

# ステレオリソグラフィにおける反応熱を考慮した非定常熱伝導解析

北海道大学工学部 ○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）に用いられる感光性樹脂は、硬化反応時に熱を発生する。この反応熱による樹脂の収縮が造形物の反り・変形現象の原因であると考え、硬化時の樹脂の挙動をモデル化し、造形物の温度変化を有限要素法により解析する。

### 1. はじめに

ステレオリソグラフィにおいて、反り変形現象は造型精度を悪化させる大きな要因となっている。反り・変形現象は樹脂の収縮によるものであり、収縮ひずみと反応熱には強い相関があるということが楢原らの実験[1]により明らかになった。そこで本研究では反り・変形現象を解析するために実験結果から光硬化反応及び反応時の熱発生モデル化を行い、この反応熱を考慮して非定常熱伝導解析モデルを提案する。さらにこれらのモデルを用いて造形物の温度変化の有限要素解析を行う。

### 2. 光硬化反応および反応熱発生モデル

楢原ら[1]は、レジンを熱特性評価実験により光重合収縮等のひずみ変化と温度変化との対応関係を示した。図1にその結果を示す。この結果から、ひずみ変化において樹脂は照射直後に膨張しその後収縮が起り、また温度とひずみの間には強い相関があることが解った。

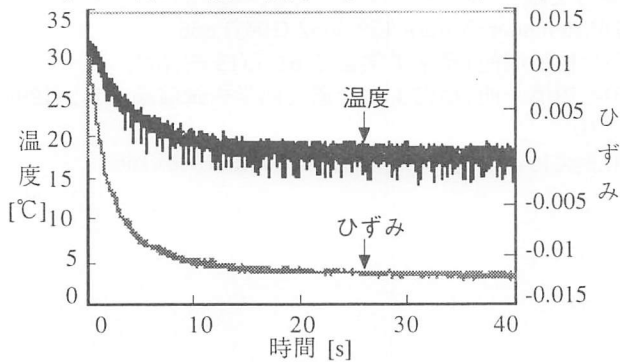


図1 レジン熱特性評価実験結果

この実験結果から樹脂が硬化時にどのような挙動をとるのかについて考え、モデル化した。図2は、ひずみ、温度、硬化反応率の3軸によりモデル化した樹脂の硬化時の挙動を示す。硬化時の挙動について3つの経路を考えた：経路1 (A-B-C-D-F)、経路2 (A-B-E-D-F)、経路3 (A-B-D-F)。しかし、経路1では液体のまま温度上昇するため、ひずみの測定が不可能であること、経路3ではどの時点で硬化しひずみの計測が可能になったかが不明であるということから本研究では経路2を採用した。経路2は硬化するまでに時間遅れ (B-E) があり、その後発熱するというモデルである。

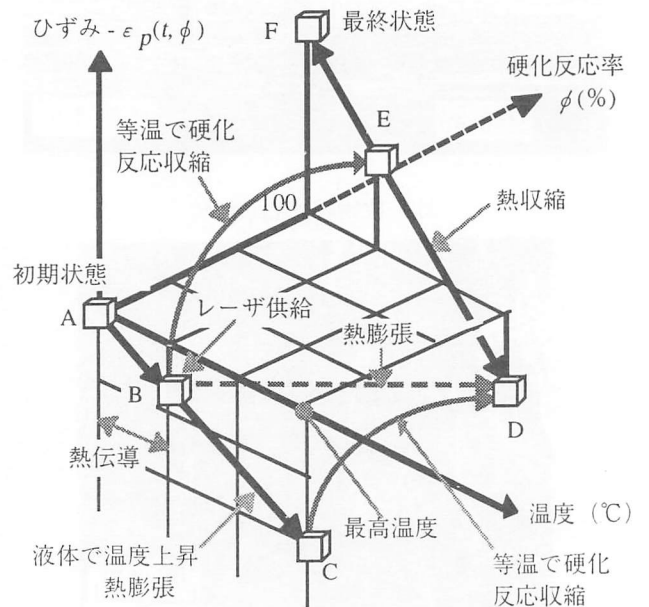


図2 光硬化反応および反応熱発生モデル

### 3. 移動内部熱源モデルと内部発熱モデル

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、硬化した樹脂は発熱率  $\dot{Q}$  で発熱する。そこでこの内部熱源がレーザー走査に伴い移動していく過程を解析するために、図3に示す移動内部熱源モデルを提案する。

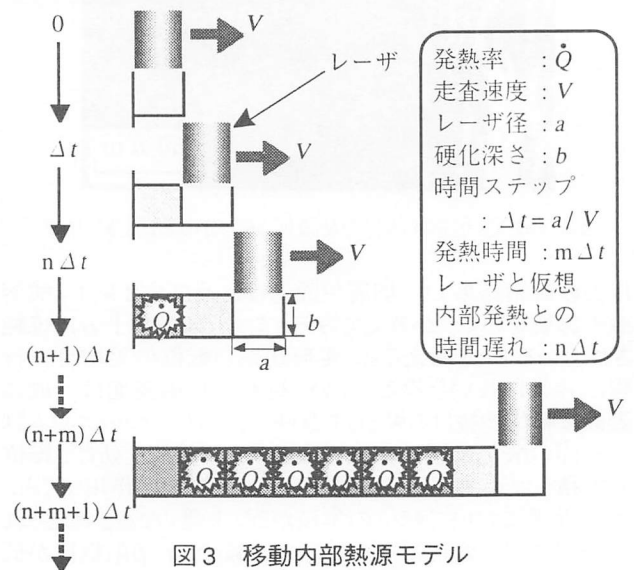


図3 移動内部熱源モデル

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 ( $\Delta t$ ) 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  $\Delta t$  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た後、 $n \Delta t$  (秒) だけ遅れて発熱率  $\dot{Q}$  の熱が、 $m \Delta t$  秒間発生する。この時間遅れは反応熱発生モデルの B-E 間の時間である。

次に発熱率  $\dot{Q}$  を実験結果から求めるために温度変化を図4左のようにモデル化した。このモデルの温度上昇の傾きから発熱率  $\dot{Q}$  を式(1)によって求めた。これを内部発熱モデル (図4右) とする。

$$\dot{Q} = \rho c (T_2 - T_1) / m \Delta t \quad (1)$$

ここで密度を  $\rho$ 、比熱を  $c$ 、発熱時間を  $m \Delta t$  とする。

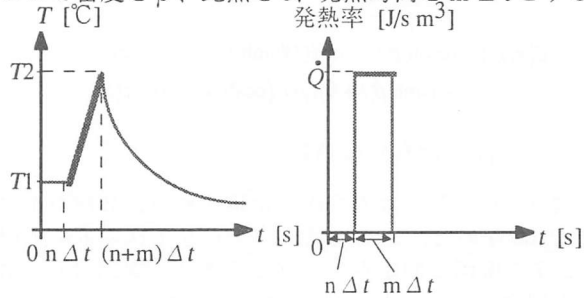


図4 内部発熱モデル

#### 4. 有限要素法による解析法と解析結果

解析対象を横 a (レーザー径)、縦 b (硬化深さ) の単位硬化形状に要素分割し、各要素の節点の温度を有限要素法 [2] により計算する。要素は  $\Delta t$  秒ごとに1つずつレーザー走査に伴って追加され、この  $\Delta t$  秒の間、非定常熱伝導解析される。これを繰り返すことによって温度分布の時間的変化を求めることができる。造形が終了した後も自然冷却による温度降下を解析する。

本研究では一層と二層の造形を解析した。境界条件は、上面は空气中、下面、側面は液中の熱伝達とし、その他の条件を表1に示す。一層の場合、10個の要素を造形し中央5番目要素の温度変化を解析した。この結果を図5に示す。

表1 樹脂特性と解析条件

<樹脂特性>		レーザー径 a	$1.0 \times 10^{-3}$ (m)
熱伝導率 $k_0$	0.116 (W/m K)	硬化深さ b	$0.5 \times 10^{-3}$ (m)
密度 $\rho$	$1.149 \times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	全長 L	$1.0 \times 10^{-3}$ (m)
比熱 c	$2.0 \times 10^3$ (J/kg K)	初期液温 $T_1$	17.63 (°C)
<解析条件>		最高温度 $T_2$	30.94 (°C)
発熱率 Q	$1019.5 \times 10^6$ (J/s m <sup>3</sup> )	ステップ幅 $\Delta t$	0.03 (s)
走査速度 V	$3.42 \times 10^{-2}$ (m/s)	時間遅れ $n \Delta t$	0 (s)
		発熱時間 $m \Delta t$	0.03 (s)

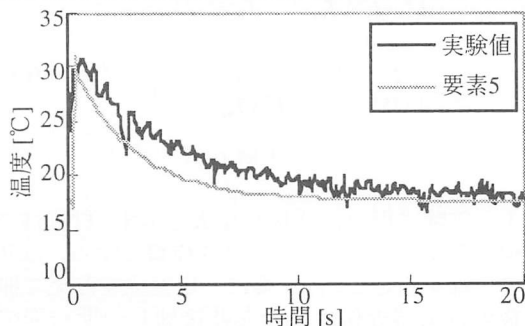


図5 解析結果1

この結果より、解析結果と実験値[1]がほぼ同様な傾向を示すことから、上記のモデルが妥当であるといえる。

次に、二層の場合について図6に走査条件を示し、図7、図8に各時刻における上層、下層の温度分布を示す。

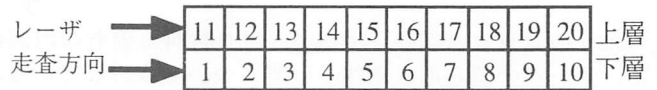


図6 レーザ走査方向と要素分割2

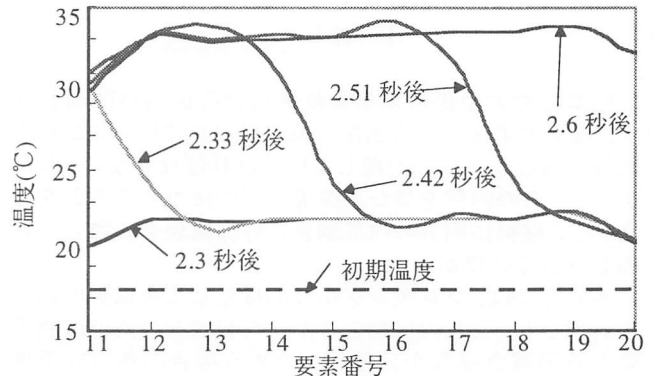


図7 解析結果2-1 (上層)

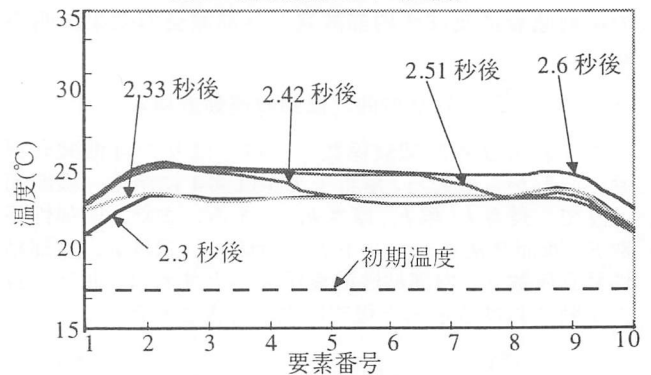


図8 解析結果2-2 (下層)

この結果より、上層と下層では約10°Cの温度差があり、これが反り・変形現象を引き起こしている可能性がある。

#### 6. 結論

本研究において以下の結論が得られた。

1. 樹脂の反応度、温度、ひずみに関する基礎現象に基づき光硬化反応及び反応時の熱発生モデル化を行った。
2. 上記の光硬化反応モデルに基づいた非定常熱伝導解析モデルを提案した。
3. 本手法を用いて温度変化の有限要素解析を行った。

○実験結果と比較することにより、上記のモデルが妥当であることを示した。

○二層の造形において、上層造形時に上層と下層では温度差があることを示した。

#### 【参考文献】

- [1] 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プングシンポジウム、(1996) pp.86-90
- [2] 矢川元基・宮崎則幸 共著：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析、サイエンス社、1985