

設計最適化ツールを用いたものづくりの有用性と課題*

黒須 信吾**、南野 忠春**、小原 照記***

トポロジー最適化 (TO) やジェネレーティブデザイン (GD) の設計最適化ツールを用いて、軽量化を図る設計を行い、Ti6Al4V 合金粉末を用いて電子ビーム積層造形によりモデルを造形した。TO 計算において、初期形状が既存形状よりも大きくした形状からの計算の方がより大きな軽量化結果が得られ、鉄製既存製品よりも 75%の軽量化が実現した。また、GD 計算においては、複数の計算結果を得られ、目的に応じたモデルの選択が可能であった。

キーワード：トポロジー最適化、ジェネレーティブデザイン、金属積層造形、軽量化

Case studies of Advanced Design Based on Topology Optimization and Generative Design Tools

KUROSU Shingo, MINAMINO Tadaharu and OBARA Teruki

Key words：Topology Optimization, Generative Design, Additive Manufacturing, Weight Reduction

1 緒言

アディティブマニュファクチャリング (以下、AM と呼称) とトポロジー最適化やジェネレーティブデザイン (以下まとめて、設計最適化ツールと呼称) を組合せて活用することで、先入観にとらわれない革新的な形状で軽量かつ付加価値の高い製品の設計および提供が可能となり、ものづくり業界に革命をもたらしている¹⁾。一方、設計最適化ツールで設計されたモデルは設計自由度が高い形状であることから、従来製造法では製造は難しく、AM での製造対応となるため、その応用先は航空宇宙分野や医療分野など極めて限定的な応用に留まっていた。しかし、昨今の設計最適化ツールの技術進歩により、製造における制約を計算に加えることで、AM 以外の casting、3 軸加工といった従来製法に対応したモデル設計が可能になっている²⁾。これより設計最適化ツールを用いた設計手法は、次世代製品の設計アプローチとして改めて注目され、様々な分野で実用化が進められている³⁾。

本研究では、実製品に対してトポロジー最適化やジェネレーティブデザインの設計最適化ツールを用いて、部品性能を維持しつつ軽量化を図る設計を行う。得られた設計モデルは金属積層造形により試作し、試作品の評価を実施する。その一連のプロセスで得られた知見や課題を抽出することを目的として実施した。

2 実験方法

2-1 計算モデル

本研究での設計最適化ツールを用いた計算モデルとして、子供用自転車 (トレーニングバイク、AVIGO (トイザラス社)) の部品である”フロントフォーク”を選定した (図 1)。この部品は、パイプに円板リングとコの字形の部品が溶接されたものであり、大きさは幅 75 mm、長さ 280 mm である。また、材質は鉄製であるが詳しい鋼種は不明であったため、自転車で多く使用されているクロモリ鋼 (機械構造用クロモリブデン鋼、AISI4130) と想定し、表 1 の物性値を用いて計算を行った。計算に用いる 3D モデルは、実製品の各部位をノギスで実測し、3DCAD で 3D モデルを作成した。実製品の実測質量は 361 g、3D モデルの算出質量は 450 g であった。

2-2 設計最適化ツールソフトおよび試作装置

本研究で利用した設計最適化手法は、トポロジー最適化およびジェネレーティブデザインを実施した。使用したソフトは、それぞれ Inspire (Altair 社) および Fusion360 Generative Design Extension (AUTODESK 社) である。これらは、デザインや設計に求められる必要最低限の形状から荷重や拘束、計算目標、製造方法、材料などを設定することでコンピュータが最適な形状を提案してくれるものであり、製品 CAD モデルが存在しない設計プロセスの超初期段階においてもゼロからコンセプトデザインの創出が可能である。本研究において、トポロジー最適化計算は岩手県工業技術センターで実施し、ジェネレーティブデザインはいわてデジタルエンジニア育成センターで実施した。

* 令和 4 年度ものづくり DX システム導入支援強化業務 (DX 推進のためのモデル事例 (先進事例) の創出)

** 素形材プロセス技術部

*** いわてデジタルエンジニア育成センター

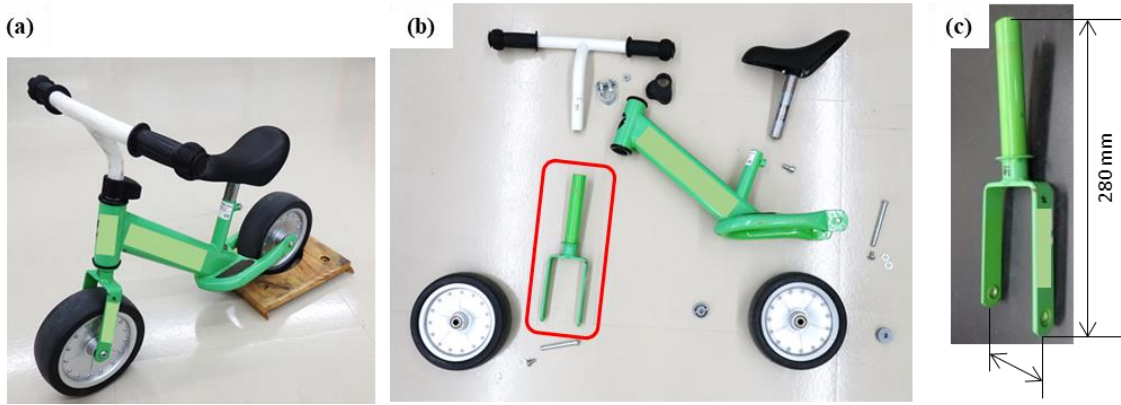


図1 本研究で計算モデルとした子供用自転車の (a) 外観写真、(b) 分解写真および (c) 計算対象としたフロントフォーク外観写真と寸法

トポロジー最適化 (Topology Optimization) は、設計領域や制約条件に基づき、不要な箇所を削り、必要な部分だけを残して、形状を導出する計算であり、ひとつの計算でひとつの最適案を提案するものである。一方、ジェネレーティブデザイン (Generative Design) は、最低限必要な領域 (保持ジオメトリ)、設計しない領域 (障害物ジオメトリ) および荷重条件から成る設計要件を定義して、ゼロの状態から形状を生み出す手法であり、ひとつの計算で複数の計算結果が提案される。これら複数の計算結果は人間が選定する必要がある。

設計最適化ツールにより提案されたモデルの試作は、電子ビーム積層造形装置 (ARCAM A2X, GE Additive 社) を用いて行った。また、使用した材料はチタン合金 (Ti-6Al-4V) であり、設計最適化においても従来材料 (想定) のクロモリ鋼からチタン合金への変更を念頭に設計計算を進行した。計算に用いたチタン合金の物性値を表1に示す。クロモリ鋼と比較して、チタン合金は強度が高いにもかかわらず、密度が低いことから、性能を維持しつつ軽量化を図るには適した材料のひとつとして考えられる。

3 結果

3-1 荷重条件の選定

設計最適化計算を実施するにあたって、まずフロントフォークに掛かる荷重について検討した。従来製品としての耐荷重は 35 kg であったが、大人でも乗れる仕様にするため、JIS 規格 (JIS D 9313-4:2019 自転車-第4部 車体部の試験方法) を参考に“曲げ試験”と“ねじり試験”から負荷させる荷重値を検討した。いずれの試験においても、高負荷条件となる“スポーツ専用自転車 (マウンテンバイク)”の荷重値を参考にした (図2)。曲げ試験に掛かる荷重は 1,500 N であり、ねじり試験に掛けるトルクは 80 Nmm である。この値を基に、表2に示すような荷重条件および組み合わせにおける実製品形状 (AISI4130 想定) における構造解析を5パターン実施し、

表1 本研究において計算で用いた各材料の物性値

材料	密度 (ρ , 10^3kg/m^3)	ヤング率 (E , GPa)	降伏強度 (YS , MPa)
クロモリ鋼 (AISI4130)	7.87	200	690
チタン合金 (Ti6Al4V)	4.43	116	827

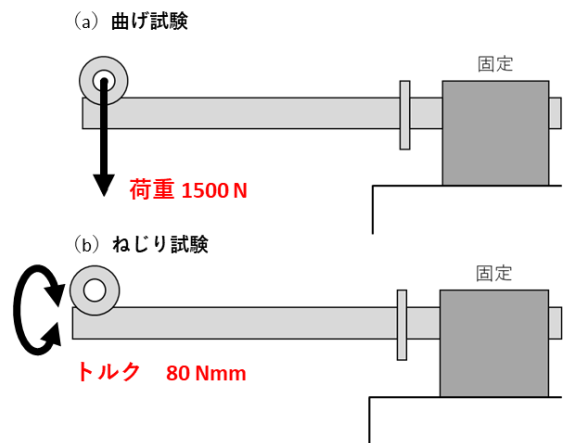


図2 JIS規格を参考にしたフロントフォークに掛かる荷重設定の外観図 (a) 曲げ試験、(b) ねじり試験

表2 各荷重条件およびその組み合わせ

荷重条件	①曲げ試験 荷重 1500N	②ねじり試験 トルク右 80Nmm	③ねじり試験 トルク左 80Nmm
1	○	—	—
2	—	○	—
3	—	—	○
1+2	○	○	—
1+3	○	—	○

その結果から本研究に用いる荷重条件を選定した。

図3に各荷重条件における構造解析結果 (引張/圧縮応力表示) を示す。(a) 荷重条件1 (荷重のみ)、(b) 荷

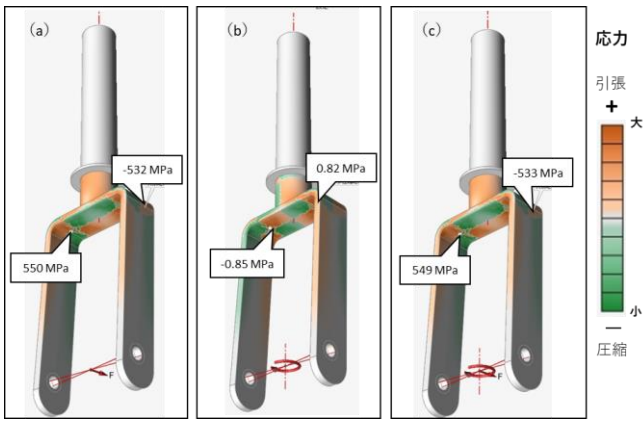


図3 各荷重条件における構造解析結果（引張/圧縮応力表示）
 (a) 荷重条件1（荷重のみ）、(b) 荷重条件2（トルク右）、
 (c) 荷重条件1+2（荷重+トルク右）

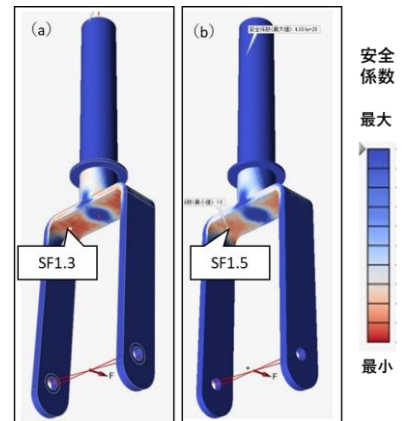


図4 異なる材質における構造解析結果（安全係数（SF）表示）
 (a) クロモリ鋼（AISI4130）、(b) チタン合金（Ti6Al4V）

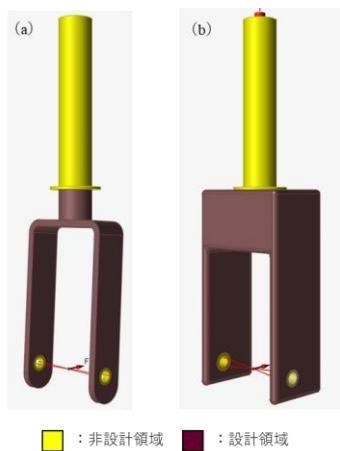


図5 トポロジー最適化計算に用いた初期形状
 (a) 既存形状、(b) 大形状

重条件2（トルク右）、(c) 荷重条件1+2（荷重+トルク右）を示している。図中には、最大応力（引張）と最小応力（圧縮）の箇所を併記している。荷重条件2に掛かる応力は、荷重条件1で掛かる応力よりも極めて小さいことがわかった。また、荷重とトルクを組み合わせた荷重条件1+2での応力値および応力分布は、荷重条件1と酷似しており、荷重条件1が支配的に働いていることがわかる。これより、解析（計算）簡略化のため、本研究での計算に用いる荷重条件を曲げ試験における荷重のみである荷重条件1に選定した。

3-2 異なる材質での構造解析結果（クロモリ鋼とチタン合金の比較）

図4に異なる材質における構造解析結果（安全係数（SF）表示）を示す。(a) はクロモリ鋼、(b) はチタン合金である。材質が異なるが、安全係数の分布は酷似しており、最小安全係数の値もクロモリ鋼の場合が 1.3、チタン合金の場合が 1.5 であった。この時 3D モデルから計算される質量は、クロモリ鋼が 450 g、チタン合金が 254 g である。これよりクロモリ鋼からチタン合金に材料を変えることで、性能を維持したまま 44%の軽量化が見込ま



図6 既存形状からトポロジー最適化計算を実施した計算結果 (a) 質量の最小化(安全係数 1.5)、(b) 剛性の最大化(減少率 50%)







れる。次節以降、設計支援ツールを用いてさらなる軽量化を図っていく。

3-3 トポロジー最適化計算による設計

トポロジー最適化計算を行うに当たり、計算前の初期形状を変え、初期形状の影響についても検討した。図5にトポロジー最適化計算に用いた初期形状を示す。(a) は、実製品と同じ“既存形状”、(b) は、タイヤの干渉を除いた広い設計領域を有した“大形状”である。質量はチタン合金換算で、それぞれ 254 g および 1173 g である。まず、図5に示すように、フレームとハンドルに組み込む領域やタイヤを取り付ける穴など、計算に含めない領域である“非設計領域”と、計算を考慮する領域である“設計領域”を分割した。トポロジー最適化計算は、計算目的の異なる2種類を実施した。ひとつは、計算目的として最小安全係数を指定し、質量が最小になるように計算を行う“質量の最小化”と、もうひとつは、目標質量を設計領域の総ボリュームに対する比率を指定し、そのうえで剛性が最大化になるように計算を行う“剛性の最大化”である。

図6に、既存形状からトポロジー最適化計算を実施し

表3 トポロジー最適化計算結果から得られた3Dモデルの外観図、3Dモデルから計算した質量および既存形状に対する質量比

トポロジー最適化計算結果							
3Dモデルからの 計算値	オリジナル	①	②	③	③'	④	
	既存形状 (AISI4130製)	既存形状 (Ti64製)	既存形状から計算		大形状から計算		
			質量最小化 安全係数 1.5	剛性の最大化 減少率 50%	質量最小化 安全係数 1.5	質量最小化 安全係数 3.0	剛性の最大化 減少率 83.5%
							
質量	450 g	254 g	163 g	171 g	129 g	161 g	296 g
質量比	100%	56%	36%	38%	29%	36%	66%
	—	100%	64%	67%	51%	63%	117%

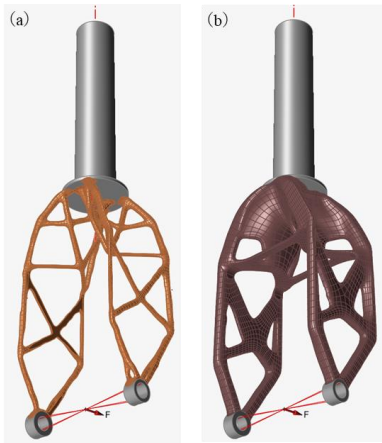


図7 大形状からトポロジー最適化計算を実施した計算結果 (a) 質量の最小化 (安全係数 1.5)、(b) 剛性の最大化 (減少率 83.5%)

た計算結果を示す。(a)は、質量の最小化(安全係数 1.5)の計算結果、(b)は、剛性の最大化(減少率 50%)の計算結果である。設計領域と非設計領域を合わせた総質量はそれぞれ 163 g および 171 g である。2つの計算結果を比較すると、肉抜きされた部位など極めて近い形状を示しており、質量も同等であった。これらの結果は、既存形状モデル(チタン合金製) 254 g からおよそ 35%の軽量化を達成した。

図7は、大形状からトポロジー最適化計算を実施した計算結果を示す。(a)は質量の最小化(安全係数 1.5)の計算結果、(b)は剛性の最大化(減少率 83.5%)の計算結果である。質量はそれぞれ 129 g および 296 g である。

既存形状からの計算結果(図6)とは異なり、特徴的な形状が得られた。両者とも形状の太さは違っても構造は極めて近い形状を示している。また、質量の最小化(安全係数 1.5)の計算で得られたモデル(図7(a))は、既存形状モデル(チタン合金製、254 g)と比較しておおよそ 50%の軽量化の結果が見出され、既存形状からの計算結果よりも大きい軽量化効果が得られた。このことから、トポロジー最適化計算は、初期形状の影響を強く受けることが示唆され、設計領域を拡大することで、自由度の高い設計を導くことも可能となり、より高い軽量化効果が得られることを見出した。

表3は、トポロジー最適化計算結果から得られた3Dモデルの外観図、3Dモデルから計算した質量および既存形状に対する質量比をまとめたものである。大形状からの計算において、安全係数を 3.0 に設定した質量の最小化計算の結果(表3中の③')も追加している。トポロジー最適化計算結果として得られた表3に示す5つのモデル(表3中の①、②、③、③'、④)とチタン合金製の既存形状(表3中の①)を試作した。

3-4 ジェネレーティブデザインによる設計

ジェネレーティブデザインのモデル設定は、トポロジー最適化とは異なり、保持ジオメトリ(図8中の緑部分)と障害ジオメトリ(図8中の赤部分)の設定が必要となる。保持ジオメトリは、トポロジー最適化計算の“非設計領域”に相当する領域である。障害物ジオメトリは、設計してほしくない領域であり、本研究の場合はタイヤの領域に相当する。これらの領域以外が“設計領域”に相当する。予備試験的に本設定で計算を実施したところ、

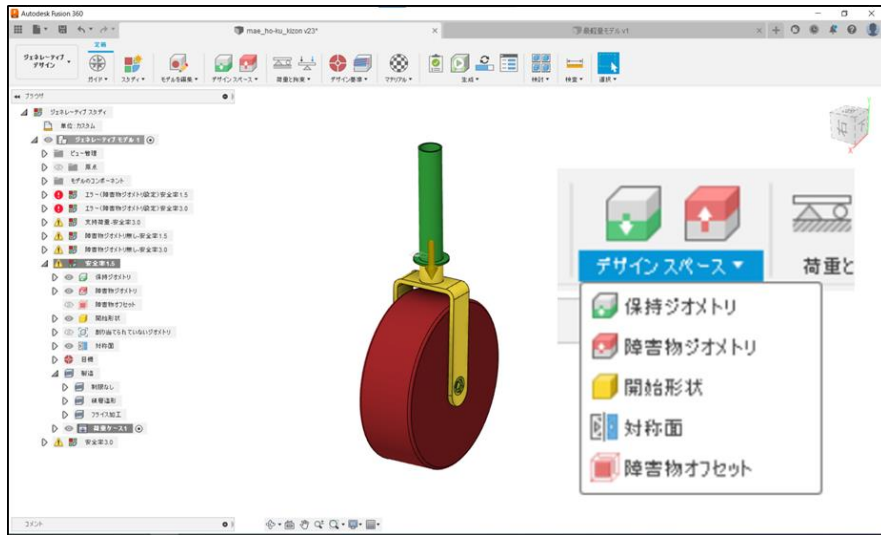


図8 ジェネレーティブデザインにおけるモデル設定画面

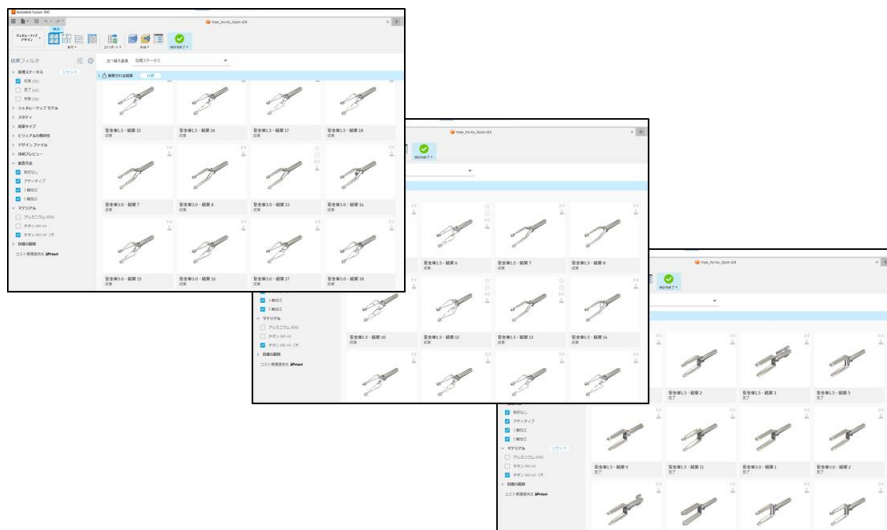


図9 ジェネレーティブデザインにおける計算結果（一例）

計算が安定しなかった。そこで実製品形状を“開始形状”（図8中の黄色部分）と設定し、計算を実施したところ、計算が安定したため、研究では開始形状を設定して計算を実施した。また、ジェネレーティブデザインには“製造制約”の設定がある。本研究では、製造制約の設定として、制限なし、アディティブ（金属積層造形に相当するもの）、3軸加工、5軸加工を選択した。計算は、安全係数が1.5以上になるように計算を実施した。

図9に、ジェネレーティブデザインにおける計算結果の一例を示す。先述したとおり、ジェネレーティブデザインにおける計算結果は複数存在する。今回の計算では97通りの結果が得られた。これらの結果を人間が選択することになるが、様々な視点からグラフで比較することができる。図10に、ジェネレーティブデザインにおける計算結果をグラフ化した一例を示す。この例は、縦軸に最小安全係数、横軸に質量を示したもので、マーカーは、各製造方法を表している。そのほかにも最大応力、最大変

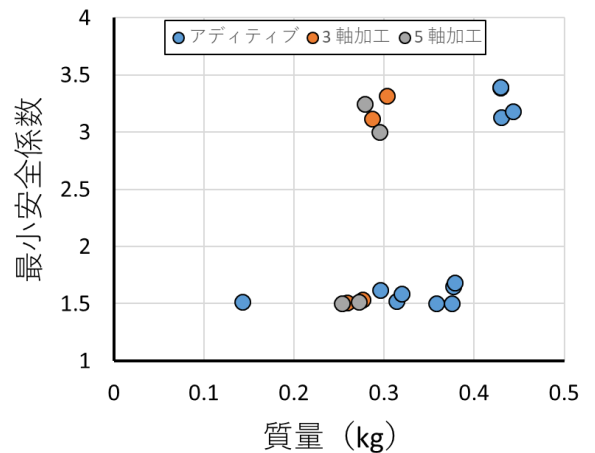


図10 ジェネレーティブデザインにおける計算結果をグラフ化した一例

表 4 ジェネレーティブデザイン計算結果から得られた 3D モデルの外観図、3D モデルから計算した質量および 既存形状に対する質量比

ジェネレーティブデザインを用いた計算結果						
	オリジナル	⑤	⑥	⑦	⑧	
既存形状 (AISI4130製)	既存形状 (Ti64製)	安全係数 1.5			安全係数 3.0	
		アディティブ +Y	アディティブ -Y	アディティブ -Z	アディティブ -Z	
質量	450 g	254 g	121 g	118 g	169 g	214 g
質量比	100%	56%	27%	26%	38%	48%
3Dモデルからの 計算値	—	100%	48%	46%	67%	84%

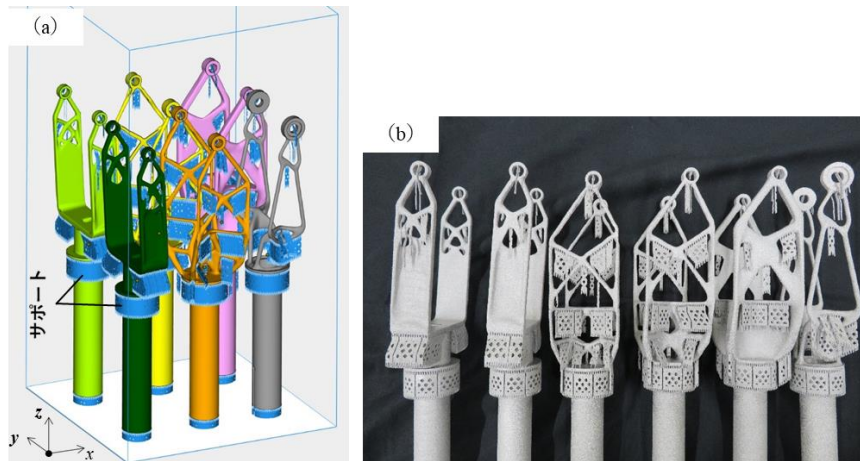


図 11 (a) 造形データおよび (b) 造形物の一例

位、部品のコスト、ビジュアルの類似性などの項目で比較が可能で、目的に応じてモデルの選定ができる。本研究では、提案のあったモデルのうちアディティブ製造で特徴的な形状の 3 パターンに加え、参考のために安全率が 3.0 のモデルも選出した。

表 4 に、ジェネレーティブデザイン計算結果から得られた 3D モデルの外観図、3D モデルから計算した質量および既存形状に対する質量比をまとめた結果を示す。ジェネレーティブデザインで得られたモデルは、表 4 中の⑤と⑥に示すように、先ほどのトポロジー最適化計算で得られたモデルと似た特徴的な形状を示していることがわかる。また軽量化の効果についても同等な効果が得られ、既存形状モデル (チタン合金製、254 g) と比較して

50%以上の軽量化が見込まれる。一方で、表 4 の⑦のように、比較的単純な形状でのモデルも提案されている。軽量化の効果は 33%と⑤と⑥よりも小さいが、従来製法でも応用可能な形状を示しており、積層造形などに頼らない製造方法での提供が可能となる。このように、ジェネレーティブデザインで計算されたモデルは、種々の目的に応じたモデルの選択が可能といえる。表 4 に示す 4 つのモデル (表 4 中の⑤、⑥、⑦、⑧) を試作した。

3-5 金属積層造形によるモデル試作

図 11 に、(a) 造形データおよび (b) 造形物の一例を示す。造形は、従来形状を含む 10 種類を試作した。造形エリアの都合上、図 11 (a) に示すように z 方向に平行にモデルの長手方向を配置して、6 個もしくは 7 個を配置

表5 トポロジー最適化計算を用いた計算モデル試作品外観図、実測した質量および既存形状に対する質量比














トポロジー最適化計算結果							
実測値	オリジナル	①	②	③	③'	④	
	既存形状 (AISI4130製)	既存形状 (Ti64製)	既存形状から計算		大形状から計算		
			質量最小化 安全係数 1.5	剛性の最大化 減少率 50%	質量最小化 安全係数 1.5	質量最小化 安全係数 3.0	剛性の最大化 減少率 83.5%
							
質量	361 g	235 g	147 g	155 g	91 g	126 g	281 g
質量比	100%	65%	41%	43%	25%	35%	78%
	—	100%	63%	66%	39%	54%	120%

表6 ジェネレーティブデザインを用いた計算モデル試作品外観図、実測した質量および既存形状に対する質量比

ジェネレーティブデザインを用いた計算結果						
実測値	オリジナル	①	⑤	⑥	⑦	⑧
	既存形状 (AISI4130製)	既存形状 (Ti64製)	安全係数 1.5			安全係数 3.0
			アディティブ +Y	アディティブ -Y	アディティブ -Z	アディティブ -Z
						
質量	361 g	235 g	106 g	103g	155 g	200 g
質量比	100%	65%	29%	29%	43%	55%
	—	100%	45%	44%	66%	85%



した。造形品にはサポート (図 11 (a) 中の青い部分) が必須であり、造形後サポートを外しやすいようにサポートを設計した。造形高さは、約 290 mm で、冷却時間を含めた造形時間はおよそ 60 時間であった。造形後、サポートについてはハンドツールを用いて除去し、未溶融粉末を注意深く除去したあとで各造形品の質量を測定した。

表5および表6に、それぞれトポロジー最適化ソフトおよびジェネレーティブデザインを用いた計算モデルの試作品外観写真、実測した質量および既存形状に対する質量比をまとめた結果を示す。ほとんどの試作品において、3D モデルから算出した質量よりもわずかに小さい質量であったが、精度よく形状を再現できていることが

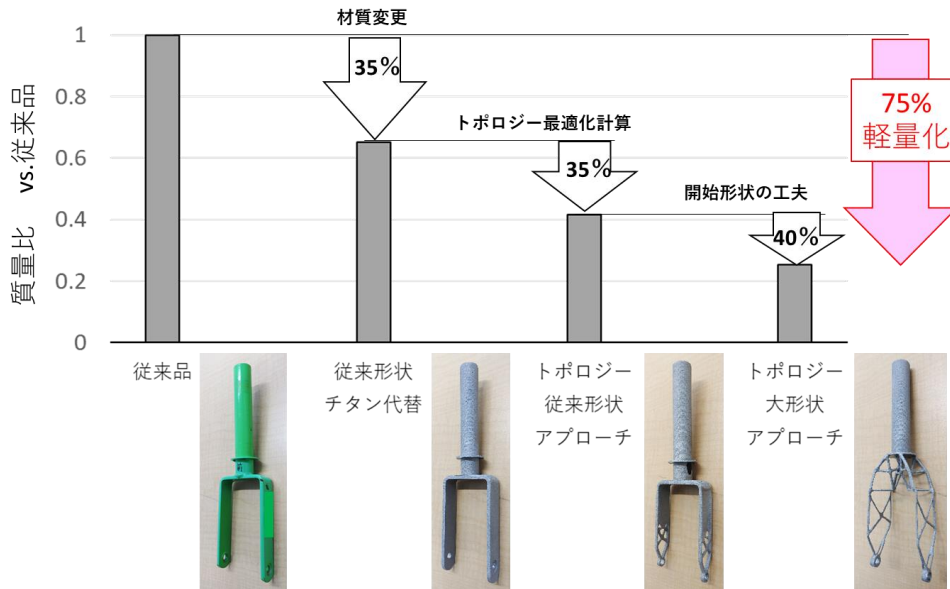


図12 設計最適化ツールを用いた効果～トポロジー最適化計算結果を中心に～



図13 従来品および試作したフロントフォークの装着写真

- (a) 従来品、(b) トポロジー最適化モデル (表 5③)、
- (c) ジェネレーティブデザインモデル (表 6⑤)、
- (d) ジェネレーティブデザインモデル (表 6⑥)

図14 横方向からの荷重荷重検証モデルおよび検証結果

外観写真からもわかる。

ここで、トポロジー最適化計算結果を中心に、設計最適化ツールを用いた効果 (図12) について述べる。鉄製の従来品をチタン合金に材質変更することで 35%の軽量化が図られた。材料をチタン合金に変えて、かつ従来形状からトポロジー最適化計算したモデルは、さらに 35%の軽量化が実現した。これは、従来品 (鉄製) と比較するとおおよそ 60%の軽量化に相当する。その上、従来形状よりも大きな形状から最適化計算して得られたモデルは、設計の自由度が広がり、従来形状からの最適化計算よりも 40%の軽量化が実現され、最終的には、従来品 361

g から 91 g と、75%軽量化することができた。

4 検証 (試作品の装着および機能性評価)

試作品を製品に実際に装着して機能性を評価した。図13は、従来品および試作したフロントフォークの装着写真である。実際にまたがった状態 (停止状態)、直進走行、走行からの停止において試作品は、従来品と変わらず問題なく機能した。しかし車体を傾けたときなど、横方向に荷重がかかると試作品によっては、大きくたわむこと

がわかった。

そこで、横方向の荷重負荷について検証した。図 14 に検証モデルおよび検証結果を示す。検証モデルは、タイヤをバイスで固定し、横方向に荷重をかけてフロントフォーク部品のたわみを観察した。検証に用いたのは、従来形状のチタン合金代替品 (②)、安全係数が異なるトポロジー最適化モデル、安全率 1.5 設定 (③) と 3.0 設定 (③′) を用いた。

この横方向の荷重は、本研究で設定した計算条件には含まれていないものであり、安全係数 1.5 設定のトポロジー最適化モデル (③) は、大きくたわむことがわかった。一方で、安全率を高く設定した最適化モデル (③′) は、ほとんどたわまなかった。このことより、設計最適化ツールを用いることで、従来よりも軽量化された“最適なモデル”は、その時の計算条件での最適なモデルであって、本当の最適なモデルではないことが明瞭に示された。その対策として設定条件を繰り返し見直し、より製品の使用環境を再現することが必要であるが、設定条件以外での調節として、安全係数をあらかじめ大きく設定するなど設計経験を基にした“勘どころ”も有効対策であるといえる。いずれにせよ、その製品の要求性能を深く理解し、設計のノウハウを蓄積し高度化させるため、継続的な研究および実施経験が必要といえる。

5 結 言

県内企業にもものづくり産業のデジタル化を PR するために、先進的なモデル事例の創出を実施した。本事例は、構造用部品の一例として子供用自転車部品を対象に、トポロジー最適化やジェネレーティブデザインなどの設計最適化ツールを用いた設計を実施し、得られた設計モデ

ルを金属積層造形にて試作した。

トポロジー最適化計算について、既存形状からの最適化計算で、鉄製従来品と比較して、60%の軽量化が実現した。得られたモデルは、既存形状から肉抜きするイメージで、大きく形状は変化しない。一方、大形状からの最適化計算では、設計領域が広がったことで特徴的な形状となった。これは、従来形状から計算よりも軽量化効果が大きく得られ、鉄製従来品と比較して、75%の軽量化が実現した。

ジェネレーティブデザインを用いた計算について、「開始形状」を指定することにより計算が安定した。計算されたモデルは、複数存在し、最も効果の大きかったモデルは、鉄製従来品と比較して、70%以上の軽量化を示した。また、得られたモデルを様々な視点より目的に応じたモデルの選択が可能である。さらに製造制限を付けることで、AMに頼らない形状も出力可能であった。

しかしながら、課題も抽出された。その製品の要求性能を深く理解し、繰り返し計算条件を見直し試行錯誤することで、よりリアルに近づけていき最適化を図る必要があることが明らかになった。

文 献

- 1) L. Barbieri, M. Muzzupappa : Performance-Driven Engineering Design Approaches Based on Generative Design and Topology Optimization Tools: A Comparative Study, Appl. Sci., 2022 12(4) 2106
- 2) トヨタが挑戦する 3D プリンタ×ジェネレーティブデザインによる次世代モノづくり, Monoist 記事 2021 年 6 月 21 日 (<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/2106/21/news028.html>)
- 3) ニュースサイト Redshift by Autodesk, (<https://redshift.autodesk.co.jp/>)