

## 学位論文題名

## 光造形法の立体形成機構に関する基礎研究

## 学位論文内容の要旨

光造形法とは、紫外線により硬化する感光性樹脂へ、紫外線レーザを任意の立体断面形状に走査・照射して樹脂を硬化させ、積層することにより立体模型を形成する技術である。光造形法は、医療分野などで光造形法でなければ従来実現できなかった利用方法の開拓が行なわれ、大きな成果をあげてきている。工業的な利用では、鋳造・試作・意匠モデルとしての用途が試みられているものの、造形された模型が産業界の要求する精度レベルに到達していないことが問題となっている。この問題を解決するためには、樹脂の微小体積で起きている硬化現象を解析することが必要であり、物理現象のモデル化やプロセス制御技術を再検討することにより精度の高い立体を造形する方法を明らかにすることが望まれている。

本論文は、上記の課題に関して研究を行なった結果について論述したものであり、8章から構成されている。

第1章は序論であって、本研究の背景・従来の問題点・本研究の目的について述べるとともに、光造形法の研究動向について記述した。また本論文の構成と概要についても言及した。

第2章では、感光性樹脂の硬化実験を行ない、単位硬化形状の硬化深さの測定から実験結果を統一的に表現できる実験式を求めた。さらに、その実験式に基づき感光性樹脂間の硬化特性比較を行ない、硬化深さ変動を最適にする条件の見積方法を提案した。

第3章ではKogelnik, Selfらの用いたレンズによるガウシアンレーザビームの変換理論に基づき光造形法における硬化単位形状を規定する光学系の解析を行い、レーザ光伝搬の性質を調べ、望ましいレーザ光学系の配置について検討した。

縦多モードレーザビームを使用した場合のビームウェスト解析を行ない、現在光造形法で用いられている2レンズ系によるスキャナ光学系は、縦多モードレーザビームの各波長のビームウェストを異なった位置に結像させることを明らかにした。上記の現象は、レンズの屈折率に起因する色収差とは違う現象であり、レーザ光が空間を伝搬する際に起こる波面変換が、各波長で異なるために引き起こされることを数式的に明らかにした。干渉フィルタを用いたビーム半径の測定実験により、理論的に予測された現象が現実に起こっていることを示した。また理論解析に基づき、縦多モード紫外発振Arレーザの場合でもビームウェストのずれが最小になる光学系の設計方法を提案した。

第4章では硬化形状の理論的予測を行なうために、3章で行なった解析式に基づき、実際の光造形装置におけるレーザ光のパワー密度空間分布を規定する

パラメータを同定する方法を提案した。非線型な関係を有している6つのレーザーパラメータを得る必要があることを示し、非線型最小二乗解法のMarquardt法を採用して、非線型解を求める方法を提案し、上記レーザーパラメータが算出できることを示した。

単位硬化形状を解析する上で必要となる、理論的レーザーパワー密度推定値の必要精度を検討した。一般的な光造形法の吸収係数の値を用い、硬化深さの予測精度を $10\mu\text{m}$ とした場合、硬化モデルに基づいて必要とされるエネルギー推定値の推定精度が $\Delta u_0/u_0=0.04\sim 0.1$ 程度必要となることを示した。そして、本方式で求めた推定値が半径 $50\mu\text{m}$ より端の部分では、 $0.1$ 以上でよく推定が行なわれていることを示した。

第5章は、光造形模型の表面粗さについて、その要因を理論的に解析した。また光造形法の従来の理論に関する単位硬化物の輪郭形状の予測について、レーザー光のデフォーカスによる硬化実験を行い、実際の硬化輪郭形状と予測値との対応関係を調べた。

単位硬化形状は、模型の表面粗さを形成する一要因であり、粗さを低減するために単位硬化形状を解析することの意義を示すとともに、理論的表面粗さの解析を行なった。解析結果から、表面粗さの改善には、単位硬化形状の輪郭の傾き $\phi$ を小さくする、層厚さ $L$ を小さくする、斜面の傾き $\theta$ が小さくなるものは造形しないようにするなどの対策が考えられることを示した。

単位硬化形状について、He-Cdレーザー光で使用されていた単一ガウシアンパワー密度分布モデルをそのままArレーザービームに適用した場合と、縦多重モードモデルによる場合の硬化形状の予測結果と実験結果とを比較した。レーザー光をガウシアン分布とした硬化形状推定法を常に用いたりせず、各装置のレーザーパワー密度分布に基づいた予測をしないと形状推定誤差が大きくなることを、推定形状と実硬化断面形状との比較により示した。

第6章は、光造形法の硬化反応による立体形成を反応速度理論から展開し、実験結果と比較した。その結果、光造形法の硬化モデルは従来用いられていたエネルギー硬化モデルではなく、重合反応速度に基づいた硬化モデルを構築すべきであることを提案した。

第7章では、光造形模型の表面粗さを向上させる造形プロセスの基本的原理を提案した。模型の表面粗さモデルに基づき具体的な粗さ低減方法について考察した。従来の造形方法では傾斜の小さい斜面の表面粗さが問題となることを指摘し、引き上げ照射により層間の段差を埋め、表面粗さを低減する新しい光造形プロセスを提案し、その具体的な装置構成を示した。顕微鏡観察および断面曲線の測定より、提案する造形プロセスによる成形物の表面粗さと、従来法による場合の表面粗さとを比較した。傾斜角 $40$ 度以下では粗さが改善されていることが確認された。特に $30$ 度以下の傾斜面では平均粗さが $15\mu\text{m}$ 以下となり、従来法と比較して本手法が特に有効であることが確認された。

第8章は、本研究の結論であって、得られた結果を総括した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 齋 藤 勝 政

副 査 教 授 池 田 正 幸

副 査 教 授 岸 浪 建 史

学 位 論 文 題 名

## 光造形法の立体形成機構に関する基礎研究

光造形法は、紫外線レーザーの光スポットを任意の立体断面形状に走査・照射して感光性樹脂を硬化・積層させて立体模型を形成する加工技術であり、立体形状のCADデータを用いて三次元的な物理模型を迅速に製造する生産技術であるが、その基礎的な加工機構は解析されていない。

本論文は、光造形法における加工硬化単位の生成機構に関する基礎的な解析と実験結果をまとめたものであり、8章から構成されている。

第1章は序論であって、本研究の背景・従来の問題点・本研究の目的について述べるとともに、光造形法の研究動向について記述している。

第2章では、感光性樹脂の硬化実験を行ない、単位硬化形状の硬化深さの測定から実験結果を統一的に表現できる実験式を求めている。さらに、その実験式に基づき感光性樹脂と光造形装置との組み合わせ最適化問題について論じている。

第3章ではKogelnik、Selfらの用いたレンズによるガウシアンレーザービームの変換理論に基づき光造形法における硬化単位形状を規定する光学系の解析を行い、レーザー光伝搬の性質を調べ、望ましいレーザー光学系の配置について検討している。理論解析に基づき、縦多モード紫外発振Arレーザーの場合にビームウェストのずれが最小になる光学系の設計方法を提案している。

第4章では硬化形状の理論的予測を行なうために、3章で行なった解析式に基づき、実際の光造形装置におけるレーザー光のパワー密度空間分布を同定する方法を提案している。非線型最小二乗解法のMarquardt法を採用して、非線型解を求める方法を提案し、パワー密度分布定数が算出できることを示している。また単位硬化形状を解析する上で必要となる理論的レーザーパワー密度推定値の必要精度を検討し、本方式で求めた推定値が実用範囲でよく推定が行なわれていることを示している。

第5章は、光造形模型の表面粗さ形状の要因を理論的に解析している。単位硬化形状は、模型の表面粗さを形成する一要因であり、単位硬化形状を解析することの意義は大きい。解析結果から、表面粗さの改善の方法を分類している。またレーザパワー密度分布モデルにより縦多重モードレーザ光と粗さ因子との因果関係を求めている。

第6章は、硬化境界関係式を重合反応速度理論に基づいた硬化モデルから導出し、照射パワーと走査速度がべき乗の関係となる結果を得ている。硬化実験から硬化深さと照射レーザ光との関係式を導出し、硬化臨界条件が走査速度と照射パワーとのべき乗の関係にあるとした理論予測による硬化モデルの妥当性を示している。

第7章では、光造形模型の表面粗さを向上させる造形プロセスの基本的原理を論じ、模型の表面粗さモデルに基づき具体的な粗さ低減方法を提案している。まず従来の造形方法では傾斜の小さい斜面の表面粗さが問題となることを指摘し、引き上げ照射により層間の段差を埋め、表面粗さを低減する新しい光造形プロセスを考案し、その具体的な装置構成を示している。提案する造形プロセスによる成形物の表面粗さと、従来法による場合の表面粗さとを比較した結果、傾斜角40度以下では粗さが改善されていることが確認されている。特に30度以下の傾斜面では平均粗さが15  $\mu\text{m}$ 以下となり、光造形模型の表面粗さを改善する工業的に有用な手法として評価されるものである。

第8章は、本研究の結論であって、得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、光造形法における硬化加工単位の基礎的な形成機構の解析を行い、光造形法に関する工学的および工業的な有益な新知見を得ており、精密工学ならびに生産情報制御工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。