

Additive Manufacturing技術を活用した産業用ロボット拡張部品の軽量化に関する研究

真所, 最

<https://hdl.handle.net/2324/7182420>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



博士論文

**Additive Manufacturing 技術を活用した
産業用ロボット拡張部品の軽量化に関する研究**

**Research on Weight Reduction of Extended Components for
Industrial Robot Using Additive Manufacturing Technology**

2024 年 1 月

真所 最

目次

第 1 章 緒論

1.1 AM 技術の発展と特徴	1
1.1.1 熱溶解積層 (Fused Deposition Modeling: FDM) 方式 3D プリンタ	2
1.1.2 光造形 (Stereolithography Apparatus: SLA) 方式 3D プリンタ	2
1.1.3 粉末床溶融結合 (Pouder Bed Fusion: PBF) 方式 3D プリンタ	2
1.1.4 レーザビーム溶融 (Selective Laser Melting: SLM) 方式 3D プリンタ	3
1.1.5 電子ビーム溶融 (Electron Beam Melting: EBM) 方式 3D プリンタ	3
1.1.6 選択式レーザ焼結 (Selective Laser Sintering: SLS) 方式 3D プリンタ	3
1.2 AM と最適化設計技術	3
1.2.1 最適化設計技術について	3
1.2.2 AM 技術との組み合わせと適用事例	4
1.3 産業用ロボットへの応用検討	4
1.3.1 産業用ロボットの特徴と用途	4
1.3.2 産業用ロボットへの AM 部品適用	5
1.4 本論文の構成	7

第 2 章 Generative Design による産業用ロボット 拡張部品の軽量化検討

2.1 緒言	8
2.2 Generative Design による最適化設計	10
2.3 GD 生成モデルの探索とアルミニウム合金粉末を使用した AM による製作	13
2.4 最適化設計前後の比較	15
2.5 デザイン性の評価について	18
2.6 ロボットへの取付けと動作検証	19
2.6.1 産業用ロボットへの取付けと動作実験	19
2.6.2 モータトルク発生電流の比較	20
2.6.3 アーム先端加速度の比較	22
2.6.4 非常停止時の動作検証	24
2.7 結言	28

第3章 光造形（SLA）方式 3D プリンタを用いた ロボット拡張部品製作検討

3.1 緒言	29
3.2 材料選択の課題	29
3.3 素材の色違いによる力学特性検証	30
3.3.1 試験片製作	30
3.3.2 引張試験	32
3.4 引張試験結果の検証	34
3.4.1 Clear Resin	34
3.4.2 White Resin	36
3.4.3 Black Resin	38
3.4.4 各色の引張特性比較	40
3.4.5 色の違いが引張特性に及ぼす影響	42
3.5 SLA 方式 3D プリンタでのロボット部品製作の可能性	42
3.6 結言	43

第4章 選択式レーザ焼結（SLS）方式 3D プリンタによる ナイロン 12 でのロボット拡張部品製作検討

4.1 緒言	44
4.2 SLS 方式 3D プリンタと Generative Design の相性	44
4.3 ナイロン 12 について	45
4.4 切削加工現場で想定される使用環境と調査内容	45
4.5 素材評価	46
4.5.1 試験片製作	46
4.5.2 切削加工による表面仕上げと粗さ測定	46
4.5.3 水溶性切削油への浸漬	48
4.5.4 引張試験	48
4.6 試験結果および考察	50
4.6.1 後加工無し試験片の引張特性	50
4.6.2 後加工あり試験片の引張特性	52
4.6.3 後加工無し・切削油浸漬試験片の引張特性	54
4.6.4 後加工あり・切削油浸漬試験片の引張特性	56

4.6.5 各条件の比較	58
4.6.6 表面粗さの影響考察	60
4.6.7 水道水への浸漬と引張強さへの影響考察	62
4.7 結言	65

第5章 カスタマイズパラメータを使用した Generative Design の検証

5.1 緒言	66
5.2 Generative Design 解析における材料パラメータの設定	66
5.3 材料強度の変化による Generative Design 解析結果の考察	67
5.3.1 GD 解析設定	67
5.3.2 解析結果の比較	69
5.4 Generative Design 解析時の材料パラメータ設定の重要性	72
5.5 結言	72

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ	73
6.2 今後の展開	74

参考文献

本論文に関する研究業績

謝辞

第 1 章

緒論

1.1 AM 技術の発展と特徴

近年、3D プリンタを活用した積層造形 (Additive Manufacturing: AM) 技術の進歩が著しく、造形方式や素材の違いにより多種多様な 3D プリンタが市場に投入されている。適用分野也多岐にわたり、航空宇宙分野、医療分野、エネルギー・産業機器分野に加えて、自動車分野などにも展開されており、その市場規模は年々増加し続けている^{1), 2)}。

3D プリンタの主な造形方式については後述するが、その基礎原理は共通であり、造形対象となるモデルを薄くスライスした断面モデルを積み上げていくことで立体的な造形物を得る方式である。3D プリンタの先駆的装置³⁾は、液状の紫外線硬化樹脂を紫外線で断面形状を一層ずつ硬化させ、紫外線照射・積層を繰返すことで任意形状の立体形状を作製する光造形法 (液槽光重合法) であり、その発明者は日本人の小玉秀男氏であることは意外と知られていない。

AM では、製作対象物の形状の複雑さに関係なく、切削加工や鋳造、鍛造などの工法では実現することのできなかった形状 (例えばラティス構造^{4), 5)}や 3 次元的水管^{6), 7)}など) を簡単に造り出すことができる。人工関節やボーンプレートなど^{8), 9)}個人に合わせたオーダーメイド製品の製作とも相性が良く、さらには従来複数部品を組み合わせで製作していたものを一体化して一つの部品として製作することも可能である。

世界的に浸透しつつあるカーボンニュートラル実現に対しても AM は有効であると注目されている¹⁰⁾。AM は日本語において「付加製造」と表現される通り、製作する対象物のボディのみを積み上げながら造形するため、対象物の体積分のみ素材を利用するという点において、切削加工に代表される「除去加工」のような素材のロスがほとんど発生しない。製造時に廃棄される素材が少ない工法であるため、環境負荷の小さい製造方法としても認知されつつある。

以下に現在実用化されている主な積層技術^{1), 2), 11)}について概説する。

1.1.1 熱溶解積層（Fused Deposition Modeling: FDM）方式 3D プリンタ

熱可塑性樹脂を使用する方式であり、溶融した樹脂をプリンタのノズルより押出してモデルの一層ずつを一筆書きのように造形する。ABS やポリカーボネートなどの熱可塑性樹脂を使用することができ、構造がシンプルであることや低価格な機器が多く販売されていることもあり、ホビー用としても世界的に普及している。最近では海外メーカ（特に中国）から安価で高性能なモデルが数多く発表されている。

一方で、PEEK（polyetheretherketone：ポリエーテルエーテルケトン）や PEI（polyetherimide：ポリエーテルイミド）などのスーパーエンブラと言われる高強度樹脂を造形でき、産業用途でも使用できるハインエンド機器も存在しており、プロトタイプ製作や治工具製作に用いられている。

1.1.2 光造形（Stereolithography Apparatus: SLA）方式 3D プリンタ

光硬化性樹脂（レジン）にレーザを照射して硬化させ、繰返し積層して立体造形する方式である。レーザ照射により造形物の寸法精度に優れ、表面性状も良好で FDM 方式と比較しても滑らかな表面に仕上げるのが可能である。造形物の等方性が高いことが特徴で、複雑形状のモデルを安定して製作することが可能である。

1.1.3 粉末床溶融結合（Pouder Bed Fusion: PBF）方式 3D プリンタ

PBF 方式 3D プリンタは、15～45 μ m 程度の粒度分布の粉末材料をブレードやローラなどで均した粉末床（パウダーベッド）をレーザ等の熱源で加熱し、溶融・凝固することを幾層にもわたって繰返すことで立体形状を造形する方式である。PBF 方式と表記した場合は、金属材料を対象としたものを指すことが一般的である。特に熱源がレーザの場合を SLM（Selective Laser Melting）方式、電子ビームの場合を EBM（Electron Beam Melting）と呼ぶこともある。PBF 方式の装置は複雑形状かつ大型の航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野の多品種少量生産に利用されることが多く、そのための多種多様な素材の研究開発^{12),13)}も進んでいる。近年では熱源の出力向上や多熱源化による造形の高速化、造形エリアの大型化が進み、装置の開発競争が激化している。

1.1.4 レーザビーム溶融（Selective Laser Melting: SLM）方式 3D プリンタ

PBF 方式 3D プリンタのうち、熱源にレーザを使用している場合を SLM 方式という。レーザにはファイバーレーザなどが用いられ、レーザ光の照射位置決めをガルバノミラーで制御する方式が多い。造形中に金属粉末が酸化してしまうと造形品質が落ちるため、それを防ぐためにアルゴンなどの不活性化ガスを装置内に充填させて酸素濃度を下げる場合もある。最近ではレーザの搭載数を増加させ、生産性の向上を図った機種が多く発表されている。

1.1.5 電子ビーム溶融（Electron Beam Melting: EBM）方式 3D プリンタ

PBF 方式 3D プリンタのうち、熱源にレーザを使用している場合を SLM 方式という。電子ビーム方式は真空中で溶融凝固させるため、クリーンで制御された環境を確保することができる。また、電子ビーム方式は 2 つの磁場で移動する電子を制御して高速な位置決めが可能である。

1.1.6 選択式レーザ焼結（Selective Laser Sintering: SLS）方式 3D プリンタ

SLS 方式 3D プリンタは PBF 方式の一種であり、樹脂粉末材料にレーザを照射して焼結させる場合をいう。SLS 方式では様々な種類のナイロンや熱可塑性のエラストマーなどを素材として選択することができる。金属素材とは違い、軽量の樹脂素材であるがゆえに造形時にレーザが照射されず焼結していない樹脂粉末部分がサポート材の役割を果たし、どんなに複雑な形状であっても完全にサポートレスで対象物を製作可能である。

1.2 AM と最適化設計技術

1.2.1 最適化設計技術について

AM 技術の進歩と共に注目を集めているのが、最適化設計のための設計プロセス支援ツールであるジェネレーティブデザイン（Generative Design: GD）^{14), 15), 16)}や、構造最適化手法のひとつであるトポロジー最適化（Topology Optimization: TO）¹⁷⁾である。

GD や TO の基本原理は、最適化設計を実施する構造体の拘束部分や、それに対応する荷重、素材情報等を設定することで、弾性解析に基づき計算が実施され要件を満たすモデルが生成されるというものである。著者が調査した範囲では、弾塑性挙動を考慮した解析手法についての存在は把握することができなかった。GD や TO を活用することで高剛性化・軽量

化された部品設計が可能になるが、これらの手法で設計されたモデルは形状が非常に複雑で、切削加工や鋳造、鍛造などの機械加工による製作が困難である場合が多い。その点 AM はその特性上、対象のモデル形状の複雑さは製作の難易度にほとんど関係なく、むしろ対象モデル形状が複雑であるほどその付加価値を最大限発揮できることが特徴であるため、GD や TO により高剛性化・軽量化された複雑形状の部品を AM によって製作・運用することが注目されている¹⁸⁾。TO はベースモデルに対して解析のための要件定義を行うことで構造最適化されたモデルが 1 対 1 で出力されるのに対し、GD においては対象部品の素材や拘束及び負荷条件、製造方法など、最適化の過程における詳細な要件定義が可能であり、それらを満たすことのできる最適化モデルを複数個生成できることが特徴である。製品の機能やコストなどを総合的に判断しながら最適なモデルを選択できるということもあり近年大きな注目を集めており、構造設計分野において研究開発や実用化が進んでいる^{19), 20)}。

1.2.2 AM 技術との組み合わせと適用事例

先に述べたように、GD や TO を活用した最適化設計部品は AM で製作することでその付加価値を最大限に発揮できる。近年ではその組み合わせで生み出された多くの工業用製品が検討、実用化されており、特に自動車、航空宇宙産業において部品の量産化に取り組んでいる^{21), 22)}。

特に GD は前述の通り、最適化の過程における詳細な要件定義が可能で、それらを満たす最適化モデルが複数個生成されることもあり、これまでにない部品設計方法、プロダクトデザインのフローを実現できることが期待されている。

また、工業用製品だけでなく、家具やオブジェなどのアート製品においても GD と AM の組み合わせが使用されることもあり、複数のモデルが生成されるという特徴からインスピレーションを得ることで有機的で複雑な見た目をした作品を生み出し、これまでにない感性を刺激するプロダクトとして世に出される例²³⁾もある。

1.3 産業用ロボットへの応用検討

1.3.1 産業用ロボットの特徴と用途

産業用ロボット²⁴⁾は、多くの分野において実用化が進んでいるが、機械加工分野、特に切削加工の現場において、工作機械と連動させながら利用されるシーンが増加している。

Fig. 1.1 に、切削加工現場において活用されている産業用 6 軸ロボットの例を示す。

切削加工現場においては、多様な製品群の生産に対応できる汎用的な生産ラインの構築が求められており、同一の設備を用いながらも状況に応じて多種多様な製品加工を自動化させることが一般化しつつある。その生産ラインで使用される産業用ロボットには、限られたスペースの中で素材のピックアップや工作機械へのセッティング、エアブローや次工程への搬送など、多くの機能が求められる。また、各種センサを用いた良品判定や寸法計測値の加工へのフィードバックなど、工作機械とリアルタイムに連動した動作も要求される。そのため、多品種製品・ワークの把持や搬送に対応するためにロボットハンド部品を都度交換したり、作業範囲を拡張させるためにアーム延長用部品を追加装備し、アームの長さを変更することでリーチを調整したりと、様々な工夫が必要となる。アーム長さの変更は、ロボット制御のティーチングにおける特異点回避にも効果を発揮する。複数の動作軸を有するロボットの動作経路において、任意の位置・姿勢に対して取りうる各軸の組合せ解が複数存在することがあり、その解の境界が特異点である。特異点ではロボットの関節動作が不安定になりやすく、ある方向への微小移動が関節角度の大きな変化（急回転）を引き起こす²⁵⁾ことで危険を生じる。特異点の回避方法について報告されている例²⁶⁾もあるが、そのアルゴリズムは市場に存在するすべてのロボットへの実装には至っていない。ロボット制御のティーチングにおいては特異点を通らないような物理的制約を加えることが効果的であり、そのためにアームの長さを細かく変更できるような拡張部品を採用することが望まれる。さらには、高速稼働による作業効率の向上や各動作軸のモータ負荷を低減させ、故障リスクを減少させることも求められる。ロボットに対する要求が増えるということは、それに対応させるための各種センサやアクチュエータ部品を増加せざる得ない状況になり、限られた可搬重量の中で最大限の動作を行うことが困難になるため、ロボットの各種部品はできるだけ軽量であることが望ましい²⁷⁾。

1.3.2 産業用ロボットへの AM 部品適用

前述の通り、産業用ロボットに使用される部品は軽量であることが望ましく、軽量化によるメリットは非常に大きい。部品を軽量化させるために近年注目されているのが、先に述べた GD や TO などの最適化設計技術と AM での製作である。

本研究では、産業用ロボットのアーム長さを変更することのできる拡張部品について、従来の切削加工製部品を評価対象とし、軽量化を目的に GD と AM 技術を活用した拡張部品の設計および製作を行い、これらの手法の有用性や技術課題に関する検討を実施した。



Fig. 1.1 Examples of industrial robot in cutting sites.

1.4 本論文の構成

本論文は 6 章から構成されている。

第 1 章では、AM 技術の発展とその特徴、産業用ロボットの用途や技術的ニーズを述べ、研究背景について説明している。

第 2 章では、産業用ロボットのアーム長さ変更用の拡張部品「アームブロック」について、従来の切削加工製部品を基に GD で軽量化を目的とした最適化設計を実施し、アルミニウム合金粉末を使用した金属 AM により製作し、その有用性と実機適用に向けた問題点を確認した。

第 3 章では、樹脂材料にて部品製作が可能な SLA 方式 3D プリンタに着目し、GD で軽量化した部品を製作・運用するための問題点を検証した。

第 4 章では新たに SLS 方式 3D プリンタに着目し、材料をナイロン 12 としてロボット部品を製作するための問題点を検証した。

第 5 章では強度低下を考慮した材料パラメータを設定した GD 解析を実施することで、生成モデルの挙動について調査し、最適化設計を実施する際には実際に使用する材料が有する特性について使用環境を考慮したパラメータ設定することの重要性を確認した。

第 6 章では結論であり、本研究の総括並びに今後の展望について言及した。

第 2 章

Generative Design による産業用ロボット拡張 部品の軽量化検討

2.1 緒言

著者らは、Fig. 2.1 に示す「アームブロック」と呼ばれるアルミニウム合金 (A2017)製の部品を切削加工により製作し、複数個を結合する形式でロボットに装着することによりアーム長さを自由に変更してリーチの調節やティーチング時の特異点を物理的に回避させ、多様な生産ラインに適用させてきた。この運用方式は汎用性を意識したものであるが、アームブロック 1 個の重量は 640g であり、例えば一般的な 7kg 可搬のロボットにアームブロック 1 個を取付けるだけで可搬重量に対して約 10%を占め、複数個連結すればさらに大きな重量割合を占めることとなり、搬送対象製品やワークの重量次第では搬送ができない、または高速稼働が困難であるという課題が生じていた。この場合、ロボット自体を大型化しなければならない場合や、ロボットの動作スピードを大幅に低下させる必要があり、生産ラインの大型化やコストアップにつながるものが懸念される。そのため、ロボットへ装着する部品の軽量化が求められている。

本章では、前述の切削加工製アームブロックに対して軽量化された新たなアームブロックを開発することを目的とし、AM により製作することを前提として GD を活用した最適化設計を実施し、その効果について従来部品との比較を基に検討した。

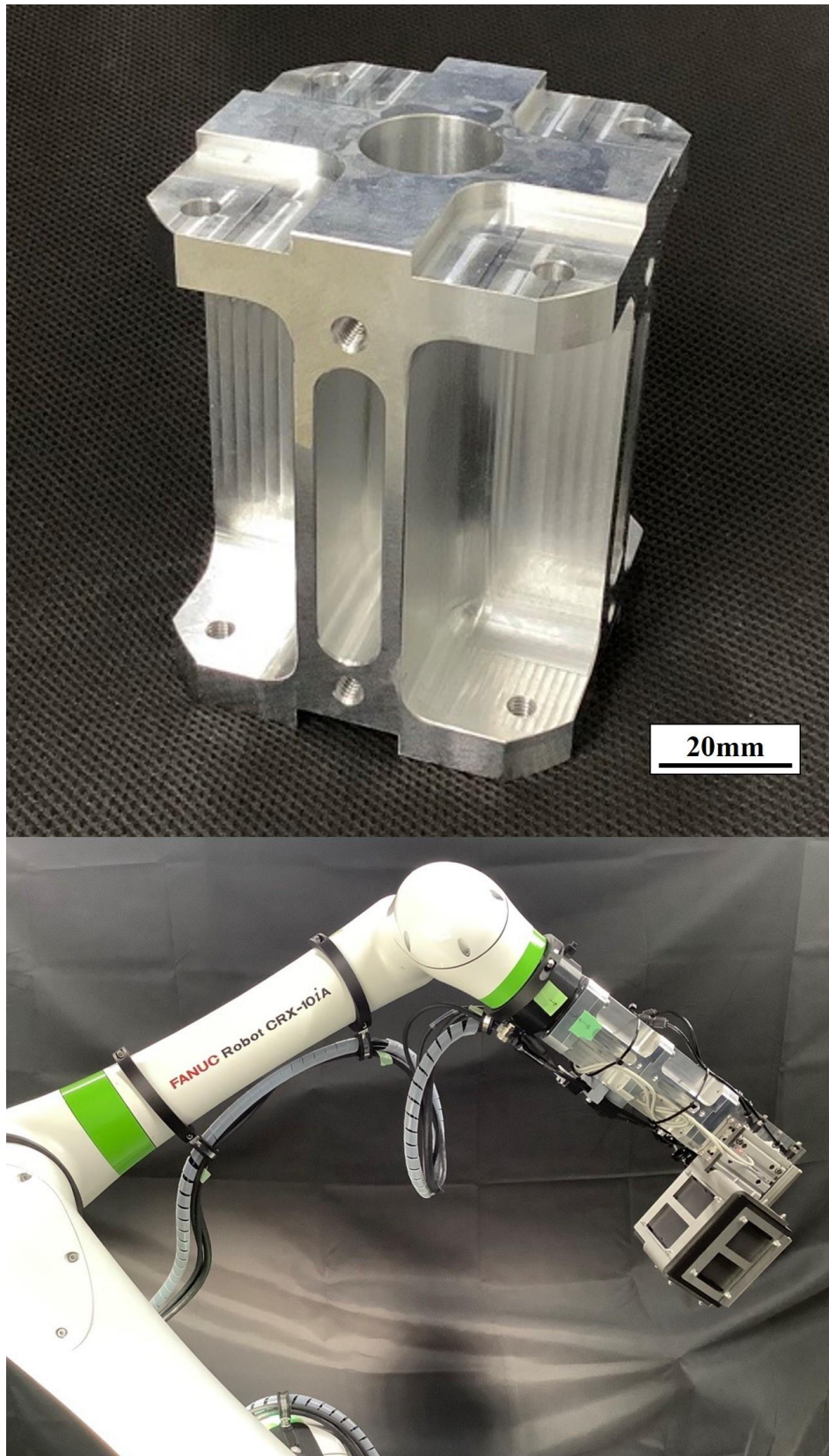


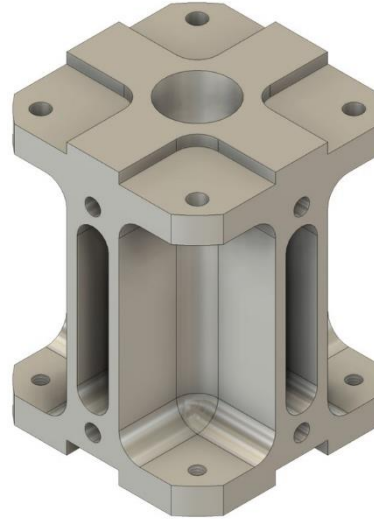
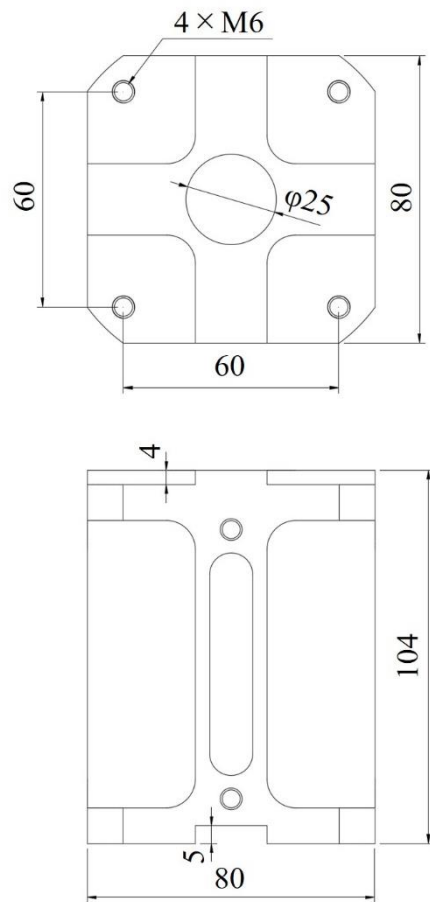
Fig. 2.1 "Arm Block" manufactured by cutting.

2.2 Generative Design による最適化設計

GD による最適化設計は、その効果を評価しやすくするために従来の切削加工製アームブロックの設計をベースとする。その概要を **Fig. 2.2** に示す。全体寸法は 80 mm×80 mm×104mm であり、外形はロボット本体のアーム端面フランジより大きくならないよう 80mm×80mm 程度に収めるようにしている。複数個連結する際は上下の突起部および切欠き部が合致することで 1 個当たりの長さが 100mm になるように設計されており、GD 解析時も同寸法で実施する。また、アームブロックはブラケットを介してロボットに接続されており、ブラケットとの接続用穴が 60mm×60mm のピッチであるため GD 解析モデルの接続部も同条件とする。φ25 の中心穴は先端ハンド部品に取付けられる各種センサやアクチュエータ類とロボット本体との内部配線用空間である。

GD 解析には AUTODESK 社の 3D CAD・解析ソフトウェアである「Fusion360²⁸⁾」に実装されている GD 解析機能を使用し、**Table 2.1** に示す条件で解析を実施した。解析用ベースモデルの概要を **Fig. 2.3** に示す。ベースモデルの緑色の領域は「保持ジオメトリ (Preserve geometry)」であり、この保持ジオメトリを割り当てられたボディは GD 解析された最終形状にそのまま組み込まれる。本モデルにおいては、アームブロックの連結に必要なジオメトリを設定している。赤色の領域は「障害物ジオメトリ (Obstacle geometry)」であり、GD 解析時にボディが生成されない空の領域を表している。この障害物ジオメトリには、アームブロックをロボットに接続、または複数個連結する際にそれぞれの干渉を回避すべき領域と、ボルトによる締結および工具を使用する際に必要な作業領域、さらにはアームの中心に各種センサやアクチュエータ類の配線を通すための空洞領域を設定している。

Fig.2.4 に拘束荷重条件設定の概要を示す。拘束および負荷条件は、ロボットを運用するにあたりアームブロックに対して最大の曲げ荷重が作用するパターンを想定し、ロボットアームが水平位置にあるときにアームブロックの終端面を固定拘束、先端に 200N の荷重が付加される設定とした。なお、ロボットの軸回転を考慮し、荷重の方向は 45° ずつ回転させた 8 方向のパターン設定にて 360° の可動範囲を補完している。



Overall dimensions: 80mm × 80mm × 104mm
Material: A2017

Fig. 2.2 Schematic illustration of “Arm Block” manufactured by cutting.

Table 2.1 Generative Design analysis conditions.

Material	AlSi10Mg	
	Young's Modulus (GPa)	71
	Density (g/cm ³)	2.67
	Yield strength (MPa)	240
	Ultimate tensile strength (MPa)	460
Lower limit of safety factor	2	
Maximum load (N)	200	

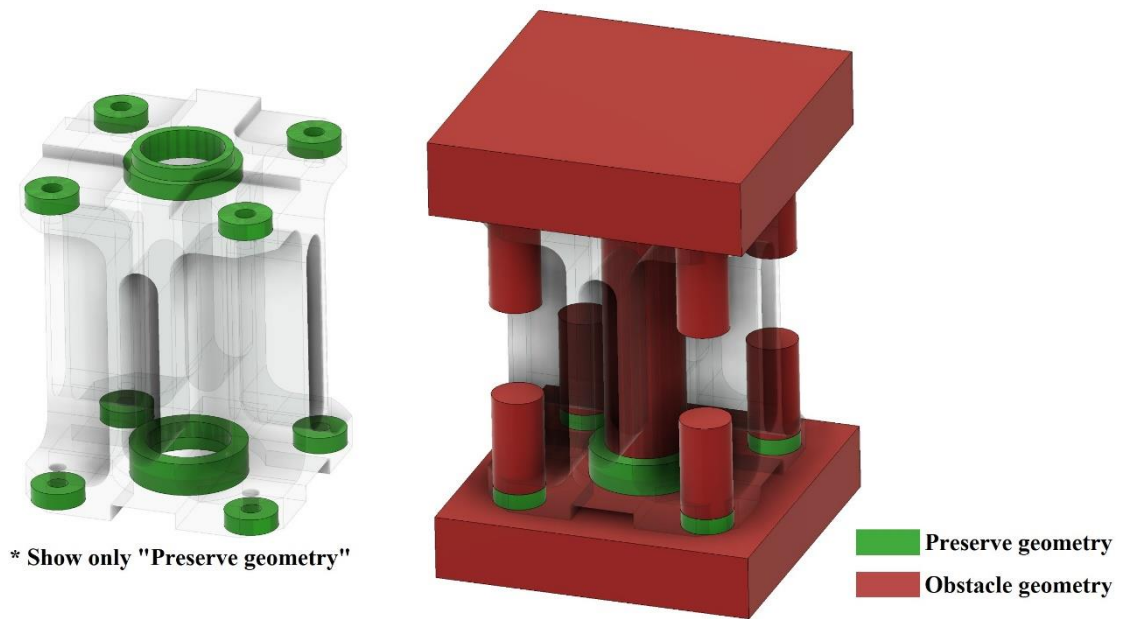


Fig. 2.3 Schematic illustration of the base model for analysis.

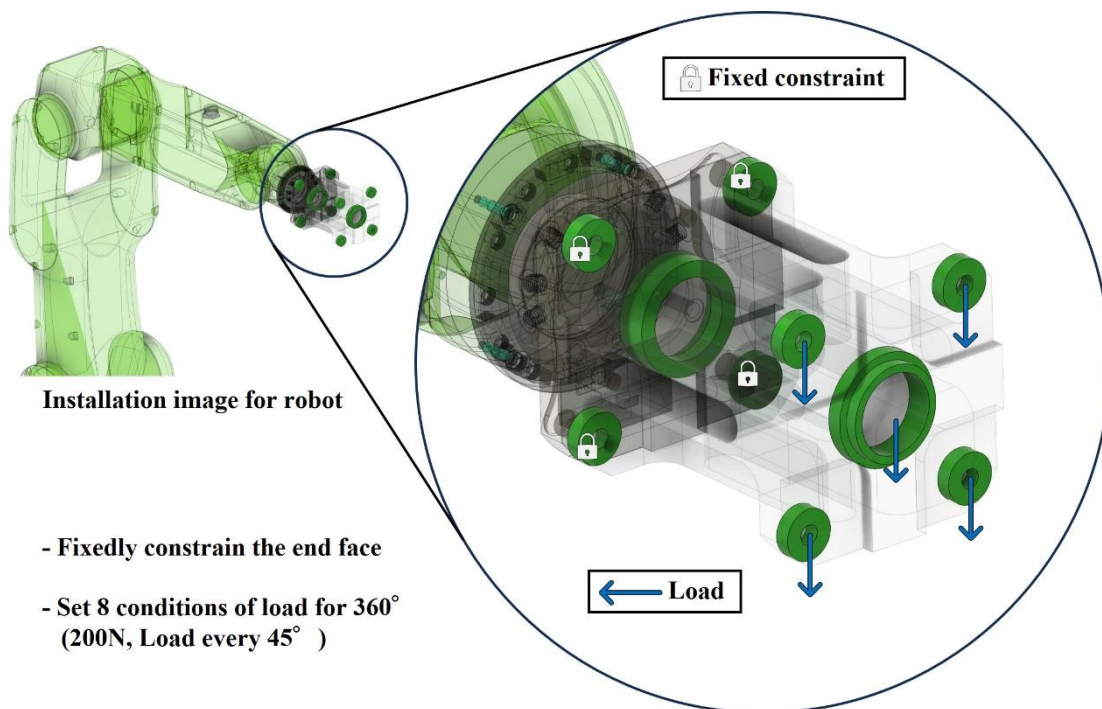


Fig. 2.4 Schematic illustration of restraint load conditions.

2.3 GD 生成モデルの探索とアルミニウム合金粉末を使用した AM による製作

Fig. 2.5 に GD により生成された 8 つのモデルおよび体積・質量・最大フォンミーゼス応力・最大変位の情報，そして造形用として採用したモデルを示す。Table 2.1 および Fig. 2.4 に示した解析条件に対し，すべてのモデルにおいて最大フォンミーゼス応力は素材の降伏応力 240MPa を大きく下回っており，例えば一般的な可搬重量 7~10kg のロボットへの適用に対し強度的な問題はないと判断できる。

生成された 8 つのモデルから，造形用として採用したのは⑥である。⑥は 8 つのモデルのうち，最大フォンミーゼス応力および最大変位が最小であることに加え，生成された形状を比較した際，AM の造形安定性を高めるために必要なサポートの数が他のモデルと比較して少量である。さらにモデル内部に配置されるサポート材が少なく，そのほとんどが外側からアクセスしやすい部分に配置されるためハンドグラインダーやペンチなどの工具による除去性がよいこと，そして切削によるポストプロセスを考慮した際に治具の取付けが容易かつ切削工具との干渉の恐れが少ないことが挙げられる。

GD により生成されたモデルは，EOS 社製 PBF 方式 3D プリンタの「M290²⁹⁾」を使用し，GD 解析と同じく素材を AlSi10Mg として製作した。装置の造形エリアは 250 mm×250 mm×325mm，1 層の厚さは 0.02mm，レーザは 400W の Yb ファイバーレーザである。切削加工製アームブロックの素材は A2017 であるが，AM 素材としては存在していないため，その代替材料として AM に使用されるアルミニウム合金として一般的な AlSi10Mg を選定した。Table 2.2 に切削加工に使用した A2017 と AM 用粉末材料の AlSi10Mg の比較を示す。AlSi10Mg は鋳造用アルミニウム合金に分類されるが，AM にて造形した本素材は従来の鋳造で製造された素材と同等もしくはそれ以上の機械的特性が得られることが報告されている³⁰⁾。

① 	② 	③ 	④ 
Volume 57.5 cm ³	Volume 55.9 cm ³	Volume 57.2 cm ³	Volume 55.4 cm ³
Mass 155 g	Mass 151 g	Mass 153 g	Mass 148 g
Maximum von Mises Stress 35.0 MPa	Maximum von Mises Stress 38.1 MPa	Maximum von Mises Stress 51.6 MPa	Maximum von Mises Stress 41.6 MPa
Maximum Displacement 0.07 mm	Maximum Displacement 0.09 mm	Maximum Displacement 0.09 mm	Maximum Displacement 0.12 mm
⑤ 	⑥ 	⑦ 	⑧ 
Volume 55.9 cm ³	Volume 56.3 cm ³	Volume 67.3 cm ³	Volume 55.7 cm ³
Mass 151 g	Mass 150 g	Mass 180 g	Mass 149 g
Maximum von Mises Stress 38.1 MPa	Maximum von Mises Stress 33.1 MPa	Maximum von Mises Stress 101.2 MPa	Maximum von Mises Stress 44.7 MPa
Maximum Displacement 0.07 mm	Maximum Displacement 0.07 mm	Maximum Displacement 0.12 mm	Maximum Displacement 0.09 mm

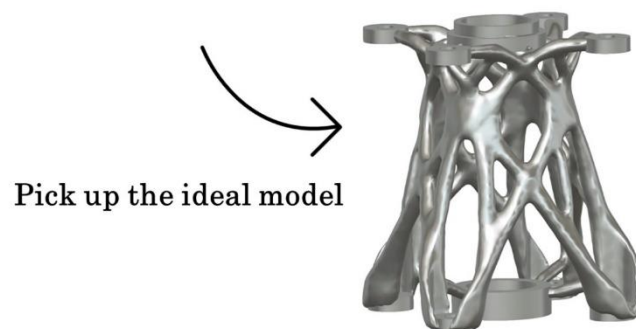


Fig. 2.5 Multiple models generated by GD.

Table 2.2 Comparison of mechanical properties between A2017 and AlSi10Mg.

Material	A2017	AlSi10Mg
Ultimate tensile strength (MPa)	425	460
Yield strength (MPa)	290	240
Young's Modulus (GPa)	72	71

2.4 最適化設計前後の比較

Fig. 2.6 に従来の切削加工製アームブロックと AM 製アームブロックの比較写真を示す。Fig.2.7 には AM 製アームブロックをロボットへ取付けた状態を示す。Fig. 2.6 では、切削加工製アームブロックの体積と質量情報に加え、2.4 節で述べた GD 解析の拘束荷重条件をそのまま適用した静的解析結果（最大フォンミーゼス応力・最大変位）も示し、AM 製の解析結果と比較している。静的解析には GD と同じ解析ソフトウェア Fusion360 に実装されている「シミュレーション：静的解析ツール」を使用した。切削加工製アームブロックの重量が 640g であるのに対し、AM 製アームブロックの重量は 150g であり、GD により従来から約 77%重量の削減を達成した。最大フォンミーゼス応力で 19.2MPa、最大変位で 0.06mm の差が見られるが、想定される使用環境において強度や位置決め精度に影響を与えることはなく、アームブロックとしての機能を損なうことなく大幅な軽量化を達成した。最大変位に関しては、ロボットを適用する生産ラインや把持対象のワーク・製品により異なるが、3mm 以内に収まればロボット動作の位置決め精度に関して一般的に影響を及ぼさない。

この結果、アームブロックの使用数を増加するほど軽量化の効果が大きくなり、可搬重量に対しての製品・ワーク搬送のキャパシティや動作範囲に余裕が生まれるだけでなく、安定した高速稼働の実現が期待できる。以上の観点から、ロボットの選定範囲が拡大することでこれまでよりも小型のロボットを採用できるため、生産ラインのコンパクト化やコスト削減が可能となる。



Fig. 2.6 Comparison of two types of “Arm Blocks”.

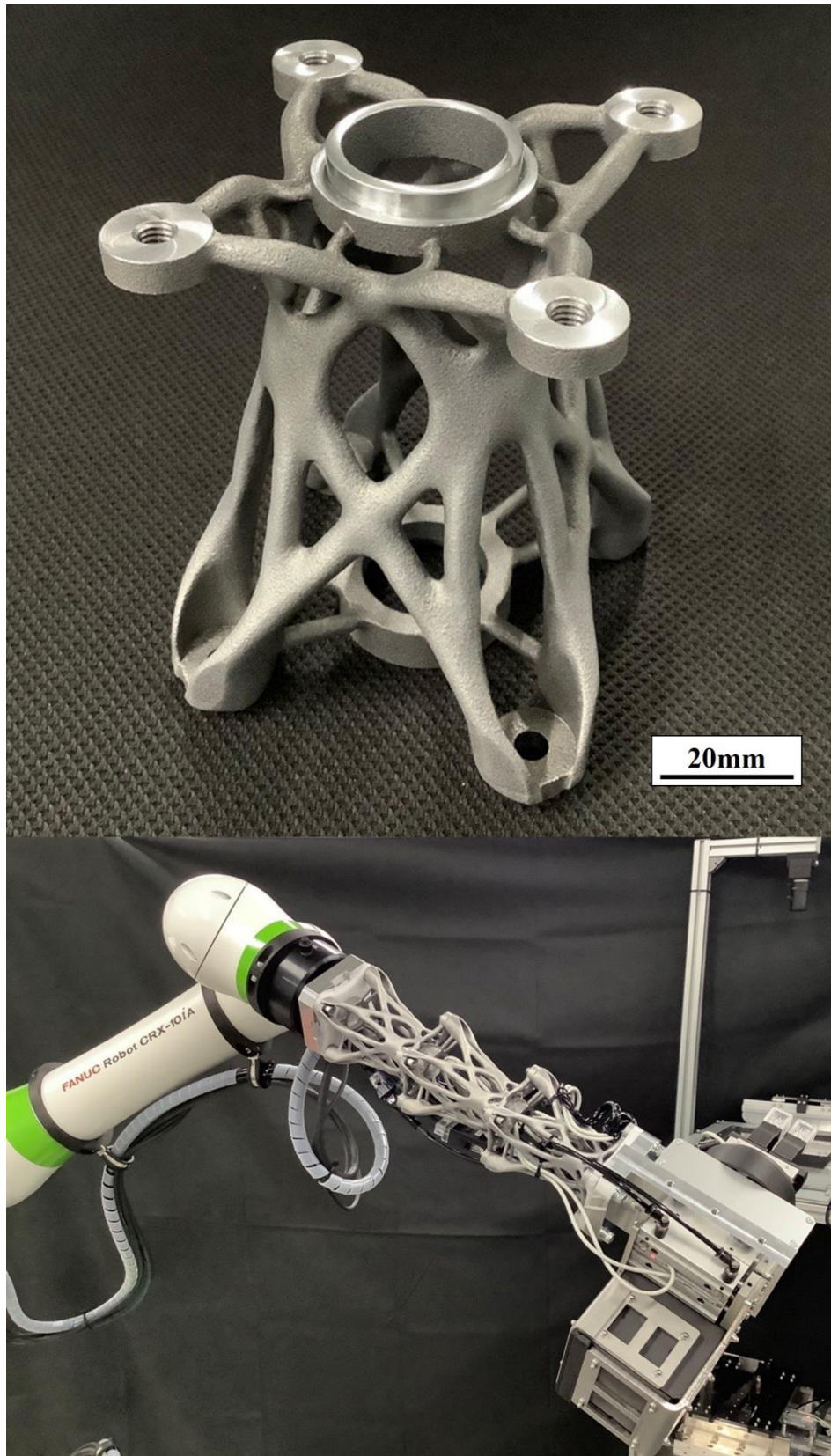


Fig. 2.7 "Arm Block" manufactured by AM.

2.5 デザイン性の評価について

製品の基本性能だけでなく、ユーザが抱く感性工学的な観点での満足度（デライト）^{31), 32)}やデザイン性³³⁾についても、対象製品の価値を評価する上で議論されることが多い。そのため、採用したモデルを設計工学的観点から評価するために、狩野モデル³⁴⁾を基にした設計に関する3つの分類³⁵⁾について考察した。狩野モデルによる分類は以下に示す、

- ① Must 設計（当たり前品質）
- ② Better 設計（一元的品質）
- ③ Delight 設計（魅力的品質）

とされている。Must 設計は「ロボットに任意の数を装着してアーム長さ（リーチ）を調節できること」であり、Better 設計は「できるだけ軽量であること」と分類できる。Delight 設計において、ピックアップしたモデルを「魅力的である」と感じるポイントは、「人間が簡単には思いつくことができない新奇性のある形状」、「ロボットに対して従来の無機質な機械部品とは異なる有機的形状の部品を組み合わせることによる斬新性」であると評価した。特に Delight 設計において、GD と AM の相性の良さが製品の魅力を向上させている大きな要因となっており、ユーザの感性に対して製品のビジュアルが働きかける効果は非常に高いものであると評価できる。

2.6 ロボットへの取付けと動作検証

2.6.1 産業用ロボットへの取付けと動作実験

AM により製造したアームブロックの実作業環境下における動作確認を目的に、アームブロックをロボットに取付け動作させた際のモータに対する負荷評価を実施した。具体的にはモータトルク発生電流を測定し、さらに動作安定性の評価を目的として、アーム先端加速度の測定を実施した。

Fig. 2.8 に示す FANUC 社製 6 軸協働ロボット「CR-7iA/L³⁶⁾」にアームブロックを 2 個取付け、同図中に示す J5 軸を 0° （水平）位置から -90° （垂直）位置まで 90° 下方に回転させた後に再び 0° （水平）位置に往復動作させた。モータトルク発生電流に関してはロボット先端付近に位置する J5 軸のモータトルクを発生させている実効電流成分を取得し、J5 軸の角度情報とともに評価をした。J5 軸の軸位置（角度）および電流出力値はコントローラシステム変数（サーボ情報の内部パラメータ）を取得することで外部 PC に出力した。アームブロック先端加速度は、オムロン社製 1 軸加速度センサ「D7F-S03-05」を回転方向に取付けデータを取得し、モータトルク発生電流と同様に J5 軸の角度情報とともに評価した。

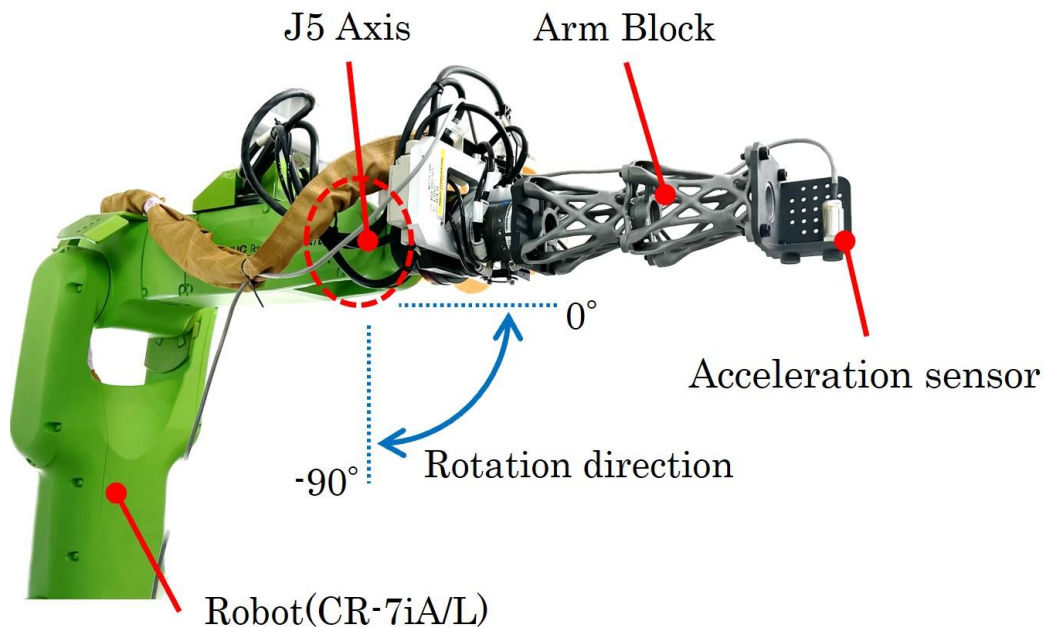


Fig. 2.8 Schematic illustration of performance comparison experiment.

2.6.2 モータトルク発生電流の比較

Fig. 2.9 に切削加工製および AM 製アームブロックを取付けたロボットの J5 軸位置（角度）とモータ電流出力値の関係を示す。これ以降，図中凡例の「Cutting」は切削加工製を，「AM」は AM 製を示す。

J5 軸を 0° （水平）位置に保持した状態では，姿勢を維持するための電流値が切削加工製で 1.2 A，AM 製で 0.8 A と，切削加工製の値が 1.5 倍程度高いことがわかる。ロボット停止時の姿勢維持のためにも電力は消費されており，消費エネルギーを抑えるためには，ロボットの待機時間を短くすることが重要である³⁷⁾。この結果より，軽量化に伴う消費エネルギー（電力）の低下が期待できることが示唆された。

-90° （垂直）位置付近になると，J5 軸よりも先端側にあるアームブロックが J5 軸直下位置になるため，姿勢維持のための電流値は 0 A 付近であることが確認でき，ここでは切削加工製，AM 製での差は無視できる。 -90° （垂直）位置から再び 0° （水平）位置まで上方への回転動作をするときのピーク電流にも差が確認でき，切削加工製で 1.8 A，AM 製で 1.3 A と，ここでも切削加工製の電流値が 1.4 倍程度高いことが確認できたことから，軽量化による消費電力の低減，それに伴うモータ負荷の低減（長寿命化）が期待される。

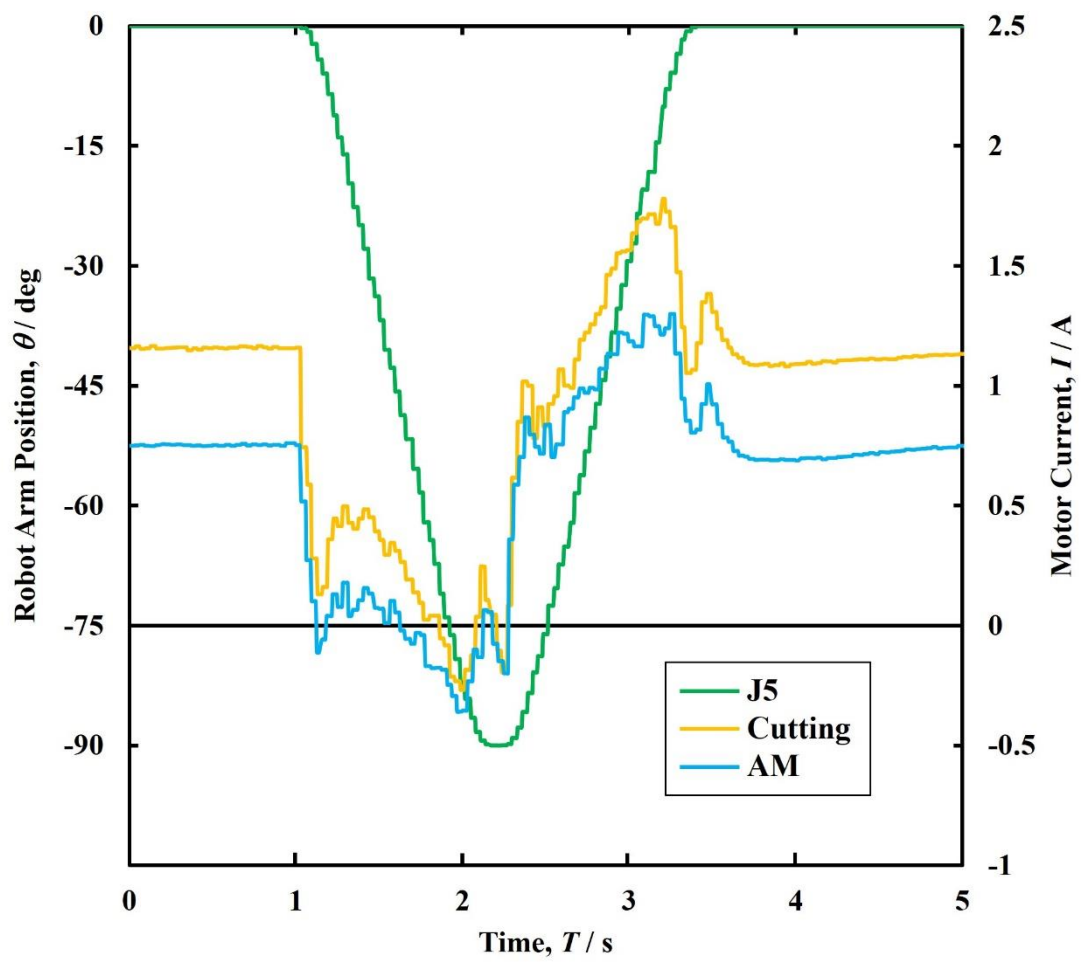


Fig. 2.9 Relationship between robot arm position and motor current.

2.6.3 アーム先端加速度の比較

Fig. 2.10 に切削加工製および AM 製アームブロックを取付けたロボットの J5 軸位置（角度）とアーム先端加速度の関係を示す。

J5 軸を 0° （水平）位置から -90° （垂直）位置へ回転させる際、加速度のピーク値は切削加工製で 7.5m/s^2 、AM 製で 3.9m/s^2 であり、切削加工製の値が 1.9 倍程度高い。

続いて -90° （垂直）位置から 0° （水平）位置まで上方への回転動作をするときの加速度のピーク値は、切削加工製で 13.4m/s^2 、AM 製で 4.6m/s^2 と、さらにその差が広がり切削加工製の値が 2.9 倍程度高いことが確認できた。上昇動作の際、切削加工製の加速度は下降動作と比較して約 1.8 倍であるが、AM 製の加速度は約 1.2 倍と小さく安定した動作である。下降動作に比べて上昇動作の際に加速度が増加する原因として、アーム先端移動方向が重力方向と逆方向となり、慣性力の影響を受けやすくなることが考えられる。その際重量の差が慣性力、すなわち加速度の差に影響していると予想される。

ロボットの振動抑制に関する研究^{38)~41)}を調査したところ、そのほとんどがロボット本体における軽量化解析・実験や動作の最適化に関する研究であり、ロボットにアームやハンド等の拡張部品を取付けた場合についての報告は調査した限りでは皆無であったが、本報告での加速度の測定結果より、拡張部品に関しても軽量化による振動抑制効果があると考えられる。

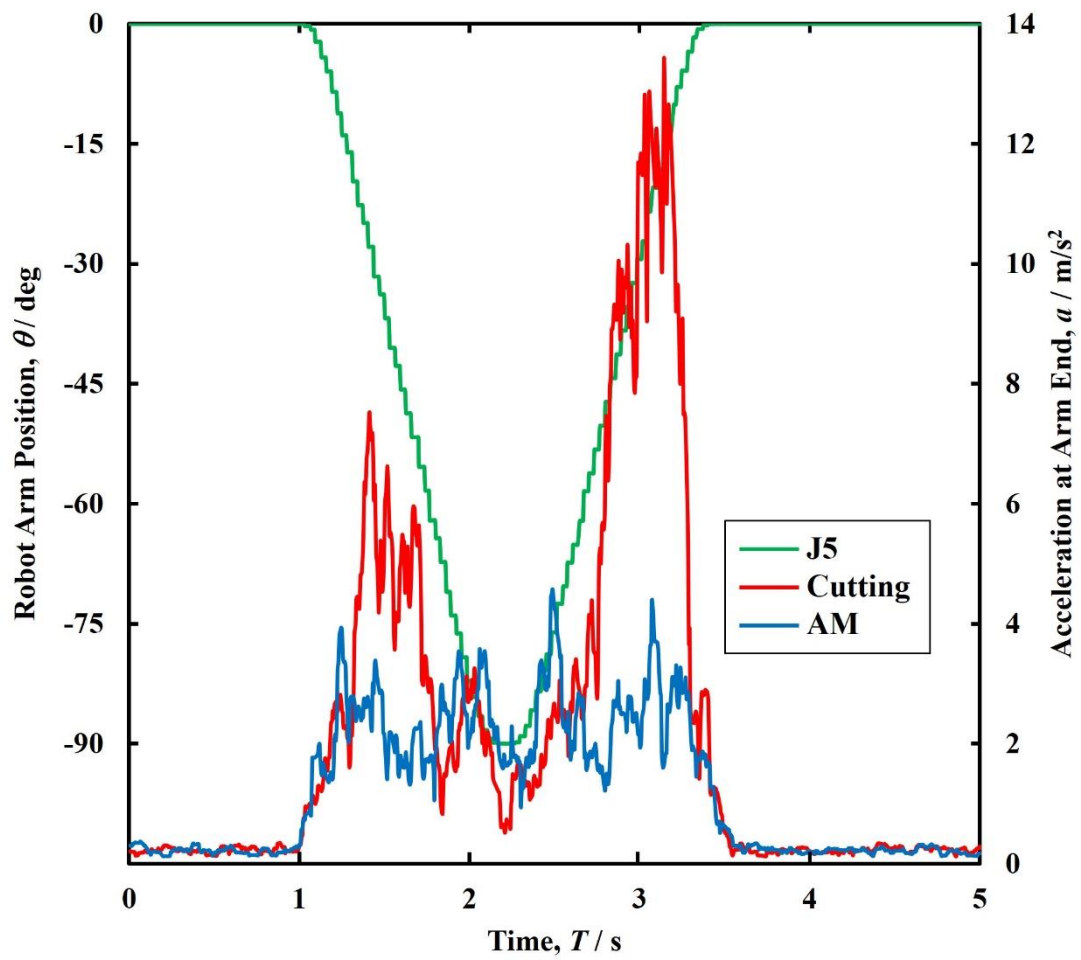


Fig. 2.10 Relationship between robot arm position and acceleration at arm end.

2.6.4 非常停止時の動作検証

ロボットの動作中、予期せぬトラブル等により非常停止ボタンを押して動作を緊急停止させる場合がある。非常停止時には、ロボットの各軸を動作させているモータへの電流が瞬時に遮断され、その時点でのモータ角度でロックされ動作が停止することがほとんどである。そのような状況を想定した際、例えば、切削加工の素材を把持した状態で動作中に非常停止した場合の振動により素材が落下し、二次的な被害につながってしまうことも予想される。そこで、2.6.1 項に示した動作実験において、J5 軸を 0° （水平）位置から -90° （垂直）位置まで 90° 下方に回転させた後に再び 0° （水平）位置に往復動作させる途中、中間地点の -45° 位置において非常停止させ（Fig. 2.11 参照）、その際のモータトルク発生電流およびアーム先端加速度の測定を実施した。

Fig. 2.12 に切削加工製および AM 製アームブロックを取付けたロボットの J5 軸位置（角度）とモータ電流出力値の関係を示す。非常停止までの挙動は、Fig. 2.9 に示した非常停止無しの場合と同様で、J5 軸を 0° （水平）位置に保持した状態および -90° （垂直）位置から再び 0° （水平）位置まで上方への回転動作途中までの電流値を比較しても差は見られない。 -45° 位置で非常停止した際、わずかにアンダーシュートが見られるが、瞬時に電流が遮断されその数値は 0A となることが確認された。モータトルク発生電流については、非常停止時において切削加工製および AM 製アームブロックの差は見られない。

続いて Fig. 2.13 に切削加工製および AM 製アームブロックを取付けたロボットの J5 軸位置（角度）とアーム先端加速度の関係を示す。J5 軸を -90° （垂直）位置から上方回転させ、 -45° 位置で非常停止した際に急激に加速度が上昇し、ピークを迎えることがわかる。ピーク値は切削加工製で 53.3m/s^2 、AM 製 115.8m/s^2 であり、重量が大きい切削加工製のピーク値が大きくなると予想していたが、軽量の AM 製アームブロックの方が約 2 倍の値を示し、非常停止無しの単純往復動作と比較してその大小が逆転した。ピーク値を迎えた後は両者ともに速やかに減衰に向かっており、切削加工製と AM 製で減衰時間にほとんど差はない。この結果、振動値のピークに差が出た原因は固有振動数の影響ではなくアームブロックの剛性の差であると予想され、軽量化した AM 製アームブロックには動的な動作に対して安定性に課題があることが示唆された。2.4 節で示したそれぞれの最大変位は 0.01mm と 0.07mm であり、ロボットの運用を考慮した場合十分な剛性を有しているが、GD による解析はあくまでも静的荷重に対するものであり、今回のような非常停止時を想定した動的動作に対するものとは根本的に異なる。非常停止時の振動抑制、安定性を考慮する場合、GD

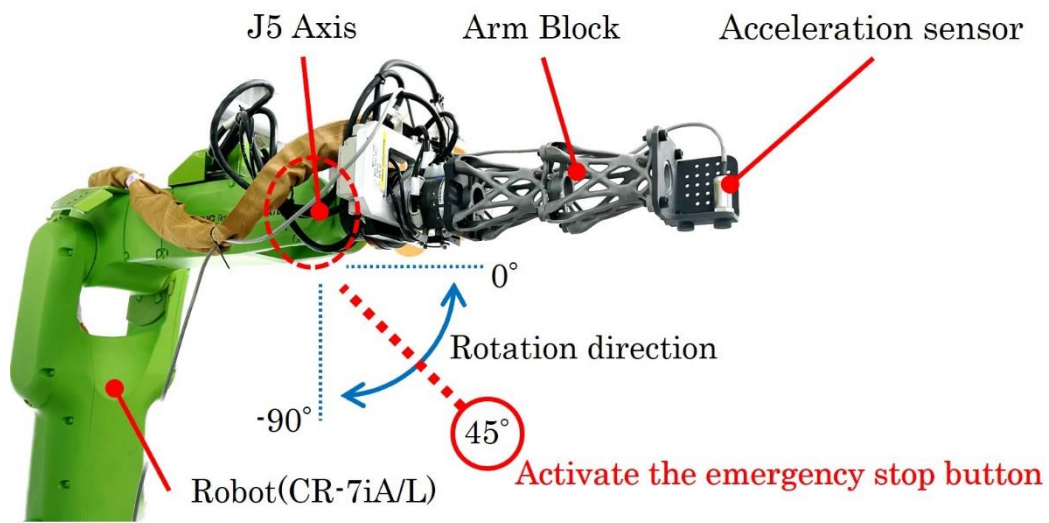


Fig. 2.11 Schematic illustration of emergency stop experiment.

解析時に何らかの方法で動的動作に対しても有効な解析設定を実施するか，モデル生成後に動的荷重（非常停止時の慣性力を模擬した過渡荷重）に対して別途解析を実施する必要があると示された．共振を防止するためのモード周波数を考慮した解析を実施することも望ましく，軽量化に加え，想定される静的動作・動的動作の両方に対応した高機能な部品設計が重要である．

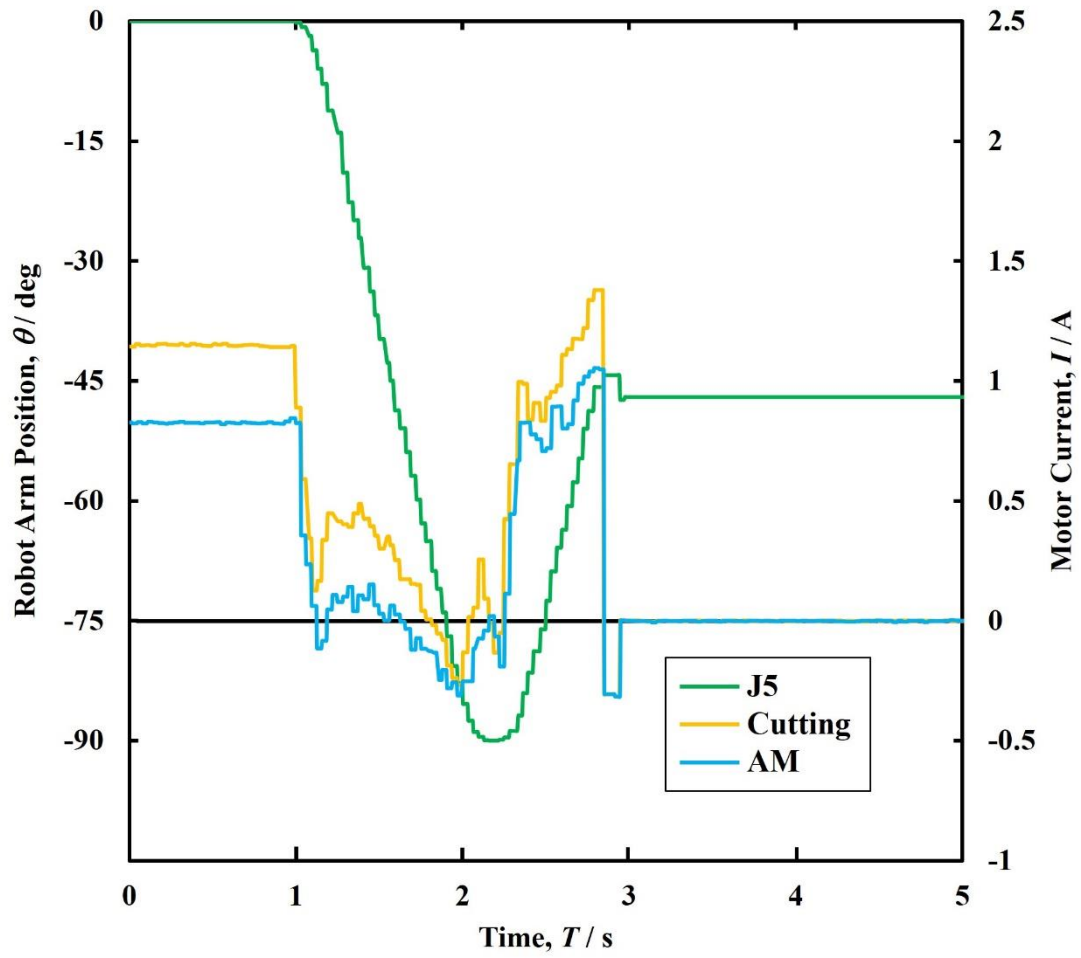


Fig. 2.12 Relationship between robot arm position and motor current (emergency stop experiment).

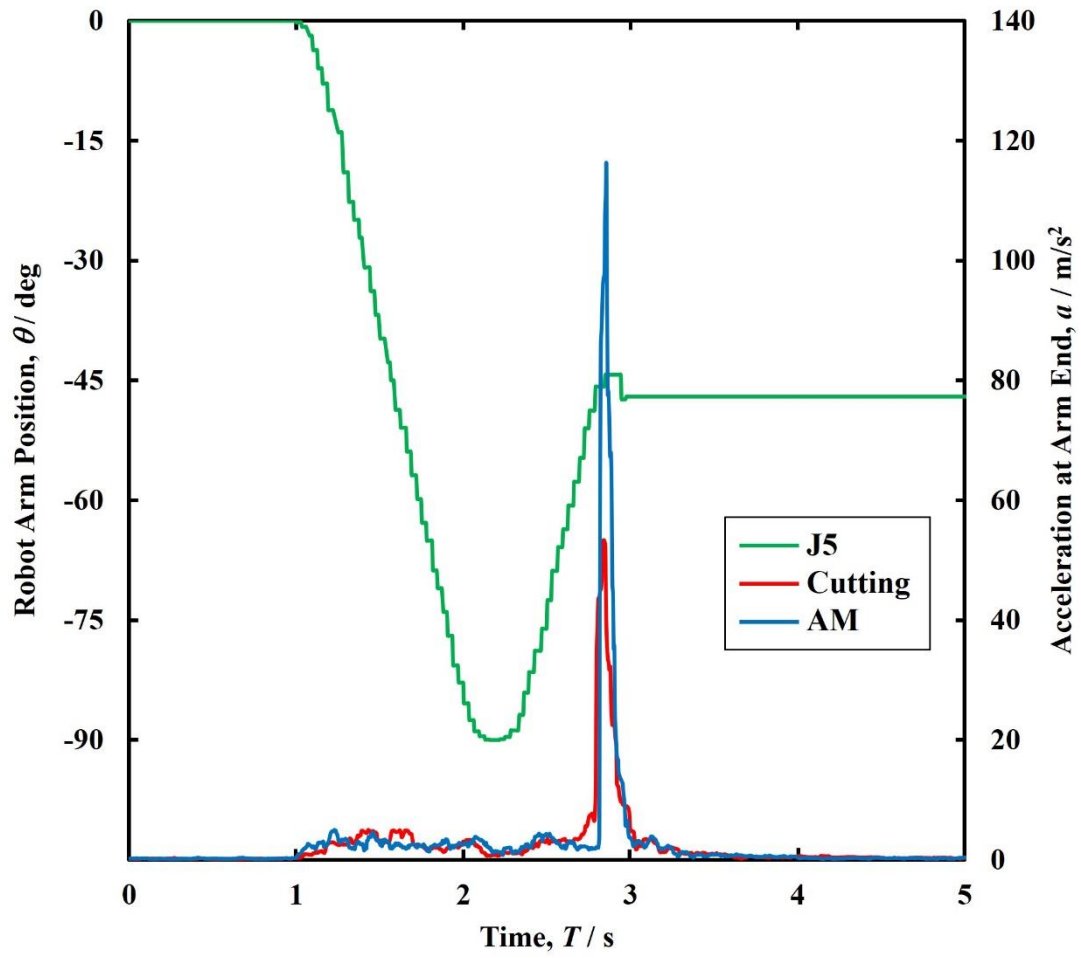


Fig. 2.13 Relationship between robot arm position and acceleration at arm end (emergency stop experiment).

2.7 結言

GD により軽量化したロボット部品を金属 AM で製作，運用実証試験を行いその効果について評価した．GD により従来の切削加工製部品と比較して 77%重量削減と大幅な軽量化を実現し，有機的な複雑形状を有する斬新なモデルを得ることができた．複雑形状の部品製作を実現するため，AM の特徴を最大限生かすことができたことも，部品としての付加価値を高める一つの要因である．

ロボットに取付けた際の動作においては，モータ負荷の低減や振動抑制効果が確認でき高機能な部品として十分に実用化できることを示したものの，緊急時を想定した非常停止時の振動計測において，切削加工製と比較して AM 製の振動値が約 2 倍の数値を示しており，動的な動作に対しての安定性に課題を残す結果となった．現状，GD 解析は静的荷重にのみ対応しており，本研究での非常停止動作試験のような動的な動作に対応した解析が望まれる．

また，金属 AM で製作するにあたり，従来の切削加工製と比較して約 10 倍近くのコストがかかることが判明し，高機能な部品ではあるものの，費用対効果は低いと言わざるを得ない．本部品を標準化・量産してロボットに実装するためには，製作コストを大幅に低減させる方策の検討が必要である．

第 3 章

光造形（SLA）方式 3D プリンタを用いた ロボット拡張部品製作検討

3.1 緒言

第 2 章では、アルミニウム合金粉末を使用した金属 AM によりロボット拡張部品を製作したが、ロボットの設置環境によっては金属部材の使用をできるだけ抑制したい場合も想定される。そこで本章では、金属材料ではなく樹脂材料で最適化設計したロボット拡張部品を製作することを検討し、安価に複雑形状部品を製造できる光造形（SLA）方式 3D プリンタに注目した。1.1.2 項にて述べた通り、SLA 方式 3D プリンタは、光硬化性液体樹脂（レジン）にレーザを照射することで硬化させながら目的形状を造形するため、工作精度に優れ、造形物の等方性が高い^{42), 43)}ことが特徴である。装置、素材ともに安価である SLA 方式 3D プリンタによる部品の製作により、コストの低減も期待される。

3.2 材料選択の課題

ロボット部品製作に向け SLA 方式 3D プリンタの性能検証を実施したところ、同じ物性として市場に出されている素材でも、色が違うことにより強度に差があることが経験的に確認（**Fig. 3.1**：簡単に破損してしまった部品）されたため、部品を製作しても信頼性に影響を与える可能性が懸念された。GD により部品製作を実施するためには、使用する材料の物性を解析パラメータとして設定する必要があるため、色違いによる強度差が生じるならば、要求強度を満たさない不適切な部材を製造する可能性がある。

そこで、色が異なる以外は同一の材料特性を持つレジンを用いて SLA 方式 3D プリンタにより引張試験片を作製、引張試験を実施し、色違いによる特性差を調査し、ロボット部品の製作に対する SLA 方式 3D プリンタの有効性や注意点を検討した。



Fig. 3.1 Components manufactured by SLA 3D printer that have sustained unexpected damage.

3.3 素材の色違いによる力学特性検証

3.3.1 試験片製作

Formlabs 社製 SLA 方式 3D プリンタ「Form 3⁴⁴⁾」を使用し、引張試験片を作製した。試験片形状は ASTM D638-14⁴⁵⁾に規定された Type I である。

材料はメーカー純正「Standard Resin⁴⁶⁾」の Clear, White, Black の 3 色を使用し、造形プラットフォームに対して試験片を垂直 (Vertical) および水平 (Horizontal) の 2 方向、全 6 条件での造形とした。Fig. 3.2 に試験片造形方向および試験片形状を示す。造形後は Table 3.1 に示す Formlabs 社推奨の条件にて波長 405nm の紫外線を照射し二次硬化処理を実施した。

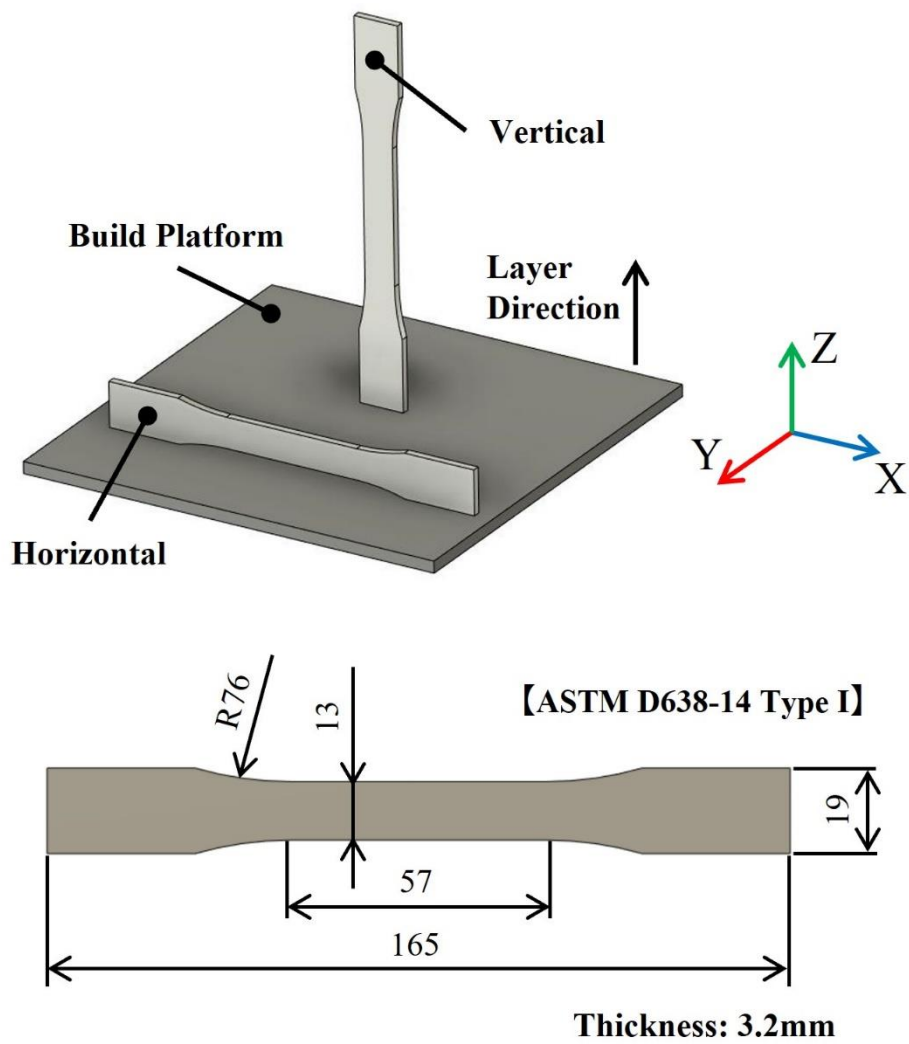


Fig. 3.2 Layer direction of specimen and tensile specimen shape.

Table 3.1 Post-curing conditions.

Resin color	Temperature	Curing time
Clear	60°C	15min
White		30min
Black		30min

3.3.2 引張試験

試験片に対し、万能試験機（島津製作所製オートグラフ AG-X plus 100kN）を使用し、初期ひずみ速度 $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、室温、大気中にて引張試験を実施した。試験方法は ASTM D638-14³¹⁾ に準拠している。引張試験の様子を **Fig. 3.3** に示す。

以降に示す応力は、試験力を試験片平行部断面積で除した公称応力であり、ヤング率はひずみが 0.05～0.25% 区間の直線回帰により決定した値である。ひずみは引張試験機のオプション機器であるビデオ伸び計を使用し、標点間距離を 50mm として測定した。

Formlabs 社が公開している Standard Resin の引張特性は、引張強さ 65MPa、破断伸び 6%、ヤング率 2.8GPa である。

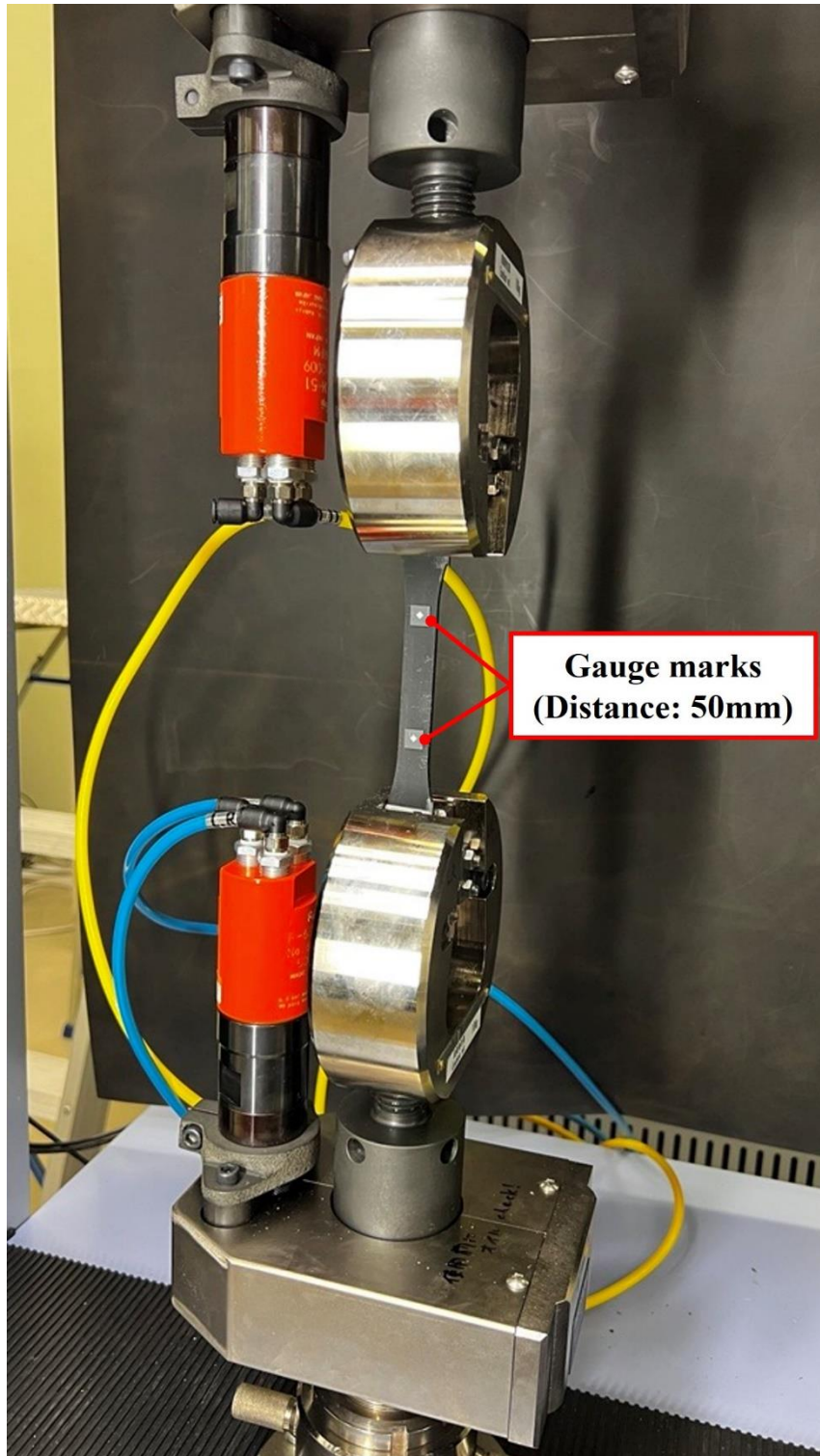


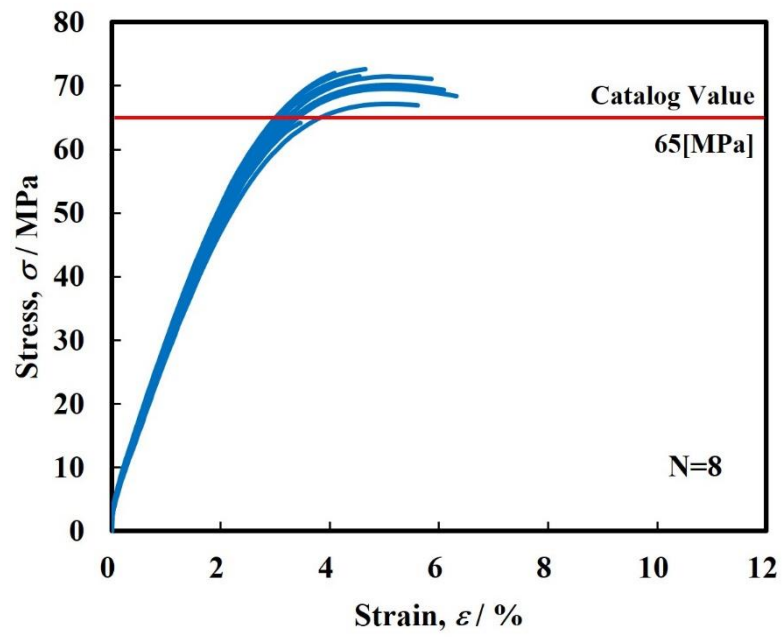
Fig. 3.3 State of affairs of tensile test.

3.4 引張試験結果の検証

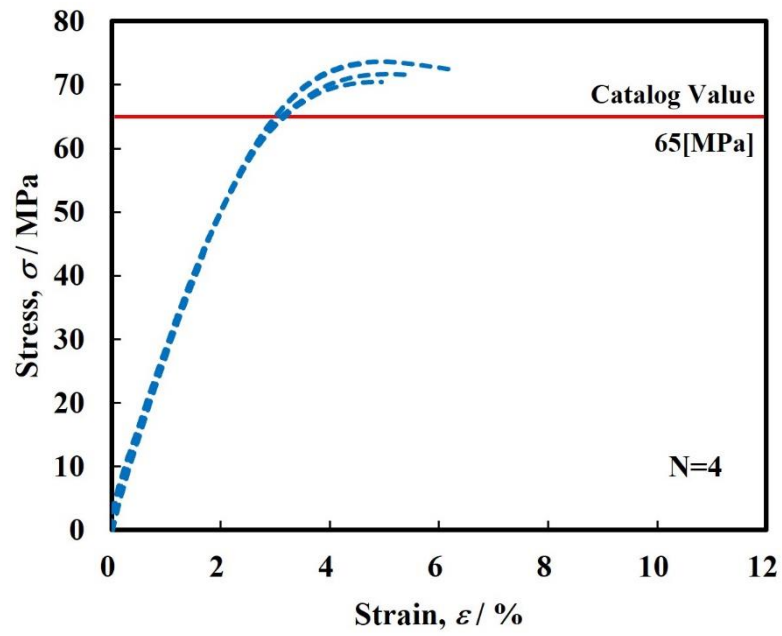
3.4.1 Clear Resin

Fig. 3.4 に Clear Resin の応力－ひずみ線図を示す．(a)は垂直造形（試験片本数 $N=8$ ），(b)は水平造形（試験片本数 $N=4$ ）である．(a)垂直造形の引張強さは 69.8MPa ，破断伸びは 5.1% ，ヤング率は 2.3GPa であり，(b)水平造形の引張強さは 72.3MPa ，破断伸びは 5.3% ，ヤング率は 2.8GPa であった．

垂直造形の破断伸びにバラツキが確認できたものの，垂直造形，水平造形ともに引張強さはカタログ値（ 65MPa ）を満たしており，造形方向の差による引張強さに明確な差異はない．Clear Resin に関しては，最適化設計にカタログ値を使用しても問題は生じないと判断できる．



(a)Vertical



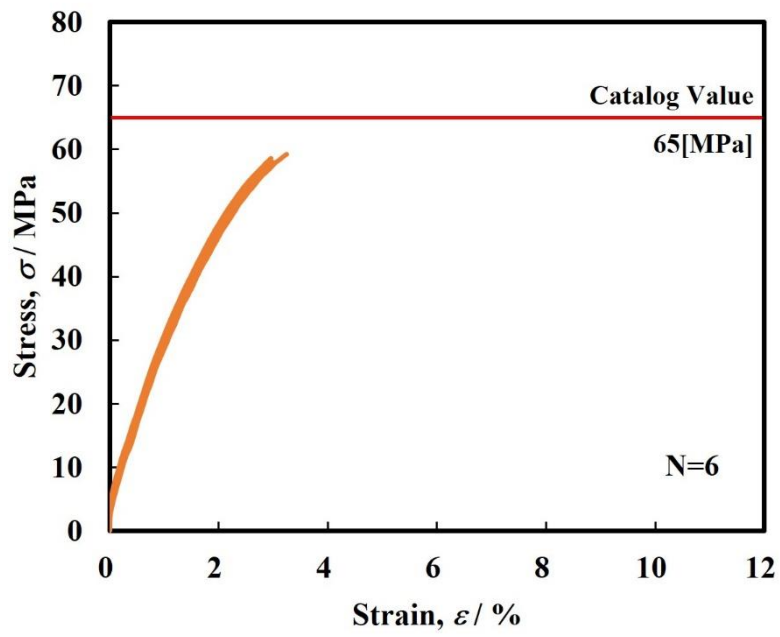
(b) Horizontal

Fig. 3.4 SS-curve of Clear Resin.

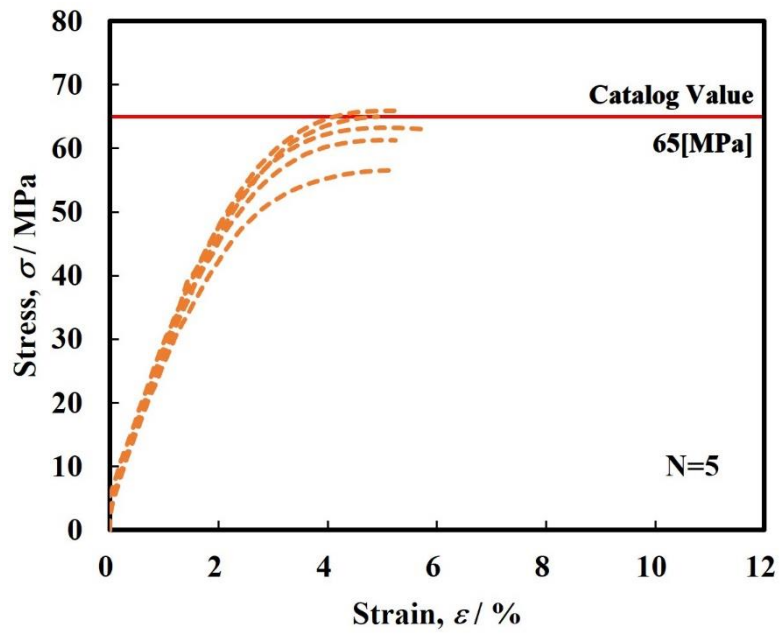
3.4.2 White Resin

Fig. 3.5 に White Resin の応力－ひずみ線図を示す．(a)は垂直造形（試験片本数 $N=6$ ），(b)は水平造形（試験片本数 $N=5$ ）である．(a)垂直造形の引張強さは 56.5MPa，破断伸びは 3.4%，ヤング率は 2.0GPa であり，(b)水平造形の引張強さは 62.4MPa，破断伸びは 5.3%，ヤング率は 2.2GPa であった．

垂直造形，水平造形ともに引張強さはカタログ値（65MPa）を下回っており，特に垂直造形においては 10%以上低い水準であった，破断伸びは造形方向によらずほとんどバラツキのない安定した結果であったが，垂直造形でカタログ値の半分程度の数値となった．White Resin を使用することを想定した最適化設計を実施する場合，試験結果のバラツキを考慮し，垂直造形の結果をもとに条件設定をしなければ強度的安全性に問題が生じることが示唆された．



(a)Vertical



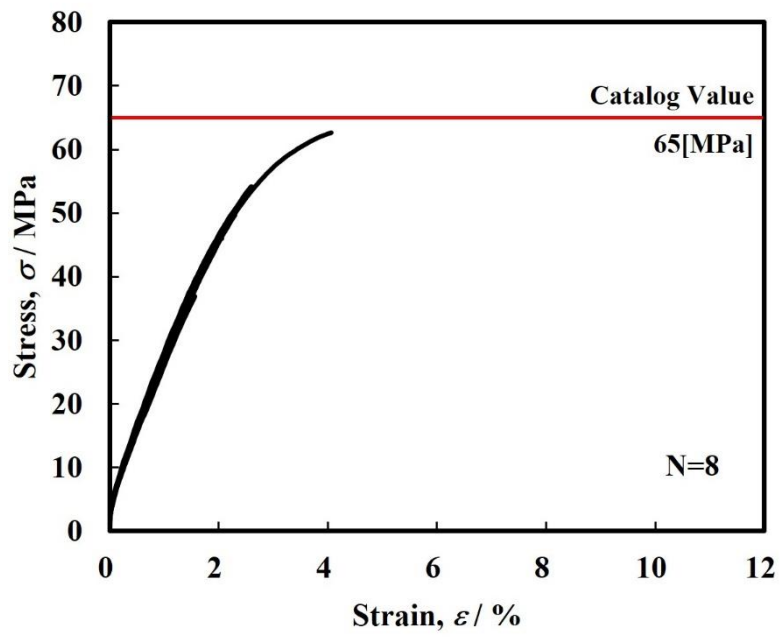
(b) Horizontal

Fig. 3.5 SS-curve of White Resin.

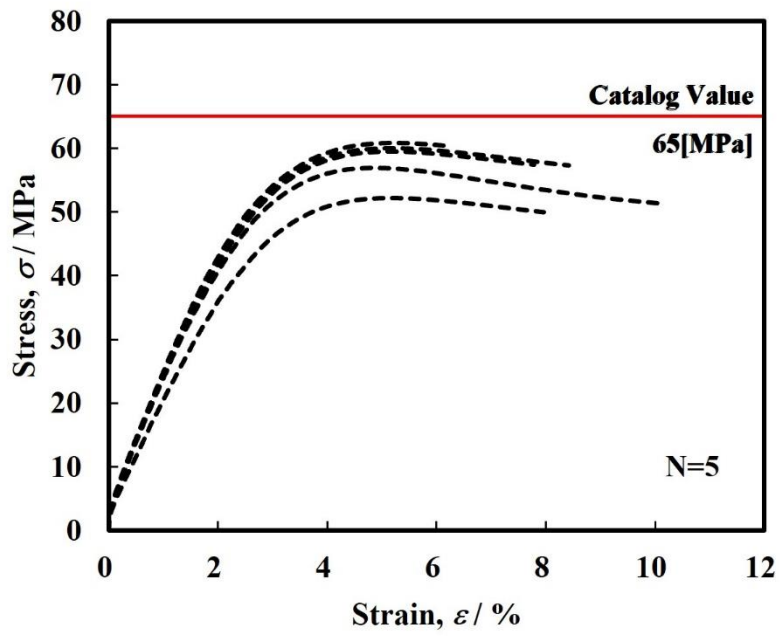
3.4.3 Black Resin

Fig. 3.6 に Black Resin の応力－ひずみ線図を示す．(a)は垂直造形（試験片本数 $N=8$ ），(b)は水平造形（試験片本数 $N=5$ ）である．(a)垂直造形の引張強さは 46.7MPa，破断伸びは 2.2%，ヤング率は 2.2GPa であり，(b)水平造形の引張強さは 57.9MPa，破断伸びは 8.1%，ヤング率は 1.9GPa であった．

それぞれの造形方向で引張強さはカタログ値（65MPa）を下回っており，垂直造形においては約 30%，水平造形においては約 10%低い水準であった．特に垂直造形ではバラツキが大きい．破断伸びは造形方向の違いにより顕著に差が見られ，水平造形の数値は垂直造形の約 3.7 倍であった．Black Resin を用いた最適化設計にはカタログ値を用いることは推奨できず，試験結果のバラツキ度合いを考えると，Black Resin を素材として選択することは安全性に懸念が生じると判断できる．



(a) Vertical



(b) Horizontal

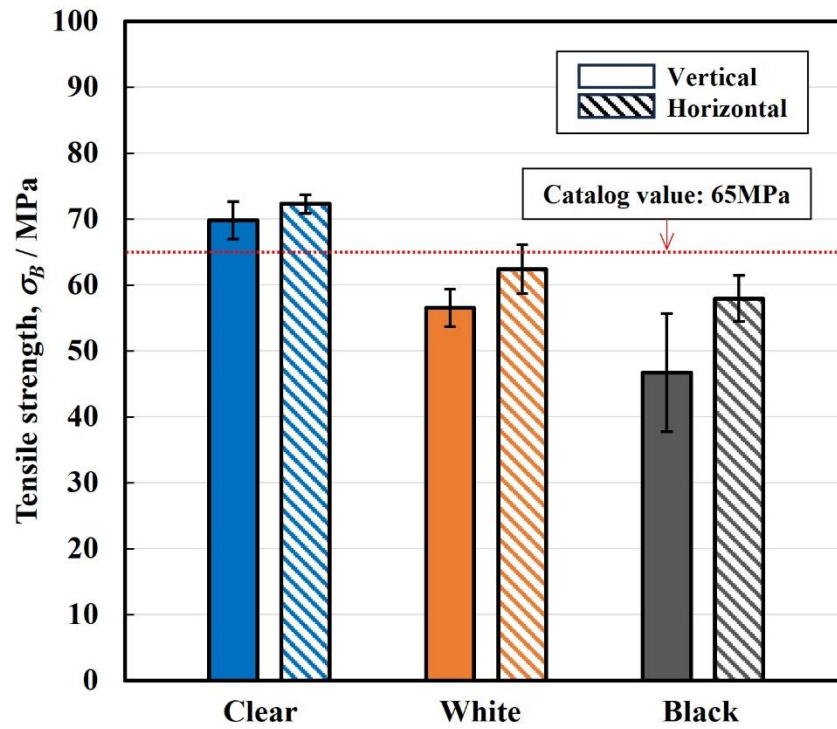
Fig. 3.6 SS-curve of Black Resin.

3.4.4 各色の引張特性比較

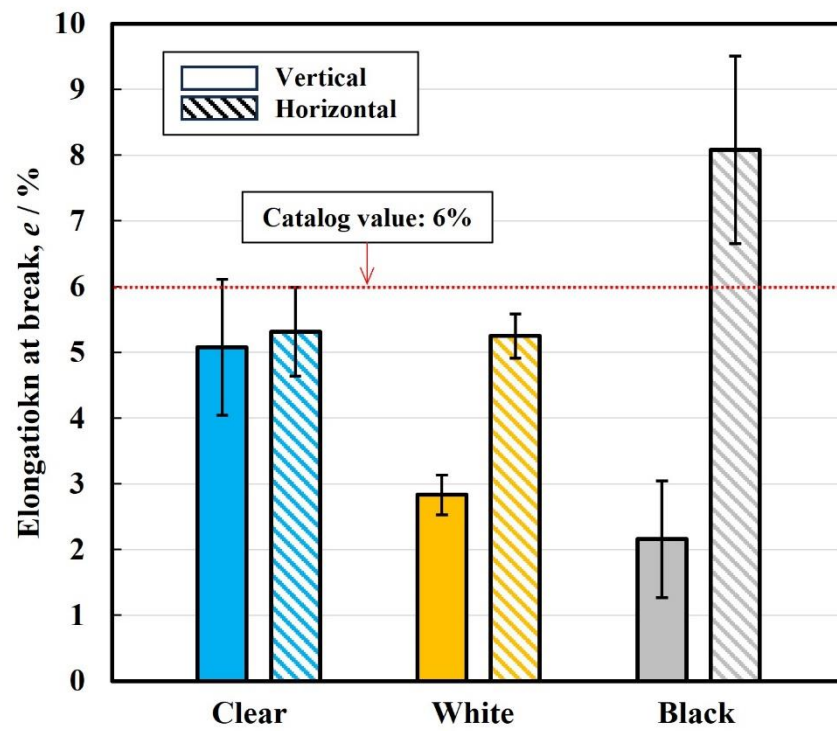
Fig. 3.7 に各色の実験結果をまとめた。(a)は引張強さを、(b)は破断伸びを示す。グラフ内のエラーバーは、標準偏差を示す。引張強さに関して、カタログ値の 65MPa を超えているのは Clear Resin のみであり、White Resin と Black Resin はその数値に達していない。特に Black Resin の引張強さはカタログ値と比較して、垂直造形で約 18MPa、水平造形で約 7MPa 低く、バラツキも考慮した場合、同じ材料として部品製作に使用することは危険であることがわかる。造形方向によらず Clear>White>Black の順に優劣があり、特に垂直造形においてはその差異が大きい。

破断伸びを比較すると、垂直造形に関しては Clear>White>Black の順であるが、水平方向に関しては Clear≒White<Black と、Black Resin の破断伸びが最大である。破断伸びのカタログ値は 6%であるが、垂直造形の Clear Resin、水平造形の Clear Resin と White Resin がカタログ値と同程度、その他は大きな差があった。垂直造形と水平造形の引張強さと破断伸びの各色における優劣が同一の傾向ではなかったことに関する理由を確認することはできなかったが、SLA 方式 3D プリンタの造形物には異方性が確認できたという報告もいくつかあり^{47), 48)}、本論文の結果においても同様の結果が示され、造形物の運用には注意が必要である。

Table 3.1 に示した条件にしたがって二次硬化処理を実施したが、各色でその条件は統一されておらず、メーカー推奨条件を順守して引張試験を実施した。二次硬化を含む造形条件を変化させることで、機械的特性に差が出るという研究報告⁴⁹⁾もあり、引張強さの向上やバラツキの減少、各色の特性差を減少させることができるかどうか、調査することも重要であると考えられる。



(a) Tensile strength



(b) Elongation at break

Fig. 3.7 Comparison of tensile properties.

3.4.5 色の違いが引張特性に及ぼす影響

Table 3.2 にメーカより公開されている安全データシート (SDS) ^{50), 51), 52)} に記載されている各レジン成分の成分構成を示すが、メーカより公開されている重量%の範囲が大きいことがわかる。また、Clear Resin のみ、レジンの効率的な硬化に効果のある紫外線増感剤である Diphenyl (2, 4, 6-trimethylbenzoyl) phosphine Oxide (ジフェニル (2, 4, 6-トリメチルベンゾイル) ホスフィンオキシド) が配合されている。成分の重量%の詳細はメーカから公開されておらず、独自の配合率により各色に差があることが予想できる。

高分子材料では、分子量が増大するほど引張強度が増加する ⁵³⁾ ことが知られている。**Table 3.3** に各成分の分子量を示す。Urethane dimethacrylate (ウレタンジメタクリレート) の分子量は 470.6 である。Methacrylate monomer (メタクリレートモノマー) はメタクリル酸グリシジル (分子量 142.2) やメタクリル酸 2-(ジメチルアミノ) エチル (分子量 157.2) などで構成されていると予測できるが、メタクリレートモノマーは 100 種類以上が存在しており、その分子量も 86.1 から 532 と非常に幅広く、色違いのレジンにおいて分子量の差が大きくなっても不思議ではない。Clear Resin にのみ配合されているジフェニル (2, 4, 6-トリメチルベンゾイル) ホスフィンオキシドは 348.4 であり、各レジンの成分構成の差、すなわち分子量の差が引張強度に影響を与えることが予想されるが、これには分子量分析等による更なる調査が必要である。さらに、光硬化性材料の重合に関する研究 ^{54)~57)} も複数あり、これらによれば、添加材や温度差などが重合の強さや速度に大きく影響を及ぼすとのことであり、本章で使用したレジン材料においても、成分構成や何らかの着色成分が強度差を生じる原因になったと考えられる。定量的な成分分析など、詳細な調査は将来課題としたい。

3.5 SLA 方式 3D プリンタでの部品製作の可能性

各色の引張試験結果をもとに、光造形方式 3D プリンタでの部品製作における留意点を考察する。前述の通り「Standard Resin」の Clear, White, Black の 3 色を比較したが、カタログ値の特性を満たしていたのは Clear Resin のみであった。GD のようなツールを活用して部品設計することを考えると、最適化設計のための材料パラメータを正しく設定しなければ、製品の安全性に懸念が生じることが示唆された。同じ Standard Resin でありながらも、別の材料としての扱いが必要であると考えられる。また、造形方向の違いによる特性差も確認でき、製品に対する荷重方向に考慮した設計が重要であることも明確となった。

また、引張試験の結果はバラツキが大きく、ロボット部品を製作し運用することを想定した場合、部品の信頼性が低いことがリスクになりうることが示された。

Table 3.2 Composition of each resin (wt%).

	Clear	White	Black
Urethane dimethacrylate	55-75	55-75	55-75
Methacrylate monomer	15-25	15-25	15-25
Diphenyl (2, 4, 6-trimethylbenzoyl) phosphine Oxide	< 0.9	-	-

Table 3.3 Molecular weight of each ingredient.

	Molecular weight
Urethane dimethacrylate	470.6
Methacrylate monomer	86.1-532
Diphenyl (2, 4, 6-trimethylbenzoyl) phosphine Oxide	348.4

3.6 結言

本章では, 装置, 素材ともに安価なコストで運用可能な SLA 方式 3D プリンタに着目し, GD で軽量化した部品を製作・運用することを検討した. しかしその検証過程において色が異なる以外は同一の材料特性を持つとされるレジン材料において, 色の違いにより力学特性に差があることが経験的に確認できたため, 材料の力学特性を明確にするために材料の引張試験を実施した結果, 明確な特性差を確認した. さらに引張試験の結果はバラツキが大きく, 構造部品としての使用を想定すると, 安定した強度を保証することは困難であることも確認した.

第 4 章

選択式レーザ焼結 (SLS) 方式 3D プリンタによる ナイロン 12 でのロボット拡張部品製作検討

4.1 緒言

前章で光造形 (SLA) 方式 3D プリンタでの最適化設計ロボット部品製作について検討したが、実際に使用する材料が有する引張特性に基づいた GD を実施することによって部品製作を検討する必要性が確認された。そこで、SLA 方式と比較して機械本体の価格や全体工数を含め、部品製作コストは上昇するものの、金属 AM に比べ大幅に低コストで部品製作が可能である選択式レーザ焼結 (SLS) 方式 3D プリンタに注目し、その中でも造形安定性が高くコストも低いポリマー材料であるナイロン 12 を使用するとして、GD によるロボット部品製作を検討した。

4.2 SLS 方式 3D プリンタと Generative Design の相性

1.1.4 項で述べた SLS 方式 3D プリンタは、造形の際モデルの形状を安定させるためのサポート材を必要とせず、複雑なモデルであっても完全にサポート材無しで高精度にモデルを造形することが可能である。GD で生成される複雑形状のモデルを SLS 方式以外の 3D プリンタで製作する場合、サポート材は必須であり、さらに造形後にサポート材を除去した部分の表面性状は荒れてしまうため、後処理によるサポート痕の除去が必要となる。サポート材やサポート痕の除去など、造形後の工程が少ないことは、SLS 方式 3D プリンタで複雑形状のモデルを製作することの大きなメリットである。GD と SLS 方式 3D プリンタは相性が良く、それぞれの特徴をうまく活かすことができる。

SLS 方式でナイロン 12 を使用し、GD による最適化設計をした軽量化ロボット部品を製作、標準部品として低コストに運用できれば、非常に費用対効果が高くなることが期待される。

4.3 ナイロン 12 について

ナイロンは一般に、靱性が高い、耐衝撃性に優れる、摺動性に優れる、耐熱性が高い、耐油性、耐薬品性に優れる、など優れた性質を有している。その中でもナイロン 12 は多くの産業分野で使用されている。特に自動車産業において需要が高く、エンジンルーム内部品、吸気系部品、燃料系部品など幅広い用途で使用されている。電気・電子機器にも多く採用されており、産業用機器のコネクタ、スイッチ、ハウジングなどに使用されている。

ナイロン 12 は SLS 方式 3D プリンタの材料として最も普及⁵⁸⁾しており、強度とディテール再現をバランスよく備えることができ、過酷な環境下で使用される治具や高耐久性部品、複雑な構造を持つ機能確認用試作などに活用されている。

4.4 切削加工現場で想定される使用環境と調査内容

切削加工現場における産業用ロボット及び周辺機器は、工作機械内部への素材供給やエアブロー、完成品のピックアップなど一連の動作を行う際に切削油にさらされやすく、常に切削油が付着する環境で使用されることが多い。その中でも、水溶性切削油を使用している切削加工現場が多数あり、ナイロン 12 への影響を調査することが望ましい。しかし、ナイロン 12 に対して水溶性切削油が及ぼす影響について報告された例は調査した限り皆無であった。

一般的にナイロンは樹脂材料の中でも特に吸水（吸湿）により強度低下する⁵⁹⁾ことが知られている。ナイロン 12 はその中でも吸水性が小さく機械的性質の変化が小さい^{60), 61)}とされているが、全く影響を及ぼさないわけではなく、一般的に濃度が 10%程度で使用され、その大半が水で構成されている水溶性切削油がナイロン 12 の部品に及ぼす影響は調査しておくべき項目である。

本章では、SLS 方式 3D プリンタによって造形されたナイロン 12 について、引張試験による基礎的な力学特性調査とともに、水溶性切削油に浸漬した場合と浸漬していない場合についても引張試験による力学特性の調査を実施した。

4.5 素材評価

4.5.1 試験片製作

Formlabs 社製 SLS 方式 3D プリンタ「Fuse 1⁶²⁾」にて、材料はメーカ純正材料「ナイロン 12⁶³⁾」を使用し、引張試験片 (ASTM D638-14 で規定された Type I) を造形した。試験片造形方向は、**Fig. 4.1** に示す通り造形プラットフォームに対して垂直 (Vertical) および水平 (Horizontal) の 2 方向である。

4.5.2 切削加工による表面仕上げと粗さ測定

一般的に、SLS 方式 3D プリンタの造形物は、オレンジピールと呼ばれるまだらな凹凸が表面に残り、ざらつきを有している。加えて、わずかではあるが積層痕が造形物表面に現れる。これらは応力集中源となるため強度低下を生じることが懸念される。そこで、切削加工による表面仕上げにより引張強度が改善するかどうかを確認すべく、**Fig. 4.2** に示す通り、引張試験片 (ASTM D638-14 Type I) の平行部と肩部、厚さに加工シロを 0.5mm 追加した一回り大きいニアネットシェイプ試験片を造形し、周囲を切削加工により後加工して試験片を製作した。直接造形した試験片 (**Fig. 4.1 参照**) を「後加工無し」とし、切削加工により作製したものを「後加工あり」とする。

切削による仕上げ加工による試験片表面粗さの変化を調査するため、後加工無し試験片と後加工あり試験片の表面粗さを測定した。表面粗さ測定器は Mitutoyo 製「SJ-400」を使用した。

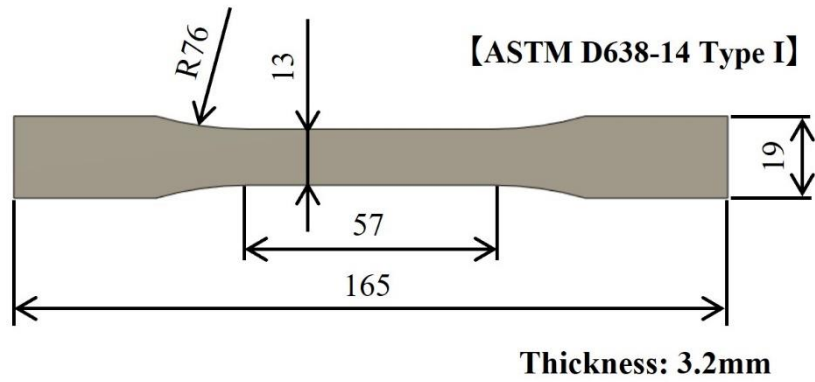
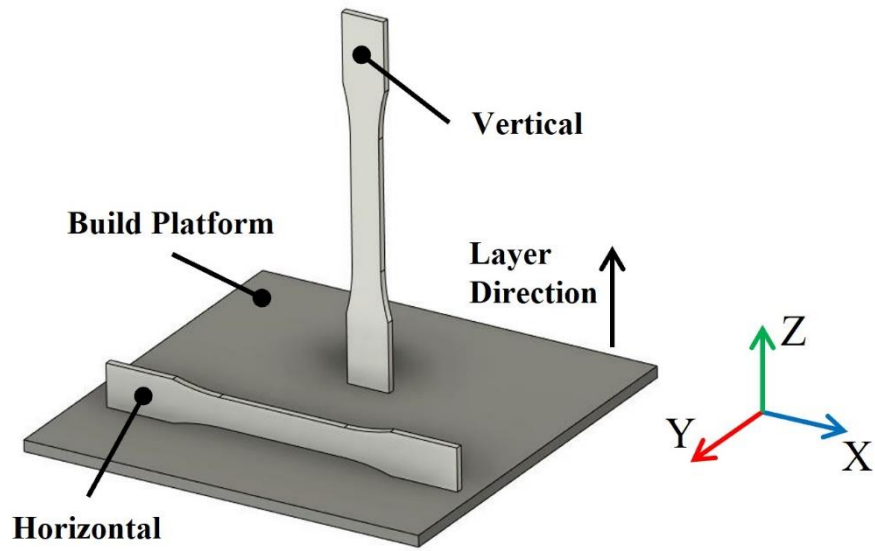


Fig. 4.1 Layer direction of specimen and tensile specimen shape.

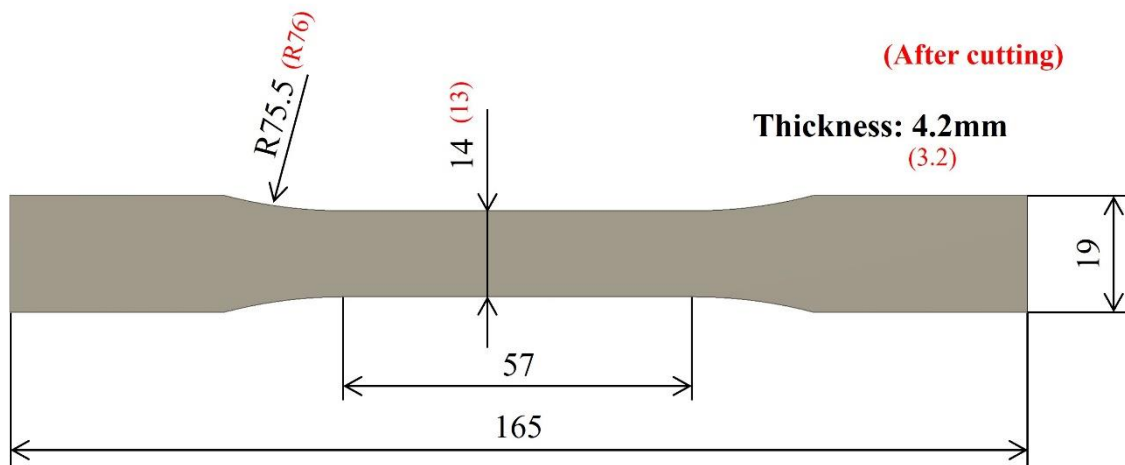


Fig. 4.2 Near net shape tensile specimen.

4.5.3 水溶性切削油への浸漬

ナイロン 12 を水溶性切削油に浸漬した際の影響を調査するため、エマルジョンタイプ切削油（サンコーオイル社製 SE1980SC）を，メーカー推奨の 10%濃度で水道水に攪拌した切削油を作製し，試験片を 10 日間浸漬した．試験片は引張試験直前まで切削油に浸漬したものを使用した．

4.5.4 引張試験

Table 4.1 に，8 種の試験片条件を示す．試験条件は 3.3.2 項と同様で，全ての試験片に対し，万能試験機（島津製作所製オートグラフ AG-X plus 100kN）を使用し，初期ひずみ速度 $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，室温，大気中にて引張試験を実施した．試験方法は ASTM D638-14 に準拠しており，3 章での引張試験と同様，これ以降で記述しているすべての応力については，試験力を試験片平行部断面積で除した公称応力を示し，ヤング率はひずみが 0.05～0.25%区間の直線回帰により決定した値である．ひずみは引張試験機のオプション機器であるビデオ伸び計を使用し，標点間距離を 50mm として測定を実施している．

Formlabs 社が公開しているナイロン 12 の引張特性は，引張強さ 50MPa，破断伸び 11%，6%（z 方向），ヤング率 1.9GPa である．Z 方向は本論文で表現している Vertical と同方向（**Fig. 4.1** 参照）であり，破断伸びに異方性がある．

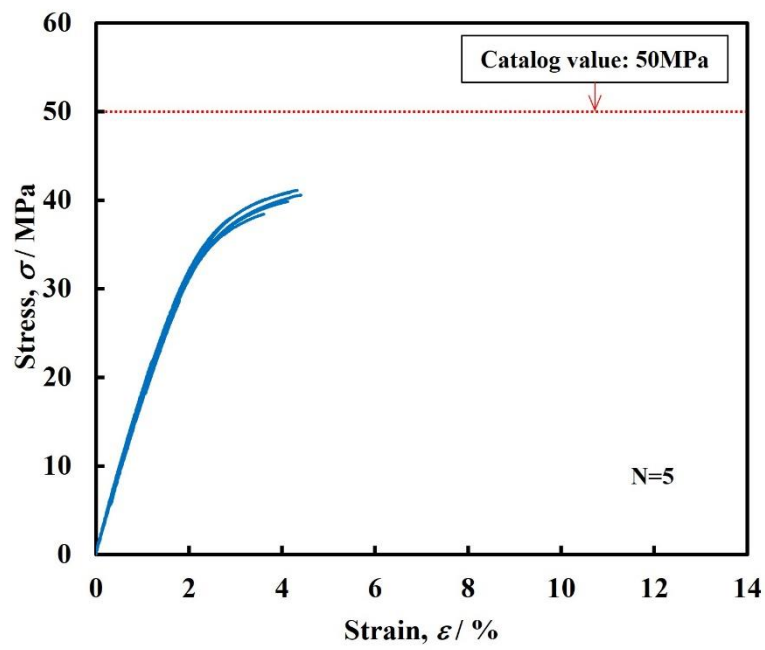
Table 4.1 Types of specimens.

No.	Build Direction	Post Process	Immersed in Cutting Fluid
1	Vertical	×	×
2			○
3		○	×
4			○
5	Horizontal	×	×
6			○
7		○	×
8			○

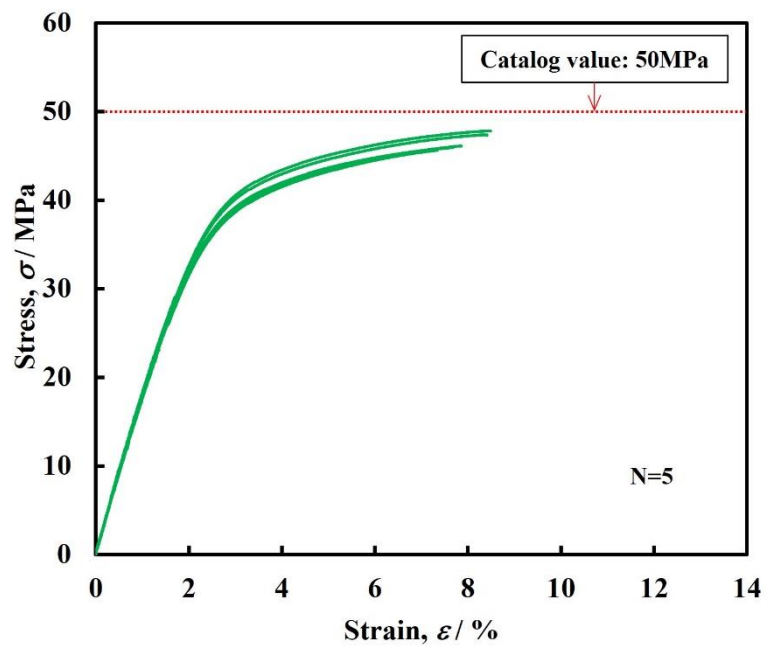
4.6 試験結果および考察

4.6.1 後加工無し試験片の引張特性

Fig. 4.3 に後加工無し試験片の応力－ひずみ線図を示す．(a)は垂直造形，(b)は水平造形である．(a)垂直造形の引張強さは 40.2MPa，破断伸びは 4.3%，ヤング率は 1.9GPa であり，(b)水平造形の引張強さは 46.6MPa，破断伸びは 8.0 %，ヤング率は 1.9GPa であった．垂直造形の引張強さはカタログ値（50MPa）より 20%低く，水平造形に関しては垂直造形と比較して引張強さは大きいもののカタログ値をわずかに下回った．ともに破断伸びはカタログ値と比較して 70%程度しか発揮できていないこともわかる．弾性領域での挙動に造形方向による差異は見られず，ヤング率も同一の値を示したが，塑性領域においては差異が明確となった．垂直造形，水平造形ともにデータのバラツキは小さく，安定した挙動を示している．



(a) Vertical

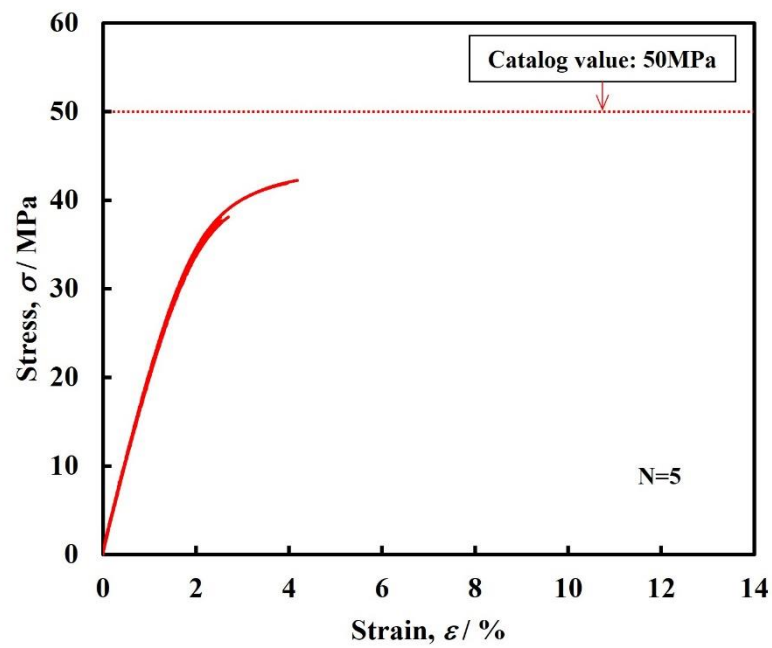


(b) Horizontal

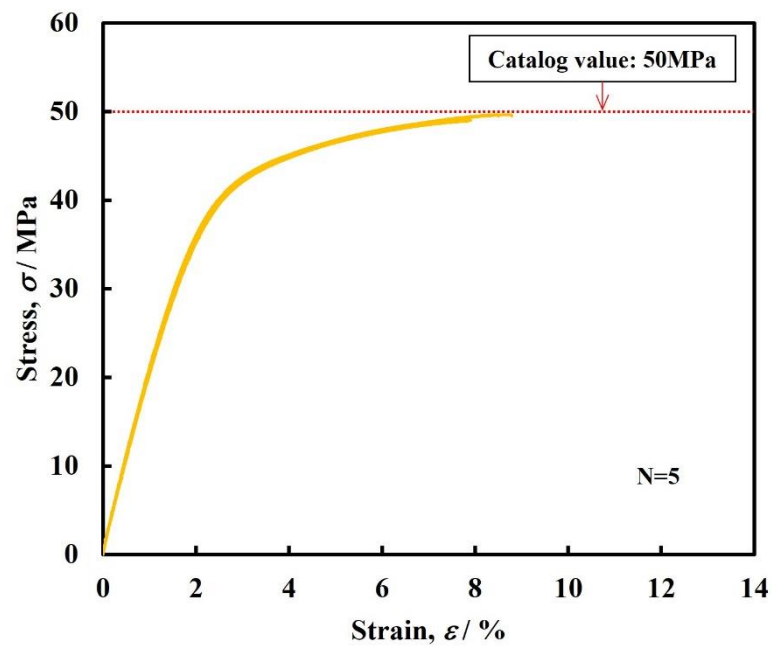
Fig. 4.3 SS-curve of “Not post processed”.

4.6.2 後加工あり試験片の引張特性

Fig. 4.4 に後加工あり試験片の応力－ひずみ線図を示す．(a)は垂直造形，(b)は水平造形である．(a)垂直造形の引張強さは 39.6MPa，破断伸びは 3.2%，ヤング率は 2.2GPa であり，(b)水平造形の引張強さは 49.2MPa，破断伸びは 8.1%，ヤング率は 2.2GPa であった．垂直造形の引張強さは，後加工無し試験片と比較してほとんど変化がなく，水平造形ではわずかに（約 6%）増加してほぼカタログ値と一致する水準であった．それぞれの引張試験での挙動は後加工無し試験片と大きく変わらず，弾性領域においては傾向が一致している．(a)垂直造形では，後加工無し試験片と比較して破断伸びが減少しており，降伏後のより早い段階で破断する傾向が確認できた．



(a) Vertical

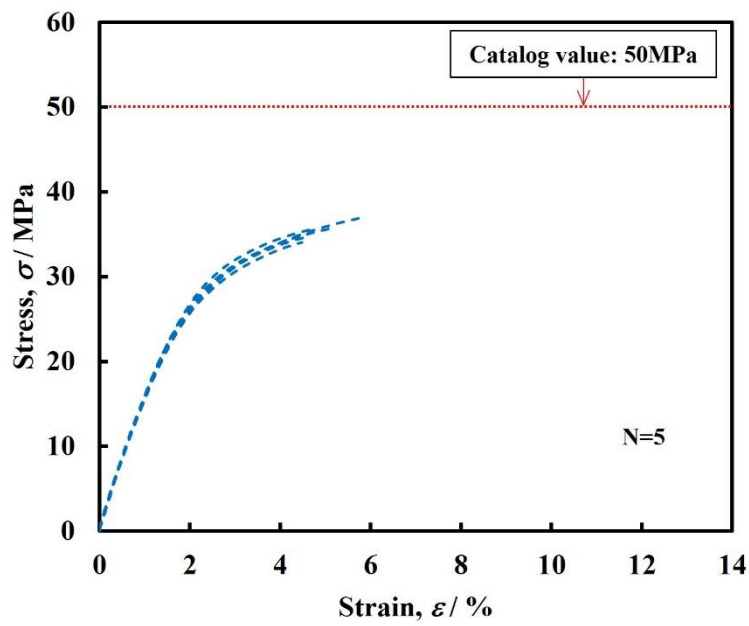


(b) Horizontal

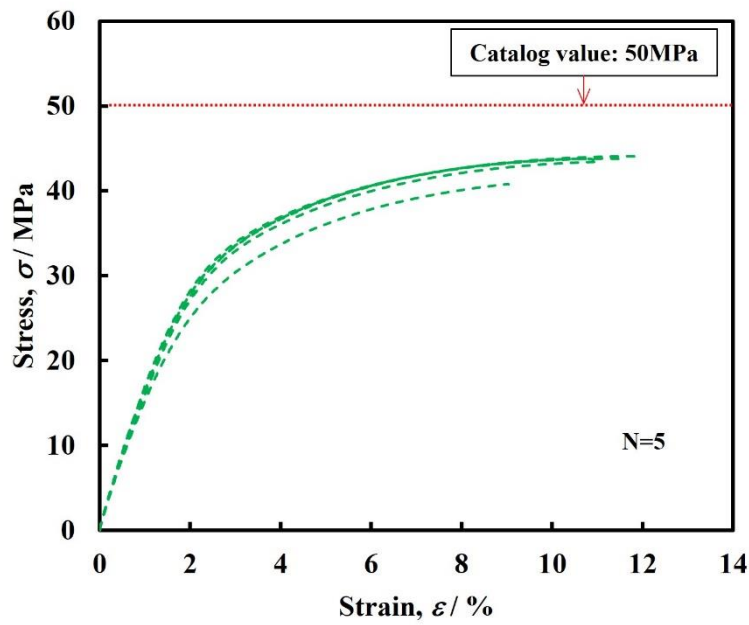
Fig. 4.4 SS-curve of “Post processed”.

4.6.3 後加工無し・切削油浸漬試験片の引張特性

Fig. 4.5 に後加工無し・切削油浸漬試験片の応力－ひずみ線図を示す。(a)は垂直造形、(b)は水平造形である。(a)垂直造形の引張強さは 35.4MPa、破断伸びは 5.0 %、ヤング率は 1.7GPa であり、(b)水平造形の引張強さは 43.2 MPa、破断伸びは 10.9 %、ヤング率は 1.8GPa であった。切削油に浸漬した影響で引張強さが低下し、破断伸びは増加していることがわかる。(a)垂直造形では、切削油浸漬無し試験片と比較して引張強さは約 5MPa 低下、破断伸びは約 1%増加しており、(b)水平造形では、引張強さは約 3MPa 低下、破断伸びは約 3%増加している。切削油浸漬により力学特性に明確な変化が見られ、使用環境を考慮した解析や設計が重要であることが示唆された。



(a) Vertical

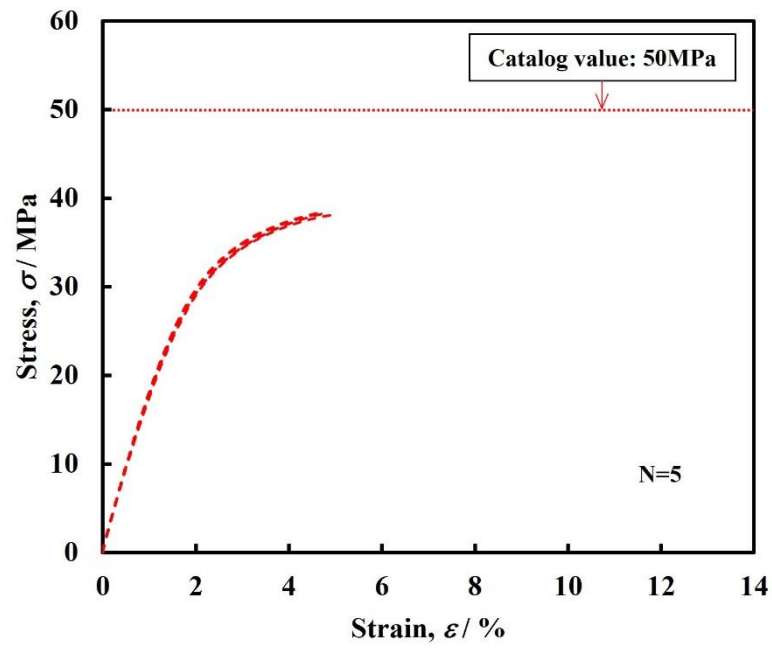


(b) Horizontal

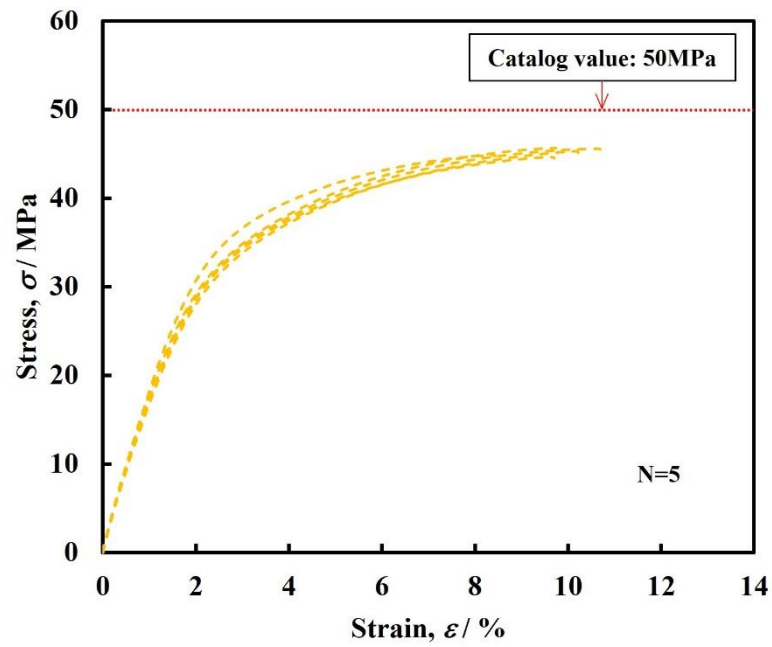
Fig. 4.5 SS-curve of “Not post processed and Immersed in Cutting Fluid”.

4.6.4 後加工あり・切削油浸漬試験片の引張特性

Fig. 4.6 に後加工あり・切削油浸漬試験片の応力－ひずみ線図を示す。(a)は垂直造形、(b)は水平造形である。(a)垂直造形の引張強さは 37.8MPa、破断伸びは 4.5 %、ヤング率は 1.9GPa であり、(b)水平造形の引張強さは 45.2 MPa、破断伸びは 9.8 %、ヤング率は 1.9GPa であった。後加工無し試験片の引張試験と傾向は同様に、切削油に浸漬することで引張強さが低下し、破断伸びは増加している。(a)垂直造形では、切削油に浸漬していない試験片と比較して引張強さは約 2MPa 低下、破断伸びは約 1%増加しており、(b)水平造形では、引張強さは約 4MPa 低下、破断伸びは約 2%増加している。後加工あり試験片と後加工無し試験片を比較すると、切削油浸漬による特性変化の割合に大きな差はなく、切削加工による特段の影響はないことが判明した。



(a) Vertical



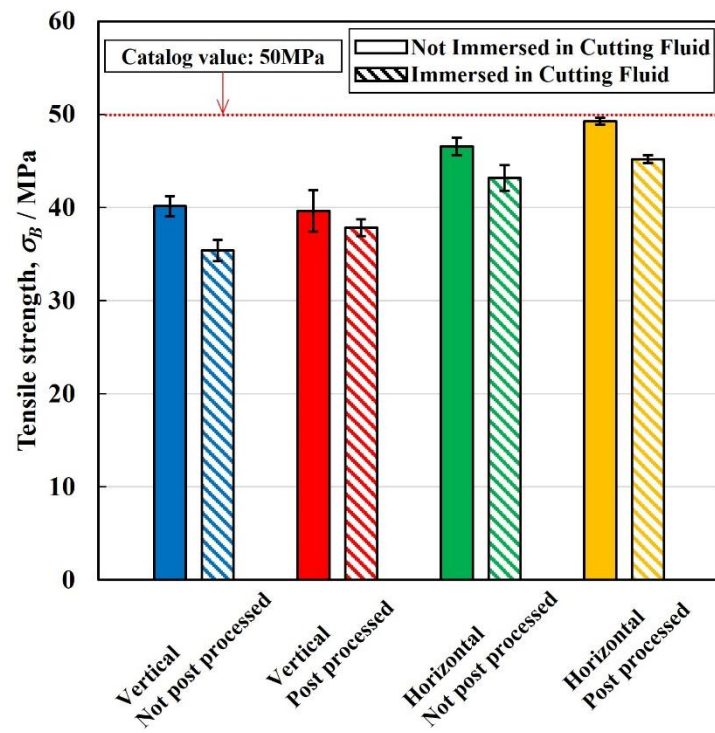
(b) Horizontal

Fig. 4.6 SS-curve of “Post processed and Immersed in Cutting Fluid”.

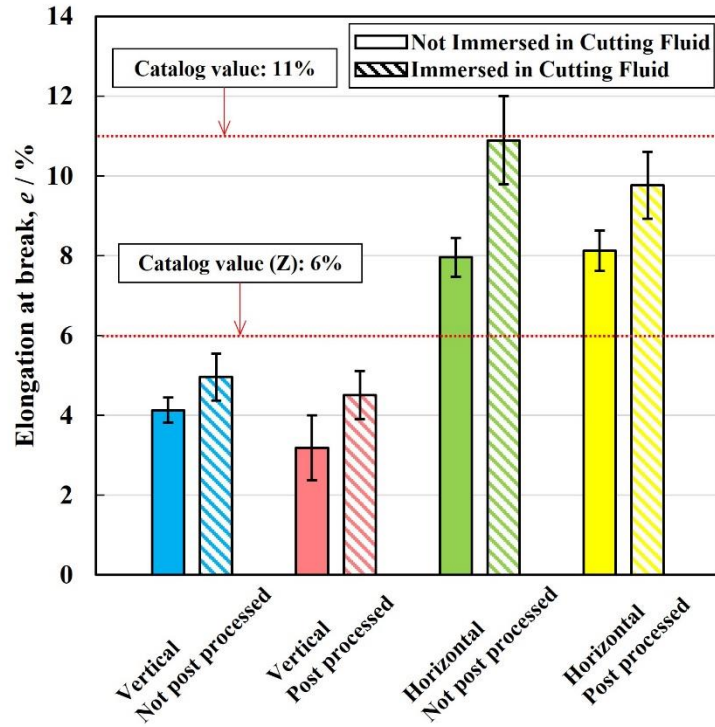
4.6.5 各条件の比較

Fig. 4.7 に全条件の引張特性の比較を示す。(a)は引張強さを、(b)は破断伸びを示す。グラフ内のエラーバーは、標準偏差である。垂直造形と水平造形を比較すると、水平方向の引張強さが高く、破断伸びも大きいことがわかる。切削液に浸漬することで、引張強さが低下し破断伸びは増加することが明確となった。全条件の中で最も強度に差が確認できた 2 つの条件について比較すると、最大の引張強さは「水平造形、後加工あり」の 49.2Mpa、最小の引張強さは「垂直造形、後加工無し、切削油浸漬」の 35.4Mpa であり、最大で約 14 Mpa の強度差が確認された。最小値は最大値から 3 割近く強度が低く、造形方向や後加工の有無、使用環境によりこれほどまでに強度差が確認できたことは部品設計において非常に重要かつ無視することのできない結果である。

また、「水平造形、後加工あり」がカタログ値に最も近い条件となった。後加工による引張強さ向上が示唆されたものの明確な差は確認できず、引張強さに対して表面粗さは大きな影響を及ぼさないことが確認された。



(a) Tensile strength

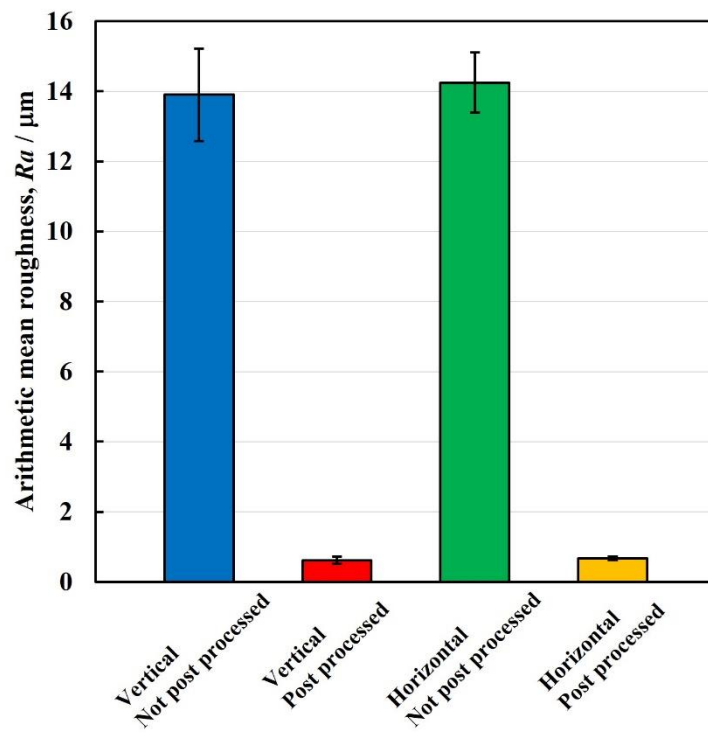


(b) Elongation at break

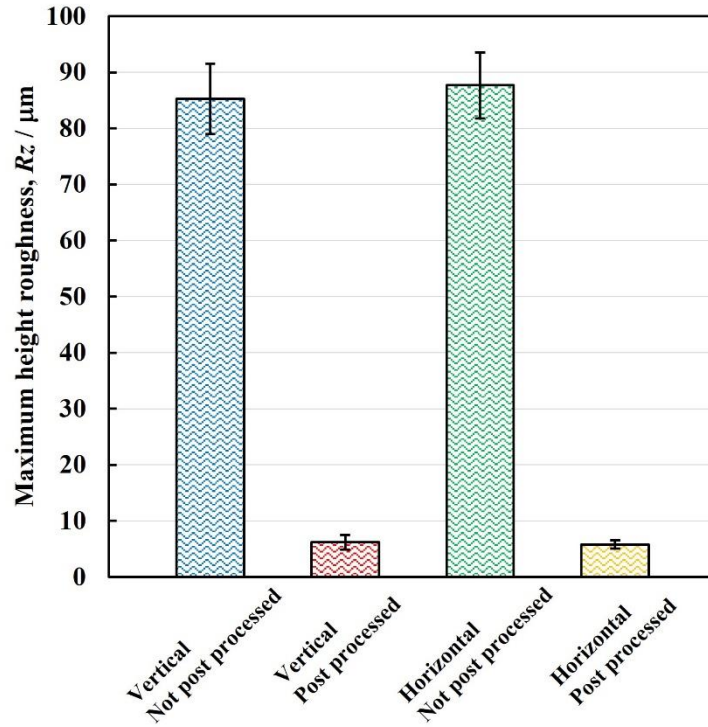
Fig. 4.7 Comparison of tensile properties.

4.6.6 表面粗さの影響考察

Fig. 4.8 に後加工無し試験片，後加工あり試験片の表面粗さの比較を示す．(a)は算術平均粗さ，(b)は最大高さ粗さである．グラフ内のエラーバーは，標準偏差を示す．後加工無し，後加工ありの双方で垂直造形，水平造形の測定値にほとんど差はなく，後加工無しの算術平均粗さは約 14 μm ，最大高さ粗さは約 85 μm であり，後加工ありの算術平均粗さは約 0.7 μm ，最大高さ粗さは約 6 μm であった．ともに後加工により算術平均粗さは 20 分の 1 以下，最大高さ粗さは 10 分の 1 以下へと大幅に改善できており，表面粗さの改善が引張強さの向上につながると予想していたものの，**Fig. 4.7** に示したように引張特性に顕著な差は確認できない．木暮ら⁶⁴⁾によれば，造形物内部には未溶融の粉末やそれらの粉末間の空隙を原因とする欠陥が発生し，これらが引張試験における破壊の起点になりうると報告されており，さらに Majewski らの報告⁶⁵⁾では SLS 方式 3D プリンタでのナイロン 12 造形物内部には未溶融欠陥が存在し，破壊の起点になる可能性が示唆されている．本研究で製作したナイロン 12 試験片においても，表面粗さではなく内部欠陥が破壊の原因となっていることが予想される．



(a) R_a



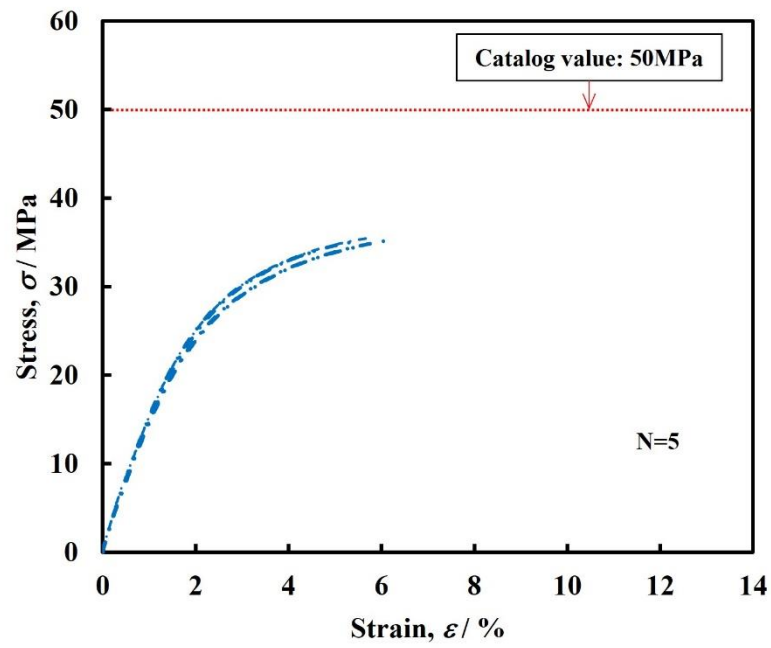
(b) R_z

Fig. 4.8 Comparison of surface roughness.

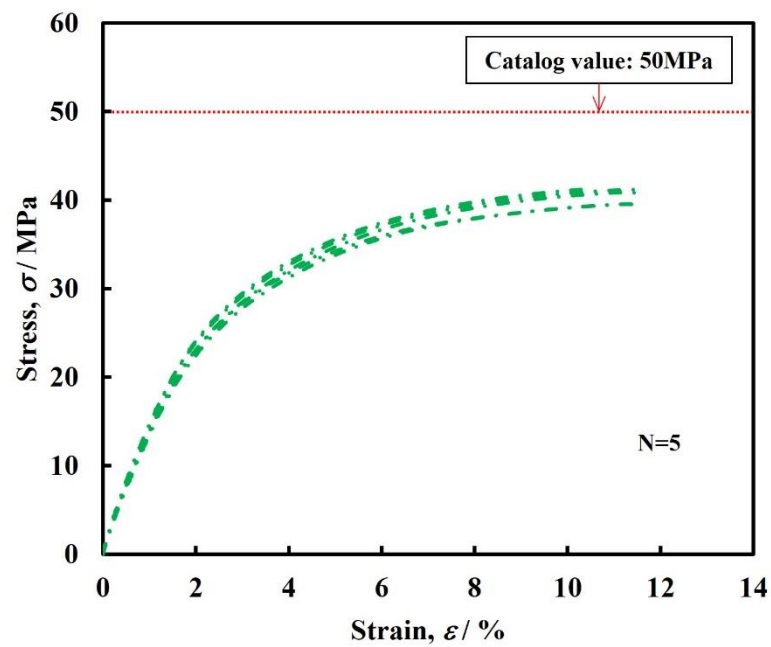
4.6.7 水道水への浸漬と引張強さへの影響考察

ここまで、水溶性切削油に浸漬した際のナイロン 12 の引張強度を評価した。本研究で使った水溶性切削油の濃度は 10 % であり、90 % は水で構成されている。そこで追加実験として、油剤原液の影響と水の影響どちらが支配的であるかを調査するため、水道水に浸漬した試験片に対して引張試験を実施した。追加実験は「後加工無し」の試験片に対して実施し、水溶性切削油と同じく期間は 10 日間、引張試験直前まで常温の水道水に浸漬したものを使用した。「後加工無し」試験片のみでの試験を実施した理由は、4.5.6 項で述べたように、表面粗さの違いによる引張特性に顕著な差が見られなかったことによる。

Fig. 4.9 に、水道水に浸漬した後加工無し試験片の応力－ひずみ線図を示す。(a)は垂直造形、(b)は水平造形である。(a)垂直造形の引張強さは 34.8MPa、破断伸びは 5.5 %、ヤング率は 1.7GPa であり、(b)水平造形の引張強さは 40.5MPa、破断伸びは 11.2%、ヤング率は 1.6GPa であった。続いて **Fig. 4.10** には、後加工無し試験片の全条件比較を示す。(a)は引張強さ、(b)は破断伸びである。グラフ内のエラーバーは、標準偏差を示す。引張特性の傾向は水溶性切削油に浸漬した際と同様で、水道水に浸漬することで引張強さは減少し、破断伸びは増加する結果となった。その傾向はわずかながら水溶性切削油への浸漬時よりも強く、水溶性切削油浸漬試験片に対して垂直造形試験片の引張強さはほとんど変化がなく、破断伸びは約 10%増加した。水平造形試験片の引張強さは約 10 %低下し、破断伸びは約 3%増加した。しかしこれらの特性差は特段大きいわけではなく、水溶性切削油と水道水の影響にほとんど差はないといえる。詳細に調査するためには水溶性切削油の濃度を極端に高めたものに浸漬するなどの方法が考えられるが、メーカ推奨濃度から乖離するほど油剤原液が水にうまく攪拌できず水溶性切削油を作製できないなどの問題点が生じてくる。さらに現実的には水溶性切削油の濃度は約 10 %で管理されていることがほとんどであるため、これ以上の調査は実施しないこととした。

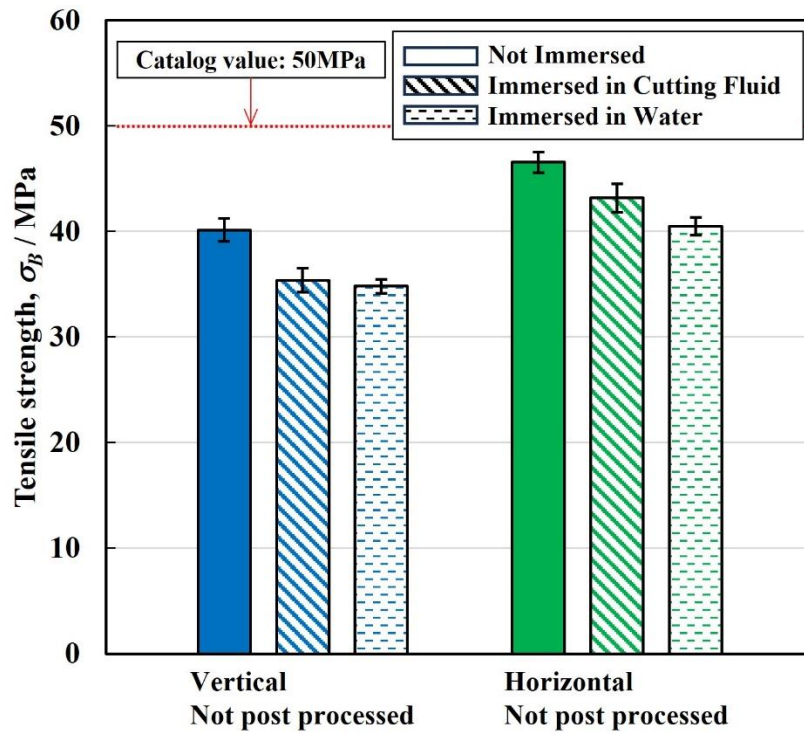


(a) Vertical

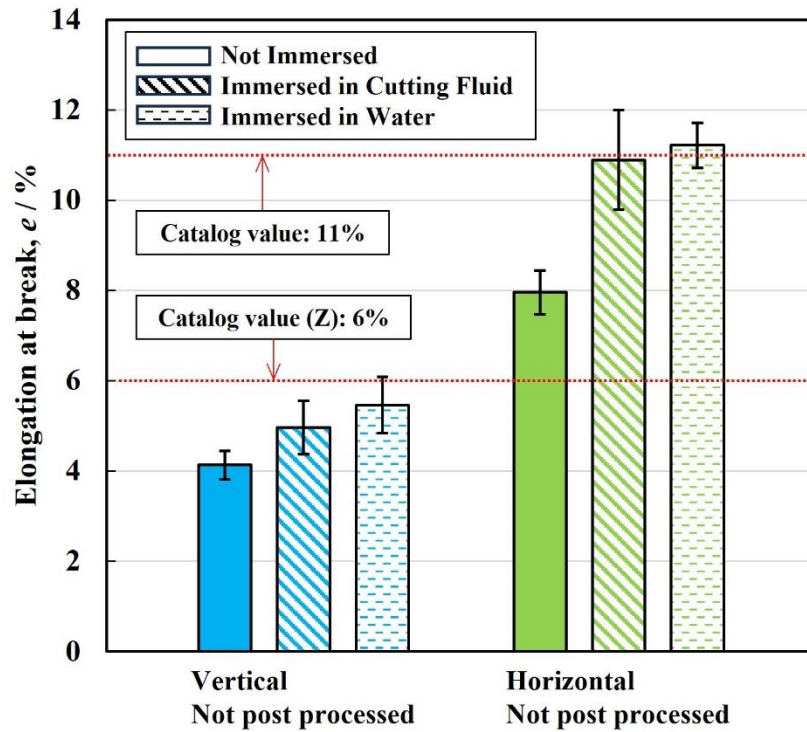


(b) Horizontal

Fig. 4.9 SS-curve of “Not post processed and Immersed in Water”.



(a) Tensile strength



(b) Elongation at break

Fig. 4.10 Comparison of tensile properties.

4.7 結言

ナイロン 12 の引張試験の結果，使用される環境を考慮した水溶性切削油浸漬試験片および水道水浸漬試験片において強度低下を確認した．切削加工による表面仕上げ加工により，わずかではあるが引張強度が向上することが期待できることも確認した．

水溶性切削油や水道水の影響で強度低下はするものの，引張試験のデータのバラツキは非常に小さいもので，材料としては安定した試験結果を得ることができている．強度低下を考慮した材料パラメータを使用して最適化設計を実施した場合，SLS 方式 3D プリンタで製作した部品は十分に使用できると考えられる．

第 5 章

カスタマイズパラメータを使用した

Generative Design の検証

5.1 緒言

GD に使用しているソフトウェア Fusion360 では、解析に使用する材料パラメータを任意の数値にカスタマイズすることができる。前章では、水溶性切削油に浸漬したナイロン 12 の強度が低下することを確認したが、その強度低下を考慮した設計が求められる。そこで、Fusion360 のマテリアライブラリに保存されているナイロン 12 の材料パラメータを変更した際に、GD 解析結果にどのような影響を及ぼすのかを確認することとした。

5.2 Generative Design 解析における材料パラメータの設定

Fusion360 のマテリアライブラリには、初期段階で Fuse 1 用のナイロン 12 の材料情報が保存されている。ナイロン 12 について、初期段階のパラメータと強度低下を考慮したパラメータの比較を **Table 5.1** に示す。強度低下を考慮したパラメータには、第 4 章における「垂直造形、後加工無し、切削油浸漬」のデータを採用した。なお、降伏応力は ASTM D638-14 に準拠し算出した。カスタマイズパラメータでは最大引張強さが約 30%、降伏応力が約 35%低下しており、GD 解析にて材料パラメータ以外の条件が同一であった場合、生成結果には何らかの差が出ることが予想される。

Table 5.1 Comparison of initial and customized parameters.

Material	Nylon12 (Initial Parameter)	Nylon12 (Customized Parameter)
Ultimate tensile strength (MPa)	50	35.4
Yield strength (MPa)	46	30
Young's Modulus (GPa)	1.9	1.7

5.3 材料強度の変化による Generative Design 解析結果の考察

5.3.1 GD 解析設定

解析対象モデルは第 2 章で示したアームブロックとし、解析条件は 2.2 節をベースにした。GD 解析条件を **Table 5.2** に示す。解析用ベースモデルは **Fig. 5.1** に、拘束荷重条件の概要は **Fig. 5.2** に示す通りである。解析用ベースモデルの保持ジオメトリはアームブロックの連結及びロボットへの固定部分を設定し、障害物ジオメトリには、アームブロックをロボットに固定、または複数個連結する際にそれぞれの干渉を考慮した回避領域と、ボルトによる締結や工具を使用する際に必要な作業領域、さらにはアームの中心に各種センサやアクチュエータ類の配線を通すための空洞領域を設定した。拘束および荷重条件は、ロボットを運用するにあたりアームブロックに対して最大の曲げ荷重作用するパターンを想定し、ロボットアームが水平位置にあるときにアームブロックの終端面を固定拘束、先端に 200N の荷重が付加される設定とした。なお、ロボットの軸回転を考慮し、荷重の方向は 45° ずつ回転させた 8 方向のパターン設定にて 360° の可動範囲を補完している。

Table 5.2 Generative Design analysis conditions.

Material	Nylon12 (Initial Parameter)	Nylon12 (Customized Parameter)
Young's Modulus (GPa)	1.9	1.7
Density (g/cm ³)	1.02	
Yield strength (MPa)	46	30
Ultimate tensile strength (MPa)	50	35.4
Lower limit of safety factor	2	
Maximum load (N)	200	

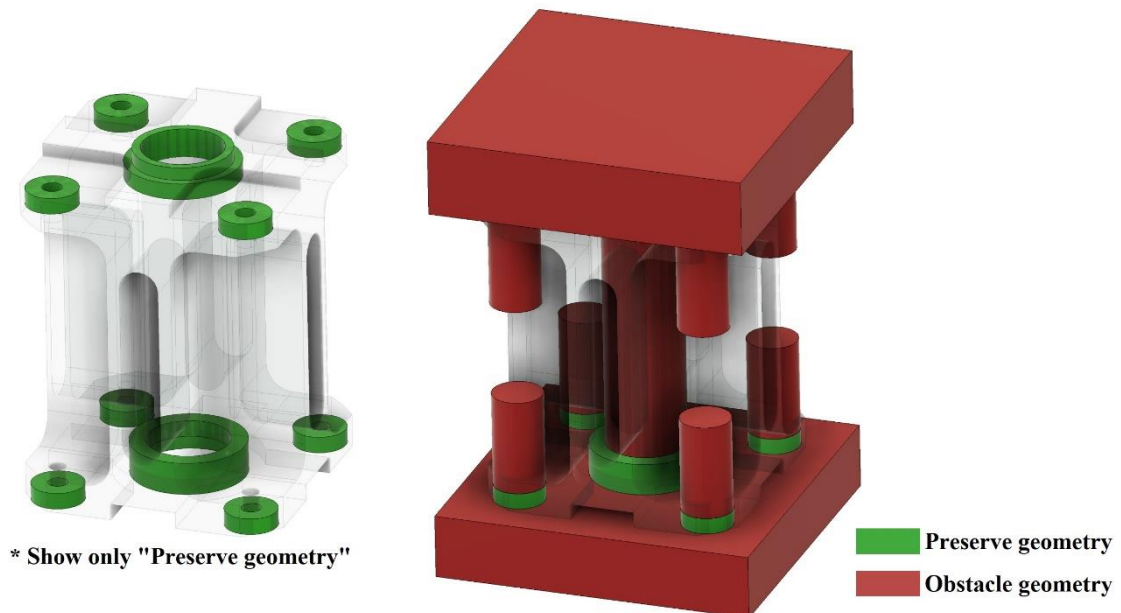


Fig. 5.1 Schematic illustration of the base model for analysis.

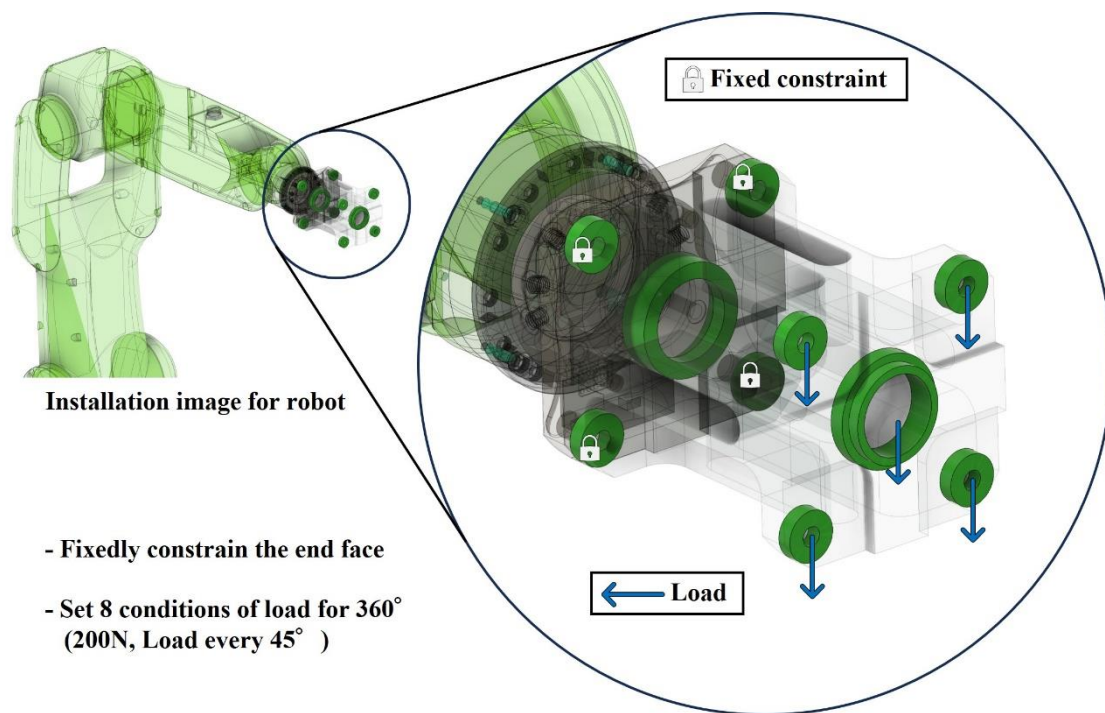


Fig. 5.2 Schematic illustration of restraint load conditions.

5.3.2 解析結果の比較

Fig. 5.3 に初期段階の材料パラメータと強度低下を考慮した材料パラメータによる GD 解析結果（モデルおよび体積・質量・最大フォンミーゼス応力・最大変位）の比較を示す。材料パラメータごとにその結果を比較すると差は明確であり、強度低下を考慮したカスタマイズパラメータでの解析では、初期パラメータでの解析と比較して生成モデルの体積・重量が大幅に増加している。それに伴いモデルの形状にも差が見られ、強度低下を考慮することでより剛性感のあるモデルが生成されており、最大フォンミーゼス応力と最大変位はその分減少し、より安全側に寄った解析結果であることがわかる。最大フォンミーゼス応力は強度低下後の降伏応力 30MPa に対しても十分に余裕のある 15MPa であり、変位量も 2.4 節で述べた 3mm 以下に収まっているため実用的動作において影響を及ぼさない程度の小さな値である。初期パラメータの解析結果に対して重量が約 80g から約 200g へと 2 倍以上の数値になっているものの、一般的な産業用ロボットの可搬重量 7~10kg に対しては十分に余裕があり、実運用においては許容できる重量である。強度低下を考慮した GD 解析結果

モデルにおいては、重量が 640g であった従来の切削加工製と比較し約 200g 程度と、約 70% の重量削減が見込まれ、十分な軽量化効果がある。

ロボットの制御においては、動作時の位置決め精度が重要である。GD 解析による軽量化効果について大きく期待してしまうが、軽量化と同様に最大変位についても注目しておく必要があり、いくら軽量化しても最大変位が大きくなり動作時の位置決め精度に影響を及ぼすことは避けるべきである。その点で、本章での強度低下を考慮した GD 解析により生成されたアームブロックは、従来部品と比較して十分軽量化されており、最大変位も十分に許容できる。このアームブロックを使用することで、ロボットの可搬重量に対しての製品・ワーク搬送のキャパシティや動作範囲に余裕が生まれ、安定した高速稼働の実現が期待できる。それによりさらに小型のロボットを採用し、生産ラインのコンパクト化やコスト削減が可能となる。

SLS 方式 3D プリンタで生産するにあたり、材料費や後処理工程などを含めた全体工数を考慮しても、従来の切削加工製と同等のコストに抑えることが可能である。さらに、AM が「デジタルマニュファクチャリング」と言われる所以である、「いつでも、世界中どこでも」3D データがあれば生産できるという強みが発揮できることを考えると、納期の短縮はもちろん、必要な部品を必要な場所で調達することで更なるコスト削減につながると考えられ、これは BCP (Business Continuity Plan: 事業継続計画) の観点でも非常に有効となる。

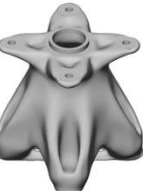
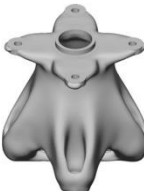
Material: Nylon12 (Initial Parameter)			
① 	② 	③ 	④ 
Volume 80.2cm ³ Mass 81g Maximum von Mises Stress 20.3MPa Maximum Displacement 1.70mm	Volume 80.0cm ³ Mass 81g Maximum von Mises Stress 18.9MPa Maximum Displacement 1.76mm	Volume 80.2cm ³ Mass 81g Maximum von Mises Stress 20.4MPa Maximum Displacement 1.76mm	Volume 80.6cm ³ Mass 82g Maximum von Mises Stress 19.8MPa Maximum Displacement 1.67mm
Material: Nylon12 (Customized Parameter)			
① 	② 	③ 	④ 
Volume 194.3cm ³ Mass 197g Maximum von Mises Stress 15MPa Maximum Displacement 0.68mm	Volume 205.2cm ³ Mass 208g Maximum von Mises Stress 15MPa Maximum Displacement 0.68mm	Volume 190.6cm ³ Mass 193g Maximum von Mises Stress 15MPa Maximum Displacement 0.68mm	Volume 188.1cm ³ Mass 191g Maximum von Mises Stress 15MPa Maximum Displacement 0.69mm

Fig. 5.3 Comparison of multiple models.

5.4 Generative Design 解析時の材料パラメータ設定の重要性

材料強度を低下させたカスタマイズパラメータを使用した GD 解析では、明確な形状差、体積、質量の差が確認できた。最大フォンミーゼス応力、最大変位にも差が見られ、材料強度以外のパラメータは共通であることを考えると、最適化設計を実施する際には実際に使用する材料が有する特性を、使用環境を考慮したうえでパラメータとして設定することがいかに重要であることを示している。安定した力学特性を発揮する材料を使用することを前提にした設計であれば、GD により付加価値の高い部品、製品の設計が可能であることが示された。

5.5 結言

本章では、強度低下を考慮した材料パラメータを設定した GD 解析を実施し、生成モデルの挙動について調査した。強度低下を考慮せずに解析し生成されたモデルと比較し、形状、質量が全く異なるモデルが生成され、最適化設計を実施する際には実際に使用する材料が有する特性を、使用環境を考慮したうえでパラメータとして設定することが重要であることを示した。将来展望として、本章で生成したモデルを造形し、ロボット実機に取付けた際の動作確認、評価が望まれる。特に非常停止動作を含む動的影響については調査しておくべき項目である。

SLS 方式 3D プリンタでの生産により、従来の切削加工製アームブロックと同等のコストに抑えることができるだけでなく、「デジタルマニュファクチャリング」と言われる AM の強みである納期短縮や運送コスト削減などの付加価値を高めることができる。

第 6 章

結言

6.1 本論文のまとめ

本研究では、産業用ロボットに取付けることでアーム長さを変更することのできる拡張部品について、従来の切削加工製部品を評価対象とし、軽量化を目的として GD と AM 技術を活用した拡張部品の設計および製作を行い、これらの手法の有用性や技術課題に関する検討を実施した。以下に得られた結果をまとめる。

- ① 産業用ロボットのアーム長さ変更用の拡張部品「アームブロック」について、従来の切削加工製部品を基に GD で軽量化を目的とした最適化設計を実施し、アルミニウム合金粉末を使用した金属 AM により製作した結果、従来の切削加工製部品と比較して 77%の重量削減を実現した。ロボットに装着した際の動作においては、モータ負荷低減や振動抑制効果が確認でき高機能な部品として実用化できることを示したものの、緊急時を想定した非常停止時の動的な動作に対しての安定性に課題を残す結果となった。
- ② アルミニウム合金粉末による金属 AM でアームブロックを製作するにあたり、従来の切削加工製と比較し約 10 倍近くの製作コストがかかることが判明したため、製作コストを低減させる方策の検討が必要であることを確認した。
- ③ 金属材料ではなく、光硬化性液体樹脂（レジン）を使用し、複雑形状部品を製作可能な SLA 方式 3D プリンタに着目し、GD で軽量化した部品を製作・運用することを検討したが、色が異なる以外は同一の材料特性を持つとされるレジン材料において、色の違いが材料の力学特性に及ぼす影響を調査し、素材色により積層部材の機械的特性に有意な差が生じることを確認した。また、強度にはバラツキが大きく、構造部品としての使用を想定すると、安定した強度を保証することは困難であることも確認した。
- ④ GD においては、実際に使用する材料が有する力学特性を定量的に考慮した解析により部品製作を検討する必要性が確認された。
- ⑤ どんな複雑形状なモデルであってもサポート材を必要とせず、樹脂材料で造形可能な SLS 方式 3D プリンタに着目し、材料をナイロン 12 として部品製作することを検討し、積層材の強度を調査した。その結果、バラツキの少ない安定した強度特性を有すること

を確認したことに加え、実際の使用環境を想定した水溶性切削油への浸漬により、引張強度が低下することを確認した。

- ⑥ 強度低下を考慮した材料パラメータを設定した GD 解析を実施することで、強度低下を考慮せずに解析し生成されたモデルと比較し、形状、質量が全く異なるモデルが生成され、最適化設計を実施する際には実際に使用する材料が有する特性を、使用環境を考慮したうえでパラメータとして設定することが重要であることを示した。

6.2 今後の展望

本研究では、GD 解析の軽量化効果について一定の評価をすることができたが、第 2 章にて示した非常停止時の挙動に関する課題に関連し、ロボットの非常停止時や、通常動作時における突発的な衝突（協働ロボットにおいては作業者と接触する場合もある）、さらにはティーチング時のミスによる予期せぬ衝突など、より広範囲な事象を考慮した際の、部品に対する動的荷重を含む解析を実施した設計が望まれる。動的シミュレーション等を活用し、より広範囲な事象に対応した部品設計を推進する予定である。

また、アームブロックの実運用においては、複数個延長することで拘束部分に作用する曲げモーメントが増加していくことが予想される。最適なロボット運用のためのアームブロックそのものの最適な長さ検証も含め、多様な使用条件にも耐えうるさらに高機能な拡張部品開発を継続する。

さらに、産業用ロボット部品の設計において、産業用ロボットが実際に使用される環境を想定した解析、設計が重要であるとの結論を出した。第 4 章において、水溶性切削油にさらされる環境を想定した試験を実施したが、世の中の製造現場では、非水溶性の切削油を使用している現場や、高温環境、低温環境において産業用ロボットを使用している現場も多く存在する。将来的には、産業用ロボットが使用される環境に対して、複数の環境条件での試験を実施し、多くの環境を想定した設計ができるようなデータベースを構築することが望ましい。そのため、産業用ロボットを既に活用している、または今後活用予定の各種加工現場の環境をヒアリングしながら、材料のデータ取得及び部品設計に向けた研究開発を進めていく。

参考文献

- 1) 京極秀樹：金属積層造形技術概説，日本船舶海洋工学会誌，104, (2022), 2.
- 2) 萩原恒夫：樹脂系三次元積層造形（3D プリンティング）技術概説，日本船舶海洋工学会誌，104, (2022), 8.
- 3) 小玉秀男：立体図形作成装置，公開特許公報（A），昭 56-144478 (1981).
- 4) 牛島邦晴，長倉祐太，吉村彰記：AM 技術のマイクロラティス構造への活用，スマートプロセス学会誌，6, 3 (2017), 125.
- 5) 桑野翔太，牛島邦晴，井上遼：粉末床溶融結合法で造形したラティスの形状不整および機械的特性，軽金属，72, 5 (2022), 191.
- 6) 京極秀樹：金属粉末レーザー積層造形技術の進展，溶接学会誌，83, 4 (2014), 16.
- 7) 竹澤晃弘：トポロジー最適化と金属積層造形の金型開発への応用，ぷらすとす，1, 11 (2018), 758.
- 8) Popov, V. V. Jr., Muller-Kamskii, G., Kovalevsky, A., Dzhenzhera, G., Strokin, E., Kolomiets, A. and Ramon, J.: Design and 3D-printing of titanium bone implants: brief review of approach and clinical cases, Biomedical Engineering Letters, 8, 4 (2018), 337. (online), available from < <https://doi.org/10.1007%2Fs13534-018-0080-5> >, (accessed 2023-12-29).
- 9) Gokcekaya, O., Ishimoto, T., Nishikawa, Y., Kim, Y. S., Matsugaki, A., Ozawa, R., Weinmann, M., Schnitter, C., Stenzel, M., Kim, H. S., Miyabayashi, Y. and Nakano, T.: Novel single crystalline-like non-equiatomic TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion, Materials Research Letters, 11, 4 (2023), 274. (online), available from < <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2147406> >, (accessed 2023-12-29).
- 10) Wang, D., Zhang, T., Guo, X., Ling, D., Hu, L. and Jiang, G.: The potential of 3D printing in facilitating carbon neutrality, Journal of Environmental Sciences, 130, (2023), 85.
- 11) 當間隆司：樹脂積層 3D プリンタの産業用途における実際と課題，及び今後の展開，日本画像学会誌，60, 4 (2021), 366.

- 12) Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., Shindo, P. W., Mesina, F. R. and Wicker R. B.: Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, *Journal of Materials Science & Technology*, 28, 1 (2012), 1.
- 13) Zitelli, C., Folgarait, P. and Schino, A. D.: Laser Powder Bed Fusion of Stainless Steel Grades: A Review, *Metals*, 9, 7 (2019), 731.
- 14) Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Volpe, Y. and Governi, L.: Generative Design: An Explorative Study, *Computer-Aided Design & Applications*, 18, 1 (2021), 144.
(online), available from < [https://www.cad-journal.net/files/vol_18/CAD_18\(1\)_2021_144-155.pdf](https://www.cad-journal.net/files/vol_18/CAD_18(1)_2021_144-155.pdf) >, (accessed 2022-09-30).
- 15) Seowoo, J., Soyoung, Y. and Namwoo, K.: Generative Design by Reinforcement Learning-Enhancing the Diversity of Topology Optimization Designs, *Computer-Aided Design*, 146, (2022), 103225.
- 16) Briard, T., Segonds, F. and Zamariola, N.: G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14, 3 (2020), 875.
- 17) Gebisa, A. W. and Lemu, H. G.: A case study on topology optimized design, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 276, (2017), 012026.
- 18) Pilagatti, A. N., Atzeni, E. and Salmi, A.: Exploiting the generative design potential to select the best conceptual design of an aerospace component to be produced by additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, (2023), 5597.
- 19) Han, L., Du, W., Xia, Z., Gao, B. and Yang, M.: Generative Design and Integrated 3D Printing Manufacture of Cross Joints, *Materials*, 15, 14 (2022), 4753.
(online), available from < <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/14/4753> >, (accessed 2023-10-15).
- 20) <https://www.autodesk.com/jp/design-make/articles/generative-manufacturing-jp>, (accessed 2022-09-30).
- 21) <https://3dadept.com/bmw-group-combines-industrial-3d-printing-with-generative-design-artificial-intelligence-in-product-development/>, (accessed 2023-11-01).
- 22) <https://www.bmw.com/ja/design/ai-design-and-digital-art.html>, (accessed 2023-11-01).
- 23) <https://www.wallpaper.com/beauty-grooming/ross-lovegrove-f1-racing-car-perfume-bottle>, (accessed 2023-11-01).
- 24) 野田哲男：ものづくりにおける産業用ロボットの展開と今後の課題，システム/制御/情報，65, 3 (2021), 78.

- 25) 内山勝：人工の手の運動制御に関する研究（第 1 報，特異点を考慮した協調運動の計算），日本気化学会論文集（C 編），45, 391 (1979), 314.
- 26) 加藤大暉，前田直毅，武内歩，廣垣俊樹，青山栄一：強化学習による協働ロボットの逆運動学の解の種類と特異点や障害物の回避，精密工学会誌，89, 10 (2023), 783.
- 27) Bugday, M. and Karali, M.: Design optimization of industrial robot arm, Engineering Science and Technology, an International Journal, 22, (2019), 346.
- 28) <https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/>, (accessed 2023-09-16).
- 29) <https://www.eos.info/en/industrial-3d-printer/metal/eos-m-290>, (accessed 2022-09-30).
- 30) Kempen, K., Thijs, L., Humbeeck, V. J. and Kruth, J.-P.: Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting, Physics Procedia, 39, (2012), 439.
- 31) 寺西正俊，西田一人，中野貴由，田中敏宏，掛下知行：積層造形技術による金属製カスタム照明の開発とデライト価値の創出，まてりあ，5, 1 (2016), 18.
- 32) 寺西正俊，西田一人，中野貴由，荒木秀樹，田中敏宏：金属 3D プリント技術によるカスタム照明の開発，粉体および粉末冶金，63, 2 (2016), 82.
- 33) 吉川雅博，田口裕也，阪本真，山中俊治，松本吉央，小笠原司，河島則天：機能性とデザイン性を考慮した軽量・低コストの対向 3 指義手，日本ロボット学会誌，32, 5 (2014), 456.
- 34) 狩野紀昭，瀬楽信彦，高橋文夫，辻新一：魅力的品質と当たり前品質，日本品質管理学会会報「品質」，14, 2 (1964), 39.
- 35) 大富浩一：設計工学の目指すところ：設計からデザインへ，日本機械学会論文集(C 編)，75, 751 (2009), 516.
- 36) <https://www.fanuc.co.jp/ja/product/robot/model/smallcollabo.html>, (accessed 2023-08-22).
- 37) Garcia, R. R., Bittencourt, C. A. and Villani, E.: Relevant factors for the energy consumption of industrial robots, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40, (2018), 464.
- 38) 熊谷聡，宮崎敏昌，大石潔：振動抑制および高速軌跡追従を考慮した産業用ロボットのモーション制御法，電気学会論文誌 D，130, 3 (2010), 375.
- 39) 背戸一登：ロボットの振動解析，日本ロボット学会誌，6, 2 (1988), 147.

- 40) 小島宏行, 木部哲治: 遺伝的アルゴリズムを用いた最適軌道計画による 2 関節フレキシブルロボットアームの残留振動抑制制御, 日本ロボット学会誌, 19, 7 (2001), 905.
- 41) Kouritem, A. S., Abouheaf, I. M., Nahas, N. and Hassan, M.: A multi-objective optimization design of industrial robot arms, Alexandria Engineering Journal, 61, 12 (2022), 12847.
- 42) Hauge, R., Mansour, S., Saleh, N. and Harris, R.: Materials analysis of stereolithography resins for use in Rapid Manufacturing, Journal of Materials Science, 39, (2004), 2457.
- 43) Tuteski, O. and Kočov, A.: Tensile strength and dimensional variances in parts manufactured by sla 3D printing, INDUSTRY 4.0, 6, 4 (2021), 143.
- 44) <https://formlabs.com/jp/3d-printers/form-3/>, (accessed 2022-09-27).
- 45) ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, (2014)
- 46) <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801089-TDS-JP-0P.pdf>, (accessed 2022-09-27).
- 47) Stögerer, J., Baumgartner, S., Rath, T. and Stampfl, J.: Analysis of the mechanical anisotropy of stereolithographic 3D printed polymer composites, European Journal of Materials, 2, 1 (2022), 12.
- 48) Monzón, M., Ortega, Z., Hernández, A., Paz, R. and Ortega, F.: Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing, 10, 1 (2017), 64.
- 49) 岩崎太郎, 北川剛至, 永田俊介, 谷本安浩: 液槽光重合法における造形条件が歯科用樹脂造形物の機械的性質および寸法精度に及ぼす影響, 日本歯科理工学会誌, 42, 3 (2023), 179.
- 50) <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801037-SDS-JA-0.pdf>, (accessed 2022-11-07).
- 51) <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801051-SDS-JP-0.pdf>, (accessed 2022-11-07).
- 52) <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001033-SDS-JP-0.pdf>, (accessed 2022-11-07).
- 53) 中野詔彦, 長谷川澄子: ポリスチレンの引張強度に及ぼす分子量の影響, 材料, 33, 372 (1984), 1206.
- 54) 宮崎光治, 川口稔, 堀部隆, 水上義文: ジメタクリレートの重合反応に関する研究(1),

- 歯科材料・器械, 4, 5 (1985), 504.
- 55) 宮崎光治, 川口稔, 井上勇介, 堀部隆: ジメタクリレートの重合反応に関する研究(2), 歯科材料・器械, 4, 6 (1985), 701.
- 56) 門磨義則, 小島克則, 増原英一: DSC による可視光線重合型レジンの重合開始剤系に関する研究, 歯科材料・器械, 5, 3 (1986), 348.
- 57) 三浦啓一: ジメタクリレートの硬化特性, 歯科材料・器械, 15, 6 (1996), 494.
- 58) 中谷充: 粉末床溶融結合法(選択的レーザ焼結法)とその材料としてのポリアミド(ナイロン) 12, 日本画像学会誌, 54, 4 (2015), 320.
- 59) 中邨佐一郎, 荒井貞夫: 機械要素のためのプラスチック, 日本機械学会誌, 66, 533 (1963), 843.
- 60) 柚口貞夫, 児玉宏: ナイロン 12, 高分子, 22, 9 (1973), 526.
- 61) 村木俊夫: ポリアミド, 高分子, 27, 3 (1978), 201.
- 62) <https://formlabs.com/jp/3d-printers/fuse-1/>, (accessed 2023-12-11).
- 63) <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001447-TDS-JP-0.pdf>, (accessed 2023-12-11).
- 64) 木暮尊志, 山内友貴, 横山幸雄: レーザー焼結で造形されたポリアミド 12 部品の機械的物性に対する造形品表面切削の影響, 精密工学会誌, 87, 3 (2021), 317.
- 65) Majewski, C. E., Zarringhalam, H. and Hopkinson, N.: Effects of degree of particle melt and crystallinity in selective laser sintered Nylon-12 parts, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture, 222, 9 (2008), 1055.

本論文に関する研究業績

学会誌掲載

真所最, 後藤浩二: ジェネレーティブデザインと積層造形技術を活用した産業用ロボットの拡張部品開発, 設計工学, 59, 3 (2024)

国際会議

Sai MADOKORO, Koji GOTOH: Effect of Water-soluble Cutting Fluid on Mechanical Properties of Nylon12 Manufactured by SLS 3D Printer, The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023 (ATEM-iDICs '23), October 2023

国内会議

1. 真所最, 後藤浩二: Generative Design による産業用ロボット向け軽量パーツの開発, 日本設計工学会 2023 年度秋季大会研究発表講演会, 2023 年 9 月
2. 真所最, 後藤浩二: Generative Design を活用した軽量化ロボットアーム部品の開発, Design シンポジウム 2023, 2023 年 10 月
3. 真所最, 後藤浩二: 光造形方式 3D プリンタにおける材料選択の注意点と設計手法の考察, 1DCAE・MBD シンポジウム 2023, 2023 年 11 月

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始適切なご助言，ご指導を賜りました九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門 後藤浩二教授に心より感謝申し上げます．

本論文の審査にあたり，有益なご助言をいただきました九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門 柳原大輔教授，九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門 津守不二夫教授，熊本大学大学院自然科学研究科 寺崎秀紀教授に厚く御礼申し上げます．

本研究に携わる費用面や，研究内容に理解を示して頂き，研究に集中できる環境を整えていただいた株式会社山本金属製作所 山本憲吾社長に厚く御礼申し上げます．

また，株式会社山本金属製作所 村上浩二氏，山本隆将氏には，本研究における各種実験に協力していただきました．データ取得や解析，論文執筆に関するご助言をいただけたことに感謝いたします．