

ステレオリソグラフィにおける 熱収縮に伴う三次元変形シミュレーション

北海道大学大学院工学研究科 ○師岡将義 田中文基 岸浪建史

要旨

ステレオリソグラフィ（光造形）において、造形精度に影響を及ぼす樹脂の収縮は、重合収縮と、光重合反応時に発生する反応熱による熱収縮の二つが原因として考えられる。これまでに、反応熱による熱収縮だけに注目し、2次元有限要素法を用いたシミュレーションにより、片持ち梁の反り変形を解析した。本報では変形シミュレーションにおける解析形状を3次元に拡張し、 x - y 面における走査経路の違いが造形物の3次元変形に与える影響を明らかにする。

1. はじめに

ステレオリソグラフィ（光造形）において、樹脂の収縮による反り変形現象は造形精度を悪化させる大きな要因となっている。これまでに重合収縮が引き起こす反り変形現象の解析は行われてきた[1]。また、反応熱と収縮ひずみには強い相関があるということが実験により明らかにされた[2]。そこで前報[3]において、反応熱による熱収縮だけに注目し、2次元有限要素法を用いたシミュレーションにより、片持ち梁の反り変形を解析した。しかし、実際のステレオリソグラフィにおいて造形物は立体形状であり、特に x - y 面における熱伝導は、レーザー走査経路により大きく影響を受け、これによる温度分布の違いも変形に影響していると考えられる。本報では変形シミュレーションにおける解析形状を3次元に拡張し、 x - y 面における走査経路の違いが造形物の3次元変形に与える影響を明らかにする。

2. シミュレーションの概要

図1に本研究で行うシミュレーションの概要を示す。走査経路(A)にしたがって、これまで造形された形状を、 x , y 方向はレーザー径 a [mm]で、 z 方向は硬化深さ b [mm]でそれぞれ等分割することにより、要素分割(B)を行う。要

素分割をすることによって各要素に対する境界条件(C)が決定される。熱伝導解析においては、上面は空气中、下面・側面は液中の境界条件とする。また、レーザー照射によって樹脂が発熱し、この熱源が分割された要素を移動する過程をモデル化し、移動熱源モデルとした。移動する熱源が境界条件の下で引き起こす各要素の温度変化を解析する。この結果から各要素の熱変形を解析し、有限要素法により節点変位を導出する。さらに温度分布は Δt 秒後の解析における初期温度として用いられる。これをレーザー走査終了まで繰り返し造形物の変形を解析する。

3. 移動熱源モデル

ステレオリソグラフィでは、レーザー走査によって照射された地点から順に硬化を開始し、硬化した樹脂は要素に対して q の熱量を発生する。この過程を解析するために、図1の(D)に示す移動熱源モデルを提案する。レーザー径(a)と同等の距離を走査するのにかかる時間をステップ幅(Δt)とし、このステップ幅で硬化される分を単位硬化形状とする。レーザーは Δt 秒ごとに単位硬化形状を追加して行き、レーザーが通り過ぎてから、 $n\Delta t$ (秒)後に $m\Delta t$ 秒間で q の熱量を発生する。熱量 q は実験結果[2]から得た値を用いる。

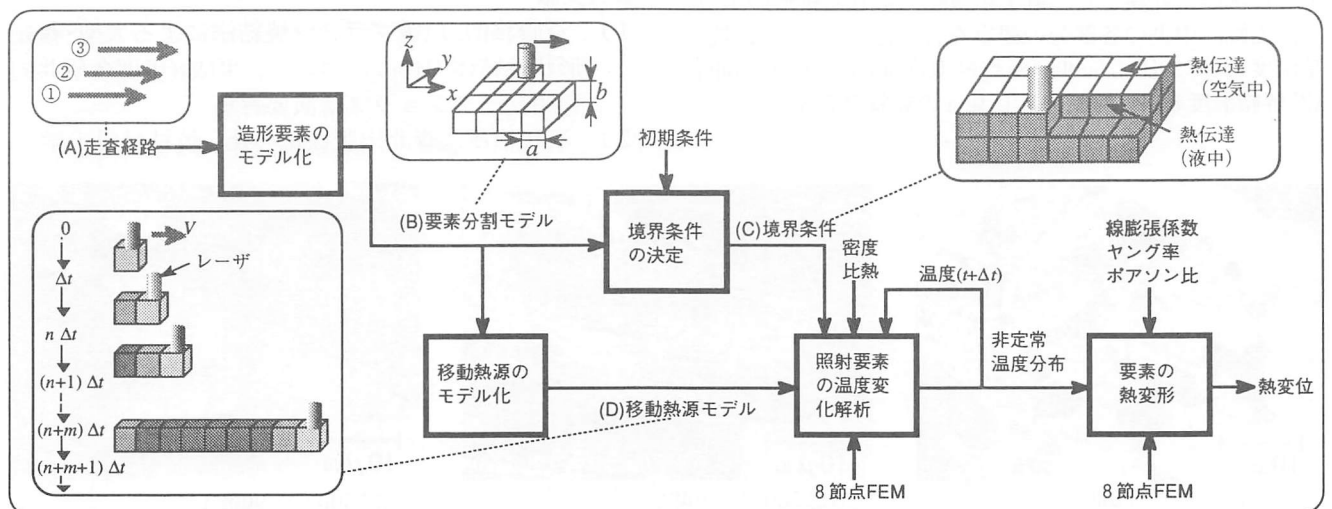


図1 シミュレーションの概要

4. シミュレーション

4.1 レーザ走査経路

反応熱の発生による造形物の温度上昇は、その分の温度差が熱収縮として造形物にひずみをもたらす。この温度上昇を抑え、熱伝達による放熱を促進するためにはレーザー走査ラインを連続させずに、間隔を置いてライン硬化させることが効果的であると予想される。そこで、 x - y 面でのレーザー走査経路を図2のようにした。経路1ではラインを隣接させながら層を塗りつぶしていく。これに対して経路2では、ライン1本分の間隔をあけてレーザーを走査させ、最後に間のラインを埋めるようにレーザーを走査させる。経路3、4も同様に第二層を走査させる。

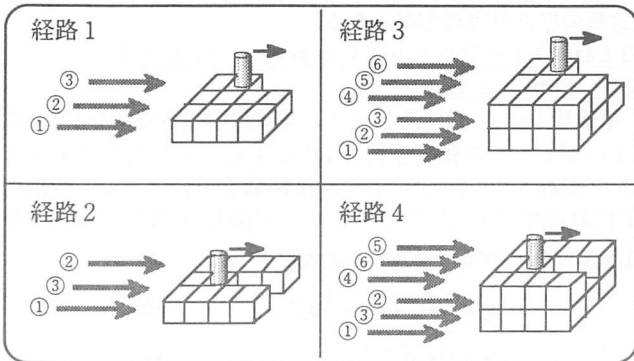


図2 レーザ走査経路

4.2 シミュレーション結果

表1のような条件でのシミュレーション結果の一部を図4に示す。ここで温度分布は、レーザー走査終了直後、反り変形においては60秒後の結果である。これらの結果を比較するために、変形量の定量化を行う。図3に示すシミュレーション結果の断面図のように、板の x 方向の長さ L に対する、板の先端の z 方向変位 Δd の割合として造形物の変形を定量化した。変形量 δ [%]は式(1)で定義される。

$$\delta(y) = \Delta d(y) / L(y) \times 100 \quad (1)$$

それぞれの走査経路による変形量を比較し、その結果を図5に示す。

5. 結論と今後の課題

本研究では、解析形状を3次元とし、片持ち梁における変形シミュレーションを行った。反応熱による熱伝導を

表1 シミュレーション条件

熱伝導率 k_0	2.77×10^{-8} (kcal/mmsK)	走査速度 V	3.42×10^{-2} (m/s)
密度 ρ	1.15×10^{-6} (kg/mm ³)	レーザー径 a	1.0 (mm)
比熱 c	4.78×10^{-1} (J/kg K)	硬化深さ b	0.5 (mm)
ヤング率 E	95.6 (kgf/mm ²)	全長 L	4.0 (mm)
熱膨張係数 α	4.10×10^{-4}	初期液温 T	17.63 (°C)
熱伝達率(気)	1.43×10^{-7} (kcal/mm ² sK)	ステップ幅 Δt	0.03 (s)
(液)	1.91×10^{-6} (kcal/mm ² sK)	時間遅れ $n\Delta t$	0 (s)
発熱量 q	3.65×10^{-6} (kcal)	発熱時間 $m\Delta t$	0.03 (s)

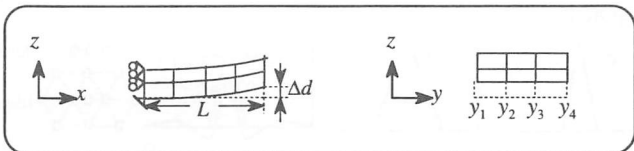


図3 シミュレーション結果の断面図

考慮すると、間隔をあけたレーザー走査経路による造形は、造形物の変形に及ぼす影響を軽減させるということを示した。また、第二層を造形することにより変形量が増加することを示した。今後は熱収縮に加えて重合収縮も考慮し、より現実に近い解析を行う必要がある。

【参考文献】

- [1]唯木他：光造形法におけるレーザー経路を考慮した変形シミュレーション（第二報）、1996年度精密工学会春季大会講演論文集
- [2]植原弘之：光造形用感光性樹脂の収縮現象の基礎モデルに関する考察、第11回ラピッドプロトタイピングシンポジウム(1996)
- [3]師岡他：ステレオリソグラフィにおける反応熱を考慮した反り変形解析、1998年度精密工学会春季大会講演論文集

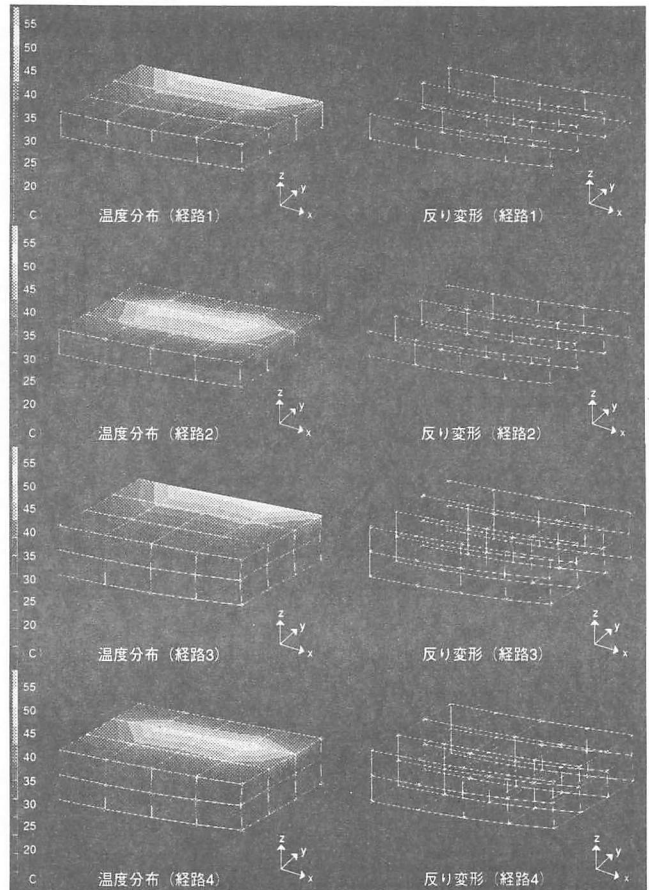


図4 シミュレーション結果

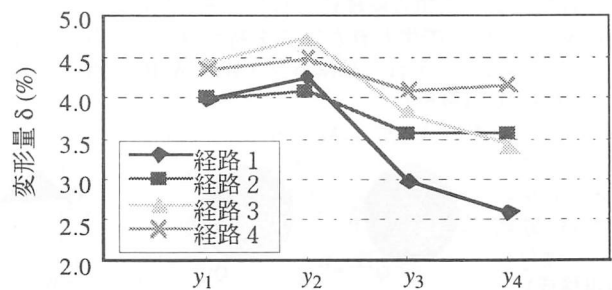


図5 変形量の比較