

要旨

光造形法における精度問題の大きな要因のひとつに、光硬化性樹脂の光重合反応時に起こる樹脂の体積収縮現象による成型物の形状歪みが挙げられる。本研究では、有限要素法による成型物の変形解析を目的として、光硬化性樹脂の光重合反応時における諸特性を基にした成型形状の要素分割と樹脂材料モデルの構築を行い、それらを用いたシミュレーションによりモデルの有用性とモデル中のパラメータが変形に及ぼす影響を明らかにする。

1 はじめに

光造形法で用いられる光硬化性樹脂は、紫外線露光により光重合反応をおこし硬化と収縮を開始する。成型物は、レーザー光線が走査された部分から順次硬化・収縮を開始することになる。樹脂の硬化・収縮は、レーザーが通過した後も進行する。よって成型物の各部は、異なった弾性係数や収縮率等の材料定数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。この不均一な内部応力は、成型物に形状の歪みをもたらす。形状の歪みは、図1に示されるような片持ちの薄板に顕著に見られる。本報では、光硬化性樹脂の光重合反応時における諸特性を基にした成型形状の要素分割と樹脂材料モデルの構築を行ない、片持ち板部分の成型のシミュレーションを行なう。

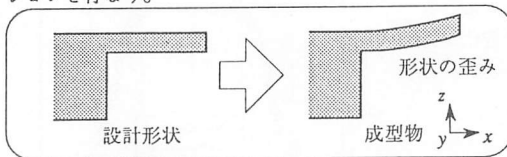


図1 成型物に見られる形状の歪み

2 層の要素分割

樹脂に与えられる紫外線のエネルギー密度は、露光量と呼ばれている。紫外線レーザー走査による樹脂への露光量 E_0 [mJ/cm²] 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2のようになると考えられる。

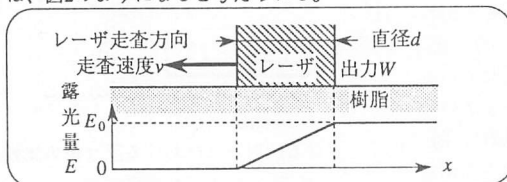


図2 レーザ走査部分付近の露光量の分布

樹脂への露光量 E と形成される硬化深さ C [mm] の関係は次式で表わされることが知られている[1]。

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

(1)式において E_c [mJ/cm²] は臨界露光量と呼ばれ、樹脂にこの値以上の露光量を与えると硬化を開始する。 D_p [mm] は透過深度と呼ばれ、樹脂のレーザー光透過の指数となる。(1)式による曲線は、“working curve” と呼ばれる。working

curveを図3.aに示す。これと図2に示した露光量の分布より、レーザーの先端から末端までの光重合反応範囲と未反応範囲の境界線は、図3.bのようにworking curveに対応すると考えられる。

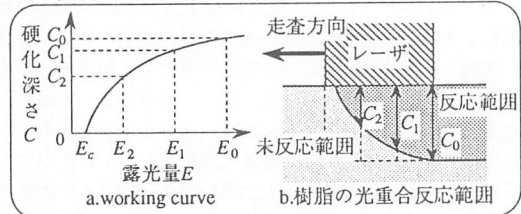


図3 working curve とレーザー走査による光重合反応範囲

図3.bより、樹脂は、レーザーによる露光量が臨界露光量 E_c に達した部分から順次に光重合反応を開始する。よって、成型物の歪みをシミュレーションするためには、レーザー走査によって形成される層を、反応開始時間や露光量が一樣であると見なすことができる要素ごとに分割し、レーザー走査に合わせて逐次、成型物の変形を計算する必要がある。本研究では、レーザー走査により形成される層を図4.aに示すように要素分割した。この時、層は図4.bのように形成される。また、図4.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、同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樣に受けると考える。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つけ加え、その時の各要素の縦弾性係数、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。

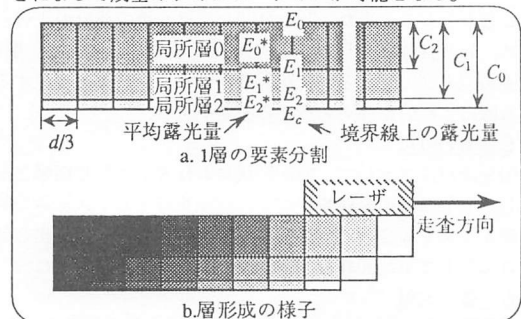


図4 層の要素分割と層形成の様子

3 樹脂材料定数モデル

以下に有限要素計算の際に必要な各樹脂材料モデルについて説明を行なう。ただし、各要素のポアソン比は、時間によらず0.3とした。

3.1 縦弾性係数時間変化モデル

ある露光量で光重合反応を開始した樹脂の最終的にとる縦弾性係数は、図5.aに示す露光量についての単調増加な関数 $Y_{fn}(E)$ に従うことが実験より知られている。よって局所層 n 内の要素の縦弾性係数は、0の初期状態から $Y_{fn}(E_n^*)$ の最終状態へと変化する。しかし、その間の動的振舞いはまだよく知られていない。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間を $t = 0$ とした(2)式で表わされる縦弾性係数の時間変化モデル $Y_n(t)$ を設定した。

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

ここで、 α_n は時定数であり、これが大きい値を取るほどその局所層内の要素の硬化は速く進行し、最終縦弾性係数に収束する。図5.bに、各モデル中の時定数の関係が、 $\alpha_0 > \alpha_1 > \alpha_2$ である場合の縦弾性係数時間変化モデルを示す。

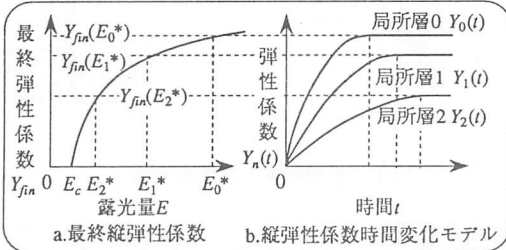


図5 最終縦弾性係数と縦弾性係数時間変化モデル

3.2 寸法歪み時間変化モデル

ある露光量で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な関数 $S_{fn}(E)$ に従うことが実験により知られている。しかし、体積収縮率の動的振舞いもやはりまだよく知られていない。そこで、本研究では局所層 n 内の要素について、(3)式で表わされる体積収縮率時間変化モデル $S_n(t)$ を設定した。

$$S_n(t) = S_{fn}(E_n^*) \{1 - \exp(-\gamma_n t)\} \quad (3)$$

ここで、モデル中の γ_n は時定数である。図6.aに、各モデル中の時定数の関係が、 $\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_2$ である場合の体積収縮率時間変化モデルを示す。

体積収縮率時間変化モデルより、(4)式で表わされる寸

法歪み時間変化モデルが導かれる。図6.bに寸法歪み時間変化モデルを示す。

$$\epsilon_n(t) = \sqrt[3]{dS_n(t)/dt} \quad (4)$$

この寸法歪み時間変化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。

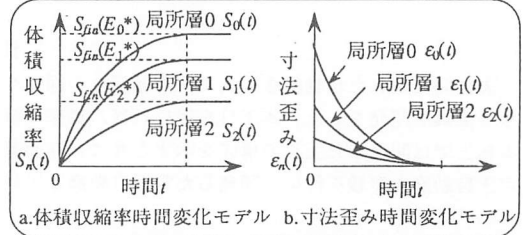


図6 体積収縮率時間変化モデルと寸法歪み時間変化モデル

4 シミュレーション

図1の薄板の部分について、成型のシミュレーションを行なった。シミュレーションで用いた各モデル中の時定数の関係は、次に示すcase1, case2の2通りである。

case1: $\alpha_0 = \gamma_0 = \alpha_1 = \gamma_1 = \alpha_2 = \gamma_2$

case2: $\alpha_0 = \gamma_0 > \alpha_1 = \gamma_1 > \alpha_2 = \gamma_2$

これらの関係において、それぞれ板が1層からなる場合と2層を積層した場合についてシミュレーションを行なった結果を図7に示す。また、板が1層からなる場合と2層からなる場合のレーザーの走査方向を図7.aに示す。

シミュレーションの結果、2層の場合に実際の成型物に見られる形状の歪みが確認された。また、時定数の関係がcase1の時とcase2の時とは、形状歪みに差異があることが確認された。

5 結論

本研究では、光硬化性樹脂の硬化時における諸特性を基にした成型形状の要素分割と樹脂材料モデルの構築を行ない、シミュレーションによりモデルの有用性とモデル中のパラメータが変形に及ぼす影響を明らかにした。

参考文献

- [1] Paul F.Jacobs: “高速3次元形成の基礎”, 日経BP出版センター(1993)
- [2] O.C.Zienkiewicz: “マトリックス有限要素法”, 倍風館(1984)

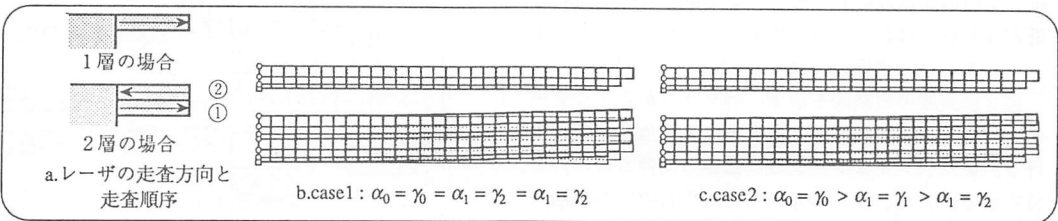


図7 シミュレーション