

北大工 ○岡田正幸、橋原弘之、三好隆志、斉藤勝政

1. はじめに

製品の意匠検討の際に重要な模型を作製する一手法として、光学的立体形状作製法が有望視されている。それは液状の光硬化性樹脂に紫外線を照射、走査することで平板状に硬化させ、これを繰り返して積層することにより立体を作製するものである。

この手法により作製される模型を高精度なものにするためには、加工条件に関する知識が必要である。特に硬化深さを正確に制御することは、模型の面精度を高めたり、十分な強度をもたせるために非常に重要である。しかしながら紫外線ビームを走査させる場合、その走査速度が変化すると樹脂に対する照射エネルギーも変化し硬化深さを均一に保つことができない。したがって硬化深さを一定に保つためには走査速度に応じて光強度を変化させる必要がある。

本報では、第一報で述べた形状形成因子について、硬化深さに影響を与えるものについて考察し、次にそれをもとに樹脂液面に集束光を走査して硬化させる加工場面を想定し、その場合の走査速度と光強度の関係について検討する。

2. 原理

樹脂の光硬化は光ラジカルによる重合、橋かけによるものであり、硬化形状は照射される光の強度分布に依存する。Lambert-Beerの法則¹⁾によれば、吸収係数 α の媒質に強度 I_0 の光が入射し距離 d の位置で強度 I になったとすると、

$$I = I_0 \exp(-\alpha d), \quad (1)$$

$$\alpha = a c, \quad a: \text{分子吸光係数}, c: \text{濃度}$$

が成り立つので、硬化深さは樹脂の種類や濃度に影響を受けると考えられる。一方、図1に示すように半径 r 、中心部の光強度 I_0 の集束光を速度 V で走査する場合を考える。

2) 液表面における光強度分布 $i_0(x, y, t)$ がガウス分布をなしているものとするれば、

$$i_0 = I_0 \exp\left[-\frac{1}{r^2}\left\{(x-Vt)^2 + y^2\right\}\right]$$

となる。よって任意の点 $P(x, y, z)$ における露光量 $E(x, y, z)$ は、

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} i_0 \exp(-\alpha z) dt$$

すなわち、

$$E = I_0 \pi^{1/2} (r/V) \exp(-y^2/r^2) \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

となる。ただし α は時間によって変化しないものとする。上式よりある硬化深さ d が与えられれば、その硬化に必要な露光量 E_d が求められるので、 d を一定に保つための V と I_0 の関係がわかる。

3. 特性実験

樹脂の硬化特性で硬化深さについて光強度、照射時間を変えて実験を行った。実験装置の構成を図2に示す。試料として表1のものを用いた。図3の相対強度分布の紫外線を露光後、マスクを取り出しマスク下部に付着した硬化物の最大硬化深さを測定した。

4. 実験結果

2種の樹脂に対して、硬化深さと光強度あるいは照射時間との関係を表す曲線を図4、図5に示す。以下は硬化深さと光強度の関係について示すが、図6は光開始剤の濃度を変えた場合、図7は樹脂の温度を変えた場合、図8は暗反応による硬化反応を調べたものである。以上の結果をまとめると、次のようになる。

1989年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集

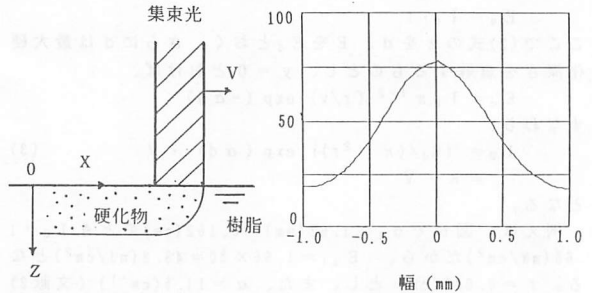


図1. 集束光走査による硬化の概要

図3. 入射光の相対光強度分布

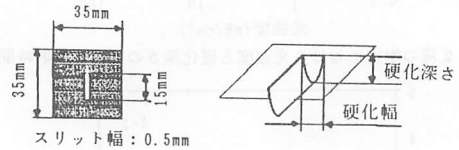
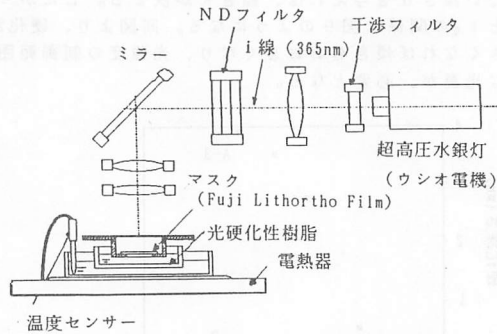


図2. 実験装置の構成

	A-1	A-2	A-3	B
SP-1507	47	48	49	49
SN-EX 7438	47	48	49	49
DARCUR 1173	6	4	2	-
DARCUR 1664	-	-	-	2

SP-1507: 昭和高分子製エポキシアクリレート
 SN-EX 7438: サンノブコ製多官能アクリルモノマー
 DARCUR 1173: サンノブコ製光開始剤
 DARCUR 1164: サンノブコ製光開始剤

表1 使用した樹脂の組成

- ① これらの樹脂については20-60℃の温度範囲では顕著な温度依存性はみられない。
- ② これらの樹脂では光照射時のみ反応が進行する。
- ③ 硬化深さは光強度、照射時間によって制御できる。
- ④ 硬化深さは、(1)式からもわかるように樹脂の光開始剤の種類のはかに濃度によっても制御できる。

5. 集束光走査における加工条件

ここでは図1で想定した場面で、硬化深さを一定に保つための走査速度Vと光強度 I_0 の関係を求める。樹脂はA-1を使用するものとする。

いま図6を用いて硬化深さがdに達した時の光強度 I_d を求めると、前述した E_d は以下のように求まる。

$$E_d = I_d \cdot t$$

ここで(2)式のzをd、Eを E_d とおく。さらにdは最大硬化深さを意味するものとし、 $y = 0$ とおけば、

$$E_d = I_0 \pi^{1/2} (r/v) \exp(-\alpha d)$$

すなわち、

$$I_0 = \{E_d / (\pi^{1/2} r)\} \exp(\alpha d) \cdot V \quad (3)$$

$$\equiv k \cdot V$$

となる。

例えば、図6で $d_1 = 1.62(\text{mm}) = 0.162(\text{cm})$ のとき $I_{d_1} = 1.66(\text{mW}/\text{cm}^2)$ だから、 $E_{d_1} = 1.66 \times 30 = 49.8(\text{mJ}/\text{cm}^2)$ となる。 $r = 0.025(\text{cm})$ とし、また、 $\alpha = 11.5(\text{cm}^{-1})$ (文献3)による手法を用いて再度厳密に測定した α の初期値であるから、 $k_1 = 7.26 \times 10^3(\text{mJ}/\text{cm}^3)$ となる。このように一定に保ちたい深さdを与えれば、傾きkが決まる。したがって、Vと I_0 の関係は図9のようになる。同図より、硬化深さが大きくなれば傾きもおおきくなり、光強度の制御範囲が大きな光源が、必要となる。

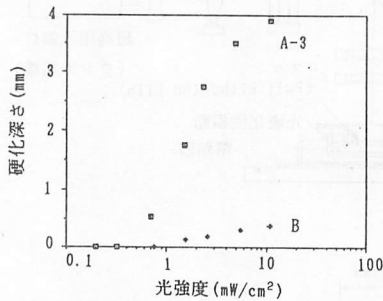


図4. 2種の樹脂における光強度と硬化深さの関係(照射時間:30sec)

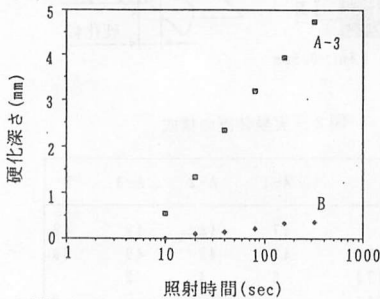


図5. 2種の樹脂における照射時間と硬化深さの関係(光強度:1.5mW/cm²)

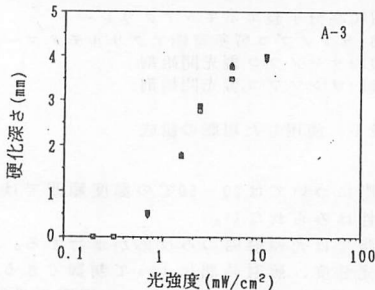


図7. 硬化深さの温度による影響(照射時間:30sec)

6. おわりに

光化学反応を利用した立体形状作製システムの開発を目的として、形状形成にかかわる樹脂の挙動についての実験を行った。特に硬化深さを支配する諸因子について考察を行い、それをもとに集束光を走査することによって樹脂を硬化させる場合を考え、硬化深さを一定に保つための走査速度と光強度の関係式(3)を求めた。

式(3)は、理論上のものなので、今後具体的な実験による比較検討を行う必要がある。

最後に樹脂を提供してくださいました日本合成ゴムの、田上氏、杉本氏、五十嵐氏にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 工藤:「光物性の基礎」オーム社 pp72
- 2) 中井、丸谷:「紫外レーザー露光による光硬化性樹脂の硬化測定」レーザ研究, Vol16, No1, pp14-22(1988)
- 3) 橋原、岡田、三好、斉藤:「光学的立体形状作製システムの研究(第一報)」1989年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文集, pp995

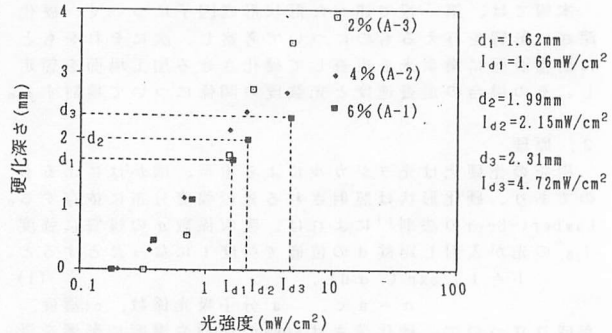


図6. 硬化深さの開始剤濃度による影響(照射時間:30sec)

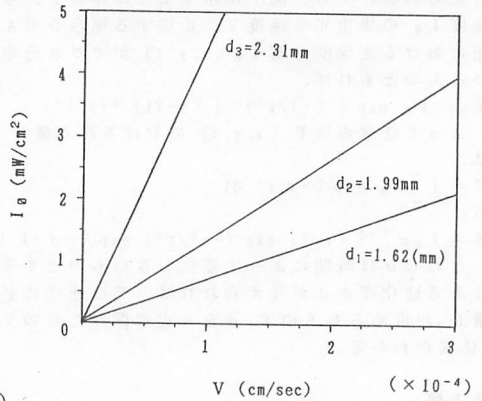


図9. 深さdを一定に保つための走査速度Vと入射光強度 I_0 の関係

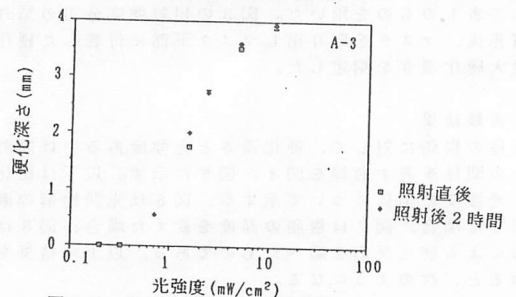


図8. 暗反応による硬化(照射時間:30sec)