

粘弾性特性が樹脂積層造形物の熱変形に及ぼす影響

The Effect of Viscoelastic Properties on Thermal Deformation of Resin
Layer-by-Layer Models○学 丸山 遼^{*1}, 正 渡邊 浩志^{*2}正 岡田 裕^{*1}, 浅田 健吾^{*3}, 正 松尾 裕一^{*1}Ryo MARUYAMA^{*1}, Hiroshi WATANABE^{*2},Hiroshi OKADA^{*1}, Kengo ASADA^{*3} and Yuichi Matsuo^{*1}^{*1} 東京理科大学 Tokyo University of Science^{*2} 株式会社テクスパイア Techspire Corporation^{*3} JAXA Japan Aerospace Exploration Agency

In additive manufacturing, thermal deformation occurs in the object during the cooling process. The direction and magnitude of this deformation change depending on the manufacturing environment, such as the material used, the lamination method, and the ambient temperature. In this study, we simulate the manufacturing process using thermal-structural coupled analysis using the finite element method. For this analysis, we adopted a commercial the finite element software “Digimat” to predict this deformation in additive manufacturing. Among the deposition conditions, the choice of material has a significant contribution to deformation, and we investigated the effect of the viscoelastic properties of the resin material.

Key Words : Additive Manufacturing, Fused Deposition Modelling, Molding Defects, ABS resin, Relaxation modulus

1. 結 言

積層造形技術は溶解した金属や樹脂などの材料を付加し三次元形状を成形する加工技術である。1980 年代の名古屋工業研究所の小玉氏による紫外線硬化樹脂を利用した積層技術を起源とする⁽¹⁾。従来の除去加工に比べて複雑な形状表現が可能な点や材料を節約できる点が評価されている。以前は、試作工程で多く用いられていたが、現在では医療分野や航空宇宙分野を中心に部品そのものへの利用が進んでいる。積層造形の方式には様々あり、粉末状の材料に高出力のレーザー光線を照射して焼結させる SLS (Selective Laser Sintering; 選択的レーザー焼結方式)、SLA (Stereo Lithography Apparatus; 光造形方式)、熱可塑性材料を加熱溶解しノズルから吐出し積層させて造形する FDM (Fused Deposition Modelling; 熱溶解方式) などがある。中でも FDM は汎用的な材料である ABS 樹脂が利用でき、廉価機の出現もあり普及が進んでいる。本研究では、この FDM 方式の積層方法を取り扱う⁽²⁾。

FDM 方式では、図 1 のように加熱溶解した液状の樹脂をノズルから押し出してプレート上に積層する。積層された樹脂には冷却される過程で収縮し熱応力が生じる。下層ではすでに冷却が進んでいるため、上層に比べ収縮が小さい。このような熱応力のばらつきにより成型品に反りなどの不要な変形が生じ、寸法誤差の原因となる⁽³⁾。この熱収縮の予測解析において樹脂の粘弾性特性は反りに対して大きな影響を持つ特性であり、緩和弾性率により表される。本研究では緩和弾性率を変化させ、反りの予測解析に及ぼす影響を調べた。

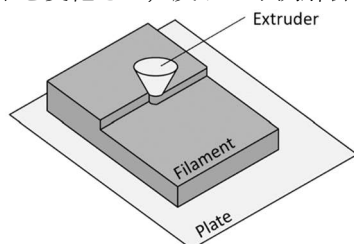


Fig.1 Schematic of FDM.

2. 解析手法

2・1 樹脂の材料特性

樹脂は粘弾性体であり，式(1)のようにひずみ ε が材料に加わる応力 σ に比例する弾性と式(2)のようにひずみ速度が応力に比例する粘性のそれぞれの性質が併存している．これにより一定のひずみを作用させた際に反力として得られる応力が時間の経過とともに減少する応力緩和挙動が見られる．1234

$$\sigma = k \cdot \varepsilon \quad (1)1$$

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

粘弾性体の力学モデルとして図2のようにばね（弾性率 E_n ($n = 1, 2, 3 \dots$)) とダッシュポッド（粘性係数 η_n ($n = 1, 2, 3 \dots$)) の組み合わせ（粘弾性ユニット）及び長期弾性率を表すばね（弾性率 E_∞ ）で構成された一般化マクスウェルモデルが知られている．応答領域の異なる粘弾性ユニットにより広範囲の周波数に対する動的な応答を再現できる⁽⁴⁾．本研究では，マスターカーブからカーブフィットプログラムを用いて必要な定数の同定を行った．

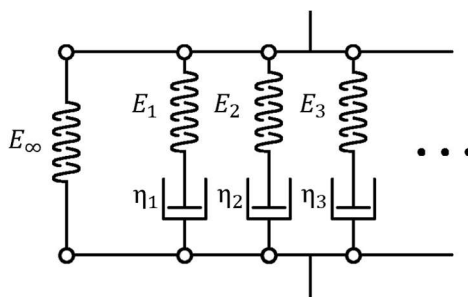


Fig.2 generalized maxwell model.

5

2・2 時間-温度換算則

樹脂などの粘弾性体における弾性率は時間依存性と温度依存性があり，時間と温度には等価性が成立することが知られている．つまり低温状態で長時間かけて起こる現象を高温状態においては短時間で観察できる．実時間と換算時間の比を示すシフトファクター a_T は熱可塑性樹脂では式(4)に示す WLF (Williams, Landel, Ferry) 型の式により計算される⁽⁵⁾．

$$a_T = \frac{t}{t'} \quad (3)$$

$$\log a_T = -\frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (4)$$

ここに， C_1, C_2 : 定数 T_r : 参照温度 T : 測定時の温度

低温あるいは高温状態での実験結果を温度時間換算則により，参照温度にある材料に変換した時間または周波数と弾性率の関係を示した曲線をマスターカーブと呼ぶ．本研究で扱う ABS 樹脂は，SAN(スチレンアクリロニトリル)にゴム粒子であるブタジエンを混合したものであり，ブタジエン含有率によって材料特性が変化する．

2・3 熱-構造連成解析

示したいくつかの材料データは温度依存の値であるのに加え，3D プリンタを用いた積層造形の工程では成型品内部に温度分布のばらつきが生じる．よって熱変形の生じた成型品の最終形状を予測するために，本研究では熱-構造連成解析を行う必要がある．そこでポリマーと複合材料の積層造形専用のプロセスシミュレーションソフトウェアである Hexagon 社の Digimat を使用した．この解析では熱伝導解析により温度を求めた後に，熱粘弾性解析を行う．ここでは式(5)の線形粘弾性構成方程式⁽⁵⁾を用いる．これは，粘弾性体に時間とともに変化するひずみ $\sigma(t)$ を作用させたときの応力を履歴積分した形式である．式(6)は，ガラス転移温度前後で熱膨張率の大きく変わる樹脂材の熱ひずみを表している．

$$\sigma(t) = E(t, T) \cdot \epsilon_0 + \int_0^t E(t - \tau', T) \cdot \frac{\partial \epsilon(\tau')}{\partial \tau'} d\tau' \quad (5)$$

$$\epsilon^{th} = \alpha(T)(T - T_g) - \alpha(T_{ini})(T_{ini} - T_g) \quad (6)$$

ここに、 $E(t, T)$:緩和弾性率 τ :緩和時間 $\epsilon(t)$:粘弾性によるひずみ T_g :ガラス転移温度 T_{ini} :初期温度 ϵ^{th} :熱ひずみ

3. 解析結果

造形物の対象は一辺が 101.6mm, 厚さ 15.0mm の直角二等辺三角形とした. 形状を図 4 に, 積層条件を表 1 に示す. また, 解析に必要な材料特性として Aoki ら⁽⁷⁾の測定結果からブタジエン含有率がそれぞれ 0%, 6%, 10%, 15%, 17.5% の ABS 樹脂におけるせん断貯蔵弾性率を示したマスターカーブ 5 つ (図 3(a)) を, その他の比体積や比熱容量は温度に依存するとし, 熱伝導率 (=0.18 mW/(mm・℃)), 放射率 (=0.925) など温度によらず一定値を仮定した. この際マスターカーブの参照温度はすべて 200℃であり, それぞれのカーブを 7~10 つの粘弾性ユニットを用いて表した. また, 表 1 に示す条件で 3D プリンタを使用して成形を行う実験条件を仮定した. ボクセル有限要素法解析モデルを使用して有限要素法解析を実施した. ボクセル有限要素の寸法は 0.5mm × 0.5mm × 0.5mm であった.

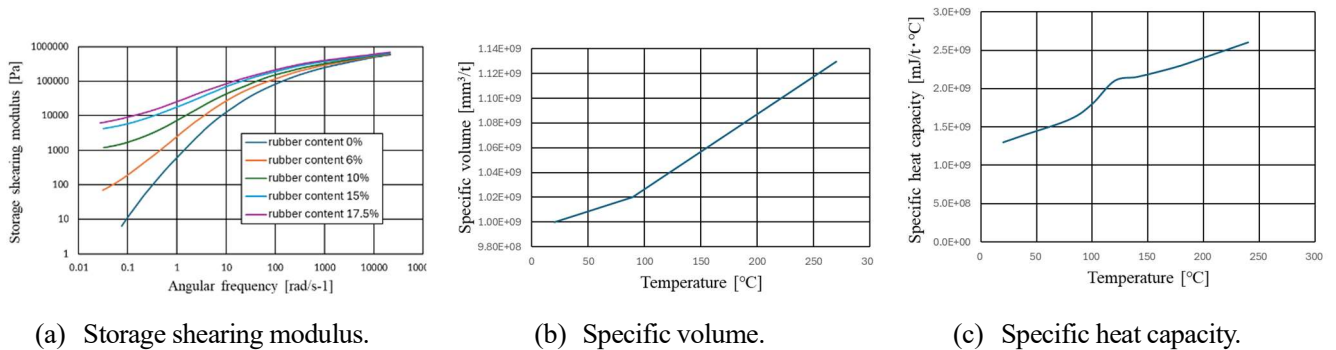


Fig.3 Material properties.

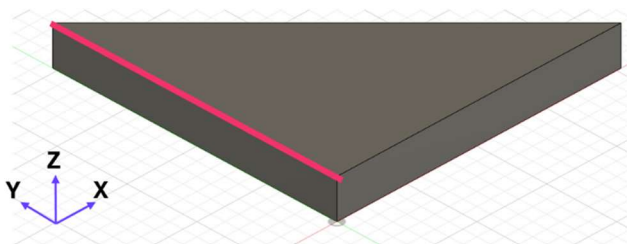


Fig.4 STL data (101.6 mm × 101.6mm×15.0mm).

Table 1 The condition of 3D printing.

材料	ABS 樹脂
層の厚さ (mm)	0.2
ビード幅 (mm)	0.4
充填率 (%)	100
ノズル温度 (°C)	250
プレート温度(°C)	100
周囲温度 (°C)	23
造形速度 (mm/s)	60
充填形状	格子
充填角度 (°C)	45, 135

反り予測を行った結果のうち, 図 4 中で桃色に示した縁部分の弧長-変位グラフを図 5 に示す. 両端の内, 直角を取る頂点を弧長の原点とした. ブタジエン含有率が 0%のときの解析結果が 6~17.5%の材料データを用いた

他の4つの場合と大きく離れる結果となった。図3(a)を見ると計算に使用した材料データの内0%の材料データのみが持つ特徴として低周波数帯のデータが少なく弾性率変化が緩やかな領域が見られない。これは高温の樹脂においてゴム状領域と呼ばれる領域であり、熔融した樹脂を積層するFDM方式においては本来考慮する必要がある領域だと考えた。そのため、今後対象としているABS樹脂に対し動的粘弾性試験を行うことでより広範囲な周波数及び温度帯におけるせん断弾性率のデータを取得する。

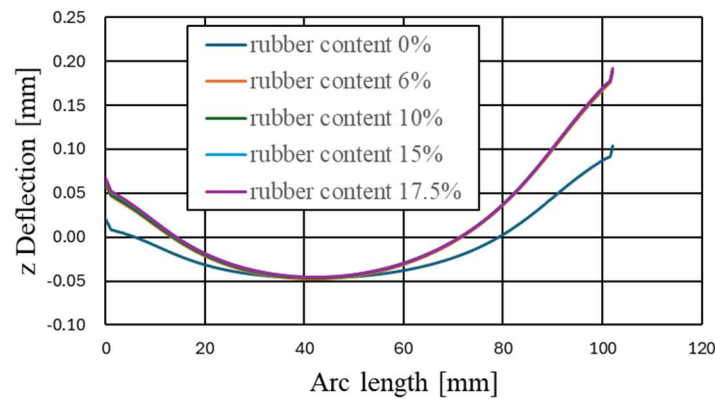


Fig.5 z Deflection for each master curve.

4. 結言

本研究ではABS樹脂を用いたFDM方式の積層造形について、成形品の反りの予測解析を行った。反りへの影響が最も大きいと考えられる緩和弾性率の変化に対する解析結果の違いを調べた。

今後、造形に用いた樹脂材料について動的粘弾性試験を行い、解析で想定しているより材料の緩和弾性率のデータをすることで解析結果精度の向上を図る。

文 献

- (1) 小玉秀男, “光造形法の実用化”, レーザー研究, Vol. 24, No.4 (1996), pp. 441-442
- (2) 萩原恒夫, “3D プリンタ材料の最新動向と今後の展望”, 日本画像学会誌, Vol.54 No.4 (2015), pp. 293-300.
- (3) 古橋洋, 荒井毅, 石畝学, “反り変形現象と抑止技術[対策編]”, 成形加工, Vol.20, No.10 (2008), pp.732-736.
- (4) 泉聡志, 渡邊浩志, 門脇弘, 伊田徹士, “実践 非線形有限要素法シミュレーション”, 森北出版, (2024), pp.118-127.
- (5) 新保實, “プラスチックの粘弾性特性とその利用”, 共立出版, (2013), pp.1-33.
- (6) Laurent, A., Olivier, L., Sylvain, M. and Issam, D., “Numerical simulation of additive manufacturing of polymers and polymer-based composite”, *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Component*, (2020), pp.115-142.
- (7) Yuji Aoki, Akira Hatano, Takeshi Tanaka, and Hiroshi Watanabe, “Nonlinear Stress Relaxation of ABS Polymers in the Molten State”, *Macromolecules*, vol 34, (2001), pp 3100-3107