

構造解析を利用したコンセプトデザイン

上野 明也^{*1)} 角坂 麗子^{*2)} 濱野 智子^{*3)}

Design concept using structural analysis

Akinari Ueno^{*1)}, Reiko Kakusaka^{*2)}, Tomoko Hamano^{*3)}

Topological optimization (phase optimization) in structural analysis can indicate the optimal material layout by applying conditions such as material and load etc. in the given design domain. Usually, a topological optimization function is used to study how to maximize rigidity and minimize mass in structural design, but in this study, topological optimization is used in the initial stage of shape study during product design to study techniques on designing structurally suitable shapes with a high aesthetic beauty while deriving ideas on new shapes.

A “chair” requiring aesthetic beauty and strength, which is a typical theme in product design, was adopted as a design theme in the development.

キーワード：構造解析，コンセプトデザイン，トポロジー，位相最適化

Keywords：Structural analysis, Concept design, Topology, Topological optimization

1. はじめに

プロダクトデザインの形状コンセプト決定において、プロダクトデザイナーは使用する材料の強度を考慮に入れて審美性を持った形状をデザインする⁽¹⁾。しかし、デザイン後の構造解析やモックアップモデルの検証後、強度不足から大幅な形状変更が必要になることがある。プロダクトデザイナーが事前に強度解析することにより、安全な製品の開発が短期化できる。さらに、強度解析の最適構造はコンセプトデザインの造形ソース⁽²⁾としても利用が可能である。

また、近年 Additive Manufacturing（以下 AM）などのデジタル加工技術を活用した個人の作家活動“パーソナルファブリケーション”が目立ってきている⁽³⁾。AM によるパーソナルファブリケーションのアウトプットは試作品レベルのものも多く、構造的な安全性の部分はほとんど考慮されていない⁽⁴⁾。メーカーズ⁽⁵⁾のように個人が事業を行う場合にも、デザインできる手法や、安全性を考慮して商品開発できる環境が必要である。

そこで本研究では、コンセプトデザインの際に、構造解析のひとつであるトポロジー最適化の最適構造から造形ソースを得るとともに、審美性が高い形状をデザインする手法を提案する。

具体的には、プロダクトデザインの代表的テーマの一つであり、強度を重視する“椅子”を本研究のテーマと

して手法開発を行った。

2. デザインプロセス

2.1 トポロジー最適化の条件設定 はじめに、トポロジー最適化の条件設定方法を検討した。構造解析ソフトウェアのトポロジー最適化機能を用いて、造形ソースを得るための最適構造を作成した。ここでは、構造解析ソフトウェアはアルテアエンジニアリング製 SolidThinking Inspire、三次元 CAD システムは PTC 製 CREO を使用した。

椅子は、ソファを使えないような狭いリビング等で利用する 4 本脚の座椅子とした。使用状況や生産現場の金型などの制約を想定し、サイズは 480×480×480 mm 以内とした。座面はバランスを考慮し、床から 190 mm とした。以上の仕様でソリッドモデリングが可能な三次元 CAD で基本形状となる設計領域を作製した。設計領域の材料は ABS 樹脂とした。

荷重は JIS S 1203₋₁₉₉₈ の座面と背もたれの静的強度試験より以下の通り設定した（図 1）。

A) 座面全体：1100 N

B) 背もたれ全面：410 N, 座面全体：1100 N

トポロジー最適化の目標値は剛性最大化とした。脚の位置となる支点は、前脚二本を前方および側面から 100 mm 内側、後ろ脚二本を後方から 50 mm 側面から 100 mm 内側の位置に設定した。

事業名 平成 25 年度 基盤研究

*1) 城東支所

*2) デザイン技術グループ

*3) 環境技術グループ

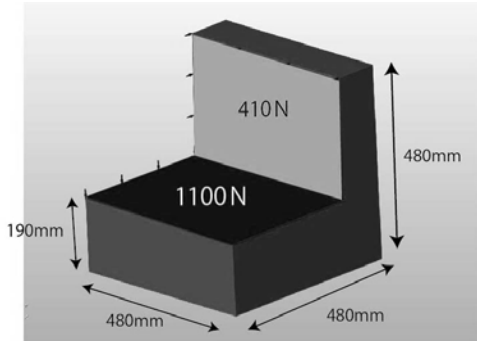


図 1. 基本形状と加える荷重

2.2 トポロジー最適化の結果と考察 2.1 の条件設定から、トポロジー最適化を行った結果、約 3 分のソフトウェアの計算で図 2 のような最適構造が得られた。このような座面全体と背もたれ全面に対し四方へ枝分かれする複数のトラス構造となった理由としては面全体に力が加わり、それを支えるために広がった形状になったと考えられる。そこで JIS S 1203-1998 の座面当て板と背もたれ当て板をモデリングし、座面と背もたれに図 3 に示すように荷重を加えた。その結果、トラス構造がなく、座面と背もたれを追加すれば椅子のフレームとなる形状で、造形ソースとして活用可能な最適形状が得られたと考える。次に図 4 と同様な条件で目標質量を最小に変更して計算を行った結果、図 5 のような最適形状を得ることができ、図 4 と同様な理由に、椅子の造形ソースとして活用可能な結果となったと考える。

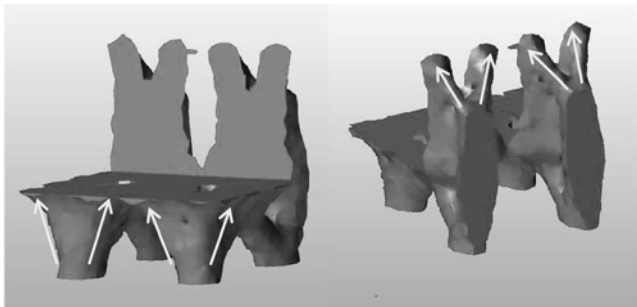


図 2. トポロジー最適化による最適構造
(座面全体と背もたれ全体に荷重)

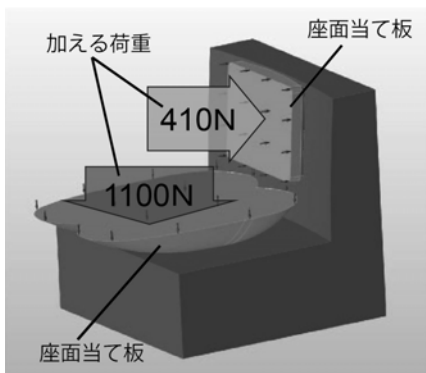


図 3. 座面当て板と背もたれ当て板に加える荷重

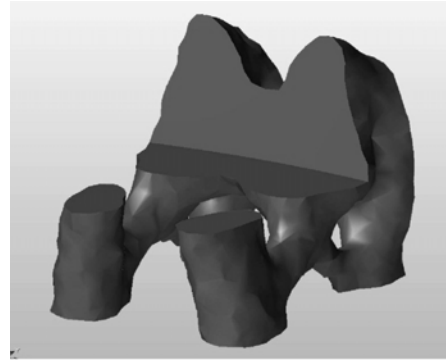


図 4. トポロジー最適化による最適構造
(座面当て板と背もたれ当て板に荷重)

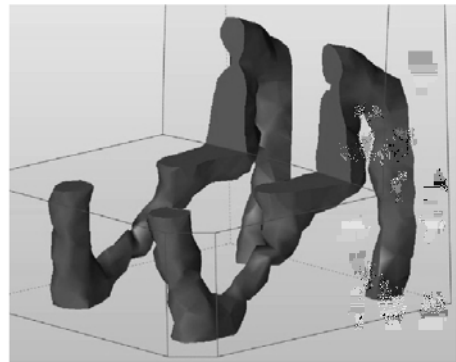


図 5. 剛性最大化，目標質量最小での最適構造

さらに、脚の位置となる支点の位置が最適構造にどの程度影響を及ぼすのか検証を行った。前後左右に 10 cm 以内の位置移動では計算結果に大きな変化はなかった。前脚 2 本の間隔を 5 cm とした場合の結果を図 6 示す。3 点支持の状態と考え、前脚 1 本、後ろ脚 2 本の 3 点で計算を行ったところ、図 6 とほぼ同様な結果を得ることができた。図 4 と同様に造形ソースとして活用可能と考える。

以上の結果から①荷重を与える範囲の限定、②最適化の目標質量設定、③支点の変更が造形ソースを得るためのトポロジー最適化の条件設定のポイントと考察する。

参考として、今回のトポロジー最適化の実質的な作業は設計領域の作製は 1 時間程度、構造解析の条件設定および解析は 2 時間程度であった。

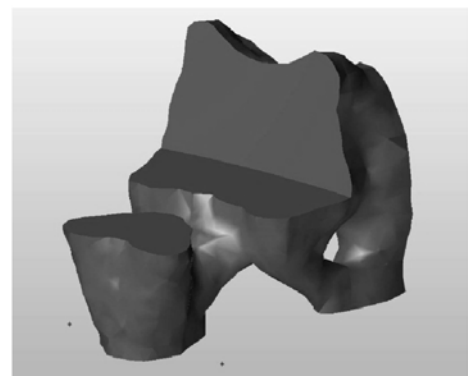


図 6. 前脚 2 本の間隔 5 cm での最適構造

2.3 トポロジー最適化の最適構造のコンセプトデザイン
 トポロジー最適化の最適構造からのコンセプトデザイン化する手法の検討は、フレームが他に比べて細く、試作工程が容易な図 5 で行った。特殊なソフトウェアを使用することなく、多くのデザイナーが利用できる「トレース法」と「押し出し法」2種類のデザイン手法で開発を試みた。加えて工芸品や AM の造形に利用が可能な「モチーフ法」の開発を試みた。

(1) トレース法 図 5 の最適構造は形状変更等の再編集が一般的に行われていないポリゴン形式の 3D データである。また、凹凸の多い最適構造を三次元 CAD 上でトレースしながらデザインするには、曲面が複雑で高いモデリング技術が必要となる。そこで、最適構造を投影図化し(図 7)、ドローイングソフト(Adobe 製 Illustrator)によるトレースを行い、輪廓図による三面図を作製した(図 8)。本研究の椅子は側面図から制作を行った。側面図の制作は複雑な透視図法を用いるより容易に行うことが可能だけでなく、発想の幅と展開数を増やす際にも有効となる⁽⁶⁾。

トレースの留意点は、凹凸の多い最適構造の輪廓を忠実に再現しようとせず、一つの線分をできるだけ一定方向の曲線か直線でトレースすることである。このトレースした線が境界線となり、構成される面もシンプルな形状となり、モデリングが容易になる(図 9)。また、最適形状をブロックごとに分けることにより、一つの面を構成する境界線の数を減らすことができる(図 10)。境界線の数が減った面はシンプルな形状になり、モデリングが容易になる。今回の最適化形状は座面や背もたれがないため、座面と背もたれをトレーススケッチの際に加えた(図 11)。

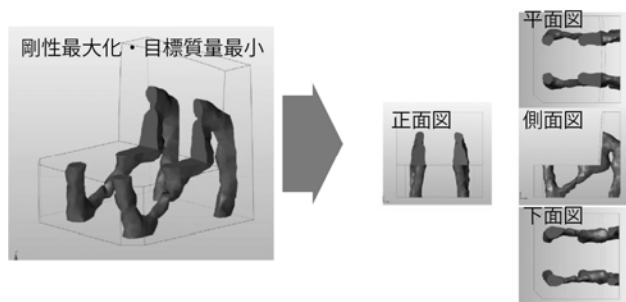


図 7. 最適構造の投影図化

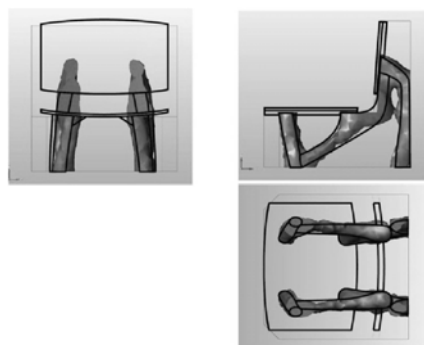


図 8. ドローイングソフトを利用しての3面図化

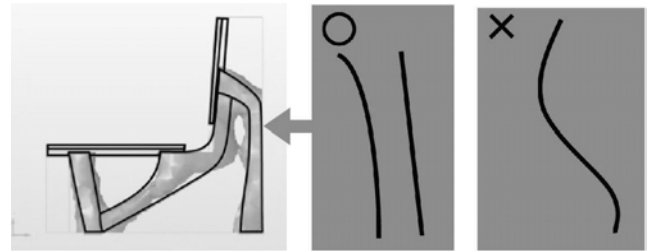


図 9. 一定方向の曲線か直線でトレース

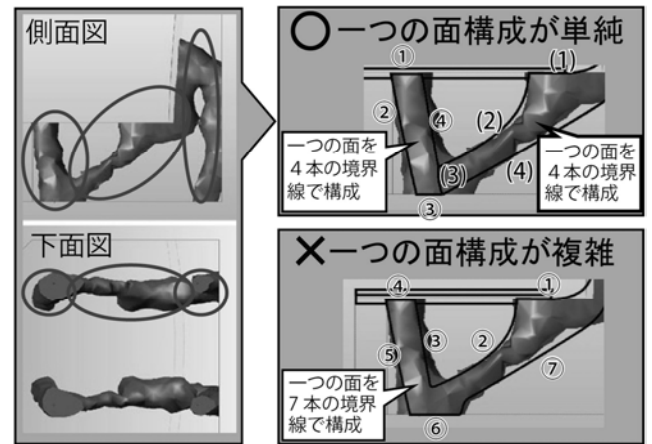


図 10. 最適構造のブロック化

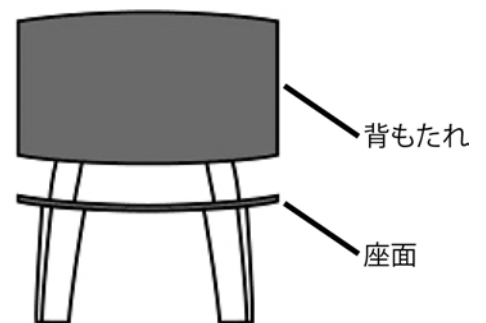


図 11. 座面と背もたれの追加

次に、図 8 の三面図から三次元 CAD によりソリッドモデルを作成した。モデリングによる三次元データ化後に、デザインの確認のために CG を作製した(図 12)。デザインした椅子は造形ソースとした図 5 の最適構造に

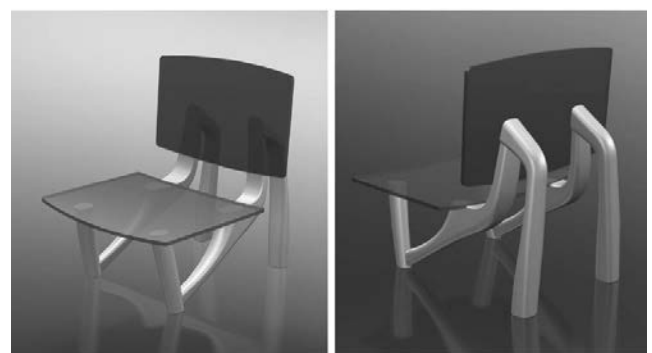


図 12. 剛性最大化質量最小化のデザイン

従い、フレームは左右に分割している。左右フレーム、座面、背もたれがそれぞれ独立していることから、樹脂成型や鋳造など様々な方法での製造が可能になると考える。

今回の最適化の条件は、上からの座面への荷重と背もたれへの荷重のみで、横からの荷重を考慮していないため、座った時の横揺れ発生が推測される。そこで、試作品は座面と背もたれのフレームの間に脚貫による補強を行った（図 13）。脚貫の位置や大きさなどは図 4 の最適構造で左右のフレームがつながっている部分を参考にした。

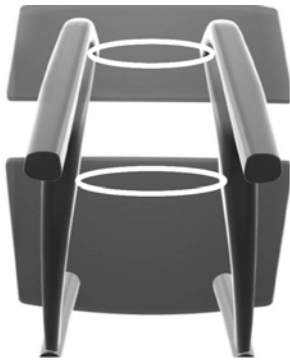


図 13. 脚貫による補強箇所

(2) 押し出し法 図 5 の最適構造投影図のより座面、背もたれ、脚の形状が確認できる側面図を選択し、ドローイングソフトで断面図を作成した（図 14）。次に、断面図を押し出し、立体化することにより椅子の形状を作成した（図 15）。立体化の方法はドローイングソフトのデータを DXF 形式などで書き出した二次元データを 3 次元 CAD で取り込み、数値入力で断面図を押し出して三次元データを作成した。次に、三次元データを基に CG を作製した（図 16）。素材はアクリルに限らず、板金や MDF 合板の曲げ加工などで平板を立体形状に曲げて、製造する製品に展開できると考える。最適構造の厚みの変化を剛性に反映する場合は、厚みが一定のデザインではなく、断面図作製の際に最適構造を参考に、厚みを変化させる方法があると考えられる。また、押し出し形状に限定しない場合は、押し出した形状の中心付近を取り除き、フレームとして使用できるようなデザインも可能となる（図 17）。

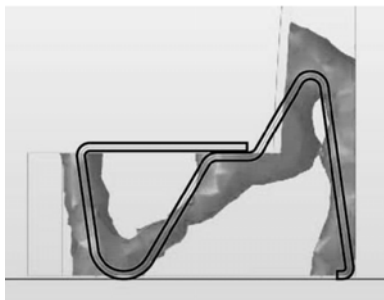


図 14. 断面図の作成

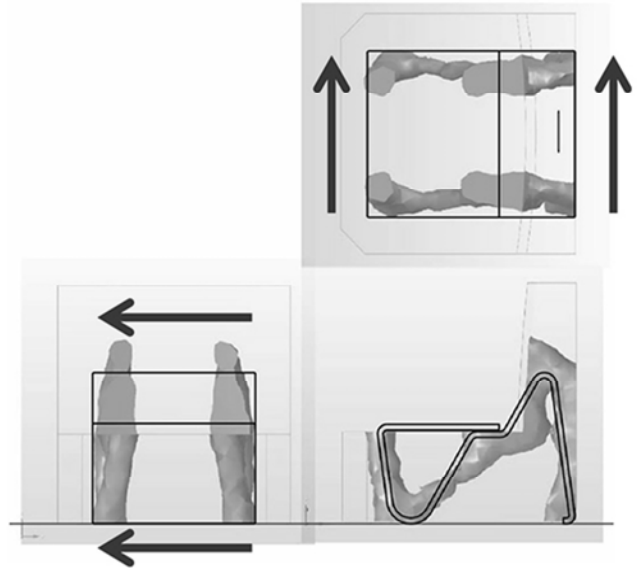


図 15. 断面図の押し出し

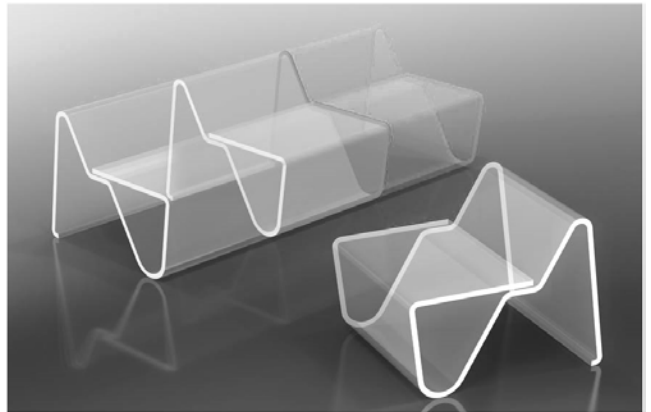


図 16. 押し出し形状の CG

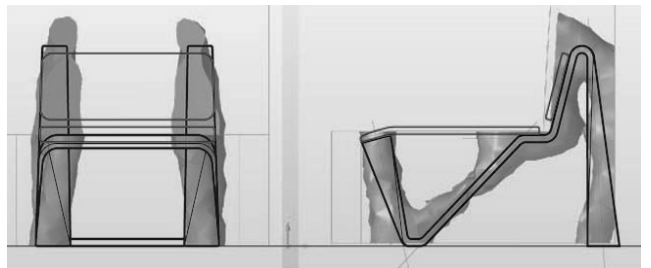


図 17. 押し出し形状からのフレーム形状

(3) モチーフ法 花や幾何学形状などをモチーフとして AM で造形する際には、最適構造に沿わせてモチーフとなる形状を複数配置する手法が考えられる。例えば図 18 に示す三角形を変形させた基本形状を三次元 CAD 上で図 4 の最適構造に沿って配置する（図 19, 20）。最適構造に沿わせ、デザイン作成後の強度不足による大幅な形状変更が回避できると考える。

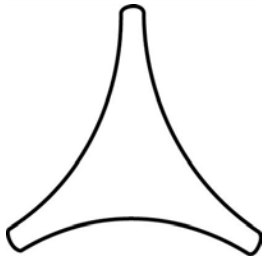


図 18. モチーフとなる基本形状

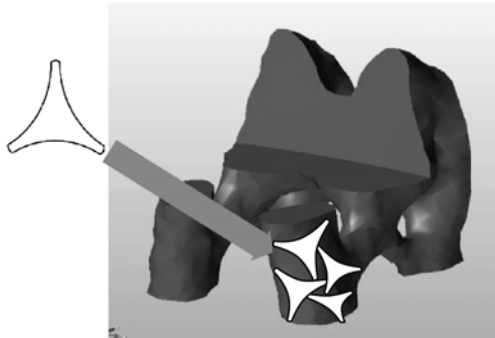


図 19. モチーフを配置

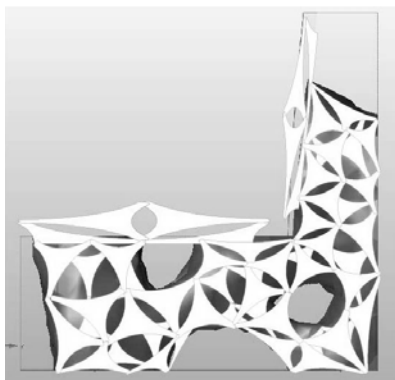


図 20. モチーフをレイアウトした椅子

2.4 試作品の製作および評価 図 5 の最適構造から、トレース法でデザインした図 12 を試作し、強度評価を行った。

(1) 試作 フレーム部分は、トポロジー解析の条件 ABS 樹脂とし、座面と背もたれはアクリル樹脂として CNC 加工機で制作した。フレームはウレタン塗装し、フレーム、座面、背もたれを貼り合せた (図 21)。

(2) 評価 試作品の評価は、トポロジー最適化の条件設定に利用した、JIS S 1203₁₉₉₈ の静的強度試験で行った。座面は区分 3 (負荷位置決めジグによって決まる座面負荷位置に対して 1300 N の力を 10 秒間ずつ 10 回荷重) とした。最適化形状の解析は剛性の最大化であり耐荷重ではないので、荷重を上げて試作品は耐えることができると判断したため、トポロジー最適化の条件設定である区分 2 (1100 N) から、実際の試験では区分 3 (1300 N) に上げた。結果を表 1, 2 に示す。座面の静的強度は、負荷 0~8 回目まで



図 21. 試作品

はたわみ量が 6.1 mm から 6.4 mm まで変化しているが、8 回目以降は 6.4 mm の数値で安定している。たわみ量が途中から変化していないことから、試作品は同様の荷重を繰り返し加えても耐え得ると推測される。また、試験中の椅子のたわみは、アクリルの座面で起こっており、フレーム部分はたわんでいないことを目視で確認した。

背もたれの静的強度試験は座面と同様に区分 3 (負荷位置決めジグによって決まる座面負荷位置に対して 1300 N の力と、後方の脚にストップを当てて座面負荷位置に 560 N の力を 10 秒間ずつ 10 回荷重) とした。結果を表 2 に示す。座面のたわみ量は 6.3~6.6 mm まで変化しているが、負荷 4 回目から 10 回目では 6.5 mm のたわみ量となっており、数値は安定していることから、試作品は荷重を繰り返し加えても耐え得ると推測される。試験中の椅子のたわみを目視で確認したところ、アクリルの座面とアクリルの背もたれで起こっており、フレーム部分はたわんでいないことが確認できた。背もたれのたわみ量は負荷 1 回目のたわみ量 10.5 mm から 10 回目の 9.6 mm まで座面とは逆にたわみ量が減っていく結果となったが、試作品は同様の繰り返し荷重を加えても耐え得ると推測される。座面のたわみ量より背もたれのたわみ量の方が大きい理由としては、座面のアクリル板は 4 隅 4 点をフレームで支えているが、背もたれのアクリル板は下半分のみでフレームを支えているためと考える。

さらに、JIS S 1203₁₉₉₈ で定められている静的強度試験前と試験後の変形量の測定試験を行った。測定のポイントを 8 か所決め (図 22)、ポイント間の距離を試験前後で測定した結果を表 3 に示す。変化量はすべて 0.1 mm 以内に収まった。都産技研における樹脂製の椅子の変形量の試験は 5~10 mm のものが多い。以上より変形しにくい剛性の高い椅子が試作できたと考える。

表 1. 座面の静的強度試験結果

回数 [回]※	変位 [mm]	試験力 [N]	たわみ [mm]
0	105.9	0	0
1-1	112.1	1293.8	6.1
1-2	108.1	0.4	2.1
2-1	112.2	1297	6.2
2-2	108.3	0	2.3
3-1	112.2	1294	6.2
3-2	107.7	0.6	1.7
4-1	112.3	1292.2	6.3
4-2	106.7	0.4	0.7
5-1	112.3	1295.4	6.3
5-2	108.1	0.4	2.1
6-1	112.3	1297	6.3
6-2	108.3	0.4	2.3
7-1	112.3	1294.6	6.3
7-2	108.5	0.4	2.5
8-1	112.4	1292.6	6.4
8-2	108.6	0.4	2.6
9-1	112.4	1290.2	6.4
9-2	108.7	0	2.7
10-1	112.4	1293.4	6.4
10-2	108.4	0	2.4

※-1 は負荷状態, -2 は負荷を除いた状態で測定

表 2. 背もたれの静的強度試験結果

背もたれ				座面			
回数 [回]	変位 [mm]	試験力 [N]	たわみ [mm]	回数 [回]	変位 [mm]	試験力 [N]	たわみ [mm]
0	0	44.8	0	0	105.9	0.6	0
1-1	10.5	561.4	10.5	1-1	112.2	1292	6.3
1-2	0.1	44.8	0.1	1-2	108.5	12.2	2.6
2-1	10.5	568.8	10.5	2-1	112.3	1293.2	6.4
2-2	0.1	45	0.1	2-2	108.6	9.4	2.7
3-1	10.4	568.2	10.4	3-1	112.3	1300.6	6.4
3-2	0.1	45.2	0.1	3-2	108.7	19.6	2.8
4-1	10.3	565	10.3	4-1	112.4	1289.4	6.5
4-2	0.1	44.4	0.1	4-2	108.7	23.8	2.8
5-1	10.1	571	10.1	5-1	112.4	137.8	6.5
5-2	0.1	44.6	0.1	5-2	108.7	23	2.8
6-1	10	567	10	6-1	112.3	1288.2	6.5
6-2	0.1	44.2	0.1	6-2	108.7	11.8	2.8
7-1	9.9	567	9.9	7-1	112.4	1288.2	6.5
7-2	0.1	45.4	0.1	7-2	108.8	23	2.9
8-1	9.7	569.8	9.7	8-1	112.4	1304	6.5
8-2	0.1	44.8	0.1	8-2	108.8	23	2.9
9-1	9.7	566.6	9.7	9-1	112.5	1287.4	6.6
9-2	0.1	44.2	0.1	9-2	108.7	16.8	2.8
10-1	9.6	560.4	9.6	10-1	112.4	1303.8	6.5
10-2	0.1	45.2	0.1	10-2	108.8	24	2.9

※-1 は負荷状態, -2 は負荷を除いた状態で測定

化, 目標質量最小からのデザインのみであったが, 最適形状とそこからデザインの試作品を製作し, 強度評価を行うことにより, デザイン手法の提案を試みた。その結果, 最適形状からどの程度デザイン後に強度が再現されるのかを比較検証することの可能性を見出した。さらに, AM での試作品を完成品として利用するパーソナルファブリケーションへの応用にも繋がると考える。

今後は, 本研究の手法を活用して椅子以外の強度と審美性を必要とする製品の開発, 応用事例を増やすとともに, デザイナーに限らず設計者やクリエイターなどが実務で利用できるデザイン手法を検討する予定である。また応用事例の拡充を行う際には, 木や複合素材の製品, 複数の部品や材料で構成される製品に対して本研究のデザイン手法が応用可能であるか追及を進めていきたい。

(平成 28 年 7 月 6 日受付, 平成 28 年 7 月 22 日再受付)

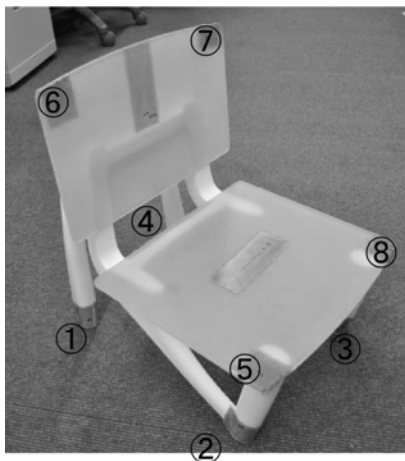


図 22. 変化量の測定

3. まとめ

コンセプトデザインにトポロジー最適化形状を利用した結果, 3 時間程度でコンセプトとなる形状を得ることができた。また, 最適構造からのデザイン, 試作により変形の少ない剛性の高い椅子を製作することもできた。本研究での試作は CNC 加工機による切削で制作するため, 剛性最大

表 3. JIS S 1203 静的強度試験前と試験後の変形量の測定試験結果

測定箇所	試験前の距離[mm]	試験後の距離[mm]	変化量[mm]
1-2	36.3	36.4	0.1
2-3	26.7	26.6	0.1
3-4	36.1	36.1	0.1
4-1	25	25.1	0.1
1-3	43.9	44	0.1
2-4	43.7	43.7	0.1
5-6	44.3	44.2	0.1
7-8	44	44.1	0.1

文 献

- (1) 日本インダストリアルデザイナー協会:「プロダクトデザイナー—商品開発に関わるすべての人へ」, ワークスコーポレーション, pp.210-211 (2009)
- (2) 日本インダストリアルデザイナー協会:「プロダクトデザイナー—商品開発に関わるすべての人へ」, ワークスコーポレーション, pp.132-133 (2009)
- (3) 田中浩也:「FABLIFE デジタルファブリケーションから生まれるつくりかたの未来」, オライリージャパン, pp.12-26 (2012)
- (4) Neil Gershenfeld, 糸川洋訳:「Fab パーソナルコンピュータからパーソナルファブリケーションへ」, オライリージャパン, pp.28-73 (2012)
- (5) Chris Anderson, 関美和訳:「MAKERS 21 世紀の産業革命が始まる」, NHK 出版, pp.130-154 (2009)
- (6) 福田哲夫:「スケッチの基本と立体化」, DESIGN PROTECT No.103, p.56 (2014)