

KSK-GH28-1

平成 28 年度

「安全・安心」及び「生活の質の向上」に資する技術革新

障害者の生活の質の向上に資する
3Dプリンタ出力製品の高付加価値化
補助事業

平成 29 年 3 月

一般財団法人 機械振興協会 技術研究所



RING!RING!
プロジェクト
競輪の補助事業

この事業は競輪の補助により実施しました。
<http://ringring-keirin.jp>



障害者の生活の質の向上に資する3Dプリンタ出力製品の高付加価値化

— 目 次 —

| | |
|-----------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 参考文献 | 2 |
| 2. これまでの取り組み | 2 |
| 2.1 専門委員会 | 2 |
| 2.2 関連調査 | 3 |
| 2.3 簡易式3Dプリンタによる実習 | 3 |
| 2.4 ビジネスモデルの構築 | 3 |
| 2.5 3Dプリント出力作業の試行実験 | 4 |
| 3. 3Dプリント出力製品の高付加価値化 | 5 |
| 3.1 3Dプリント出力製品に望まれる機能 | 5 |
| 3.2 機械的特性評価 | 6 |
| 3.2.1 引張試験 | 11 |
| 3.2.2 圧縮試験 | 13 |
| 3.2.3 曲げ試験 | 15 |
| 3.2.4 疲労耐久試験 | 16 |
| 3.2.5 硬さ試験 | 19 |
| 3.3 シミュレーションによる造形物評価 | 20 |
| 3.4 まとめと考察 | 23 |
| 4. 結論 | 24 |
| 謝辞 | 24 |

<研究>

障害者の生活の質の向上に資する3Dプリンタ出力製品の高付加価値化

藤塚 将行^{※1}, 保戸塚 久善^{※1}, 飯塚 保^{※1}, 木村 利明^{※2}, 松丸 誠一^{※3}

High value-added of 3D printed product contribute to the improvement of QOL of handicapped persons

Masayuki FUJITSUKA, Hisayoshi HOTOZUKA, Tamotsu IIZUKA,
Toshiaki KIMURA & Seiichi MATSUMARU

1. はじめに

近年、途上国の人口爆発による資源枯渇が不安視される一方で、先進国と呼ばれる国々ではいずれも少子高齢化による人口の減少が歯止めなく進む傾向にあり、各国は相対的に増え続ける高齢者層を労働力として活用することや少子化対策に様々な政策を打ち出している。この問題は我が国にとっても例外ではなく、高い医療技術による世界最高水準の高齢化と子育て世代の負担軽減が遅れていることによる少子化の二つの大きな理由により、むしろ世界的に例を見ない超高齢社会として注目を集める状況にある。政府の掲げる一億総活躍社会の観点では減り続ける労働力人口の確保を目指し、働く女性への支援、定年の延長などの各種対応策を政府主導で展開しているが、内閣府のまとめによる労働力人口の長期予測推移はこれらの策を講じても今後2060年に向けて大幅に減少することが示されている。

このような課題は、市区町村というミクロな視点でも全く同様の問題であり、技術研究所が立地する東久留米市においても現在11万5千人程度の人口が2040年には10万人を下回り、2060年には8万人以下になることが予測されているため、東久留米市まち・ひと・しごと

創生総合戦略¹⁾において2050年代までの人口10万人を維持することを目標としてまちづくり、ひとづくり、しごとづくりの観点で各種の施策に基づいた事業に取り組むことを掲げている。とりわけ合計特殊出生率の急激な回復が望めない現状において喫緊の課題といえるのは労働力人口の減少に歯止めをかけることであり、経済成長力の低下を抑制するだけでなく、介護福祉の領域における「支えられる人」が「支える人」として元気に活躍することに大きな期待が集まっている。その期待を担う層として注目をされているのが高齢者や障害者とされ、この方々の労働参加の拡大がひとつの解として期待されている。特に障害者の労働参加は定年退職後の元気で働ける期間に限定されてしまう高齢者の労働参加を推進することに比べて、就労可能期間が長く、自立により支えられる側から支える側への転換が生じることによる社会保障費の削減が中長期的に期待できるなど利点も多い。これまでの調査研究では障害者就労の高付加価値化を通じて我が国の直面する労働力人口の減少と社会福祉関係費増大の両課題を解決しうる取組みについて平成26年度から検討を行ってきた。これまでの調査研究で明らかになった障害者就労の大きな課題としては、職種が限定されてしまうこと、賃金・工賃が極めて低いことによりなかなか自立に繋がらないといったことが挙げられる。これらの課題を解決するため本研究では職種として製造業に着目している。製造業は一般

^{※1} 技術開発センター ^{※2} 企画管理室

^{※3} 産学官連携センター (東久留米)

に熟練が必要とされるだけでなく危険を伴う作業も多いとされ、障害者の就労として未開拓な分野である。3Dプリントサービスは障害者が取り組むことのできる製造業としては安全性が高く、高付加価値な就労であることから従来の障害者就労に比べ、やりがいや楽しみが多く感じられるだけでなく賃金・工賃の面でもメリットの多い作業といえる。そこに機械産業に関する当協会の技術・ノウハウを活用して作業の簡素化や安全性向上等を検討し、障害者の高付加価値な就労の実現に繋がることを目指している。

これまでのアプローチでは障害者が3Dプリンタを活用し、高付加価値な就労により具体的に障害者の高付加価値就労として3Dプリントサービスに着目し、持続的なビジネスモデルの立案とマーケットの視点、人とのマッチングの視点、3Dプリンタの設備・技術の視点から、その実現性を検証した。その後、技術研究所近隣の障害者就労支援事業所の協力のもと、立案したビジネスモデルの中でも中心的な作業といえる商用の3Dプリンタで造形された様々なモデルの仕上げ作業の試行実験とその評価を行った。また実作業に先駆けて必要不可欠な作業の安全性の確保と障害のある方が働きやすい環境整備も併せて行った。今年度は実際にビジネスとして成り立つかを実際の受発注を通して商流に組み込むことで検証するとともに、JKAの補助事業としては3Dプリンタによる造形物に強度等の信頼性を持たせることによる高付加価値化を実現することを目的とした検証を行った。本報告の構成は以下の通りである。

2章ではこれまでの調査検討結果及びビジネスモデル化に関する取り組み、さらには昨年度実施した障害者の方々による試行実験についてまとめて紹介を行う。3章では3Dプリンタ出力製品の高付加価値化を考えた際に望まれる機能について検討した後、機械的特性について引張、圧縮、曲げ、疲労、硬さといった複数の材料評価法による試験とその結果から考察を行う。また3Dプリンタ出力製品は従来の加工法よりも柔軟に様々な形状が造形できるため、3Dプリンタでの出力された製品

評価にシミュレーションソフトによる解析が可能であるか検証をおこなう。最後に4章で本報告書を総括する。

参考文献

- 1) 東久留米市まち・ひと・しごと創生総合戦略
(平成28年3月版)

http://www.city.higashikurume.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/005/29/3_sougou2803.pdf

2. これまでの取り組み

本事業では、障害者の高付加価値就労として3Dプリントサービスビジネスの実現を支援し、「障害のある人が幸せに暮らせる社会創造」を行うことを目的としている。その実現のため平成26年度には実現可能なビジネスモデル(マーケット、人、設備)を創出することを目的として様々な検討を行った。また平成27年度は立案した3Dプリントサービスのビジネスモデルが事業として成立するかを判断する大きなポイントとして障害者による実作業の試行実験とその評価を行い、持続的な事業化に向けた検証を行った。本章ではこれまでの調査研究で取り組んできた内容を紹介する。

2.1 専門委員会

障害者就労の領域、3Dプリンタの領域は共にこれまで技術研究所が培ってきた技術や経験が活かせる領域とは大きく異なる領域であるため、外部有識者の意見を集約する場が必要となった。そこで本事業を円滑に実施展開させるための発案・提言を行うことを目的として、学術・福祉・企業・行政関係者で構成する専門委員会を設置した。平成26年度においては委員からの課題提供や障害者就労の現状報告、今後の進め方などについて全9回の委員会活動で議題としてとりあげ、障害者による

3D プリントサービスのビジネスモデル構築に向けた活発な議論が行われた。平成27年度においては障害者が安全かつ快適に作業できる環境整備に関する議論や就労支援作業所に勤務される委員の方々の仕上げ作業の試行実験に関する調整や試行後の結果の報告などが行われた。今年度は造形物の強度評価状況の共有や実際のビジネスとしての受発注に関する議論の場として28年度も継続設置される。この専門委員会の今年度の概要は以下の通りである。

委員会名：

障害者の就労に資する3Dプリンタ技術普及専門委員会

委員数：委員長1名，委員10名，事務局5名

委員：

学術 明治大学

日本社会事業大学

玉川大学

福祉 特定非営利活動法人 武蔵野の里

社会福祉法人 森の会

特定非営利活動法人 コイノニア

社会福祉法人 椎の木会

東久留米市立 さいわい福祉センター

企業 株式会社JMC

行政 東久留米市 福祉保健部

事務局：

一般財団法人 機械振興協会 技術研究所

2.2 関連調査

本事業の目的は3Dプリンタを活用した高付加価値な障害者就労を持続的なビジネスとして実現することである。そのため事業の成否に関するポイントはビジネスだけでも障害者就労だけでもなく、様々な視点に立った動向調査が不可欠であった。調査を行った主な視点としては障害者就労の現場から見たマーケットの調査と3Dプリンタの設備・技術に関する調査である。特に障害者の方々が多く日々活躍される特例子会社の現場は種類やレベルが様々な障害者が活躍するために蓄積された

ノウハウの宝庫であり、規模も業種も様々な6事業所について調査を行った。また3Dプリンタの設備・技術の視点では3Dプリンタ製造メーカーや実際に3Dプリントサービスを行う会社などを訪問調査し造形後の後処理体験を行うなど、障害者が活躍しやすい造形方法や受注につながる機器選定などについての知見を得ることができた。

2.3 簡易式3Dプリンタによる実習

障害のある方々が元気に生き生きとやりがいを感じながら3Dプリント作業に取り組むことを念頭に置いた時、大きな課題となるのが障害の種類・レベルと作業内容とのマッチングである。この点を検討するため、就労支援事業所の指導者、行政向けに3Dプリンタの実習セミナーを関連調査と並行して合計5回開催し、参加した専門家の意見を汲み上げ、障害者の3Dプリント出力サービスへの適用性を検証した。日ごろから障害者の就労に関わる指導者の方々からのコメントには現場ならではの意見が多く、作業内容、作業時の接し方だけでなく機器選定にも必要な情報を得ることができた。

2.4 ビジネスモデルの構築

障害者の高付加価値就労として3Dプリントサービスのビジネスモデルを立案し、マーケットの視点、障害のある人との作業とのマッチングの視点、3Dプリンタの設備・技術の視点から、その実現性を検証した。これらの事業実施において、機械振興協会の技術・ノウハウを活用し技術的課題の解決をはかった。

立案したビジネスモデルを図2.1に示し、以下に説明する。法人、コンシューマ等の顧客は3Dプリントサービス企業に3Dプリントを発注する。通常、3Dプリントサービス企業は顧客から3Dデータを受け取り、所有する3Dプリンタで3Dプリントを行って、納品/請求を行う流れとなる。

3Dプリントは一般的に時間がかかり（数時間～数十時間）、繁忙期等は仕事が溢れ、外注を求めるケース

も多いと言われている。本事業で目指すビジネスモデルは、福祉事業所やそれらを取りまとめるNPO法人が3Dプリント出力を3Dプリントサービス企業から下請けとして請け、障害者が作業を行うモデルである。3Dプリントサービス企業との受発注の窓口や管理は、障害者就労のためのNPO等の団体が行うことを想定している。機械振興協会は、商用3Dプリンタを導入してその団体への貸出しと技術支援、および作業スペースの貸出しを行う。これらの活動が円滑に進められるよう、近隣自治体とも協調していく。

なおビジネスモデル検証のために設定した3つの視点では事業化を進める際にさらに詳細な検討が必要である。具体的には安定的な受注、障害の特性や幅広い個人差にあった作業工程・方法の選択などの配慮、選定・導入される3Dプリンタの造形手法や機種に依存する部分の安全性確保などは昨年度から継続的に設置される専門委員会と3Dプリントサービスの試行実験を通じて検討を行っていく予定である。

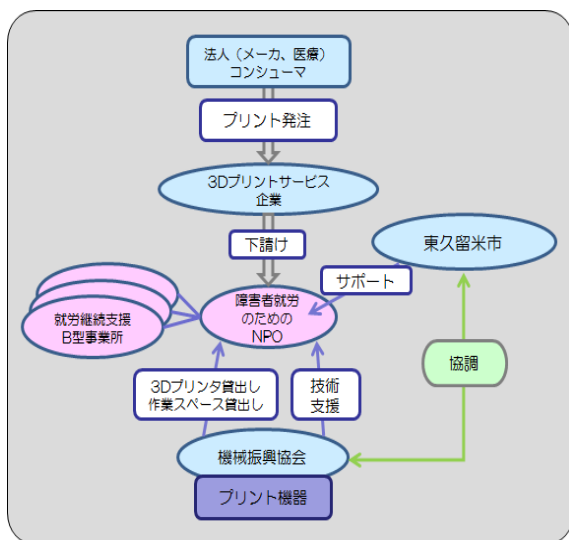


図 2.1 障害者による 3D プリントサービスのビジネスモデル案

2.5 3D プリント出力作業の試行実験

障害者の高付加価値就労として立案した3Dプリントサービスのビジネスモデルが成り立つかを検証する際に不可欠なのは、就労する障害者と作業内容とが円滑かつ持続的にマッチングするかという点である。この点を検証する取り組みとして3Dプリント出力事業が可能な作業環境を商用の3Dプリンタの導入や作業の安全性を十分に考慮して構築し、ビジネスモデルの中から3Dプリントサービスの後処理工程の内容を図 2.2 に示した(1)～(6)までに分割して切り出し、本事業に参画している就労支援団体の協力により、障害者の方々に試行していただいた。

試行実験の実施概要は以下の通りである。

参加人数：障害者5名以内程度、指導員1名以上

団体毎の試行回数：4回（週1回ペースを基本）

試行スケジュール：11月1団体、12月1団体

1月3団体

試行で用いる造形物：4種類（(株)JMCから提供）

一日の作業時間：10～16時（12～13時は昼休憩）

施行後の評価：アンケートによる意見集約と(株)JMCの協力のもと機械振興協会技術研究所が実施

試行実施日のスケジュールとして一般的なものは次の通りである。朝10時に技術研究所に集合し、はじめに当日作業のレクチャーを行う。作業に取り掛かる準備として保護具等を装着ののち3Dプリンタから造形物を取り外す。サポート外しと一次洗浄を行い、二次洗浄終了時またはUV硬化の前で昼休憩となる。午後は主に磨きとアルコール洗浄の作業が中心であり、最後に総評とアンケートをとって解散となる。造形するモデルは図 2.3 に示す1回目から徐々に難易度が高くなるように用意したモデルについて仕上げ作業に取り組み、障害者就労として妥当であるかを検証するだけでなく、作業者の技能の向上やノウハウの蓄積についても確認を行った。

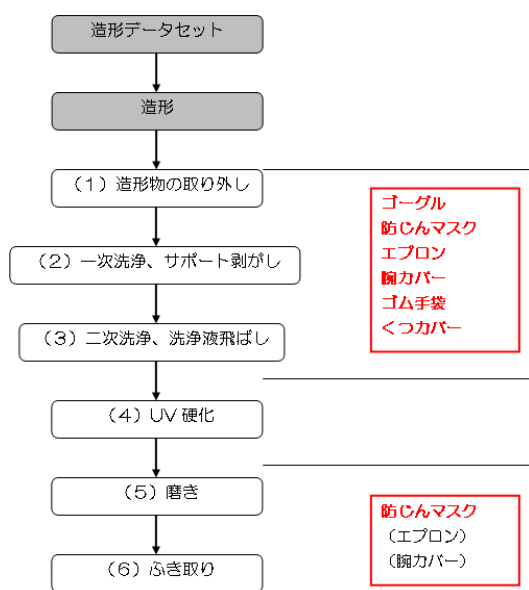


図 2.2 3D プリント作業における試行内容

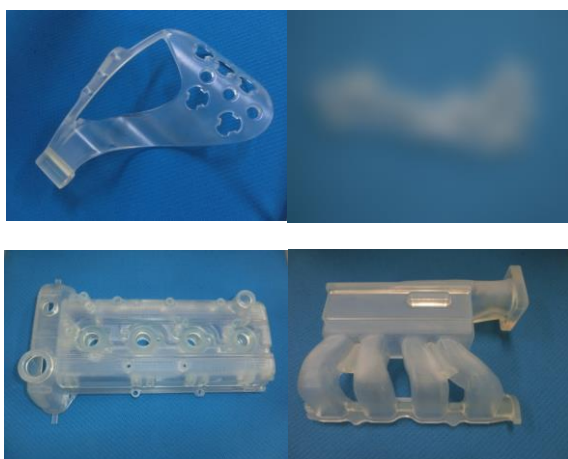


図 2.3 試行で仕上げた造形物 (2 回目は非公開)

高難易度の造形物の仕上げ作業では断念する場合も予想されたが、回を経るごとに習熟が進み、すべての参加者が最後まで取り組むことができた。それだけでなく習熟が進み創意工夫を繰り返すことでやりがいを感じる方が多く、参加した障害者の 95% が今後も関わりたい要望があり、十分な仕事量の確保と得手不得手のある作業に関する分業化を検討する必要があることがわかった。

3. 3D プリント出力製品の高付加価値化

障害者の高付加価値就労として 3D プリントサービスビジネスの実現を支援し、「障害のある人が幸せに暮らせる社会創造」を行うこと本事業の大目的として検討してきた。これまでの取り組みでは障害者の就労事業として 3D プリントサービスの実現に向けたビジネスモデルの構築や障害者の方が実作業に持続的に取り組んでいけるかの検証および環境整備を主なポイントとして進めてきた。本事業をビジネス的側面で評価した時、今後さらなる需要が見込まれる成長産業と評される業種だが、同様の 3D プリント事業者は協力関係にある株式会社 JMC の他にも数多く存在するため、障害者の方が参画する社会貢献的な側面が強い就労事業だから成立するのではビジネスとしての持続性を維持できない。むしろ競合する他の事業者よりも優位性が発揮できるような状態でなくてはならず、そこで機械振興協会技術研究所が長年培ってきた試験計測といった製造業に関する評価技術を駆使することで 3D プリント出力製品に高い付加価値をもたらすことができないかを検討した。

3.1 3D プリント出力製品に望まれる機能

これまで 3D プリント出力製品の主な用途は試作品や形状確認、宝飾やホビー用途としての模型や歯科における利用が中心であり、その他は流体が流れるいわゆる流路の検証、さらにはロストワックス铸造用のモデルなどである。これらの様々な用途の出力製品は一見多岐にわたる印象を受けるが、歯科利用以外のほとんどの用途では製品に強度等の信頼性が求められていない。つまり、これまでの 3D プリント出力製品には信頼性が必要とされていなかったため、実使用部品としての信頼性の評価が不足している。一方で、本事業で導入した 3D プリンタのように高い寸法精度で造形できる 3D プリンタの出現により、特に小ロット部品の製造についてはコスト的に許容できる場合もあり、造形された出力製品を実使用したいというニーズが高まってきている。造形物の寸法精度は積層ピッチごとの誤差の積算で推定可能である

ため、本事業では高付加価値な3Dプリント出力製品に望まれる機能として高信頼性に着目し、材料の機械的特性の評価検証を次節以降で行う。

3.2 機械的特性評価

ものづくりの現場では製造された部品やそれらを用いた製品の構造的な性能を把握するため、使われた材料の強度を納品時の材料証明書(ミルシート)をから引用して用いたり、JIS規格に記載されているような簡単な試験片による材料試験を行ったりしている。3Dプリントに用いられる材料の多くは、材料製造元が諸特性を公表している。しかし記載されている特性値には造形条件や造形方向について言及されていないことから、その結果がどういった由来の特性値であるのかは不確かなケースが多い。特に3Dプリンタで造形する場合は造形条件によっても特性が変わることが予想されるため、一般的な材料性能を示す意味においては敢えて3Dプリンタでの造形を避け、バルク状態で固化させたりして作成された試験片を用いる場合もある。しかし、樹脂材料は硬化が進む過程で内部に残留応力が生じることが知られており、一層ずつ積み上げていく造形方法である3Dプリンタで造形された出力品はその層間に不均一が生じることが避けられない。3Dプリンタで造形された製品の機械的な性能を考えると、この造形方向により生じる不均一に由来する異方性を評価しなくては、製品の信頼性を確保することは難しい。そこで本研究では3Dプリント出力製品の高付加価値化を目的として、製品の機械的特性に着目し、造形方向を変化させて造形した試験片に対して引張試験、圧縮試験、曲げ試験、疲労耐久試験、硬さ試験といった複数の材料試験法により評価を行うこととした。またその結果を有限要素法によるシミュレーション解析によってさらなる検討を行う。

今回の実験に先立って各測定に必要な材料試験片を作成した。試験片の寸法や形状等は各試験の項目で紹介するが、すべての試験片に共通する項目として試験片の種類と造形方向については以下に詳細に説明する。

① 試験片の種類(材質, 造形機, 造形条件, 特徴など)

i. 光造形方式(TSR-883)

材料名: TSR-883

造形機: ATOMm-8000(シーメット社製)

積層ピッチ: 0.15mm

特徴: 紫外線硬化のエポキシ樹脂に紫外線レーザーを照射することで硬化し、それを積層させることで造形する。熱熔融積層法や粉末焼結法に比べて効果時の収縮やそりが少なく、形状精度に優れた造形法である。用いられる材料はエポキシ系が多く、透明なモデルが造形できるため、流路の可視化モデルの作成などにも多用される。装置のコストが高い一方で他の造形法に比べると材料費が安価であることから産業用3Dプリンタとして主流といえる。造形物には自重によるたわみを抑制するサポートが必要であるため、その取り外しや仕上げ作業が必須である。なお本装置は平成27年度JKA補助事業で使用した装置で、試験片制作も技術研究所内で行った。造形の様子を**図3.1**に、装置の仕様を**表3.1**に示す。図内には各試験に対応した試験片が後述する造形方向を変化させて造形されている様子が確認できる。また最小積層ピッチは50 μm と仕様に記載されているが造形が安定しない場合があるため0.15mmピッチを利用しており、強度の低下が予想される。



図3.1 光造形試験片(TSR-883)作成の様子

表 3.1 ATOMm-8000 の仕様

| | |
|----------|--------------------------------------|
| モデル | Rapid Meister ATOMm-8000 |
| 搭載レーザー | 半導体励起固体レーザー 1.2W 80KHz |
| 走査方式 | デジタルスキャナ方式 (TSS4)・ダイナミックフォーカス制御方式 |
| レーザー保証時間 | 1年間 |
| 最大走査速度 | 45m/sec |
| 硬化径 | 0.10~0.60mm (自動可変) |
| 最大造形サイズ | 800×600×400mm |
| Zテーブル | 最小積層ピッチ50μm ※樹脂により異なる |
| リコータ | ヴェントリコータ方式 |
| 液面制御 | バルーン方式 |
| 電源仕様 | AC100V×1回路 20A |
| 装置外形寸法 | W1900×D1190×H2170mm |
| 装置重量 | 約1,200kg (樹脂含まず) |
| ソフトウェア | C-Sirius |
| オペレーション | 日本語版/英語版 |

図 3.2 に今回使用する材料の色や質感を示すため TSR-883 で造形された曲げ試験片の写真を示す。図中の左から 0 度、45 度、90 度の試験片で、微妙に黄色がかった透明であることが確認できる。

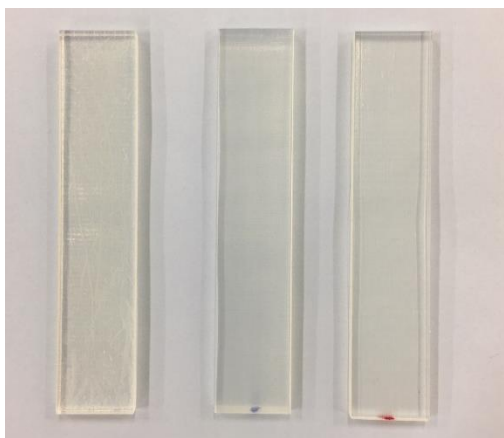


図 3.2 造形された試験片の例 (TSR-883)

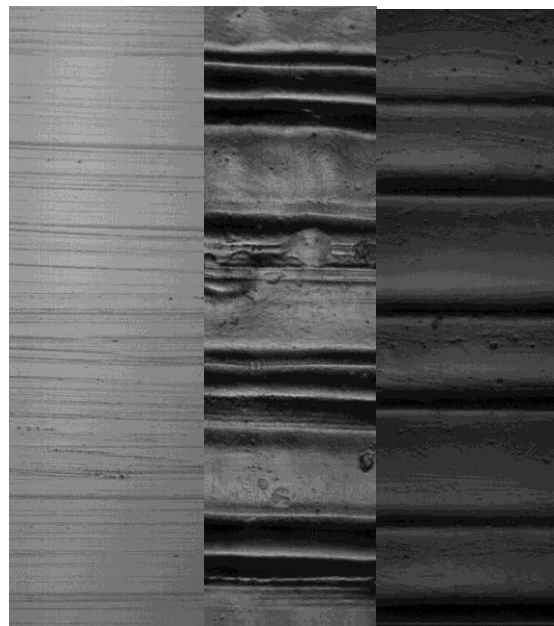


図 3.3 光造形試験片 (TSR-883) 表面の全焦点画像

図 3.3 にナノインデントに組み込んだ 3CCD リアルカラーコンフォーカル顕微鏡 H1200 (レーザーテック社製) で撮影した TS-883 試験片表面を示す。この顕微鏡に採用されている共焦点光学系で観察を行うと合焦点時以外の像情報を受光しない。この特殊な光学系で撮影された画像をレボルバー部に組み込んだ Z 軸移動機構で高さ方向に変化させながら連続的にスキャンさせると、高低差の情報を含む三次元形状データや、焦点のあった画像を貼り合わせて合成させた全焦点画像を撮影することができる。本画像は積層ピッチによる画像の高低差による不鮮明さを除去した全焦点画像である。左から順に 900 μm×300 μm の短冊状にトリミングした画像を 0 度、45 度、90 度と並べている。0 度の画像ではふき取り痕が確認できるほどの表面状態であるが 45 度、90 度では造形により生じた積層による段差が生じている。特に 90 度では 900 μm の中に 0.15mm の積層ピッチが約 6 層確認できる。表 3.2 にはメーカーが公表している光造形用樹脂の特性表を示す。いずれもベースはエポキシ系の樹脂で高強度な材料であることが確認できる。

表3.2 光造形用樹脂の特性表

| 項目/樹脂名 | TSR-883 | TSR-821 |
|-----------------------|------------------|----------|
| ベース樹脂 | エポキシ | エポキシ |
| 粘度 (m Pa.s) 25°C | 520 | 380 |
| 比重 25°C | 1.12 | 1.12 |
| Ec (n J/cm 2) | 18 | 20-25 |
| Dp (nm) | 0.18 | 0.15 |
| 引張強度 (M Pa) | 60 | 49 |
| 伸度 (%) | 5-8 | 13-15 |
| 引張弾性率 (M Pa) | 2,730 | 1,800 |
| 曲強度 (M Pa) | 98 | 70 |
| 曲弾性率 (M Pa) | 2,710 | 2,225 |
| 10mm 衝撃強度 (J/m, ノッチ付) | 37 | 48-49 |
| 高荷重HDT (°C) | 54 | 49-52 |
| 低荷重HDT (°C) | 59 | 55-56 |
| 表面硬度 (Shored) | D84 | D80-82 |
| 外観 | 微黄色透明 | 淡白色 |
| 特徴 | 高剛性・韌性 非アンチモン | 韌性ABSライク |

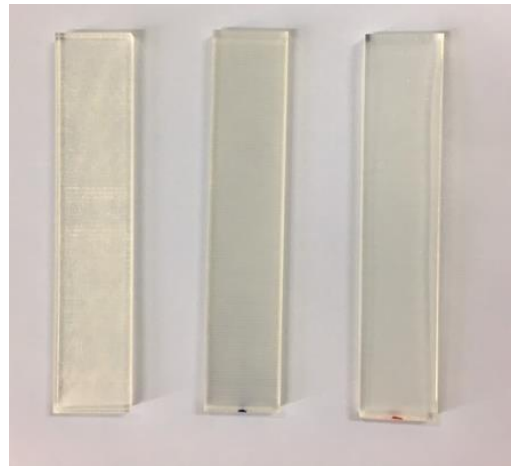


図3.4 造形された試験片の例 (TSR-821)

ii. 光造形方式 (TSR-821)

材料名 : TSR-821

造形機 : RM-3000 (シーメット社製)

積層ピッチ : 0.1mm

特徴: 同じ光造形方式の TSR-883 と近い特徴を有するが、本材料は先ほどの材料より剛性は低いとされるが産業界で最も汎用性が高いとされる ABS 樹脂に近い性能を有する淡い白色の樹脂である。光造形方式でよく使われる材料の一つとして評価対象に選んだ。図3.4に今回使用する材料の色や質感を示すため TSR-821 で造形された曲げ試験片の写真を示す。図中の左から0度、45度、90度の試験片で、先ほどの TSR-883 に比べ透明度が低い材料であることが確認できる。図3.5は TSR-821 試験片表面の全焦点画像である。90度の結果では900μmの中に0.1mmの積層ピッチが約9層確認でき、TSR-883と同様の傾向であるといえる。

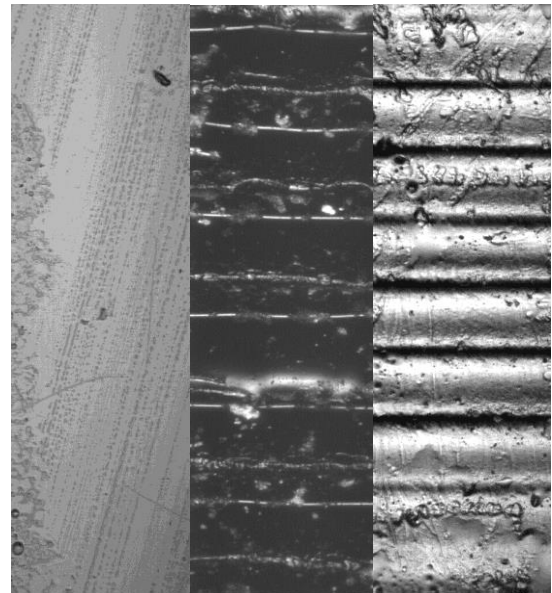


図3.5 光造形試験片 (TSR-821) 表面の全焦点画像

iii. 粉末焼結造形

材料名 : PA650 (ナイロン12ベース, ALM社製)

造形機: SinterStation Hi-Q Base (3D Systems社製)

積層ピッチ : 0.1mm

造形時出力 : 16.4W

特徴 : 平均粒径 55 μm 程度のナイロン12粉末を敷き詰

めた上から赤外線ビームレーザを照射し、粉末同士を焼結させて作った薄い固化層を積み上げることで造形する。ナイロンの高い機械的特性がそのまま反映されるため強度が高く、耐衝撃性、耐熱性、耐候性といった性能に優れる。表3.3にはメーカーが公表している粉末焼結造形用樹脂の特性表を示す。焼結の際に生じる収縮は一層の断面積が大きいほど大きくなるため、造形のサイズや方向によって寸法精度に影響が出る場合がある。粉末の粒状が造形物表面に現れるため、ざらついた仕上がりとなるため、表面の仕上げには研磨やサーフェサーによる目止めを行うことがある。同様のざらつきは造形物内部にも存在するため試験片としては内部にポイドが生じていると状態であるため、試験片ごとのばらつきにも注意する必要がある。また、材料は不透明の白色であるため透過性を必要とする造形には向かない。設備費が高価な造形法ではあるが材料の強度的特性に多くの利点を有する造形法でニーズが高いため試験対象とすることにした。

表3.3 粉末焼結造形用樹脂の特性表

| 項目/樹脂名 | PA650 |
|------------------|--------|
| ベース樹脂 | ナイロン12 |
| 平均粒径 (micron) | 55 |
| 比重 (grams/cc) | 1.02 |
| ASTM D 792 | |
| 融点 (degree C) | 181 |
| ASTM D 3418 | |
| 熱変形温度 (degree C) | 86 |
| ASTM D 648 | |
| 最大引張強度 (MPa) | 48 |
| ASTM D 638 | |
| 最大引張弾性率 (MPa) | 1,700 |
| ASTM D 638 | |
| 曲弾性 (MPa) | 1,500 |
| ASTM D 790 | |

図3.6に今回使用する材料の色や質感を示すため粉末焼結で造形された曲げ試験片の写真を示す。図中の左から0度、45度、90度の試験片で、いずれも不透明で白色であることがわかる。

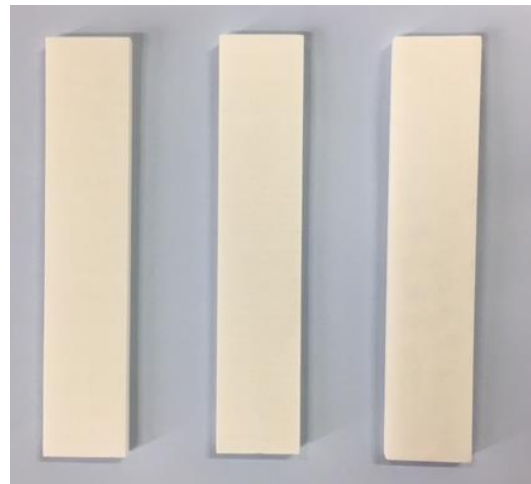


図3.6 造形された試験片の例 (PA650)

図3.7に粉末焼結造形試験片の表面の全焦点画像を示す。これまでと同様に造形方向を変えた画像を左から0度、45度、90度と並べているが、粒径55μm粉末が確認できる他はどの角度においてもほぼ同様であり、この視野においては造形方向の違いは確認できなかった。

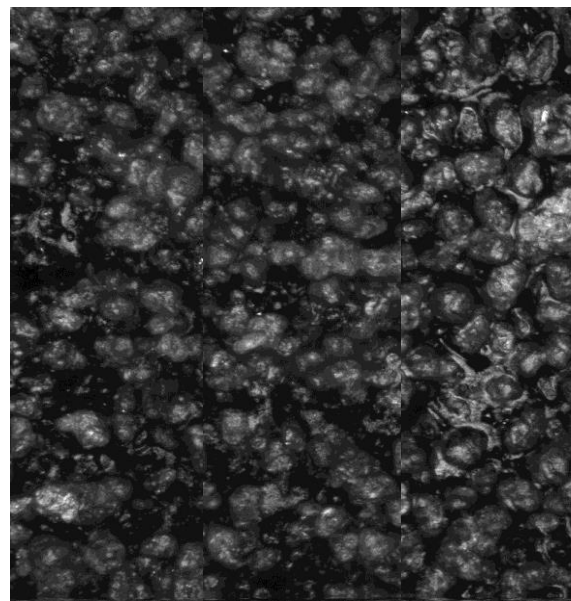


図3.7 粉末焼結造形試験片表面の全焦点画像

iv. 石膏粉末造形

材料名：ZP131（3D Systems 社製）

造形機：Z Printer 310 および Z Printer 650

（3D Systems 社製）

積層ピッチ：0.1mm

特徴：粉末固着造形とも呼ばれ、分類の上ではインクジェット方式に分けられることもある造形法である。プリンタヘッドから樹脂の結合剤を吹き付け、石膏の粉末を固めて造形するため、造形物は石膏粉末と結合剤の複合材料状態となる。したがって、表面は石膏粉末によるざらつきが顕著で造形精度も低くなりやすいだけでなく、強度としても脆い上に不均一となる。図3.8に試験片の例を示す。その一方で色情報を付加することでフルカラー着色が可能な点、造形速度が最も速い造形法である点、サポートが不要で前後の処理が容易である点など多くの利点があり、3D プリントにおいてはよく利用される造形法であることから強度的な不安定さに懸念はあるものの試験の対象とした。表3.4に石膏粉末造形の材料特性を示す。この造形法には機械的特性が望めないため、他の材料のような内容は公開されておらず、強度等の検証を行っている事例もほとんど確認できなかった。図3.9に石膏粉末試験片表面の全焦点画像を示す。粉末焼結試験片の結果と同様に90度において0.1mmの積層ピッチは確認できなかったが45度と90度において同じような粉末の粒度が確認されるのに対し0度においては造形の最後に吹き付けられた結合剤によるものと思われる細かな表面粗さが現れる結果となった。

表3.4 石膏粉末造形の材料特性表

| 項目/材料名 | ZP131 |
|----------------------|---------|
| ベース素材 | 硫酸カルシウム |
| 比重 (gram s/cm 3) | 2.6-2.7 |
| 融点 (degree C) | 1450 |
| 水溶性 (20°C in g/l) | 0.83% |



図3.8 造形された試験片の例 (ZP131)

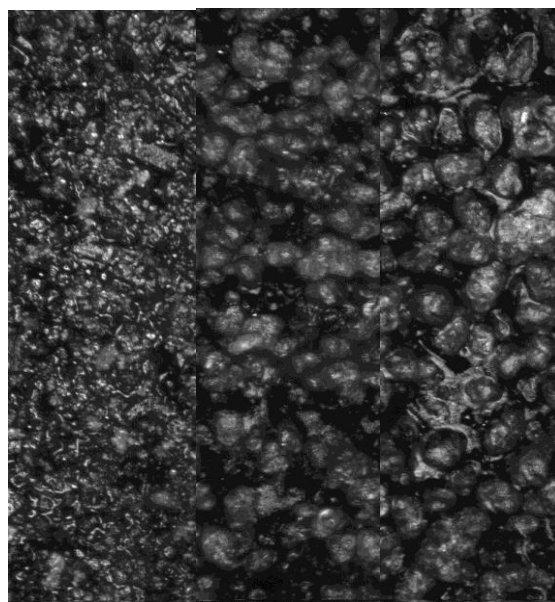


図3.9 石膏粉末造形試験片表面の全焦点画像

② 試験片の造形方向

本研究では3D プリント出力製品の機械的特性について造形方向に依存した異方性が生じることを検証評価するものである。したがって、各種材料試験時に試験荷重がかかる方向を0度とし、45度、90度と造形方向を変化させた試験片をそれぞれについて作成した。例えば圧縮試験片の場合は図3.10の通りとなる。

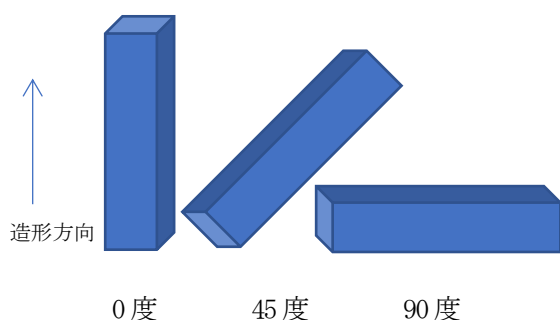


図3.10 試験片の造形方向 (模式図)

3.2.1 引張試験

引張試験から得られる性質は材料の機械的特性を代表するものとして工業界において広く利用されるため、数多くある材料特性評価法の中でも引張試験は最も基本的とされる試験法である。試験片形状に加工された材料に破断するまでの張力を与え、その際の荷重と伸び、さらには応力とひずみを測定することで引張強度や弾性率などの諸特性が把握されている。本測定では引張強度を測定し、材料および造形方向による違いを把握するだけでなく、破断した荷重を疲労耐久試験における負荷荷重に用い目的で測定を実施した。

試験片形状は薄すぎると硬化時に形状を損なうようなそりが生じたり、大きなサイズで造形するとコストがかかりすぎたりしてしまうため、本研究では発泡ポリエチレンなどで使われるJIS K6767におけるダンベル形状を用いることにした。図3.11にその形状を示す。また図3.12に実際に用いた試験片の例としてTSR-821で作成した試験片を示す

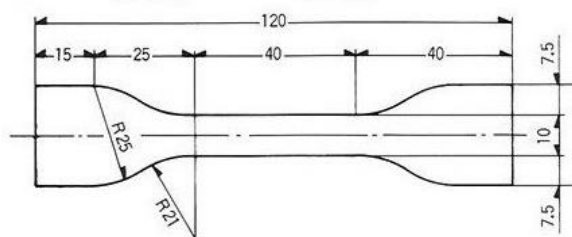


図3.11 引張試験片形状

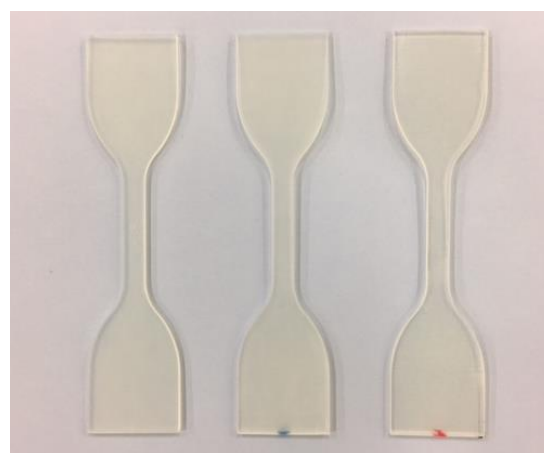


図3.12 造形した引張試験片 (TSR-821)

次に引張試験を行っている様子を図3.13に示す。使用した装置はJT トーシ社製小型卓上試験機リトルセンスター-LSC-1/30 である。試験最大荷重は1000N であり試験速度は1mm/min を用いた。チャック用治具には偏心ローラータイプのロールチャックと手動ネジ締付タイプの平行チャックが用意されており、ロールチャックは着脱が容易であったが、試験片のチャック部に偏った試験力がかかり、試験片に破損が生じるケースがあったため平行チャックを用いた。



図3.13 引張試験の様子

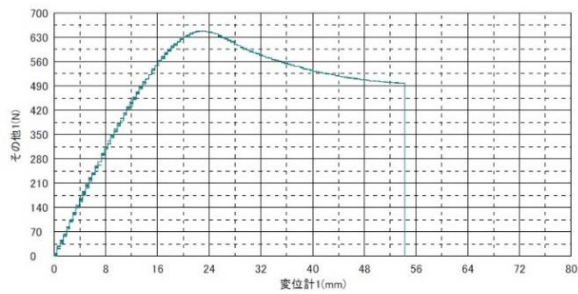


図 3.14 引張試験結果の例 (TSR-821 0度)

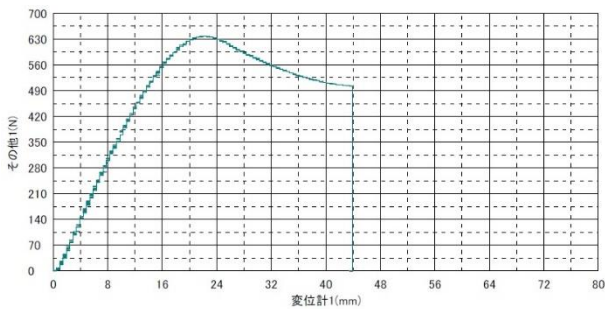


図 3.15 引張試験結果の例 (TSR-821 45度)

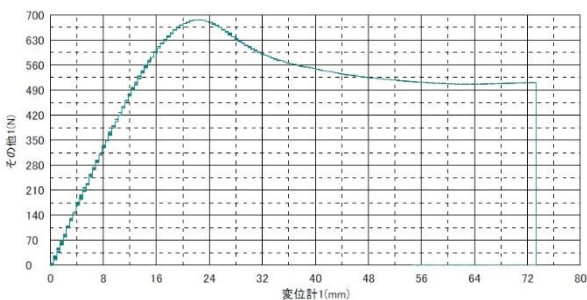


図 3.16 引張試験結果の例 (TSR-821 90度)

図 3.14～図 3.16 に引張試験の荷重変位線図を示す。造形方向による強度の違いは荷重方向に対して垂直な 90 度で最も強く、45 度の試験片が最も弱かった。試験片内に強度的な違いが存在する場合、例えば接着継手のようなケースでは応力集中を避ける目的でスカーフ継手と呼ばれる接合法が用いられるが、このような接合法は大きく強度差が予想される場合に極めて弱い接着面積を広くするためであり、この測定の場合は強度差よりも、造形方向による面粗さ等の法が支配的となったことから効果的とはならなかった。また応力集中を回避する

意味では今回設定した 45 度が適していないことも考えられるため、傾斜による応力集中を避けるためには、角度を変えた詳細な検証が必要であることがわかった。

各試験片の各造形方向についての試験結果をまとめたものを表 3.5 に示す。特徴的な結果としては TSR-883 の結果がメーカー公表値よりも低く、逆に TSR-821 の結果がかなり高かったということが挙げられる。これは造形時の積層ピッチによる影響であると予想される。積層ピッチが変わると造形精度も変わってしまうため、試験片形状に違いが生じる可能性もあり、今回は検証できなかったが造形物に強度が必要な場合は細かな積層ピッチによる造形をする必要がある。光造形の 2 種については全体的な強度の他は似た傾向を示している。粉末焼結については積層面での剥離的な破壊での強度低下よりもレーザー照射による焼結が試験片断面の端部まで行われている 0 度において最も強くなり、90 度が最も弱い結果となった。この傾向は造形方法の異なる石膏粉末造形においても同様であった。ただし、造形法による不均一さから石膏粉末造形の結果には異常値と判定できるような結果もみられた。

一般的には引張試験の結果から引張強度だけでなく引張弾性率を導出するが、試験片作成の都合上小型の試験片を用いたことでひずみゲージの貼り付けが困難な上、試験機のクロスヘッド移動量からのひずみ計測もチャッキング時および試験開始直後に大きく試験片が変形するため今回は引張試験からは引張強度の計測のみを行うこととし、弾性率については曲げ試験や硬度測定において押し込み弾性率を導出することにした。

また今回想定していた検証内容とは異なるが造形物の強度について光造形法特有の現象が確認できた。それは造形後の仕上げ作業終了から試験までの時間により強度が変化現象である。今回採用した粉末焼結造形や石膏粉末造形は後処理が簡単であることが特徴の一つであることは前述したとおりだが、光造形法においてはサポートの取り外しや洗浄の際にアルコールと水の

表 3.5 引張試験結果

| 試料名 | 造形方向 | No. | 最大荷重 [N] | 引張強度 [M Pa] |
|---------|------|-----|-------------|----------------|
| TSR-883 | 0度 | 1 | 5795 | 48.3 |
| | | 2 | 5895 | 49.1 |
| | | 3 | 5845 | 48.7 |
| | 45度 | 1 | 5525 | 46.0 |
| | | 2 | 5425 | 45.2 |
| | | 3 | 5580 | 46.5 |
| | 90度 | 1 | 5840 | 48.7 |
| | | 2 | 5775 | 48.1 |
| | | 3 | 5965 | 49.7 |
| TSR-821 | 0度 | 1 | 6905 | 57.5 |
| | | 2 | 6870 | 57.3 |
| | | 3 | 6835 | 57.0 |
| | 45度 | 1 | 6350 | 52.9 |
| | | 2 | 6370 | 53.1 |
| | | 3 | 6475 | 54.0 |
| | 90度 | 1 | 731.0 | 60.9 |
| | | 2 | 685.5 | 57.1 |
| | | 3 | 705.5 | 58.8 |
| 粉末焼結 | 0度 | 1 | 577.0 | 48.1 |
| | | 2 | 587.5 | 49.0 |
| | | 3 | 626.5 | 52.2 |
| | 45度 | 1 | 517.0 | 43.1 |
| | | 2 | 489.0 | 40.8 |
| | | 3 | 490.0 | 40.8 |
| | 90度 | 1 | 484.0 | 40.3 |
| | | 2 | 456.0 | 38.0 |
| | | 3 | 455.0 | 37.9 |
| 石膏粉末 | 0度 | 1 | 3130 | 26.1 |
| | | 2 | 2870 | 23.9 |
| | | 3 | 2370 | 19.8 |
| | 45度 | 1 | 2620 | 21.8 |
| | | 2 | 2845 | 23.7 |
| | | 3 | 1620 | 13.5 |
| | 90度 | 1 | 2520 | 21.0 |
| | | 2 | 2435 | 20.3 |
| | | 3 | 1920 | 16.0 |

化合物であるエタコールに浸す、また造形した後に UV 硬化機で固化を進める。これらの工程で試験片内に残留したアルコールが揮発しきるまで、さらには UV 硬化機処理の後、さらに硬化が進み、完全に硬化するまでは期待した性能が発揮できない。今回の作成した引張試験片の場合は、仕上げの翌日でおおよそ 80%、翌々日で 90%

程度の結果となった。今回の試験片はサイズが小型であるためアルコールの揮発も硬化も比較的スムーズに進むため、3 日程度で十分な強度を発揮することができたがサイズが大きな造形物については十分時間をあけて使用する必要がある。この点は産業用として多用される光造形法において重要なポイントであり、また発注から納品までの時間が他の生産方法に比べて極端に短い 3D プリント造形製品を実使用可能な部材として利用することを想定した場合は、UV 硬化の他にもさらなるアルコールを揮発させる目的で恒温槽に入れるなどのポストキュア処理を検討する必要がある。

3.2.2 圧縮試験

圧縮試験は角柱、円柱、円筒形の試験片を 2 枚の平行板面にはさみ、徐々に圧縮荷重を加えて破壊する材料の機械的特性を把握する試験法である。圧縮試験は延性に富んだ金属材料などには適さないとされる一方、コンクリートなどの脆性材料の評価には有効とされるため建築業界では多用される試験である。今回は石膏粉末造形による造形物の脆性的な破壊をする材料の評価に適すると想定し試験を行った。試験片形状は底面積が 10mm × 10mm の正方形、高さを 50mm とした。図 3.17 に作成した圧縮試験片の例 (TSR-883) を示す。

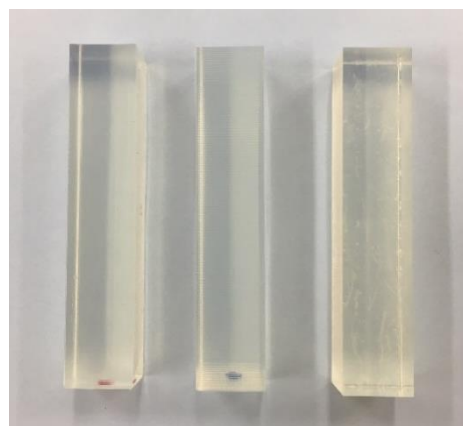


図 3.15 造形した圧縮試験片 (TSR-883)

次に圧縮試験を行っている様子を図 3.18 に示す。使用した装置は島津製作所製万能試験機 UH-500 kNC である。試験最大荷重は 500 kN から 10kN トンまでを 5 段階

に切り替え可能であるが、今回は1000N以内で試験可能であると予測されたため10kNを採用した。試験速度はJIS規格に記載の試験片高さを用いた計算式により1.5mm/minを用いた。



図3.18 圧縮試験の様子

圧縮試験の試験結果をまとめたものを表3.6に示す。当初の実験計画では座屈が生じる前に脆性的な破壊が生じて圧縮強度が導かれるはずだったが、想定よりも材料の強度が高かったため、石膏粉末造形の45度の2例を除いて、ほぼすべての試験において座屈が生じる結果となった。したがって本測定で得られた結果は圧縮強度ではなく大半が座屈強度ということになる。したがって表中の強度は圧縮強度とせず強度と記載することにした。なお、3Dプリンタで造形された製品はデザイン性を重視すればスリムな構造も容易に作成することが可能なため、細長い形状や薄い板状の部材で生じやすい座屈が起りやすくなることが予想されるため、造形データのモデリング時には注意が必要となる。試験結果は想定される圧縮強度より低い結果であることが確認されているが、各材料間、造形方向間の相関は引張試験と同様の傾向が把握できる。石膏粉末試験片については造形された試験片の寸法精度が悪く、上下面が圧縮平行板に均等に当たらずに座屈よりもさらに早期に圧壊が生じていたことも予想され、石膏粉末造形物の信頼性向上は難しい点が多いといえる。

表3.6 圧縮試験結果

| 試料名 | 造形方向 | No. | 最大荷重 [N] | 強度 [MPa] |
|---------|------|-----|----------|----------|
| TSR-883 | 0度 | 1 | 6095 | 61.0 |
| | | 2 | 5520 | 55.2 |
| | | 3 | 5620 | 56.2 |
| | 45度 | 1 | 4620 | 46.2 |
| | | 2 | 5120 | 51.2 |
| | | 3 | 4610 | 46.1 |
| | 90度 | 1 | 5350 | 53.5 |
| | | 2 | 5010 | 50.1 |
| | | 3 | 4910 | 49.1 |
| TSR-821 | 0度 | 1 | 8125 | 81.3 |
| | | 2 | 7970 | 79.7 |
| | | 3 | 7910 | 79.1 |
| | 45度 | 1 | 7780 | 77.8 |
| | | 2 | 7650 | 76.5 |
| | | 3 | 7285 | 72.9 |
| | 90度 | 1 | 7960 | 79.6 |
| | | 2 | 7905 | 79.1 |
| | | 3 | 8020 | 80.2 |
| 粉末焼結 | 0度 | 1 | 5870 | 58.7 |
| | | 2 | 5690 | 56.9 |
| | | 3 | 5830 | 58.3 |
| | 45度 | 1 | 5680 | 56.8 |
| | | 2 | 5620 | 56.2 |
| | | 3 | 5765 | 57.7 |
| | 90度 | 1 | 5755 | 57.6 |
| | | 2 | 5620 | 56.2 |
| | | 3 | 5885 | 58.9 |
| 石膏粉末 | 0度 | 1 | 735 | 7.4 |
| | | 2 | 948 | 9.5 |
| | | 3 | 590 | 5.9 |
| | 45度 | 1 | 378 | 3.8 |
| | | 2 | 2845 | 28.5 |
| | | 3 | 1625 | 16.3 |
| | 90度 | 1 | 450 | 4.5 |
| | | 2 | 365 | 3.7 |
| | | 3 | 484 | 4.8 |

3.2.3 曲げ試験

曲げ試験は他の試験と同様、材料試験の一種で、材料の曲げに対する強さや変形の様子を調べる方法である。丸棒または角棒上の試験片の両端を支え、中央に荷重を加える3点曲げと、左右両支点から等距離の位置に同じ大きさの2つの荷重を加える4点曲げによる方法とがある。本研究では試験方法が簡便な3点曲げにより測定を行った。試験片は100×20×4mmとした。図3.19に造形した試験片の例（粉末焼結造形）を、図3.20に曲げ試験を行っている様子を示す。

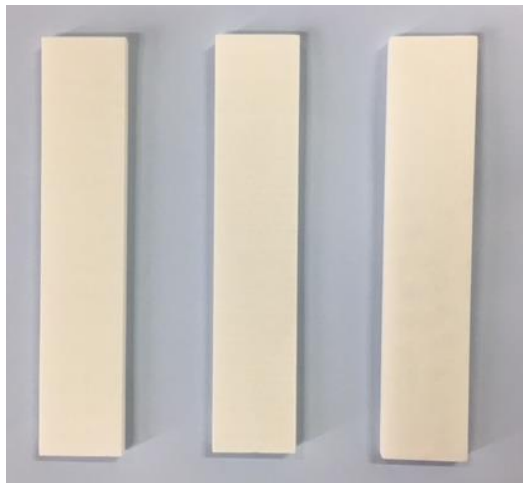


図3.19 造形した曲げ試験片 (PA650)

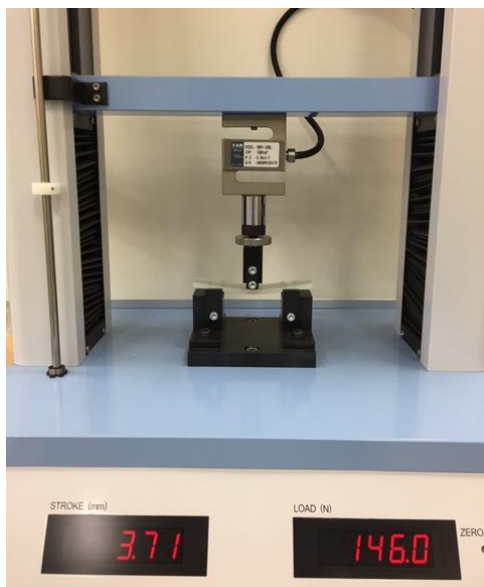


図3.20 曲げ試験の様子

試験機は引張試験と同様でトルセンスター LSC-1/30 を用い、試験速度は2mm/minとした。支点間距離は試験片厚さ h の16倍で64mm、圧子の半径および支持台の半径はともに5mmである。図3.21～図3.23に曲げ試験から得られた粉末焼結試験片の結果をグラフで示す。また曲げ強度、曲げ弾性率などについて詳細にまとめた結果を表3.7に示す。曲げ弾性率の導出には規定ひずみ区間の応力歪配から算出する割線法と曲げ荷重-たわみ曲線の直線部の初期歪配用から算出する接線法があるが、本研究ではひずみ測定が困難であったため接線法を用いている。

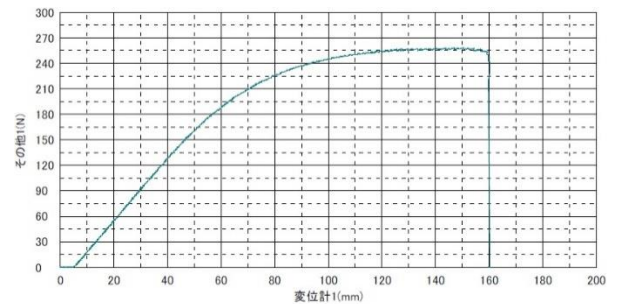


図3.21 曲げ試験結果の例 (PA650 0度)

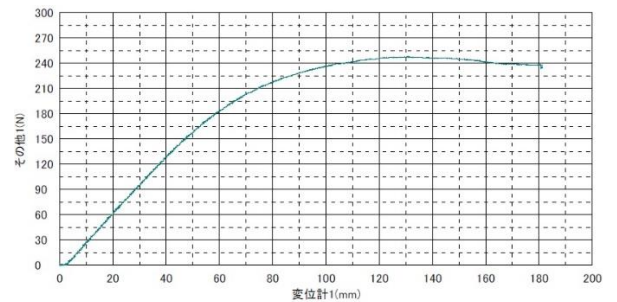


図3.22 曲げ試験結果の例 (PA650 45度)

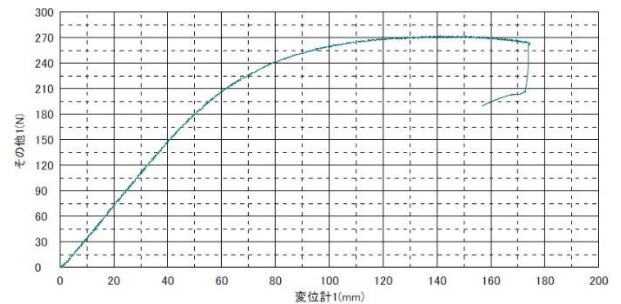


図3.23 曲げ試験結果の例 (PA650 90度)

表 3.7 曲げ試験結果

| 試料名 | 造形方向 | No. | 曲げ荷重 [N] | 曲げ強度 [MPa] | 曲げ弾性率 [MPa] |
|---------|------|-----|-------------|---------------|----------------|
| TSR-883 | 0度 | 1 | 236.5 | 71.0 | 1981.9 |
| | | 2 | 238.0 | 71.4 | 1944.3 |
| | | 3 | 238.5 | 71.6 | 2007.8 |
| | 45度 | 1 | 198.5 | 59.6 | 1910.4 |
| | | 2 | 234.0 | 70.2 | 2115.1 |
| | | 3 | 226.0 | 67.8 | 2104.1 |
| | 90度 | 1 | 224.5 | 67.4 | 2118.6 |
| | | 2 | 253.0 | 75.9 | 2341.1 |
| | | 3 | 257.0 | 77.1 | 2323.4 |
| TSR-821 | 0度 | 1 | 294.0 | 88.2 | 2285.7 |
| | | 2 | 293.0 | 87.9 | 2262.6 |
| | | 3 | 306.5 | 92.0 | 2354.5 |
| | 45度 | 1 | 291.5 | 87.5 | 2247.0 |
| | | 2 | 288.5 | 86.6 | 2327.3 |
| | | 3 | 287.5 | 86.3 | 2242.3 |
| | 90度 | 1 | 292.5 | 87.8 | 2363.1 |
| | | 2 | 283.5 | 85.1 | 2226.1 |
| | | 3 | 285.5 | 85.7 | 2292.5 |
| 粉末焼結 | 0度 | 1 | 258.5 | 77.6 | 1944.3 |
| | | 2 | 256.0 | 76.8 | 1873.2 |
| | | 3 | 247.0 | 74.1 | 1884.7 |
| | 45度 | 1 | 243.5 | 73.1 | 1745.5 |
| | | 2 | 247.5 | 74.3 | 1775.7 |
| | | 3 | 246.0 | 73.8 | 1745.5 |
| | 90度 | 1 | 261.0 | 78.3 | 1884.7 |
| | | 2 | 272.0 | 81.6 | 1932.1 |
| | | 3 | 257.0 | 77.1 | 1861.8 |
| 石膏粉末 | 0度 | 1 | 79.5 | 23.9 | 4859.7 |
| | | 2 | 62.5 | 18.8 | 5120.0 |
| | | 3 | 54.5 | 16.4 | 5244.9 |
| | 45度 | 1 | 17.5 | 5.3 | 5015.5 |
| | | 2 | 51.0 | 15.3 | 2612.2 |
| | | 3 | 58.5 | 17.6 | 3477.7 |
| | 90度 | 1 | 71.5 | 21.5 | 2935.5 |
| | | 2 | 35.0 | 10.5 | 1792.0 |
| | | 3 | 65.0 | 19.5 | 2216.9 |

TSR-821 は曲げ強度においても TSR-883 に比べ、高い結果だったが、曲げ弾性率は文献値の 2225MPa と良い一致を示している。粉末焼結については曲げ強度は記載されていないため検証できないが、こちらも曲げ弾性率の文献値 1500MPa に近い結果が得られており、後述する FEM 解析に利用可能な特性値を得ることができた。

3.2.4 疲労耐久試験

疲労とは繰り返し負荷を与えた場合、静的負荷に比べてはるかに低い応力で破壊が生じることであり、疲労試験は破断に至った静的荷重よりも低い荷重で試験片が破断するまでの間、繰り返し負荷を続け試験片が破断するまでのサイクル数をプロットしていくことで材料の耐久性に関する特性を把握する。本研究では 3.2.1 で実施した引張試験の破断荷重から異常値除去後の平均を 100% として 90%, 80%, 70%, 60% と荷重を変えて繰り返し負荷回数が 10000 回までの低サイクル疲労域について検証した。試験片は各材料各造形方向にそれぞれ引張試験と同様のものを用意した。疲労試験機は自製製作所による特注疲労耐久試験機 FRDH-20-0H であり振動発生機に SW-2015LV、超高速疲労耐久振動コンソールに PD-300FCL L-MasterPro を組み合わせている。本システムは最大試験力を高荷重に対応するため外部電力増幅器接続ユニット APD-3NPA を介して電力増幅器 APD5000 に接続されている。これにより装置の最大試験力は 3000N であり、疲労耐久試験では押し力と引き力で分けられることから ±1500N の試験に対応可能となった。

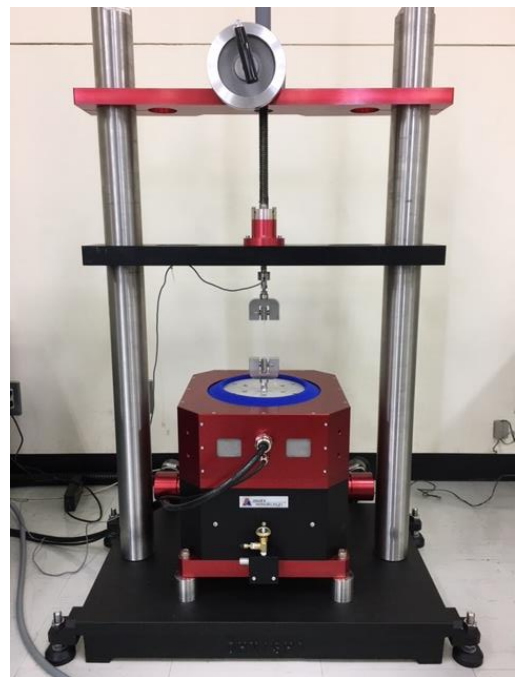


図 3.24 疲労耐久試験機 (試験実施部)

図 3.24 に装置の振動発生機を含んだ試験実施部を、図 3.25 に超高速疲労耐久振動コンソール（上）及び外部電力増幅ユニット（下）の試験制御部を示す。試験実施に関わる操作はコンソール前面のスイッチジョグダイヤルですべて可能であるが、PC 連携ソフトウェア APD300FCG-CS をインストールした PC から操作することも操作できる。本ソフトウェアを駆使することで予めプログラムした試験を連続実施できる疲労耐久試験モードだけでなく、共振点を探せる共振点検出モード、本体の操作パネルを PC 上で再現する振動試験モードの 3 つのモードが選択可能となる。図 3.26 に試験を実施している最中の試験片近傍を示す。



図 3.25 疲労耐久試験機（試験制御部）

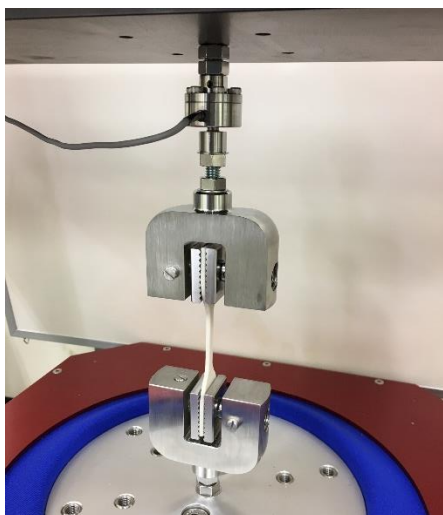


図 3.26 疲労耐久試験の様子

疲労耐久試験で用いた試験力を表 3.8～表 3.11 にまとめる。表中 100%の試験荷重は先に説明した通り異常値を除去した引張試験の破断荷重の平均値である。引張試験では TSR-883 と TSR-821 の結果がメカによる材料特性シートに記載された結果と異なり強弱が逆転していたが疲労耐久試験の結果を検証することで、引張試験での結果の妥当性もある程度検証できる。次に各条件の結果を縦軸に破断荷重のパーセント表示、横軸に繰り返し負荷回数をまとめたグラフを図 3.27～図 3.30 に示す。TSR-821 の結果を除き、60%までに 10000 サイクル以上の高サイクル疲労に達した結果となっている。

表 3.8 疲労耐久試験の試験力 (TSR-883)

| TSR-883 | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% |
|---------|------|-----|-----|-----|-----|
| 0度 | 586 | 527 | 469 | 410 | 352 |
| 45度 | 551 | 496 | 441 | 386 | 331 |
| 90度 | 583 | 525 | 466 | 408 | 350 |

表 3.9 疲労耐久試験の試験力 (TSR-821)

| TSR-821 | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% |
|---------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0度 | 687 | 618 | 550 | 481 | 412 | 344 |
| 45度 | 640 | 576 | 512 | 448 | 384 | 320 |
| 90度 | 707 | 637 | 566 | 495 | 424 | 354 |

表 3.10 疲労耐久試験の試験力 (PA650)

| 粉末焼結 | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 0度 | 597 | 537 | 478 | 418 | 358 |
| 45度 | 499 | 449 | 399 | 349 | 299 |
| 90度 | 465 | 419 | 372 | 326 | 279 |

表 3.11 疲労耐久試験の試験力 (ZP131)

| 石膏粉末 | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 0度 | 300 | 270 | 240 | 210 | 180 |
| 45度 | 273 | 246 | 219 | 191 | 164 |
| 90度 | 248 | 223 | 198 | 173 | 149 |

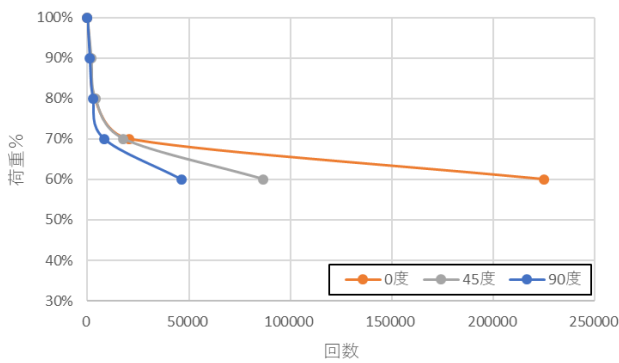


図 3.27 疲労耐久試験結果 (TSR-883)

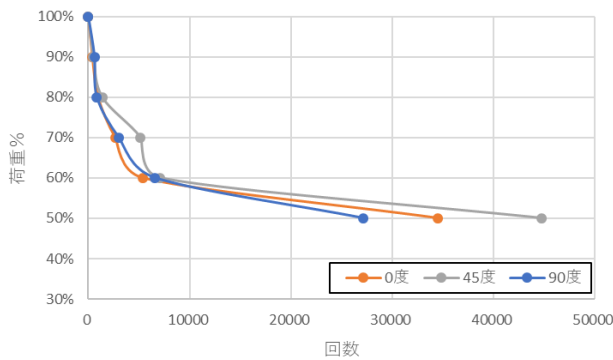


図 3.28 疲労耐久試験結果 (TSR-821)

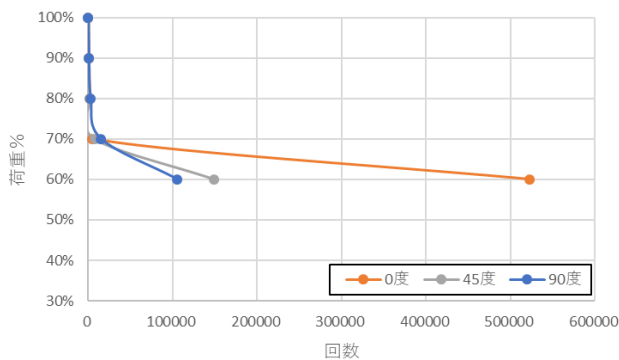


図 3.29 疲労耐久試験結果 (PA650)

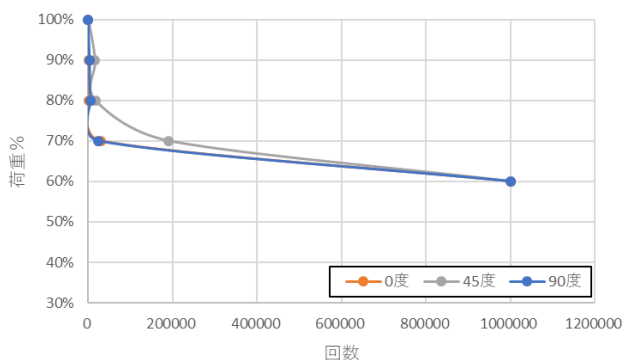


図 3.30 疲労耐久試験結果 (ZP131)

どの条件でも 70%~60%において高サイクル疲労に移行するという点で大きな違いは確認できないが TSR-883 と粉末焼結では造形方向 0 度の場合、同じパーセントでも試験荷重が他の造形方向に比べて高いにもかかわらず最大のサイクル数を記録しており、荷重方向と造形方向を垂直にした時に最も疲労破壊しにくい結果となった。また、引張強度では物性シートのデータ以上のデータを示していた TSR-821 は他の試験片よりも低サイクルで破断しており、同じ光造形材料の TSR-883 に比べても繰り返し負荷に弱い挙動を示している。荷重%で比較する弊害として実際の荷重での違いがつかみにくいため、この傾向が確かであることを検証する目的で光造形法の 2 種に限定し縦軸を荷重に変えたグラフを図 3.31 のように作成した。荷重によるサイクル数を比較した結果、同じ荷重であればどの造形方向の結果と比べても TSR-821 は TSR-883 を上回るサイクル数を示すことはなく、疲労負荷時の TSR-883 の TSR-821 に対する優位性が確認された。

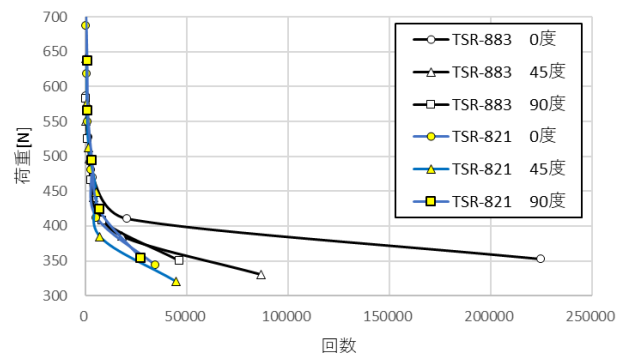


図 3.31 光造形試験片の荷重によるサイクル数

石膏粉末造形の結果を確認すると低サイクル破壊時のサイクル数は著しく低いが 70%以下に荷重パーセントを下げると極端にサイクル数が増加する。この挙動は低サイクル時では石膏粉末による不均一さや応力集中で破壊が生じ、低い荷重パーセントでは樹脂由来の粘弾性特性が発揮され、サイクル数を大きく増加させていると予想できる。造形物が複合材料で構成される場合の挙動解明には他の材料以上に注意が必要である。

3.2.5 硬さ試験

硬さ試験は材料試験として代表的な引張・圧縮・曲げ試験などの試験法と異なり、試料表面にわずかな平面があれば試験片形状によることなく、測定が可能であることが特徴である。また、その測定時間も数秒から数十秒と短時間であることから、簡便かつ迅速な材料特性評価法といえる。近年、エンジニアリングプラスチックに代表される樹脂材料や樹脂を含む複合材料など粘弾性特性を示す材料が多用されるにつれ、従来の材料試験、硬さ試験では測定が困難となるような事例が増える一方でそれらの硬さやヤング率などの機械的特性を明らかにする必要性が高まってきている。本事業では様々にある硬さ試験の中から、透明な材料へ測定が可能、弾性率の導出が可能などの理由から計装化押し込み試験を採用することとした。計装化押し込み試験法はナノ領域においてはナノインデンテーションと呼ばれる ISO14577 に 2002 年に規格化された試験法で、試験中の荷重と変位を連続的に計測することで材料の機械的特性を把握するものである。試験片は造形方向を変化させた直径 25mm 厚さ 10mm の円盤状であり、上下端は平行になるように作成した。図 3.32 に作成した試験片の例として光造形による TSR-883 の試験片を示す。

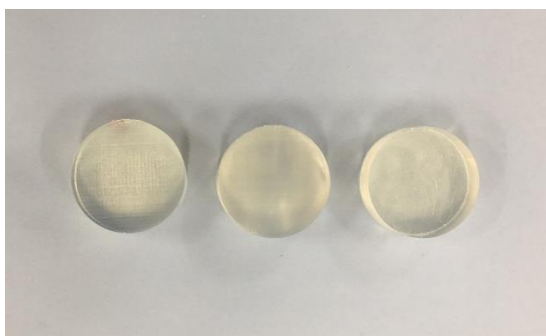


図 3.32 造形した硬さ試験片 (TSR-883)

当研究所ではこれまでも計装化押し込み試験の精度向上や応用範囲の拡大について検討を進めてきており、本測定ではその際に試作をおこなった三次元形状観察ナノインデンテーションテスターを使用した。図 3.33 に試験をしている様子を示す。本装置では右側の顕微鏡

部で表面および圧痕観察を行い、左側のインデントアームで押し込み試験を行う。本試験機の特徴として、ダイヤモンド圧子は試験片を固定するための筒状のカラー内部を移動し、音や空気の振動による外乱の影響を受けにくい構造となっている。表 3.12～表 3.13 に試験結果を図 3.34～図 3.35 に得られた荷重変位線図を示す。なお、粉末焼結および石膏粉末造形に関して試験自体は可能であるものの表面粗さの影響で結果が安定せず、妥当な結果が得られなかったため硬さ試験については光造形法の 2 種についての検証とする。

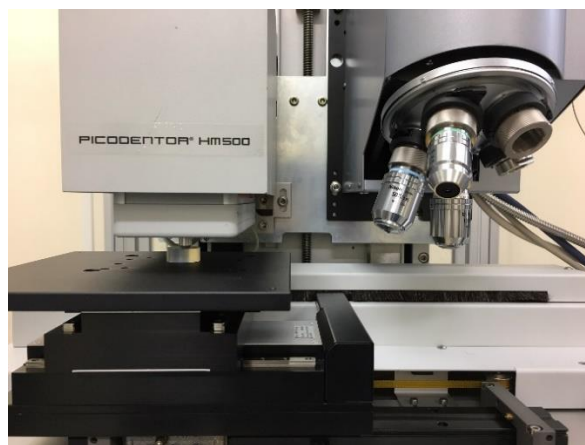


図 3.33 硬さ試験の様子

表 3.12 硬さ試験の結果 (TSR-883)

| | HM [N/mm ²] | HV | EIT/(1-νs ²) [MPa] |
|-----|----------------------------|------|-----------------------------------|
| 0度 | 94.0 | 14.1 | 1951.5 |
| 45度 | 87.3 | 10.9 | 2498.7 |
| 90度 | 67.9 | 10.4 | 1365.5 |

表 3.13 硬さ試験の結果 (TSR-821)

| | HM [N/mm ²] | HV | EIT/(1-νs ²) [MPa] |
|-----|----------------------------|------|-----------------------------------|
| 0度 | 107.2 | 15.6 | 2203.7 |
| 45度 | 83.1 | 11.0 | 2135.8 |
| 90度 | 73.3 | 10.3 | 1628.9 |

HM は押し込み深さから導出されたマルテンズ硬さ, HV は除荷終了時の押し込み深さから圧痕の幾何学的形状を見積もることにより得たピッカース硬さ, EIT は除荷曲線の接線から導出した弾性率である. いずれの結果においても造形方向は0度が高く順に45度, 90度の結果となっている. 弾性率の結果は0度の際に最表面が造形機により固められた層であることもあり, 0度の結果と曲げ試験から導出された曲げ弾性率に良い一致が確認された.

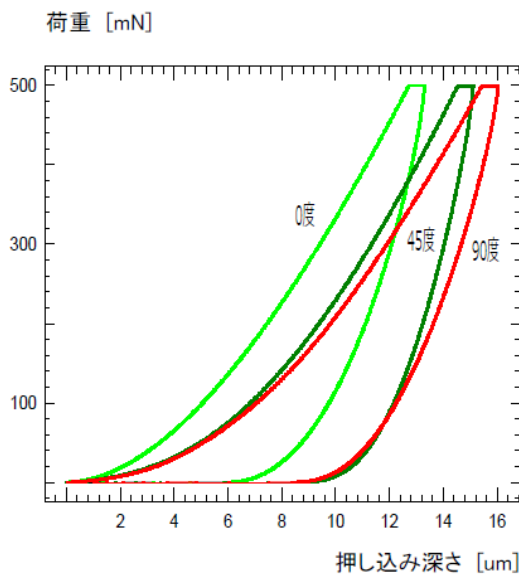


図 3.34 硬さ試験の結果 (TSR-883)

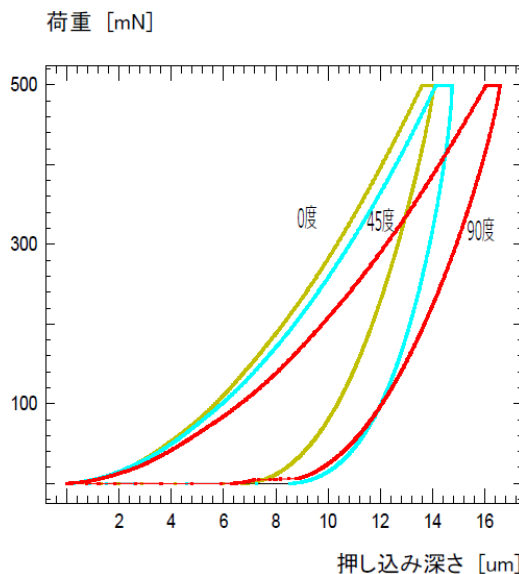


図 3.35 硬さ試験の結果 (TSR-821)

3.3 シミュレーションによる造形物評価

3D プリンタによる出力製品の形状は従来のものづくりでは製造できなかったような形状も含めてこれまでに以上に様々であり, 本研究で検証してきたシンプルな試験片形状による造形方向や造形条件の試験結果から実際の製品の性能を予測することは大変困難である. そこで材料試験から得られた機械的特性を用いて 3D プリンタ出力製品の性能を推定するツールとして有限要素解析によるシミュレーション解析により検討を行った. 有限要素解析ソフトに ANSYS 社製 ANSYS Mechanical CFD を使用し, 今回実施した様々な材料試験から得られた特性値による解析および最適化を試みた. 最初に等方性材料と仮定した場合の引張試験について検証した. 有限要素解析では解析する形状を作成する必要がある. ANSYS の場合はソフトウェア内に SpaceClaim という形状作成ソフトがあり, 二次元で作成した後, 押し出して三次元形状に作成する. その様子を図 3.36 に示す.

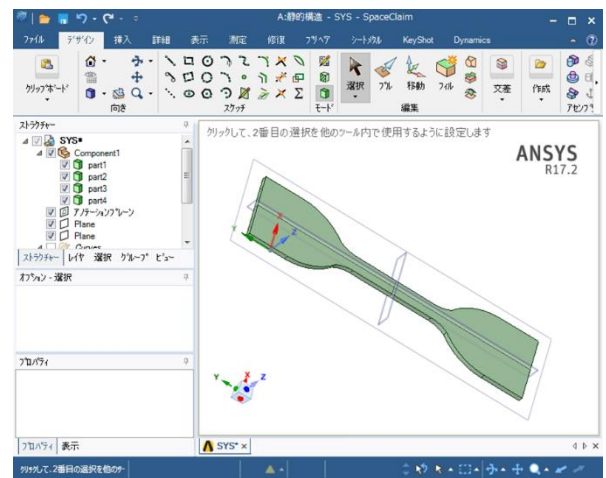


図 3.36 SpaceClaim による形状作成

形状が複雑な場合は隣り合った物体がつながっているのか接触しているのかを定義し, 材料情報を定義する. 造形方向による性能差が大きい時にはこの材料情報で異方性を設定する必要があるが, その際に入力が必要な情報はかなり多いため, 精度の高い解析には多くの実験による材料情報が不可欠である. 材料情報を入力後にモデルを分割して解析するのに必要なメッシュの生成を

行う。詳細な解析が必要とされる箇所のメッシュは細かく設定をする必要があり、引張試験片についてメッシュを細かく設定すると**図3.37**のように、粗く設定すると**図3.38**のようになる。

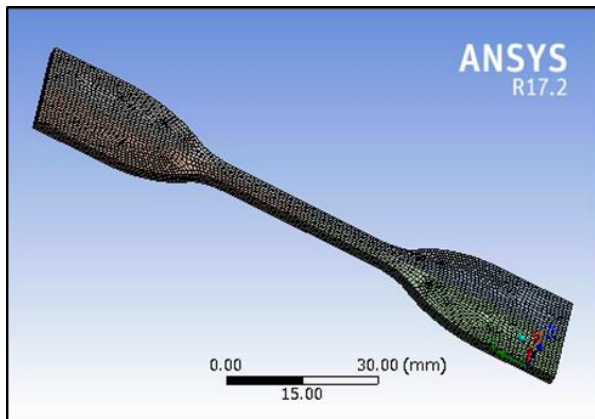


図3.37 細かいメッシュ生成の例

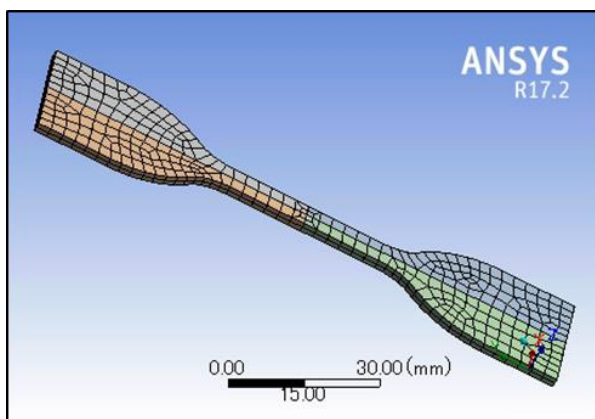


図3.38 粗いメッシュ生成の例

それぞれのモデルを比較すると、デフォルトではそれぞれ六面体形状に分割されており、各モデルにおける六面体の数（要素：エレメント）は**図3.37**で11076、**図3.38**で586であり、その六面体の頂点（節点：ノード）は**図3.37**で55154、**図3.38**で3708と15倍近くの差が生じている。今回の検証では構造がシンプルであるため解析に膨大な時間はかかるわけではないがメッシュの生成で最適化をすることにより解析時間が大きく変化する場合もあるので、検証が必要である。今回の二種類のメッシュの違いは解析すると表のとおりとなる。節点

数の大きく異なる二つのモデルではあるが線形解析には大きな影響は見られなかったが、非線形解析の場合におよそ3倍の計算時間がかかっている。少ない節点数でもほぼ同様の解析結果を得られていることから、メッシュ生成時の最適化は複雑な形状の解析をする際には必須であることが確認された。ANSYSでは様々な解析が可能であるが引張試験片の解析例を示す。**図3.39**はミーゼス応力、**図3.40**は相当塑性ひずみである。ダンベル形状の平板試験片ではくびれ部に応力が集中し、試験片中心近傍が破断をするのが一般的であるため、当然の結果ではあるが材料試験の結果を有限要素解析で予測可能であることが確認できる。

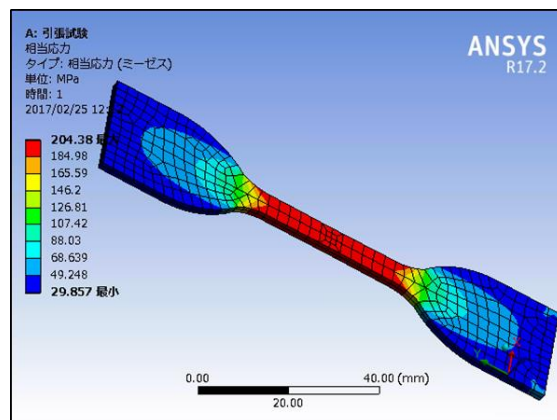


図3.39 引張試験の解析例（ミーゼス相当応力）

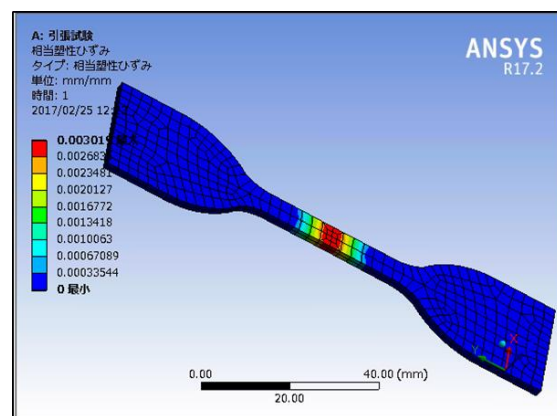


図3.40 引張試験の解析例（相当塑性ひずみ）

表 3.14 メッシュ数の違いによる比較

| 節点数 | メッシュ数 | | | |
|---------------|----------|------|-----------|------|
| | 3675 : 疎 | | 22567 : 密 | |
| 解析タイプ | 線形 | 非線形 | 線形 | 非線形 |
| 拘束点反力(kN) | 3.56 | 2.36 | 3.56 | 2.36 |
| 全体ミーゼス応力(MPa) | 315 | 204 | 330 | 204 |
| 中央最大主応力(MPa) | 307 | 205 | 307 | 205 |
| 計算時間(s) | 25 | 45 | 26 | 142 |

次に造形方向による異方性を考慮した解析を圧縮試験片の場合について検証した。通常の有限要素解析では弾性率、ポアソン比、せん断弾性係数を用いるがポアソン比やせん断弾性係数は導出が困難なパラメータである。そこでポアソン比は一般的な値として0.3、せん断弾性係数は等方性材料であると仮定した値を用い、弾性率については曲げ試験から得られた曲げ弾性率を使用して解析した。この時の最大主応力の解析結果を図 3.41 から図 3.43 に示す。

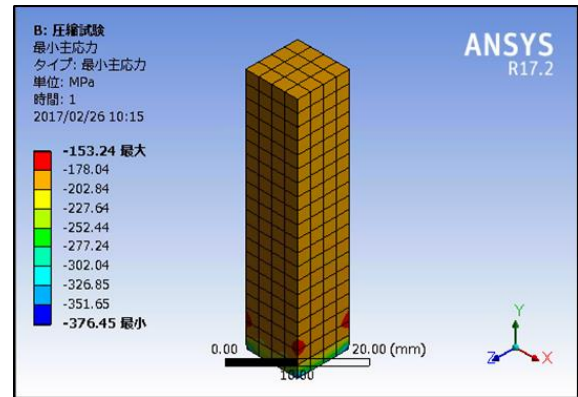


図 3.43 圧縮試験片 (90 度) の最小主応力

異方性のある試験片であっても角度が 0 度, 90 度の場合はその影響が確認しにくい。45 度の場合には図示した最小主応力とともに変形が偏って生じていることが確認できる。現状では解析に必要なパラメータに仮定値が多く、決して精度の高い解析とはいえないが、様々な条件による試験結果を積み上げることで造形方向の違いを反映できることがわかった。その他の解析として曲げ試験についても検証したので図 3.44 に全変形量を図 3.45 にミーゼスの相当応力の結果を示す。曲げ試験は二点で支える試料台の上に置かれた板状試験片の中に荷重をかけていく試験で、支点は円筒形上である。したがって荷重をかけていくと試験片は支点部で内側へ向けて滑りながら変形する。したがって曲げ試験の場合は試験片の拘束を試験片下部、つまり支点で設定すると実際の現象とは異なる解析となる。また支点上に試験片を配置するだけの解析をすると拘束条件が不足し、物体が変形せずに移動や回転する剛体移動が発生してしまいエラーとなる。そこで本解析では試験片が剛体移動しない程度の弱いバネで固定する拘束条件を追加することでエラーの生じない結果を得ることができた。実際の造形物の解析の場合でも拘束条件により実際の現象と大きく異なる場合や剛体移動などによるエラーが生じる場合だけでなく、変形により造形物同士が接触する場合など様々なケースに対応できるよう、さまざまな事例の蓄積が必要不可欠であるといえる。

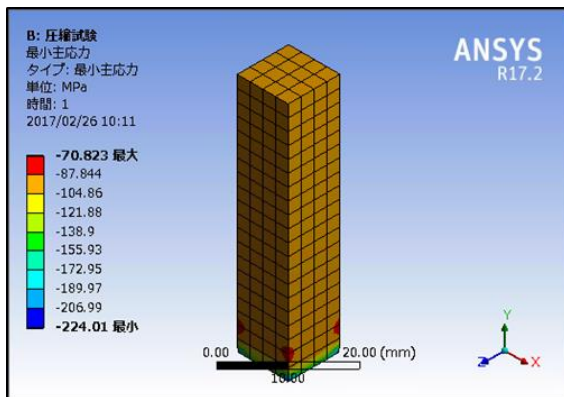


図 3.41 圧縮試験片 (0 度) の最小主応力

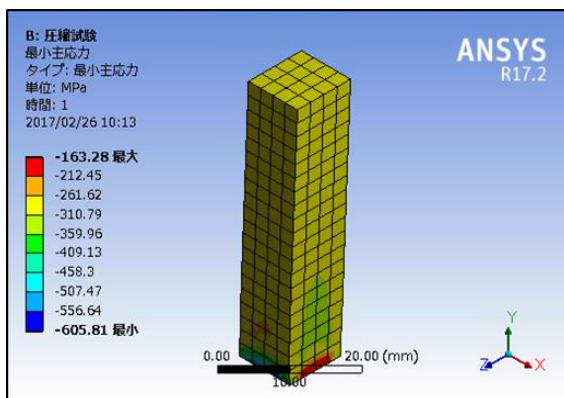


図 3.42 圧縮試験片 (45 度) の最小主応力

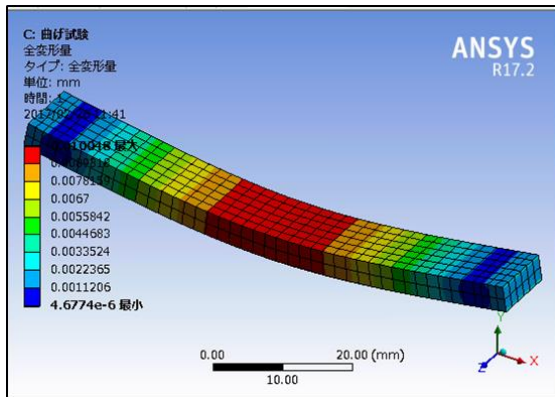


図 3.44 曲げ試験片の全変形量

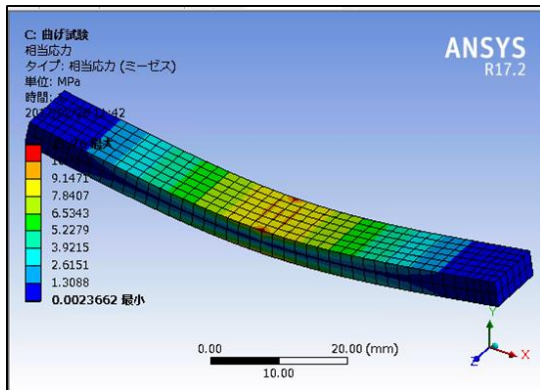


図 3.45 曲げ試験片のミーゼス応力

3.4 まとめと考察

ここでは本章で検討した様々な内容についてまとめ、高付加価値な 3D プリント出力製品の実現について考察する。

3D プリント出力製品の造形方向による強度の違いを把握するため、0 度、45 度、90 度と造形方向を変えた試験片を作成し、機械的特性を把握する試験を行った。その結果、造形法により強度が発揮される方向に違いはあるがおおむね 5~20% 程度の強度差が確認できた。積層ピッチ界面での剥離を原因に強度低下が予想されたが、造形時にレーザーが照射されるなどした箇所は強度が高く、積層ピッチ間の界面で剥離的に破壊することは

あっても、それにより他の条件より強度が低下している様子は確認できなかった。レーザー照射された箇所の強度が高いことはレーザーが照射された面が表面に露出している 0 度の硬さ試験結果が最も高強度であることから確認でき、積層界面以外が表層に出来る 45 度、90 度で低強度の結果が得られた。したがって高強度の 3D プリント出力製品を造形したいときはレーザー照射された高強度の箇所が多くなるように積層ピッチを細かく密にすることで実現可能であるといえる。

光造形法による出力製品は洗浄液であるエタノールの影響や硬化が完全に終了するまで間、強度低下が顕著であり、影響が確認できなくなるまで 3 日間程度の時間を要した。この現象は造形から納品までが短納期であることが多い 3D プリント出力サービスでは製品性能が強度面で期待した通りに発揮できない重要な問題であり、高い信頼性の 3D プリント出力製品を製造したい場合には造形日や仕上げ完了日の明記や時間経過による強度変化情報を添付するなどの対応が必須であるといえる。特に今回は薄板形状での造形物について、問題を把握したが造形物の寸法が変化すると、溶剤の揮発や硬化の進捗が異なることが予測されるため、さらなる検証も併せて必要である。

粉末焼結法や石膏粉末造形法で造形された造形物は光造形法によるものに比べ表面粗さや内部に生じる微細な空隙などの不均一要素が多く存在するため、これらの造形法による製品ではサーフェサーなどの仕上げ工程を採用することで信頼性を向上できる。特に石膏粉末造形は石膏粉末と樹脂の複合材料状態であるため、疲労耐久試験の結果では石膏粉末による影響が低サイクルで、樹脂による影響が高サイクルで顕著である。極端に強度差があるものを混合して複合材料状態にしていると、高強度材料による拘束により低強度材料内に応力集中が起きやすく、その箇所が制御できないため、組み合わせる材料の強度を検討し、調整することで信頼性の向上を実現できる可能性がある。

3D プリント出力製品の強度解析について有限要素法によるシミュレーション解析の可能性を検証した。シンプルな事例については実用的かつ十分な解析が可能であることがわかったが、造形法や使用される材料により解析条件が異なるだけでなく、解析に必要な機械的特性値を様々な手法により把握する必要がある。特にその特性値には測定が困難なものも含まれるため、精度の高いシミュレーション解析を実現するためには今後さらなる実験値の積み上げとその妥当性の検証が不可欠である。

4. 結論

本事業では、障害者の高付加価値就労として事業化を目指して立案した3Dプリントサービスのビジネスモデルが持続的な事業として成立するため、3Dプリント出力製品に高い信頼性を担保し、出力された製品が実使用可能な部品となるなどの高付加価値化をはかることによる競争力の確保と、3Dプリント出力製品の利用範囲を広げることによる障害者就労支援事業の参画者拡大を目的としている。本研究では3Dプリント出力製品の高付加価値化に望まれる機能として製品の機械的特性に着目し、以下のような検証をおこなった。

(1) 3Dプリント出力によく利用される3種の造形法（光造形法、粉末焼結法、石膏粉末造形法）、4種の材料（TSR-883、TSR-821、PA650、ZP131）について造形方向を0度、45度、90度と変化させた試験片を作成した。

(2) 3Dプリント出力製品の機械的特性を把握するため、引張試験、圧縮試験、曲げ試験、疲労耐久試験、硬さ試験をそれぞれの試験片について実施した。その結果から強度の高い製品を造形するための知見や、3Dプリントによる造形物に特有な機械的特性の傾向を把握することができた。

(3) 3Dプリントサービスで出力される様々な形状の造形物の強度評価に対応するため有限要素解析を用いたシミュレーションによる解析が3Dプリント出力製品

に利用可能かを検証した。解析条件や基本となる材料パラメータについてはデータの積み上げが不可欠であるが、それらを充実させることで異方性や不均一さを含む3Dプリント出力製品の強度解析は十分可能である。

したがって、今後ますます利用範囲の拡大が予測される3Dプリンタ出力製品を信頼性が要求される領域でも使用可能にする高付加価値化を実現することで、構築してきたビジネスモデルによる障害者就労支援事業の競争力の向上、優位性の確保だけでなく、3Dプリント出力サービスの利用拡大による仕事量をさらに増大させることができる。これらによって今まで以上にたくさんの方々がより高付加価値な就労にかかわり、生きがい、やりがいを感じながら高工賃を得られるため、3Dプリンタを用いた高付加価値な障害者就労支援事業に参画される方々の生活の質の向上に寄与することが可能となった。

今後は昨年度行なった障害者による3Dプリンタ造形物の仕上げ作業の試行実験において、作業者の多くが困難を感じた内容について作業の見える化、容易化、簡素化を技術的アプローチによって解決し、参加可能な障害者の範囲を拡大していきたい。その結果、多くの障害者が参加できる高付加価値就労の実現することで、障害のある方たちにとって賃金・工賃の向上だけでなく、社会参加ができている・社会の役に立っているというモチベーションの向上につなげることで「障害のある人が幸せに暮らせる社会創造」の実現に寄与していきたい。

謝辞

最後に本事業を実施するにあたりご協力、ご助言いただいた近隣の自治体、福祉団体、障害者のみなさん、学術関係者、民間企業の方々に心より感謝申し上げます。

なお本事業は、公益財団法人JKAの競輪補助金（補助事業番号28-10）を受けて実施しました。ご支援いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。