

# 三次元原型・加飾加工技術の開発（第3報）

—立体モデルの加工実験および制御条件の確立—

藤巻 誠・橘田鉄雄・大柴勝彦・藤原和徳・佐野照雄

## Development of Working Upon 3-Dimensional Model and Superficial Decoration (Part 3)

Makoto FUJIMAKI, Tetsuo KITTA, Katsuhiko OSHIBA,  
Kazunori FUJIHARA, Teruo SANO

### 要 約

前報に引き続き、貴金属製装身具の三次元原型・加飾加工技術について検討した。

1. 第1報で提案した、3つの三次元加工方法について、加工実験機の製作および成形実験を行った。各加工法に対応した形状のデータ入力およびこれに基づく成形実験を行った。
2. 加工機の作動に必要な制御条件について検討した。物体を表現するデータ構造を仮定し、そのデータ構造を基に加工機の動作データを計算する手法について、具体的な形状を例にして加工実験を行った。これらの実験から、ブローチ形状、指輪形状の平面形並びに垂直形の三次元物体の成形加工ができる見通しが得られた。
3. 除去加工法については、前報で提案した熱風除去法について適用実験を行い、実用性を確認した。

### 1. はじめに

積層付加法については、前年の実績により中空容器様原型およびその鋳造品が得られているために、複雑な形状物体の成形を目標に、Auto CADを用いて図形入力を行い、意匠的に実用性のあるブローチ類の製品化を実現した。

切削除去法については、前年の実績である断面形状の解析法、ならびに漸近加工法を適用できるデータ構造を仮定して加工実験を行い、立体物を成形した。さらに、複雑形状物に対応するために、データ構造の改良を行なった。

除去法による成形実験においては、積層成形実験に用いた装置および制御装置を使用して、熱風による切断実験を行い、パターン切抜きの実用性を検討した。

### 2. 積層付加法による成形実験

#### 2-1 実験装置の概要

前年度は BASIC 言語で作成したプログラムを使用し基本的な立体形状を生成したが、各形状ごとにプログラムを作成する必要があった<sup>1)</sup>。

今回は、市販のパソコン CAD を用い簡単な手順で NCデータ生成できる付加加工実験装置を構成し、製品に近いワックス原型を作成することを目的とした。

図2-1に全体の構成図を示す。NCデータ生成装置で入力した図形データから NCデータを生成、それを RS-232C 回線を通して加工機の NCコントローラに転送、DNC 運転を行いながら加工を行う。

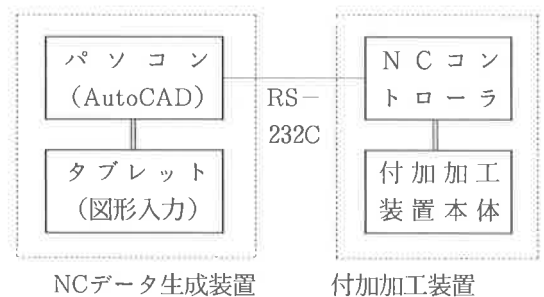


図2-1 実験装置の構成

(1) NCデータ生成装置

NCデータ生成装置は、市販のCADである

Auto CAD を用いて、これに NCコード生成コマンドと DNCソフトを付加し、構成したものである。

#### ・図形入力

CAD に接続したタブレットにデザイン画（主に線画）をセットする。入力は、デザイン画の輪郭形状を2～3mmピッチのドットでトレースする。

CAD の高度な知識がなくても、複雑な平面形状を入力することができる。入力図形は、直線データの集合として処理される。

#### ・NCコード生成

入力図形から NCコード生成コマンドにより NCコードを生成する。生成された NCコードは、フロッピーディスクにASCII コードで保管される。

また、入力図形を多層に積層するNCデータを生成することもできる。

#### (2) 付加工実験装置

付加工は、ワックス材を加熱により溶融させ、それをディスペンサから吐出させることによって線形状を基本とした原型を作成するものである。

付加工実験装置は、前年度使用した X-Y加工プロッタを付加工専用で改造した装置本体に NCコントローラを付加し構成した。

加工装置本体をコントロールするコントローラは、内部に CPUボード、I/Oボードおよびステップモータ駆動用ドライバーが組み込まれている。

実験装置の基本仕様は以下の通りである。

- ・制 御 軸 X, Y, Z の3軸 (X, Y 軸は同時制御)
- ・最大加工範囲 X100×Y100×Z200mm
- ・補 間 機 能 直線補間、円弧補間
- ・移 動 速 度 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200mm/sec
- ・制 御 機 能 ワックス材の吐出、冷却用エア
- ・ノ ズ ル 径 0.18mm～2.27mm

#### (3) DNC運転

デザイン画からCADデータを生成する際自由曲線を直線で近似するため、NCデータは大容量となる。コントローラのメモリ容量には制限があるため複雑な加工を行う場合には、NCデータを全部一度に送ることはできない。

大容量データを加工するために、パソコンと

NCコントローラを RS-232C で連結し、加工中データを分割して転送する方式を採用した。

コントローラは、パソコンから NCコードを受取り順次加工する。メモリ上のデータが無くなると、再び NCデータを読み取り実行を繰り返す。

### 2-2 加工結果および考察

#### (1) 加工結果

図2-2のデザイン画の場合、入力に要した時間は約15分、入力した座標点数は約600点である。写真2-1に画面出力例を示す。

これから加工用 NCデータの生成に要した時間は約2分、コードは約800行である。

実際に NCデータを転送し加工するのに要する時間は、一層当り約15分である。写真2-2は、加工したワックス型と実際に铸造（金）したもので、厚みを持たせるため3層に積層している。加工条件は、ノズル径0.42mm、ヒータ加熱温度150℃、吐出圧力1kg/cm<sup>2</sup>である。

パソコンは、NEC 製PC-98XL<sup>2</sup>を使用した。

CADデータとワックス型を比較すると、正確に CADデータを再現していることがわかる。溶融ワックスを使用するため、図形の端点で液溜りをするのがわかる。

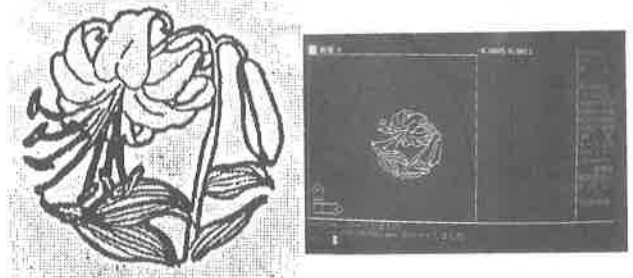
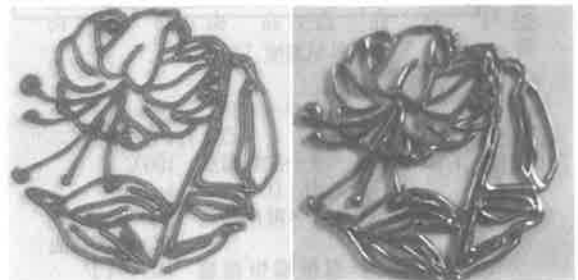


図2-2 デザイン例 写真2-1 画面出力例  
(野バラ社、「図画辞典」より)



(a) ワックス原型 (b) キャスト

写真2-2 加工例

今年度は、デザイン画<sup>2)</sup>から平面複雑形状を入力できるようになり、実際に試作品を作ることができたが、問題点として以下のことが挙げられる。

## (2) 線径の可変性

ワックスの線径が一定であり、表現力が乏しい。線径を変えるには、ノズル径を変える方法、ワックスの吐出圧力の調整あるいはディスペンサの相対移動速度の調整の3通りが考えられる。

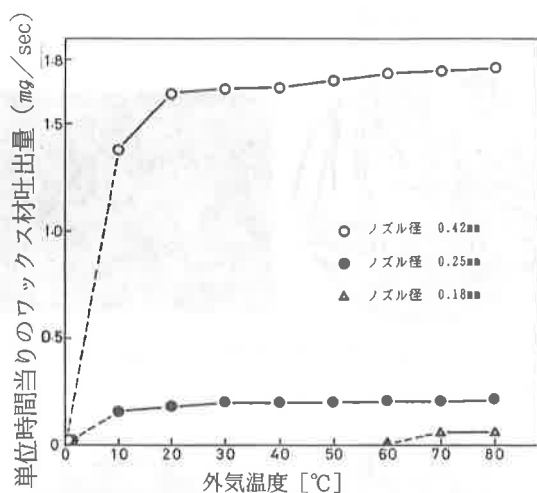
ノズル径を変える方法は、ノズルの機械寸法を変えることとなり実現が困難である。

吐出圧力を調整する方法も、現在の設備では微調整が難しく、応答速度が遅いため実現は困難である。

相対移動速度を調整する方法は、CADデータに線径の情報を付加し、線径によって速度を変えるNCデータを作成することで対応は可能であると考えられる。

## (3) ワックスの細線化

加工実験したものは、50mm角程度のワックス型であり宝飾品としては一般的でない。実際の宝飾品は、10~20mm角程度のものが多い。このためノズル径を細くする必要があるが、外気による冷却で溶融ワックスが固化しノズルが詰まる。



ワックス材	ハードワックス	ブルー融点 121°C
加工条件	ヒーター加熱温度	150°C
	吐出圧力	2 kg/cm <sup>2</sup>
使用機器	ワックス吐出装置	AD3000VH TC-200D他
	低温恒温恒湿器	PL-1F

図2-3 外気温度の変化とワックス材の吐出量

図2-3は、外気温度の違いによる溶融ワックスの吐出量の変化をグラフにしたものである。0.42、0.25mm径のノズルの場合は、外気温度が0°C付近にならないと目詰まりは発生しない。これは、熱容量が大きくワックスが固化しにくいと考えられる。これに対し、0.18mm径のノズルの場合は、外気温度が高くなければワックスを吐出できないことが明らかである。このことから、径が小さい場合には、ノズルの冷却の影響を考慮しなければならない。実際に固化によるノズルの目詰まりを防止するには、ノズル先端を加熱する方法が有効である。

## (4) ノズルの目詰まり

ワックス材をディスペンサ内で24時間以上加熱すると黒色物質が発生し、ノズルの目詰まりの原因となる。また、加熱と冷却を繰り返すと現象が顕著となる。これは加熱によるワックス材の炭化、あるいは、長時間加熱状態に置かれたワックス材が変色することから、ワックス材に含まれる色素の影響が原因と推定される。

ワックス材を1回の加工で使いきることが黒色物質の発生を防止する方法として有効である。

## 2-3 まとめ

今回、付加加工装置にパソコンCADを連結、実験装置を構成し、付加加工実験を行った。この結果、比較的簡単にデザイン画からの入力および原型を製作することができた。今後、ノズルの目詰まり防止、表現力の向上を目指し実際の宝飾品に近い微細加工の研究を行う予定である。

## 3. 切削除去法による成形実験

### 3-1 経過および概要

前年度の実験結果から、切削加工の条件及び制御方法が明確になっているので、そのデータを基礎にして、加工実験を行った。

加工に用いた試験装置はスカラ型微動装置（球面スカラロボット）、素材は固形ワックス<sup>3)</sup>である。

加工動作のための装置駆動ソフトは、昨年度のメニュー形式を踏襲して発展させた。

主な変更点はデータ構造の改訂、データ形式変換機能の付加、データ操作機能（平行移動、拡大縮小、補間）の充実、作動領域の検証機能の付加、

簡易データ作成機能の充実等である。

簡易データ作成機能においては、曲線の補間に相当する曲面の補間機能を実現し、成形実験に適用した。

### 3-2 実験および結果

#### (1) データ構造の仮制定

第2報のデータ構造はサンプルデータの作成の都合上、CRT1画面単位(θ1、θ2、R、X、Y、Zの6軸×21点)であったが、形状の精密化のために任意の点数を扱うことが必要であるので、21点の制約を除いた。また、画面上での編集を考慮して、データ番号をつけることにした。さらに、動作のための数値データに、将来の駆動軸の増加を想定してダミー項を1軸分、移動速度の指定項、始点通過点の指定フラグ項を追加した。データ形式を表3-1に、データファイル(アスキー形式)の部分例を図3-1に示す。なお、ファイル中にコメント行を置くことも可能にした。

表3-1 データ形式

項	データ番号	スピードフラグ	通過フラグ	オプション軸	θ1軸	θ2軸	R軸	X軸	Y軸	Z軸
型	整数	整数(1~9)	整数(0,1)	浮動小数点型	"	"	"	"	"	"
単位	番	なし	なし	未定(度,mm)	度	度	mm	mm	mm	mm

#で始まる行はコメント

```

10 N 0 0.000000 90.000000 -171.446000 0.000000 -29.666000 0.000000 -4.462000
11 N 0 0.000000 90.000000 -170.436000 0.000000 -29.588000 0.000000 -4.954000
12 N 0 0.000000 90.000000 -169.545000 0.000000 -29.502000 0.000000 -5.444000
13 N 0 0.000000 90.000000 -168.555000 0.000000 -29.408000 0.000000 -5.932000
14 N 0 0.000000 90.000000 -167.645000 0.000000 -29.305000 0.000000 -6.419000
15 N 0 0.000000 90.000000 -166.694000 0.000000 -29.195000 0.000000 -6.905000
16 N 0 0.000000 90.000000 -165.744000 0.000000 -29.075000 0.000000 -7.389000
17 N 0 0.000000 90.000000 -164.793000 0.000000 -28.950000 0.000000 -7.869000
18 N 0 0.000000 90.000000 -163.843000 0.000000 -28.815000 0.000000 -8.346000
19 N 0 0.000000 90.000000 -162.892000 0.000000 -28.672000 0.000000 -8.820000
20 N 0 0.000000 90.000000 -161.942000 0.000000 -28.522000 0.000000 -9.290000
21 N 0 0.000000 90.000000 -160.992000 0.000000 -28.364000 0.000000 -9.771000
22 N 0 0.000000 90.000000 -160.041000 0.000000 -28.198000 0.000000 -10.240000
23 N 0 0.000000 90.000000 -159.091000 0.000000 -28.024000 0.000000 -10.707000
24 N 0 0.000000 90.000000 -158.140000 0.000000 -27.843000 0.000000 -11.170000
25 N 0 0.000000 90.000000 -157.189000 0.000000 -27.654000 0.000000 -11.630000
26 N 0 0.000000 90.000000 -156.240000 0.000000 -27.457000 0.000000 -12.087000
27 N 0 0.000000 90.000000 -155.289000 0.000000 -27.253000 0.000000 -12.541000
28 N 0 0.000000 90.000000 -154.338000 0.000000 -27.041000 0.000000 -12.991000
29 N 0 0.000000 90.000000 -153.386000 0.000000 -26.822000 0.000000 -13.438000
30 N 0 0.000000 90.000000 -152.436000 0.000000 -26.595000 0.000000 -13.881000
    
```

図3-1 データファイル例

#### (2) 垂直型のデータおよび成形

昨年度と同じ縦爪形状物体を対象にして、データ形式変換をし、加工した。

成形品は昨年度と同じであるが、加工中にデータファイルを読み替える動作がないため工具の移動時の息継ぎ状態がなくなったため加工時間は20パーセントほど短縮した。

また、概形の加工動作に加えて、部分的な微妙動作も同一のデータファイルに記述できるため、ファイルの管理も簡素化された。

#### (3) 球面動作による成形例

直交系を一定値に固定し、θ1、θ2、R軸の変化によって、球面の一部を実現した。このデータは、十分大きな素材形状の中で考えると、球の内面にも相当する部分があるので、凹面状の加工に適用できる。写真3-1に部分的凹球面、凸球面の同時成形の例を示す。

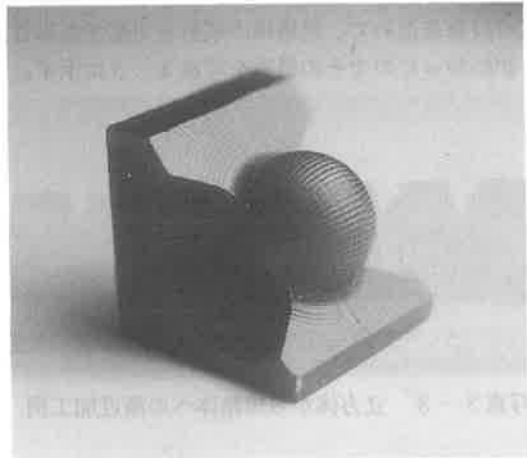


写真3-1 部分球加工例

#### (4) 螺旋軌道によるデータおよび成形

直観的に回転体と見なせる物体は、回転軸をZ軸に対応させて、X、Y軸を一定値に、θ1軸を0度に固定し、θ2軸の回転とR軸の切込みによって、旋盤型動作をさせる。Z軸の動作ピッチに対応させて、θ2軸を回転させるとR軸の原点は螺旋軌道を描くことになるので、R軸のデータによって、切込み深さを変えて成形する。写真3-2にタービンブレード形状物体を示す。

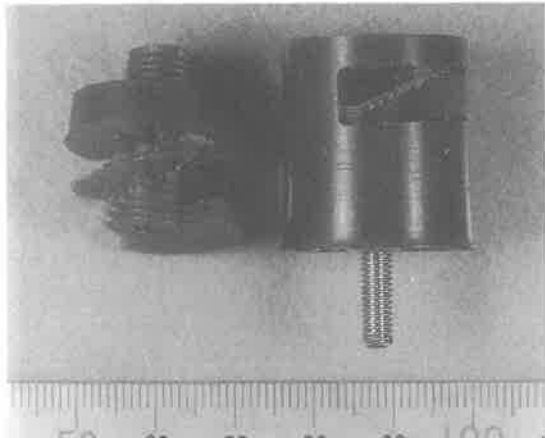


写真3-2 タービン形状加工例

#### (5) 直交座標データおよび螺旋変換による成形

直交座標での表現例として、表面の点座標の算出が容易に行えるために基本的な形状である楕円体を採用した。

また、素材形状を立方体であると仮定して、これに内接する楕円体を切削成形することにした。

この過程を漸近方式により数回で成形する加工データを作成し、自動加工した。さらに、漸近方式の計算を進めて、角錐体の成形も可能であることがわかったのでその過程を写真3-3に示す。



写真3-3 立方体から角錐体への漸近加工例

#### (6) 任意データの作成方法

加工機として、CADに接続するためには動作範囲内で任意の数値に対応しなければならない。このため、任意のデータを作成することが必要になったので、サウンドマスター<sup>4)</sup>で生成した音声データを、形状データと見なして、任意の軸に対応させて読み込み、動作データ形式に変換、さらに限界検証をして動作データとして使用した。このデータ作成方法で、螺旋軌道型の加工例を写真3-4に示す。

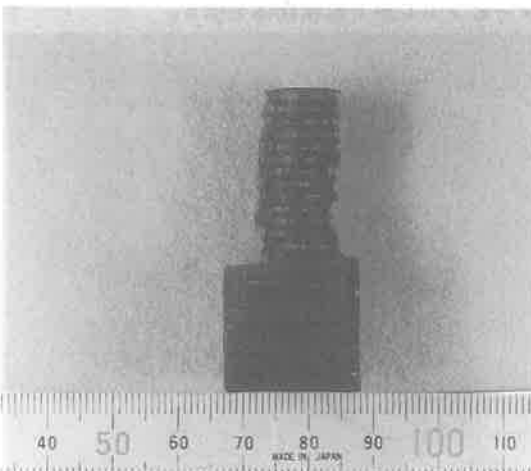


写真3-4 任意データの螺旋軌道加工例

#### (7) 所要時間

直交座標で表した約6000点の形状データの例について、変換計算及び加工時間を実測した。6000点で約200キロバイト、各点に姿勢データ及び補助データをつけると約500キロバイトになる。このデータファイルの、範囲検証に約2分、拡大縮小、平行移動計算に約3分かかった。

また、試験機の移動速度を最高速度の $\frac{1}{2}$ に設定して(表3-1のスピードフラグ=5)加工したところ、漸近過程の1表面の切削に約30分を要した。(NEC製 PC-9801RA 5 を使用)

#### 3-4 考察

##### (1) データ構造について

ここで制定したデータ形式は、直交座標で表した点とその点の表面法線方向および補助的なデータで表現してある。また、点データの連続形式で物体を表現している。したがって、有限個のデータで、物体表面を近似表現することができる。このことによって、粗加工、中間加工、精密加工のように成形精度を段階的に分割したファイルにすること、あるいは部分表面の精密加飾を別ファイルにすることができる。

さらに、特定の軸に、特定値を固定することによって、断面も表現できる。

ここで、加工点の法線方向は、加工対象の点の近傍データから計算で得られたとして、その項を確保してあるので、形状データ作成時に計算して、記述しておくことができる。

また切削切込み量は、R軸での指定あるいは直交座標でのワークの移動で指定することもできる。このため、直観的な、使用形態(水平型、垂直型、傾斜型)の選択、および工具の使用モード(ドリルモード、ミルモード)の選択の際に、適した作動データを作成することができる。

##### (2) 形状データの確認・動作限界値

加工機の構造により動作域の制約があるので、各軸ごとの限界値を用い数値データを検証して、範囲外のデータ番号をメモファイルに格納することにした。このためCADで作成したデータを加工試験機で作動させる前に判定することができる。

この、データ検証のソフトは、本機に固有の数値を指定しているが、事前検証の手法は他の加工機についても適用できる。

・工具限界値(形状干渉)

工具の寸法並びに加工機の構造によって、加工できるワークの形状に制約がある。この制約は、現在のところでは、操作者が直観的に判断せざるを得ないが、データ操作によっては自動判定の可能性もある。

これは、触線<sup>6)</sup>の考えを適用して、断面を数本の触線で囲い、多角形に近似したのち、断面輪郭と触線で囲まれる部分を個別に漸近方式で加工する方法である。この方法については次年度に検討したい。

・加工限界値 (相互干渉)

ワークの固定位置の決定、加工開始点および終了点の決定等の作業は操作者が任意に決定できるが、形状によっては、有限の許容姿勢の範囲では加工できない部分が生じることが予想される。このようなデータ領域を自動的に抽出することができるだろうか。基本的には、作動域をいくつかのブロックに分割し、ブロックごとにワークの固定位置および工具姿勢を仮定し、さらに加工機自体の構造を織り込んだ検証計算をすることによって実現の可能性はある。しかし、数十点で表現した場合でも、多量の計算が必要になるとおもわれる。

(3) 加工形状および成形精度に関する考察

写真 3-3 の漸近方式による切削例では工具姿勢が表面の法線方向ではないため成形した物体の形状が形状データに対してゆがんでくる。この様子は平面成形について顕著に視認できる。

工具先端が物体表面に接しているとして、工具の傾きとゆがみ (オーバーカット) の関係は図 3-2 のようになる。20度で約10%になる。

したがって、約10度までの傾斜を許容限界角度にすることが適当と思われる。

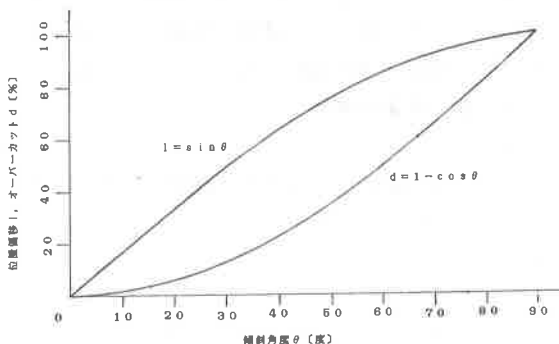


図 3-2 傾斜限界角の検討

(4) データ構造の楽譜対応

図 3-1 のデータファイル例について、データ番号を時間の経過に置き換えると、各軸の数値はそれぞれ波形と見なすことができる。ここに各軸のデータを短縮すると図 3-3 のようになる。特に螺旋軌道型では Z 軸は一定傾斜、 $\theta 2$  軸は鋸歯状波、R 軸はランダム波、その他の軸は不変になっている。この様子は、1 鋸歯状波、R 軸の数値はそれぞれ楽譜の小節と音符、に対応して考えることができる。この対応によって、多軸加工機は多重奏のオーケストラと同様に見なすことができる。ここで音符の長さに相当する要素は、各軸の移動所要時間であるので、先に仮制定した、データ構造に、同時起動同時停止のための、速度指定項を追加することが必要になってくる。そこで、各軸のデータの前に速度を記述することにした。

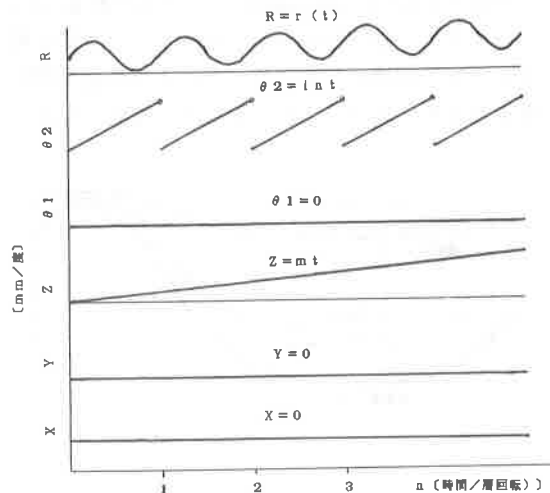


図 3-3 形状データの時間軸表示

(5) 補助動作および漸近パス

形状データおよび工具姿勢データで構成されている表 3-1 のデータ構造において、原点位置から加工開始点までの空送り、加工終了点から原点までの空送りあるいは粗加工から精密加工への切り替え時の空送り等の補助動作は本機に固有の径路であるので、形状データファイルのデータから決定しなければならない。現在は、操作者が動作域の最外縁に沿った径路を指定しているが、(2)の相互干渉問題が自動的に解決できれば、必然的に自動決定できると思われる。

現段階では、形状データと補助データの区別を動作フラグで行うことにした。この形式を表3-2に示す。

表3-2 改良後のデータ形式

項	データ番号	動作フラグ	通過フラグ	オプション軸回数	オプション軸
型	整数	整数 (0, 1)	整数 (1, 9)	整数 (1~9)	浮動小数点型 以下各軸毎
単位	番	なし	なし	なし	米 (mm)

#で始まる行はコメント

また、形状データが与えられれば、前報で提案した漸近方式で自動的に途中の加工点の計算ができる。

螺旋軌道によるデータ表現においてみると、円柱素材は中心軸から表面までの距離が一定であるので、図3-4のように、一定の高さの直線になる。

物体の表面は、図の波形によって表されるので、直線と波形の最大距離から、切削工具の直径を考慮して漸近回数  $n$  が決まる。 $n$  により各加工径路を求めると、図3-4の  $a$  から  $p$  の波形になる。

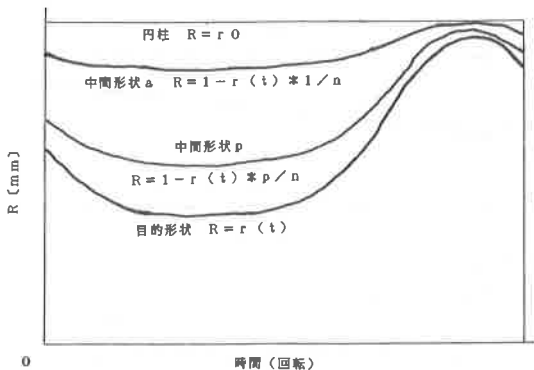


図3-4 螺旋軌道型データの漸近過程例

### 3-5 まとめ

実験装置の駆動ソフトの改良および加工実験の結果、各種立体の成形が実現できた。現段階では手作りのデータによる加工のため、成成品の形状については立体と見なしがたいものもあるが、均整のとれた製品の形状データが与えられれば、作動範囲の検証の後に自動成形できる見通が得られた。

形状データの作成には CAD からの出力数値ファイルを、形式変換ユニットを通して書き替え

て、自動運転が可能になるものと思われる。

さらに、形状データの検証を、ファイル変換時にソフト上で行う方法と、加工機側で行う方法とを併用することによって、自動運転の確実性が増すものと思われる。

また、改良したデータ形式で運転することによって、ロボットのPTP 動作の線形性が向上するため、データに忠実な形状表現が可能になるものと思われる。

## 4. 除去法による成形実験

### 4-1 経過

前報で除去加工の一例として、レーザ光による加工実験を行い、ワックス材の輪郭成形加工が装身具の原型製作に適用できることがわかった。

しかし、装身具部品の中には寸法、形状精度を要しない物もあり、それらの成形に適した簡易な加工法を検討した結果、レーザ光に替わる熱源として、光ビーム、水圧ジェット、熱風加工等が考えられた。

特に、熱風加工については、積層加工装置のノズル径、加熱ヒータ等一部を替えることで加工が可能となることから、実用化実験を行った。

### 4-2 実験装置及び方法

装置は2-2のディスペンサに溶融ワックスを入れない状態でヒータを加熱し、ノズルから熱風を吹き出させ加工する。

実験条件としては、ノズル径0.5~0.1mm、ヒータ温度範囲150~200°Cが適当と思われる。

#### ・最適加工条件の選定

低溶融材であるワックスについて、装身具構成素材が0.2~1.0mmが主であることから、これらについては鋭角を含むスター形状切断とブロック材については、彫刻加工を行い次の要因について検討した。ノズル径、加工速度、切断幅、切断面粗さ、形状精度、熱影響層の加工品質との関係。

### 4-3 結果と考察

#### ・切断加工

切断実験結果について加工面粗さが比較的良好なものについて、加工データを表4-1に示し、加工例を写真4-1に示す。

ワックス材の板厚が0.4mm以上になると加工面粗さ、切断幅、形状精度が極端に悪くなる。0.6mm以上になると溶融物（ドロソ）の付着が多くな

表4-1 ワックス材の熱風加工試験例

加工条件 シートワックス厚さ0.2~0.4mm				
ノズル径	圧力kg/cm <sup>2</sup>	温度°C	送りmm/sec	短評
0.20	2.0~4.0	170~200	2.0~5.0	良好
0.25	3.~5.0	170~220	2.0~5.0	良好
0.40	5.0~7.2	150~200	2.0~10.0	悪い

り1mmが加工限界である。切断幅は加工速度に対して大差はないが板厚に対しては厚くなるにしたがい広くなり、表裏の差も大きくなる。

0.2mm以下の薄板材についてはワークの保持に問題があり、小部品の加工は熱変形が起こり困難である。

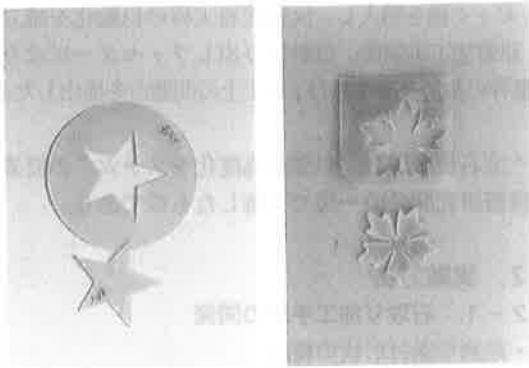


写真4-1 加工例

#### ・彫刻加工

ブロック材の彫刻加工を試みたがレーザー加工同様熱がこもり加工精度が保てない。

#### 4-4 まとめ

ワックス材の熱風加工について、加工品質に影響を及ぼす要因について実験、評価を行い、個々

の最適加工条件を見いだした。

熱風加工は融点の低い(100°C)素材については加工部が熱影響を受け、すべての品質が最適な加工は容易にできない。熱影響の比較的少ない薄板材(0.2~0.6mm)の加工のみ適用が限定される。

積層加工装置と共用できる利点があるので安価なシートワックス切断装置として利用できる。

具体的には、はなびらの切抜き等が考えられる。

#### 5. おわりに

以上に於て、三次元加工の3つの加工法のうち、おもに積層付加法、切削除去法に関する実験結果を示した。レーザーによる除去加工はこれら2つの成形法による最終形状データを用いて加工実験できるためこれらの加工パスの研究の完成を待って実施することにしたい。また、熱風による切断、加飾はレーザーに代わる能力があり、かつ安価で構成できるため実用性は十分にあると思われる。

来年度は、個々の成形法の実用化を図ると共に、3つの加工法を統合した技術の確立を目指す。

#### 参考文献

- 1) 藤巻他：山梨県工業技術センター研究報告3 (1989) P6~P18
- 2) 野ばら社編：図画辞典(1969) P247
- 3) 佐野他：山梨県工業技術センター研究報告2 (1988) P32~P37
- 4) カノープス電子(株)：サウンドマスターマニュアル
- 5) 数と図形：H・ラーデマッヘル、O・テーブリッツ著山崎三郎、鹿野健訳日本評論社 (1989. 10)