

3D-CAD とシミュレーションを用いた設計変更技術適用による機械設計の高度化

(機械設計の効率化に向けた 3D-CAD 普及促進)

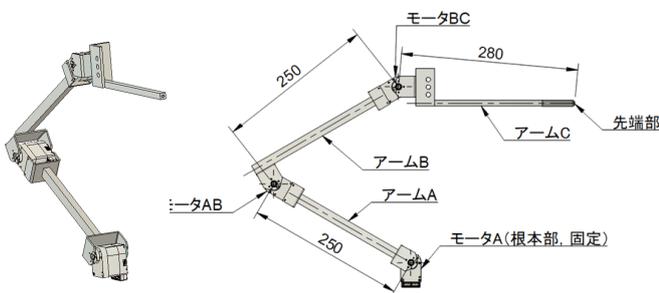
機械システム科 主任研究員 西村 学
 機械システム科 研究員 小笠原 耕太郎

機械設計は製品開発において重要な工程である。この工程では製品形状を決めるにあたり多岐にわたる検討を行い、製造・検査に必要な設計図面を作成するなど非常に多くの工数を要する。全国ではこの機械設計の多くの業務を効率化するために3Dデータやこれを作成する3D-CADを用いることが主流である。県内でも生産性向上の取組支援をしているが、3D-CADの機械設計活用に関してはさらなる普及推進が必要である。

3D-CADの普及への大きな障壁として“導入メリットの不透明さ”や“導入しても活用できない”などが挙げられる。そこで本研究では実際に部品設計における3D-CADやシミュレーションの活用事例を作り、そのメリットを明確化するとともに得られた知見をもとに導入前後の技術支援をしていくことを目的とする。本年度は既存のロボットアームに対し、設計で用いるシミュレーションの解析条件を検討した。この条件を用いて既存のロボットアームの軽量化設計を行い、シミュレーション結果と実験値を比較することで提案した条件の妥当性を確認した。

1. 緒言

全国における機械や電気機器、輸送用機器などの業種では3D-CADは7割程度導入されており広く普及している。それに比べ、長崎県の製造業における機械設計では3D-CADが用いられることはまだ少ない。そのため3D-CADの普及推進が望まれるが、この課題として、導入メリットの明確化や導入後のノウハウ構築の困難さなどが挙げられる。そこで本研究では3D-CADやシミュレーションを用いた設計事例をつくることを目的とした。これにより単純なメリットの把握だけでなく、導入後の参考資料としても活用できる。また、本研究で得られる知見を元に直接支援することで企業のノウハウ構築にも寄与できる。



a) 外観 b) 概形図 (単位: mm)

図1 研究対象のロボットアーム
 (アーム材質: アルミニウム合金)

本研究では別の経常研究で用いているロボットア

ーム^[1]を題材(図1のアームA, B, C)として進める。この既存のロボットアームに対して3D-CADおよびシミュレーションを用いて設計変更を試みた。

シミュレーションを含む設計には比較的安価で静解析機能が搭載されるAutodesk Fusion(以下Fusion)を用いて実施した。

2. 機械設計とシミュレーションの解析条件

製造業における機械設計では既に類似製品がある場合が多い。そのため類似製品が既にあるという前提での3Dモデルを用いた機械設計の流れ(図2)について簡単に説明する。

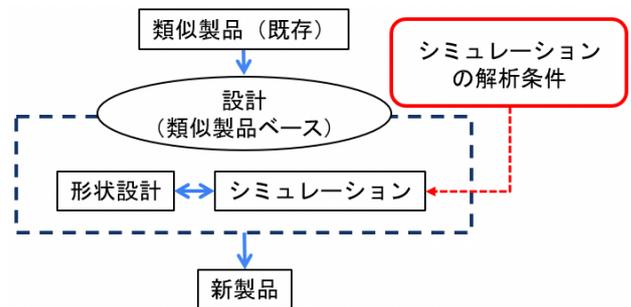


図2 3Dモデルを用いた機械設計の流れ

まず類似製品の3Dモデルをベースにして直接形状変更するか、もしくは参考にして新製品の3Dモデルを作成する。その3Dモデルを用いたシミュレーションで各種性能を評価して、必要があれば形状設計をし直す。

手計算だと簡略化せざるを得ない形状でも3Dモデルで再現できていればそれに応じた計算結果が得られる。これは3Dモデルを使うメリットの一つである。

シミュレーションでの性能評価において設計対象製品は類似製品(既存)の結果と比較して評価される。比較して評価する上でこれらの結果は同じ条件のもとで計算されたものである必要がある。この条件をシミュレーションの解析条件と呼ぶことにする。このシミュレーションの解析条件によっては現実から大きく逸脱した結果となる可能性もあるため、解析条件の妥当性については設計に用いる前に検討することが望ましい。そのため本研究ではまずシミュレーションの解析条件について検討した。

3. シミュレーションの解析条件検討

今回の設計では上述の様に各製品のシミュレーション結果同士の比較であって、引張強さなどの実験で得られた指標との比較ではないものとする。この場合、現実には発生する物理量そのものがシミュレーションで再現できなくてもよいと考える。他の部位と比べて高い値を示しているなどのより危険な部位を特定出来ることが重要であると考え、今回のシミュレーションでは分布傾向が再現できれば良いものとした。そのため、ひずみもしくは応力などの分布傾向や変形の仕方などが現実を示しているかについて確認していく。

3.1 メッシュサイズ検討

精度や分布傾向に影響するシミュレーションの解析条件のひとつにメッシュサイズがあり、この適切なサイズを決定した。具体的には以下で説明する。

前年度に報告した各アームの最大負荷時の条件(図3)を簡易的に設定し、メッシュサイズを各アームで5段階に変化させて解析を実施した(表1、表2)。

表1、2のメッシュサイズ条件は各アームを構成するブラケット(BKT)やロッド(ROD)、コネクタ部品(CON)を元にした、より簡易的なモデルを用いて決定している。このモデルは各部品を長手方向に垂直に切った断面形状を長手方向に単純に伸ばした簡易的な片持ちはりとした。そのモデルの先端に長手方向と垂直に荷重を付加した時のたわみ量がメッシュサイズの変化に対して収束する最大のメッシュサイズの組合せを“中(基準)”と定めた。これを基準としてメッシュサイズを大きくしたものを“大”、“とても大きい”とし、小さくしたものを“小”、“とても小さい”とした。

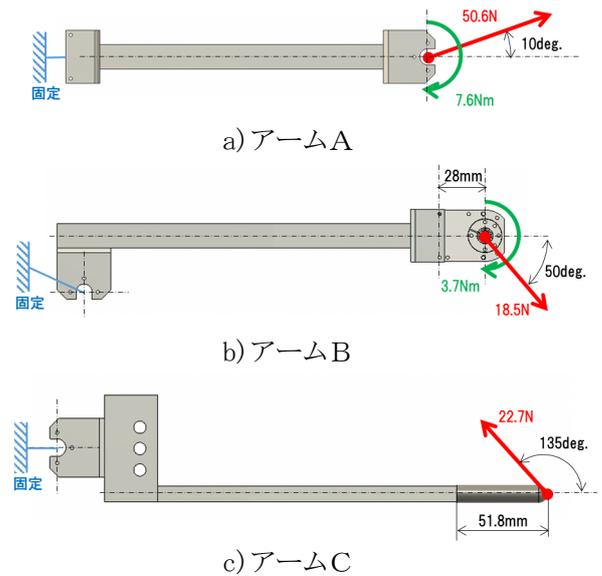


図3 各アームの荷重負荷条件

表1 アームAとBにおけるメッシュサイズ条件

	[mm]		
メッシュサイズ条件	BKT-R	ROD	BKT-T
とても大きい	15	120	30
大	15	60	15
中(基準)	7.5	30	7.5
★小	4	15	4
とても小さい	2	7.5	2

※BKT-Rはモータ固定用、BKT-Tはモータ駆動側組付用。

表2 アームCにおけるメッシュサイズ条件

	[mm]		
メッシュサイズ条件	ROD	CON	BKT-T
★とても大きい	60	30	15
大	60	15	15
中(基準)	30	7.5	7.5
小	15	4	4
とても小さい	7.5	2	2

これらのメッシュサイズ条件でのシミュレーション結果として最大変位量の推移を図4に示す。これを見るとメッシュサイズが小さくなるほど最大変位量が大きくなり値が収束する様子が確認できる。今回は隣り合うメッシュサイズ条件の結果が6%以下となった場合収束していると判断した。この判断基準で一旦決めたメッシュサイズ条件を表1、2において★印で示す。本来メッシュサイズを決める場合アームの種類ごとに分けるのではなく一つに統一してなるべく汎用的に扱えるのが望ましい。本研究でも最終的には統一しており詳細は5. の項目で示す。

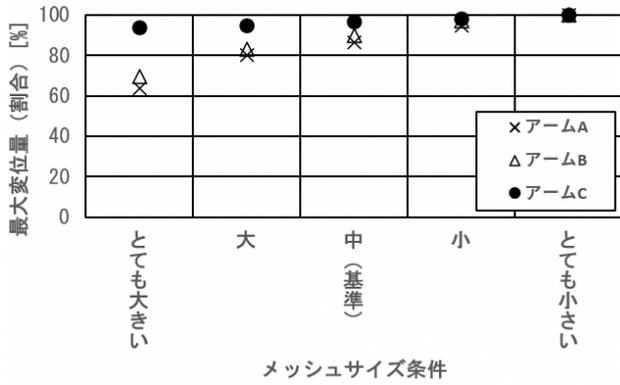


図4 メッシュサイズに対する最大変位量の推移
※“とても小さい”条件の変位を100%とした。

3.2 解析モデルと境界条件の検討

まず図3で示した固定・負荷の条件を適用する対象であるアームと治具の構成を図5に示す。

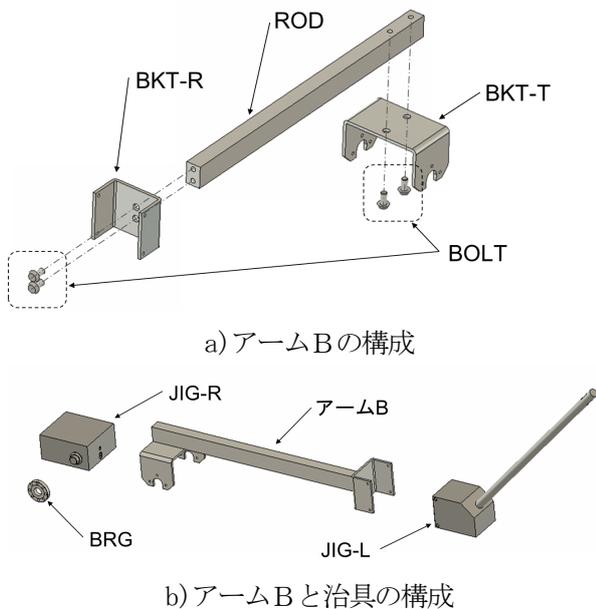


図5 アームBにおけるアームおよび治具の構成

図5は代表としてアームBを示している。一つのアームは複数の部品から構成され、それぞれボルトで連結される(図5 a))。さらにアームBには負荷するための治具(JIG-L)と固定するための治具(JIG-R)がボルトを介して組付けられる(図5 b))。この時、治具はBRK-T(図5 a))から挟み込まれて組付くがこの片側だけにベアリング(BRG)が組付けられる。そのため、片側のみトルクが伝わらない構成となっているが、これは実際のアームBの使われ方を再現したものである。

これらはアームA・Cの構成についても同様である。

表3 解析モデルの概要

解析モデル	部品間ボルト	治具	部品・治具間ボルト
ボルトなし/治具なし	×	×	×
ボルトあり/治具なし	ボルトコネクタ	×	×
ボルトなし/治具あり	×	○	ボルトコネクタ

このようなアームA、B、Cについて表3に示す3種類の解析モデルでシミュレーションを行った。

『ボルトあり/なし』は部品間の締結ボルトを表現しているかどうかを示している。ボルトを表現する場合はボルトコネクタ^[2]という Fusion の持つ機能を用いて設定しており、初期軸力を加味できる。ボルトを表現しない場合はアームの各部品はボルトを用いずに連結され一体部品として表現される。『治具あり/なし』における治具ありはJIG-TおよびJIG-R、BRGなどがモデルで表現され、現実と同様にアームに対して組付けられて計算されている。その際、治具とアーム間はボルトコネクタで連結される。治具なしの場合は治具のモデルは組付けず、治具が組付く部位に対して固定や同等の負荷条件を付与している。

つぎにBKT-Tに組付くBRG部の条件設定について説明する。BRGの内輪(およびシャフト)と外輪が回転方向の動きを互いに阻害せず、半径方向の荷重だけは相互に作用しあう状態を再現したい。そのためにBRG外輪内径の縁とJIG側のシャフトの軸中心とをFusionが有する機能の剛体コネクタ^[3]を用いてBRGの両面2か所(図6)で設定した。これによりBRG外輪の内径とJIGのシャフト軸中心において上記のような相互関係が構築できると考えた。

本来はBRG内輪外径と外輪内径が相互に作用しており、今回はこれを再現できていないが本検討対象はアームであるため問題ないと判断した。

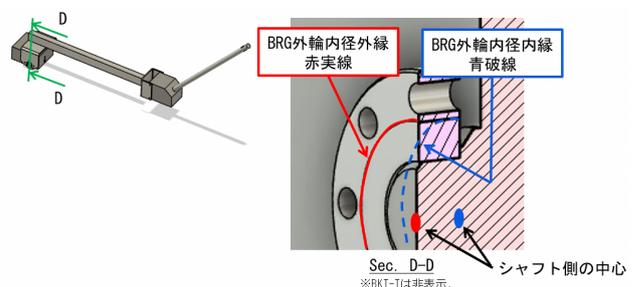


図6 治具ありにおけるBRG部の条件設定

治具なしの場合は、BKT-Tに対してBRGを組付けないが治具ありや現実と同じ挙動を再現させる必要がある。今回はBKT-Tにモータの駆動軸部が組付き(図1)、

モータを支持する BKT-T の両組付け部の回転軸は常に一致するとみなして考えた。その上で BRG が組付く側だけ回転軸まわりに自由に回転できるという境界条件としたい。

これを実現するために、BRG が組付く通し穴に対して Fusion における構造拘束^[4]のタイプをリモート^[5]として通し穴が BRG 中心軸まわりの回転を除く自由度すべてを拘束した。その反対側の通し穴は固定とした。

ここまで説明した境界条件で拘束し表 3 に示す解析モデルにおけるシミュレーション結果のうち変位量分布(絶対値)の結果を図 7～9 に示す。

各解析モデルの結果を各図の a)～c) に示す。図 7 においては下方の BKT に固定用治具を取り付けるため(図 3)、下方の変位が小さくなるはずである。しかし今回は上述のとおり治具なしの場合(図 7 a) と b)) において BKT-T のモータの回転軸まわりの回転を除くすべての自由度を拘束している。(逆側に本来反作用として生じる荷重を負荷した。) そのため図 7 の a) と b) において上部の BKT-T の回転中心の変位量がゼロとなっており、下方の変位量が大きくなっている。ただ、変形の仕方に着目すれば a)～c) で大きな変化はない。図 6, 7 においても同様に変形の仕方として a)～c) で変化はないと判断した。

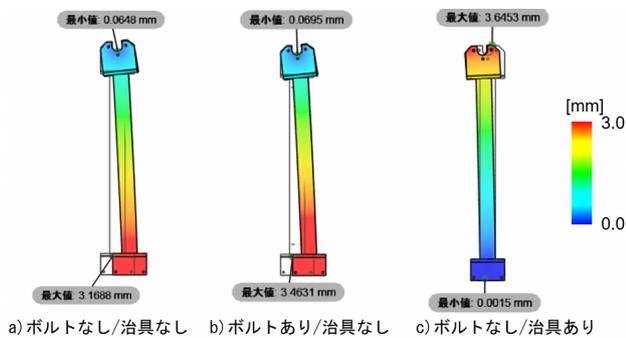


図 7 アームAの変位量分布

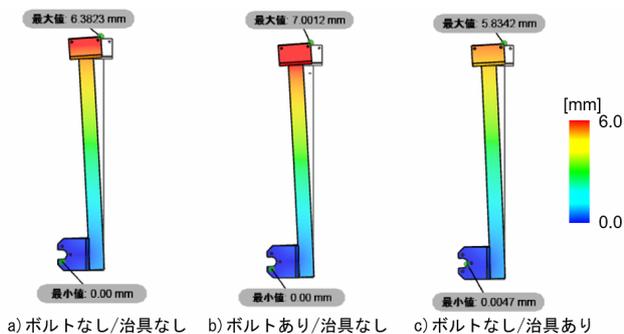


図 8 アームBの変位量分布

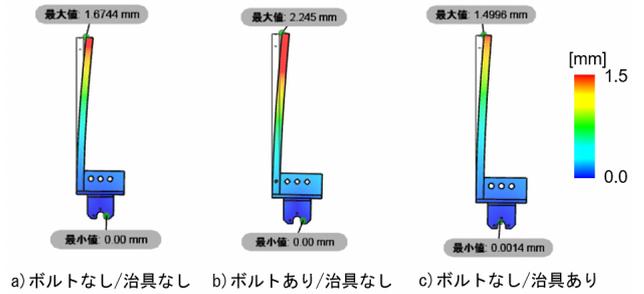


図 9 アームCの変位量分布

また、応力分布についても確認した。応力分布は BKT-T で見られた特徴的な分布について着目した。図 10～12 では Z 方向の垂直応力分布を示す。各図の a)～c) では BKT-T の内側 R 付近で引張と圧縮が左右対称の位置に同様に発生しており大小の差はあるが傾向は同等である。b) や c) ではボルトコネクタを一部利用して締結時の初期荷重が考慮されているため、締結部付近では分布傾向に差異が見られるが強度と比較して小さいので、問題ないものと判断した。これらの結果より今回比較した解析モデルはどれも同等の分布傾向を示せると判断できる。

また、計算に要した時間を図 13 に示しており、アームごとに各解析モデルの計算時間を比較した。ここから確実に言えるのはボルトなし/治具なしの場合がどのアームにおいても計算時間が最も短いことである。

設計で用いる解析モデルとして変形や応力分布の傾向が観測でき、なるべく計算コストが低いものにしたので今回は“ボルトなし/治具なし”を用いていくこととした。

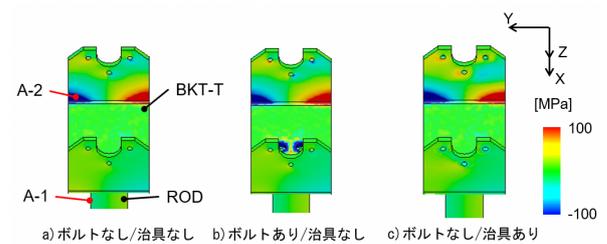


図 10 アームAにおけるZ方向垂直応力分布

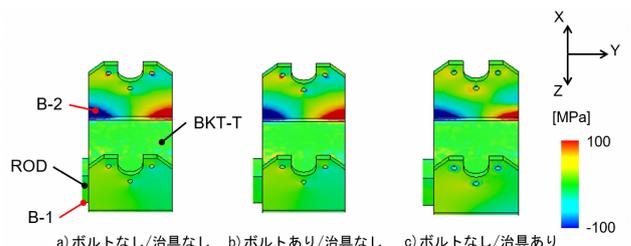


図 11 アームBにおけるZ方向垂直応力分布

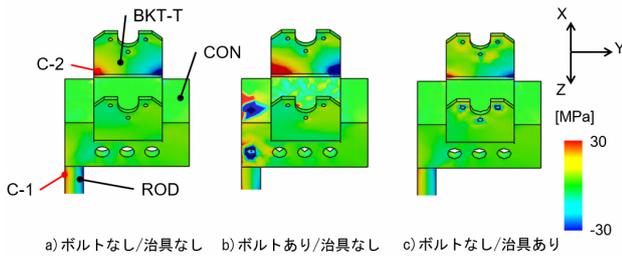


図12 アームCにおけるZ方向垂直応力分布

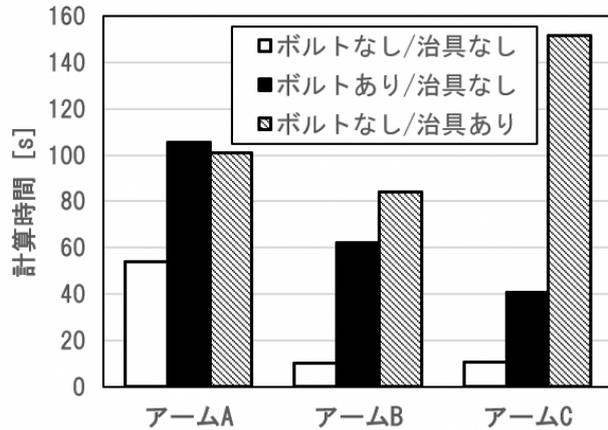


図13 計算時間

4. 実験

4.1 実験方法

図3で示した固定・負荷条件をアームに適用して実験をし、ひずみを測定した。図14に代表としてアームBの試験装置構成を示す。シミュレーションで確認できた特徴的な値を示す箇所に貼付したひずみゲージをデータロガーに接続し、データロガーに接続されるPCで各部のひずみ量を観測した。今回はひずみゲージを用いたが、分布傾向を確認する上ですでに精度も確認されているデジタル画像相関法 (DIC)^[6]や光弾性法^[7]を利用することも有効であると思われる。

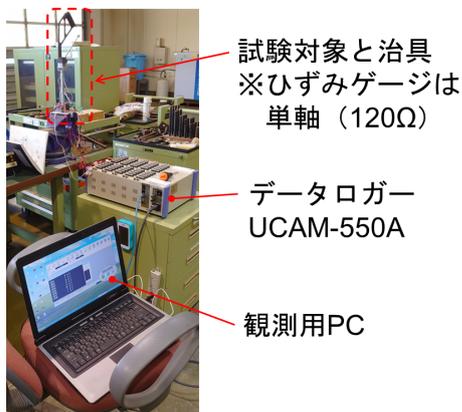


図14 アームBにおける試験装置構成

4.2 実験結果

実測値とシミュレーション結果のひずみを比較した(図15)。観測位置は図10~12中のA-1、A-2、B-1、B-2、C-1、C-2である。ここでB-1についてのみY方向垂直ひずみを示しており、その他はZ方向垂直ひずみを示す。実測とシミュレーションを比較するとどの個所においても正負が合っておりシミュレーションで現実と同様の分布傾向が示せていると考えられる。

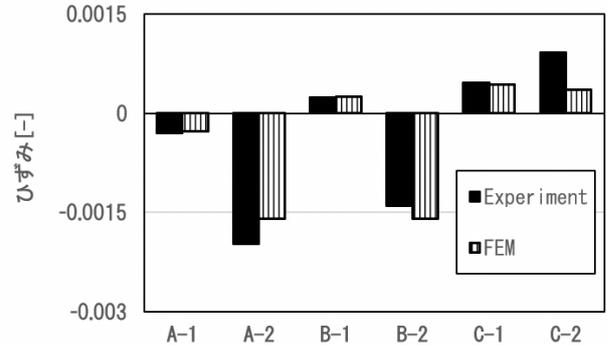


図15 各部のひずみ

5. 設計に向けたシミュレーション条件の統一

4.までの結果から分布傾向が確認できるという点では現状のシミュレーション条件で設計してよいと考えられる。ただ今回のようなアーム部品を設計する場合に細かい形状で条件を変更するのは手間であるため、ある程度の汎用性を持たせる必要がある。そこで今回メッシュサイズをアームA・B(表1の★)とアームC(表2の★)とで分けているものを統一することを考えた。統一するにあたりメッシュサイズがより小さいアームA・Bの条件をアームCに適用できるかを検討した。これまでの条件との比較結果を表4に示す。ミーゼス相当応力の最大値や最大変位量も大きく変化がなく分布傾向についても類似していたので統一可能と判断した。

これよりこの後の設計におけるシミュレーションでは、メッシュサイズをBKTで4mm、その他の部品を15mmとして行うものとした。

表4 アームCに対するメッシュサイズ統一検討

メッシュサイズ条件	アームC	アームA・B
	BKT: 15mm ROD: 60mm CON: 30mm	BKT: 4mm その他: 15mm
ミーゼス相当応力最大値 [MPa]	64.4	61.8
最大変位量 [mm]	1.67	1.69
分布傾向の類似性	○	

6. シミュレーションを用いた設計

6.1 設計したロボットアーム

アームBを対象として軽量化設計を実施した。その際の強度要件として、図3 b)に示す負荷条件下で軽量化前のミーゼス相当応力の最大値を下回ることとした。

軽量化自体は著者の試行錯誤により行った。軽量化した結果とシミュレーション結果を図16に示す。

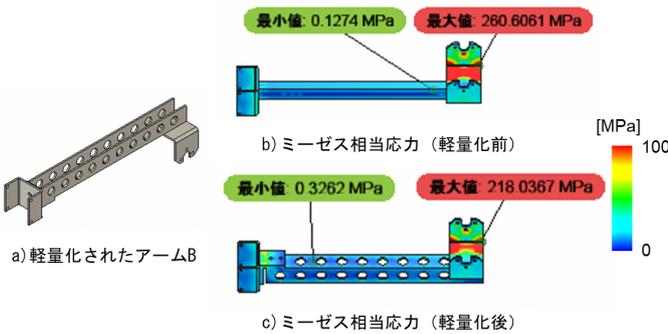


図16 軽量化アームBとシミュレーション結果

形状は図16 a)に示し、軽量化前後で約22g(実測)軽くなっている。ミーゼス相当応力の最大値についても軽量化前の260.6MPaに対して軽量化後が218.0MPaと下回っており強度要件を満たしている(図16 b)とc)。

6.2 シミュレーションと実験値の比較

シミュレーション結果と実測値を比較した。比較位置と測定の向きを図17に示し、比較結果を図18に示す。各所の垂直ひずみは正負が一致しており今回程度の形状の変動であれば設定したシミュレーションの解析条件で分布傾向が確認できると考えられる。

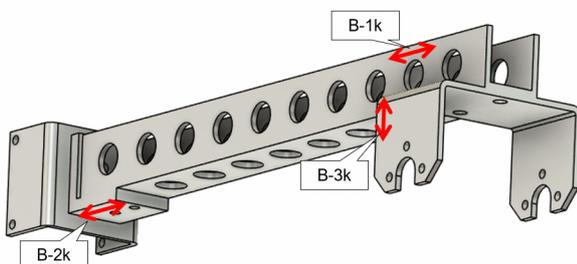


図17 ひずみ比較位置と測定の向き

※B-3kについてはBKTの内側の値について比較した。

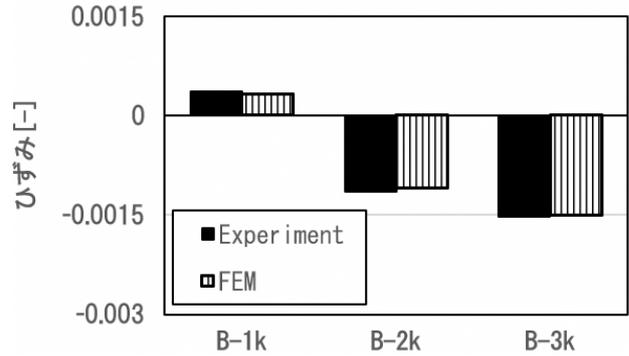


図18 軽量化アームにおける各部ひずみ

7. 結言

本研究ではシミュレーションの解析条件を定めて、これを設計に用いるところまでの一連の流れを示した。また、定めた解析条件を用いることで現実の分布傾向を設計時に確認できた。

今回の結果は設計段階で分布傾向を把握できる可能性について示しているに過ぎない。よりよい解析条件を構築するためにはシミュレーションでは検出できなかった事象が発生する度に解析条件を改善することしかないと考えられる。その経験が各組織のノウハウになる。

今後は本報告内容を元にして、主に技術支援などで還元していく。

参考文献

- [1] 堀江貴雄：長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, p.13, 2023.
- [2] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-ADD-BOLT-CONNECTOR>, Accessed 2025.
- [3] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-ADD-RIGID-BODY-CONNECTOR>, Accessed 2025.
- [4] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-ADD-STRUCTURAL-CONSTRAINT>, Accessed 2025.
- [5] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-REMOTE-CONSTRAINT-CONCEPT>, Accessed 2025.
- [6] 小金丸正明：日本機械学会年次大会講演論文集、2004. 1、pp. 295-296, 2004.
- [7] S. P. Timoshenko, J. J. Goodier：弾性論、pp. 154-171, 2012.