フィングリッパーの構造の最適化

6年B組　川本 稜生
指導教員　守本 寛治

１．要約

フィングリッパーとは主にロボットアームのハンド部に用いられる構造であり、外力の方向に変形する特性により、余分なアクチュエータを搭載せずに柔軟に対象物を把持することができる。本研究では、より物体の把持に優れた構造を特定するため、形状の差異が特性にもたらす変化をシミュレーションで考察した。また、実際にモデルからフィングリッパーを試作して検証を行った。

キーワード　　フィングリッパー、シミュレーション、シリコーンゴム、TPE

２．研究の背景と目的

多方面でロボットの導入が進んでいる現代では、ある機能に特化したものよりも、汎用性の高いものが求められる。対象の形や状態によらない安定した動作を実現するために多様なアームが考案されており、フィングリッパーもその一つである。しかし、製品としての実用化がなされる一方で、フィングリッパーそのものの構造について研究した論文は国内にはほとんどない。そこで、形状を徐々に変えてその特性の変化の様子を調べ、どのような構造なら様々な状況に対応できるのか考えることにした。

３．研究内容

３．１　モデルの作成

３．１．１　設計

シミュレーションをするにあたり、基本となるモデルを作成した。次ページの図１はその設計図である。フィングリッパーは、一般的に薄い側面を複数の架橋部（ブリッジ）で接合した構造をしている。今回は、シミュレーションの負荷を軽減するためにモデルをなるべく単純なものにした。基本モデルでは、架橋部の数（以下「ブリッジ数」とする）を3、架橋部の厚み（以下「ブリッジ厚」とする）を3mm、側面の厚み（以下「側面厚」とする）を1.5mmとそれぞれ定めている。また、材質はシリコーンゴムとした。本稿では、主にこれらの数値を変えた際の挙動の変化について考察する。

３．１．２　Mooney-Rivlin定数の同定

ゴム材料のような大きな変形を伴う材質の場合、荷重と変位量が比例関係になく、非線形解析と呼ばれる手法が必要になる。中でも、Mooney-Rivlin モデルは超弾性体の解析において広く利用されている。この研究ではAutodesk社のFusion 360というソフトを用いてシミュレーションを行ったが、非線形解析の際にモデルの材料特性としてMooney-Rivlin定数を設定する必要があった。本来なら引張試験などの材料試験を実施して算出するべきものであるが、

そうした試験を行うことができなかったため、既存の論文やデータを参考にして、以下のように設定した。

C_{01}	0.1473 (MPa)
C_{10}	3.6731 (MPa)

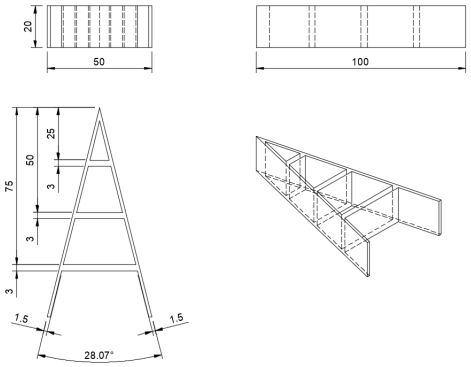

図１　基本モデル設計図

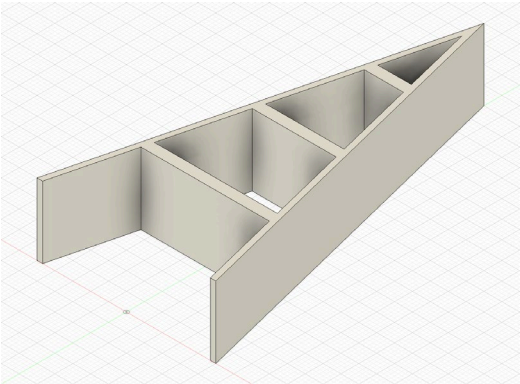

図２　基本モデル外観

３．２　シミュレーション

３．２．１　設定条件と解析手法

モデルの底面（図２における正面）を固定して、図３の矢印のように静的荷重を加えたと仮定し、10 ステップ分の解析を行う。荷重の大きさを変えて複数回シミュレーションを繰り返し、変位（初期位置からの距離）、応力（Von Mises 応力）、ひずみ（等価ひずみ）のそれぞれについて最終ステップでの最大値を調べる。さらに、前述のブリッジ数、ブリッジ厚、側面厚を変えたモデルでも同様にシミュレーションを行い、数値を比較する。

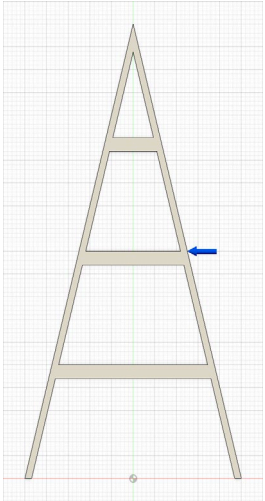

図３　シミュレーション

３．２．２　結果

計 15 種類のモデルでシミュレーションを行い、次ページのようなデータを得た。

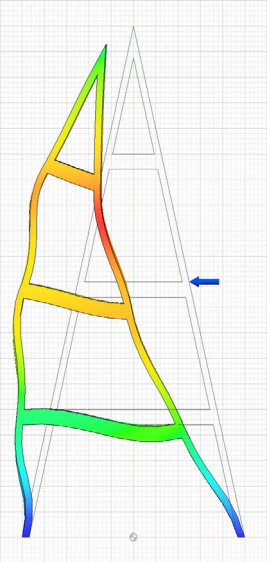

図４　結果（変位分布）

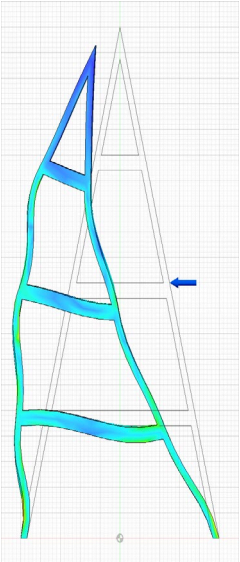

図５　結果（応力）

ブリッジ数/ブリッジ厚/側面厚

3/1.5mm/1.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
5N	11.04	1.007	0.07836
10N	18.1	1.674	0.133
12N	21.22	2.099	0.1494

3/2mm/1.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
5N	7.997	0.9603	0.07624
10N	14.51	1.692	0.1374
15N	20.39	2.462	0.1847

3/3mm/1.5mm(基本モデル)	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	8.034	1.261	0.09008
20N	15.84	2.423	0.1698
25N	19.71	3.061	0.2133

3/4mm/1.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
5N	2.646	0.5366	0.04239
10N	5.309	1.007	0.07906
15N	7.974	1.403	0.1097
20N	10.64	1.799	0.1395
25N	13.64	2.387	0.1793
30N	17.24	3.092	0.2192
35N	23.54	4.282	0.2535

3/5mm/1.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	6.025	1.148	0.09243
20N	12.22	2.303	0.1818
30N	18.65	3.545	0.2751
35N	22.44	4.161	0.324
40N	44.12	5.044	0.3731

4/1.5mm/1.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
5N	9.372	0.8556	0.06315
10N	15.93	1.479	0.1168
12N	18.05	1.722	0.1353

4/3mm/1.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	7.161	1.085	0.08249
20N	14.18	2.05	0.1607
25N	17.6	2.581	0.1997

4/5mm/1.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	4.074	0.7797	0.05892
20N	8.34	1.632	0.1216
30N	12.8	2.557	0.1997
40N	17.87	3.553	0.287

3/3mm/1mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
3N	8.171	0.9032	0.0715
5N	12.78	1.482	0.1153
7N	16.8	2.209	0.1512
8N	19.12	2.575	0.166
9N	23.34	3.204	0.2067

3/3mm/1.25mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
5N	9.366	1.116	0.07575
10N	17.33	2.43	0.1415
12N	21.3	3.016	0.1809

3/3mm/2mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	5.95	0.859	0.05985
20N	11.42	1.721	0.1058
25N	14.07	2.179	0.134

3/3mm/2.5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	4.097	0.7199	0.05123
20N	8.001	1.38	0.1018
25N	9.865	1.697	0.1259

3/3mm/3mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	3.12	0.6146	0.04534
20N	6.203	1.22	0.09096
25N	7.719	1.512	0.1133
30N	9.209	1.793	0.135
40N	12.11	2.324	0.1765
50N	14.94	2.869	0.2179
60N	17.79	3.447	0.2602
70N	20.9	4.022	0.3023
75N	35.55	5.108	0.3553

3/3mm/4mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	2.179	0.4844	0.03438
30N	6.527	1.459	0.105
50N	10.74	2.387	0.174
70N	14.84	3.24	0.2392
80N	16.9	3.639	0.2705
90N	19.06	4.064	0.3012
95N	20.41	4.319	0.3165

3/3mm/5mm	変位(mm)	応力(MPa)	ひずみ
10N	1.546	0.3875	0.0266
30N	4.653	1.176	0.08138
50N	7.741	1.957	0.1365
70N	10.79	2.71	0.1904
90N	13.81	3.427	0.2427
100N	15.33	3.772	0.2682
120N	18.59	4.438	0.3187
125N	19.53	4.601	0.3314

表１　シミュレーション結果

３．３　解析

表１の結果より、変位、応力、ひずみの最大値はそれぞれ荷重の大きさに比例すると考えられる。そこで、最小二乗法を用いて一次関数による近似を試みた。なお、表１において赤字で示されている項目は、シミュレーションの結果変形が著しく、外れ値として処理するべきだと判断したものである。

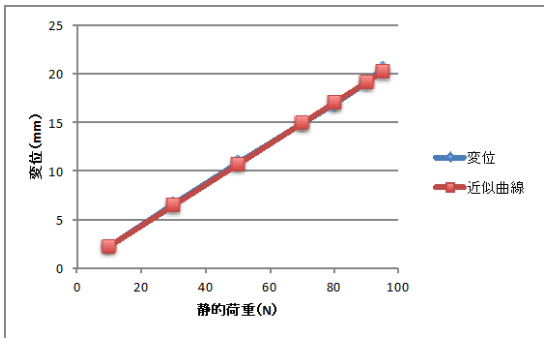

図６　近似の例（3/3mm/4mm）

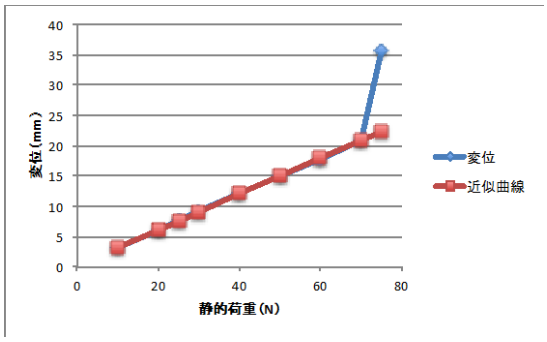

図７　外れ値の処理の例（3/3mm/3mm）

近似によって得られた関数の一次の係数を次ページに示す。数値が大きいほど、静的荷重の増加に対する各項目の増加の割合が大きいことを表す。さらに、これらのデータからブリッジ数、ブリッジ厚、側面厚の差異による係数の増減について考察した。

表３は、ブリッジ数のみが異なるモデルについて比較し、ブリッジ数 3 のモデルに対するブリッジ数 4 のモデルの各係数の割合を算出したものである。ブリッジ数が増加すると係数は減少する傾向にあり、基本的には、ブリッジ数の増加に伴ってより変形しにくく、より壊れにくくなっていると言える。また、ブリッジ厚が増すと係数の減少率も平均して大きくなっており、ブリッジが厚くなることでブリッジ数の増加による効果が大きく出ていると考えられる。

図８～１０は、ブリッジ数 3、側面厚 1.5mm の 5 つのモデルの、ブリッジ厚に対する各係数の変化の様子と、二次関数で近似した曲線をグラフにしたものである。なお、ブリッジ厚が 1.5mm のモデルのデータは変形が大きく、外れ値とした。外れ値を除いた相対誤差の平均値はいずれも 3%未満で、近似の精度は十分であると思われる。各係数はブリッジ厚が 4mm のものから 5mm のものにかけて増加しており、近似によればブリッジ厚がそれぞれ 4.29mm、3.92mm、3.76mm の際に係数が最小値をとると予想される。

図１１～１３は、ブリッジ数 3、ブリッジ厚 3mm の 8 つのモデルの、側面厚に対する各係数の変化の様子と、指数関数で近似した曲線をグラフにしたものである。ブリッジ厚の場合と同様に相対誤差の平均値を算出したところ、変位係数と応力係数は約 2%、ひずみ係数は約 9%となった。ひずみ係数は他に比べ値が小さく、シミュレーション結果のグラフにも若干のブレが見受けられるため、9%は許容範囲であると考える。側面厚が増すと単純に強度も上がるが、側面厚が 1.5mm を下回った辺りから急激に強度が落ち、変形しやすくなっていることが分かる。

	3/1.5mm/1.5mm	3/2mm/1.5mm	3/3mm/1.5mm（基本モデル）
変位係数	1.446146628	1.239289448	0.778714286
応力係数	0.151652968	0.150168564	0.119457143
ひずみ係数	0.010298399	0.010845912	0.00818

	3/4mm/1.5mm	3/5mm/1.5mm	4/1.5mm/1.5mm
変位係数	0.575020022	0.6284	1.253532679
応力係数	0.098930909	0.12080339	0.123944977
ひずみ係数	0.006940399	0.009201257	0.010388436

	4/3mm/1.5mm	4/5mm/1.5mm	3/3mm/1mm
変位係数	0.696778575	0.435446667	2.400111155
応力係数	0.099270672	0.086422333	0.371987931
ひずみ係数	0.007814963	0.006830733	0.021086942

	3/3mm/1.25mm	3/3mm/2mm	3/3mm/2.5mm
変位係数	1.683307054	0.542136767	0.385367609
応力係数	0.269767426	0.086653333	0.06526392
ひずみ係数	0.014661485	0.004893517	0.004989285

	3/3mm/3mm	3/3mm/4mm	3/3mm/5mm
変位係数	0.293354943	0.211654716	0.154013127
応力係数	0.056131756	0.044500881	0.036950019
ひずみ係数	0.0042506	0.003312508	0.002661552

表２　近似の一次係数

	3/1.5mm/1.5mm	4/1.5mm/1.5mm	割合
変位係数	1.446146628	1.253532679	0.866808838
応力係数	0.151652968	0.123944977	0.817293447
ひずみ係数	0.010298399	0.010388436	1.008742833

	3/3mm/1.5mm（基本モデル）	4/3mm/1.5mm	
変位係数	0.778714286	0.696778575	0.894780779
応力係数	0.119457143	0.099270672	0.831014957
ひずみ係数	0.00818	0.007814963	0.955374491

	3/5mm/1.5mm	4/5mm/1.5mm	
変位係数	0.6284	0.435446667	0.692945045
応力係数	0.12080339	0.086422333	0.715396592
ひずみ係数	0.009201257	0.006830733	0.742369573

表３　ブリッジ数に関する比較

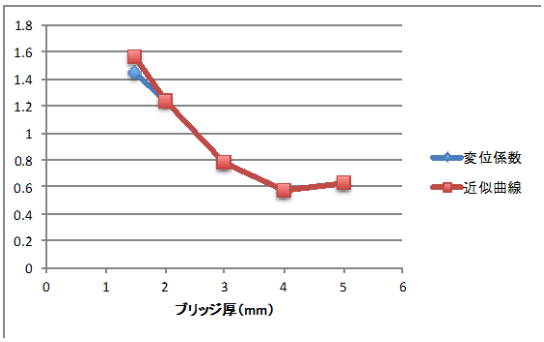

図８　ブリッジ厚と変位係数の関係

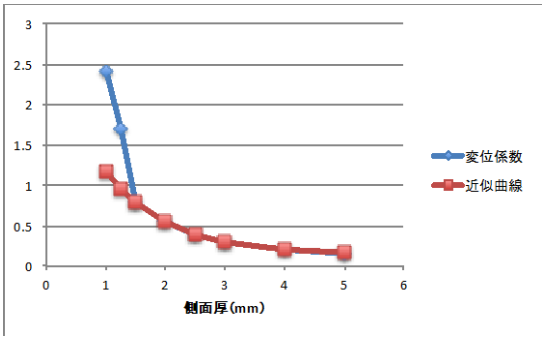

図１１　側面厚と変位係数の関係

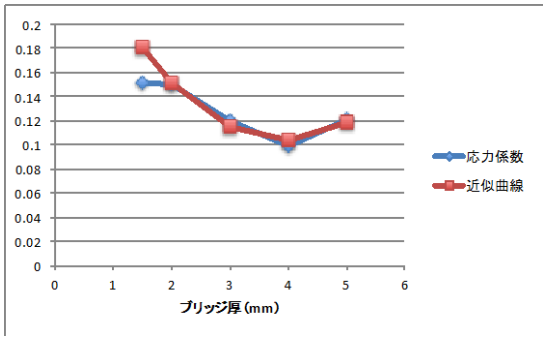

図９　ブリッジ厚と応力係数の関係

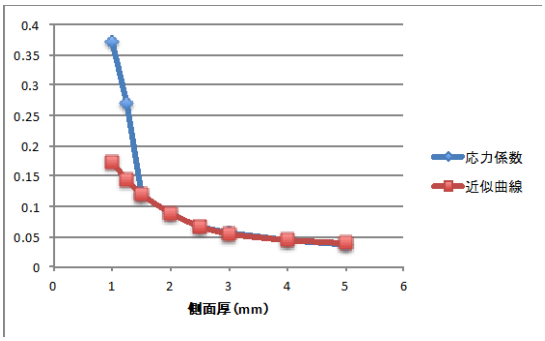

図１２　側面厚と応力係数の関係

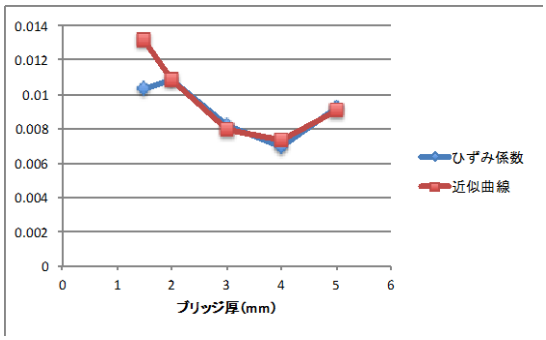

図１０　ブリッジ厚とひずみ係数の関係

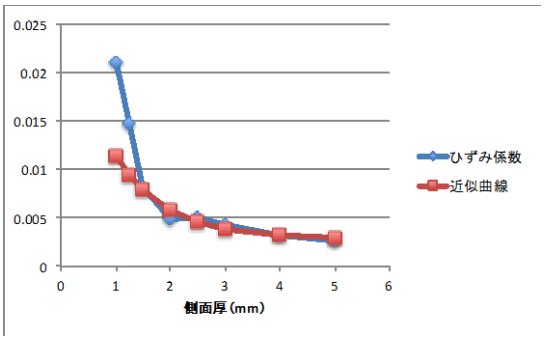

図１３　側面厚とひずみ係数の関係

いることが分かる。

３．４　試作

基本モデルから型を作成し、3D プリンターを用いて出力（ABS を使用）した。フィングリッパー本体の材料には市販の TPE（熱可塑性エラストマー）を使い、熱湯で温めてから型に押し込んで成形した。TPE は、硬化してもシリコーンゴムなどの素材と同様にある程度の弾性を保ち、粘・接着性及び生体適合性を持つため、ロボットアームの材料として適当である。

今回の試作では、実際にシミュレーションと同じように変形することまでは確認できたが、定量的な測定を行うまでには至らなかったので、今後測定方法を考案していきたい。

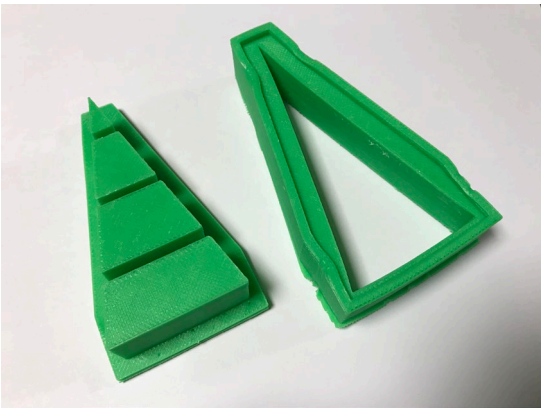

図１４　出力した型

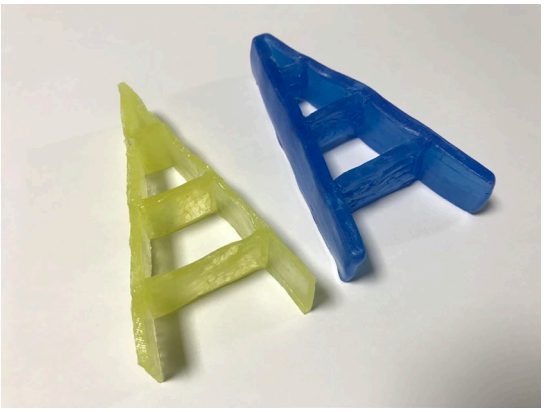

図１５　基本モデルの試作品

４．考察

図１６、１７は基本モデルにおいて Mooney-Rivlin 定数の有無によるシミュレーション結果の違いを比較したものである。（図２の正面から見た図）表示されているのは変位分布であり、色相が赤に近づくほど初期位置から大きく動いていることを表す。定数なしのシミュレーションでは、大きく変形した際に外力に対して垂直方向（図の下向き）に曲がってしまっているが、定数ありの場合では垂直方向への変形が抑えられている様子が見て取れる。これは、Mooney-Rivlin 定数の導入によって弾性体としての性質を加味した結果、定数なしのシミュレーションでは変形に耐えられず上下に逃げていた力を吸収することができるようになったためだと考えられる。また、定数ありのモデルの方がより大きな力に耐えるという点からも、Mooney-Rivlin 定数を考慮したことで現実の弾性体の挙動に近づいたと言えるだろう。ただ、今回はシリ

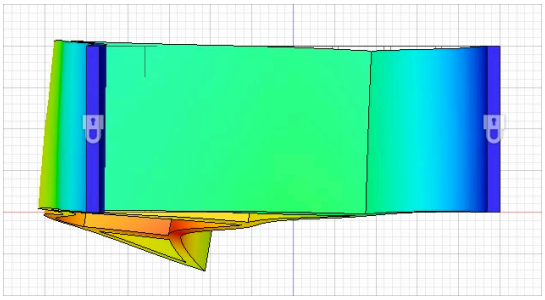

図１６　Mooney-Rivlin 定数なしのシミュレーション

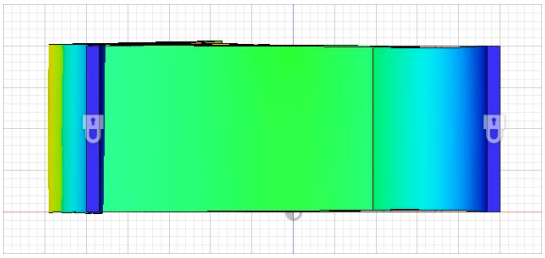

図１７　Mooney-Rivlin 定数ありのシミュレーション

コーンゴムの材料定数を元にシミュレーションを行ったが、設定した値がシリコーンゴムのものとして適切であるかは判断できないため、材料試験によって確認する必要がある。

解析結果によれば、ブリッジ数と側面厚が増加すると強度は上がるが、ブリッジ厚に関しては一定値を超えると逆に強度が低下する。これは、モデル全体のサイズを統一してシミュレーションを行ったために、ブリッジ厚が増すと空洞部分が減り、柔軟性が失われたためだと思われる。ロボットアームとしての機能を果たすためには、強度だけでなく、物体の形状に沿って変形する柔軟さも必要とされるため、十分な強度と柔軟性を両立させなければならない。現在のモデルならば、ブリッジ厚が空洞幅の 2 割弱程度のものが最適であると考えられる。側面厚は指数関数的に変化しており、3mm 以上にしても強度を上げる効果は薄く、硬くなるばかりであるから、側面厚は 3mm 程度にしてブリッジ数を増やすのが効果的だろう。

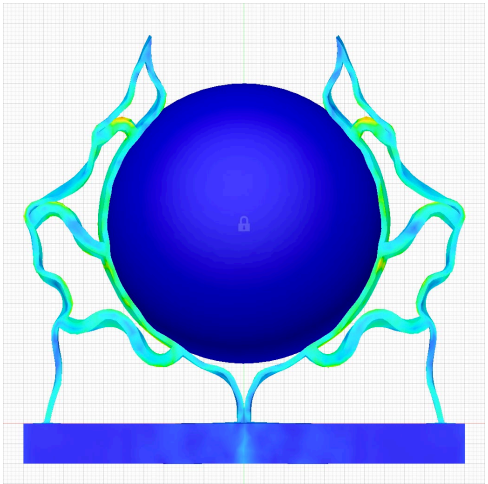

図１８　球体の中心部での把持

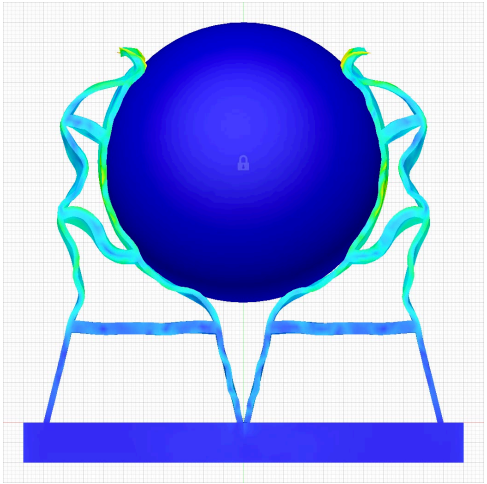

図１９　球体の先端部での把持

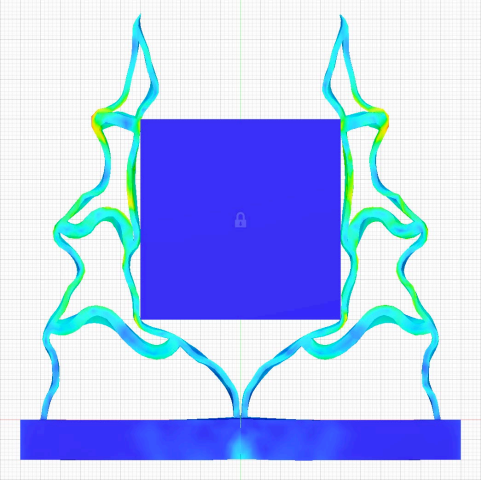

図２０　立方体の把持

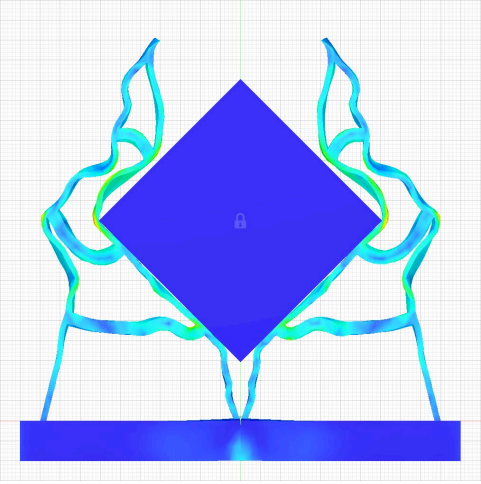

図２１　立方体の把持（斜め）

対象物の形状、位置などを変えて変形の様子をシミュレーションしたところ、ある程度対象の形に合わせて変形することが確認できた。しかし、対象物の大きさの問題か変形に不自然な箇所も散見されるため、モデル、シミュレーション手法共に改善しなければならないだろう。

５．今後の展望

今回の研究では、ブリッジ数とブリッジ厚の違いによる差異について考察するにはデータが不足していたため、さらにモデルの種類を増やして細かくデータを取る予定である。また、図２２のように接合部に溝を掘って、よりなめらかな変形を可能にしたものなど、新たなモデルの作成も進めたいと考えている。

今回は TPE を用いて試作を行ったが、TPE が射出成形可能な流動性を示す温度帯は 200℃前後であり、現状の設備ではより複雑なモデルを再現することは難しい。そこで、常温で成形可能な市販のシリコーンシーラントまたは液体シリコーンを用いることを検討している。

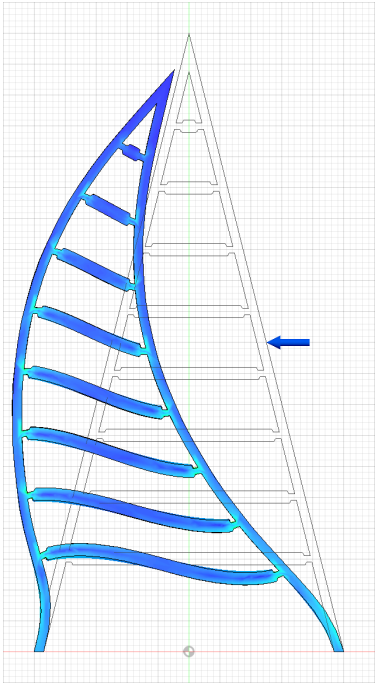

図２２　溝ありのモデル

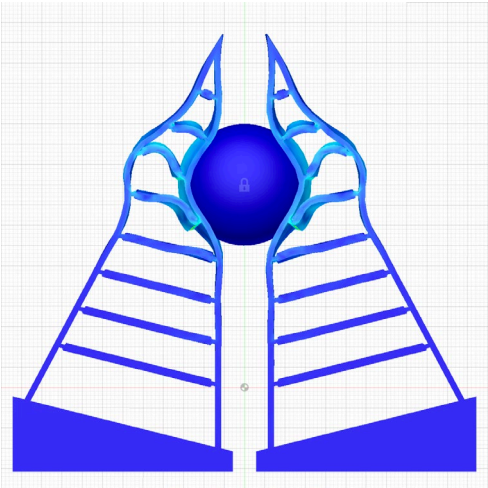

図２３　シミュレーションの様子

６．参考文献

[1] はじめてのゴム材料解析：有限要素法マルチフィジックス解析ツール　ANSYS：サイバネット
https://www.cybernet.co.jp/ansys/case/tips/29.html

[2] 石川覚志「機能性エラストマーの数値解析理論に関する研究」京都大学学術情報リポジトリ（KURENAI），2009 年
https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/81829/1/D_Ishikawa_Satoshi.pdf

[3] 華陽物産株式会社「ゴム物性一覧表」
https://kayo-corp.co.jp/common/pdf/rub_propertylist.pdf

７．謝辞

本研究を行うにあたり、顧問の守本先生にご指導いただきました。また、増井先生には材料特性に関する助言をいただきました。この場を借りて御礼申し上げます。