

三次元原型・加飾加工技術の開発（第2報）

—原型素材および制御法について—

藤巻 誠・橋田鉄雄・大柴勝彦・藤原和徳・佐野照雄

Development of Working Upon 3-Dimensional Model and Superficial Decoration (Part 2)

Makoto FUJIMAKI, Tetsuo KITTA, Katsuhiko OSHIBA,
Kazunori HUIHARA and Teruo SANO

要 約

前年に引き続き、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. 前報で提案した、三次元加工方法に関する3つの加工法について、基礎的加工条件を解明し、条件の範囲を特定した。
2. 加工機に必要な機能および制御法について検討した。基本形状の加工方法を具体的な加工手順に分解し、加工装置を想定して動作解析を行った。その結果、FFTによる波形解析技術を応用できることが判明し、適用した結果、加工機の制御方法および工具の選択に関する基準が得られる見通しを得た。さらに、昨年の実績である、P乗平均距離計算法を複雑形状の加工工程に応用して、漸近加工方式を考案し、加工例を実現した。

1. はじめに

3つの原型加工方法について、それぞれ制御に関する要因を検討し、要因ごとの特性実験を行った。各加工方法を同一の装置に、選択適用することを前提にして、加工法に対応した加工具の着脱に関して検討した。

また、各加工法に共通する加工機の制御法および制御データの形式について検討し、一定条件内の形状について加工実験をおこなった。

2. 原型加工条件の確立

2-1 付加加工条件の確立

(1) 実験装置および実験方法

① 実験装置

図2-1に本実験に用いた付加加工装置の概略を示す。

付加加工装置は、直交するX・Y・Z軸を持ち、Z軸駆動部にはディスペンサ本体部が取り付けられている。また、ワックス材を加熱溶融させるヒータとヒータコントローラ部、溶融ワックスを吐出させる圧力コントローラ部および圧力源として窒

素ポンペから構成されている。

ヒータにより加熱溶融されたワックス材は、圧力コントローラ部で調圧された圧縮ガスによりノズルから押し出され、X-Y軸駆動部により任意の形状に付加加工される。

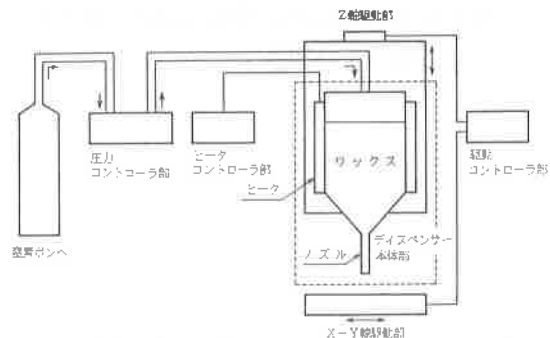


図2-1 付加加工装置の概略図

② 実験方法

ワックス材加工条件の検討は、市販のワックス材を用いて加熱温度、溶融ワックス吐出圧力、加工平面とノズル先端との間隔（以下、ギャップと称す）およびX-Y軸駆動速度を各々変化させ単層による加工を行い、ワックス材の吐出幅、吐出

高さおよび吐出量で検討を行った。

吐出幅および吐出高さは、各条件においてワックス材を直線で80mm程度吐出した試料から50mmを切り出し、幅および高さをそれぞれ3ヶ所測定しその平均値を吐出幅および吐出高さとした。また、吐出量は切り取られた試料の重量を各駆動速度における50mm進む時間で除した値を用いた。

(2) 結果および考察

① ギャップの影響

140℃におけるブルーワックス材についてギャップを0.1mmピッチで変化させたときの吐出幅および吐出高さの関係を図2-2に示す。

吐出圧力および駆動速度を一定にした場合は吐出幅および吐出高さにはほとんど変化が認められず、ほぼ一定の値を示した。

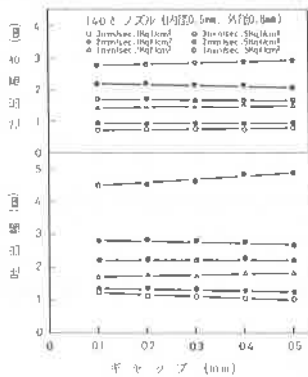


図2-2 ギャップと吐出幅及び吐出高さの関係

これは、ノズル先端を溶融ワックス材が包み込むように吐出させるため、ギャップが変化しても吐出幅および吐出高さには影響を及ぼさないものと考えられる。

② 吐出量

図2-3は、各ワックス材の140℃における太径ノズル(内径0.5mm、外径0.8mm)および小径ノズル(内径0.3mm、外径0.5mm)を使用したときの吐出圧力と単位時間当たりの吐出量の関係を示したものである。

各ワックス材とも吐出圧力が増加するに伴い、単位時間当たりの吐出量も直線的に増加する傾向を示す。ブルーワックス材とパープルワックス材の

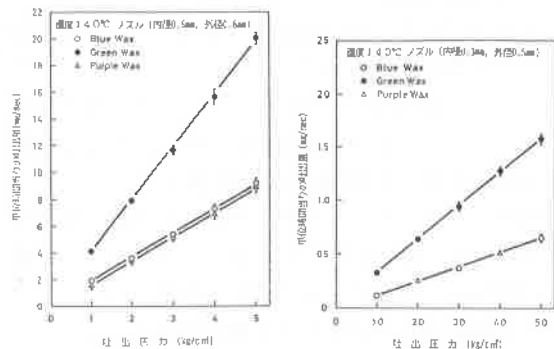


図2-3 吐出圧力と単位時間当たりの吐出量

単位時間当たりの吐出量は、両者ともほぼ同一の傾向を示すが、グリーンワックス材の場合は、他の2種類のワックス材と比較し約2倍の単位時間当たりの吐出量を示す。

これは、140℃におけるグリーンワックス材の粘性が他の2種類のワックス材と比べ、小さいことが影響していると思われる。

また、ノズル断面積と単位時間当たりの吐出量の関係は前者が1/3になると後者は約1/12~1/16程度になり、断面積の2乗に反比例する。

③ 吐出幅および吐出高さ

図2-4は、各温度における太径ノズルを用いた場合の吐出圧力と吐出幅および吐出高さの関係を示したものであるが、130℃における吐出幅は、パープルワックス材→ブルーワックス材→グリーンワックス材の順に大きくなるが、ブルーワックス材とパープルワックス材にはあまり大きな違いは認められず、ほぼ同様な傾向を示す。これは、130℃における粘性がほぼ同程度なためと考えられる。また、吐出圧力が1kg/cm²の場合でもノ

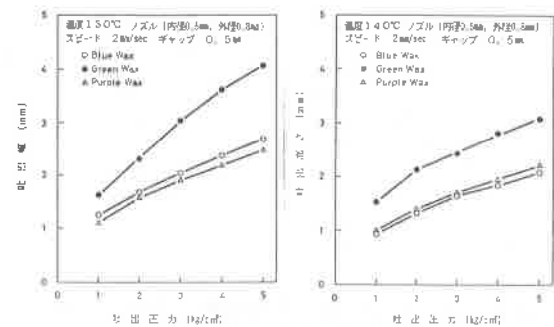


図2-4 吐出圧力と吐出幅および吐出高さの関係(太径ノズル)

ズル先端を溶融ワックス材が包み込むようにして吐出するため、吐出幅はノズル外径より大きくなることが認められる。

また、140℃におけるブルーワックス材とパープルワックス材の吐出高さを比較した場合、ほぼ同様な値を示すが140℃の粘性はブルーワックス材がパープルワックス材より小さいため、横に広がりやすくなり粘性の大きいパープルワックス材の吐出高さが高くなると考えられる。

また、グリーンワックス材の場合は、図2-3から単位時間当たりの吐出量が、他の2種類のワックス材より2倍近い値を示しているため、吐出高さも高くなったものと考えられる。

図2-5は小径ノズルを用いた時の吐出幅および吐出高さを示したものである。

小径ノズルのブルーワックス材およびグリーンワックス材は吐出圧力1kg/cm²の場合、吐出幅はノズル外径より大きくなる傾向にあるが、パープルワックス材の場合はノズル内径と同様の値を示す。これは、単位時間当たりの吐出量が少ない上にパープルワックス材の粘性が高いため、溶融ワックス材がノズル先端を包み込まずに吐出し、固化するものと考えられる。また、吐出高さは太径ノズルと同様な傾向を示す。

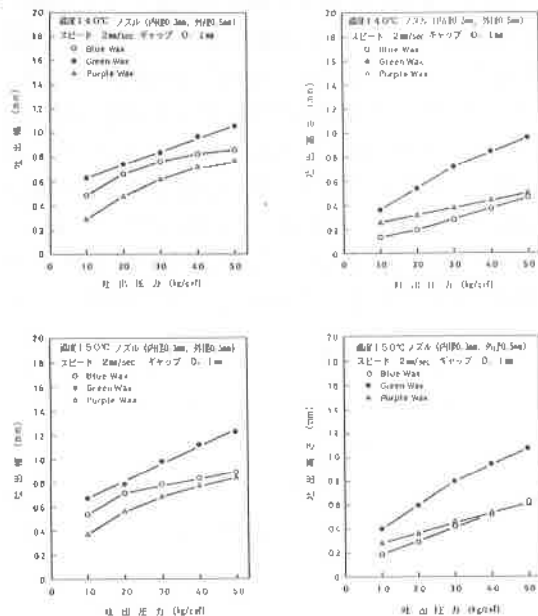


図2-5 吐出圧力と吐出幅および吐出高さの関係(小径ノズル)

④ 付加加工の適用範囲

太径ノズルはどの付加加工条件(吐出圧力、溶融温度、駆動速度およびギャップ)においても付加加工は可能であったが、小径ノズルは付加加工条件によっては付加加工不可能な場合があり、それを集計したものを図2-6に示す。

各ワックス材とも溶融温度および吐出圧力は高く、駆動速度およびギャップは小さいほど付加加工可能な範囲が広がる傾向を示している。また、各温度とも吐出圧力が2kg/cm²以下の場合、ギャップをノズル内径(0.3mm)以上大きくすると付加加工不可能な範囲に入ることが多く認められる。

従って、付加加工を行う際のギャップは、ノズル内径以下に設定をする事が必要である。

ブルー	ギャップ	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1
グリーン	ギャップ	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1
パープル	ギャップ	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1	5	3	1
圧力		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
温度		130			140			150			130			140			150		

図2-6 付加加工適用範囲

(3) まとめ

市販ワックス材を用いて、付加加工条件として主に吐出量、吐出幅および吐出高さを検討した結果、次の事が明らかとなった。

- ① 本実験に用いた3種類のワックス材のうち単位時間当たりの吐出量はグリーンワックス材が最も大きい。
- ② 吐出幅は、ノズル外径に大きく影響される。
- ③ 各ワックス材とも単位時間当たりの吐出量、吐出幅および吐出高さは粘性に影響される。
- ④ 小径ノズルを用いた付加加工の際は、ギャップをノズル内径以下に設定する事が必要である。

2-2 切削加工条件の確立

(1) 実験装置および方法

① 実験装置

切削加工には、スカラ型微動装置¹⁾のアーム部

にリユータを取り付けて行った。図2-7にスカラ型微動装置の概略を示す。

加工時の切削抵抗（以後切削動力で表示する）は、リユータのコントローラ部より工具主軸を駆動する直流モータの電流と電圧をデジタルマルチメータで測定し、電力量で評価することにした。

リユータの主軸回転数の測定は周波数カウンターを使用し、無負荷時及び加工時の主軸回転数の変動を測定した。また、加工面の表面粗さの測定は表面粗さ計を使用した。

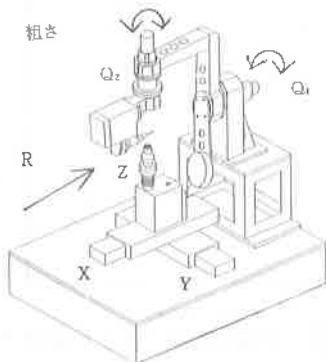


図2-7 スカラ型微動装置

② 実験方法

ブルー、パープル、グリーンの3種類のワックス材について切削条件（主軸回転数、送り、切込み）を種々変えて実験を行い、切削動力と仕上げ面アラサについて測定し、検討した。表2-1に切削工具の形状を示す。

また、比較的小物の原型加工を目的とするため加工時の欠け等の発生が問題となる。この点については各ワックス材についてクロスカット加工を行うことによって欠けの発生を観察し、最適なワックス材の選定を行った。

表2-1 工具形状

工具No.	工具形状		用途
1	φ3	球形3枚刃	荒加工用
2	φ5		
3	0.5	平錐状工具	仕上加工用
4	1.0		

(2) 実験結果及び考察

① 主軸回転数

図2-8は工具No.1を使用した場合のリユータの主軸回転数と切削動力の関係を表したもので3種類のワックス材についていずれも同一の傾向を示している。回転数が10000rpm位から急激に切削動力は減少する。10000~30000rpmの範囲では切削動力はなだらかな減少傾向を示した。ワックス材の種類別の結果では高速域においてブルー、パープル、グリーンの順に良い結果が得られた。しかし、いずれの場合も実質的な差は数10mw程度で大きな差は見られなかった。No.3、4の工具は仕上げ加工を目的として実験したが、工具径が小さくなるため30000rpm以上が必要である。

なお、本来の評価基準からすれば回転数よりも切削速度で表現すべきであるが、現場的な指標を与えるため回転数表示を採用した。

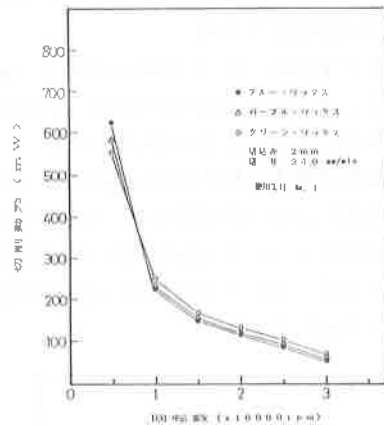


図2-8 主軸回転数と切削動力

② 切込み

各種工具における最適な切込み量を把握するため切削動力、加工時の工具状態等を評価基準として実験を行った。図2-9はNo.1の工具における切込みと切削動力の関係を示したもので、切込みの増加とともに切削動力も直線的に増加している。No.3、4の工具については加工時の工具状態、仕上げ寸法から適切な切込み量を求めるようにした。

実際に原型を加工する場合は工具サイズ等によって切込み条件も変えなければならないが、No.1、2の工具の場合には直径R以下、またNo.3、4については0.1~0.5mmの範囲の切込みが適していることが確認できた。

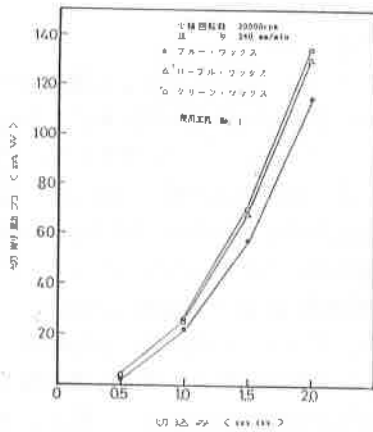


図 2-9 切込みと切削動力

③ 送り速度と仕上げ面粗さ

図 2-10 は No. 1 の工具について送りと切削動力の関係を示したものである。この結果より送りと切削動力は比例関係にあり、切込み条件より強力に切削動力に影響している。

No. 1、2 の工具については 80~320mm/min の送り、No. 3、4 の工具では 40~80mm/min の範囲内の送りが適していることが確認された。

なお、送りの増大は加工時間の短縮につながり経済的であるが、仕上げ面粗さは一般的に悪くなりワックス材のように柔らかい材料でも欠けが発生しやすくなる。このことは最適な送り範囲が存在することを示している。

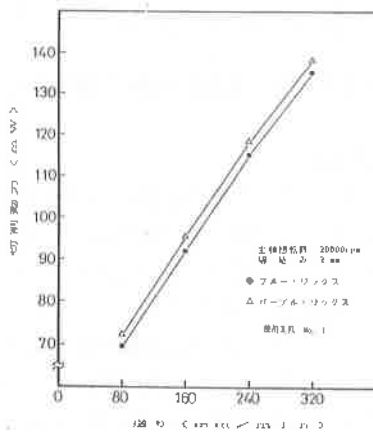


図 2-10 送りと切削動力

図 2-11 はブルー材について主軸回転数と仕上げ面粗さの関係を示したもので、送りが 80mm/min では回転数によらず 1 μm 程度で 240mm/min

では右下がりの傾向を示し 3 μm 程度であった。

今回の実験では、欠けの発生を視覚的に観察するためクロスカット加工を行ったが、その結果は脱落率（脱落数/総加工数）で表すとブルー、パープル、グリーン材についてそれぞれ 0%、3%、18% で、ブルーワックスが最も優れていた。

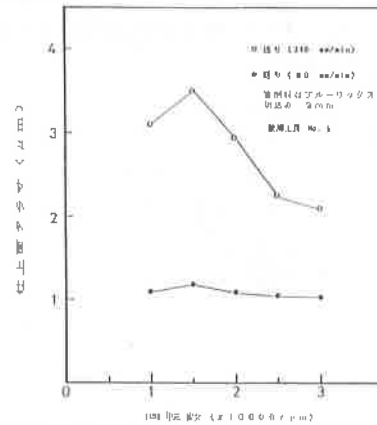


図 2-11 主軸回転数と仕上げ面粗さ

(3) まとめ

原型加工に適したワックス材については切削動力及びクロスカット加工の結果よりブルーワックス材が最も適していることがわかった。

リュータの主軸回転数は 10000~30000rpm の範囲で、No. 1、2 の荒加工用の工具については 15000~25000rpm 程度、No. 3、4 の仕上げ用工具については 30000rpm 前後の回転数が必要である。

切込みは荒加工では 0.5~2.0mm 程度を目安に、また仕上げ加工では 0.1~0.5mm の範囲で加工物の形状等によって選択することが必要である。

送り速度は仕上げ面粗さの程度を考慮し荒加工では 80mm~320mm/min、仕上げ加工では 40~80mm/min 程度が目安となる。

2-3 除去加工条件の確立

(1) 実験装置

① レーザ光による除去加工装置

- 炭酸ガス (CO₂) レーザ加工機 (ML-10E)、(ML1212-25C)

レーザー出力: CW500W パルス1000W

- YAG レーザ加工機

(JK702)、(ML-2500A)

レーザ出力：パルス250W

② 試料

実験に使用した試料は装身具原型用ハードワックス材パープル、ブルー、グリーンの3種類である。

融点120~140℃

素材寸法 板材 100×100×0.2~1.0mm

ブロック 100×50×1.0~10.0mm

(2) 実験方法

・最適加工条件の選定

低溶融材であるワックスについてのレーザ加工データについては極めて薄い材料の加工が試みられている程度である。

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マーキング加工を、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。

出力形態、焦点位置、ビーム出力、加工速度、アシストガスと圧力、切断幅、切断面粗さ、形状精度、ドロスの付着、熱影響層の加工品質との関係

(3) 結果と考察

切断、マーキング、彫刻加工の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2-2に示し、加工例を写真2-1に示す。

表2-2 ワックス材のレーザ加工試験結果

No	資料名	色	溶融温度	板厚mm	レーザ出力	CO/YAG	切断速度	アシストガス	品質
1	シートワックス	グリーン	120℃	0.3	30W	CO ₂	33mm/Sec	N	◎
2	※	※	120	0.5	48	CO	5	N	◎
3	※	※	120	0.8	20	YAG	75	N	○
4	ブロックワックス	※	120	5.0	60	YAG	33	Air	×
5	シートワックス	ブルー	125	0.2	30	CO	5	Air	◎
6	※	※	125	0.5	50	YAG	75	Air	◎
7	ブロックワックス	※	125	2.0	120	CO	5	N	△
8	シートワックス	パープル	130	0.3	30	CO	33	N	◎
9	※	※	130	0.6	48	YAG	240	N	◎
10	※	※	130	0.8	80	CO	8	N	○
11	ブロックワックス	※	135	5.0	120	CO	75	N	△

・切断加工

ワックス材の板厚が0.6mm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り、0.8mm以上になるとドロスの付着が多くなり1mmが加工限界である。切断幅は加工速度、パルス出力に対しては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、小部品の加工は困難である。

CO₂レーザとYAGレーザの比較ではCO₂レーザ加工のほうが面粗さ、加工幅、形状精度など加工品質の面でやや良い結果が得られたが、制御技術、作業性の面ではYAGレーザのほうが利点が多いと思われる。

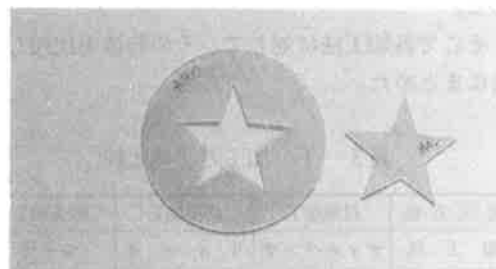


写真2-1 加工例

・マーキング加工

形状の転写は可能であるが切断幅、面粗さ共に形状精度の面で寸法のばらつきが同一条件で0.5mm以上ある。低溶融材であるため加工部周辺に熱影響が存在し、実用上問題がある。

・彫刻加工

ブロック材の彫刻加工は途中加工がほとんどであるためレーザ光が加工周辺部に熱影響層を大きく残し、溶融したものが蒸発せず流れだすため形状精度が保持できない。アシストガス圧の影響も大きく、微量の調整が困難であるためワックス材の加工は不可能に近い。

(4) まとめ

ワックス材のレーザ加工について、加工品質に影響をおよ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みいだした。

しかし、レーザ加工が一種の熱加工であるため融点の低い(130℃)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。

3. 工具交換手法の検討

前報において指摘したように、装身具は複雑形状のものが多いため、その成形は非常に困難であるが、3つの加工法を適宜使い分けることによって、実現の可能性がある。

与えられたデータに基づいて、どの加工法を採用するかを自動的に判別することは現在の技術では困難であると思われる。

しかし、人間の直感で使い分ける際に、同一装置で、同一データを使用するためには、加工法に対応した加工具が簡易に着脱できることが必要である。

そこで各加工法に対して、その特徴を比較し、表にまとめた。

表3-1 加工方法の比較

加工方法	付加加工	切削加工	除去加工
加工具	ディスペンサ	リユータ	レーザー
要	重量(kg)	1	1
	全長(mm)	150	150
	直径(mm)	40	30
因	付帯物	空圧ホース	カーンコード
	変動要因	加熱量、圧力	工具径、回転数
			ガラスファイバ
			パルス数、周期

この表によって、加工機の工具取り付け部には、大略5kg、直径50mm程度の、円柱負荷を同心位置に、簡易に着脱できれば充分であると思われる。

ディスペンサは、容積50mlの実験的仕様であるため、実用機では更に直径が増す見込みである。

また、吐出方式をピストン式等の他の方式に変更することも考えられる。その場合には、取り付け方法の変更も必要になるとと思われる。

リユータについては、現在直流電動式を採用しているが、切り粉の粘着、刃先の冷却を考慮して、エアタービン式を採用する可能性もあるが、機械寸法にはほとんど変更はないものと思われる。

レーザーについては、現有の1kw炭酸ガスレーザーを使用した。

YAG等の波長の異なる発振器の採用、さらに、効率を考慮して、小出力機を採用する場合は発振

部を加工軸に直接取り付けられることも考えられるが、現在では、グラスファイバーによって導くことを想定している。

また、除去加工においては、レーザーによる除去以外に、熱風を微小ノズルから加工部に噴射して除去する点加熱吹散、逆に加熱ノズルを接触させて部分的に加熱吸引する除去法、水圧ジェットによる除去等の手段を用いることも検討する必要があると思われる。

ここで、3つの加工方法を同一ワークに適用することを想定すると、a. 定型ブロックから概略形状を切削加工によって得る。b. 概略形状の部分表面に、中空部を積層付加する。c. 積層付加部分の外形を切削仕上げする。d. 部分的にレーザー等で除去して、模様付けをする。

というように、3つの加工法の採用によって、多様な形状の物体が、成形できる可能性がある。

4. 駆動軸の総合的制御法の確立および仕様決定

4-1 加工対象物の断面表現について

(1) 加工形状の座標変換

今、加工対象物の断面形状が、XYZ直交座標のXZ平面の閉曲線と与えられているとする。

曲線上の点(x, z)を、閉曲線内部に原点をおいた極座標に変換する。

$x = r(\theta) \cos \theta$, $z = r(\theta) \sin \theta$ の変換式によって、 θ と $r(\theta)$ の関係が得られる。ここで、「 θ に対して、 r は1つの値を取る」つまり(θ の1次式)という制約条件をおく。

(2) 加工形状の変換および制約条件

(1)の変換式を基に図4-1イaのような断面を持ちY軸方向に長い、ワックス材を使用することを考える。かりに、上方下円中空形と呼ぶことにする。

下円の中心を原点Oとして、回転角 θ に対する、原点から輪郭までの長さを $r(\theta)$ として、その実測値を図にすると、同図口曲線aのように、上方部は2つの角状突起になる。(各部分は便宜上直線に似せて描いてあるが直線ではなく $r(\theta) = x / \cos \theta$ による。)

下円部は原点から等距離で直線になる。

この素材から、同図イbのような形状を、削り出すことを考える。この形状も(1)の制約条件を満

たしているものとする。

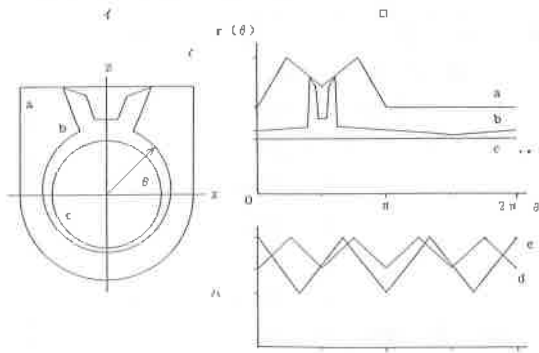


図4-1 形状の座標変換

上方下円中空形の輪郭と同様に、変換すると、同図ロbようになる。中空円cについては、 θ に関わらず、一定になる。

なお、矩形、三角形についても同様に変換すると同図ハd、eようになる。

(3) 形状のFFT解析

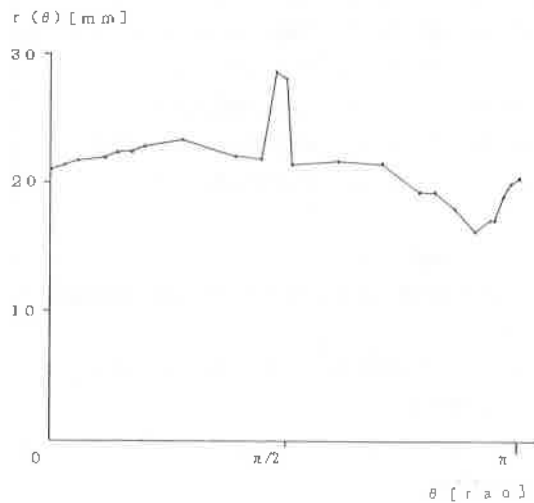


図4-2 任意形状の表示例

図4-1に示すa~e、図4-2に示す任意輪郭fについて、FFT解析手法²⁾を用いることにする。FFTを用いることによって、無限に細かく表現された任意輪郭図形を、有限個の成分で、近似表現するわけである。

図4-2は、対称性を考慮して半周分の形状によるデータを示している。図4-3にFFT解析結果を、等間隔サンプリングにおける、サンプリング数をパラメータとして、各高調波成分の振幅

を示している。

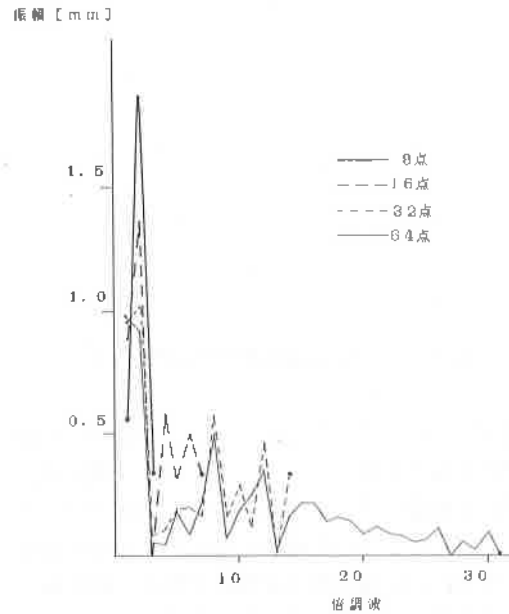


図4-3 任意形状(波形)のFFT解析結果

(4) 切削工具直径の選定

図4-3によって、各高調波成分の振幅がわかるので、一定値より大きい振幅に着目して、検討する。

輪郭形状の全長Lは、波形を積算して得られる。この全長が、基本波1周期に対応すると仮定すると、第M次の高調波成分に対応する輪郭長さは、 L/M となる。

サンプリング定理³⁾に従えば、Mより大きいNでサンプリングすれば、Mまでの周波数成分はすべて含まれるので、切削工具の直径を $d=L/M$ とすればこままでの細かな表現は可能であることが推定できる。

前報で、加工具の外形と、加工痕の関係を考察してあるので、要求される面状態から、回転切削工具の直径が決まる。

(5) 切削加工に対する加工過程の漸近方式の提案

図4-3の周波数成分の逆数である波長について各成分の振幅を見ると、図4-4のようになる。

ここで加工対象物の1つの断面の平均的な長さを150mmと仮定すると8次高調波成分の波長は1.17mmとなる。したがってこれより小さい直径の

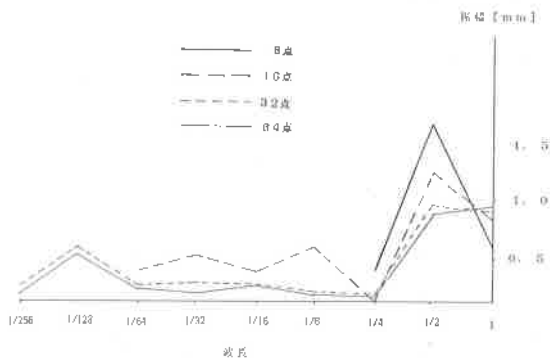


図4-4 形状解析結果の波長表現

切削工具を用いることによって、この成分の表面形状が表現できるといえる。またこの波長は、1/128であるので、1周360度の1/128は約2.7度に相当する。さらに細かく表現する必要があるれば、さらに高次波長成分を検討することになる。

ここで得られた工具径で最大切込み量を除した商を加工回数として、加工回数で回転角 θ の切込み量を割って単位切込み量とする。これを1周にわたって漸次切削して行く。

4-2 加工条件解明のための実験装置

(1) 実験装置の概要および特徴

装置は、DIOユニット、サーボユニット、球面スカラロボット本体および制御用コンピュータで構成される。

図2-7に示した、概略図において、架台上の水平回転軸 $\theta 1$ 、 $\theta 1$ 軸に直交固着する $\theta 2$ 軸、 $\theta 2$ 軸の先端の工具固定R軸、さらに架台上の直交XYZ軸からなる。

一定範囲内で $\theta 1$ 軸が回転し、 $\theta 2$ 軸が1回転する。

この運動によって、緯度経度に相当する軌道が得られる。

$\theta 1$ 軸を固定することによって、1つの平面(斜面を含む)を決定できる。

直交座標系にワークを固定する。

ワークが $\theta 1$ 、 $\theta 2$ で制限される球殻内部を移動できる。

(2) 性能仕様

表4-2に主な仕様を示す。

表4-2 スカラ型微動装置の主な仕様

No.	項目	仕様
1	制御軸数	6軸
2	各軸の作業域	$\theta 1$: 270° $\theta 2$: 440° R : 100mm X : 100mm Y : 100mm Z : 100mm
3	各軸の最大速度	$\theta 1$: 110°/sec $\theta 2$: 110°/sec R : 200mm/sec X : 400mm/sec Y : 400mm/sec Z : 200mm/sec
4	位置繰返し精度	右手系: ± 0.03 mm以下 左手系: ± 0.06 mm以下 総合: ± 0.09 mm以下
5	可搬重量	2kg (右手系左手系共)
6	駆動方式	全軸(6軸)共DCサーボモータ
7	潤滑方式	グリス潤滑方式
8	重量	95kg (架台含まず)
9	作業範囲	直径 $\phi 180$ mmの球の内部
10	制御装置	別途仕様書による

(3) 基本動作ソフト

この装置は、基本動作として、次の運動制御ができる。

- 6軸の移動先データに基づき、現在位置から移動する。
- 速度指定値に基づき各軸の速度を個別に制御できる。
- 2つの指定値を連続して移動する。
- 加工具の負荷トルクをセンサにより計測し、制御コンピュータに伝送する。

4-3 実験装置の動作ソフトおよび制御データ形式

この装置を、加工実験に使用するためMSCにより、次のソフトを作成して附加した。

(1) 統括ソフト

以下の個別動作を、統括し、メインメニューによって、各ソフトが動作する。

フローチャートを図4-5に示す。

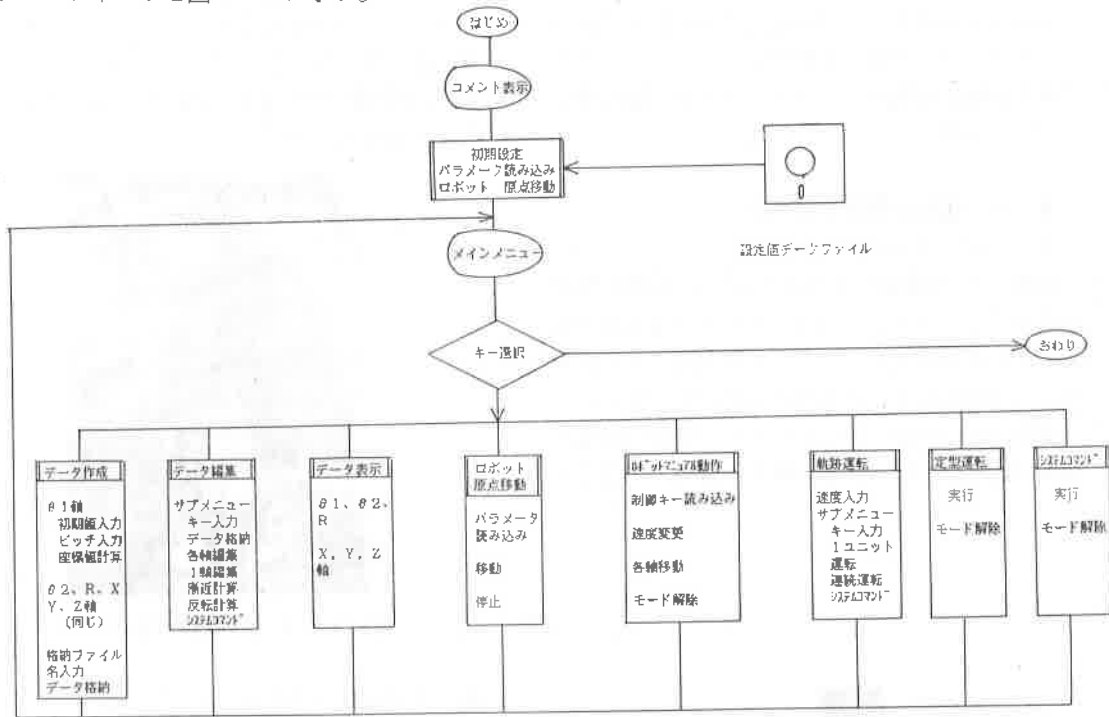


図4-5 操作ソフトフローチャート

(2) 簡易データ作成ソフト

6つの各軸データを、初期値、および変化分を与えて、自動計算させる。このソフトで簡易CAM的に各軸データを作成できる。

(3) データ編集ソフト

1点ごとのキー入力、ファイルからマトリクスデータの読み込み、各軸ごとのデータ変更および格納、軸データの平行移動、軸データの積、軸データの差計算および漸近計算等の計算機能を備えている。

(4) ファイル操作ソフト

計算結果の自動データファイル格納、データファイル名の登録のためのデータベースファイル作成、ファイル名登録ファイルの接続等のファイル操作機能を備えている。

(5) データ形式

各軸ごとのデータを、6×21のマトリクス形式とした。

6軸は当然として、21は1CRT画面に表示できる行数の制約から決定した。

θ1、θ2、Rのルーツ系、x、y、zの位置系を別画面として表示させている。本来、ツール系

の座標値は位置系データを基に計算で得られるものであるが、微小平面の法線方向の計算ソフトを作成していないために、既に得られたものとして、マトリクス形式で一定値を与えた。データは簡易作成ソフトにより作成し、編集ソフトで編集した後、フロッピーディスクまたはハードディスクに格納する。

実験装置が、ロボット動作をする際は、1ユニットのマトリクスデータを、本体記憶部に読み込み、指定点ごとに、PPP移動する。

各軸の速度は、位置データファイル読み込み前に設定する。

(6) 連続運転

(5)のデータ形式に従ったデータファイルの、ファイル名を接続させる、ファイル作成ソフトによって、一連のデータファイル名を登録したデータベースファイルを作成する。連続運転ではデータベースファイル名を指定することによって、ファイル中のデータファイル名の各軸データを読み込み、ロボット動作をした後、次のデータファイルを読み込むという動作を繰り返す。

ここでは、素材形状のデータファイル名と加工

形状のデータファイル名を指定して、工具径に基づき漸近計算をさせ、計算結果の加工回数ごとのデータファイル名を、素材形状のデータファイル名および加工形状データファイル名の中間に挿入して、データファイル名とした。

4-4 実験結果および考察

(1) 水平型の加工例

垂直(Z)軸微動および θ 2軸による螺旋軌道制御方式によって、写真4-1のような形状を切削加工により作成した。ここでは1回ごとの螺旋軌道の開始点および終点の接続状況を評価した。

螺旋のピッチが0.18mmより小さくなると各周回切削の継目は、ほとんど肉眼では識別できなくなる。

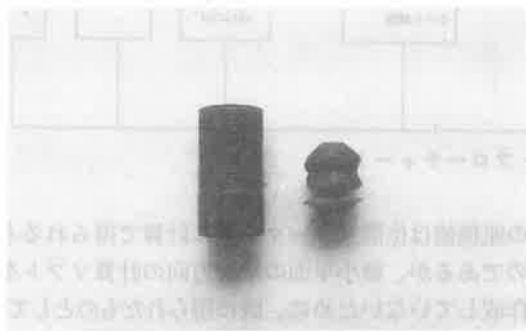


写真4-1 (水平)加工例

(2) 垂直型の加工例

水平軸微動および θ 2軸によって、立体の漸近加工工程を実現し、加工例を写真4-2に示す。漸近過程が理解し易いように、3区間に分けて展開して掲示した。これは、図4-1に基づく形状



写真4-2 (垂直)加工例

である。回転角3および5度ごとのサンプリングによるデータから作成した。

(3) 斜面型の加工例

緯度経度同時制御によって斜面が成形できることを示す加工をした。



写真4-3 (傾斜)加工例

(4) 工具刃先の使用モード

加工形状に応じて、次のモードを使い分ける必要があると思われるが、詳細については次年度に検討する。

- a. ドリルモード：刃先で軸方向および軸と直交方向に進行するモード
- b. ミルモード：刃の側面で進行方向の側面を使用するモード

(5) 加工所要時間

各軸の移動速度と加工性能を検討する必要があるが、詳細については、実験中である。各軸の最高速度は実験装置の仕様でほぼよいと思われる。

但し、R軸については、微細表現の限度を更にするためには、他の軸速度の3ないし5倍くらいに設定する必要があると思われる。この場合、加工具の先端位置制御の精度を確保するために、駆動軸の位置関係、機械寸法、駆動力の配分、重量の配分等の機械要素を再検討する必要がある。ここで、機械設計をする際に、各要素を指数関数曲線に対応させて決定すると、高速化並びに安定化が実現でき、位置決め精度の向上ならびに振動の抑制が可能であると思われる。

(6) 加工精度向上のための手段

本報では、無限に細かく表現された、任意曲線を、有意のデータ数でサンプリングして近似曲線

式を作成し、この近似式によるデータを位置データとして使用した。したがって元の形状とある程度の相違がある。これを、さらに近似させるために、2つの方法が考えられる。

- a. FTTのサンプリング数を増す
- b. 補間法により中間値を計算で得る

aはサンプリング数の増加と共に計算時間が増すが、数値計算用プロセッサを制御コンピュータに追加設置して、高速化を図ることができる。また、FTT専用基板を使用することもできる。この場合には、加工形状に際限なく近似させていくことができる。

bはラグランジュの補間法ならびにスプラインの補間法⁹⁾等があるが、いずれの場合にも誤差は免れない。しかし、ソフト上で簡便に補間値が得られる。

4-5 三次元加工機構の仕様の提案

物体の断面形状の解析および加工実験の結果から、三次元加工機としては次のような事項が必要であろう。

(1)装置概要

3自由度以上の自由度を有する加工機構

(2)所要機能

保持系および加工具系の協調動作

(3)各部仕様

卓上型が望ましい。

テーブル寸法 250×300mm以内

(4)動作仕様

各軸速度 400mm/sec以内

チャック回転 360度

分解能 最大限0.01mmおよび0.1度

(5)工 具

ディスペンサ AC100v

80~200度C

0.001ml/shot

レーザー Nd YAG 100w

リユータ AC100v

35000rpm

工具径 2.4, 3.0mm

(6)その他

切削、付加、除去加工法への共通対応

4-6 制御法における今後の課題

- (1) 加工対象物の数式表現の可能性について
 - ・断面形状と立体形状の関連について
 - ・位置データの座標変換および計算所要時間について
- (2) 加工対象形状と工具の干渉に関する考察
 - ・数式表現と制約条件について
 - ・工具姿勢および刃先モードと軌跡について

5. まとめ

5-1 三次元加工制御法の要約

4によって次のことが明らかになった。

- a. 平面図形を有限個の数値で近似表現できる。
- b. 凹凸の特徴が数値化できる。
- c. 凹みにしたがって、切削工具を選別できる。
- d. 形状にしたがって、加工工程が漸近化できる。
- e. 断面の接続で、立体が成形できる。
- f. 螺旋軌道により立体が成形できる。
- g. 形状の実現度はサンプリング数による。
- h. 補間法により、近似させていくことができる。

5-2 三次元加工制御法の応用

4.では、主として切削除去加工を主対象にしてきたが、断面形状の解析および表現法は他の2つの加工法にも適用できる。写真5-1に付加工における積層立体化の加工例を示す。



写真5-1 付加工による立体成形例

写真の左は、断面の積層により立体化を実現したものであり、右は、積層により得た立体を原型とした、石膏型による金製壺形鋳造製品である。この場合には、目的形状の断面データとして、円をとり同心異径の断面データを与えて、立体化を

実現した。

この成形には、XY加工プロッタ（前年度購入備品）に、委託製作した3軸ユニバーサルテーブル（上下、回転、傾斜式）および精密位置決めテーブルを附加して、使用した。写真5-2に使用機を示す。

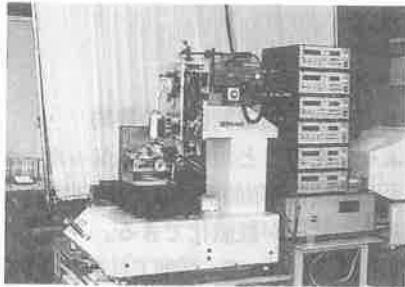


写真5-2 XY(Z)加工プロッタ

この改造によって、スカラ型微動装置の一部機能が実現できるため、制御法を移植して、簡易型加工機に発展させることもできる。

付加加工による成形品の主な特徴は、

- a) 中空物体の成形
- b) 超薄肉物体の成形
- c) 複合物体の成形
- d) 複雑形状物体の成形

が可能であることである。

レーザによる切抜きの場合には、1つの任意方向の断面データを取り扱うことに相当する。

現在の一般的なレーザ加工機にはGコードによる制御機能が付随しているが、本テーマで対象にしている装身具類の形状表現には、多くの困難さがあるとおもわれる。そこで、4による形状解析によって得られるデータを、直接入力することによって微妙な形状の切抜きが可能になると思われる。

いずれの加工法においても、与えるデータにより、複雑な形状が実現できる。

5-3 三次元加工における今後の課題

- (1) 3つの加工方法の統合
加工具着脱機構の基本設計
位置合わせ方法
- (2) 原型の表面仕上げ方法の検討
数値データでの平滑化

断面補間計算による平滑化

曲面補間計算による平滑化

機械動作での精密化

工具の微細化による微妙表現

運動制御の高精度化による高速化

(3) 鑄造半製品の仕上げ方法および加飾加工

化学的加飾

機械的加飾

等の課題がある。

6. おわりに

以上において、三次元加工の3つの加工法の条件説明および具体例の説明、ならびに三次元加工機構の要件の検討、制御法の検討を行い、当初設定した、仮の三次元加工の定義に近づくことができた。次年度も引き続いて研究を行う。

特に上記4のテーマについて、詳細に検討する。

おわりに、研究計画の遂行にあたって、御助言を戴きました工業技術院機械技術研究所の中田毅主任研究官、本テーマの研究実施にあたって、実験装置であるスカラ型微動装置の仕様決定の過程で、スカラロボットおよび球面スカラロボットの開発者の立場から適切な御助言を戴きました山梨大学の牧野洋教授、実験装置の製作にあたって御無理をお願いしたべんてる株式会社の各位にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 明 愛国 古屋信幸 牧野洋 球面スカラロボットの開発研究（第1報）精密工学会誌 第54巻 第7号 S63 7
- 2) 宮川 洋 今井秀樹 訳 デジタルフィルタ 科学技術出版社 S55 7
- 3) 南 茂夫 科学計測のための波形データ処理 CQ出版社 S61 4
- 4) 森 博嗣 黒川善幸 C言語によるマトリックス演算 森北出版 1988 6
- 5) 竹本宣弘 荒実 Cによる数値計算 朝倉書店 1988 11