

レーザービーム照射時の樹脂挙動の観察

Flow of Photocurable Polymer during Laser Exposure

徐 毅*・中川 威雄*

Yi XU and Takeo NAKAGAWA

概 要

紫外線硬化樹脂の硬化過程の動的な状況をビデオカメラを用いて観察し、硬化物の周囲の液体樹脂が流動していることを明らかとした。この流動現象が造形過程に対してどのような影響を与えているか考察した。また、流動の原因については、温度測定を行い、樹脂の反応熱により液体樹脂の温度分布が不均一となり、その比重の変化で液状樹脂を流動することを確認した。

1. 諸 言

光造形はラピット・プロトタイプング技術の一つで、三次元データから直接立体モデルを作るプロセスである。この方法は短時間で複雑形状を持つモデルを製作できる特長がある。しかし現在残されている問題点の一つに造形品の寸法精度、特に反り変形の発生がある。

光造形は液体の光硬化性樹脂が紫外線照射を受けて硬化する現象を利用するもので、硬化物を積層することによってモデルが作られる。モデルの造形精度の不良現象を解明するために、著者らは一本の線状硬化物を取り出して、その形状および内部の硬化状況を測定し¹⁾、露光量分布に基づく硬化物内部の不均一性を明らかとし、これらの実験結果をFEM解析を適用することで一本の線状硬化物の反り変形の解析を行った²⁾。

ところが、実際の造形においては、硬化物はその周囲の環境、つまり既に存在する硬化物や液体樹脂が新たに造形される硬化物に対してどのように影響を与えるかは、未だ明らかにされていない。硬化過程の全容を解明するためには、このような硬化物およびその周辺の状況を詳細に調べる必要があり、トータルとしての硬化物環境を把握するためビデオカメラを使って実験観察を行った。

*東京大学生産技術研究所 第2部

2. 実験方法

本実験では光造形機 SOUP530 (CMET 社製, He-Cd レーザ, 出力29mw) を用い, エポキシ系樹脂 HS-660 (旭電化社製) について硬化時の流動挙動を観察した。

液体樹脂の流動を観察するために、トレーサとしての BN 粉 (平均粒径 $1.5\mu\text{m}$) を混合 (樹脂:BN 粉=重量比 1400:1) した液状樹脂をガラス容器 (100×30×30mm) に入れ、紫外線レーザーの照射条件を2水準、つまり、

- 1) 一定速度 v で走査した場合:
走査照射
- 2) 固定して走査しない場合:
点照射

にとり、その硬化挙動をビデオカメラで上部および正面から観察した (図1)。

今回の実験においては観察のため走査速度を遅くしている。実験ではレーザーの走査速度とビーム径を変えたため、硬化物幅は表1に示すように変化した。

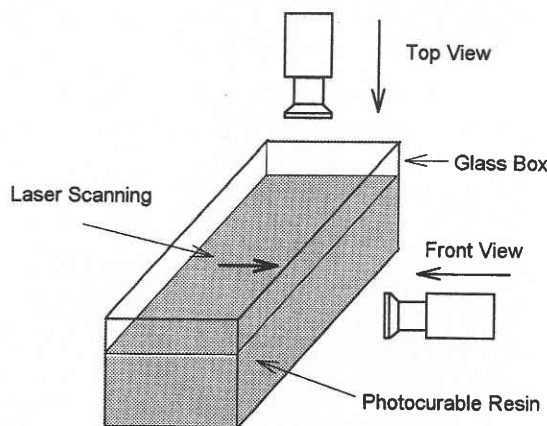


図1 液体樹脂の流動のビデオ観察

表 1 硬化物の幅 単位 mm

| 走査速度 (mm/s) | 0.1 | 1 | 10 | 50 |
|----------------|------|------|------|------|
| 硬化物幅 (ビーム大) | 3.07 | 2.63 | 2.36 | 2.08 |
| 硬化物幅 (ビーム小) | 0.6 | 0.32 | 0.2 | 0.18 |

3. 実験結果および考察

本実験で認められた現象を以下に纏める。

- 1) 自由に硬化物が成形される場合の液体樹脂の挙動：
 - ①点照射の場合に，硬化物周辺の液体樹脂は硬化物に沿って下から上に流動している（図2）。
 - ②走査照射の場合に，レーザビーム前方の液体樹脂は硬化物の進行前方への流動が認められた（図3）。
- 2) 既に存在する硬化物に沿って硬化物が成形される場合の液体樹脂の挙動：

周辺に硬化物があるために液体樹脂の自由な流動挙動は阻害され，硬化物に沿って流動する（図4～図7）。
- 3) 造形過程での液体樹脂流動の影響

既に存在する硬化物に沿って新たに硬化物が造形される

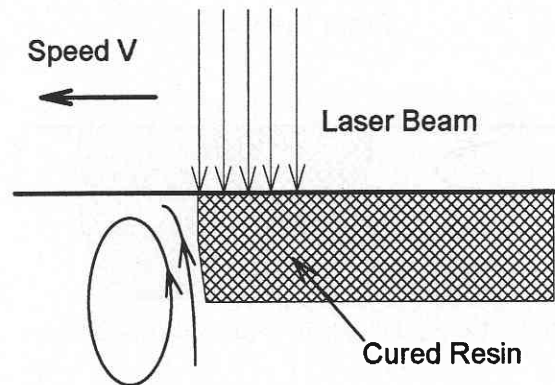


図 3 走査照射によりレーザビーム前に液体樹脂の流動

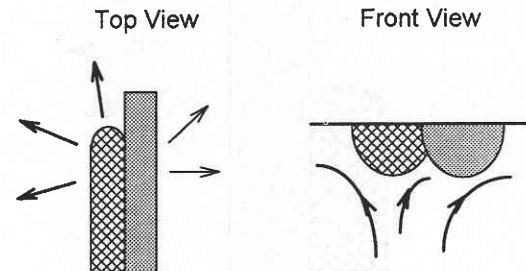


図 4 右側に硬化物がある場合の液体樹脂の流動

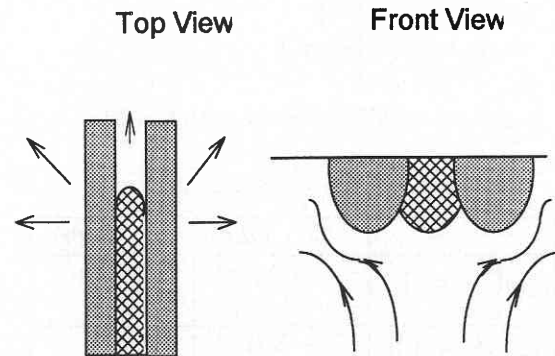


図 5 両側に硬化物がある場合の液体樹脂の流動

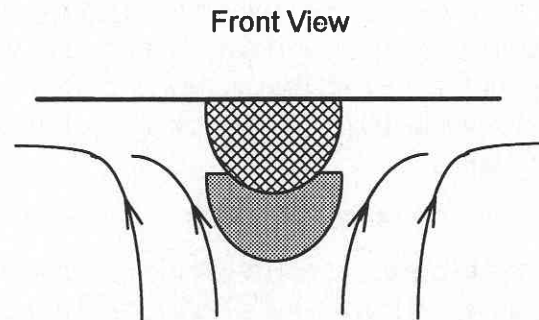


図 6 下部に硬化物がある場合の液体樹脂の流動



1 mm

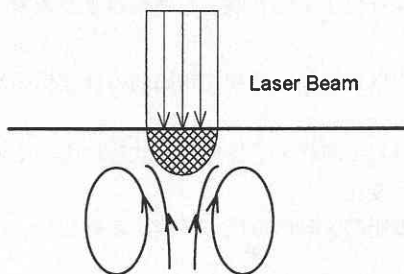


図 2 点照射により硬化物断面周囲に液体樹脂の流動

Front View

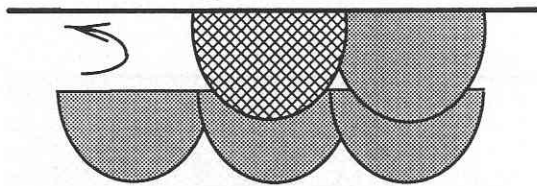


図7 下側と右側に硬化物がある場合の液体樹脂の流動

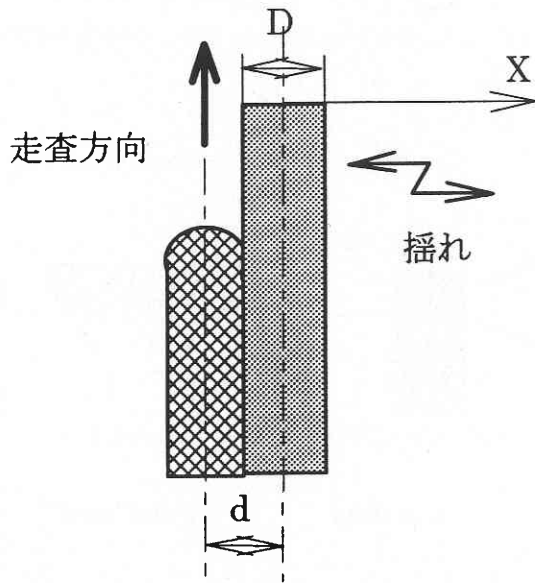


図8 液体樹脂の流動による硬化物の揺れ

表2 右側にある硬化物の揺れ

| | $X_{min} (\mu m)$ | $X_{max} (\mu m)$ |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| 接触 ($\frac{d}{D} < 1$) | -62.5 | 250 |
| 離れ ($\frac{d}{D} > 1$) | -50 | 0 |

場合、既に存在する硬化物(一本の場合)は液体樹脂の流動の影響により外側に押しつけられ、復帰するため、揺れる現象が生じることが確認された(図8)。この揺れの幅は硬化物の成形間隔の有無により変化する。この揺れの幅を表2に纏めた。

4. 総合的考察

液体の流動の原因については液体内部の圧力や比重などの分布が不均一性にあると考えられている³⁾。光造形では紫外線レーザーが樹脂の硬化開始させるプロセスをとって

表3 測定条件

| | |
|--------------|-----|
| レーザー出力[mW] | 26 |
| レーザービーム径[mm] | 1.5 |
| 測定温度[°C] | 25 |
| 照射時間[s] | 5 |

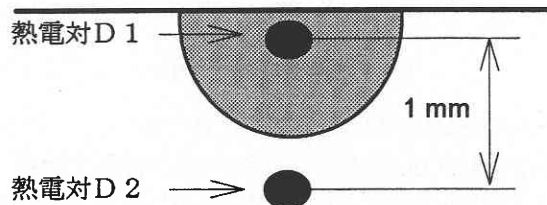


図9 熱電対の設置位置

り、液体樹脂の流動はレーザー照射に基づく樹脂の硬化時の反応熱によるものと考えられる。

この状況を調べるために、レーザー照射の場合の温度変化とレーザーが液体樹脂に点照射する場合における硬化物及び周辺の液体樹脂の温度分布を測定した。

測定は線径0.1mmのアルメルクロメル熱電対を用いて、液面から深さ方向に1mmの間隔で数本浸漬し(図9)、これを包むようにレーザーを照射し、硬化物内部及び周辺の液体樹脂の温度を測定し、その結果を図10に示した。

樹脂なしの熱電対にレーザー照射する場合にその温度は40°C近くまで若干(約10°C)上昇する。しかし、レーザーを液体樹脂(25°C)に照射する場合に硬化物の温度は180°Cまで上昇し、周辺の液体樹脂の温度もそれぞれに上昇した(最大15°C程度)。この硬化物で温度が急激に変化する。これらのことから、硬化時の反応熱により周囲の液状樹脂の比重が生じて不均一になり、その結果、液状樹脂が流動を始めるものと推定される(図11)。

5. 結論

ビデオカメラを用いて紫外線硬化樹脂の硬化過程での動的な状況の観察によって判明した結果および考察を以下に示す。

- 1) 樹脂の硬化に伴って硬化物周囲の液体樹脂が流動している。
- 2) 造形過程で隣接する硬化物の状態に応じて液体樹脂の流動状況が変化した。
- 3) 液状樹脂の流動の原因で隣接する硬化物を揺らす現象がある。
- 4) この流動はレーザーによる樹脂硬化時の反応熱に起因

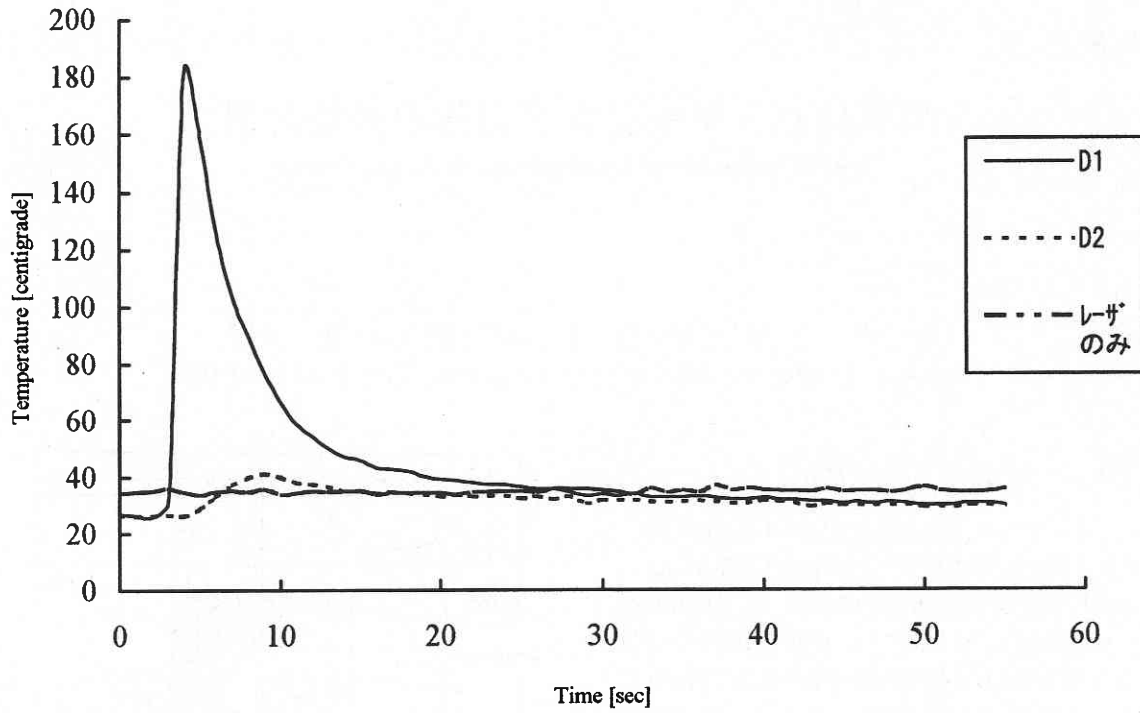


図10 点照射する時の硬化物及び液体樹脂の温度分布

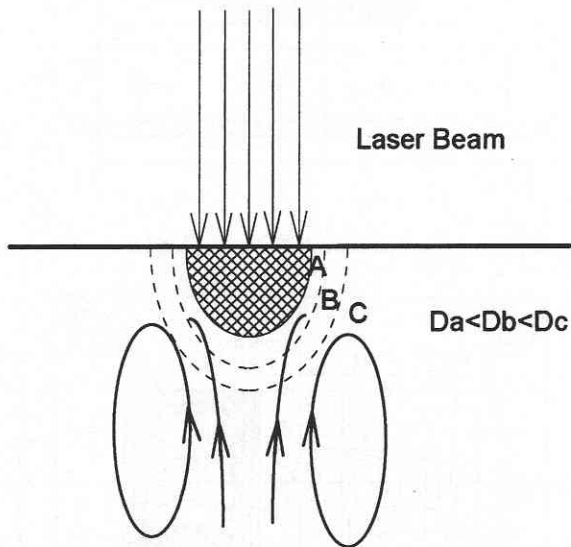


図11 樹脂反応熱により液状樹脂の流動

する。

今後は、連続硬化時の硬化物自体の反応熱とそれによって生じる流動がその硬化物自体に及ぼす影響を中心に研究を進める予定である。
(1995年12月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 徐毅ら：紫外線レーザー硬化物の硬度測定による硬化特性の考察，1994年度秋季大会学術講演会論文集，629，620.
- 2) 徐毅ら：光造形における反り変形の解析（第1報）露光量分布に依存する硬化収縮について，1995年度春季大会学術講演会論文集，891，892.
- 3) 流体力学ハンドブック，1987，（丸善），P475.