>付録</b>	<b>47</b>

# 図目次

図 1-1	打上時の音響発生 <sup>2)</sup> .....	1
図 1-2	環境試験における衛星の不具合 <sup>3)</sup> .....	2
図 1-3	ランダム振動条件.....	2
図 1-4	ひてんの振動低減対策 <sup>5)</sup> .....	2
図 1-5	SOHLA-1 の振動低減対策 <sup>6)</sup> .....	2
図 1-6	ダブルロッド型 PLA パネル <sup>8)</sup> .....	3
図 1-7	ピストン型 PLA パネル <sup>8)</sup> .....	3
図 1-8	アルミハニカムパネル超小型衛星構体 <sup>10)</sup> .....	4
図 2-1	ハニカムパネルの構成および振動減衰手法.....	5
図 2-2	粘弾性接着剤ハニカムパネル.....	5
図 3-1	ハーフパワー法による減衰比の推定 <sup>16)</sup> .....	10
図 3-2	ハニカムコアの等価板厚法の概要 <sup>19)</sup> .....	11
図 3-3	ハニカムコアのセル.....	11
図 4-1	凹凸の溝が調整されたヘラ <sup>20)</sup> .....	13
図 4-2	ハニカムパネルの接着.....	13
図 4-3	接着後のハニカムパネル.....	14
図 4-4	完成したハニカムパネル.....	14
図 4-5	ハニカムパネルの設計.....	15
図 4-6	ボルト締結用ブロックの設計.....	15
図 4-7	接着剤の塗布部.....	16
図 4-8	ヘラの溝部寸法.....	16
図 4-9	ハニカムパネルモデル（接着剤無）.....	18
図 4-10	ハニカムパネル（接着剤有）.....	18
図 4-11	接着剤の試験片.....	20
図 4-12	引張試験機.....	20
図 4-13	ひずみゲージ.....	20
図 4-14	制振鋼板 <sup>29)</sup> .....	21
図 4-15	ハニカムパネルの固定部.....	22
図 4-16	メッシング.....	23
図 4-17	接着剤無の 1 次モード（130.7 Hz）.....	24
図 4-18	接着剤無の 2 次モード（447.6 Hz）.....	24
図 4-19	接着剤無の 3 次モード（687.6 Hz）.....	24
図 4-20	接着剤無の 4 次モード（755.2 Hz）.....	25
図 4-21	接着剤無の 5 次モード（1,603 Hz）.....	25
図 4-22	H1, H2 の 1 次モード（129.7 Hz）.....	26
図 4-23	H1, H2 の 2 次モード（439.8 Hz）.....	26
図 4-24	H1, H2 の 3 次モード（682.7 Hz）.....	26
図 4-25	H1, H2 の 4 次モード（751.2 Hz）.....	27
図 4-26	H1, H2 の 5 次モード（1594 Hz）.....	27
図 4-27	M1, M2 の 1 次モード（129.6 Hz）.....	28
図 4-28	M1, M2 の 2 次モード（439.4 Hz）.....	28

図 4-29 M1, M2 の 3 次モード (682.4 Hz) .....	28
図 4-30 M1, M2 の 4 次モード (750.5 Hz) .....	29
図 4-31 M1, M2 の 5 次モード (1,593 Hz) .....	29
図 4-32 S1, S2 の 1 次モード (120.2 Hz) .....	30
図 4-33 S1, S2 の 2 次モード (427.0 Hz) .....	30
図 4-34 S1, S2 の 3 次モード (544.2 Hz) .....	30
図 4-35 S1, S2 の 4 次モード (551.9 Hz) .....	31
図 4-36 S1, S2 の 5 次モード (1194 Hz) .....	31
図 4-37 S1, S2 の 6 次モード (1,619 Hz) .....	31
図 4-38 S1, S2 の 7 次モード (1,820 Hz) .....	32
図 4-39 周波数応答解析の結果 .....	33
図 4-40 加振機のシステム構成 <sup>32)</sup> .....	34
図 4-41 低騒音小型振動シミュレータ m06/MA1 .....	35
図 4-42 圧電式加速度ピックアップ VP-32 <sup>33)</sup> .....	35
図 4-43 電力増幅器 MA1-CE(下)と振動制御器 K2 sprint(上) .....	35
図 4-44 振動台上のシステム構成 .....	36
図 4-45 振動台 (治具取付部) の寸法 <sup>34)</sup> .....	36
図 4-46 機器の取付 .....	36
図 4-47 NR-500 シリーズのシステム構成 <sup>35)</sup> .....	37
図 4-48 使用したデータロガー .....	37
図 4-49 ハニカムパネルのボルト取付部 .....	37
図 4-50 実験装置の外観 .....	37
図 4-51 加振方向 .....	38
図 4-52 治具特試験の結果 .....	39
図 4-53 ハニカムパネルの振動試験の結果 .....	40
図 2-4 弾性ヒステリシスループ <sup>36)</sup> .....	47
図 2-5 一自由度系の力学モデル <sup>37)</sup> .....	47

# 表目次

表 4-1	A5052 の物性値 .....	19
表 4-2	ハニカムコアの物性値 .....	19
表 4-3	H1,H2 の接着剤の物性値 .....	21
表 4-4	M1,M2 の接着剤の物性値 .....	21
表 4-5	S1,S2 の接着剤の物性値 .....	21
表 4-6	固有振動数 .....	32
表 4-7	実験条件 .....	38
表 4-8	ピーク 1 .....	40
表 4-9	ピーク 2 .....	41
表 4-10	ピーク 3 .....	41
表 4-11	固有振動数の誤差率 .....	41



# 第 1 章 序論

## 1.1 打上時の振動環境と対策

人工衛星はロケットでの打上時および、振動試験において過酷な振動環境に晒される。射点からのロケット打上時の音響は、図 1-1 に示すようにロケット燃焼ガスの圧力変動、エンジン排気流と周辺の静止した空気との混合や摩擦により生成する流体渦から発生する。この音響は周辺空気や建物（発射棟、煙道、移動発射台周囲設備及び地形等）の干渉及び反射などにより、ロケット機体や宇宙機を格納しているフェアリングを加振し、フェアリング内部の宇宙機に対し過酷な音響励起ランダム振動環境を与える<sup>1)</sup>。人工衛星の荷重経路（ロードパス）となる一次構造は、強度と剛性を確保しつつ軽量化と低価格を同時に得るために、熱膨張を極小に抑える必要のある太陽電池パネルなどを除いたほぼ全てにおいて、アルミハニカムサンドイッチパネル（以下、ハニカムパネル）を採用している。故に衛星構体が高い比剛性を有するため、振動が減衰されることなくロケットインタフェースを介して衛星内部へ伝搬する。さらに衛星のもつ周波数特性によって共振し、構体自身によっても振動を増幅する。それにより極めて強い振動が搭載機器へ伝搬し、搭載機器などに致命的な損傷を与える。

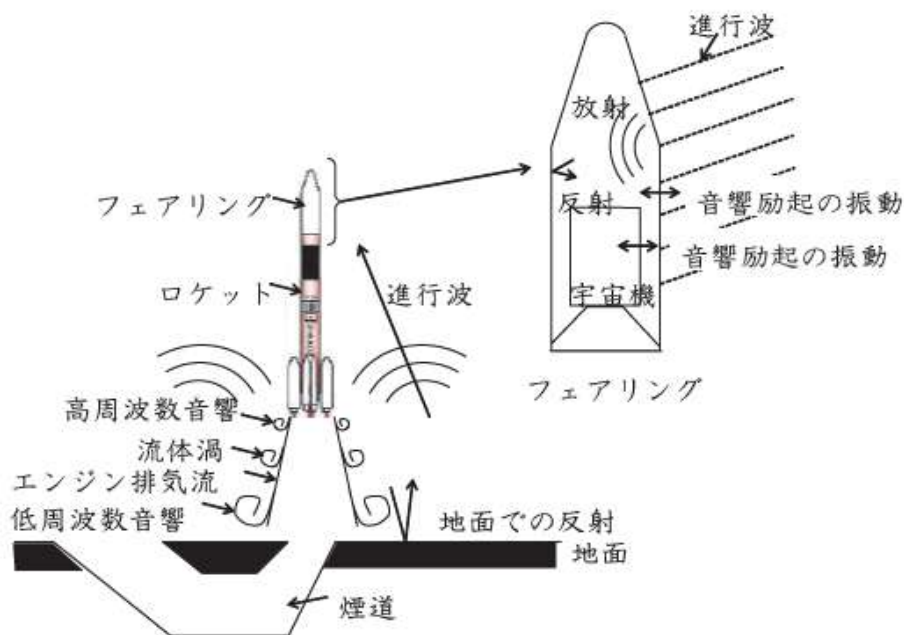


図 1-1 打上時の音響発生<sup>2)</sup>

図 1-2 より、実際にランダム振動試験においてコンポーネントレベルでは 1 衛星当たり 3.20 件、正弦波振動環境試験においては 1.80 件と振動環境による不具合は非常に多い<sup>2)</sup>。図 1-3 はある超小型衛星の品質保証試験 (QT) でのランダム振動条件について、あるロケットが提供するロケットインタフェース上での条件 (点線, 11Grms) に対する衛星内の搭載機器が耐えるべき条件 (実線, 20.4Grms) である。

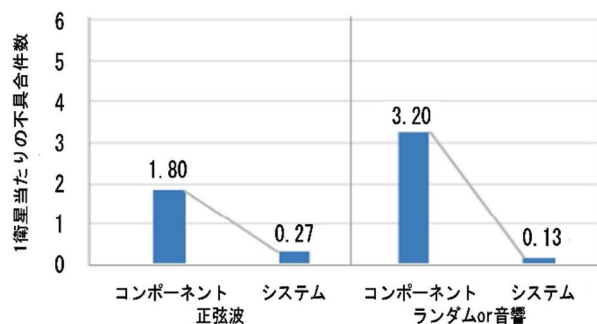


図 1-2 環境試験における衛星の不具合<sup>3)</sup>

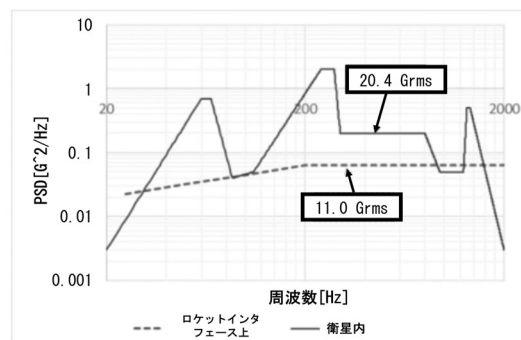


図 1-3 ランダム振動条件

この過酷な機械的環境は、超小型衛星の大きな魅力の一つである低価格で短期間での開発が可能であるという利点を大きく阻害している。現状では、地上で使用される高機能なセンサやアクチュエータ、電子機器などは地上で使う場合と同じ状態では搭載することができず、大きな開発費と長い年月をかけて高い機械的環境耐性を確保する必要がある。そのため一般に、宇宙へ持って行く機器類は地上用途のものより、価格が 100 倍近くにもものぼり、また最新技術から数年～10 年程の遅れがある<sup>4)</sup>。

それに対して、ひてん (図 1-4) や SOHLA-1 (図 1-5) などの衛星では、搭載機器と取付面の間にポリイミドテープを挟み込み、その接着層の粘弾性によって振動エネルギーを熱エネルギーに変換することによる振動減衰の効果を得た<sup>5)</sup>。SOHLA-1 では板材とリム部を別々に製作し、接着剤で一体化した側面パネルを採用した<sup>6)</sup>。また近年、航空機のスラストリバーサー (逆噴射によってブレーキをかける装置) の激しいフラッタ (空力振動) 抑制するために、ハニカムパネル内部に粘弾性体を挟み込むことが航空機分野で導入されている<sup>7)</sup>。

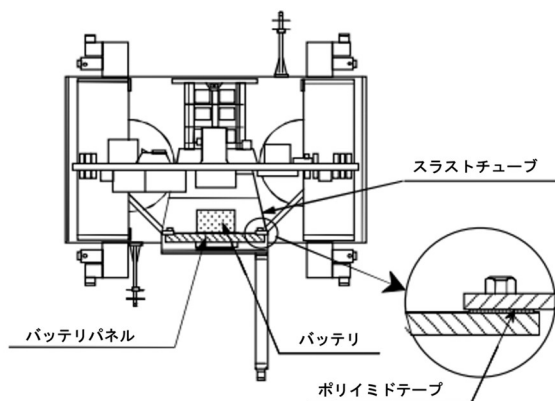


図 1-4 ひてんの振動低減対策<sup>5)</sup>

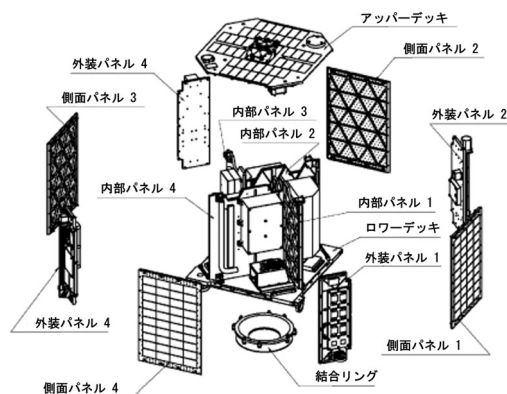


図 1-5 SOHLA-1 の振動低減対策<sup>6)</sup>

以上のことから、衛星構体に僅かでも柔軟性を持たせて剛性を下げ、粘弾性由来の減衰特性によって振動エネルギーを熱エネルギーに素早く変換し、散逸させることで、振動環境を緩和できると期待される。しかし、これらの対策ではある特定の搭載機器や共振点の振動衝撃抑制に限られており、搭載機器ごと及び共振点ごとの個々の繊細な調整が必要となってしまう。或いは人工衛星の振動耐性を増強する方法もあるが、重厚な構造部材や振動を抑制するダンパを適用するなど重量や容積といった貴重な搭載リソースを消費してしまい、設計自由度を低減させてしまう。当然のことながら人工衛星においては搭載リソースの制約や減圧環境での使用を鑑みれば、地上で多用されるブレーキダンパや長大なシリンダダンパ、流体やゲルを用いた防振機構は適用できない。また軽量化と低価格、及び加工任意性を鑑みれば、制振・防振合金材料をスキンやコアとして採用することは非現実的である。

そこで、ハニカムコア内部に摩擦ダンパを挿入することで振動減衰することを構想し、PLA 製の中空パネルをシリンダとロッドの壁面の摩擦を利用したピストン型の摩擦ダンパ（図 1-6）及びロッドの平面部をこすり合わせることによるダブルロッド型の摩擦ダンパ（図 1-7）を実際に製作し、振動試験を行い結果として振動応答の確認を行った。しかしながら、はめあいの困難さから有効な効果は得られなかった<sup>8)</sup>。また摩擦ダンパはエネルギー収支の関係から共振点において応答は発散しやすい<sup>9)</sup>。

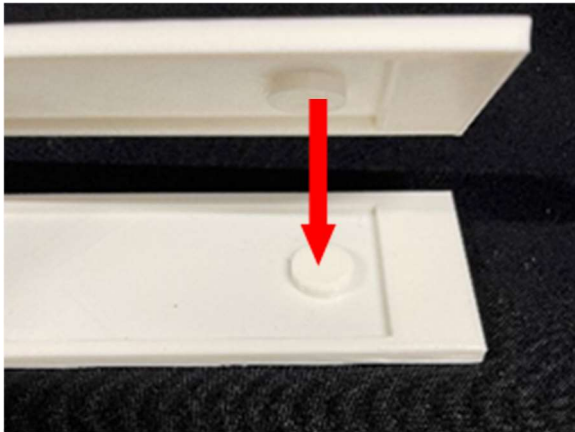


図 1-6 ダブルロッド型 PLA パネル<sup>8)</sup>



図 1-7 ピストン型 PLA パネル<sup>8)</sup>

## 1.2 研究目的

人工衛星の構造部材を固体ダンパとして用いることで、搭載リソースを消費することなく、設計や製作の工数・工程に影響を及ぼすことなく、幅広い周波数帯において衛星構体自体で振動伝達を抑える新たな振動減衰構造材の実現を目指す。そこで本論文では、新たなアルミハニカムパネル構体（図 1-10）での減衰手法の提案を行い、シミュレーションと実験でその効果の確認を行うことを目的とした。



図 1-8 アルミハニカムパネル超小型衛星構体<sup>10)</sup>

### 1.3 粘弾性接着剤ハニカムパネル

衛星構体は搭載機器を保護するものという観点に立ち、粘弾性による振動減衰の実績があること及び搭載リソースを消費しないことを前提とし、また、設計や製作の工数・工程に影響を及ぼすことなく、粘弾性を用いた一次構造による振動減衰手法として粘弾性接着剤ハニカムパネルを提案した。

ハニカムパネルはスキン材、接着剤、中空のハニカムコアの層で構成されている（図 2-1）。ハニカムパネルに存在する一部をダンパとして振動減衰効果を有するものに置き換える。これによって機器の自由度に干渉せずにダンパを搭載できることができる。そこで本論文では、スキンとハニカムコアを接着する接着剤を粘弾性を有するものに置き換えて組み込むことで衛星全体の振動衝撃を抑制することを着想し、シミュレーションや実験を用いて減衰効果があることを確認する。

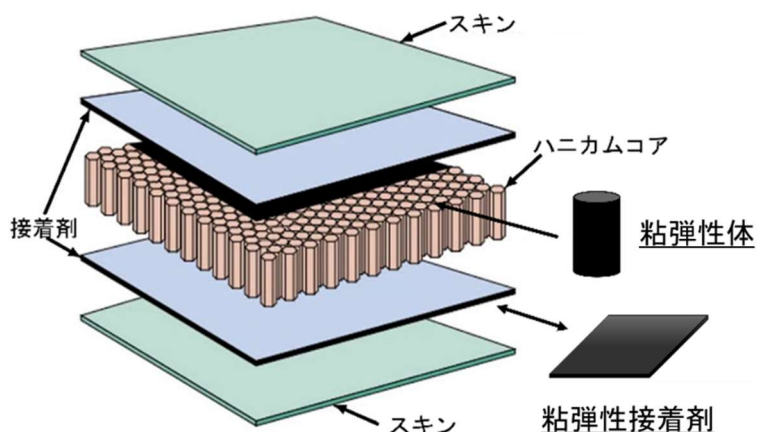


図 1-9 ハニカムパネルの構成および振動減衰手法

一般的なハニカムパネルに用いられている高剛性エポキシ接着剤<sup>11)</sup>に代えて、本論文では、シリコーン系などの粘弾性材料の接着剤を用いる。シリコーン系接着剤は、剛性の低さや耐熱性に優れていることから宇宙利用可能なものが多い。実際、熱応力による破損を防ぐために太陽電池パネルの表面には太陽電池を放射線から保護する目的でカバーガラスがシリコーン系の接着剤で取り付けられている<sup>12)</sup>。粘弾性接着剤ハニカムパネルは、パネル全体に渡って接着剤が塗布されることから、せん断変形を起こす固有モード（図 2-3）において接着剤が変形し、エネルギー散逸が大きく生じることから、幅広い周波数帯において振動減衰することが期待されている。一般的に損失係数は主な金属材料の損失係数が 0.005～0.04 程度なのに対し、柔軟なゴムなどの粘弾性材料の、材料減衰比は 0.05～0.4 程度と大きいので、ピークの上昇や大きさが小さくなることが見込める<sup>13)</sup>。本論文では、この粘弾性の特徴を衛星構体に広く用いられるハニカムパネルに適用することで振動減衰効果を得る。

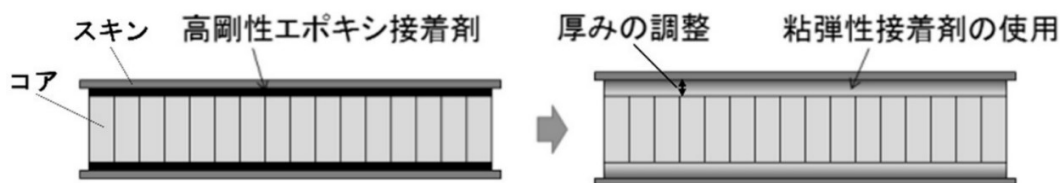


図 1-10 粘弾性接着剤ハニカムパネル

## 第2章 評価手法

### 2.1 動解析シミュレータ

#### 2.1.1 モード解析

モード解析では、自由振動における固有振動数および固有モードを求める解析である。  
非減衰多自由度系の自由振動の運動方程式は、

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{0\} \quad (3-1)$$

$[M]$ : 質量マトリックス

$[K]$ : 剛性マトリックス

$\{q\}$ : 変位ベクトル

この運動方程式を解くために、

$$\{q\} = \{Q\}e^{i\Omega t} \quad (3-2)$$

とにおいて、これを時間  $t$  で微分すると、

$$\{\ddot{q}\} = -\Omega^2\{Q\}e^{i\Omega t} \quad (3-3)$$

となり、式(3-2)、(3-3)を式(3-1)に代入すると以下の式となる。

$$(-\Omega^2[M] + [K])\{Q\}e^{i\Omega t} = \{0\} \quad (3-4)$$

ここで両辺を  $e^{i\omega t}$  で除すると

$$(-\Omega^2[M] + [K])\{Q\} = \{0\} \quad (3-5)$$

となる。

ここで $\{Q\} = \{0\}$ 以外の解を持つ条件として、以下の固有方程式

$$[-\Omega^2[M] + [K]] = 0 \quad (3-6)$$

を解くことで固有角振動数 $\Omega_{nj}$  ( $j$ は次数) が求まる. よって固有振動数 $f_{nj}$ は,

$$f_{nj} = \frac{\Omega_{nj}}{2\pi} \quad (3-7)$$

$\Omega_{nj}$ :  $j$ 次の固有円振動数

$f_{nj}$ :  $j$ 次の固有振動数

となる. ここで振幅 $\{Q\}$ を固有方程式によって求められた固有ベクトルである固有モード $\{\phi\}$ と書き換えれば、以下の式に変形できる.

$$(-\Omega^2[M] + [K])\{\phi\} = \{0\} \quad (3-8)$$

減衰多自由度系の強制振動の運動方程式は,

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} \quad (3-9)$$

であり、減衰多自由度系の自由振動の方程式は

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{0\} \quad (3-10)$$

である. ここで、式を解くために、変位ベクトルを次のように仮定する.

$$\{q\} = \{Q\}e^{\lambda t} \quad (3-11)$$

時間  $t$  で微分して

$$\{\dot{q}\} = \{Q\}\lambda e^{\lambda t}, \quad \{\ddot{q}\} = \{Q\}\lambda^2 e^{\lambda t} \quad (3-12)$$

となり、これらを運動方程式に代入すると,

$$(\lambda^2[M] + \lambda[C] + [K])\{Q\}e^{\lambda t} = \{0\} \quad (3-23)$$

$e^{\lambda t}$ で両辺を除すると,

$$(\lambda^2[M] + \lambda[C] + [K])\{Q\} = \{0\} \quad (3-34)$$

となる. ここで解析では、減衰マトリックス $[C]$ を、質量マトリックス $[M]$ に比例する成分と剛性マトリックス $[K]$ に比例する成分の一次結合から成り立つと仮定するレイリー減衰を導入すると式 (3-15) のように表せる<sup>14)</sup>.



$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3-45)$$

減衰比 $\zeta$ との関係は,

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\Omega} + \frac{\beta\Omega}{2} \quad (3-56)$$

となり, 運動方程式に代入すると

$$((\lambda^2 + \lambda\alpha)[M] + (\lambda\beta + 1)[K]) = 0 \quad (3-67)$$

となりここで, 式を $(\lambda\beta + 1)$ で割り,

$$p^2 = -\frac{(\lambda^2 + \lambda\alpha)}{(\lambda\beta + 1)} \quad (3-78)$$

と置けば, 式は

$$(-p^2[M] + [K])\{Q\} = 0 \quad (3-19)$$

となり,  $\{Q\}$ を固有モード $\{\phi\}$ に置き換えると,

$$(-p^2[M] + [K])\{\phi\} = 0 \quad (3-20)$$

となり, 不減衰系の固有モードと同一であり,  $r$ 次を示す $p = \Omega_r$ を代入して変形すれば,

$$\lambda_r^2 + (\alpha_c + \beta_c\Omega_r^2)\lambda_r + \Omega_r^2 = 0 \quad (r = 1 \sim N) \quad (3-21)$$

よって $\lambda_r$ の解は,

$$\lambda_r = -\frac{\Omega_r}{2} \left( \frac{\alpha_c}{\Omega_r} + \beta_c\Omega_r \right) \pm \Omega_r \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\alpha_c}{\Omega_r} + \beta_c\Omega_r \right)^2 + 1} \quad (3-22)$$

式に比例粘性減衰の定義式に前と後ろから同じ $r$ 次の固有モード $\{\phi_r\}^T, \{\phi_r\}$ を乗じると, モード減衰 $C_r$ は,

$$C_r = \{\phi_r\}^T [C] \{\phi_r\} = \alpha \{\phi_r\}^T [M] \{\phi_r\} + \beta \{\phi_r\}^T [K] \{\phi_r\} = \alpha M_r + \beta K_r \quad (3-23)$$

となる.  $C_r$ はた自由度系に対する $r$ 次の等価一自由度系の減衰係数である. よって $r$ 次の臨界粘性減衰係数 $C_{C_r}$ は,



$$C_{C_r} = 2\sqrt{M_r K_r} \quad (3-24)$$

$M_r$ :  $r$  次のモード質量  
 $K_r$ :  $r$  次のモード剛性

であり、レイリー減衰のみの場合、 $r$  次のモード減衰比 $\zeta_r$ は、

$$\zeta_r = \frac{C_r}{C_{C_r}} = \frac{\alpha M_r + \beta K_r}{2\sqrt{M_r K_r}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\Omega_r} + \beta \Omega_r \right) \quad (3-25)$$

$\Omega_r$ : 非減衰系 $r$ 次の固有円振動数

であり、ここで周波数に依存しない一定の減衰比 $\zeta_c$ <sup>15)</sup>を用いてモード減衰として加えると、

$$\lambda_r = -\Omega_r(\zeta_r + \zeta_c) \pm \Omega_r \sqrt{(\zeta_r + \zeta_c)^2 - 1} = \sigma_r \pm i\Omega_{dr} \quad (3-26)$$

$\Omega_{dr}$ :  $r$  次の減衰固有角振動数  
 $\sigma_r$ :  $r$  次のモード減衰率

であり、減衰固有振動数 $f_{dr}$ は、

$$f_{dr} = \frac{\Omega_{dr}}{2\pi} = \frac{\Omega_r \sqrt{1 - (\zeta_r + \zeta_c)^2}}{2\pi} \quad (3-27)$$

となる。

### 2.1.2 周波数応答解析

まず，モード座標変位 $\{\xi\}$ は，固有モード $[\phi]$ で下式ように定義される．

$$\{q\} = [\phi]\{\xi\} \quad (3-28)$$

減衰多自由度系の運動方程式(式)に固有モードの転置行列 $[\phi]^T$ を左からかけると

$$[\phi]^T[M][\phi]\{\xi\} + [\phi]^T[C][\phi]\{\xi\} + [\phi][K][\phi]\{\xi\} = [\phi]\{f\} \quad (3-29)$$

左辺は直交行列であり，固有モードを用いることで計算コストの低減につながる．また，固有モードはモード解析にて非減衰系から算出される．モード減衰のマトリクスは，

$$[\phi]^T[C][\phi] = \begin{bmatrix} 2(\zeta_1 + \zeta_c)\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 2(\zeta_r + \zeta_c)\omega_r \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

## 2.2 ハーフパワー法を用いた減衰比の推定

実験に得られた応答データから減衰比を以下の式で同定できる<sup>15)</sup>．図 3-1 は周波数応答関数を表しており，本論文では，応答データとして応答加速度を算出し，そこから減衰比の同定を行う．

$$\zeta = (f_2 - f_1)/2\Delta f \quad (3-31)$$

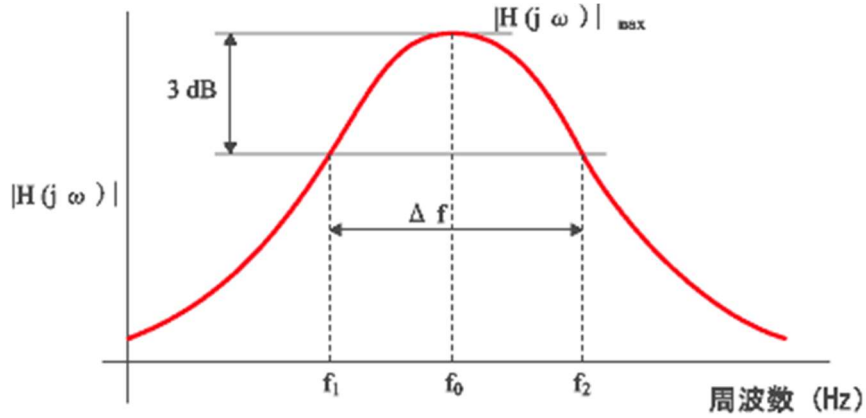


図 2-1 ハーフパワー法による減衰比の推定<sup>16)</sup>

## 2.3 ハニカムパネルの等価板厚法

まず、ハニカムサンドウィッチパネルを製作する際、寸法を決定する必要がある。寸法の決め方として構造解析ソフトを用いるが、その構造上、要素数が非常に多くなってしまうことから、計算時間が膨大にかかってしまう。そこでハニカムコアの等価板厚法<sup>17)</sup>によって、異方性の均質材として近似を行なった。ハニカムコアの等価板厚法は Gibson の式を用いた。ハニカムコアのセル（図 3-3）を正六角形と仮定した場合について、以下に示す<sup>18)</sup>。

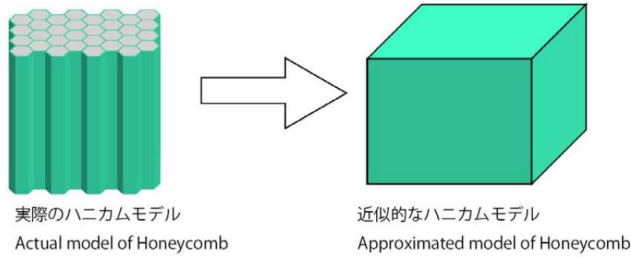


図 2-2 ハニカムコアの等価板厚法の概要<sup>19)</sup>

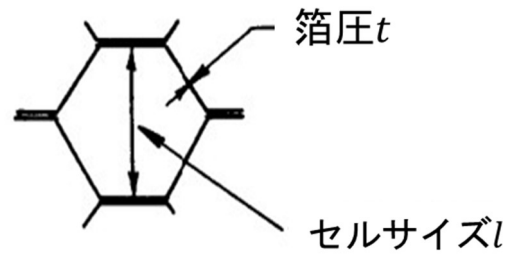


図 2-3 ハニカムコアのセル

ハニカムコアを均質材として等化した密度 $\rho_h$ は、

$$\rho_h = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} \rho_d \quad (3-32)$$

$l$ :セルサイズ[in]

$t$ :セルの箔厚[in]

$\rho_d$ :材質の密度[kg/m<sup>3</sup>]

となる。 $\rho_d$ はハニカムコアの材質密度であり、図 3-3 の  $t$  はセルの箔厚、 $l$  はセルサイズである。面内方向の力学特性について、相反定理により面内方向のヤング率 $E_x$ 、 $E_y$ とポアソン比 $\nu_{yx}$ 、 $\nu_{xy}$ は、

$$E_x \nu_{yx} = E_y \nu_{xy} \quad (3-33)$$

となる。 $E_x$ 、 $E_y$ は、

$$E_x = E_y = 2.3 \left( \frac{t}{l} \right)^3 E_d \quad (3-34)$$

$E_d$ :材質の密度[MPa]

ハニカムコアの特性上,

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} = 1 \quad (3-35)$$

であるが、用いた解析ソフトでは 0.5 以上、および-1.0 以下のポアソン比で定義されるため、

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} = 0.499 \quad (3-36)$$

とした。せん断弾性係数(剛性率) $G_{xy}$ は

$$G_{xy} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 E_d \quad (3-37)$$

となる。ハニカムコアの面外特性は以下のような関係式となる。

$$E_z = \left(\frac{h/l + 2}{2 h/l}\right) \frac{t}{l} E_d \approx \frac{t}{l} E_d \quad (3-38)$$

$$\nu_{zx} = \nu_{zy} = \nu_d \quad (3-39)$$

$$\nu_{xz} = \frac{E_x}{E_z} \nu_d, \quad \nu_{yz} = \frac{E_y}{E_z} \nu_d \quad (3-40)$$

$$G_{xz} = G_{yz} = 0.577 \frac{t}{l} \quad (3-41)$$

## 第 3 章 粘弾性接着剤ハニカムパネル

粘弾性接着剤ハニカムパネルは図 2-2 で示したように接着剤を従来の高剛性のエポキシ接着剤から、シリコーン系などの柔軟な粘弾性接着剤に変えることで、振動エネルギーを熱エネルギーに散逸させ、振動減衰効果を付与することを目的として提案したハニカムパネルである。

### 3.1 ハニカムパネルの製作方法

ハニカムパネルの製作は大きく分けて表面処理、接着、成形の 3 工程があり、本節ではその 3 工程について述べる。

#### 3.1.1 表面処理

アルミ合金製のスキン材およびボルト締結部に使用するブロックを中性洗剤で洗浄し、乾燥させる。後に接着剤の接着強度を高めるために 100 番台の粗目のサンドペーパーで表面を傷つける。後にアセトンでスキン材およびアルミ合金製のハニカムコア自体の面内剛性は非常低いので、接着面のみを洗浄する。本研究ではハニカムパネルに多く用いられている A5052 を使用した。

#### 3.1.2 接着

スキン材への接着剤の塗布は接着剤の厚みを調整する必要がある。接着剤はハニカムパネルに多く用いられているのはフィルム型であるが、本研究では、多種の接着剤を使用するため、塗布には接着剤の厚みを均一にするために、凹凸の溝が調整されたヘラを使用した。接着剤の塗布後は、接着剤の硬化開始時間までに図 4-2 のような重石とパネル全体に均一に荷重をかけるためにゴムパッドを用いて、完全硬化時間に達するまで接着させた。



図 3-1 凹凸の溝が調整されたヘラ<sup>20)</sup>

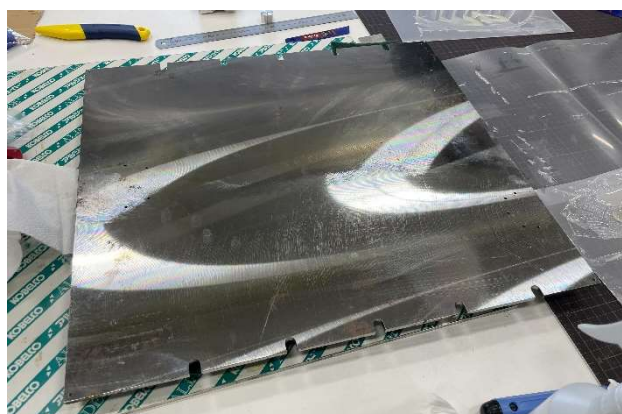


図 3-2 ハニカムパネルの接着

### 3.1.3 ハニカムパネルの成形

図 4-3 のように接着後のパネルはハニカムコアが余った状態であり, これらをカッターで切り落とし, 成型した. 青いフィルムテープは表面保護のためである. これらの工程より完成したハニカムパネルを図に示す.



図 3-3 接着後のハニカムパネル



図 3-4 完成したハニカムパネル

### 3.2 ハニカムパネルの設計

図 4-5 に本論文の振動試験の供試体とするハニカムパネルおよびそのハニカムパネルに組み込んだボルト締結ブロックの寸法を図 4-6 に示す.

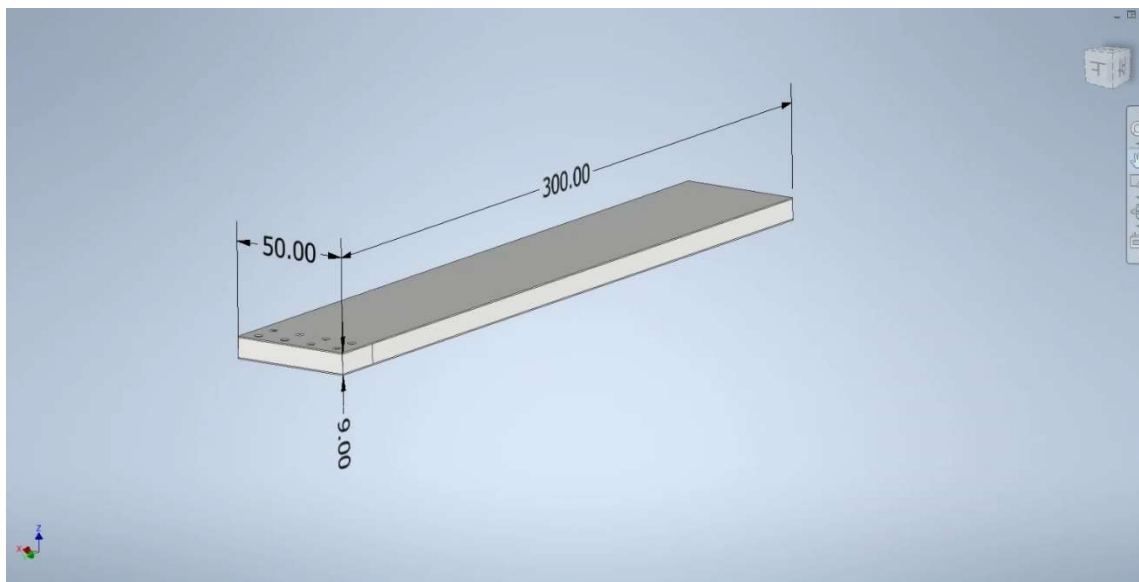


図 3-5 ハニカムパネルの設計

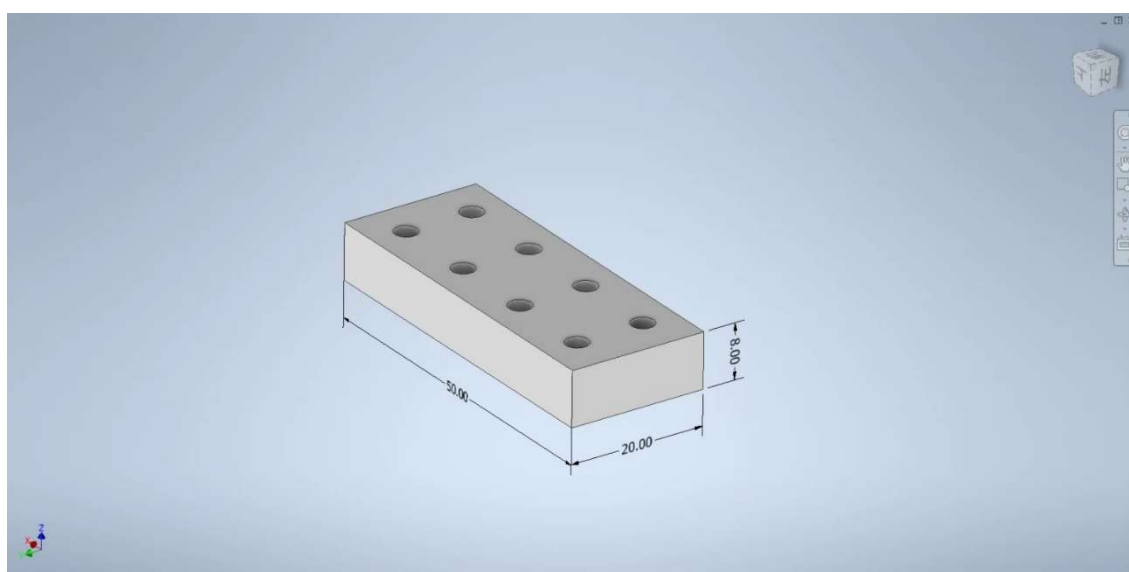


図 3-6 ボルト締結用ブロックの設計

本論文では固有振動数解析を行い、その結果から供試体とするハニカムパネルの寸法を  $300\text{mm} \times 50\text{mm} \times 9\text{mm}$  とした。厚みの内訳は2枚のスキン材はそれぞれ  $0.5\text{mm}$ ，ハニカムコアおよびボルト締結用ブロックは  $20\text{mm} \times 50\text{mm} \times 8\text{mm}$  であり、ハニカムコアは  $280\text{mm} \times 50\text{mm} \times 8\text{mm}$  とした。接着層はヘラの溝部寸法に応じて以下の図 4-7 のように塗布される。等価板厚法による解析は接着剤の影響が少ないことから 3D モデルを作るうえで、接着層を無視してモデル化を行うのが一般的である。しかし、本研究で用いる柔軟な接着剤は一般的にハニカムパネルに用いられるエポキシ系の接着剤とは大きく物性値が異なることからその影響を無視できない。そこでスキンとハニカムセル間は、スキンを研磨したうえで接着剤を塗布しているため、表面膜のような状態になると仮定し、接着層の厚みは  $0.05\text{mm}$  と仮定してモデリングを行った。様々な厚みでモード解析を行い、メッシングの制限など考慮したうえで決定した。高精度で解析が行うことができる、等価板厚法により求めた接着剤を考慮しないモデルと膜表面を一般的に用いられるエポキシ接着剤としたモデルの一次固有振動数の差が 1% 以内に収まった厚みである。

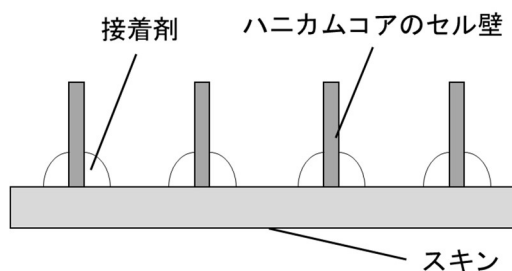


図 3-7 接着剤の塗布部

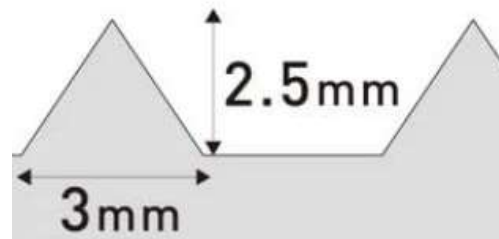


図 3-8 ヘラの溝部寸法



### 3.3 構造解析シミュレーション

本論文では解析手法として ANSYS® Workbench Mechanical の動解析ツールとしてモーダル解析ツール、周波数応答解析ツールを選択した。ANSYS® Workbench Mechanical とは構造、振動、伝熱、電磁場、圧電、音響、熱流体、落下衝突、回路、システム解析といった様々なシミュレーション解析を行うことができるマルチフィジックス CAE である。解析には有限要素法が用いられ、数学的に厳密に解くことができない工学的問題を解くことができる<sup>21)</sup>。尚、ANSYS®のバージョンは 2022 R2 である。

#### 3.3.1 解析目的

##### モーダル解析（一般的にはモード解析）

モーダル解析とは、対象物そのものが振動しやすい周波数とその振動形状を把握する解析で、自由振動の状態を周波数軸で解析し、物理座標系ではなくモード座標系で解析する。モーダル解析では対象物の固有振動数（共振周波数）と変形形状が把握でき、外力が持つ振動数と同じ周波数にならないように避けるための対策がたてやすくなる。また対象物の固有モード（固有振動数における変形形状）が把握でき、振動形状で変形している箇所を把握し、対策の指針がたてやすくなる<sup>22)</sup>。

本論文では、製作したハニカムパネルの 3D モデルを用いて振動試験でのハニカムパネルの固有振動数および固有モードの予測を行い、実験データと比較し、評価することを目的とした。また現状では、接着層による剛性の影響は小さく無視できるため、接着剤を考慮した等価板厚法でのハニカムパネルのモデル化を用いた解析手法が行われていない。本論文では、等価板厚法により均質化したハニカムパネルの解析を接着剤を考慮したうえでを行い、従来手法および実験データと比較した。

##### 周波数応答解析

周波数応答解析とは、指定した周波数で繰り返し荷重が負荷される場合の応答を把握する解析です。ある一定の周波数および振幅で揺れ続けた場合、安定した振動状態になる。この状態を定常状態と呼び、このときの応答を確認する解析である。モーダル解析では外力を無視するため、構造物が共振する周波数と揺れ方（モード形状）だけが確認できるが、周波数応答解析では、実際に外力を負荷して揺れを確認できるため、揺れの大きさなども評価できる<sup>23)</sup>。

本論文では、モーダル解析の結果により得られた固有振動数および固有モードにより、実験における加振方向の固有振動数の予測を行うことを目的とした。

### 3.3.2 モデルの構成

製作したモデルを図に示す。構成は緑がスキン、青がブロック、赤がハニカムコア、黄色が接着剤である。接着剤有のモデルでは、スキンをメッシングの制限を回避する目的で積層シェルとしているため、見かけ上は存在しない。

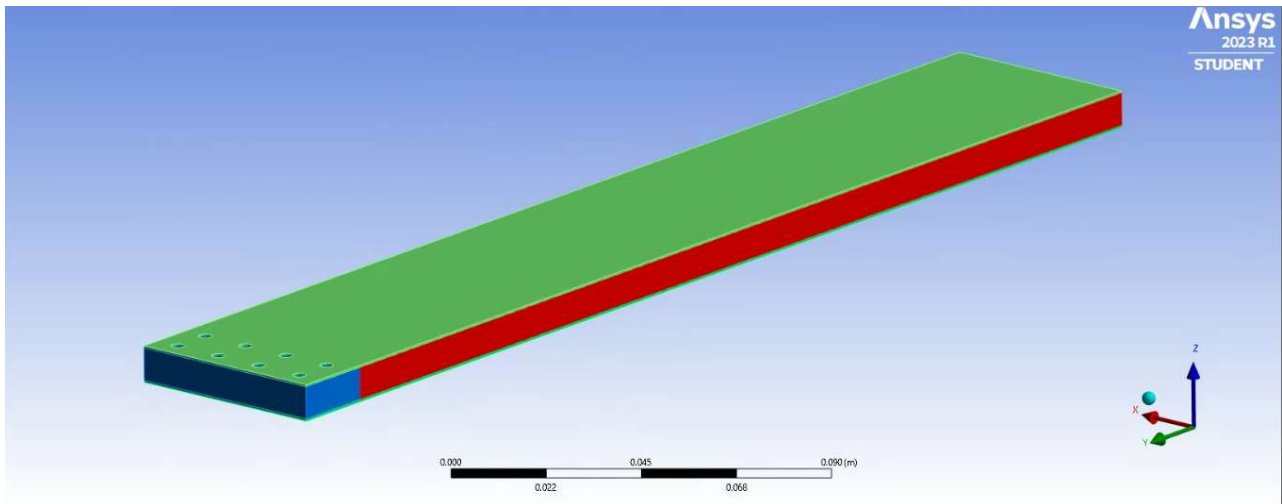


図 3-9 ハニカムパネルモデル（接着剤無）

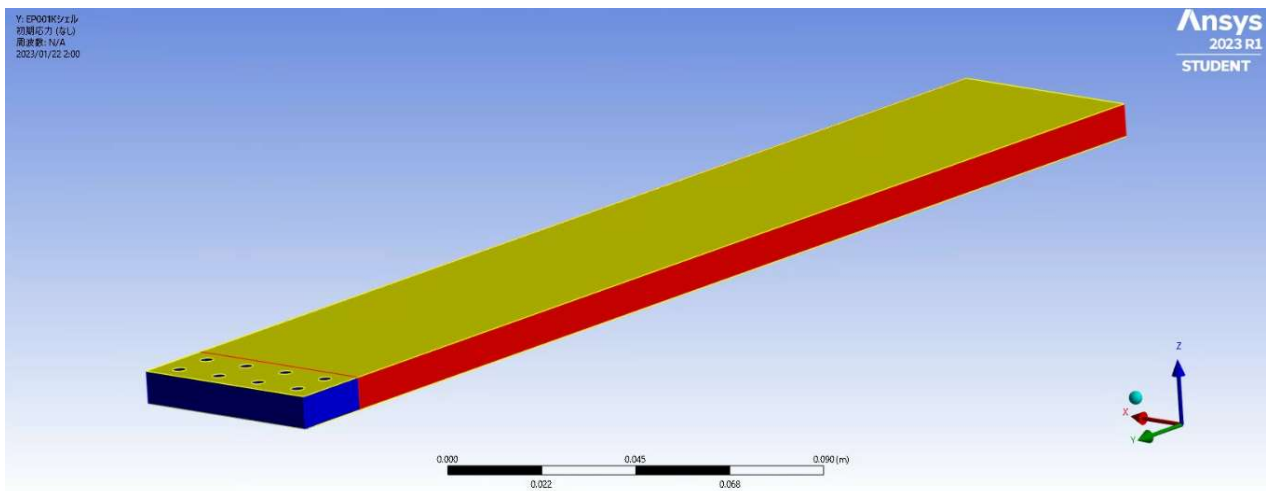


図 3-10 ハニカムパネル（接着剤有）

### 3.3.3 物性値

実験及び解析にて接着剤を除くすべての材料を A5052 を使用した.

表 4-4 に A5052, 表 4-5 にハニカムパネルのセルサイズと箔圧に加え, 均質化した物性値を表に示す.

表 3-1 A5052 の物性値

密度 $\rho$	2680 kg/m <sup>3</sup>
ヤング率 $E$	69.6 GPa
ポアソン比 $\nu$	$0.330 \times 10^{-5}$
剛性率 $G$	68.2 GPa
体積弾性率 $K$	26.2 GPa

表 3-2 ハニカムコアの物性値

セルサイズ $l$	1/4 in
箔圧 $t$	0.001 in
$\rho_c$	21.5 kg/m <sup>3</sup>
$E_x$	$3.24 \times 10^{-6}$ GPa
$E_y$	$3.24 \times 10^{-6}$ GPa
$E_z$	0.557 GPa
$\nu_{xy}$	0.49
$\nu_{yz}$	$3.16 \times 10^{-5}$
$\nu_{xz}$	$3.16 \times 10^{-5}$
$G_{xy}$	$1.32 \times 10^{-5}$ GPa
$G_{yz}$	0.106 GPa
$G_{xz}$	0.106 GPa

ハニカムパネルは3種の二液混合式接着剤を使用した。1種類の接着剤につき2枚ずつ、合計6枚のパネルを製作し、振動試験を行った。接着剤はスリーボンド社製の構造用接着剤 2087 を使用したハニカムパネルをそれぞれ H1, H2 とし、同社製の低温硬化型接着剤 2086N, を使用したハニカムパネルをそれぞれ M1, M2 とし、セメダイン社製の EP001K を使用したハニカムパネルを S1, S2 とした。柔軟な粘弾性特性を付与する目的として使用した接着剤は EP001K である。そこでハニカムパネルに使用した接着剤の評価を物性値ごとに行うため、使用したスリーボンド社製の2種の接着剤はヤング率およびポアソン比が不明確であったため、これらの二種の接着剤の試験片を製作し、引張試験を実施して物性値としてヤング率およびポアソン比を取得した。実際に使用した引張試験の試験片を図に示す。試験片の寸法は図の平面は  $90 \times 10 \times 1.3$  mm であり、3枚ずつ(2種)の試験片から応力を算出した。

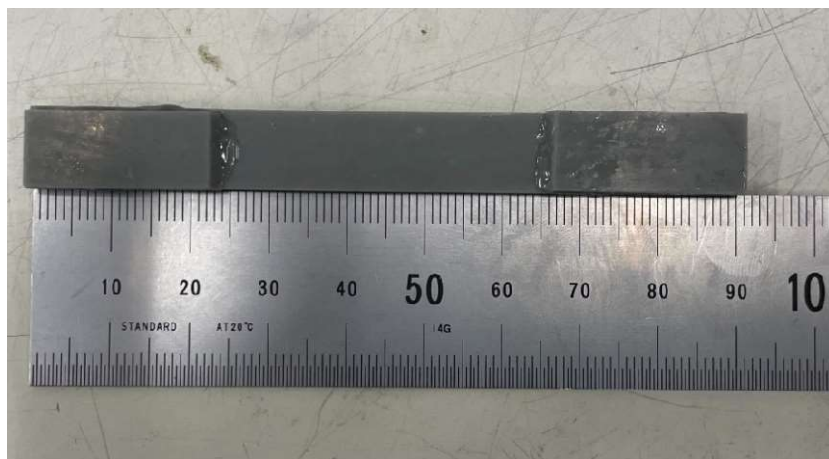


図 3-11 接着剤の試験片

引張試験には島津製作所社製の万能精密試験機 Autograph AGX-50kNVD (図 4-12)を使用した。2軸のひずみゲージは共和電業社製の KFGS-1-120-D16-11 L1M2S (図 4-13)を試験片の両面に使用した。試験条件は引張速度は 1mm/min で、サンプリング周波数を 10Hz として引張試験を行った。



図 3-12 引張試験機

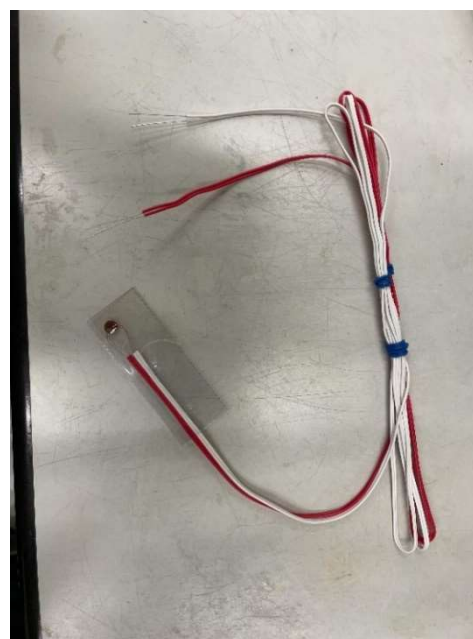


図 3-13 ひずみゲージ

引張試験および技術データから得た接着剤の物性値を以下に示す。

表 3-3 H1,H2 の接着剤の物性値

名称	二液式構造用接着剤 2087 <sup>24)</sup>	
主成分	主剤	硬化剤
	エポキシ樹脂	ポリアミドアミン
混合密度	1.000 g/cm <sup>3</sup>	
ヤング率	2410 MPa	
ポアソン比	0.433	

表 3-4 M1,M2 の接着剤の物性値

名称	低温硬化型接着剤 2086N <sup>25)</sup>	
主成分	主剤	硬化剤
	エポキシ樹脂	ポリチオール
混合密度	1.070 g/cm <sup>3</sup>	
ヤング率	2330 MPa	
ポアソン比	0.482	

表 3-5 S1,S2 の接着剤の物性値

名称	EP001K <sup>26)</sup>	
主成分	主剤	硬化剤
	エポキシ樹脂	変性シリコーンポリマー
混合密度	1.070 g/cm <sup>3</sup>	
ヤング率	3.22 MPa	
ポアソン比	0.499	

### 減衰比の推定

減衰比は試験条件や同じ材質であっても異なるため非常に不明確であるが、周波数応答解析において、応答の無限大発散を防ぐ目的で推定を行った。ハニカムパネルの減衰比は 0.12～0.27 程度<sup>27)</sup>であり平均値の 0.19 を一定減衰比として使用した。柔軟な接着剤に関してはゴム弾性体のため、減衰特性が、固有振動数および共振点のピークに大きく影響することを考慮し、構成が類似している制振鋼板の減衰特性を採用した。制振鋼板は 20℃で 2,000Hz まで損失係数は線形的に上昇し、2000Hz で 0.2 (減衰比は 0.1) となることから、初期値をハニカムパネルの一定減衰比 0.19 とし、 $\beta$  の値をモード減衰比が最終的に約 0.1 となるように設定した。制振鋼板同様に線形的上昇することと仮定し係数  $\alpha$  は 0 とした<sup>28)</sup>。

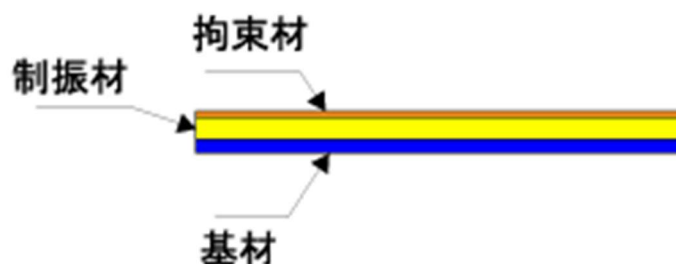


図 3-14 制振鋼板<sup>29)</sup>

### 3.3.4 解析条件

モーダル解析における境界条件は、ハニカムスキンのボルト締結部の円周（8箇所）を固定（剛体として定義）とし、片持ちのモデルで解析を行った。周波数応答解析では、モード重ね合わせ法を利用し（境界条件はモード解析と同様）、ベース加振（固定部を加振する条件）を固定した円形部に垂直方向に  $0.5G$  ( $0.49\text{m/s}^2$ ) で  $20\sim 2000\text{Hz}$  の条件で行った。

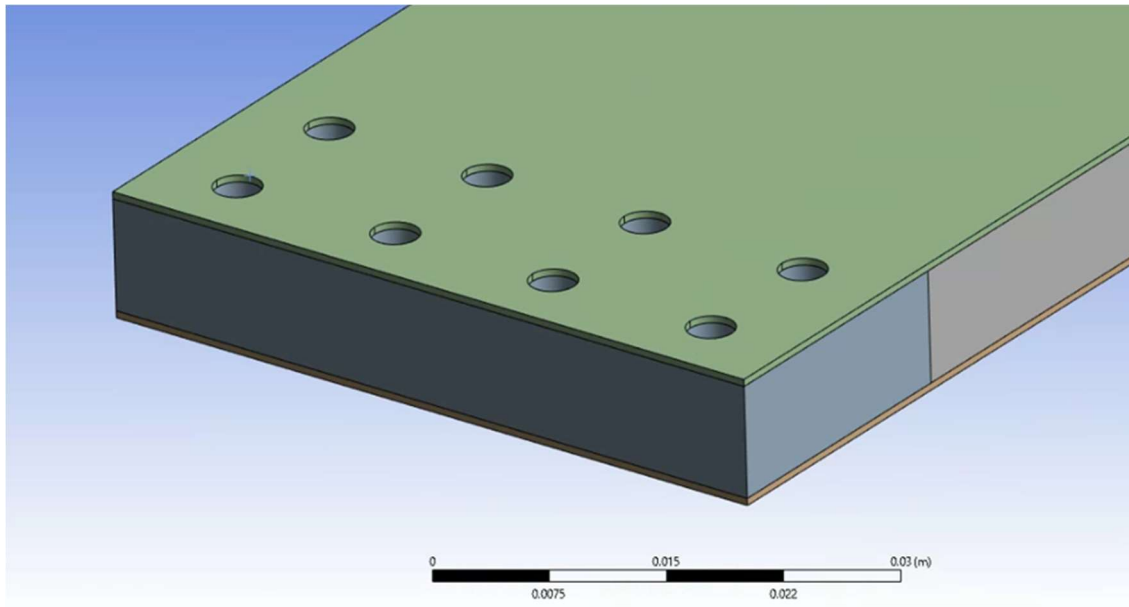


図 3-15 ハニカムパネルの固定部

### 3.3.5 メッシュ

接着剤無のハニカムパネルモデルのメッシングにおいては8節点ソリッド要素を使用し、メッシュ数はモーダル解析の結果が収束するまで行い、結果として、要素数 2,803, 節点数 19,322 となった。ソリッド要素とは、3次元の立体形状をした要素のことです。3次元CADデータをそのまま活用してメッシュ作成できるため、CAEでは最も多く利用されている。ソリッド要素には、六面体（ヘキサ）、四面体（テトラ）、ピラミッド、三角柱（プリズム）などの形状がある<sup>30)</sup>。

接着剤有のハニカムパネルモデルでは、スキンをシェル要素、それ以外をソリッド要素とし、メッシュ数はモーダル解析の結果が収束するまで行い、結果として、接着剤無し同様の要素数 2,803, 節点数 19,322 となった。ハニカムパネルの接着剤を考慮した解析としてスキン材をシェル要素にして解析が行われる。シェル要素とは、見た目は厚みゼロの面だけの要素で、計算上は板厚分の剛性を持った要素のことで、剛性挙動は曲げのみであり、薄板形状のモデル化に多用される。薄板形状ではソリッド要素に比べてメッシュ数が少なく済み、計算コストを低く抑えられるメリットがある<sup>31)</sup>。

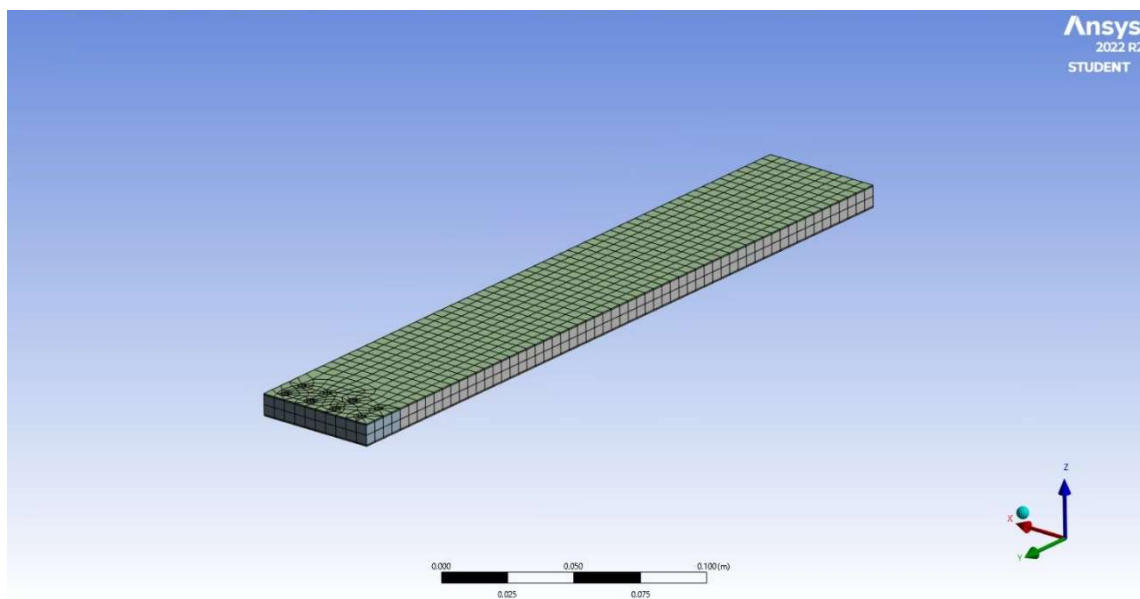


図 3-16 メッシング

### 3.3.6 モーダル解析の結果

モーダル解析の結果として，以下に接着剤なしの 2000Hz までの非減衰系の固有モードを示す．図 4-17~4-21 はすべて図の Z 軸方向変位の大きさの比を表している．

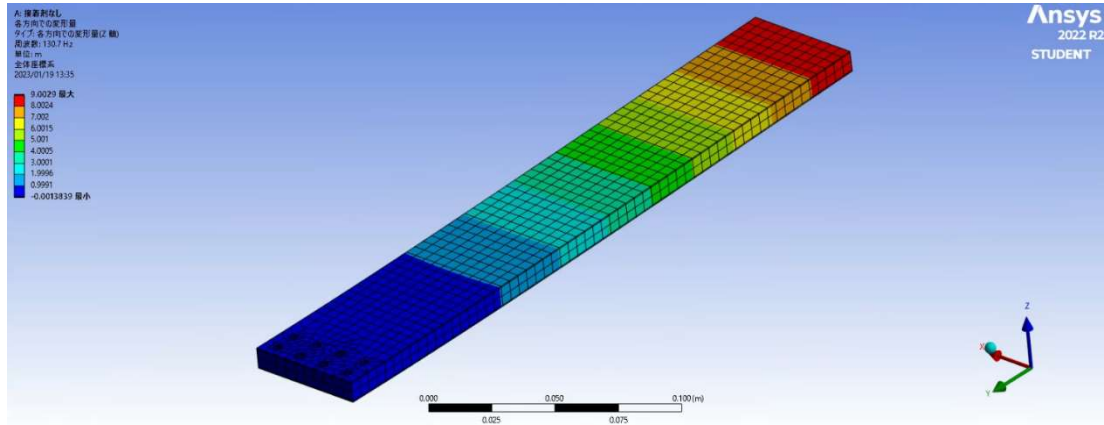


図 3-17 接着剤無の 1 次モード (130.7 Hz)

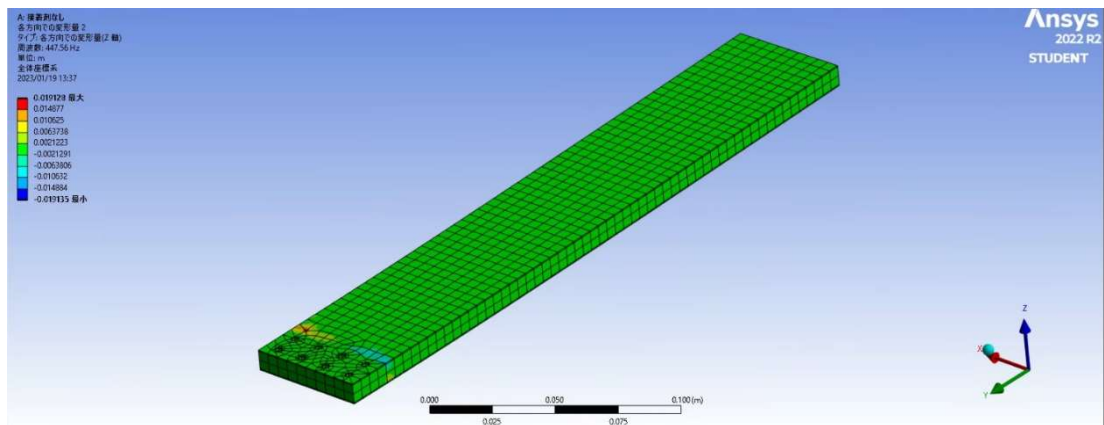


図 3-18 接着剤無の 2 次モード (447.6 Hz)

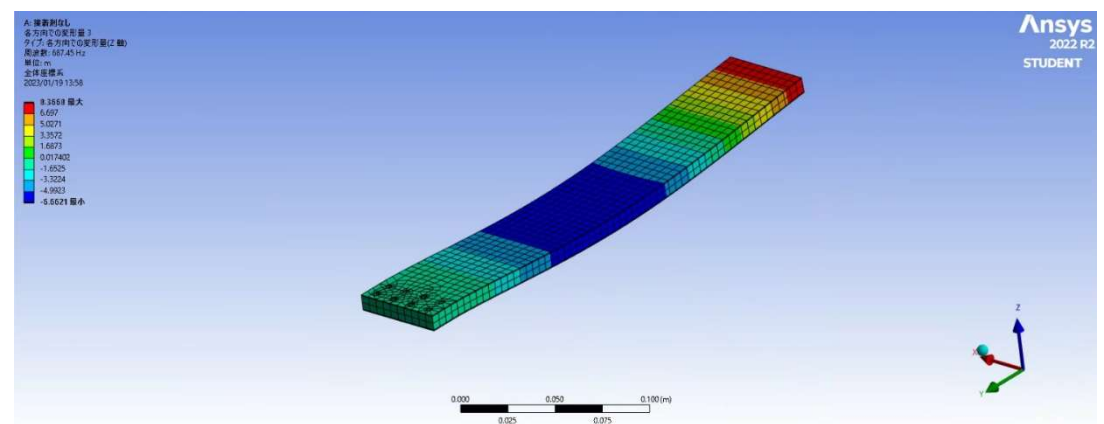


図 3-19 接着剤無の 3 次モード (687.6 Hz)



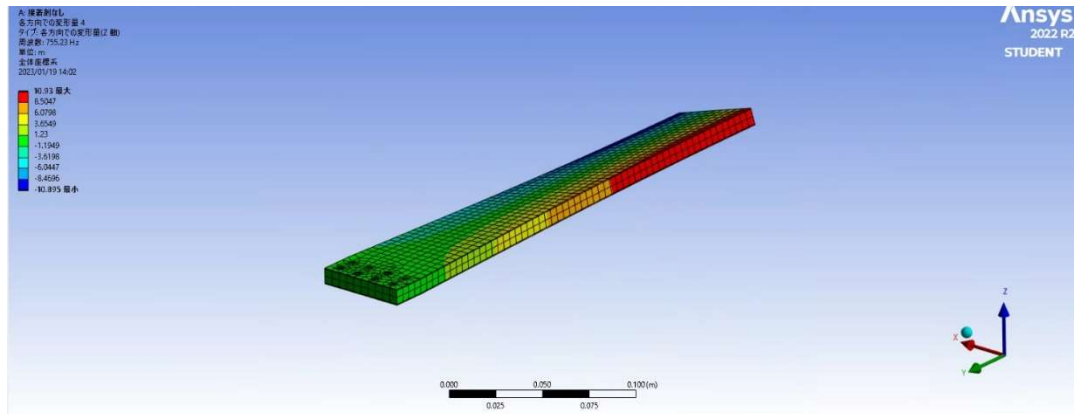


図 3-20 接着剤無の 4 次モード (755.2 Hz)

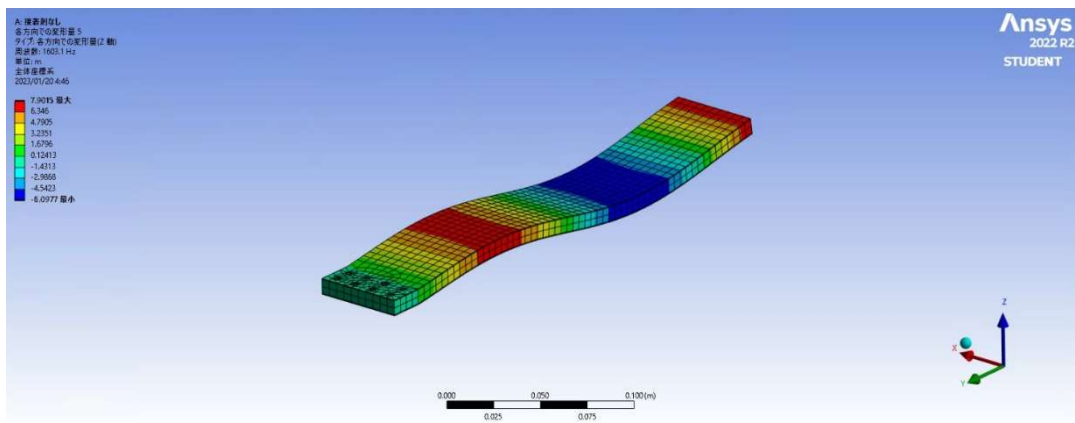


図 3-21 接着剤無の 5 次モード (1,603 Hz)

接着剤有の固有モードを図 4-22～4-38 に示す。またすべてのハニカムパネルの固有振動数を表 4-6 に示す。

## H1, H2 の固有モード

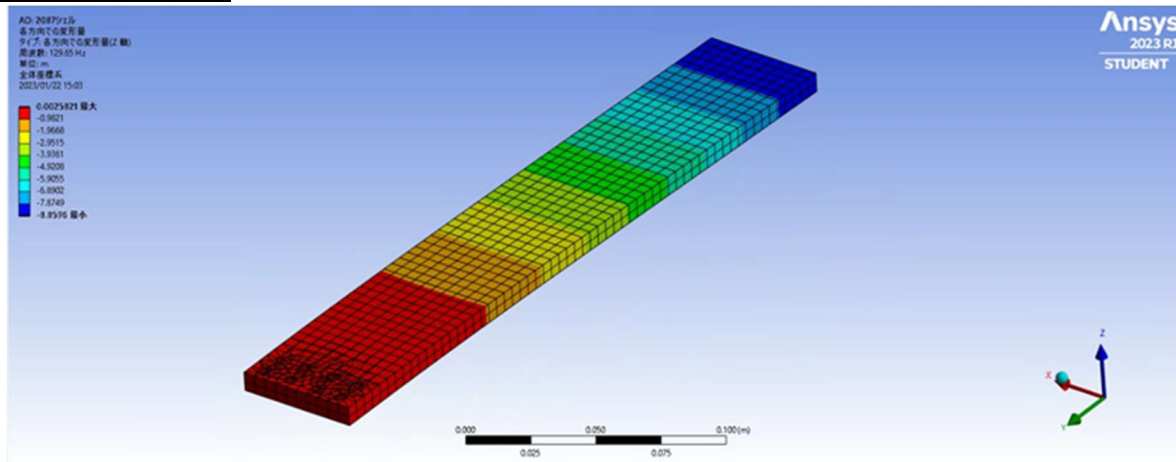


図 3-22 H1, H2 の 1 次モード (129.7 Hz)

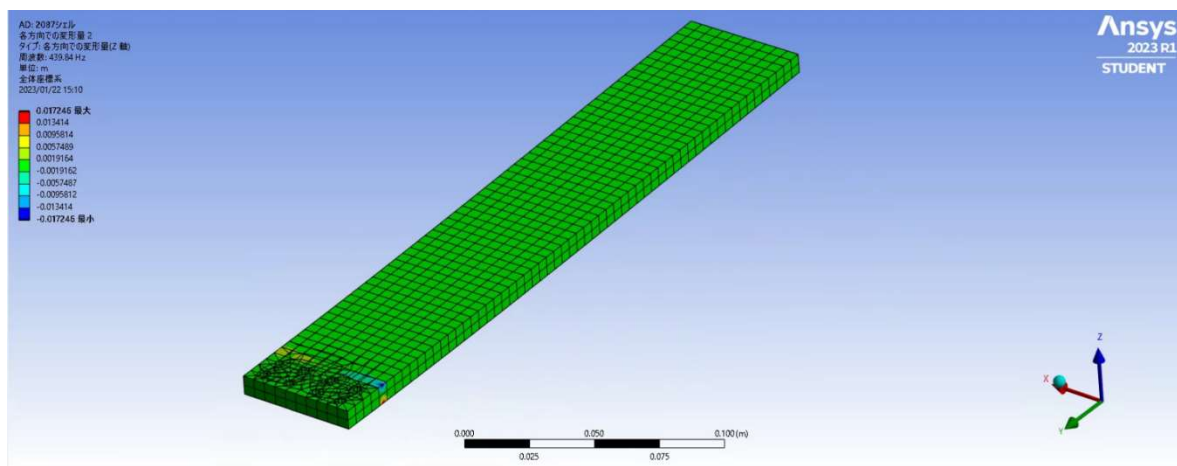


図 3-23 H1, H2 の 2 次モード (439.8 Hz)

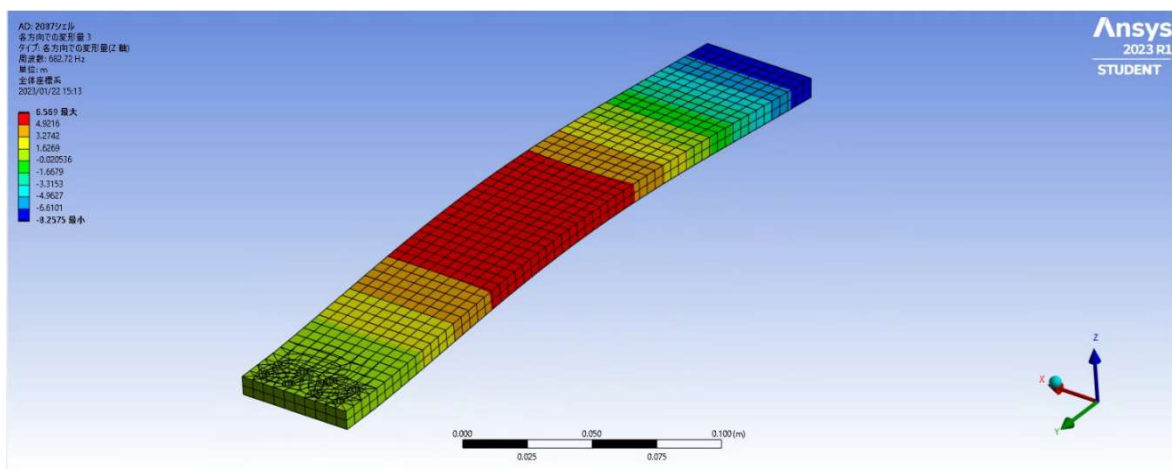


図 3-24 H1, H2 の 3 次モード (682.7 Hz)

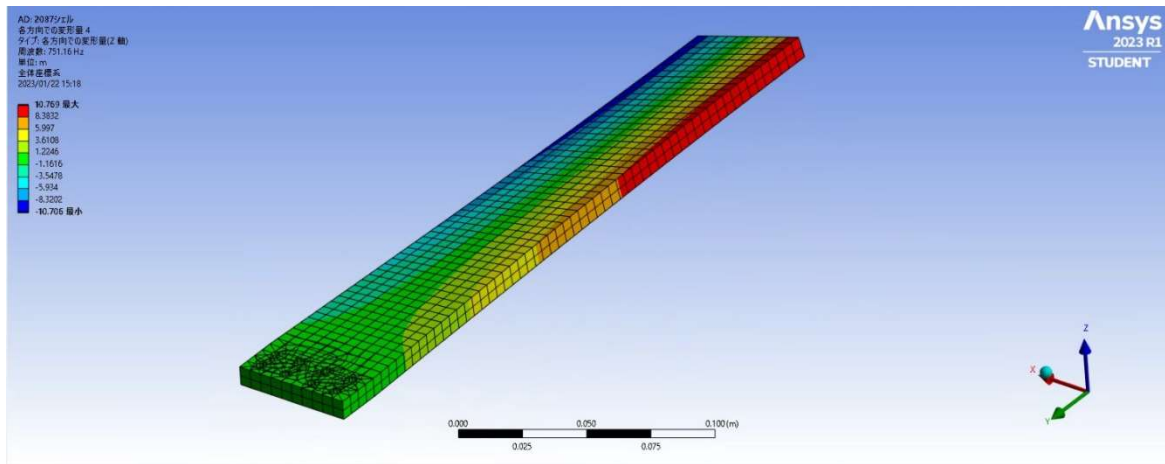


図 3-25 H1, H2 の 4 次モード (751.2 Hz)

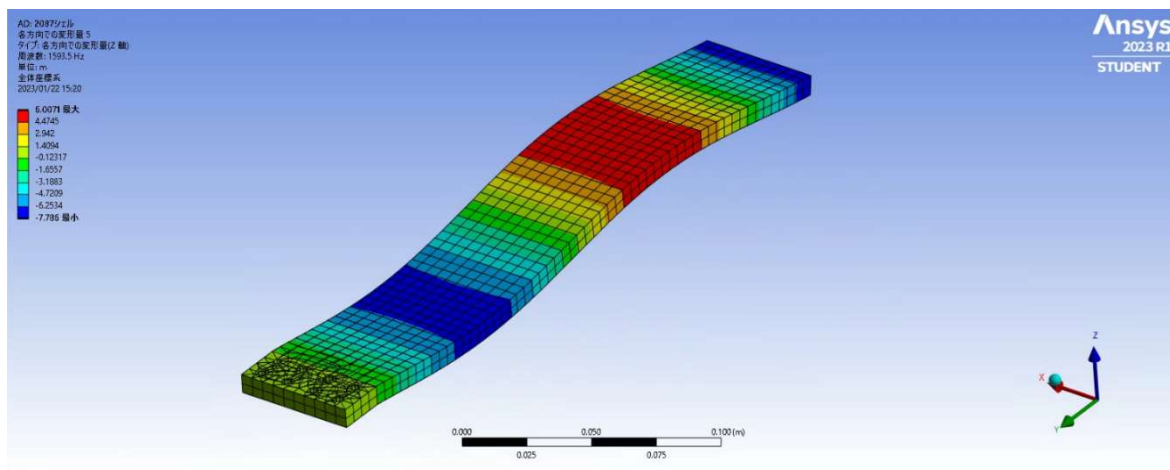


図 3-26 H1, H2 の 5 次モード (1594 Hz)

## M1, M2 の固有モード

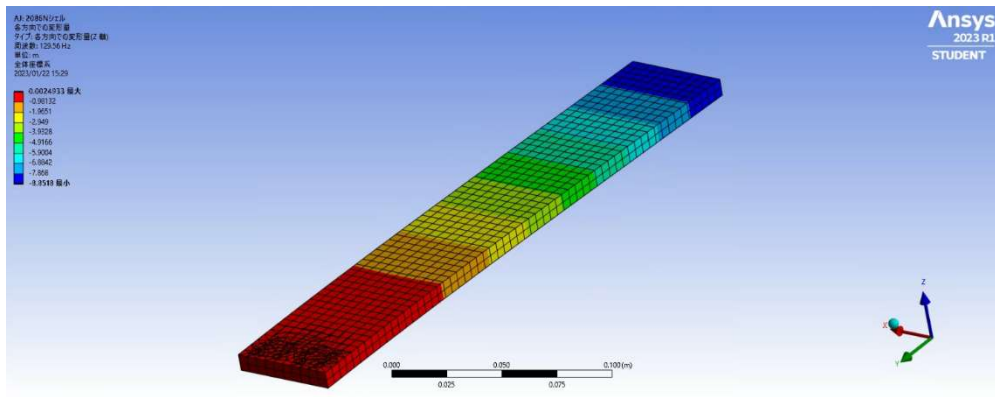


図 3-27 M1, M2 の 1 次モード (129.6 Hz)

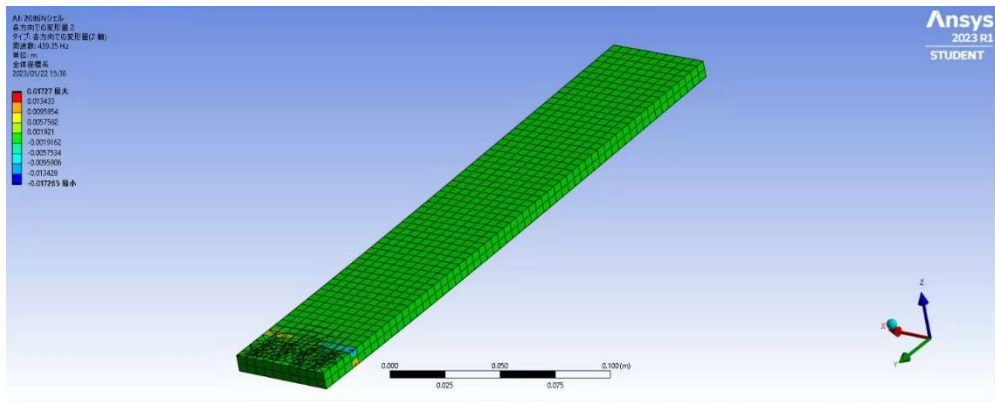


図 3-28 M1, M2 の 2 次モード (439.4 Hz)

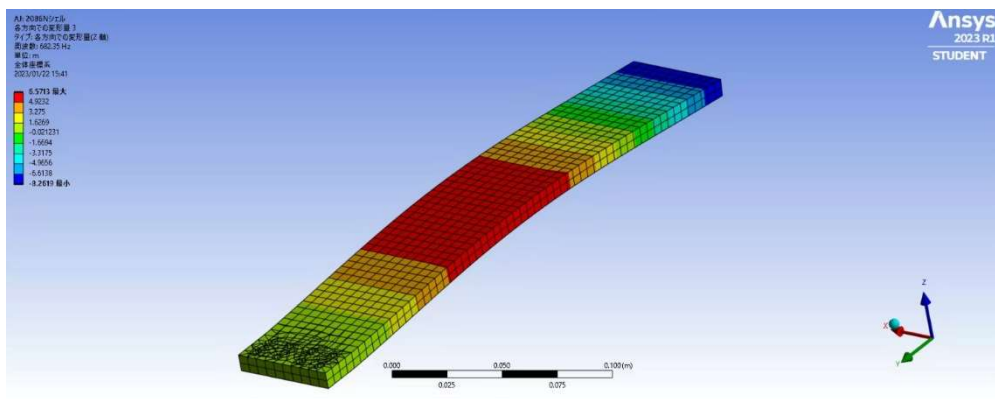


図 3-29 M1, M2 の 3 次モード (682.4 Hz)

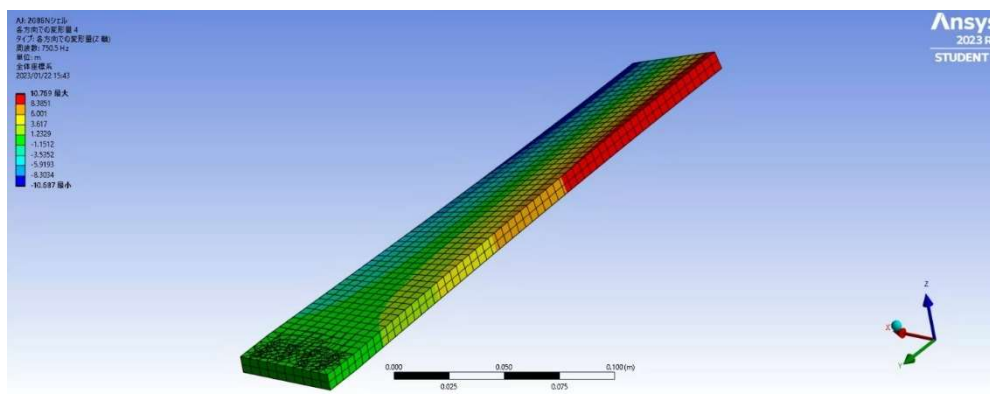


図 3-30 M1, M2 の 4 次モード (750.5 Hz)

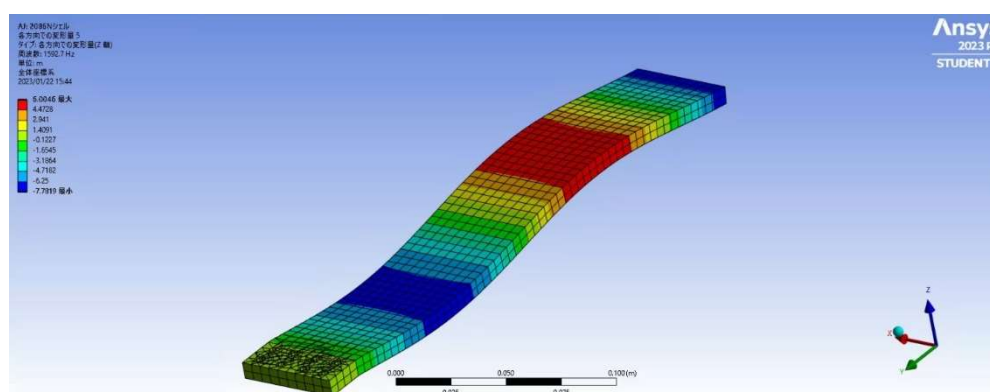


図 3-31 M1, M2 の 5 次モード (1,593 Hz)

## S1, S2 の固有モード

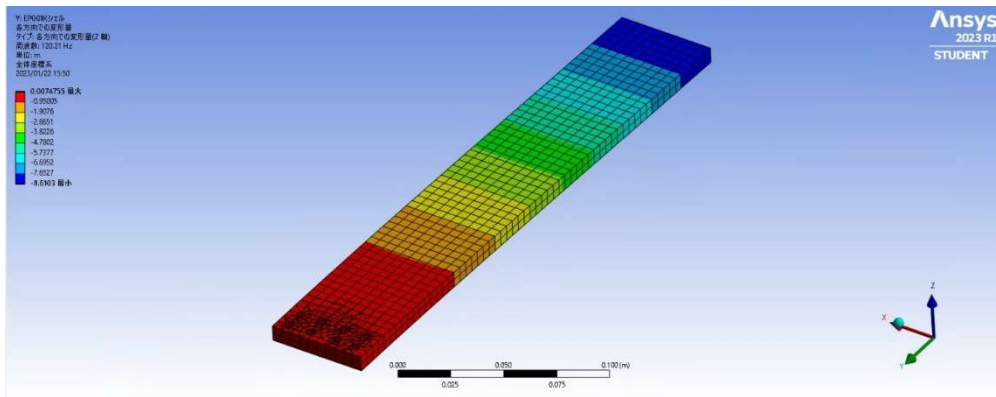


図 3-32 S1, S2 の 1 次モード (120.2 Hz)

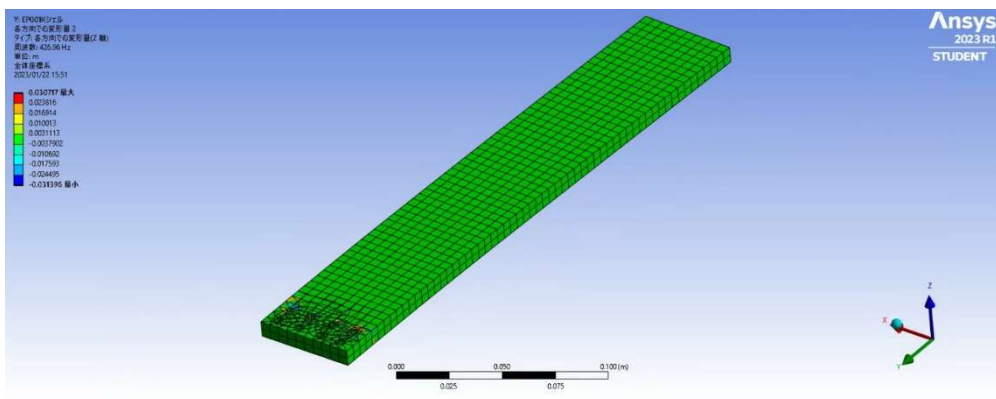


図 3-33 S1, S2 の 2 次モード (427.0 Hz)

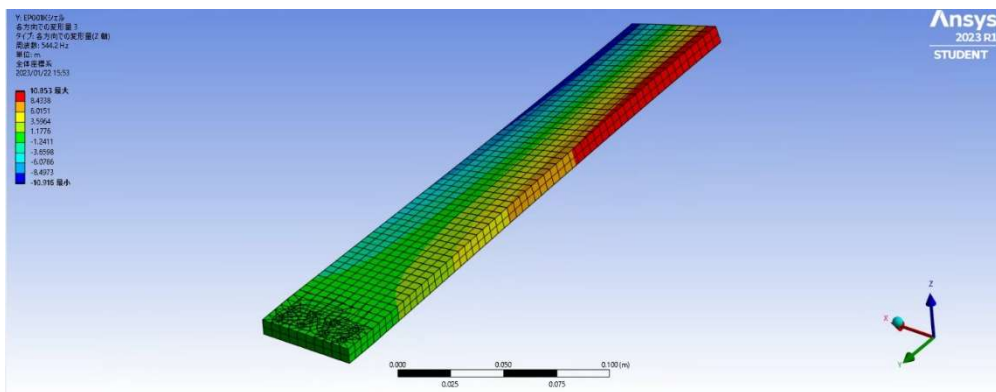


図 3-34 S1, S2 の 3 次モード (544.2 Hz)

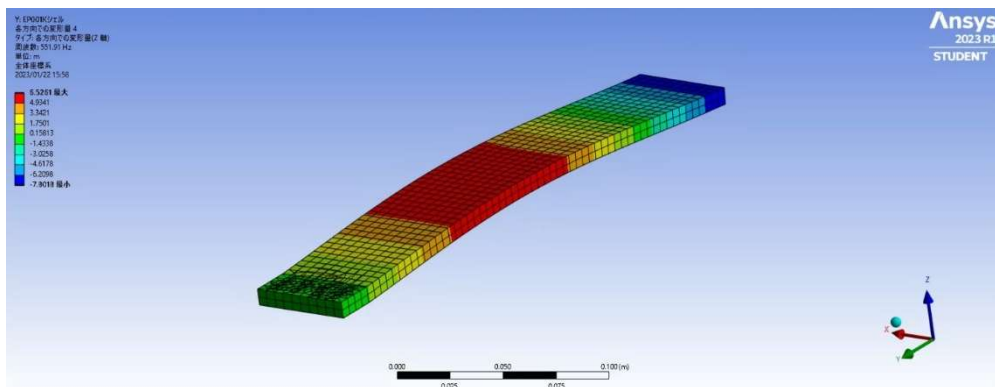


図 3-35 S1, S2 の 4 次モード (551.9 Hz)

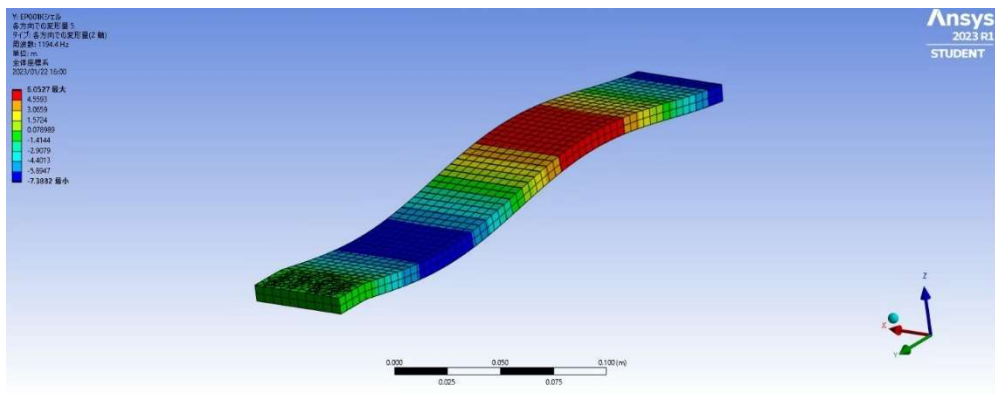


図 3-36 S1, S2 の 5 次モード (1194 Hz)

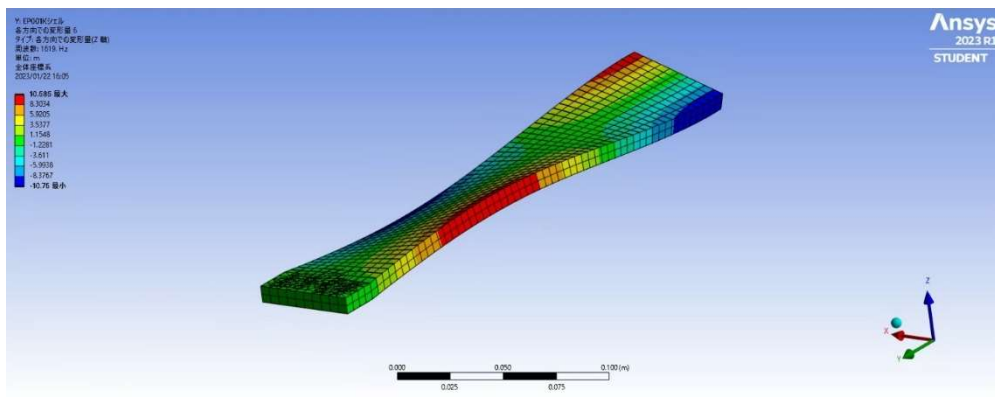


図 3-37 S1, S2 の 6 次モード (1,619 Hz)



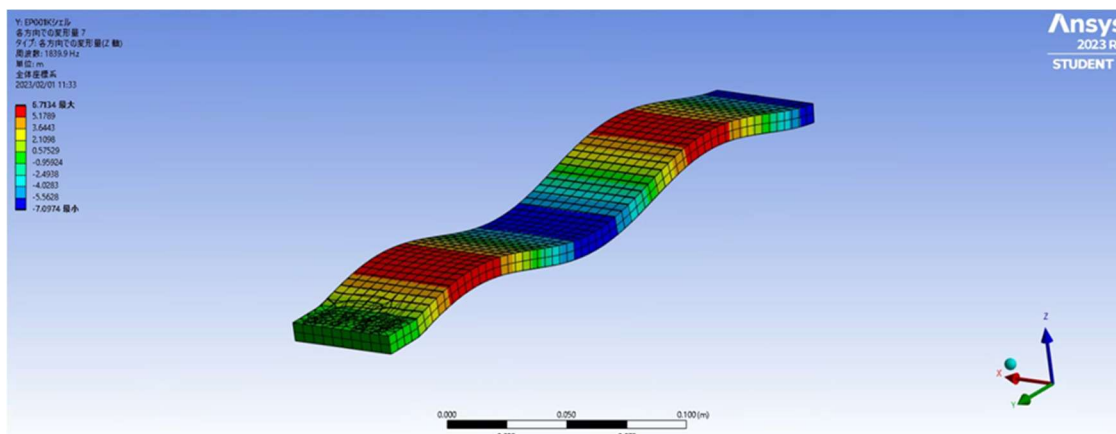


図 3-38 S1, S2 の 7 次モード (1,820 Hz)

表 3-6 固有振動数

	接着剤無し	H1・H2 (H)	M1・M2 (M)	S1・S2 (S)
モード次数	固有振動数[Hz]			
1	130.7	129.7	129.6	120.2
2	447.6	439.8	439.4	427.0
3	687.5	682.7	682.4	544.2
4	755.2	751.2	750.5	551.9
5	1,603	1,594	1,593	1,194
6	≥2,000	≥2,000	≥2,000	1,619
7	≥2,000	≥2,000	≥2,000	1,840

モーダル解析の結果として固有振動数および固有モードを得た。接着剤無ハニカムパネルと接着剤を一般的なエポキシ接着剤として定義した H ハニカムパネルの差は 0.765%, M では 0.841% となり, 1% 以内に収めることが出来た。一般的なハニカムパネルに適用されるエポキシ接着剤を使用したハニカムパネルに関しては固有振動数においても高精度で解析ができることがわかった。固有モードについては接着剤無と有ではコンター図が大きく異なっているが, これは符号が違っただけで同じ挙動を示す。

剛性においては、接着剤なし、H、M では一次固有振動数が、129.6~130.7Hz であるのに対し、粘弾性接着剤ハニカムパネル S では 120.2Hz であることから、接着剤を柔軟な材質に変えることによる剛性の低下は無視できない可能性が大きいことが分かった。2,000Hz 以内の固有モードも接着剤無・H・M では 5 次までなのに対し、S1、S2 においては、7 次となっているため剛性の低下が大きく発生する可能性があることが分かった。



### 3.3.7 周波数応答解析の結果

20～2000Hz で周波数応答解析を行った．結果として果として応答倍率-周波数[Hz]のグラフを示す．周波数応答解析の結果から，モデル解析の結果を参照すると，接着剤無および H, M に関しては 1 次, 3 次, 5 次のモードにおいて加振方向の振動をしていることが分かった．S1 に関しては 1 次, 4 次, 5 次, 7 次のモードにおいて加振方向の振動をしていることが分かった．

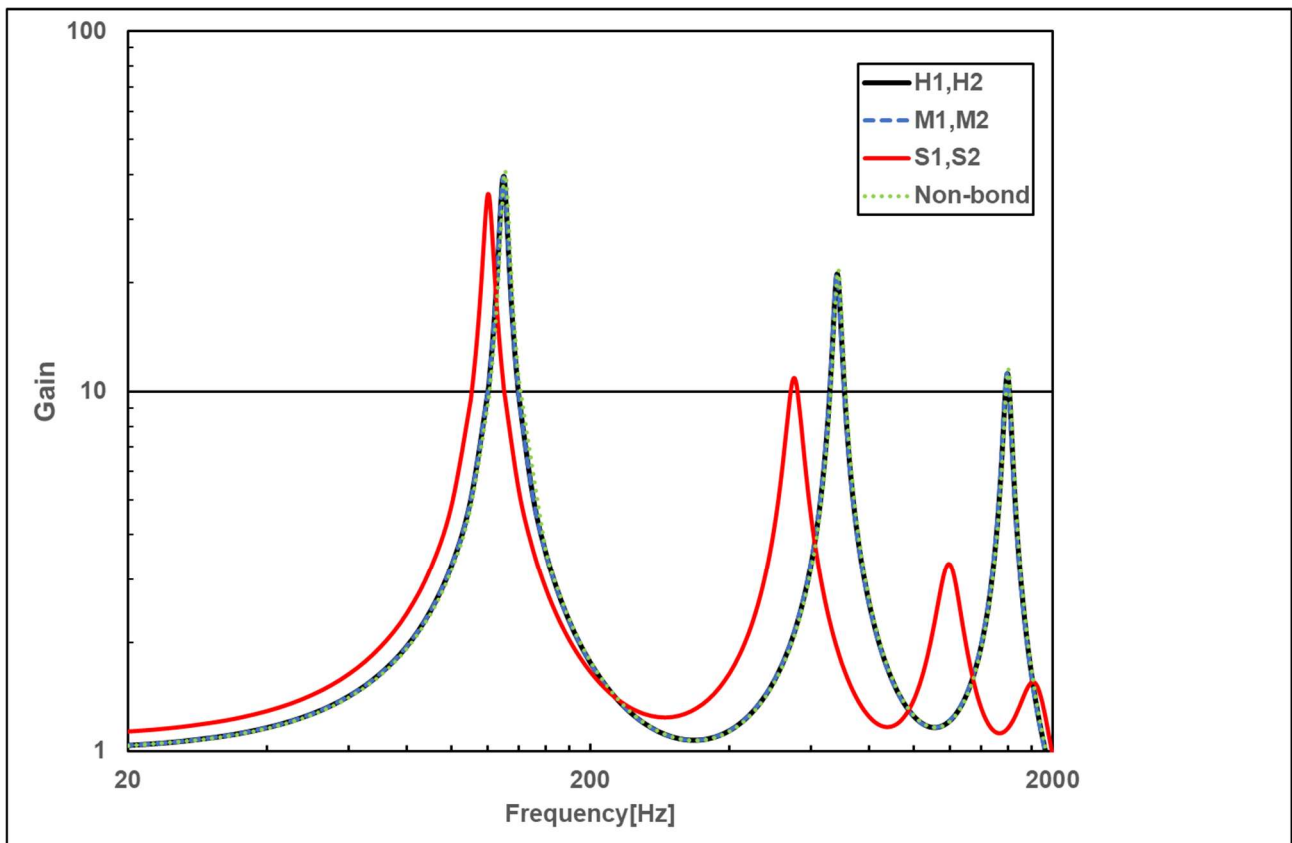


図 3-39 周波数応答解析の結果

### 3.4 振動試験

本論文では、ハニカムパネルの振動特性を確認するため、モーダルサーベイ振動試験を行った。

#### 3.4.1 実験目的

使用した接着剤ごとにハニカムパネルの振動応答を確認し、共振周波数および応答倍率のピーク値を確認し、減衰比を算出し、粘弾性接着剤ハニカムパネルの減衰特性を確認する。

#### 3.4.2 実験方法

加振機の簡単なシステム構成を以下に示す。



図 3-40 加振機のシステム構成 <sup>32)</sup>

加振機はIMV社製の低騒音小型振動シミュレータ m06/MA1 (図 4-41) を使用した。制御用ピックアップは付属の圧電式加速度ピックアップ VP-32 (図 4-42) を使用し、電力増幅器は同社の MA1-CE (図 4-43 下) を使用し、振動制御器は K2 sprint (図 4-43 上) を使用した。



図 3-41 低騒音小型振動シミュレータ m06/MA1



図 3-42 圧電式加速度ピックアップ VP-32<sup>33)</sup>



図 3-43 電力増幅器 MA1-CE(下)と振動制御器 K2 sprint(上)

加振機の振動台上のシステム構成を以下の図 4-44 に示す.

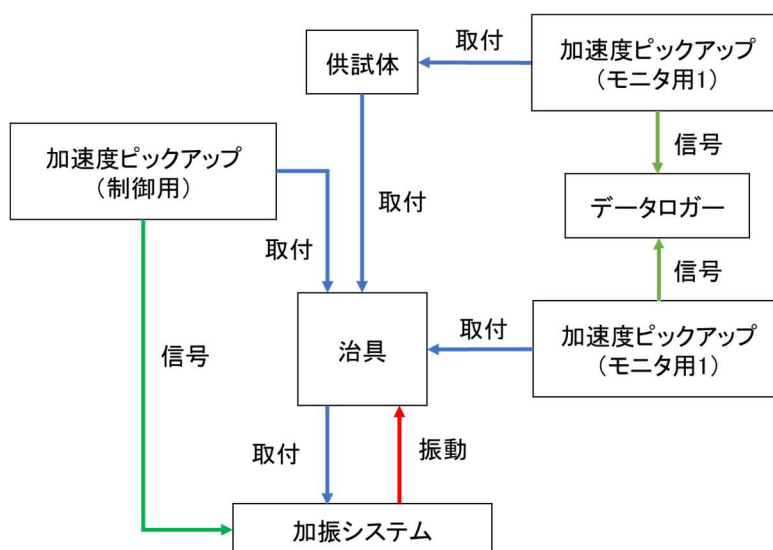


図 3-44 振動台上のシステム構成

治具は振動台の寸法（図 4-45）に合わせて製作した A2017 製の治具を使用した。治具は m060 のマニュアルの参考トルクをベースに M6 ボルトで 7.2 N-m で締結した。図 4-46 のように治具上にモニタ用の EMIC 社製の加速度ピックアップ 710-A および、制御用加速度ピックアップを設置した。



図 3-45 振動台（治具取付部）の寸法 <sup>34)</sup>



図 3-46 機器の取付

データロガーは KEYENCE 社製の NR-500 シリーズを使用した。NR-500 はパソコン接続，トリガ入力などの外部接続のためのユニットであり，50kHz 応答の外部同期入力を備え従来では同期計測できなかった高速サンプリングに対応している。NR-CA04 は圧電素子型の加速度センサを直接接続できる加速度計測ユニットであり，電荷出力型加速度センサおよび電圧出力型（プリアンプ内蔵型）加速度センサの両方に対応している。一般的な NR-500 シリーズのシステム構成を図に示す。本研究では，NR-500 インターフェースユニット（標準セット）および NR-CA04（加速度計測ユニット）のみを使用した。

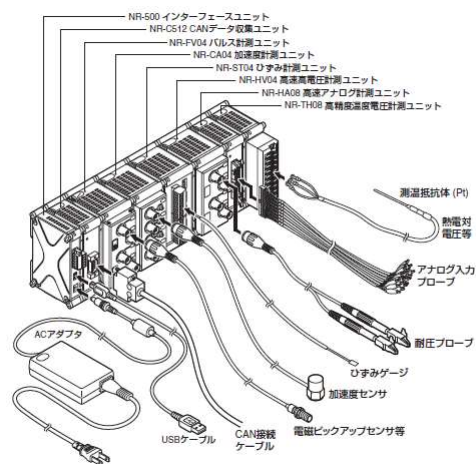


図 3-47 NR-500 シリーズのシステム構成 <sup>35)</sup>



図 3-48 使用したデータロガー

治具のモニタ用の加速度ピックアップは CH1 に，制御用のピックアップを設置した。また，治具上にハニカムパネルを M4 ボルト(SUS304)で治具(A2017)に 0.5T 系列(0.76N\*m)で締結した。実験は片持ちのハニカムパネルの自由端の端辺の中央から，長手方向 3mm の位置に加速度ピックアップ 710-A(CH-2)を設置し，応答加速度データを取得した(図)。実験装置の外観は図のように片持ちのモデルで行われる。

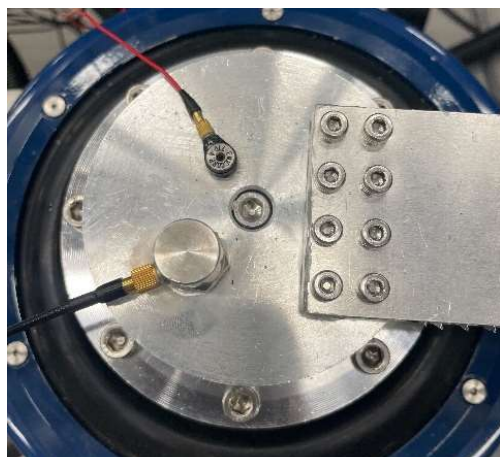


図 3-49 ハニカムパネルのボルト取付部



図 3-50 実験装置の外観



振動試験は、共振点における減衰特性を確認する目的でモーダルサーベイ振動試験を行った。実際の衛星での環境試験では主にランダム振動試験が行われるが、周波数特性を確認する目的で正弦波スイープのモーダルサーベイ試験を実施した。本論文では、治具特試験(治具のみの振動試験)にて、共振などの異常を確認した後、供試体のハニカムパネルを取り付け、振動試験を行った。表 4-7 に振動試験のデータ収集条件を示す。

表 3-7 実験条件

周波数範囲	5~2000Hz
掃引速度	2 oct/min
加振加速度	0.5G (定レベル)
加振方向	図の矢印方向
サンプリング周波数	10000Hz

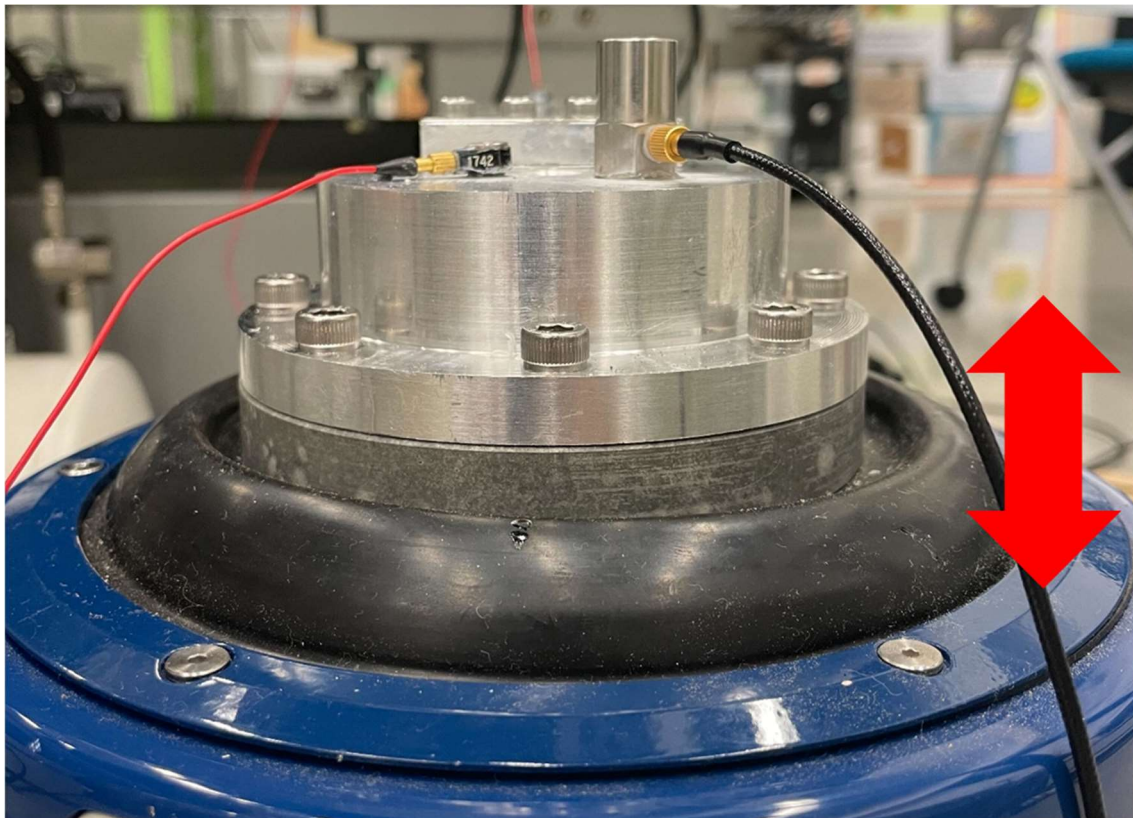


図 3-51 加振方向

### 3.4.3 振動試験の結果と考察

#### 治具特試験

振動試験は先述の振動条件で治具特試験および 3 種のハニカムパネル(合計 6 枚)のモーダルサーベイ振動試験を行った。結果として治具特試験の結果として加速度[m/s<sup>2</sup>]-周波数[Hz]のグラフを図に示す。

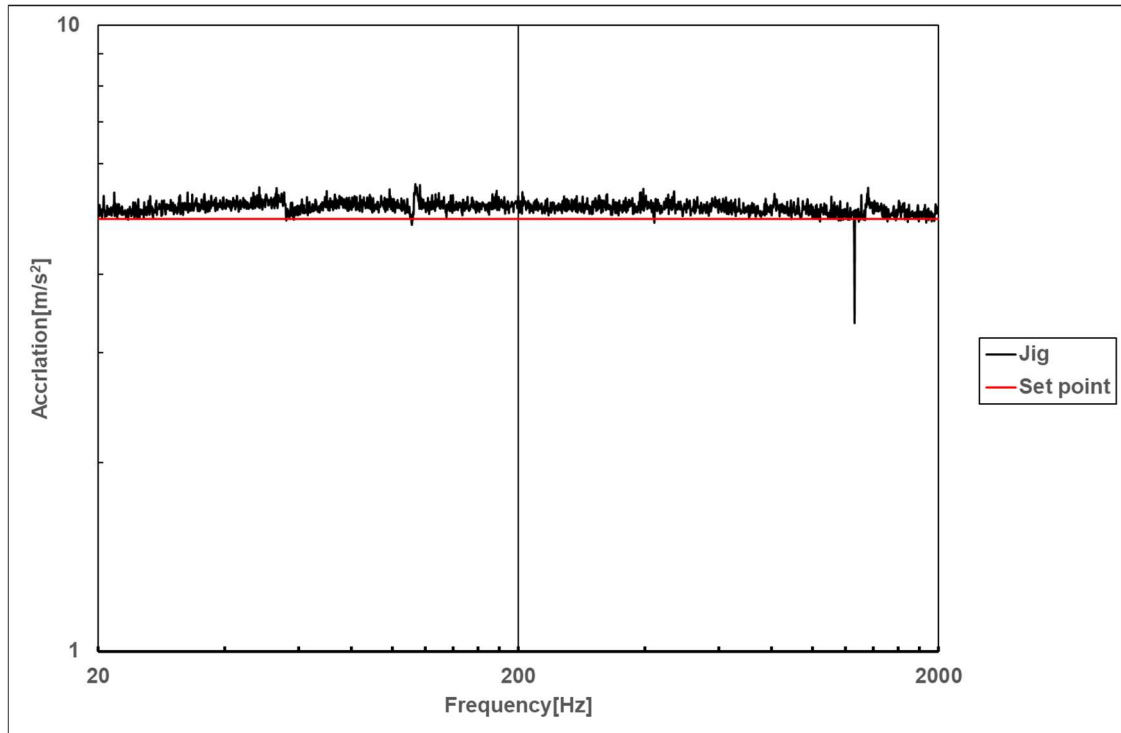


図 3-52 治具特試験の結果

治具特試験では、20~2000Hz で共振を確認できなかったことがわかった。目標の出力も問題なく出ていることを確認した。40 モーダルサーベイ試験を実施した。

### ハニカムパネルのモーダルサーベイ振動試験

治具特試験により，治具のみでは共振点がないことを確認したうえでハニカムパネルのモーダルサーベイ振動試験を行った．そこでモーダルサーベイ振動試験を実施した．ハニカムパネルの振動試験の結果として応答倍率-周波数[Hz]のグラフを示す．3つのピーク値において算出した損失係数 $\eta$ および減衰比 $\zeta$ を示す．

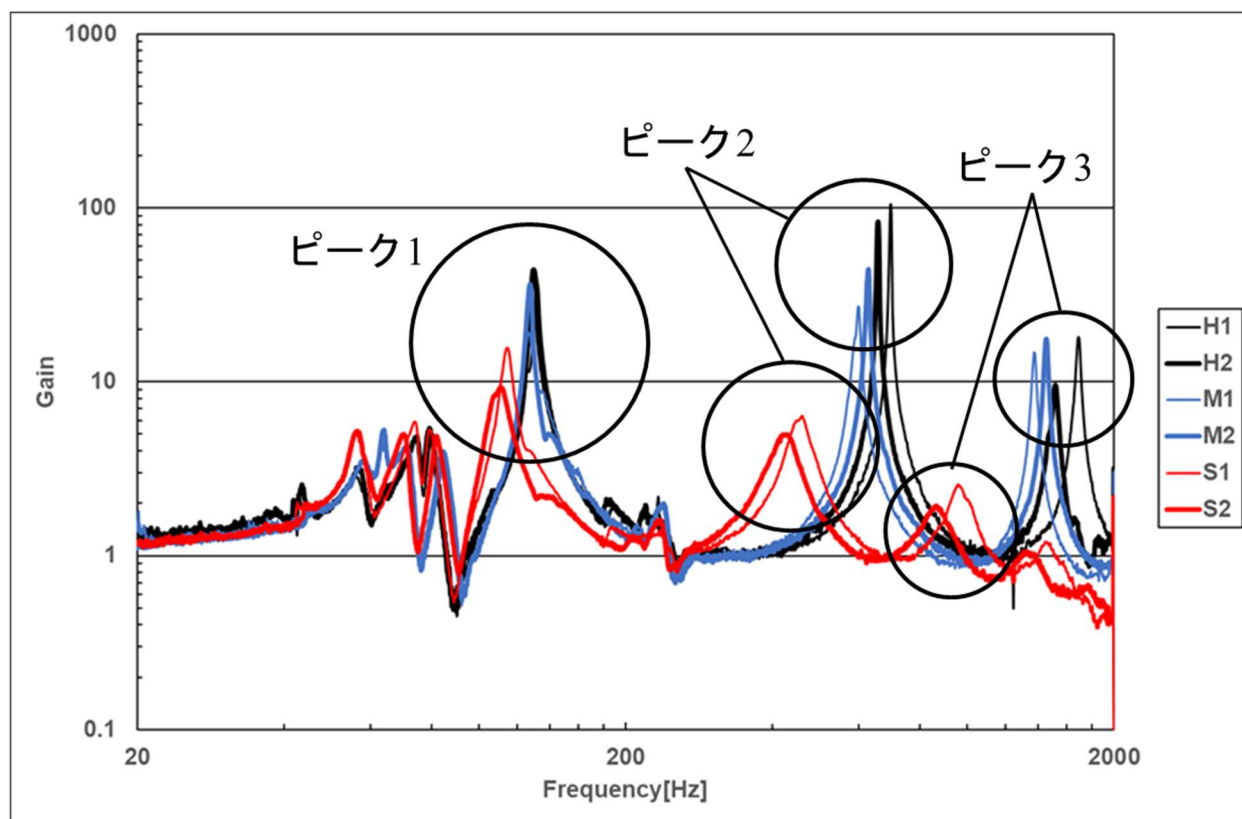


表 3-8 ピーク 1

	$f_n$ [Hz]	$G_p$	$\eta$	$\zeta$
H1	132.1	36.55	0.02175	0.01086
H2	129.7	44.12	0.02394	0.01197
M1	126.7	19.02	0.04089	0.02045
M2	127.3	36.35	0.02419	0.01209
S1	114.5	15.68	0.04436	0.02218
S2	110.8	9.339	0.1005	0.05023



表 3-9 ピーク 2

	$f_n[\text{Hz}]$	$G_p$	$\eta$	$\zeta$
H1	697.1	104.8	0.009355	0.004678
H2	658.0	83.17	0.007017	0.003509
M1	599.9	27.06	0.020622	0.01031
M2	628.3	44.42	0.01185	0.005925
S1	459.9	6.367	0.1238	0.06189
S2	427.1	4.988	0.1669	0.08346

表 3-10 ピーク 3

	$f_n[\text{Hz}]$	$G_p$	$\eta$	$\zeta$
H1	1693	18.05	0.01777	0.008887
H2	1515	9.580	0.02755	0.01377
M1	1372	14.72	0.022848	0.01142
M2	1453	17.63	0.017455	0.008727
S1	956.7	2.559	0.3926	0.1963
S2	866.2	1.935	0.2179	0.1089

実験結果と解析の結果を比較すると、解析によって求めた固有振動数とモード形状、周波数応答解析の結果から、解析同様に振動方向の加速度データを算出していることから、よりピーク 1 は一次モード、ピーク 2 は三次モード、ピーク 3 は五次モード（S1、S2 では 4 次モード）であることが考えられる。また、解析手法の評価として以下に解析結果の固有振動数で実験結果を除いた誤差率を算出した（表 4-11）。

表 3-11 固有振動数の誤差率

	ピーク 1	ピーク 2	ピーク 3
H1	1.83%	1.41%	6.20%
H2	-0.0305%	-4.32%	-4.95%
M1	-2.24%	12.1%	-13.9%
M2	-1.79%	-7.93%	-8.76%
S1	-4.78%	-16.7%	-19.9%
S2	-7.81%	-22.6%	-20.2%

H1, H2 では非常に高い精度で解析できることが分かった。M1、M2 や S1、S2 では、ピーク 2、ピーク 3 では 10%以上となり、柔軟な接着剤では非常に大きくなる。現状の解析手法では、一次固有振動数では、誤差率は 13%近くまでであることから、現状 10%以内に収まっていることから、実際に利用可能である<sup>11)</sup>。しかしながら、本論文で行った接着層の厚みは妥当性が低いため、実際に測定するためにはコストと時間がかかってしまうため、おおよその値を推定する必要があるため、実現性を高めるために推定手法を確立する必要がある。

減衰効果に関して、定レベルでの加振を行っているため、H1、H2 では 1 次モードは理論上ではピーク値が最大の共振が発生するが、ピーク 2 の周波数帯ではピーク 1 よりも大きいことがわかった、そ

れに応じて減衰比もピーク 2 では減少している。3 次モードでは減衰比が上昇し、ピーク値の減少がみられる。M1, M2 も同様の結果が得られた。これらは剛性の高いエポキシ樹脂の接着剤特有の減衰特性であることが考えられるため、接着剤の動的粘弾性測定によって速度ごと（周波数ごと）に検証する必要がある。

粘弾性接着剤ハニカムパネル S1, S2 では、他のハニカムパネルと比較し、幅広い周波数帯で大きく減衰効果を有しており、振動減衰手段として非常に有効であることがわかった。特に減衰比が 0.02～0.2 近くまでと上昇していることが分かった。それに応じて高周波数域ではピーク値も著しく減衰していることが分かった。これはゴム材料特有の速度依存する粘性効果が大きく働いていることが考えられる。また、ハニカムパネルの構造上、接着剤はパネル全体に渡って塗布されることから、幅広い周波数帯の固有モードにも対応していることが考えられる。

## 第 4 章 結論

### 4.1 結論

人工衛星の構造部材を固体ダンパとして用いることで、搭載リソースを消費することなく、設計や製作の工数・工程に影響を及ぼすことなく、衛星構体自体で振動伝達を抑える新たな振動減衰構造材の実現を目指し、そこで本論文では、新たなアルミハニカムパネルでの減衰手法の提案を行い、シミュレーションと実験でその効果の確認を行った。結果として提案手法である粘弾性接着剤ハニカムパネルは、従来のハニカムパネルと比較し、面外方向加振における幅広い周波数帯において応答倍率のピーク値の低下や減衰比が大きいことから、減衰特性を有していることを明らかにした。

### 4.2 今後の課題

- 柔軟な粘弾性材料を接着剤とすることで、ハニカムパネルが大きく減衰効果を有しており、周波数ごとに減衰比が上昇していることが確認できた。その要因を調査する必要があるため、動的粘弾性測定を実施し、速度ごとに減衰特性を調査する。
- 面内方向加振における減衰特性を調査する。
- 同様に今回使用した、エポキシ樹脂接着剤の動的粘弾性測定を速度ごとに実施し、減衰特性を調査する。
- ハニカムパネルの幅広い周波数特性の原因として、どの固有モードに対しても、エネルギー散逸が行えることが考えられるが、それを検証するため、モーダル解析を参照し、局所的に粘弾性接着剤の位置を変え、同様の振動試験を行う。
- また粘弾性ハニカムパネルでは剛性の低下が見られたため、強度試験を実施する。
- 解析手法としては、高次のモードに対して精度を高めるため、厚みの推定方法や接着剤塗布部のモデリングなど検討する。
- 実現に向け、50kg 級の超小型衛星を模した箱型を製作し、実験する。

## 参考文献

- 1) K.M. Eldred, “Acoustic loads generated by the propulsion system,” NASA-SP-8072 (1971).E.E Whiting,:An Emprical Approximation to the voigt profile, NASA, 1968, pp.1-6
- 2) 施 勤忠: 人工衛星の音響振動試験装置, 日本音響学会誌 72 巻 9 号 (2016), pp. 586–587.
- 3) 宇宙航空研究開発機構 環境試験技術ユニット 高橋大祐: 宇宙機の環境試験における不具合分析による試験の有効性評価や課題解決に向けた取り組み, 環境試験技術報告 第 16 回試験技術ワークショップ開催報告, 2018.
- 4) Private communication with Morio Shimizu, National Aerospace Laboratory of Japan (NAL), 2002.
- 5) 大久保洋志, 他: 粘着層付き薄膜を有する制振機構に関する研究”, 日本航空宇宙学会論文集, 第 53 巻, 第 613 号, pp. 43 – 50, 2005 年.
- 6) 中村真人, 他, “50kg 級小型衛星構体の振動低減対策”, 日本航空宇宙学会論文集, 第 56 巻, 第 652 号, pp. 244 – 247, 2008 年.
- 7) Private communication with ARTEC AEROSPACE, Toulouse, France, Dec. 14, 2011.
- 8) Kentaro Shirai, Hironori Sahara, Research on Vibration Control to Mitigate Mechanical Environment Inside Satellites, ISTS 33<sup>rd</sup>, Feb. 28,2022.
- 9) 入江敏彦, 小林幸徳: 機械振動学通論, 朝倉書店, 2006, pp.47-51.
- 10) 首都大学東京, 宇宙システム研究室 バイナリブラックホール衛星 ORBIS, [cited on Jan 8, 2023]. <https://www.comp.sd.tmu.ac.jp/ssl/orbis/STR.html>, [cited on Jan. 5, 2020.]
- 11) 先端材料技術協会/野口元監修: ハニカム構造の応用と機能ーハニカム構造材料からナノハニカムまでー, シーエムシー出版, P.26, 2008.
- 12) 原賀康介: 反応型接着剤の電機・電子機器での応用, 接着の技術, Vol.17,No.1,64,1987.
- 13) 防振ゴムの特性, [https://www.swcc.co.jp/cs/products/tec\\_information/vib\\_rubber\\_cha.html](https://www.swcc.co.jp/cs/products/tec_information/vib_rubber_cha.html), [cited on Jan 8, 2023]
- 14) 長松 昌男・長松 昭男 共著: 実用モード解析入門,コロナ社, P.91~P94, 2018,1,18
- 15) CAE 用語: 構造減衰, <https://www.cybernet.co.jp/ansys/glossary/kouzougensui.html>, [cited on Jan 8, 2023].
- 16) 制振材料とその性能測定について (page2), [https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c\\_support/newreport/damp/damp\\_2.htm](https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/damp/damp_2.htm), [cited on Jan 8, 2023]
- 17) 小笠原永久, 他: 簡易モデルを用いたハニカムサンドウィッチ構造材料の弾塑性解析, 日本機械学会論文集(A編) 64 巻 624 号,1998.8
- 18) L.J. Gibson, M.F. Ashby, セル構造体ー多孔質材料の活用のために, 内田老鶴圃, 1993.6.1.
- 19) 齋藤慎哉, 解析報告書, 豊橋技術科学大学, 2009.10.31.
- 20) のりへラー井上工具株式会社, [https://inoue-kougu.co.jp/blog/product\\_type/%E3%81%AE%E3%82%8A%E3%83%98%E3%83%A9/](https://inoue-kougu.co.jp/blog/product_type/%E3%81%AE%E3%82%8A%E3%83%98%E3%83%A9/).
- 21) ANSYS, <https://www.ansys.com/ja-jp>, [cited on jan 8, 2022]
- 22) CYBERNET, はじめての振動解析(1)ー振動の基礎とモーダル解析ー, Mechanical CAE News Vol.31.
- 23) CYBERNET, はじめての振動解析(2)ー周波数応答解析・モード重ね合わせ法ー, Mechanical CAE News Vol.31.
- 24) 二液常温硬化型構造用接着剤, <https://www.monotaro.com/g/00016759/>, [cited on Jan. 5, 2020.]
- 25) 株式会社スリーボンド: 技術資料スリーボンド 2 0 8 6 N低温硬化型二液性エポキシ樹脂接着剤, 2003.10.23.
- 26) EP001K, <https://www.cemedine.co.jp/technology/epoxy/ep001/ep001k.html>, [cited on Jan. 8, 2023.]
- 27) 日本機械学会: 振動のダンピング技術, 養賢堂, (1998) p15.
- 28) 日本学術振興会「材料の微細組織と機能性」, 材料の振動減衰能データブック, 朝倉書店, 2007,11,1.

- 29) 制振材料とその性能測定について(page1),  
[https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c\\_support/newreport/damp/damp\\_1.htm](https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/damp/damp_1.htm), [cited on Jan 8, 2023]
- 30) CAE 用語 ソリッド要素,  
<https://www.cybernet.co.jp/ansys/glossary/solidyouso.html#:~:text=%E3%82%BD%E3%83%AA%E3%83%83%E3%83%89%E8%A6%81%E7%B4%A0%E3%81%A8%E3%81%AF%E3%80%813,%E3%81%8C%E3%82%88%E3%81%8F%E4%BD%BF%E3%82%8F%E3%82%8C%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82.>
- 31) 西脇 剛史, 見考 弘, 前川 善一郎: ハニカムサンドウィッチパネルの固有振動解析手法, 日本複合材料学会誌, 2001, 5, 27, pp230-236
- 32) CAE 用語 シェル要素,  
<https://www.cybernet.co.jp/ansys/glossary/shellyouso.html#:~:text=%E3%82%B7%E3%82%A7%E3%83%AB%E8%A6%81%E7%B4%A0%E3%81%A8%E3%81%AF%E3%80%81%E8%A6%8B%E3%81%9F%E7%9B%AE,%E5%AF%BE%E3%81%97%E3%81%A6%E4%BD%9C%E6%88%90%E3%81%97%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82.>
- 33) 圧電式加速度ピックアップ-振動系-IMV 株式会社,  
<https://www.imv.co.th/products/vibrograph/pickup/e-comp/>, [cited on Jan. 8, 2023.]
- 34) 低騒音小型振動試験装置,  
[chrome-extension://efaidnbmnnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.imv.co.th/catalog\\_dl/pdf/m\\_series.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.imv.co.th/catalog_dl/pdf/m_series.pdf),  
[cited on Jan. 8, 2023.]
- 35) 株式会社キーエンス, マルチユニット対応データ収集システム NR-500 シリーズユーザーズマニュアル, 2015, 5.
- 36) 制振材料とその性能測定について(page1),  
[https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c\\_support/newreport/damp/damp\\_1.htm](https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/damp/damp_1.htm), [cited on Jan 8, 2023]
- 37) 中村 智也: 固体接触部のエネルギー散逸機構の解明とダンパへの応用, 九州大学学術情報リポジトリ, 2017.

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，2 年間にわたってご指導をいただいた佐原宏典教授には深く感謝を申し上げます。また研究の指針を与えてくださった有限会社オービタルエンジニアリングの山口耕司様をはじめ関係者の皆様には，研究の機会と指針を与えてくださったことに大変感謝しております。

研究に関して未熟な私に多くの助言をくださった大島草太助教授，鳥阪綾子准教授，本当にありがとうございました。また研究室の先輩方や同期の皆様の，ひたむきに研究に取り組む姿は大きな刺激となり，研究に対する活力となりました。どんな時も優しく，時に笑わせてくれる素晴らしい同期や後輩に恵まれたことを実感し，ここで研究ができたことを大変嬉しく思います。誠にありがとうございました。

## 付録

粘弾性体の減衰手法の原理は、エネルギー散逸である。すべての材料は繰り返し荷重がかかる振動など動的現象において、微視的な内部摩擦などによって図 2-4 のように振動応答の遅れなどから荷重とひずみの関係は楕円（ヒステリシスループ）のような関係となる。このヒステリシスループの面積の大きさは 1 サイクルあたりに材料内部で熱として失われるエネルギーの大きさを表している。ここである材料を 1 自由度のダッシュポットおよび質量を有する系を対象とし、正弦加振力  $F_0 \sin \omega t$  が働く場合を考える（図 2-5）。

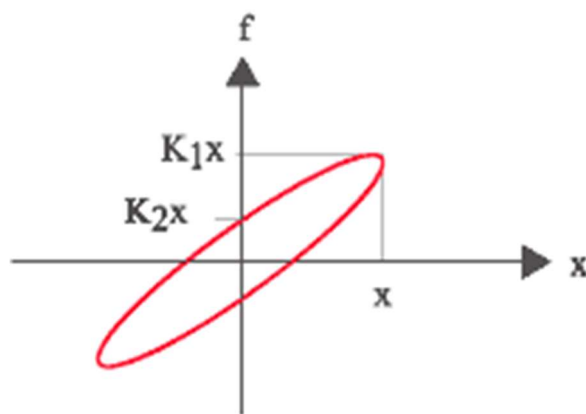


図 4-1 弾性ヒステリシスループ<sup>36)</sup>

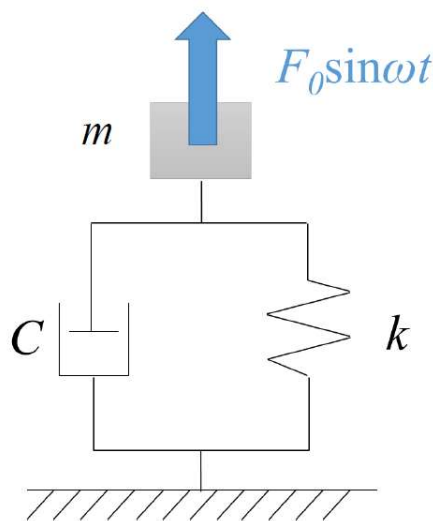


図 4-2 一自由度系の力学モデル<sup>37)</sup>

一自由度系のモデルの運動方程式は、以下の式で表せる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (4-1)$$

$m$ : 質量[kg]  
 $C$ : 粘性減衰係数[N・s/m]  
 $k$ : ばね定数[N/m]  
 $F_0$ : 最大加振力[N]

定常状態での変位は

$$x = A \sin(\omega t - \phi) \quad (4-2)$$

$A$ : 最大振幅[m]  
 $\omega$ : 固有円振動数[rad/s]  
 $\phi$ : 位相遅れ[rad]

となり、1 サイクル中に加振力によってなされる仕事 $\Delta E$ は、

$$\Delta E = \int_0^T F_0 \sin \omega t \cdot \dot{x} dt = \pi F_0 A \sin \phi \quad (4-3)$$

となる。減衰力によって散逸されるエネルギー $\Delta E_{loss}$ は

$$\Delta E_{loss} = \int_0^T c \dot{x} \cos \omega t \cdot \dot{x} dt = \pi c \omega A^2 \quad (4-4)$$

である。ここで共振時において位相遅れ  $\phi = \pi/2$  となり  $\sin \phi = 1$  となる。ここで  $\Delta E$ 、 $\Delta E_{loss}$  が等しいとすると、静たわみ  $A_{st}$  を導入し、共振振幅  $A_{max}$  を求めることが出来る。

$$A_{st} = F_0/k \quad (2-5)$$

$$A_{max} = F_0 C \omega_n = A_{st} 2\zeta \quad (4-6)$$

$\zeta$ : 減衰比

である。ここで、共振時の応答倍率は以下の式となる。

$$\frac{A_{max}}{A_{st}} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{\eta} \quad (2-7)$$

$\eta$  は損失係数であり、ヒステリシスループにおいて最大変位時の力と変位ゼロ時の力の比から求められ、エネルギー散逸量の大きさを表す面積の大きさを表す量である。また式 (2-7) の通り、共振点のピーク値の大きさを表し、減衰特性に大きく影響する係数である。