

研究ノート

高速度撮影と応力可視化による積層造形体の破壊挙動観察

加藤正樹^{*1}

Observation of Fracture Behavior and Stress Visualization of Additive Manufactured Objects by High-speed Photography

Masaki KATO^{*1}Research Support Department^{*1}

積層造形法で作製した試料の応力発生状況及び破壊挙動を観察するため、応力発光塗料及び高速度観察記録装置を用いる手法について検討した。試料に生ずる力学エネルギーを可視化する応力発光塗料と、高時間分解観察技術を組み合わせることにより、積層造形試料の変形に伴う応力や破壊挙動を詳細に観察することができた。

1. はじめに

製品や部材の製造においては、要求される性能・機能の満足と、高い信頼性の両立が必須である。近年、新たなものづくり技術として大きな注目を集めている付加製造技術（積層造形技術）においても、造形体の信頼性を向上するため、使用時の応力の大きさや分布等を把握することが非常に重要である。

応力検出には、ひずみゲージ法¹⁾をはじめ、赤外線²⁾やX線³⁾による測定、音弾性法⁴⁾、画像相関法⁵⁾等、多くの手法があるが、応力分布が観察できない、測定方法が複雑等の課題がある。

近年、産業技術総合研究所・九州センターにおいて開発された機能性塗料である応力発光塗料⁶⁾は、圧縮、引張り等の機械的外力（力学エネルギー）によって材料が発光し、力学エネルギーの小さい弾性変形領域においても発光強度が高いという特徴がある。そのため、応力分布や破壊に伴う応力の経時的変化等を、簡便かつ同時に観察することが可能である。

本研究開発では、応力発光塗料を用いて、3Dプリンタで作製した試料における応力発生状況を観察した。また、引張試験を行いながら、高速度撮影装置を用いて高時間分解能でのその場観察を行い、試料の破壊進展挙動を詳細に観察した。

2. 実験方法

CAD（Dassault Systèmes 社 SOLIDWORKS）を用いて設計した試験片を、粉末床溶融結合型積層造形装置（3D Systems 社 sPro60 HD-HS）を用いて作製した。応力集中の観察には、微小なノード（結節点）からなる

試料を用いた。また、引張試験では、JIS（K7161）に準拠したダンベル試験片（全長160mm、厚さ6mm、平行部長さ80mm、幅10mm）を用いた。

試料の表面に、応力発光塗料（堺化学工業(株)、二液硬化型）を塗布、乾燥させ、試料表面に応力発光塗膜を形成した。塗布はブラシを用い、乾燥温度は80～120℃の間で最適な温度を検討した。

試料に力を加えて変形させ、応力発光の状態を観察した。引張試験での応力発生の際の観察は、万能試験機（エー・アンド・デイ社 テンシロン RTH）及び高速度撮影装置及び画像処理ソフトウェア（フォトロン社 FASTCAM SA-Z、FASTCAM Viewer）を用いた。引張速度は1mm/min、撮影時の分解能は、3,000～20,000fpsとした。

3. 実験結果及び考察

作製した試料のうち、発光状態を観察した試料の微小ノード形状及び塗膜形成後の試料を図1、引張試験片の形状を図2に示す。応力集中観察用の試料は、部位によって発光強度が変化するよう、数珠状に楕円球が繋がった形状とした。引張試験片には、応力集中による破壊位置を特定するため、中央に穴を開けて作製した。

塗膜形成に際して、塗布温度を検討した結果、室温による塗膜のレベリング(1h)を行った後、80℃ 1h → 100℃ 1h → 120℃ 1h のスケジュールで乾燥した場合、均一かつ高い発光強度が得られた。発光は、塗膜内の無機微粉体に力が印加されることによって生ずるため、塗膜の発光強度には、塗膜の平滑性、密着性及び硬度が大きく影響すると考えられる。高い発光強度を得るため

^{*1} 共同研究支援部 試作評価室

には、塗膜に含まれる樹脂の硬化を十分に進行させることが重要と考えられる。発光強度は塗膜の膜厚、即ち無機微粉体の含有量にも依存すると考えられるため、ブラシ塗りのような比較的厚い塗膜が得られる塗布方法も、高い発光強度が得られた原因と考えられる。

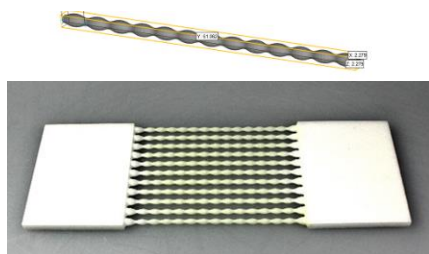


図1 応力集中観察用試料の形状及び塗膜形成後の試料

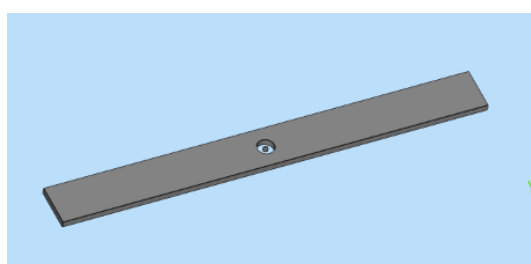


図2 引張試験用試料の形状

樹脂微小ノードの変形に伴う発光の様子を図3に示す。ノードが小さく変形しやすい部分ほど明るく発光し、発光強度に分布が生ずる様子が観察された。塗膜内の無機微粉体に加わる力は、塗膜の変形量に依存するため、塗膜の発光強度は塗膜に生ずる歪エネルギーの大きさにより変化すると考えられる。



図3 微小ノード試料の変形による発光

引張試験下での応力発生その場観察について、破壊進展挙動の高時間分解能撮影の結果を図4に示す。撮影時の補助照明等、観察条件を検討した結果、20,000fpsでの撮影により、鮮明な撮影が可能となった。4点の写真における経過時間は約150msである。

画像から、破壊が抜き穴円周の中心を起点して生じた

ことが明瞭に観察されるとともに、変形に伴い応力分布が変化していく様子を可視化することができた。このとき、破断の際に左右非対称な破壊が起きたことがわかった。これは、粉末焼結法では不可避免的に生ずる試料内部の欠陥（空隙等）⁷⁾のため、局所的に強度の低い箇所が生じたことによると推定された。

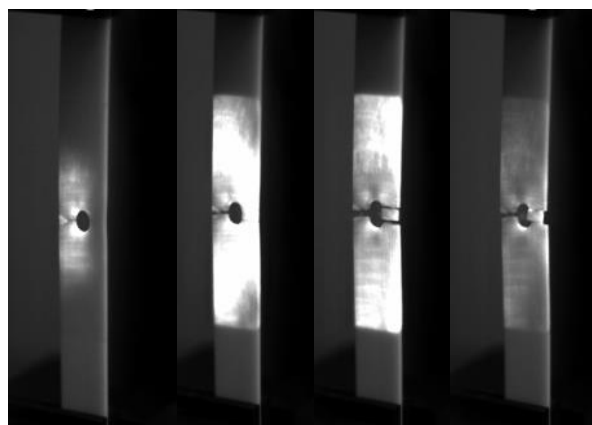


図4 引張試験下での応力発生その場観察

4. 結び

力学エネルギーを可視化する応力発光塗料と、高時間分解能観察技術を組み合わせることにより、積層造形試料の変形に伴う応力や破壊挙動に関する詳細な観察を行うことができた。

今後、構造体のロボスト化等、積層造形による機能性付与に活用していく。現場でも比較的容易に利用可能な可視化技術として、地域企業のさまざまな現場ニーズに合わせた活用を促進していく。

謝辞

本研究の実施にあたり、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 九州センター 製造技術研究部門 トリリオンセンサ研究グループ 寺崎正グループ長のご指導、ご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

文献

- 1) 泉良和: 精密機械, **39**(1), 78(1973)
- 2) 阪上隆英: 溶接学会誌, **72**(6), 511(2003)
- 3) 福岡秀和: 溶接学会誌, **58**(1), 65(1989)
- 4) 三好良夫: 材料, **37**(416), 571(1988)
- 5) 古賀紀光: まてりあ, **55**(6), 267(2016)
- 6) 徐超男: セラミックス, **44**(3), 130(2009)
- 7) G. Flodberg, et.al: *Additive Manufacturing*, **24**, 307(2018)