

大型構造物の振動耐久性評価・設計改善技術の開発（第2報）

Development of Technology for Evaluating Vibration Durability and Improving the Design of Large Structures (2nd Report)

材料技術部 金属・物性科 工藤弘行 西村将志 佐藤浩樹
材料技術部 機械・加工科 坂内駿平
電子・機械技術部 ロボット・制御科 近野裕太

本研究は、原子力・廃炉分野で使用されることの多い大型構造物の振動耐久性評価や設計改善に関する技術を開発するものである。2年目である本年度は、溶接構造体の疲労強度を設計段階でCAEにより推定する技術や、実大金属構造物の数分の1スケールに縮小した樹脂製ミニチュア試験体の振動特性から、実大金属構造物の振動特性を推定する「代替樹脂成形品による振動特性評価」について、実験およびCAE解析の両面から検討を行った。この結果、弾性率と密度の比率である「比弾性率」の違いに基づき、寸法スケール倍率を決定することで、同一の振動特性を得る手法を確立した。

Key words: ハンマリング振動試験、CAEモード解析、実験モード解析

1. 緒言

当所では、令和4年度から廃炉産業集積のため、技術的な側面の支援としてコンピュータ・シミュレーション(CAE)を活用し、県内企業の設計力・提案力の向上を支援する取り組みを行っている。

原子力、廃炉分野に共通する特徴のひとつとして、数mサイズ以上の大型構造物を扱う点が挙げられる。一方、CAE適用が難しい工学問題として、振動・衝撃などを扱う動解析がある。本来、このような場合は、CAEと対になる実験から何らかのフィードバックを得て、解析精度を高める必要があるが、廃炉分野の大型構造物は、場合によってはいわゆる「一品もの」であるなど、一般的な工業製品に比べて製造個数が極端に少ないため、実製品から設計へのフィードバックが働きづらい難点があり、廃炉産業への新規参入を妨げる一因となっている。

近年、3Dプリンタが普及し、設計段階において大型構造を縮小したミニチュアを作成する機会が増えているが、あくまで模型としての用途に限られ、製品の性能評価に用いられることはほとんどない。これに対し、本研究グループでは、振動特性が主に重量や剛性（バネ定数）に左右される点に着目し、実大金属構造物の数分の1スケールに縮小した樹脂製ミニチュア試験体の振動特性から、実大金属構造物の振動特性を推定する「代替樹脂成形品による振動特性評価技術」を提案した。これにより、前述した実製品から設計へのフィードバックが働きづらい難点を克服できるのではないかと考える。

一方、耐久性の面で最も問題が起きやすいの

は機械振動に起因する疲労破壊である。振動を受ける構造物では、共振現象の影響により定格の数倍の変形を生じることがある。特に問題が生じやすいのは形状的、材料的な弱点となる溶接部である。当所では、溶接部止端の局所ひずみを基準とした疲労強度評価手法に関する研究実績がある¹⁾。この手法は、試験体の共振現象を利用し、小さな加振力で破壊試験を行う点や、共振周波数の変化から早期の疲労亀裂の発生や進展を検知できる点が特徴である。

以上より、本研究では、廃炉分野での使用が想定される溶接部を持つ大型構造物への適用を目指し、製品を製造する前の設計の時点で、CAE技術を活用し耐振性や耐久性に優れた製品を設計する技術の開発を行った。2年目となる本年度は、溶接構造試験体の疲労強度の評価手法や、樹脂ミニチュア試験体の設計手法について、実験、CAEの両面から検討を行った。

2. 実験およびCAE解析

2. 1. 溶接構造試験体の製作

局所ひずみを基準とした疲労強度評価手法を適用するため、隅肉溶接部を持ち、振動荷重に対して溶接部止端で応力集中が生じるような溶接構造試験体を製作した。

図1に設計した溶接構造体のCAD図を示す。溶接構造試験体は、当所の振動試験機への取付けを前提にしておき、幅250[mm]×奥行250[mm]×板厚12[mm]のベースプレートに、幅100[mm]×奥行100[mm]×高さ600[mm]の箱型構造（角パイプ状）が取り付けられた構造である。リブのないAサンプルと、リブにより剛性を高めたBサンプルの2種類の試験体を製作した。

また、箱型構造とテーブルの境界部に補強を目的としたリブが取り付けられている。このリブは、箱型構造が片持ちはりの曲げ変形を受けるときに、図3に示す通り「構造的応力集中」が生じ、溶接止端部で疲労破壊が起こることを狙って設置している。リブの寸法は図2に示すように、幅30[mm]、高さ50[mm]である。なお、試験体の材質は炭素鋼とした。

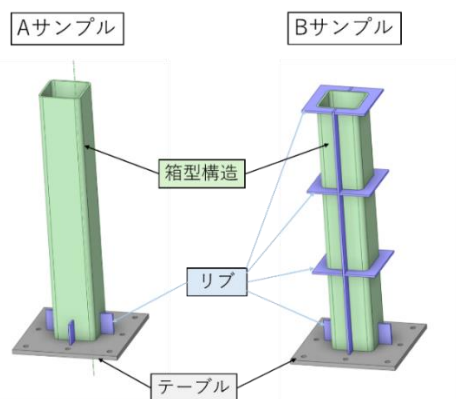


図1 溶接構造体のCAD図（斜視図）

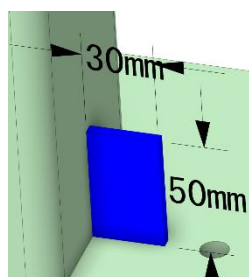


図2 リブの寸法形状

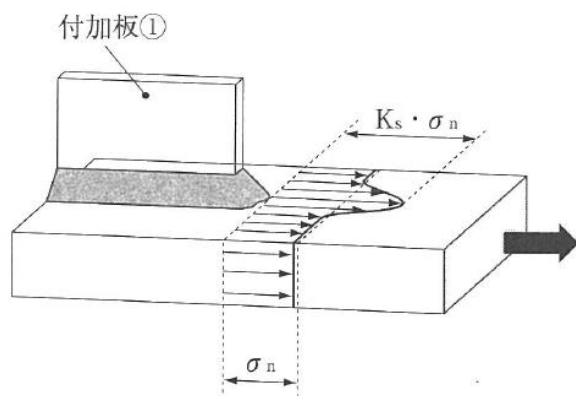


図3 止端部の構造的応力集中の模式図²⁾

2. 2. 溶接構造試験体の振動疲労試験

溶接構造体の疲労強度を評価するため、当所所有の振動試験機（エミック（株）社製 F-2500BHD/LA25）を用いて振動試験を図4に示すように、水平方向セッティングで実施した。振動試験条件は、周波数範囲 50～500[Hz]、加速度 5[m/s²]、掃引速度 0.5[オクターブ

/分]の掃引試験とした。加速度センサは高さ 600[mm]と 300[mm]の2地点に設置し測定を行った。

局所ひずみ基準の疲労評価を行うため、振動荷重に対して構造的応力集中が生じる2つのリブ溶接部に対し、図5に示すように、それぞれ4つのひずみゲージを貼付し、合計8地点の測定を行った。測定部長さ1mmのひずみゲージを止端部に合わせて設置することが本手法の特徴である。

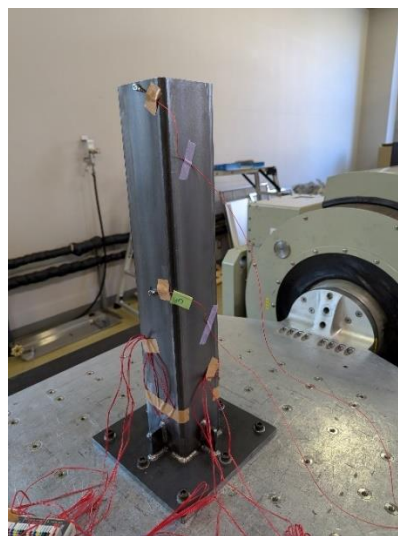


図4 振動試験の状況



図5 ひずみゲージ貼付状況

これまでの当所研究で得られた知見より、振動疲労試験中に試験体に疲労亀裂が生じると、亀裂の成長の程度に応じて、試験体の共振周波数が徐々に小さくなることが分かっている。共振周波数のピーク波形は極めて急峻であるため、加振周波数と構造物の共振新周波数に違いが生じると、安定して狙いのひずみ負荷を与えることができない。

本研究では、試験体の周波数一定の負荷を与えるものとし、従来の当所研究で実績のある方法として、予

め若干の亀裂進展を見込み、測定された共振周波数よりわずかに小さい加振周波数で耐久試験を行う手法を適用した。本報告では、過去の文献の例を参考に、疲労破壊を生じる下限に相当するひずみ振幅 $\Delta \varepsilon$ を $250[\mu \varepsilon]$ となるように設定し、これに相当する加速度を確認し試験条件とした。

2. 3. 樹脂ミニチュア試験体の振動試験

代替樹脂成形品による振動評価に関する基本的な検討を行うため、図1に示した溶接構造試験体Aサンプルの寸法を5分の1にした樹脂ミニチュア試験体を当所所有の光造形方式3Dプリンタ(formlabs社製 Form 3L)で製作した。試験体は実サンプルと相似な立体、つまりXYZ軸の全ての寸法を同一の比率(相似比)で縮小して製作した。なお、振動試験機の取り付けのため、テーブル寸法は相似ではない。図6に造形直後のミニチュア試験体を示す。造形上、困難とみられた最薄1[mm]の造形や、Bサンプルの水平方向に延びたリブも造形できることを確認した。

ミニチュア試験体の振動試験は、当所所有の小型輸送振動試験機(IMV(株)社製 m130LS)を用いて図7に示すように、水平方向セッティングで実施した。振動試験条件は、周波数範囲 10~500[Hz]、加速度 $5[m/s^2]$ 、掃引速度 0.5[オクターブ/分]の掃引試験とした。

一般に、加速度センサ重量は試験体の重量の 1/100 以下にすべきといわれるが、ミニチュア試験体はこの条件をクリアできないため、非接触による振動測定を用いるなど、何らかの工夫が必要と考える。そこで、加速度ピックアップの重量の影響を調べるため、重量の影響が少ないと考えられるひずみゲージ測定を用いて、加速度ピックアップの取り付けの有無による共振点の変化を調べた。ひずみゲージ測定は、図5と同じ場所に1点で測定を行った。

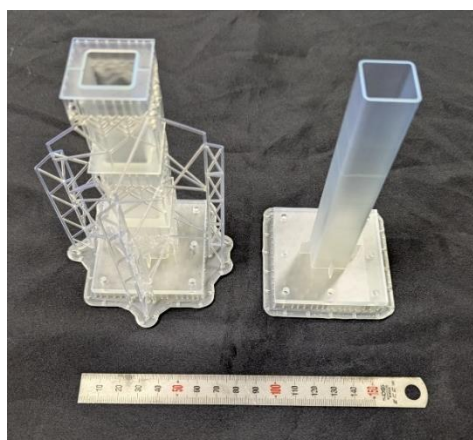


図6 造形したミニチュア試験体
(サポート材を除去する前の状況)

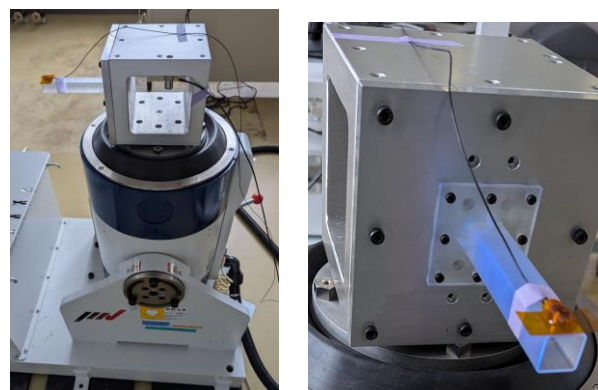


図7 ミニチュア試験体の振動試験状況
(左) 試験機 (右) サンプル、加速度ピックアップ状況

3. CAE解析

3. 1. 溶接振動疲労試験のCAE解析

設計段階でCAEを用いて溶接構造体の疲労強度を推定するためには、一般的な振動解析で評価対象となる、共振点における共振周波数と振動モードに加えて、疲労破壊の発生を左右する溶接止端部の応力状態を正確に再現することが必要である。さらにCAE解析では応力特異点の評価に難点があるため、本研究では実験で用いた「局所ひずみ」基準の評価をCAEでの評価にも活用することとした。

CAE解析は、固有値モードを調べる固有値解析と、振動試験と関係性の深い周波数応答解析の2種類の解析を行った。周波数応答解析は、種々の振動周波数に対する構造物の振動応答を調べる解析である。本研究では、周波数応答解析の手法として、固有値解析結果を参考にすることで短い計算時間が可能なモード重ね法を用いた。ここで、減衰比を0.005~0.1の範囲で変化させ、振動試験との整合性を確認した。

なお、機械力学の知見より、一組の質点、ばね、ダンパーからなる1自由度系の粘性減衰振動の解が得られており、本研究の振動疲労試験に対応する正弦加振力に対する1自由度系の粘性減衰振動は、図8に従うことが知られている³⁾。このグラフの縦軸は静たわみに対する強制振動の変位振幅の比、横軸は固有角振動数で正規化した角振動数である。減衰比 ζ は振動応答を左右するパラメータであることが、本研究では、実構造体の振動試験結果と、複数の減衰比 ζ で計算したCAE結果を照合して、減衰比 ζ を同定した。

図9は解析モデルおよび溶接部止端の要素分割図である。応力集中が生じ、大きな応力勾配を生じる止端部付近は、要素長さ0.25[mm]と十分に細かい要素分割を行った。図中、橙色の四角枠は実験でひずみゲージを貼付した場所に領域を指定したもので、いわば「バーチャルひずみゲージ」である。この領域のCAE解析

結果を評価に用いれば、既に十分に実績のある溶接部止端部の局所ひずみ基準の $\Delta \varepsilon - N$ 線図による評価⁴⁾が利用できるため、精度の良い疲労寿命予測が可能と考えた。

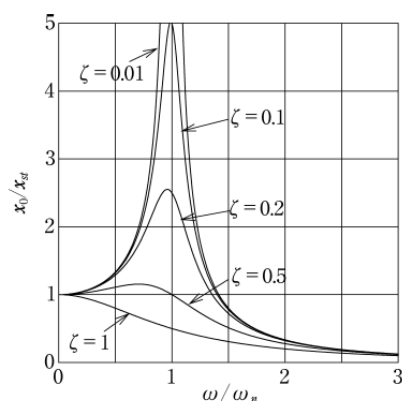


図 8 正弦加振力に対する粘性減衰振動の振動共振倍率³⁾

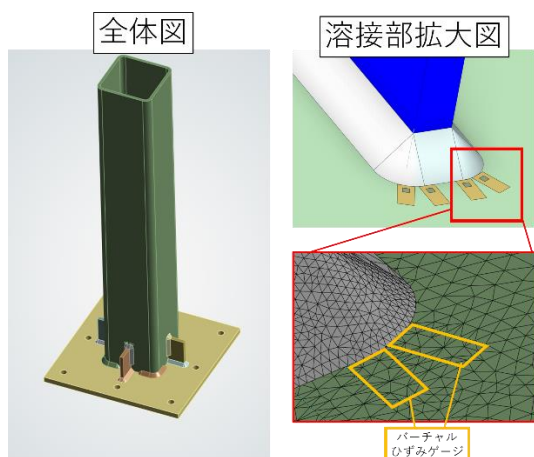


図 9 溶接部止端近傍の要素分割部

3. 2. ミニチュア試験体に関する CAE 解析

本研究では、樹脂 3D プリンタによりミニチュア試験体を造形する。試験体の設計を行う基本的な情報を得るため、試験体寸法や材料物性値の影響の影響を調べるための CAE 解析を行った。

図 10 は、疲労振動用の溶接構造体の試験体と相似の状態、試験体寸法を変化させた解析モデルを示したものであり、そのスケール倍率（相似比）は 1/1、1/2、1/3、1/4、1/5、1/6、1/8、1/10 の 8 条件の解析を行った。それぞれの試験体高さは、テーブル板厚を除いた寸法で 600、300、200、150、120、100、75、60 [mm] である。なお、造形したモデルに隅肉溶接部はなく、完全に一体化した構造とした。

また、加速度ピックアップの重量の影響を評価するため、2. 3 項で実施した 1/5 モデルの振動試験に対応する CAE 解析を実施した。この解析では、加速度ピ

ックアップを解析モデルに含めて計算を行った。図 11 に解析モデルを示すが、加速度ピックアップの取り付け位置の影響を統一するため、試験片高さと取り付け位置の比を 1/12 に固定した。

次に、材料物性値の影響を調べるため、構造材料として広く使用される 5 材種と樹脂材のポリエチレンの物性値を用いて、実寸法の 1/1 モデルの CAE 計算を行った。計算に用いた物性値は、ANSYS の材料データベースから参照したもので表 1 に示した。参考のため、比弾性率も併せて記載した。

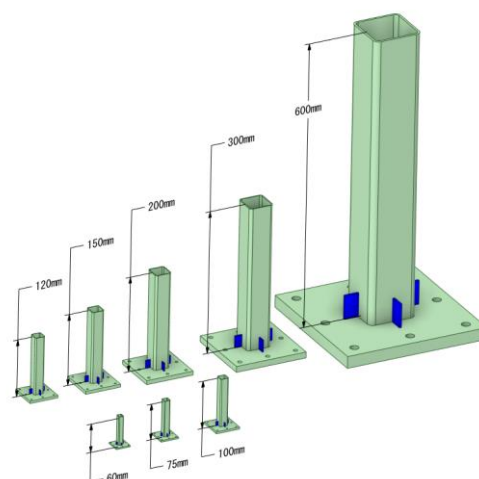


図 10 ミニチュア試験体の解析モデル

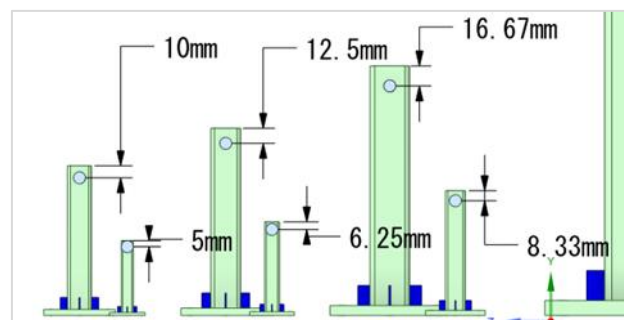


図 11 加速度ピックアップを含んだ解析モデル例

表 1 CAE に用いた材料物性値

材種	弾性率 E	質量密度 ρ	比弾性率
	MPa	kg/m ³	MPa · m ³ /kg
鉄鋼	200,000	7,850	25.5
アルミ合金	71,000	2,770	25.6
マグネシウム合金	45,000	1,800	25.0
チタン合金	96,000	4,620	20.8
ねずみ鉄	111,000	7,200	15.4
ポリエチレン	11,000	950	11.6

4. 実験結果

4. 1. 溶接構造試験体の振動疲労試験結果

図12はAサンプルの共振探索試験結果である。共振周波数は182.8[Hz]、試験体先端および中間高さにおける共振倍率は、それぞれ10.5倍、4.2倍であった。

共振探索試験中のひずみ測定例として、Bサンプルの結果を、横軸を時間軸、縦軸をひずみとしたグラフで図13に示す。このグラフは1つの溶接部に並んで取り付けた4点のひずみゲージ結果を示したものであるが、振動試験の加速度応答と呼応し、共振ピークを示す、ひずみ振幅が確認できる。共振点の拡大図では、ひずみ応答は比較的きれいなサインカーブであることや、各測定点の大小関係はほぼ変わらないことが確認した。

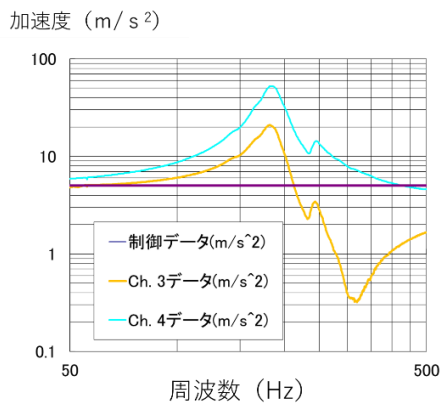


図12 共振探索試験結果 (Aサンプル)

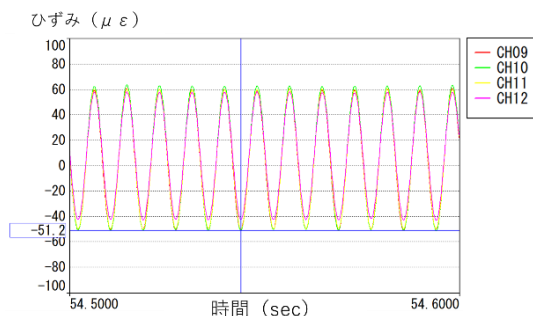
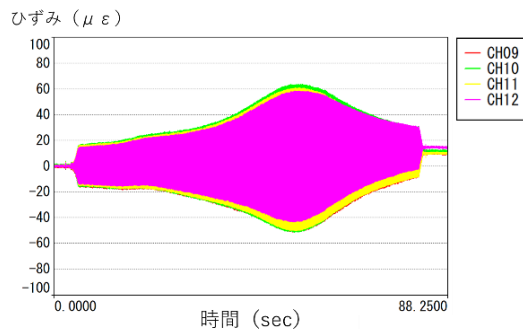


図13 共振探索試験中のひずみ測定結果
(上) 全体図 (下) 共振点における拡大図

次に、共振周波数より1[Hz]小さい加振周波数で1分間刻みの耐久試験を行った結果を示す。

図14は、Bサンプルを対象に試験時間1分の振動負荷を与えた時のひずみ測定結果を横軸時間、縦軸がひずみのグラフで示したものである。ここでは、加速度20[m/s²]の結果を示したが、10[m/s²]の時までは、ひずみ振幅は試験を通してほぼ一定であるのに対し、加速度20[m/s²]では、2つある溶接部のうち、一方の4地点のひずみが徐々にプラス側にシフトする挙動を示した。これは疲労亀裂の発生、進展過程の特徴として知られるものである⁴⁾。また、拡大図を見ると、再現性の高いひずみ振幅が生じていることが分かった。

図15は、A、Bサンプルに対して、振動耐久試験の準備として、加速度とひずみ振幅との関係を示したものである。いずれも、加速度に対するひずみ振幅応答は線形的な挙動である。また、狙いのひずみ振幅を定めた疲労試験が実施可能であることを確認した。

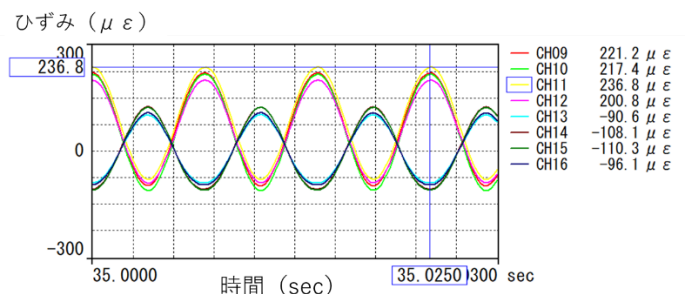
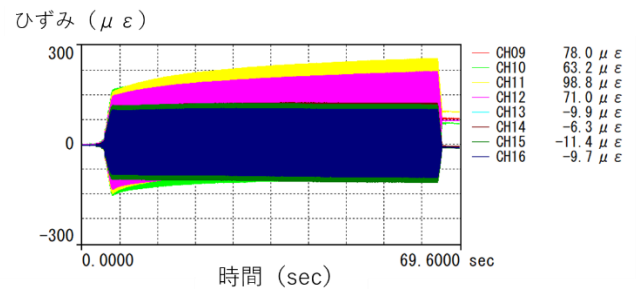


図14 共振探索試験中のひずみ測定結果
(左) 試験全体 (右) 拡大図

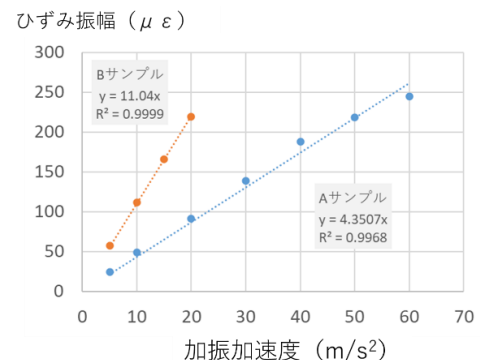


図15 加振加速度とひずみ振幅の関係

4. 2. ミニチュア試験体の振動試験結果

図16は、1/5 樹脂ミニチュア試験体の共振探索試験結果であり、横軸に周波数、縦軸に試験体先端で測定した加速度を示したものである。共振周波数は344.0[Hz]、試験体先端における共振倍率は24.3倍と実際のAサンプルより高かった。これは、実際の試験体は溶接部未溶着部があり、その接触部で内部減衰が生じるのに対し、樹脂ミニチュア試験体は完全な連続体で内部減衰が少ないためと考えられる。

次に、1/5 ミニチュア試験体から加速度センサを取り外して実施した共振探索試験時のひずみゲージ測定結果を図17に示す。ピーク時の10周期から読み取った共振周波数は463[Hz]となり、予想通り、加速度センサの重量の影響は大きいことが確認できた。

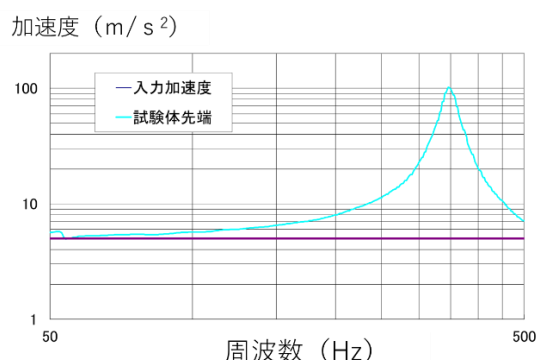


図16 1/5 樹脂ミニチュア試験体の共振探索試験結果

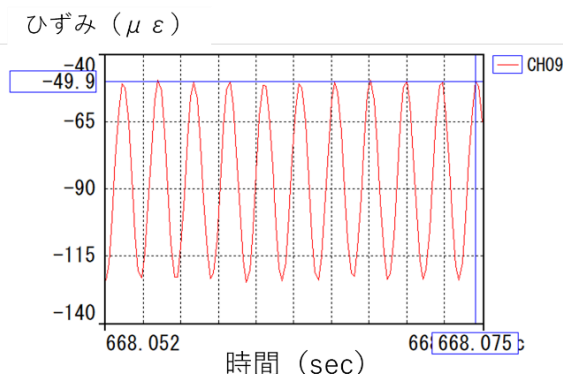
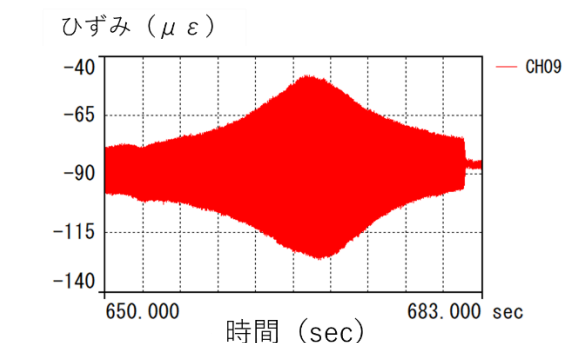


図17 共振探索試験中のひずみ測定結果
(上) ピーク前後 (下) 共振点における拡大図

5. CAE解析結果

5. 1. 溶接振動疲労試験のCAE解析

図18にAサンプルのCAE固有値解析により得られた1次および2次の固有値モードを示す。テーブル側を固定端、上部を自由端とする典型的な共振挙動となった。1次共振周波数は182.44[Hz]と、実験値182.84[Hz]と極めて良い一致を見せた。

図19は様々な減衰比で計算したCAE周波数応答解析結果を、減衰比と加速度応答の関係として、横軸を周波数、縦軸を共振倍率のグラフで示したものである。図8の1自由度系のグラフと同様に減衰比が大きくなるに従い共振点のピークが緩やかになる挙動を示した。これは今回の試験体が比較的シンプルな形状であったためと考えられる。図中、赤線は振動試験で得られた実験値であるが、共振ピーク付近で減衰比0.072の解析結果と良い一致を示したことから、減衰比は0.072と同定した。

図20は、減衰比0.072の場合の最大主ひずみ分布結果である。ひずみが50[μ ε]以上を赤く表示しているが、止端部は応力集中が生じていることが分かる。一方、4本の橙色の矢印はひずみ評価点であるバーチャルひずみゲージの結果を示したものであるが、4地点の平均値は36[μ ε]であった。対応する振動実験で得られたひずみ振幅は24[μ ε]であり、まずまず近い数値が得られた。

CAE解析と実験に若干の相違が生じた理由として、溶接ビード形状の影響や、ゲージ貼り付け位置の影響が挙げられるため、今後の検討課題としたい。

以上より、CAE解析により、振動疲労試験体の共振周波数を再現できること、減衰比を同定することで共振時におけるひずみ分布もほとんどの精度で求めることができることを確認した。なお、減衰比は、材料の種類や構造に応じて、ある範囲の値を持つことが知られているが、今回の試験体と類似の溶接構造体であれば、同一の減衰比を利用できると考える。

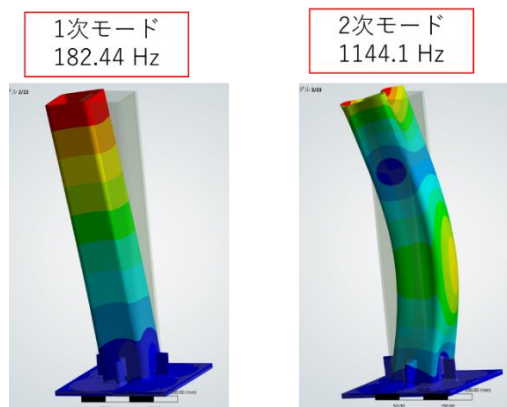


図18 Aサンプルの固有値解析結果

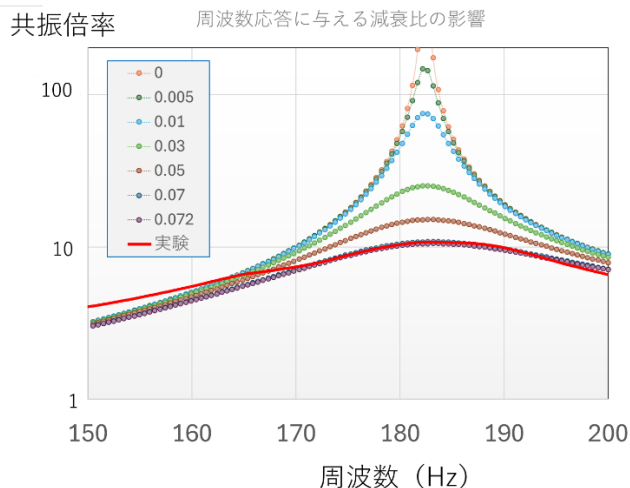


図 19 様々な減衰比における周波数応答解析結果

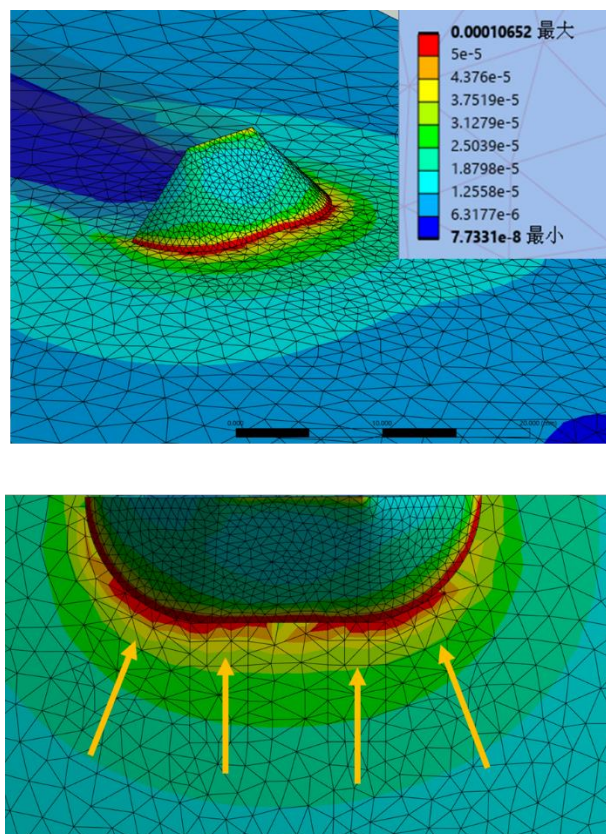


図 20 最大主ひずみ分布結果
(上) 斜視図 (下) 天面図

5. 2. ミニチュア試験体に関するCAE解析結果

材料を鉄鋼に固定して、試験片寸法を変化させたCAEモード解析をした結果、全ての試験片高さで図18と同様の1次および2次の固有値モードを示した。そこで、この結果を試験片高さとの関係として図21にプロットした。グラフには近似式も示し

たが、1次モード、2次モードともに反比例の関係があることが分かった。

材料物性の影響を調べるため、試験片高さを600[mm]に固定し、材料を変化させた場合の解析結果を表2に示す。鉄鋼、アルミ合金、マグネシウム合金はほぼ同一の結果となったのに対し、ねずみ鋳鉄とチタン合金はやや小さく、ポリエチレンは大きく異なる結果となった。なお、結果は示さないが、材料物性の影響は、試験片寸法の影響と独立していることを確認した。

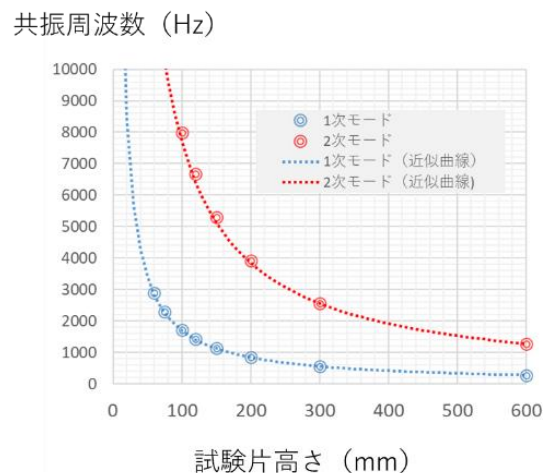


図 22 試験片高さとの共振周波数関係

表 2 材料物性値との共振周波数の関係

材種	共振周波数
	Hz
鉄鋼	182.45
アルミ合金	184.00
マグネシウム合金	182.45
チタン合金	166.70
ねずみ鋳鉄	140.82
ポリエチレン	39.39

次に、加速度ピックアップの影響を調べるために実施した1/5樹脂ミニチュア試験体のCAE解析結果を示す。ここで3Dプリンタの物性値と加速度ピックアップ等の重量は、カタログ値とは異なる可能性を考えて未知数として扱い、4.2項で得られた加速度ピックアップの有無に対する共振探索試験結果と合致するように逆解析的手法で同定した。最終的に得られた樹脂の弾性率は3625[MPa]、加速度ピックアップの重量は2.14[g]であった。この物性値を用いた固有値解析結果を図23に示すが、実験結果と良い一致を示している。

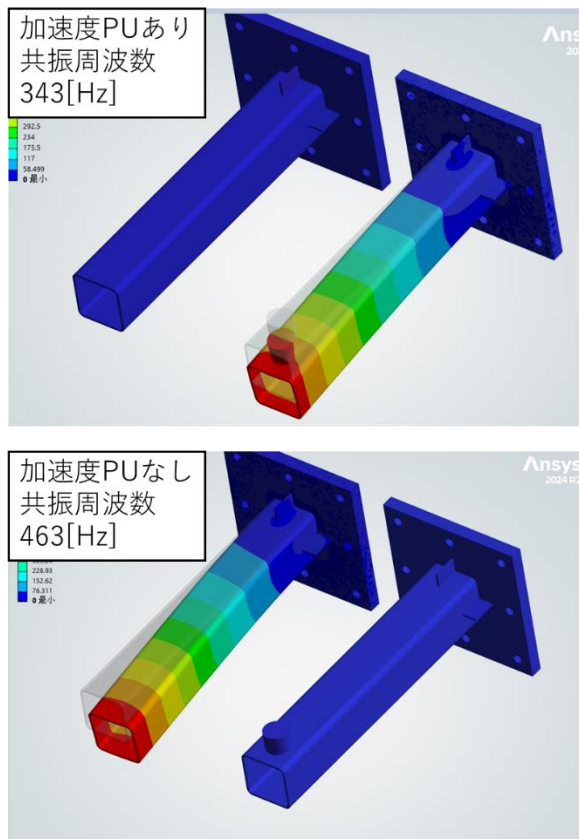


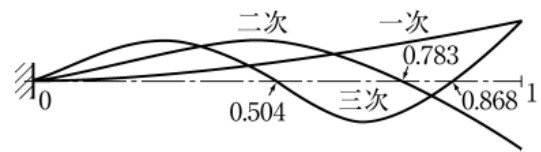
図 2 3 加速度ピックアップの有無に応じた
1 次モードの変形モードと共振周波数

6. 考察

5 章に示したように、構造体の共振周波数は試験片寸法に反比例すること、材料物性の影響は金属材料同士では差は小さく、金属材料と樹脂材料では数倍の差があることが分かった。これらの結果に関して、機械力学の観点から考察した。

はじめに、今回の試験体で生じた変形は、テーブルとの溶接部を固定端、上部を自由端とした「片持ちはりの曲げ」に近いと考えた。軸に対して横方向に棒が振動する場合、この振動は、はりの曲げ振動（あるいは横振動）と呼ばれ、固有値モードと共振周波数は機械力学の知見として、式 1 に従うことが知られている⁵⁾。ここで、 λ_n は境界条件により決まる係数で、固定-自由の場合を図 2 4 に示す。L ははりの長さ、E は弾性係数、I は断面二次モーメント、 ρ は質量密度、A は断面積である。

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \cdots (1)$$



(c) 固定-自由
 $\lambda_1=1.875, \lambda_2=4.694, \lambda_3=7.855$

図 2 4 固定 - 自由の境界条件における共振モード

次に、式 1 の各項について相似比の影響を考える。まず、断面積 A は、長さの 2 乗の次元を持ち、相似な立体では相似比の 2 乗に比例する。断面二次モーメント I は、長さの 4 乗の次元を持ち、相似な立体では相似比の 4 乗に比例する。以上より、ルート内における長さの寄与は 2 乗であり、式全体としては 1/長さ（あるいは 1/相似比）として整理することができる。上記より、図 2 2 で反比例の傾向が得られたのは、理論的な裏付けのある妥当なものである。より複雑な構造であっても部分に着目すれば、本質的には、この式で共振周波数の挙動を説明できると考える。

一方、式 1 の各項の中で、材料物性に関わるのは弾性率 E と密度 ρ の 2 つである。ここで、 $\sqrt{E/\rho}$ は、比弾性率と呼ばれ、FRP など軽量で剛性の高い材料を扱う場合によく用いられる指標であるため、ひとまとめして扱う。式 1 から、共振周波数 f_n は、 $\sqrt{E/\rho}$ すなわち比弾性率の平方根に比例すると考えられる。

上記の考えを検証するため、図 2 5 に CAE に用いた材料物性値を縦軸にヤング率、横軸に質量密度としてプロットした。赤線は鉄鋼の比弾性率 E/ρ を基準として直線で示したもので、青線は鉄鋼の 1/2 の比弾性率を示したものである。表 2 において、鉄鋼、アルミ合金、マグネシウム合金の計算結果がほぼ同一であったのは、比弾性率がほぼ同じであるためと言える。

図 2 6 は、縦軸に共振周波数、横軸を比弾性率の平方根としたグラフに、各材料の結果をプロットしたところ、極めて良い相関性を示した。本研究の A サンプルのようなシンプルな構造に限れば、共振周波数に対する材料物性の影響は、比弾性率の平方根に比例すると考えて差し支えない。

以上により、共振周波数に与える試験片寸法と材料物性の影響の影響を、式 1 を基に説明できることを示した。

最終的に、本研究グループが提案する代替樹脂成形品の設計手順を、今回の鉄鋼と 3D プリンタ材料の組み合わせを例に下記に述べる。

- (1) 代替成形したい 2 材料の比弾性率を計算しその比率の平方根を求める。さらにその比を求

- める。
- (例) 鉄鋼 5.05、3D プリント材料 1.65
単位は (MPa・m³/kg の平方根)
2 材料の比は約 3
- (2) 仮に同一寸法で成形した場合、2 材料の比弾性率の平方根の比が共振周波数の違いとなる。
- (例) 鉄鋼の共振周波数が樹脂より約 3 倍大きくなる。
- (3) 材料特性面で共振周波数が小さくなる樹脂で同じ周波数を得る場合、試験片寸法により共振周波数を増やす必要がある。
- (例) 共振周波数は、試験片寸法に反比例するので、寸法を約 1/3 倍にすればよい。

上記の設計手順の理解を助けるため、一連の流れに関する CAE 解析を行い、図 27 に、共振周波数の変化に着目した代替樹脂成形設計手順として図示した。

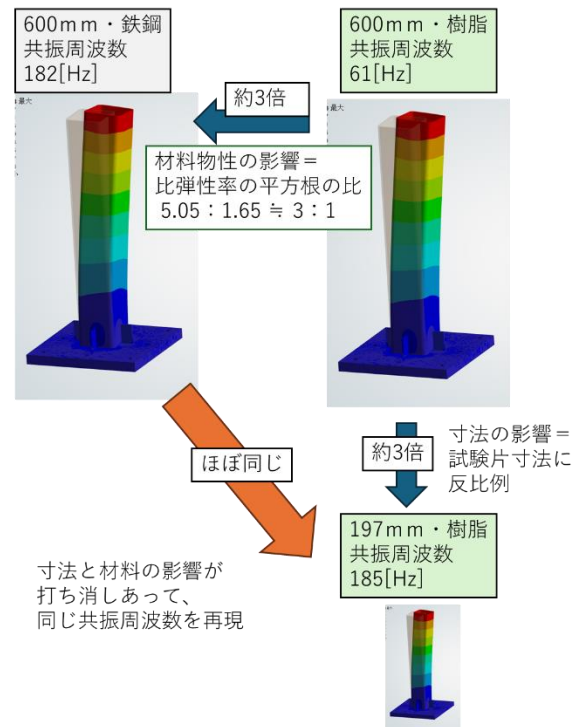


図 27 代替樹脂成形設計手順における共振周波数

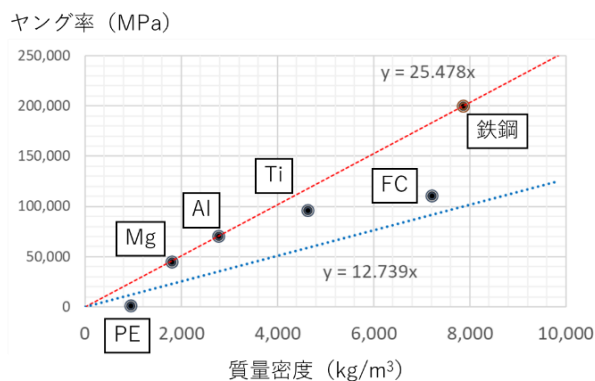


図 25 各種材料のヤング率と質量密度の関係

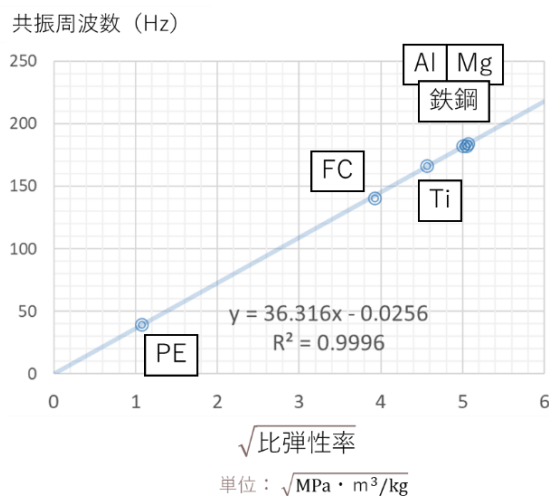


図 26 共振周波数と比弾性率の平方根の関係

6. 結言

本研究は、大型構造物の振動耐久性評価や設計改善に関する技術を開発するものであり、溶接構造物の疲労強度を CAE により推定する技術や、樹脂製ミニチュア試験体の振動特性から実大金属構造物の振動特性を推定する「代替樹脂成形品による振動特性評価」について実験および CAE 解析の両面から検討し、以下の成果を得た。

- ① 溶接構造試験体を対象に「局所ひずみ基準」による振動疲労試験を実施し、共振現象を利用することにより、当所振動試験機により、疲労破壊発生の下限值レベルの振動疲労試験が実現できることを確認した。
- ② 1/5 樹脂ミニチュア試験体の振動試験において、加速度ピックアップを取り付けることで、共振周波数が本来より約 25% 低下することを確認した。
- ③ 溶接構造試験体 A サンプルを対象にした CAE 固有値解析を行った結果、1 次モードの共振周波数が極めて良い一致を示した。
- ④ 溶接構造試験体 A サンプルを対象にした CAE 周波数応答解析について、実験結果との比較から、減衰比を 0.072 と同定し、ひずみ評価点で比較したところ、実験値とまずまず近い計算値が得られた。
- ⑤ ミニチュア試験体に関する CAE モデル解析を行

い、共振周波数は試験片寸法（あるいは相似比）に反比例することが分かった。

- ⑥ 1/5 樹脂ミニチュア試験体の CAE 解析において、加速度ピックアップを含めた解析モデルをもちいることで、逆解析的に、樹脂材の弾性率や、加速度ピックアップの実効的な重量を求めることができた。
- ⑦ 機械力学分野の「はりの曲げ振動」に関する共振周波数の式の各項に着目した考察により、本研究の溶接構造試験体に関して、共振周波数は試験片寸法には反比例、比弾性率の平方根に比例することを示した。
- ⑧ 上記の結果を踏まえ、代替樹脂成形品の設計手法として、比弾性率の平方根の比を逆数倍してスケール倍率を決定する手法を提案する。

最終年度となる来年度はトポロジー最適化技術の活用などを行う予定である。

参考文献

- 1) 佐藤 他. 溶接鉄鋼構造の疲労強度の評価. 令和 5 年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2026.
- 2) “応力集中”. 溶接構造の疲労. 一般社団法人溶接学会. 2015, 第 5 章
- 3) “強制振動”. 機械工学便覧 $\alpha 2$ 機械力学. 日本機械学会. 2014, 第 6 章.
- 4) 鯉渕 他. 製品開発のための疲労破壊事故の解析と強度対策. 日刊工業新聞社. 2011, p. 41
- 5) “はりの横振動”. 機械工学便覧 $\alpha 2$ 機械力学. 日本機械学会. 2014, 第 12 章.