

要 旨

これまで、光造形法における変形現象の有限要素解析と光硬化性樹脂の材料動的特性の推定を目的として、光硬化性樹脂の静的特性を基にした成型形状の要素分割と樹脂材料動モデルの構築を行ない、それらを用いた変形シミュレーションを行ってきた。本報では、1層からなる片持ち梁の成形シミュレーションを行ない、その結果から変形を定量化し、光硬化性樹脂の材料動的特性を推定する。

1 はじめに

光造形法で用いられる光硬化性樹脂は、紫外線レーザー光の走査により光重合反応を起こし硬化と収縮を開始する。このため、成型物の各層は、それぞれ異なった光弾性率や歪み速度を持ちながら収縮し、その結果、成型物内部に不均一な応力が発生する。そして、この不均一な内部応力は、成型物に変形をもたらす。これまで、光硬化性樹脂の静的特性より成型形状の要素分割と樹脂材料動モデルの構築を行ない、それらを用いた成形シミュレーションを行なった[1]。本報では、1層からなる片持ち梁の成形シミュレーションを行ない、その結果から変形を定量化し、樹脂動的特性を推定する。

2 層の要素分割

紫外線レーザー走査による樹脂表面への露光量 $E_0$ [mJ/cm<sup>2</sup>]は、レーザーの直径 $d$ [mm]、出力 $W$ [mW]、走査速度 $v$ [mm/s]によって決定される。レーザー走査が等速で行なわれるとすると、レーザー走査部分付近の露光量の分布は、図1のようになると考えられる。

樹脂への露光量 $E$ [mJ/cm<sup>2</sup>]と形成する硬化深さ $C$ [mm]との関係は、(1)式で表わされる[1]。

$$C = Dp \ln(E/E_c) \quad (1)$$

(1)式において $E_c$ [mJ/cm<sup>2</sup>]は臨界露光量であり、 $Dp$ [mm]は透過深度である。(1)式による曲線は“working curve”と呼ばれている。working curve を図2.aに示す。図1に示した露光量の分布モデルより、レーザー付近の光重合反応範囲モデルは図2.bのようにworking curveに対応すると考えられる。

本研究では、図2.bより、レーザー走査により形成される層を図3.aに示すように3層に要素分割した。この時、層は図3.bのように形成される。また、図3.aにおいて、要素分割された3層を局所層と呼ぶことにし、図のように番号付けをする。また、同一局所層内の各要素は、その上下端の露光量の平均値を一律に受けると考える。これを平均露光量とし、局所層 $n$ ( $n=0, 1, 2$ )の平均露光量を $E_n^*$ とする。これより、レーザーがその直径 $d$ の1/3の距離( $=d/3$ )を走査するのに必要な時間間隔で、新たに硬化・収縮を開始する要素を追加し、その時の各要素の光弾性率、寸法歪み、ポアソン比を基に有限要素計算を繰り返し行なうことによって成型のシミュレーションが可能となる。

3 樹脂材料動モデル

3.1 光弾性率動モデル

光重合反応を開始した樹脂が最終的にとる光弾性率(最終光弾性率)は、露光量 $E$ についての単調増加関数 $Y_{fn}(E)$ [N/mm<sup>2</sup>]に従うことが実験より知られている[2]。よって、局所層 $n$ ( $n=0, 1, 2$ )内の要素の光弾性率は、0の初期状態から $Y_{fn}(E_n^*)$ の最終状態へと時間変化する。しかし、その間の光弾性率の動的振る舞いは、硬化ラインについて実時間測定[3]が行なわれているが、時間による定式化は行なわれていない。そこで、本研究では局所層 $n$ 内の要素について、その要素が硬化を開始する時刻を $t=0$ とした(2)式で

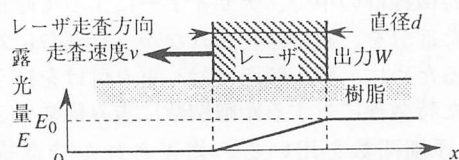


図1 レーザ走査部分付近の露光量分布モデル

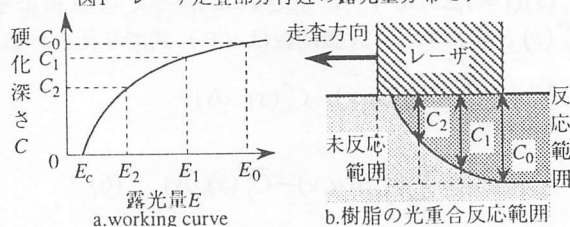


図2 Working Curveと光重合範囲モデル

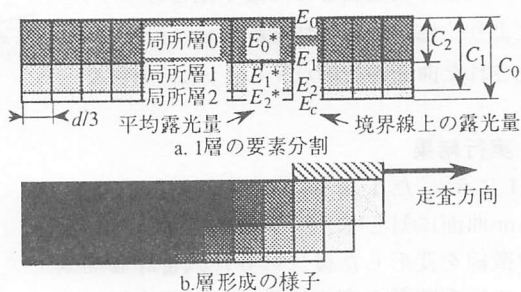


図3 層の要素分割モデルと層形成の様子

表わされる光弾性率動モデル $Y_n(t)$ [N/mm<sup>2</sup>]を設定した。

$$Y_n(t) = Y_{fn}(E_n^*) \{1 - \exp(-\alpha_n t)\} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_n$ は時定数である。

3.2 歪み速度動モデル

光重合反応を開始した樹脂の最終的にとる体積収縮率は、露光量についての単調増加関数 $S_{fn}(E)$ [%]に従うことが実験により知られている[2]。よって、局所層 $n$ ( $n=0, 1, 2$ )内の要素は最終的に $S_{fn}(E_n^*)$ の体積収縮率をとる。これより、同要素の最終歪み $\epsilon_{fn}(E_n^*)$ は(3)式で表わすことができる。

$$\epsilon_{fn}(E_n^*) = 1 - \sqrt[3]{1 - S_{fn}(E_n^*)/100} \quad (3)$$

しかし、体積収縮率や歪みの動的振る舞いは、実時間測定[3]が行なわれているが、時間による定式化は行なわれていない。そこで、本研究では局所層 $n$ 内の要素について、(4)式で表わされる歪み動モデル $\epsilon_n(t)$ を設定した。

$$\epsilon_n(t) = \epsilon_{fn}(E_n^*) \{1 - \exp(-\gamma_n t)\} \quad (4)$$

ここで、モデル中の $\gamma_n$ は時定数である。歪み動モデルより、歪み速度動モデル $\dot{\epsilon}_n(t)$ が導かれる。歪み速度動モデルにより有限要素計算の際、有限要素法における等価節点力の考え方をを用いて各節点力を導出することが可能となる。

3.3 時定数による樹脂材料動的モデルの操作

光弾性率動的モデル，歪み動的モデルでは，その増加率をモデル中の時定数により操作することができる。ここで，(2)式，(4)式中に含まれる時間 $t$ [s]の関数である(5)式の項について考える。

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (5)$$

ここで， $\lambda$ は時定数であり，(2)式における $\alpha_1$ ，(4)式における $\gamma_1$ に対応する。 $F(t)$ は， $t=0$ において0をとり， $t \rightarrow \infty$ で1に収束する。この間の $F(t)$ の増加率は時定数 $\lambda$ により操作できる。 $F(t)$ がある値 $f(0 < f < 1)$ に達するまでに必要な時間を到達時間 $T_f$ [s]としたとき， $T_f$ は $1/\lambda$ に比例する(図4)。

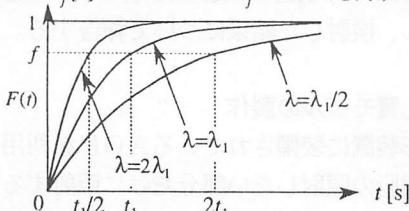


図4 時定数と到達時間の関係

4 シミュレーション

樹脂動的特性を推定するため，1層からなる片持ち梁について成形シミュレーションを行った。

シミュレーション条件は，レーザー直径 $d=0.6\text{mm}$ ，走査速度 $v=40\text{mm/s}$ ，層厚 $C_0=0.375\text{mm}$ ，梁長さ $L=6\text{mm}$ とした。硬化深さ，最終光弾性率，最終体積収縮率等の静的特性値については，市販されている樹脂の値を用いた。

シミュレーションに用いる樹脂材料動的モデル中の時定数の値として， $\lambda=3.5, 1.17, 0.7, 0.35, 0.233, 0.175$ を用いた。 $\lambda=0.35$ は，硬化ラインの寸法収縮についての測定データ[3]による値である。動的モデルの増加率をとらえやすくするために，(5)式における到達時間を動的モデルの増加の指数とする。 $\lambda=0.35$ であるとき， $F(t)$ は $t=10$ において0.97に達する。この到達時間 $T_{0.97}$ を増加率の指数とし，時定数値を，その値による到達時間 $T_{0.97}$ を付加して表記すると， $\lambda=3.5(1), 1.17(3), 0.7(5), 0.35(10), 0.233(15), 0.175(20)$ となる。これらの時定数の値を用いて，全ての局所層における増加率が等しい場合(CaseA)，上の局所層ほど増加率が大きい場合(CaseB)，上の局所層ほど増加率が小さい場合(CaseC)について成形シミュレーションを行ない，片持ち梁の変形について梁長さに対する梁先端部の上方向への変位の割合を変形量 $\delta$ [%]として計算した。

シミュレーションに用いた時定数と変形量との関係を表1および図5に示す。また図6にCaseA1のシミュレーション結果を示す。図6において変位量 $\delta$ は $\Delta v / \Delta h \times 100$ であり， $\delta > 0$ は上方向への反りを， $\delta < 0$ は下方向への反りを意味する。

図5の白丸は，CaseAでの全時定数の値による到達時間と変形量の関係を示す。CaseAにおいて，片持ち梁は，全ての時定数の値において上向きに反りを生じた。

図5の黒丸は，CaseBでの時定数 $\alpha_0, \gamma_0$ による到達時間と変形量の関係を示す。CaseB1の場合のみ下向きの反りが認められた。図7にCaseB1のシミュレーション結果を示す。この場合， $\alpha_0, \gamma_0$ の値が $\alpha_1, \gamma_1$ に近づく程変形量が大きくなる。

図5の四角は，CaseCにおける，時定数 $\alpha_0, \gamma_0$ による到達時間と変形量の関係を示す。図8にCaseC1のシミュレーション結果を示す。 $\alpha_0, \gamma_0$ の値が， $\alpha_1, \gamma_1$ より離れる程，変形量が大きくなっている。

CaseB4, CaseC1では，時定数の値は， $\alpha_2, \gamma_2$ のみ異なる。これらの変形量の差は小さく， $\alpha_2, \gamma_2$ の値の変化が変形に与える影響は， $\alpha_0, \gamma_0$ と比べ非常に少ないといえる。

光造形法において成形した片持ち梁に垂直方向の変形が見られない場合，樹脂の硬化，収縮は梁の上に位置する部分ほど速く進行していることが考えられる。また，梁が上向きに反る場合は，進行の差が少なく，反りが下向きの場合は差が大きいことが考えられる。

5 結論

本研究では，1層からなる片持ち梁の成形シミュレーション結果について，変形の定量化を行ない，樹脂の動的特性を推定した。

参考文献

- [1] 唯木ほか，“光造形法における樹脂の硬化特性のモデル化と変形シミュレーション”，1994年度精密工学会秋季大会学術論文集
- [2] Paul F. Jacobs, “高速3次元成形の基礎”，日系BP出版センター(1993)
- [3] 榎原弘之，“光造形レジンの応力・ひずみ特性のリアルタイム測定”，第8回ラピッド・プロトタイプングシンポジウム(1995)22-27

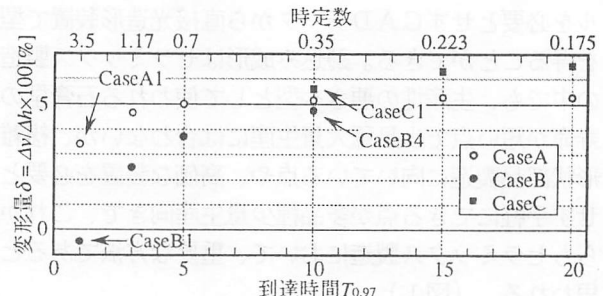


図5 到達時間と変形量の関係

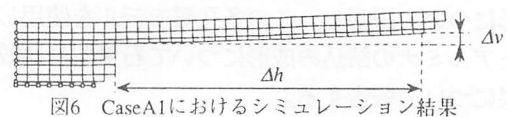


図6 CaseA1におけるシミュレーション結果

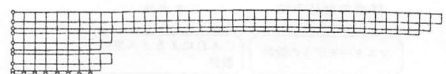


図7 CaseB1におけるシミュレーション結果

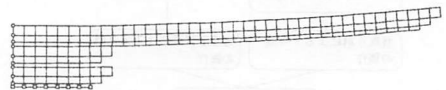


図8 CaseC1におけるシミュレーション結果

表1 シミュレーションに用いた時定数の値と変形量

	CaseA						CaseB				CaseC		
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	1	2	3
$\alpha_0, \gamma_0$	3.5	1.17	0.7	0.35	0.223	0.175	3.5	1.17	0.7	0.35	0.35	0.223	0.175
$\alpha_1, \gamma_1$	3.5	1.17	0.7	0.35	0.223	0.175	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
$\alpha_2, \gamma_2$	3.5	1.17	0.7	0.35	0.223	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	3.5	3.5	3.5
$\delta$ [%]	3.40	4.69	4.96	5.17	5.27	5.27	-0.457	2.50	3.57	4.77	5.62	6.29	6.47