

フレーム構造の最適設計に関する研究 (第1報)

都知木邦裕*¹ 南部洋平*¹ 半田隆志*² 香西良彦*²

Study on the Optimal Design of Frame Structures

TOCHIKI Kunihiro*¹, NAMBU Yohei*¹, HANDA Takashi*², KOZAI Yoshihiko*²

抄録

本研究では、実製品への適用を見据えた最適設計手法を構築するために、手動車椅子のフレーム構造を対象に断面寸法の最適化を行った。3Dスキャナにより実機の形状を計測し、1次元ビーム要素を用いた有限要素解析モデルを構築した。JIS T 9201:2016 (手動車椅子)を参考にした解析条件のもと、OptiStructを用いて質量最小化を目的とした寸法最適化を実施した。さらに、生産性への配慮として、接合位置を考慮した現実的なフレーム構造の最適設計の適用手順を体系化した。

キーワード：フレーム構造，寸法最適化，有限要素法

1 はじめに

近年、輸送機器や建築構造など多様な分野において、軽量化や高剛性化を効率的に実現する手段として、構造解析と最適化アルゴリズムを組み合わせた最適設計手法が、製品開発に取り入れられつつあり、特にトポロジー最適化は、構造の形状や材料を自動的に導出できる手段として注目を集めている。しかしながら、トポロジー最適化の計算結果は自由形状を伴うことが多く、量産品へ適用することが困難な場合が多い。実際の製品設計では生産性や加工性も考慮した現実的な最適化が重要である。

本研究では、手動車椅子のフレーム構造を対象に、断面寸法を設計変数とした寸法最適化を行い、生産性も考慮した最適設計の適用方法を明らかにすることを目的とする。得られた知見を一般的なフレーム構造の設計に展開可能な設計手順として整理する。

2 解析方法

2.1 最適設計の方針

本研究では実際の製品設計への展開を見据え、トポロジー最適化ではなく、断面形状の寸法最適化を採用した。この手法は既存の形状を大きく変更することなく、標準的な断面形状の中で性能向上を図るアプローチである。

なお、本研究の最適化計算には、Altair Engineering社のOptiStruct (Ver.2023)を使用した。本ソフトウェアは、断面寸法を設計変数とする寸法最適化の計算を行うことが可能である。

2.2 解析モデルの作成

対象としたのは、一般的な手動車椅子の側面のフレーム構造である。フレームの形状は3Dスキャナ (Steinbichler社製 COMET5-11M) を用いて計測した。

解析モデルには1次元のビーム要素を使用した。部材の中心軸上にビーム要素を配置し、各要素には、断面形状を定義する寸法をパラメータと

*¹ 機械技術担当

*² 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

して設定している。ビーム要素を用いることで、計算負荷を大幅に低減できる上、寸法を設計変数として直接扱うことができるため、寸法最適化との親和性が高い。作成した解析モデルを図1に示す。

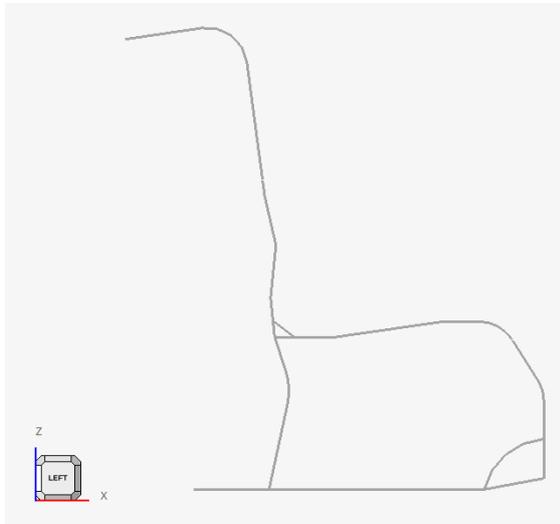


図1 解析モデル

2.3 解析条件の設定

材料特性はアルミ合金（A6061 相当）を想定した材料パラメータ（縦弾性係数 69,040MPa、ポアソン比 0.33、密度 2.7g/cm³）を使用した。荷重条件、境界条件は JIS T9201：手動車椅子の、手押しハンドル上方耐荷重試験とキャストアップ繰り返し試験に相当する条件を設定した。

2.4 最適化計算条件の設定

設計変数として各部材のパイプの外半径と内半径を設定した。外半径は既存製品の寸法を上限とする制約条件を設けた。また、肉厚を外半径と内半径の差から算出するパラメータとして定義し、1mm を下限とする制約条件を設けた。制約条件として耐荷重試験に対しては、応力が材料の引張強さを超えないこと、繰り返し試験に対しては、疲労曲線から算出される許容応力を下回ることとした。目的関数にはフレーム全体の質量最小化を設定し、必要な強度を保ちつつ、軽量化を図った。

2.5 生産性に関する配慮

本研究における構造最適化では、フレーム部材

に1次元のビーム要素を用いており、それぞれの要素に対して断面寸法や材料特性などの属性情報（プロパティ）を割り当てている。プロパティの分割位置で、断面寸法を変化させることができる。

最適化計算では、任意の位置でビーム要素に異なるプロパティを設定することが可能である。しかし、プロパティの分割位置が多くなると、最適化の計算結果として、寸法の異なる部材が多数生成されることになる。実製品ではこれらを接合して組み立てる必要が生じ、生産コストの増加につながる。

そこで、本研究ではプロパティの分割位置を既存製品の接合位置と一致させるように設定した。これにより、最適化後の設計でも新たな接合箇所を追加することのない構造を提案することができる。最適化の計算に使用したプロパティの分割図を図2に示す。図中の番号はプロパティ単位で付した部材番号を表す。

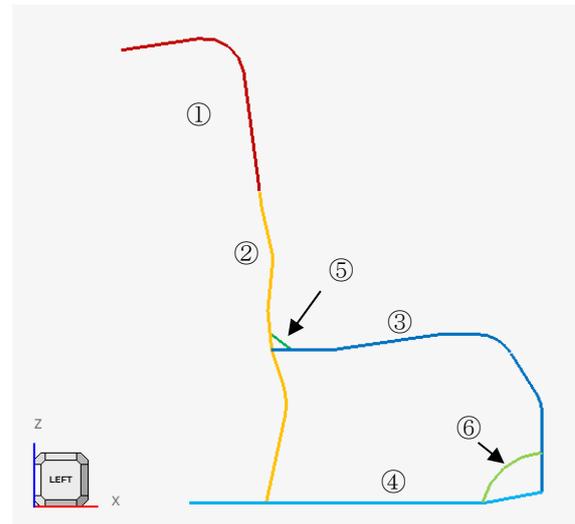


図2 プロパティ（断面寸法属性）の分割図と部材番号

3 結果及び考察

3.1 最適化計算結果

寸法最適化の計算で得られた最適化後の断面寸法の結果を表1に、質量及び最大応力の結果を表2に示す。この結果から、フレーム全体の質量は約30%の軽量化が可能であることが確認された。また、最大応力についても約18%の低減がみら

れ、最適設計の有効性を確認した。

表1 最適化計算結果：断面寸法
(既存製品の数値を1として正規化)

評価項目	部材 番号 (図2)	計算結果	
		外半径	肉厚
断面寸法	①	1.00	1.17
	②	1.00	1.33
	③	1.00	0.64
	④	0.10	0.56
	⑤	0.52	0.61
	⑥	0.20	0.56

表2 最適化計算結果：質量と最大応力
(既存製品の数値を1として正規化)

評価項目	計算結果
質量	0.70
最大応力	0.82

3.2 断面寸法最適設計の適用手順

以上の検討により断面寸法最適化を行う手順を以下にまとめた。解析ソフトは当センターが所有するソフトウェア「OptiStruct」を使用することを前提とした。

(1) 3D形状データの作成

1次元ビーム要素でモデル化を前提とした形状データを作成する。既存製品を対象とする場合には、3Dスキャナ等を用いた実測を行い、ビームの軸心や図心のデータを作成する。

(2) 解析モデルの作成

形状データをもとに1次元ビーム要素で有限要素法の解析モデルを作成する。計算コストを抑えつつ、断面寸法最適化に必要な情報を有するモデルとする。

(3) 接合位置を考慮した部材分割に関する設定

既存製品の接合部に合わせて、プロパティ（断面寸法属性）を分割する。効果として、接合箇所の増加を抑えつつ最適化が可能となる。

(4) 最適化寸法の設定

最適化対象の部材について断面形状の基本寸法（外径や内径など）を設計変数として設定する。

(5) 解析条件の設定

強度試験等で求められる性能を考慮し、試験条件を参考に、荷重条件及び境界条件を設定する。

(6) 制約条件の設定

応力や変形量など必要な性能指標を制約条件として設定する。

(7) 目的関数の設定

軽量化を目的とする場合には質量最小化を、剛性向上を目的とする場合は、コンプライアンス最小化を設定する。

(8) 寸法最適化の計算

OptiStructを用いて寸法最適化計算を行い、計算が正常終了すれば最適化結果が得られる。

4 まとめ

本研究では、フレーム構造に対する最適設計の適用手法を確立することを目的として、手動車椅子のフレームを対象に、断面寸法の最適化を実施した。3Dスキャナを用いて製品形状を計測し、それに基づいてビーム要素による計算効率の高い有限要素解析モデルを構築した。また、JIS T 9201:2016（手動車椅子）を参考とした解析条件を設定し、OptiStructを用いて寸法最適化を行った。

最適化に際しては、生産性への配慮として、既存製品の接合位置に基づくプロパティの分割を行うなど、実製品への適用を見据えた工夫を加えた。これらの手順を通じて、断面寸法最適化の実施手順を体系的に整理することができた。

今後はフレームのレイアウトに着目した最適化へと展開し、より自由度の高いフレーム設計の実現を目指していく予定である。

参考文献

- 株式会社 日経BP, “新型「エルフ」にJFEのトポロジー最適化技術、軽量化と室内空間拡大を両立”, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/15785/> (accessed 2024.3.21).
- 山川宏, “最適設計ハンドブック；基礎・戦略・応用”, 朝倉書店, (2003).