

大型構造物の振動耐久性評価・設計改善技術の開発（第3報）

Development of Technology for Evaluating Vibration Durability and Improving the Design of Large Structures (3rd Report)

材料技術部 金属・物性科 工藤弘行 西村将志 佐藤浩樹
電子・機械技術部 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。3年目である本年度は、トポロジー最適化設計を適用したロボットアーム部品を対象に、製品寸法を縮小したミニチュア試験体の評価から大型構造の設計へ活用する「スケールアップ設計」技術について、実験およびCAE解析の両面から検討を行った。この結果、ミニチュア試験体の振動特性の周波数を、材料物性と寸法の違いに基づき補正することで、大型構造の振動特性を推定する手法を確立した。

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ことが多い点が挙げられる。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、実製品や試作品から設計へのフィードバックが働きづらい、あるいは高コストになりがちという難点があり、廃炉産業への新規参入を妨げる一因となっている。

本研究グループでは、昨年度、実大金属構造物の数分の1スケールに縮小して造形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」を提案している¹⁾。

本年度、新たに組み込んだのが、設計したい空間に対してどのように材料を配置すべきかを、コンピュータが提案してくれる「トポロジー最適化技術」である。本技術は、範囲として与えた複数の設計変数の組合せの中から、自動で最適な設計値を探索するもので、従来の工業製品にあまり見られないような自由度の高い形状案を得られるのが特徴であるが、現状では廃炉産業での活用例は少ない。

以上より、本研究では、廃炉分野での使用が多い大型構造物への適用を想定し、トポロジー最適化設計を活用し、軽量かつ高性能な製品を設計する取り組みを行った。構想設計から本設

計への移行段階での活用を想定し、代替樹脂成形による小型試作品から、大型構造物の設計へのフィードバックを行う「スケールアップ設計」技術について、実験及びCAEの両面から検討した。

2. 実験

2. 1. ロボットアーム部品の設計・製造

本研究が提案するスケールアップ設計の一例として、ロボットアーム部品の設計例を報告する。図1は、設計のスタートとして参考にした市販の教育用ロボット(Hiwonder社製MaxArm)である。トポロジー最適化を適用し、剛性と固有振動数を可能な限り高く保ちつつ軽量化することで高性能なロボットアームを目指した。設計したロボットアームは3倍の大きさにスケールアップし、アルミ鋳造で製作して性能を評価した。

参考にしたロボットは、図1(右)に示すように左右方向の首振りと上下方向の首振り機構を持ち、アーム先端に取り付けられたロボットハンドで搬送物を把持することができる。本研究では、図2のアームを設計対象とした。アームはアルミ製でコの字型をしており、間を繋ぐ補強部品がねじ止めされている。

ロボットアームの設計には、Altair Engineering社製Inspireを使用した。本ソフトウェアは3D-CADとトポロジー最適化がセットになっており、トポロジー最適化で導出した形状をシームレスに3D-CADデータ化することができるのが特徴である。最初に、教育用ロボットのアームの最外形を取った直方体の3Dモデルを図3のとおり作成し、これをロボットアームの設計範囲とした。設計範囲は長さ190[mm]、幅23[mm]、高さ26[mm]である。材質は参考にしたロボットアームと同じアルミとし、密度2770[kg/m³]、ヤング率

71000[MPa]、ポアソン比 0.33 とした。次に、参考にしたアームと同じ位置に補強部品を模したボルト結合を設定し、アームの支点には回転運動を許容するジョイント結合を設定した。ジョイント部分には首振り運動を想定した 35[kg・cm]のモーメントを上下方向と左右方向に設定した。アーム先端には、50[g]の搬送物を持ち上げることを想定し、 $0.05[\text{kg}] \times 9.8[\text{m/s}^2] = 0.49[\text{N}]$ を負荷した。設定した条件を図4に示す。最適化の制約条件として、剛性最大化・固有振動数最大化・重量 50[%]削減・左右対称形状を設定し、トポロジー最適化を実行した。

トポロジー最適化で得られた形状を図5に示す。得られた形状は複雑な凹凸を持ち、アルミ鋳造で造形できない箇所があることから、図6のとおり形状を単純化して3DCADで描き直し、これを最終設計CADデータとした。最終形状を3倍にスケールアップし、図7のとおりアルミ鋳造で製作した。アルミ鋳造で製作したアームは長さ570[mm]、幅69[mm]、高さ78[mm]、材質はAC4CH-F材である。

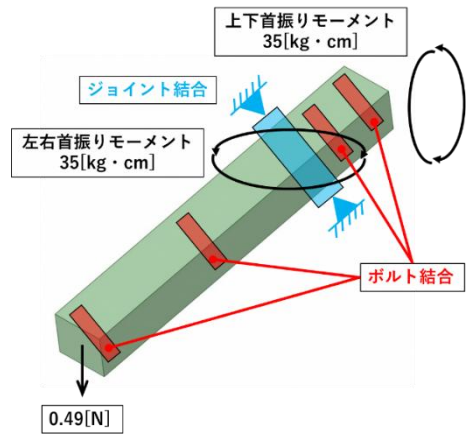


図4 トポロジー最適化設計の解析条件



図5 トポロジー最適化で導出した設計形状案



図1 教育用ロボット(左)と、その基本動作(右)



図2 設計対象としたロボットアーム部品

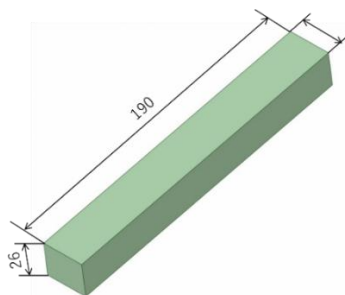


図3 ロボットアームの設計領域

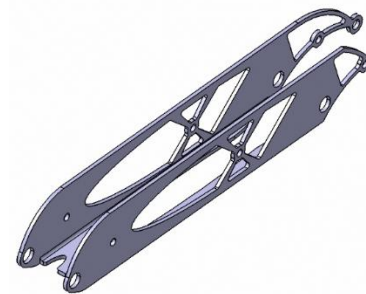


図6 3DCADで描きなおした最終設計CAD図

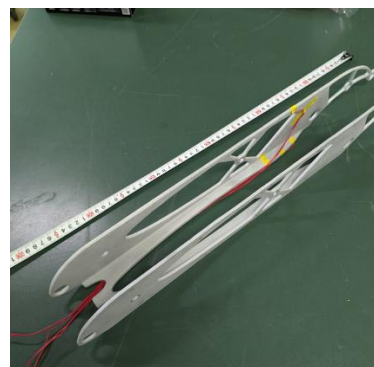


図7 アルミ鋳造で製作したロボットアーム

2. 2. ロボットアーム部品の振動特性及び剛性試験

アルミ鋳造ロボットアーム部品の振動特性を評価するため、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実施した。

図8に示すように、水平方向及び垂直方向の2方向の試験を実施し、ロボットアーム部品のY方向及びZ方向の振動特性評価を行った。振動試験条件は、周波数範囲 50~500 [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。

また、ロボットアーム部品の剛性試験として、アーム先端にロードセルを介して上下から1回ずつ30[N]程度の荷重を与え、ひずみゲージ測定及びデジタル画像相関法による変位測定を行った。図9にひずみゲージの貼付状況を、図10にデジタル画像相関法のための白黒模様の画像マーカーの塗布状況を示す。

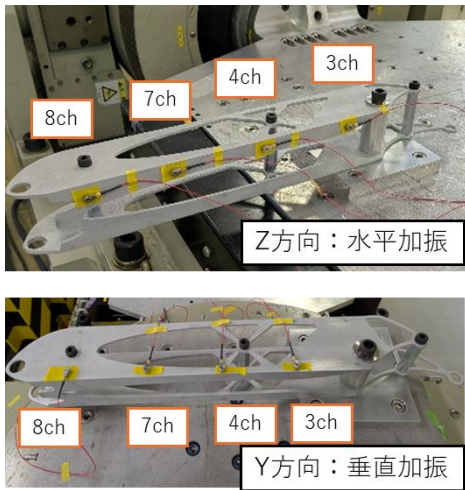


図8 振動試験の状況

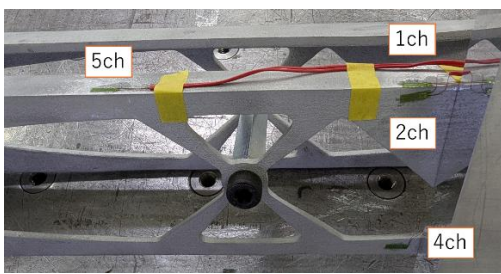


図9 ひずみゲージの貼付状況

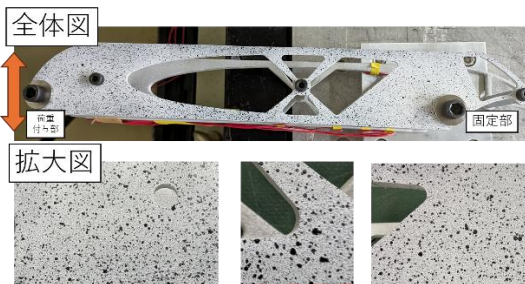


図10 デジタル画像相関法の画像マーカー

2. 3. ロボットアーム部品のハンマリング試験

製作したアルミ鋳造アームの振動特性を評価するため、XYZの3方向でハンマリング試験を実施した。ハンマリング試験は図11の小野測器製DS-5000を使用した。図12、図13のとおりY方向、Z方向は1軸の加速度センサを10個貼り付けたが、X方向は加速度センサを貼り付けるスペースが無いため、図14のとおり3軸加速度センサを2個貼り付けた。周波数レンジは1000 [Hz]、分析ライン数は800とした。また、ハンマリング試験の結果を可視化するため、Vibrant Technology社製ME scopeで振動モードをアニメーション化し、CAE解析結果と比較した。

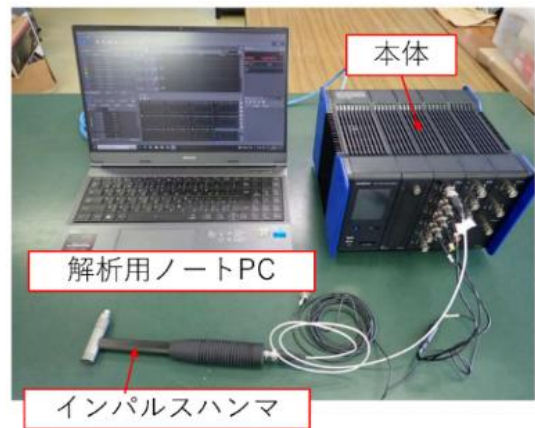


図11 ハンマリング試験装置

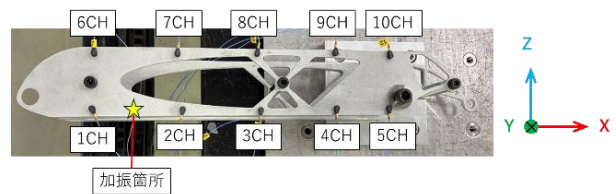


図12 Y方向測定時のセンサ位置および加振条件

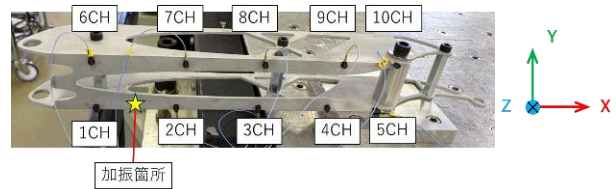


図13 Z方向測定時のセンサ位置および加振条件

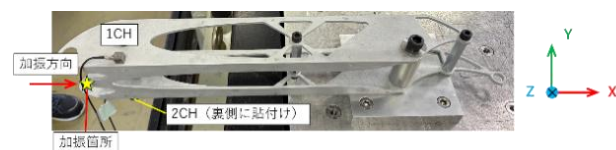


図14 X方向時のセンサ位置および加振条件

2. 4. ミニチュア試験体の製作

代替成形技術の基本的な検討のため、図6に示した最終設計CAD図の寸法を縮小したミニチュア試験体を当所が所有するDesktop Metal社製Studio System2を使用して製作した。本機は金属粉末とバインダーと呼ばれる熱可塑性の樹脂を混練した材料を使用し、MIM（金属粉末射出成形）技術に応用したプロセスにより造形を行う3Dプリンタである。積層ピッチは50~300[μm]、造形空間寸法は300×300×200[mm]、最小造形寸法（板厚）は0.5[mm]である。ミニチュア試験体はアーム長190[mm]のトポロジー最適化設計案を基準とし、相似形状として、XYZ軸ともに同一の比率（相似比）で縮小した。前述の造形空間寸法と最小造形寸法の制約があることから、50%サイズ（アーム長95mm）、60%サイズ（アーム長115mm）、66%サイズ（アーム長125mm）の3種類を製作した。材質はSUS316L相当材料を使用した。造形例として図15に66%、50%サイズのサンプルを示す。

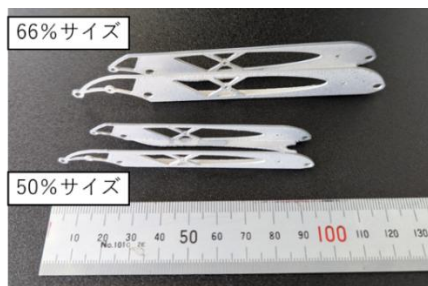


図15 金属3Dプリンタ造形品

3. CAE解析

3. 1. ロボットアーム部品のCAE解析

トポロジー最適化設計の妥当性を確認するため、有限要素解析ソフトウェアANSYSによりCAE解析を行った。図16は境界条件を図示したもので、ジョイント部を固定し、アーム先端に0.49[N]の荷重を与えた。

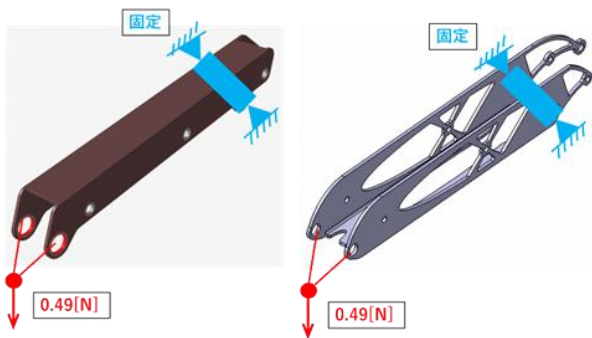


図16 CAE解析モデル

3. 2. ミニチュア試験体のCAE解析

本研究が提案する代替樹脂成形による特性評価では、材料特性及び寸法が各種特性に与える影響を把握することが重要であるため、3Dプリンタで製作するミニチュア試験体に関するCAE解析を行った。

図17は、基準長さ190[mm]の設計案を基準に、相似比が0.8、0.66、0.6、0.5、0.4、0.33、0.25、0.2とした解析モデルを示している。以下、モデル名称を100P、080P、066P、060P、050P、040P、033P、025P、020Pとする。

解析は、剛性に関するもの、振動特性に関するものの2種類の解析を行った。剛性については、上述した相似比の異なる9モデルに同一荷重や同一加速度の加速度を与えた。振動特性については、モーダル解析を行い共振周波数と変形モードを求めた。

材料物性値はアルミ casting材とSUS316材を想定し、表1の値を用いた。



図17 ミニチュア試験体CAE解析モデル

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 |
| アルミ casting材 (AC4CH) | 71,000 | 2,770 | 25.6 |
| ステンレス鋼 (SUS316) | 200,000 | 7,850 | 25.5 |

3. 3. スケールアップ試験体のCAE解析

本研究が提案する「スケールアップ設計」に関する基本的な知見を得るため、スケール倍を増加した場合のCAE解析を行った。図18は解析モデルを示したもので、長さ190[mm]のトポロジー最適化設計CADを基準に、相似比を100%、300%、1000%の3条件とした。以下、モデル名称を100P、300P、1000Pとする。周波数応答解析を行い、3モデル間の比較を行った。

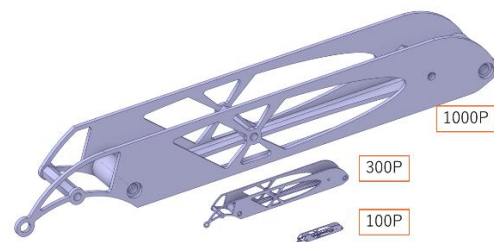


図18 スケールアップ試験体の解析モデル

4. 実験結果

4. 1. ロボットアーム部品の振動試験結果

振動試験結果として図19に、周波数-加速度グラフを両対数目盛で示す。Z方向振動の主たる共振周波数は148[Hz]、Y方向振動の主たる共振周波数は77[Hz]であった。表2に共振点などのグラフの特徴点を列記した。表中の共振倍率とは、加振機の入力加速度と、各点の加速度の比を倍数で評価したものである。

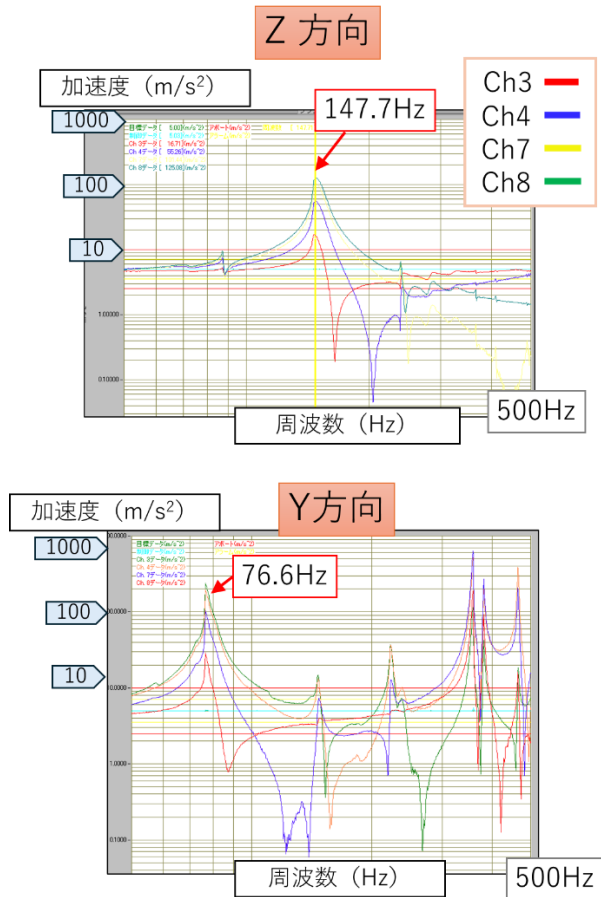


図19 振動試験結果 Z方向(上)、Y方向(下)

表2 振動試験における特徴点

| Z方向 | | | Y方向 | | |
|----------|-----|----------|----------|----|----------|
| 周波数 (Hz) | 現象 | 共振倍率 (倍) | 周波数 (Hz) | 現象 | 共振倍率 (倍) |
| 87.2 | 共振 | 1.9 | 76.6 | 共振 | 48 |
| 148.4 | 共振 | 25 | 146.7 | 共振 | 2.9 |
| 239.3 | 共振 | 1.3 | 222.7 | 共振 | 7.5 |
| 288.1 | 変化点 | 0.9 | 357.4 | 共振 | 107 |
| 365.0 | 変化点 | 1.0 | 381.4 | 共振 | 54 |
| 410 | 変化点 | 1 | 464.6 | 共振 | 78 |

4. 2. ロボットアーム部品の剛性試験結果

図20は、剛性試験の結果を横軸時間の経時変化グラフとして示したもので、縦軸は上部に荷重を、下部に4地点のひずみを同一のグラフに併記した。全ての測定点で、荷重に比例したひずみが生じ、最大ひずみは78[$\mu\epsilon$]であった。これは応力5.5[MPa]に相当する。4地点のひずみの絶対値はほぼ同等であり、トポロジー最適化設計の特徴を反映していた。

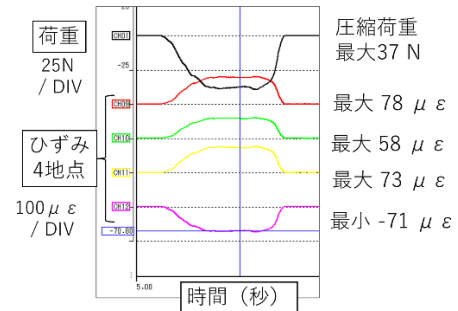


図20 ひずみゲージによるひずみ測定結果

図21はデジタル画像相関法の測定結果であり、測定荷重は25[N]である。図21(中)は変位分布で、円カーソルとラインカーソルを配置し、グラフを抽出した。図21(上)は円カーソルにおける経時変化を示したもので、図21(下)はラインカーソル上の数値を、画像中の測定対象とX座標を合致させて表したグラフである。この結果から、アーム剛性は、25[N]/0.2[mm]=125[N/mm]と算出できる。

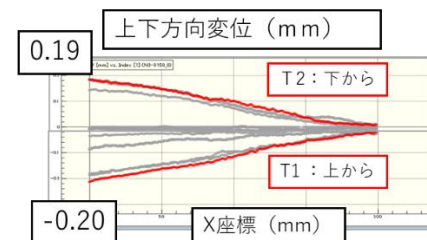
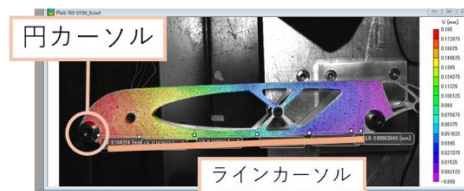
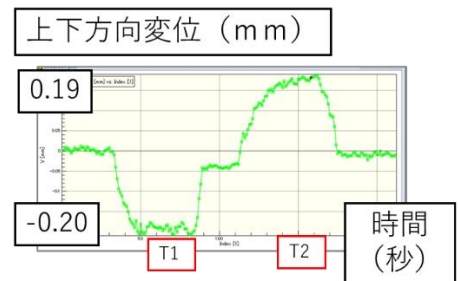


図21 DICによる変位測定結果

4. 3. アルミ鋳造アームのハンマリング試験結果

ハンマリング試験で得られた X 方向の CH1 の伝達関数を図 2 2 に、Y 方向の CH1 から CH5 の伝達関数を図 2 3 に、Z 方向の CH1 から CH5 の伝達関数を図 2 4 に示す。ピークの周波数は共通であるが、Y 方向、Z 方向ではアーム先端側の CH1 のピークが他の CH よりも相対的に高いなど、加速度振幅の強弱が地点により異なる。

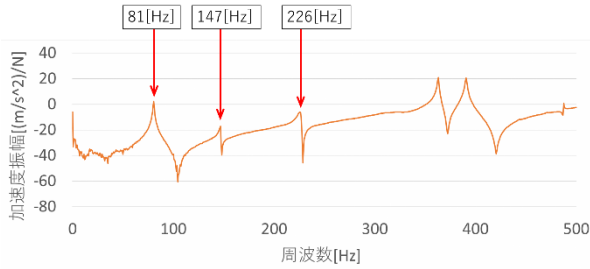


図 2 2 X 方向の伝達関数

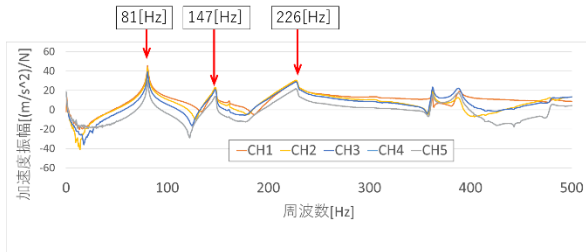


図 2 3 Y 方向の伝達関数

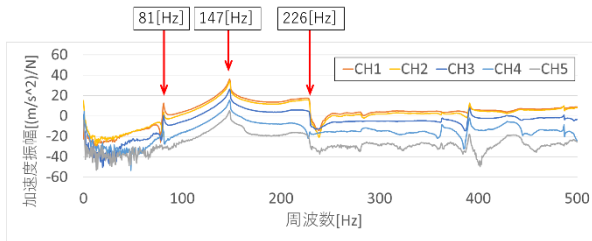


図 2 4 Z 方向の伝達関数

図 2 5、図 2 6 は、Y 方向の 1 次と 2 次の固有周波数のモード可視化結果を示したもので、前者が 1 次振動モード、後者が 1 次振動モードにねじりが加わったモードである。

表 3 から表 5 に伝達関数における各モードの周波数、加速度振幅及び変形モードを記す。X 方向は前述のとおり加速度センサを 1 箇所しか貼り付けることができなかったため、変形モードは確認することができなかった。ピーク周波数の多くは表 1 の振動試験の特徴点と合致していた。

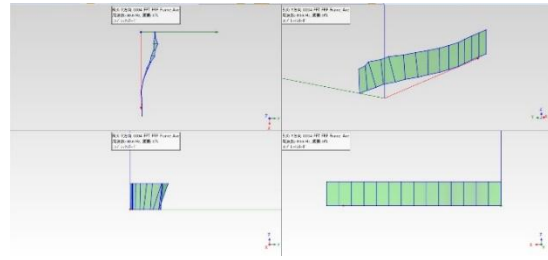


図 2 5 モード可視化結果 (Y 方向 1 次モード、81 [Hz])

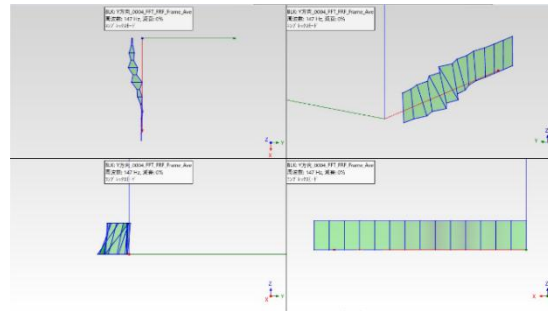


図 2 6 モード可視化結果 (Y 方向 2 次モード、147 [Hz])

表 3 X 方向ハンマリング試験結果

| 次数 | 周波数 Hz | 単位荷重当たりの加速度振幅 (m/s ²) /N | |
|----|-----------|---|-----|
| | | CH1 | CH2 |
| 1 | 81 | 2.32 | |
| 2 | 147 | -17.24 | |
| 3 | 226 | -6.36 | |
| 4 | 363 | 20.83 | |
| 5 | 391 | 20.45 | |
| 6 | 488 | 0.77 | |

表 4 Y 方向ハンマリング試験結果

| 次数 | 周波数 Hz | 単位荷重当たりの加速度振幅 (m/s ²) /N | | | | | 変形 モード |
|----|-----------|---|-------|-------|-------|--------|-----------|
| | | CH1 | CH2 | CH3 | CH4 | CH5 | |
| 1 | 81 | 45.57 | 43.69 | 39.02 | 30.36 | 30.36 | 1次 |
| 2 | 147 | 21.34 | 22.59 | 20.19 | 13.08 | 13.08 | 1次+ねじれ |
| 3 | 226 | 29.22 | 28.94 | 28.4 | 21.16 | 19.96 | ねじれ |
| 4 | 363 | 13.67 | 17.82 | 21.64 | 14.95 | 14.95 | 2次 |
| 5 | 391 | 18.41 | 11.67 | 20.97 | 16.13 | 16.13 | 2次+ねじれ |
| 6 | 488 | 9.76 | 10.78 | 12.21 | 4.07 | -20.02 | 3次 |

表 5 Z 方向ハンマリング試験結果

| 次数 | 周波数 Hz | 単位荷重当たりの加速度振幅 (m/s ²) /N | | | | | 変形 モード |
|----|-----------|---|-------|-------|--------|--------|-----------|
| | | CH1 | CH2 | CH3 | CH4 | CH5 | |
| 1 | 81 | 12.70 | 3.55 | 0.81 | -16.10 | -31.5 | 1次+ねじれ |
| 2 | 147 | 33.86 | 33.05 | 26.43 | 13.23 | 5.29 | 1次 |
| 3 | 226 | 16.25 | 14.61 | 3.81 | -15.66 | -18.45 | ねじれ |
| 4 | 363 | 3.84 | 2.38 | -2.62 | -8.65 | -27.08 | 1次+ねじれ |
| 5 | 391 | 9.56 | 10.28 | 6.48 | -2.90 | -18.09 | 2次+ねじれ |
| 6 | 488 | 7.07 | 6.80 | 0.21 | -8.51 | -27.54 | 3次+ねじれ |

5. CAE解析結果

5. 1. ロボットアーム部品のCAE解析結果

図29はトポロジー最適化設計で得られたロボットアームに対して、根元を固定し、アーム先端に0.49[N]を与えた時の変位分布である。最大変位は4.38[μm]で、市販品アームとほぼ同等の解析結果であった。これはトポロジー最適化設計により、重量を半減らしながらも同等の剛性を得たことを意味する。

図30は応力分布結果であり、応力0.25[MPa]以上の部位を赤く示している。単純形状を持つはり(梁)の曲げ変形では、はりの根元である固定部に近い部分に大きな応力が生じるのが一般的であるが、トポロジー最適化設計案では、固定部から大きく離れた位置でも比較的大きな応力が生じており、荷重を分担して受け持っている特徴が表れている。図10に示したひずみゲージ貼付位置は荷重を分担して受け持つ部位を4か所抽出して測定点としている。

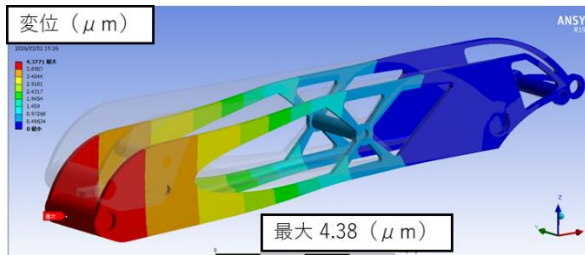


図27 トポロジー最適化設計案の変位分布図

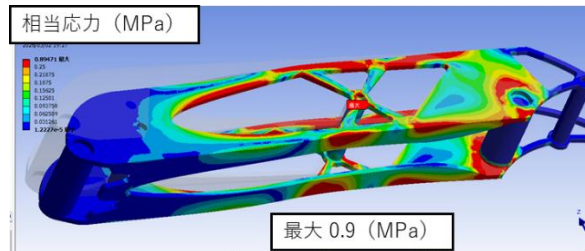


図28 トポロジー最適化設計案の応力分布

5. 2. ミニチュア試験体のCAE解析結果

図29は、ミニチュア試験体モデルに同一荷重10[N]を与えた場合のCAE解析結果を示したもので、図29(上)が変位分布図、図29(下)が相当応力分布図である。いずれも寸法が小さくなると急激に増大し、最大のモデルと最小のモデルの変位の違いは約5.0倍、応力の違いは約23.6倍であった。図30は応力と変位に与える寸法を、横軸が寸法のグラフで示したものである。グラフには近似式を点線で記入しているが、変位は寸法に反比例、応力は寸法の2乗に反比例していることが分かった。

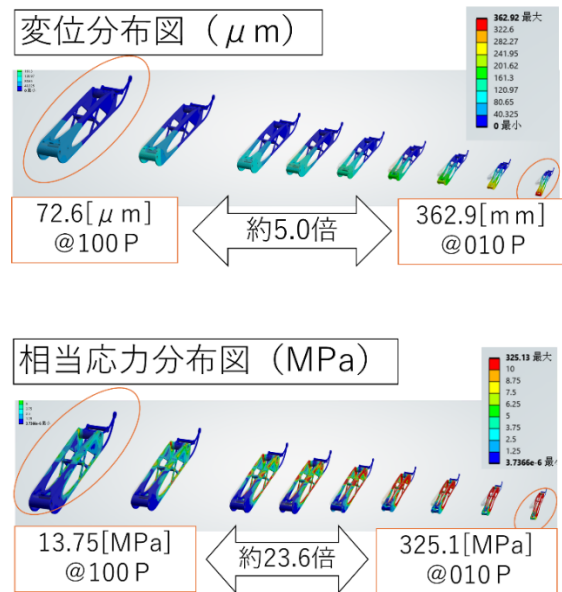


図29 同一荷重を与えた場合のCAE解析結果
(上) 変位分布図 (下) 相当応力分布図

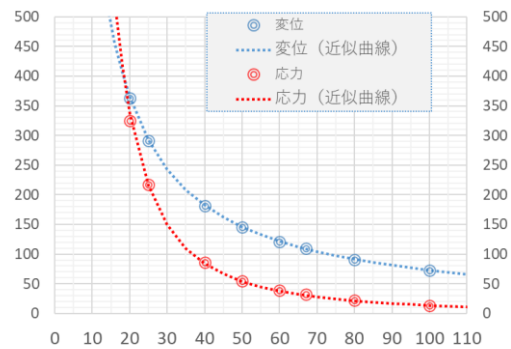


図30 試験片寸法と変位、応力との関係
(同一荷重の場合)

次に、図31は、ミニチュア試験体モデルに同一加速度9800[m/s^2]を与えた場合のCAE解析結果を示したもので、図31(上)が変位分布図、図31(下)が相当応力分布図である。いずれも寸法が大きくなるのに応じて増大し、最大のモデルと最小のモデルの変位の違いは約25.0倍、応力の違いは約5.2倍であった。図32は応力と変位に与える寸法をグラフで示したものである。グラフには近似式を点線で記入しているが、変位は寸法の2乗に比例、応力は寸法に比例することが分かった。

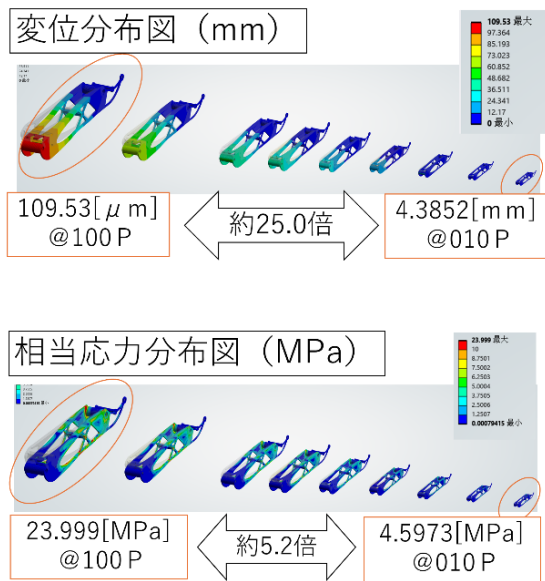


図3-1 同一加速度を与えた場合のCAE解析結果
(上)変位分布図 (下)相当応力分布図

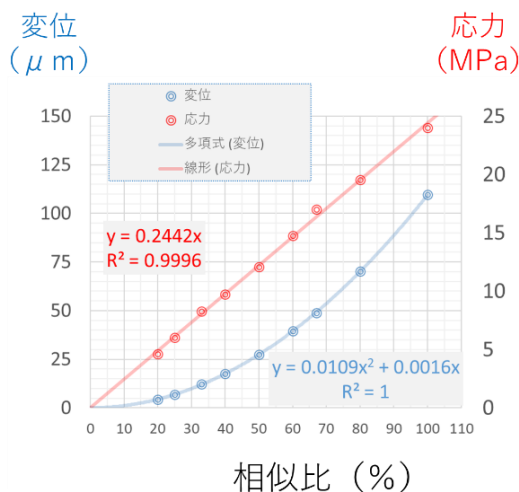


図3-2 試験片寸法と変位、応力との関係
(同一加速度の場合)

5. 3. スケールアップ試験体のCAE解析結果

スケールアップ試験体モデルのモーダル解析結果の例として、300Pの1次モードの変形モードを図3-4に示す。300Pは実際にアルミ鋳造製のロボットアームを製作したサイズであるが、図2-5のモード可視化結果と同一の変形モードであり、共振周波数も非常に良い一致を示している。

次にY方向に加速度5[m/s²]を与えた周波数応答解析を行った。評価点は図3-4に示したロボットアーム先端シャフトが取り付く部位でY方向の加速度を評価指標とした。図3-5は、周波数応答解析結果を100P、300P、10000Pの3サイズの結果を並べて示したものである。グラフ上限の周波数をそれぞれ150、500、

1500[Hz]として、表記すると、3サイズの結果は、ほぼ同じ波形となることを確認した。

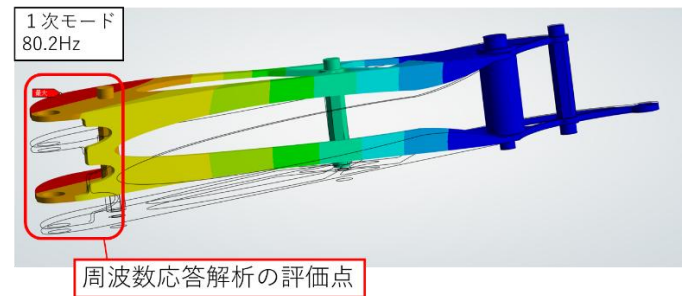


図3-3 300Pモデルのモーダル解析結果(1次モード)

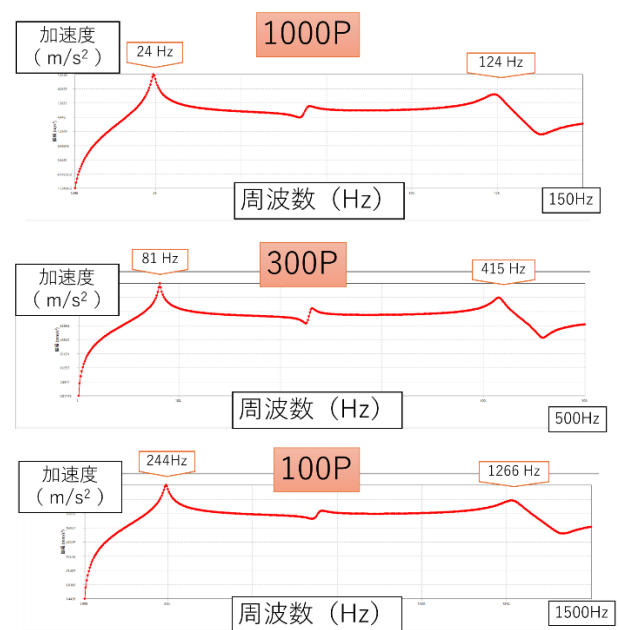


図3-4 スケールアップモデル周波数応答解析結果

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、溶接構造体の疲労強度を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 市販のロボットアーム部品を対象にトポロジー最適化設計を適用した結果、アーム重量を半減しながらも剛性を維持する設計案を得た。
- ② 県内企業への委託製作により、最適化設計案の寸法を3倍大きくしたアルミ鋳物製ロボットアーム

部品を製作し、各種特性試験を実施し基本的な特性を得た。

- ③ 当所の金属 3D プリンタを用いて、最適化設計案の寸法を 50%及び 66%に縮小したミニチュア試験体を製作し、各種特性試験を実施し、寸法の影響に関する基本情報を得た。
- ④ アルミ鋳物製ロボットアームを対象に、振動試験及びハンマリング振動測定による振動特性評価をした結果、ほぼ同じ結果が得られた。振動試験が不可能な大型構造物ではハンマリング振動測定を用いるのが有効と思われる。
- ⑤ 相似な形状を持つミニチュア試験体に同一荷重を与える CAE 解析を行った結果、変位は試験片寸法に反比例、応力は試験片寸法の 2 乗に反比例することを確認した。
- ⑥ 相似な形状を持つミニチュア試験体に同一加速度を与える CAE 解析を行った結果、変位は試験片寸法に反比例、応力は試験片寸法の 2 乗に反比例することを確認した。
- ⑦ 相似な形状を持つスケールアップ試験体の周波数応答解析を実施した結果、3つの異なる相似比の周波数応答グラフを、グラフ上限の周波数を適切に設定すると、ほぼ同じ波形となることを確認した。

参考文献

- 1) 工藤ら, 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). 令和 6 年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2025.