

3次元CADモデルの作成と光造形法の適用 - 自動2輪前輪部のハブの試作 -

浜松職業能力開発短期大学校 池本和夫

Production of Three-Dimensional CAD Model and an Application by Laser
Photolithography
(Trial Production of a Front Wheel Hub for Motorbike)

Kazuo IKEMOTO

要約 多くの物づくり技術がコンピュータ技術と結びつく中で、3次元CAD技術はその中核を占め、3次元CADデータを中心とする設計・生産情報は、製品の開発期間の短縮などに活用の効果が認められている。光造形法に代表される積層造形技術は、製品開発におけるコンカレントエンジニアリングの主要技術の一つとして注目されている。3次元CADデータから実物を出力する方法については、従来CAD/CAMおよびマシニングセンタなどによる切削除去加工しか存在しなかった。光造形法は、3次元CADデータから作成した形状スライスデータに対応して、樹脂にレーザーを照射して層状の硬化した断面を積み重ねて造形する新しい方法である。試作型を製作することなく、プロトタイプモデルを短時間に作成できるため、光造形システムの導入や技術の習得に強い関心を示している企業は数多い。3次元CAD技術が普及している金型および木型製造業の能力開発セミナー受講者の方々からも、光造形法に関する能力開発セミナーを開講して欲しい旨の要望を頂いた。本研究では、能力開発セミナーのコース開発を目的として、実際の製品を対象に作成した3次元CADモデルに、光造形法を適用する際の留意点を検討した。その結果、STLデータの編集におけるミスキの修正、サポートの付着状況や造形時間を考慮したモデルの造形姿勢の選択、および剛に付着したサポートを除去した面への仕上げ工程の追加などに留意しなければならぬと考えられた。

I 緒言

製品の開発・設計・製造業務の効率化を推進するために、生産システム全体の統合化が求められているが、3次元CAD/CAM/CAEは、その中核として、設計製造期間の短縮、設計製品の品質向上、図面管理の一元化および標準化の促進などに、活用の効果が認められている⁽¹⁾。設計対象物の3次元CADモデルは、設計上流のCAEの形状データや、CAMにおけるNCデータおよび積層造形法 (layered manufactur-

ing) におけるスライスデータの作成を容易にするなど、他の工程との連携をスムーズにする利点がある。

3次元CADモデルから、試作型を製作することなく複雑形状部品を製造できる積層造形法は、樹脂にレーザーを照射して層状の硬化した断面を積み重ねていく光造形法 (laser photolithography) が主流であるが、意匠・形状ばかりでなく機能まで確認できる試作モデルを短時間に作成可能な特殊加工法として位置付けられている。そのため、ラピッド・プロトタイプング (rapid prototyping) 技術と呼ばれることも多い^{(2)~(4)}。

本研究では、光造形法に関する能力開発セミナーのコース開発を目的として、実際の製品を対象に作成した3次元CADモデルに、光造形法を適用する際の留意点を検討した。まず、光造形法を適用する3次元CADモデルの表現手法とデータ変換方法の現状および光造形法の原理を把握した。つぎに、卒業研究を指導した学生の就職内定先から、実際の製品である自動2輪前輪部のハブの2次元図面を提供して頂き、サーフェスを用いた3次元CADモデルを作成した。IGES (Initial Graphics Exchange Specification) 変換後、STL (Stereolithography File) データを作成および編集して、サポート部分と共に造形機に転送するスライスデータを生成した。さらに、加工条件を定義した後で、エポキシ系の紫外線硬化性樹脂を1層ずつ硬化および積層して光造形した。最後に、未硬化樹脂および不要なサポート部分の除去やポストキュアなどの仕上げ処理を加えて、プロトタイプモデルを製作した。その結果判明した、3次元CADモデルのデータ処理や光造形の各工程におけるいくつかの留意すべき事項を報告する。

II 3次元CADモデルの表現方法とデータ処理

投影図を扱う2次元CADが平面としての形状情報しか持たないのに対して、立体形状を扱う3次元CADでは、外観の評価や干渉チェックができるだけでなく、CAEやCAMの入力データとしても利用可能である。CAMにおいては、自動プログラミングへの入力の手間が省け、NCデータの作成時間を大幅に短縮できるだけでなく、作成したNCデータの工具軌跡をモデル上に表示して検証することも可能である。

3次元CADによるモデリング手法には、大別して、ワイヤーフレーム、サーフェスおよびソリッドの3種類がある。ワイヤーフレームモデルは、点と線のみで表現するため簡易であるが、隠線処理や面消去が困難であり、表示や形状認識に曖昧さが残ってしまう。サーフェスモデルは、線で囲まれた領域を面として定義し、面の集合で立体を表現するので自動的に隠線処理はできるが、立体内部の構造は中空なのかどうか指示する必要がある。曲面の表現方法には⁵⁾、四角形の四隅の点と境界曲線で定義される曲面パッチの連続で曲面全体を表すCoons曲面が1964年に考案された。その後、形状制御に微分ベクトルではなく制御点のみを用いて改良したBezier曲面や、曲面全体をひとまとめに表現

して曲面の連続性を改善したB-spline曲面などが提案された。2次曲面も表現できるようにB-spline曲面を改良したNURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面が、現在用いられている主流の表現方法である。ソリッドモデルは、立体形状に関する情報を完全に表現できるが、データ量が多くなる。代表的な表現方法には⁶⁾、基本要素の組み合わせで複雑な形状を表現するCSG (Constructive Solid Geometry) と、立体を囲む境界面と法線ベクトル、位置を表す幾何要素およびつながりを表す位相要素などで表現するB-rep (Boundary representation) 方式などがある。また、最近のソリッドモデルは、形状単位でモデリングを行うフィーチャやパラメトリック設計の機能が取り入れられている。

これらのサーフェスおよびソリッドによる3次元CADモデルから光造形システムへのインターフェイスデータとして使用されているのが、STLフォーマットである。STLデータは、曲面を近似する三角パッチと法線ベクトルのみにより構成され、位相情報を持たない⁵⁾。STLデータの生成時に生じる三角パッチ群の重なりや隙間の検出および修正を行うためには、位相情報を付加した光造形システムの内部データフォーマットに変換して対応する。三角パッチの不具合をなるべく解消した後で、造形中の変形を防止するために、造形対象のモデルにサポートを付加する。サポートは格子状の構造で、モデル本体との接続部は楔形状に作製されるため、造形後簡単に除去できる。また、断面形状の塗り潰し軌跡として、内部を完全に硬化させるか、ハニカム形状にするかなどを選択する。最後に、造形時間と成形後の表面段差などを考慮して、造形機における加工条件設定に対応したスライス間隔を決定し、モデルおよびサポートのスライスデータを作成する。

III 各種積層造形法と光造形法の原理

1 積層造形法の種類

積層造形法によるラピッド・プロトタイプング技術は、CADデータを基にして3次元の複雑形状部品を短時間に製造する技術である。形状造形手法を大別すると⁵⁾⁶⁾、まず、光硬化性樹脂を用いて、部品の断面形状を逐次成形し積層させる光造形法がある。2番目は、粉末のプラスチックやワックスなどの薄い層に、加熱用のレーザを照射させて溶融硬化させる粉末焼結

法がある。3番目は、セラミックスなどの粉末にインクジェットノズルから液状のバインダを選択的に塗布し、鑄造のためのシェルを直接生成する3Dプリンティング手法がある。4番目は、細いノズルからワックスや樹脂を押し出して、細線状樹脂を硬化させながら面状に走査させる樹脂押し出し法がある。最後に、ロール紙を加熱接着した後、レーザあるいはカッターで切断して積層するシート積層法などがある。

2 光造形法の原理

液状の光硬化性樹脂にレーザ光を照射すると、重合反応を生じて硬化するが、光は樹脂表面で吸収されるので、液表面に硬化した薄いプラスチック膜が形成される。3次元CADモデルから作成されたスライスデータを下端から順番に取りだし、形状に基づいてレーザ光を照射して硬化層を形成する。スライス間隔がレーザ光の照射による樹脂の硬化厚さ以下であれば、硬化反応時に硬化中の層とその下の硬化層は強固に接合され、最終的に3次元の立体形状が造形されることになる。

光造形装置は、光走査機構、積層機構および樹脂液タンクなどが主体である。スライスデータの断面形状に対応して樹脂表面にレーザ光で直接描画する光走査機構には、NCテーブル方式と電磁ミラー方式がある⁽⁵⁾。NCテーブル方式は、光ファイバなどを数値制御のXYテーブルやロボットアームにより2次元的に移動して照射位置を制御する方法である。電磁ミラー方式は、2枚の回転ミラーによりレーザ光を2次元に偏向する方法であり、直径が10mm以下の小ミラーを電磁トルクで任意角度に回転して偏向するので、高速走査が可能で小型軽量になるが、照射範囲を広くすると描画の歪みが問題になる。レーザ光には、紫外光を連続出力できるArレーザおよびHe-Cdレーザなどを用いる⁽⁷⁾。He-Cdレーザは、Cdを加熱して蒸気とし、Heの中で放電・イオン化して325nmの紫外光を発振させる。空冷が可能で、小型、軽量および安価のためHe-Cdレーザが適しているが、大出力を要する場合はArレーザを用いる。レーザ光を走査して硬化した層の上に所定の厚さの未硬化樹脂層を形成する積層機構には、規制液面法と自由液面法がある⁽⁹⁾。規制液面法は、樹脂液タンクの底面の透明板に沿って形成される液面にレーザ光を照射し、硬化後に透明板から引き離すことにより、硬化層と透明板との間に未硬化樹脂を浸入させて次の層を形成する方法である。自由液面法は、樹脂液タンクの上方に開放された水平な気液境界面に対

して大気側からレーザ光を照射し、1層の硬化が終わると硬化した表面を樹脂中に沈めることにより、新たな未硬化樹脂層をその上に形成する方法である。多くの実用装置で採用されているのは自由液面法であるが、ベースプレートの下方移動後に液面を安定する必要がある。

光硬化性樹脂は、光重合性のプレポリマとモノマおよび光重合開始剤の混合液体である⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。プレポリマは物理的な特性を決定づける主成分であり、粘度の高いアクリレートやエポキシなどの種類がある。モノマは樹脂全体の流動性を改善する希釈剤であり、光重合開始剤は光エネルギーにより解離して重合反応を開始する核になる。重合反応の形態に着目すると、アクリル系樹脂が主体のラジカル重合型とエポキシ系樹脂を主成分とするカチオン重合型に分類される。市販の樹脂の大半はラジカル重合型であるが、エポキシ系のカチオン重合型樹脂の方が、硬化反応が完全で機械的性質に優れていること、硬化時の体積収縮率が低く変形しにくいこと、および低粘度で扱いやすいことなどの利点がある。カチオン重合型の光硬化反応の概要⁽⁷⁾は、まず、光重合開始剤が紫外線エネルギーを吸収して、カチオン重合を開始させる芳香族ジアゾニウム塩系の触媒成分を放出する。これが分解して活性なルイス酸を発生し、エポキシ系樹脂などを重合する。工業的に入手可能なエポキシ系のカチオン重合性樹脂のなかで、環脂肪族系エポキシ樹脂は重合速度が速いので光造形に有用と考えられている。

光走査および積層工程に要する時間は、(1)式で表される造形時間に依存する⁽⁵⁾⁽⁷⁾。

$$\begin{aligned} \text{(造形時間)} &= \text{(積層回数)} \times (\text{1層の平均走査時間} + \text{未硬化層形成時間}) \\ \text{(積層回数)} &= \text{(モデルの高さ)} / \text{(スライス間隔)} \\ \text{(1層の走査時間)} &= \text{(断面積)} \times \text{(走査密度)} / \text{(走査速度)} \\ \text{(未硬化層形成時間)} &= \text{(液面沈下時間)} + \text{(液面安定時間)} \\ &\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで、走査密度はスライスデータの断面形状で樹脂が占める割合を示す充填率である。

積層工程が終了した後、ベースプレートから成形物を取り出して仕上げ作業を追加する必要がある。まず、未硬化樹脂および不要なサポートを除去して、造形物の表面を溶剤で洗浄する。つぎに、紫外線照射による2次光硬化と加熱による熱硬化などのポストキュアが必要である。最後に、ドリルによる穴開けやタップ立てなどの機械加工と要求される表面精度に応じた研磨

の工程を追加する。

最近の光造形システムでは、光硬化性樹脂の物性改善、光源に高出力の固体半導体レーザーの採用、およびSTLフォーマットの問題点を解決した新しいデータ受け渡し形式の開発などが試みられている^{(9)~(11)}。

IV 3次元CADモデルの作成

自動2輪前輪部のハブを対象に、作成した3次元サーフェスモデルを図1に示す。また、図1の3次元モデルから作成した各視点の2次元投影図を図2に示す。CADのアプリケーションソフトウェアは、図1の作成には日立造船情報システム(株)のGRADE/CUBE-NCを、図2の作成にはAutoDesk社のMechanical Desktopを使用した。

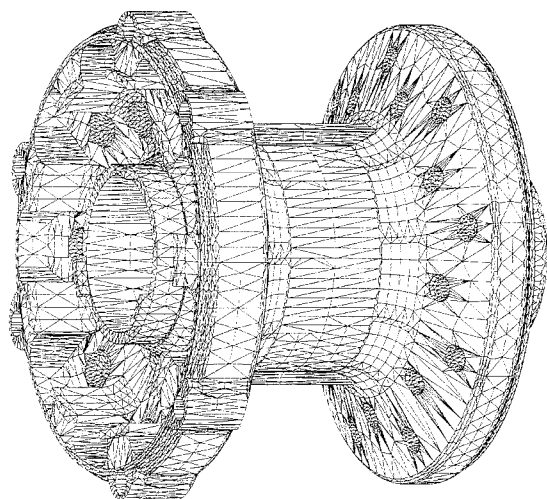


図1 3次元サーフェスモデル

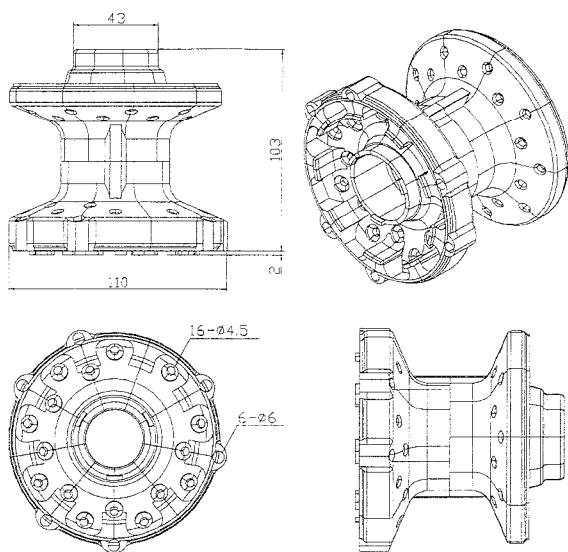


図2 2次元投影図

1 3次元サーフェスモデルの作成

自動2輪前輪部のハブのモデリング手法には、複雑な曲面部分のモデル化を考慮して、サーフェスを採用した。フィーチャによるソリッドモデリングの適用も試みたが、複雑なフィレットや曲面、および曲面に配置する穴形状の作成などに充分対応できなかった。図3に、図1の3次元サーフェスモデルを作成した手順の概要を示す。

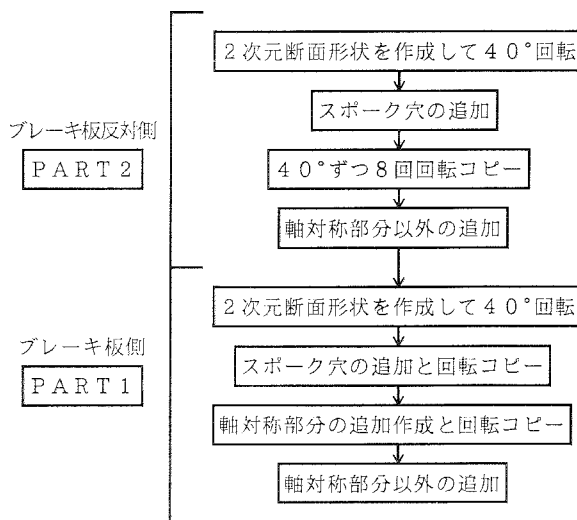


図3 3次元サーフェスモデルの作成手順

ハブをシャフト穴に直交する断面で、ディスクブレーキ板側のPART1と反対側のPART2の2つに分割してモデリングした。まず、シャフト軸周りに回転させるPART2の2次元断面形状を作成した。軸周りに40°回転させた曲面に、スポーク穴の断面と回転軸を、各々0°、20°および40°の位置に配置した。回転軸周りに360°あるいは180°回転させてスポーク穴を作り、軸対称モデルの1/9を仕上げた。これを、シャフト軸周りに40°ずつ8回回転コピーした後、軸対称以外の付帯する構造を追加してPART2を完成した。この段階で、比較的形状の簡単なPART2のサーフェスモデルに対して光造形法を適用し、3次元形状の半分が成形されることを確認した。つぎに、PART1の2次元断面形状をPART2との相対位置関係に注意して作成した。40°ごとの軸対称部分はPART2と同様に回転コピーして作成したが、120°ごとの対称部分などは追加作成した。また、ディスクブレーキ板を固定する穴や突出部、およびスポーク穴の無い部分などは、別途作成および編集した。

曲面にスポーク穴の断面形状を作成する際の作業平面の設定や、PART1のディスクブレーキ板の取り付

け部に作成した曲面の角部がかなりの鋭角になり、トリムコマンドを適用する際などに工夫を要した。なお、図1の曲面の表示は、形状を認識しやすくするために、隠線処理と曲面を三角形および四角形パッチの組み合わせで表示する処理を施している。

2 2次元投影図の作成

図1の3次元CADモデルに対して、サーフェスのトリム境界の構成点を最適化し、IGES変換したときのモデルサイズを約4割軽減した。これは、IGESファイルをMechanical Desktopに読み込み、正面図、平面図、側面図、および等角図に対応した視点を作成する際、モデルの容量が大きいことによる所要時間を軽減するためである。企業から提供して頂いた2次元図面をそのまま掲載することはできないので、図2の2次元投影図を作成したが、形状の概要が把握できる程度に参照寸法などの記入を手控えた。また、曲面部分の存在およびPART1とPART2のスポーク穴の配置状況の角度差などが認識しやすいように、曲面に面内線を描いたり、隠線を非表示にしている。

V 光造形法によるプロトタイプモデルの製作

積層造形手法としては、エポキシ系の光硬化性樹脂を用いて、紫外レーザー光の照射により断面形状を逐次成形し積層させる光造形法を適用した。STLデータおよびスライスデータの作成ならびに編集には、DeskArtes社のRapid Toolsを、光造形装置には、平成10年3月に導入されたElectro Optical Systems (EOS)社のSTEREOS Desktop Sを使用した。光硬化性樹脂には、Du-pont社のカチオン重合性の環脂肪族系エポキシ樹脂SOMOSTM 6110を、未硬化樹脂を洗浄する溶剤にはTPM (Tri Propylene glycol Monomethyl)を使用した。図4に、光造形によるプロトタイプモデルの作成手順の概要を示す。また、図5に、光造形により作成したプロトタイプモデルを示す。図5の左側は、造形後に白色のスプレー塗料を塗布したものである。

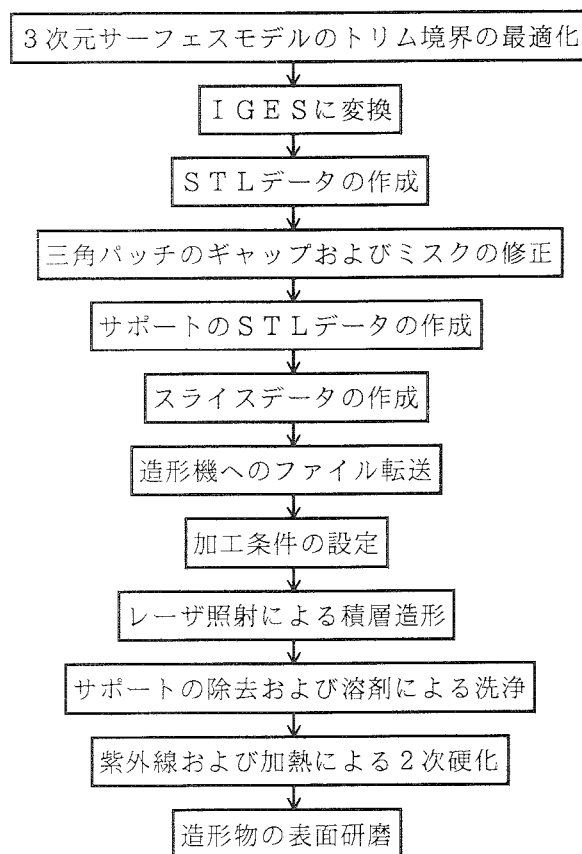


図4 光造形によるプロトタイプモデルの作成手順

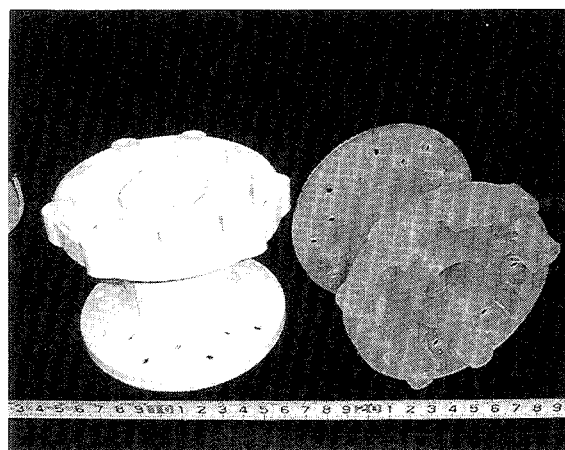


図5 光造形により作成したプロトタイプモデル

1 STLおよびスライスデータの作成

まず、IGES変換した3次元サーフェスモデルを、Rapid Toolsに読み込み、トリムカーブやサーフェスのループおよび重複などをチェックした。つぎに、多面体を構成する三角パッチの不具合である、隙間を示すギャップ (gap) と交差・独立などを示すミス (misc)¹²⁾をなるべく生成しないように、三角パッチの精度、トリムカーブの精度、隙間埋めをするギャッ

プのサイズ、および三角パッチの最大長さなどのパラメータを設定して、STLデータへ変換した。作成したSTLデータは、三角パッチの頂点移動および新たな三角パッチの追加などにより、ギャップとミスクを無くすように修正を加えた。ギャップの修正は比較的容易にできたが、複数の要因を含むミスクは、一部修正できない箇所が残存してしまった。しかし、拡大表示して、モデルの成形にはほとんど影響がないことを確認した。精度の良いハブ本体のSTLデータを完成させた後で、造形時にハブの積層部分の変形を防止するためのサポートを、STLフォーマットのハッチパターン形状で作成した。

スライスデータは、スライス間隔などのパラメータを設定して、STLデータから作成したが、閉じていないスライスの層が無いことを十分に確認した。本研究では、造形時間などを考慮して、ハブ本体およびサポートのスライス間隔を両方とも0.2mmに設定した。なお、造形機には、スライスデータのみを校内ネットワークを介してファイル転送した。

2 造形機によるモデルの成形

光造形装置の光走査機構は、2枚のガルバノミラーを用いた電磁ミラー方式で、紫外レーザー光は、波長325nm、出力40mWのHe-Cdであり、レーザーの位置誤差は $\pm 50 \mu\text{m}$ を保証している⁽⁶⁾。積層機構は自由液面法で、ベースプレートをスライス間隔だけ下降させた後の液面の整定には、20~40mm/sの速度でワイパを往復駆動する方法を採用している。ワイパの下端からはポンプで汲み上げた光硬化性樹脂を滴下させて、新たな未硬化樹脂層を形成する。なお、ベースプレート上で造形可能な最大寸法は、250×250×250mmである⁽⁶⁾。

まず、転送してきたスライスデータに対して、ハブ本体部分およびサポート部分の各々に積層条件のパラメータを設定し、ベースプレート上の配置位置を決めた。配置位置は、液面整定時間を短くするために、ワイパの初期位置に近い場所を選定した。つぎに、加工条件として、レーザーによるExposureパラメータ、積層数、RecoatingパラメータおよびBuildingパラメータなどを設定して光造形を開始した⁽⁶⁾。

図5のプロトタイプモデルの場合、ハブ本体およびサポートのスライス間隔を0.2mmに設定したので、積層方向により相違はあるが、約15~17時間の造形時間を必要とした。ベースプレートをスライス間隔0.2mmだけ降下させるときの速さは1mm/s、ワイパを

最大長さ305mmだけ往復駆動させるときの速さは30mm/sに設定した。したがって、液面沈下時間は0.2秒、液面整定時間の最大は20.3秒になる。ただし、造形物の配置位置をワイパの初期位置に近づける工夫により、最大長さ約160mmを約10.7秒で液面整定するように設定した。積層回数は、スライス間隔が0.2mmなので、PART1とPART2を上下あるいは左右にして積層すると、約545~570層である。(1)式より、最大走査速度2000mm/sでの1層の平均走査時間は約88秒であり、造形時間に占める走査時間の割合は約90%になる。造形時間を短くするために、レーザーの出力を高めて走査速度を上げたり、スライス間隔を大きくして積層回数を減少させることは装置性能の制約がある。造形方法の工夫としては、造形姿勢をモデルの高さが低くなるように調整する方法と、走査密度を低くするように断面形状の塗り潰し軌跡をハニカム形状に設定する対策が考えられる。ただし、ハニカム形状にした場合、造形後に穴を開けて未硬化樹脂を排出するか、CADモデルにあらかじめ穴を開けておく必要がある。今回のモデルには、大きなシャフト穴、多数のスポーク穴およびディスクブレーキ板固定用の穴があり、比較的薄肉断面のためハニカム形状には設定しなかった。

造形終了後の後処理として、まず、不要なサポート部分を除去し、ハブ表面の余分な未硬化樹脂を溶剤のTPMで洗浄した。その後、紫外線による2次光硬化およびオープンによる加熱を施した。サポートを除去した部分は、サンドペーパーをかけて表面を研磨し、水で表面を洗浄してエア乾燥させた。また、光硬化性樹脂を浸した布で表面を拭いて表面の凹凸を埋めた後、紫外線を照射させるなどの工夫を加えたが、サポートが剛に付着していた部分の表面を滑らかに仕上げるのは困難だった。

図5のプロトタイプモデルは、図1の3次元CADモデルを反映した形状に造形できたと考える。ディスクブレーキ板側のPART1あるいは反対側のPART2を下面にして積層した場合、上部の層が落下および変形しないように段付き部分にサポートが剛に付いた。高さ4mmのサポートのみの層を含む積層数は545層で、造形時間は約15時間を要した。PART1およびPART2を左右にして積層した場合は、シャフトおよびスポーク穴の内部にもサポートが付いた。合計570層に要した積層時間は、約17時間だった。各々のサポートが剛に付着した部分は、除去した面の精度が劣化してしまったので、積層方向だけでなくサポートデータの作成お

よび編集に工夫を加える必要があると考える。また、0.05~0.1mm程度の表面段差をも問題にする場合は、時間をかけた丁寧な研磨仕上げの工程が必要になると考える。

VI 結 言

本研究では、光造形法に関する能力開発セミナーのコース開発を目的として、実際の製品を対象に作成した3次元CADモデルに、光造形法を適用してプロトタイプモデルを製作する際の留意点を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 2次元の図面データから、ハブの3次元サーフェスモデルを作成した。その際、複雑な曲面を構成するエッジの構成点数および許容誤差に留意した。また、軸対称な構造を把握して、回転コピーコマンドを適用したり、要素のクラス設定などに工夫を加えて、CADモデルを精度良く短時間で作成できるようにした。
- (2) STLデータの編集の際、三角パッチ間のギャップの修正は比較的容易にできた。交差・独立した三角形パッチなど複数の要因を含むミスは、一部修正できない箇所が残存したが、モデルの成形にはほとんど影響がなかった。
- (3) PART2を下面にして積層した場合、サポートのみの層が高さ4mmで20層、ハブとサポートの両方を含む層が高さ105mmで525層になり、合計545層を積層するのに要した時間は約15時間だった。データ容量が大きいCADモデルのため、ラピッドプロトタイピングとはいえ長時間を要したが、試作型の製作を行う必要がないメリットは大きいと考える。
- (4) サポートが剛に付着した部分の表面精度に問題は残るが、3次元CADモデルを反映した形状に造形できた。ただし、剛に付着したサポートを除去した面には、時間をかけた仕上げ工程が必要になった。
- (5) 3次元CADモデルを回転してモデルの造形姿勢を変更することにより、サポートの付着状況や造形時間を比較した。また、造形時間を短くするために、ベースプレート上の造形物の配置位置を、ワイパの初期位置に近づける工夫を加えて、一回の液面整定時間を約10秒に短縮した。今後の課題としては、数多くのモデルに対して光造

形法を適用することにより、STLデータにおけるミスを完全に無くす方法や、造形時間を考慮したより良い積層方向の設定方法などに対するノウハウを蓄積する必要があると考える。

VII おわりに

光硬化性樹脂を取り扱う実習では、樹脂の保管、作業場所の換気、作業者の皮膚や目あるいは衣服への付着を避けること、および廃棄物の処理などに留意し、応急処置を理解しておく必要がある⁽¹³⁾。

なお、事業内援助（平成10年12月、平成11年2月、4月実施）および能力開発セミナー（平成11年6月~7月実施）において、実際の製品を対象に3次元CADモデルの作成と光造形法を適用したプロトタイプモデルの造形を数例試みたが、本研究の経験が反映できたと考える。

謝 辞

本報告は、平成10年度の卒業研究の1つのテーマとして取り上げた内容であり、同年度卒業生の鈴木秀輔君、および同君の就職先で2次元図面を提供して頂いた城北機業株式会社の技術部長加藤幸也氏に深く感謝致します。

[参考文献]

- (1) 情報処理振興事業協会：CAD/CAMの機能と適用、(株)富士通九州システムエンジニアリング（1994）、47-58
- (2) Rapid Prototyping、日経デジタルエンジニアリング、日経BP社（1998.5）、104-111
- (3) 森謙一郎：特殊加工、日本機械学会誌、100-945（1997）、845
- (4) 森謙一郎：特殊加工、日本機械学会誌、101-957（1998）、571
- (5) 中川威雄、丸谷洋二編：積層造形システム、工業調査会（1996）、21-28、40-41、65-67、69-71、95-108
- (6) 岸浪建史：ラピッド・プロトタイピング技術の展望、日本機械学会誌、100-941（1997）、362-365
- (7) 丸谷洋二他：光造形法、日刊工業新聞社（1990）、37-48、63-67、123-126
- (8) STEREOS Desktop S Operating Manual、EOS（1996）、2-1~2-2、2-7、4-19~4-26、4-31~4-

33

- (9) News Report R P ユーザ事例、日経デジタルエンジニアリング、日経BP社 (1998.12)
- (10) News Report 試作・R P、日経デジタルエンジニアリング、日経BP社 (1999.4)
- (11) 中嶋孝行：RPS/RPF/RPL R P 普及の鍵となる新フォーマット、日経デジタルエンジニアリング、日経BP社 (1999.6)
- (12) GRADE/ARTES Rapid Tools リファレンスマニュアル、(株)シーディアイ (1997)、17-18
- (13) デュボン(株)：製品安全データシート [製品名：SOMOSTTM 6100Series (6110)] (1997)