

応力発光技術を用いた積層造形物の応力分布評価

久富茂樹*、藤尾侑輝†、川名惣一朗††

Stress distribution evaluation of 3D printing objects by mechanoluminescence technique

KUDOMI Shigeki*, FUJIO Yuki† and KAWANA Soichiro††

軽量化に有効な設計手法の一つにトポロジー最適化技術がある。トポロジー最適化で得られる形状は、曲面形状が組み合わされ、従来の設計では思いつかないような形状になる場合も多く、従来の加工方法では製造できないこともある。一方、3D プリンタで造形できる形状の自由度は従来の加工方法に比べて高いが、市場での実績がない形状の部材については、安全性などの評価を求められることも多い。そこで、本研究では、トポロジー最適化により設計し、3D プリンタで作製した造形物について、応力発光技術を用いることで、造形物に力が加わったときの応力分布の可視化について検討した。発光強度の分布は、解析結果の応力分布と同様の傾向を示しており、応力発光技術により、応力分布を視覚的に確認できることがわかった。

1 はじめに

環境配慮への関心の高まり、コスト削減の要求から、製品の軽量化に対する要望が増している。軽量化に有効な設計手法の一つにトポロジー最適化技術がある。トポロジー最適化は、設計したい空間に、どのように材料を配置すれば、最適な構造となるのかを計算する手法である。最適化の目的変数が剛性である場合、限られた量の材料で、最も高い剛性の形状を得ることができるため、製品の軽量化を期待できるが、計算で得られた形状は複雑な場合も多く、従来の加工方法では作製できないこともある。一方、3D プリンタで造形できる形状の自由度は従来の加工方法に比べて高いため、トポロジー最適化形状の作製には、3D プリンタは有効な手段となる。

しかし、市場での実績のない形状の部材については、安全性などの評価を求められることも多く、評価方法については企業の関心も高い。安全性の一つの指標として強度があるが、一般的な強度試験では、力と変位の関係しか得られないため、破壊の起点となりうる大きい応力の発生箇所などを知ることができない。部材における応力分布は計算機シミュレーションで推定する方法もあるが、あくまでも設定した条件を基に算出された計算値であり、その計算値の正確性が問題になる。そのため、計算値を検証するための比較データとしても実試験で得られる応力分布を確認したいという要望が存在する。

このような課題に対して、国立研究開発法人産業技術総合研究所で技術開発を進めている応力発光技術^{2,3)}を

適用することで、実試験での荷重に対する応力分布評価を試みた。応力発光技術は、力学的刺激に対して発光する塗料を試験体に塗装することで、試験体に力が加わったときの発光強度を測定するものである。発光強度は応力に対して比例関係を示すため、発光強度分布を測定することで、試験体の応力分布を知ることができる。

本研究では、トポロジー最適化により設計し、3D プリンタで作製した造形物について、応力発光技術を用いることで、造形物に力が加わったときの応力分布の可視化について検討したので報告する。

2 実験方法

2.1 トポロジー最適化による形状設計

形状構想設計システム CSDS 開発版(株式会社くいと製)を使用し、トポロジー最適化により試験体形状を設計した。上面に垂直荷重が加わる部品を想定して設計した。下側の四隅に設置した直方体(以降“足”と記す)と上面に設置した荷重面(以降“荷重面”と記す)を非設計領域に設定し、その間の空間を設計領域に設定した。設計領域を20%に削減した際に、最も剛性が高くなる形状を求めた。図1に計算で求めた形状(以降“トポロジー最適化形状”と記す)を示す。拘束条件を与えた4か所から脚のように上方に伸び(以降“脚”と記す)、荷重面を支えるような形状になった。また、下部には4本の脚をつなぐように梁のような形状のものができた。

比較のために、筆者が設計した形状を図2に示す。この形状は、以前、当所の3D プリンタ研修を実施した際、トポロジー最適化で設計した時と同様の仕様で、剛性が高い形状を考える課題を出した際、トポロジー最適化は用いず、研修生が考案した形状を参考に、CADで再設計したものである(以降“CAD設計形状”と記す)。非設計領域及び設計した形状の体積はトポロジー最適化で設計した形状と同一にしている。

* 情報技術部

† 国立研究開発法人産業技術総合研究所 センシングシステム研究センター

†† 国立大学法人九州大学大学院 総合理工学府修士2年

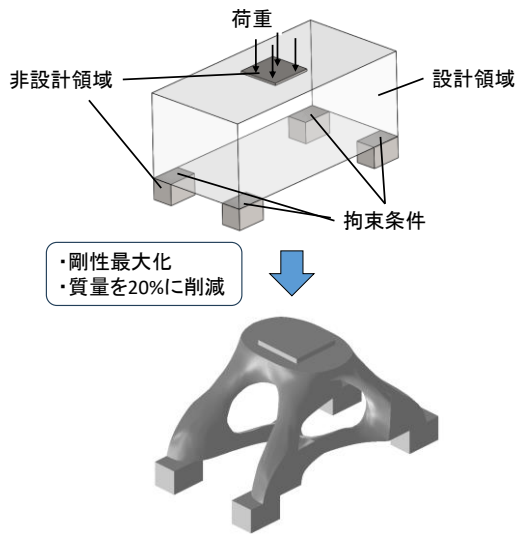


図1 トポロジー最適化による形状設計

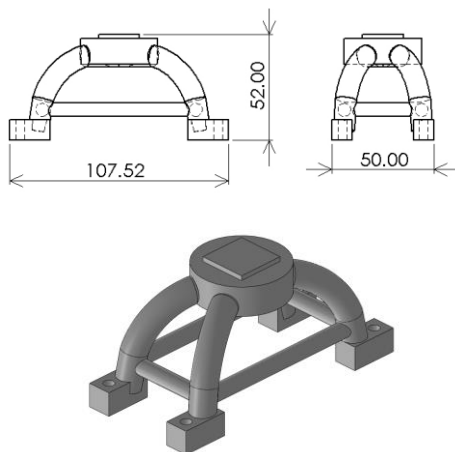


図2 CAD 設計形状

2.2 3D プリンタによる試験体の造形

設計したそれぞれの形状を3Dプリンタ(HP製 Jet Fusion 540)で造形した。当該装置は、造形ステージ上に敷き詰めた粉末の材料(PA12)に、反応剤をインクジェットにより形状断面に合わせて塗布した後、赤外線波長のヒーターを当てることで、熱反応により材料粉末が硬化し造形する方式である。プリントヘッドの解像度は1200dpi、積層厚は0.08mmである。造形した試験体を図3に示す。造形後、ブラスト処理により試験体の周囲についての余分な粉末を除去した。試験体を非接触三次元形状測定機(GOM製 ATOS Compact Scan)で測定した後、形状評価ソフトウェア(GOM製 ATOS Professional)を使用して、測定データと設計データを、ベストフィットにて位置合わせを行い、形状偏差評価を行った結果、概ね $\pm 0.3\text{mm}$ の偏差以内で造形できていることを確認した。



図3 造形した試験体

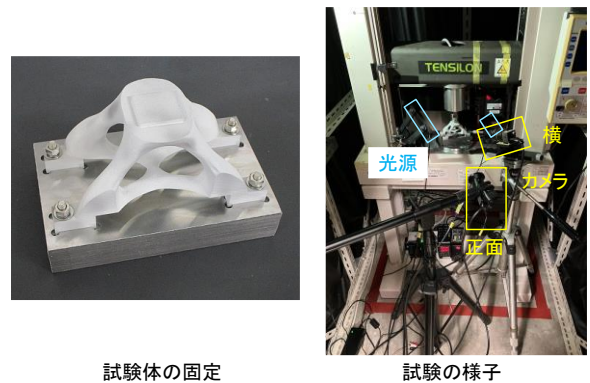


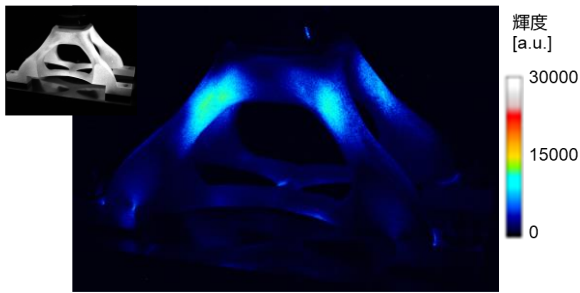
図4 試験体の固定と応力発光試験の様子

2.3 応力発光技術を用いた応力発光試験

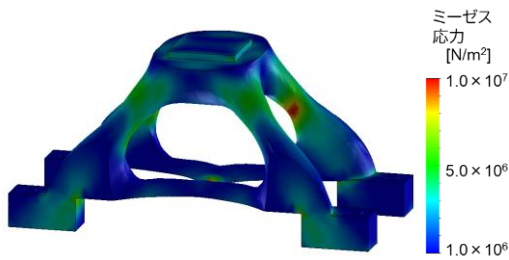
造形物表面に、応力発光材料($\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}$)とエポキシ樹脂により調製した応力発光塗料をスプレー塗装し、 100°C で熱硬化することで応力発光塗膜を形成した。その後、暗室内で圧縮試験機(エー・アンド・ディー製 TENSIRON RTC-1350A)を使用して試験を行った。図4に試験体の固定と試験の様子を示す。解析条件と試験条件を揃えるために、4か所の足を治具で固定して試験を行った。また、発光を安定化するために、1分間ブルーライトを照射した後、3分後に圧縮試験を開始した。試験力が1kNになるまで、5mm/minの速度で試料を圧縮したときの発光をカメラ(iDS製 3280)で撮影した。撮影した画像は、白黒画像であるが、パブリックドメインの画像処理ソフトウェアであるImageJを使用して画像処理を行い、輝度値に応じたカラーマップ表示を行った。

3 結果及び考察

図5にトポロジー最適化設計形状の応力発光試験と構造解析の結果をそれぞれ示す。応力発光試験の結果の左

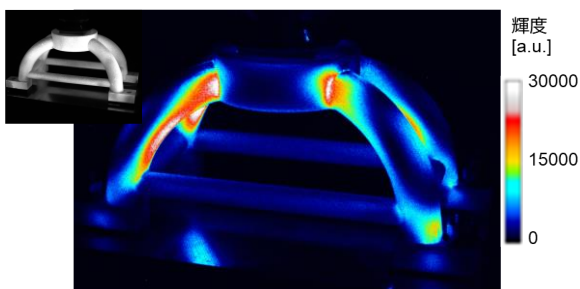


応力発光試験の結果

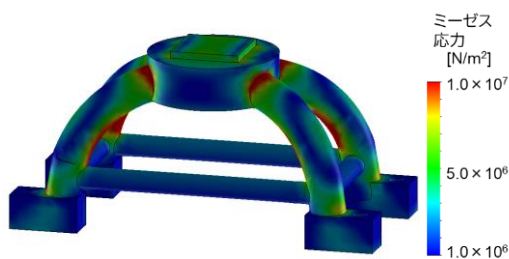


構造解析の結果

図5 トポロジー最適化設計形状の結果



応力発光試験の結果



構造解析の結果

図6 CAD設計形状の結果

上の図は、ブルーライト照射直後の残光を撮影したもので、撮影方向の参考のために掲載した。応力発光試験の結果から、4本の脚のそれぞれの中央部分で発光強度が高くなっており、この部分の応力が大きくなっていることを確認できた。この結果は、構造解析の結果と同様の傾向を示している。図6にCAD設計形状の応力発光試験と構造解析の結果をそれぞれ示す。応力発光試験の結果から、荷重面と脚の接続部から脚にかけて発光強度が高くなった。非設計領域の足との接合部付近も発光強度が高くなった。構造解析の結果も同様の傾向を示している。トポロジー最適化設計形状とCAD設計形状の結果を比較してみると、試験結果と解析結果の両面から、トポロジー最適化設計形状の方が、全体的に応力が小さくなっており、剛性の高い形状になっていることを確認できた。試験力が1kNの時の試験機の変位量は、トポロジー最適化設計形状の場合が0.29mm、CAD設計形状の場合が0.42mmであった。試験体の変位量ではないので、正確性には欠けるが、この結果からもトポロジー最適化設計形状の方が剛性の高い形状になっていることがわかる。

その一方で、4本の脚の発光強度が異なっているなど、試験結果と解析結果が一致していない点もあるため、その原因究明と対策について、今後さらに検討を進めたい。

4 まとめ

トポロジー最適化により設計し、3Dプリンタで作製した造形物について、応力発光技術を用いることで、造形物に力が加わったときの応力分布の可視化について検討した。発光強度の分布は、解析結果の応力分布と同様の傾向を示しており、応力発光技術を用いることで、実試験により応力分布を視覚的に確認し得る。

【謝 辞】

本研究の一部は、国立研究開発法人産業技術総合研究所の令和5年度地域産業活性化人材育成事業にて実施しました。

【参考文献】

- 1) 西脇ら, トポロジー最適化, 丸善出版, 2013
- 2) 徐ら, 応力発光による構造体診断技術, エヌ・ティー・エス出版, 2012
- 3) 藤尾, 力を光に変換: 応力発光を用いた応力分布可視化技術, OPTRONICS, 7, pp150-154, 2022