

# 超精密非回転対称表面形状の旋削加工

機械技術部 南 晃, 岡崎祐一\*

## Turning of Super Precise Non-rotationally Symmetric Surface Figures

Akira MINAMI and Yuichi OKAZAKI

超精密旋盤に取り付けたワークをダイヤモンドバイトを用いて正面旋削することで、鏡面に近い加工面が得られる。このバイトをZ軸方向に、高速で小刻みに変位させることができれば、ワーク表面に非回転対称の面を生成することができる。

このように高速微小変位制御可能な工具台を試作し、加工システムを構築して非回転対称な曲面を旋削した結果、数 $\mu\text{m}$ 以下の微小な段差を持つ非回転対称な形状の生成が可能になった。

### 1. 緒 言

旋盤を用いた切削加工は、本来回転軸を中心とした回転対称な形状を生成することを目的としている。しかし、旋盤に新たな装置として制御可能な工具台を付加し、主軸の回転に同期させて工具の切り込み量を高速に変化させ、これを制御することによって非回転対称な表面形状を生成することができる。

この切り込み量を変化させるアクチュエータに圧電素子を用い、その制御を高速工具サーボによって行うと、数 $\mu\text{m}$ の可動範囲と広い応答帯域を持つ工具の構築が可能である。さらにこの工具により微細な非回転対称表面形状の切削が可能となった。

本報告では、微小変位工具台を使用した加工システムを構築し、このシステムによって微細な非回転対称表面形状を生成したことについて述べる。

### 2. 工具台の構造と特性

#### 2.1 微小変位工具台の構造

図1に微小変位工具台の構造を示す。アクチュエータとして、積層形圧電素子（以下ピエゾスタックと言う）を使用した。図2にピエゾスタック、表1にその仕様を示す。ピエゾスタックと変位計を同一軸上に置き、円筒形のステンレス製ケースに内装してある。

ピエゾスタックの変位は前後2枚のダイヤフラムによって運動方向が拘束され、チップホルダに直接伝達される。このような構造にすることでアップ誤差を招かず、振動量が小さくなるため応答性が高くなる。

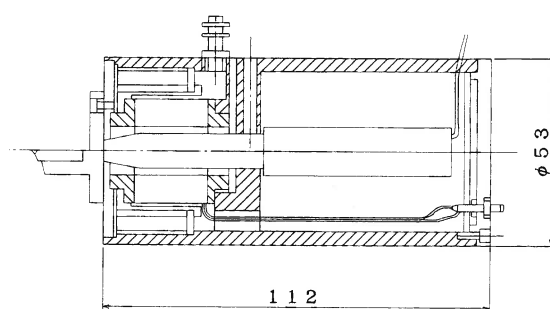


図1 微小変位工具台の構造

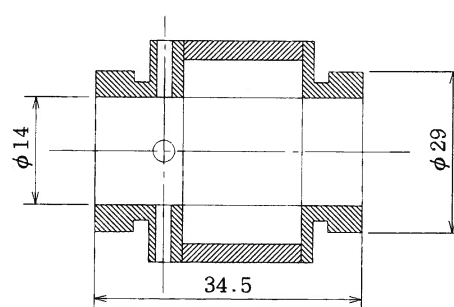


図2 ピエゾスタック

表1 ピエゾスタックの仕様

特性	特性値
共振周波数	40kHz
スティフネス	350N/ $\mu\text{m}$
静電容量	275nF
変位量	15 $\mu\text{m}$ /1000V

\*工業技術院機械技術研究所生産システム部生産機械研究室

2. 2 微小変位工具台の諸特性の測定

2. 2. 1 測定方法

図3に微小工具台の特性を測定するためのシステム構成図を示す。ジェネレータ (WAVETEK-MODEL132) で発生させたサインカーブなどの電気信号をドライブアンプ (MATSU-SADA HEPZ06. P0. 9A) に送って増幅し、工具台の圧電アクチュエータへ伝達する。アクチュエータの変位を変位センサで感知し、増幅後スペクトラムアナライザ (ADVANTESTER-9211C) に送る。

スペクトルアナライザではジェネレータで発生した電気信号と、アクチュエータ変位の信号を受け取り、印可電圧と変位の関係や周波数特性等、諸特性の測定・解析を行った。

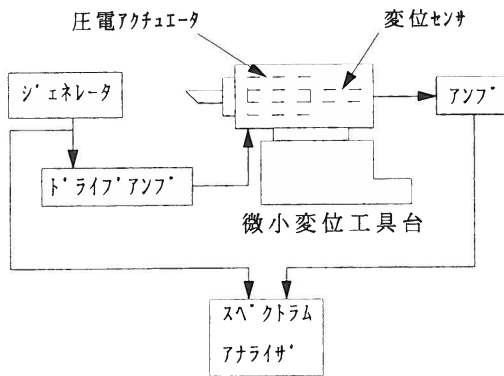


図3 微小工具台特性の測定システム構成図

2. 2. 2 測定結果

① 静特性

図4に無負荷時における工具台単体の印加電圧-変位特性を示す。印加電圧を0Vから最大400Vまで周期80secのサインカーブで変化させた。

その結果、図4のように約7 $\mu$ mの変位が得られた。印加電圧を変化させると、変位量は圧電素子の特徴である大きなヒステリシスをともないながら変化する。また、電圧を0Vにしても変位が0に戻らないクリープ現象も見られた。

② 動特性

図5に掃引正弦波入力と応答から求められた工具台単体の周波数特性を示す。

上のグラフは周波数に対するゲイン特性を、下のグラフは周波数に対する位相特性を示している。

ピエゾスタックは通常、非共振帯域を利用する。したがって1kHz付近までのほぼ平坦な部分が制御可能な部分であり、それ以上の高い周波数帯域になると鋭い共振点が見つかる。共振のピークは8.5kHz付近であった。

図6に周波数600Hz、印加電圧30Vの時のステップ応答特性を示す。図5の共振によるものと思われる顕著なオーバーシュートが見られた。

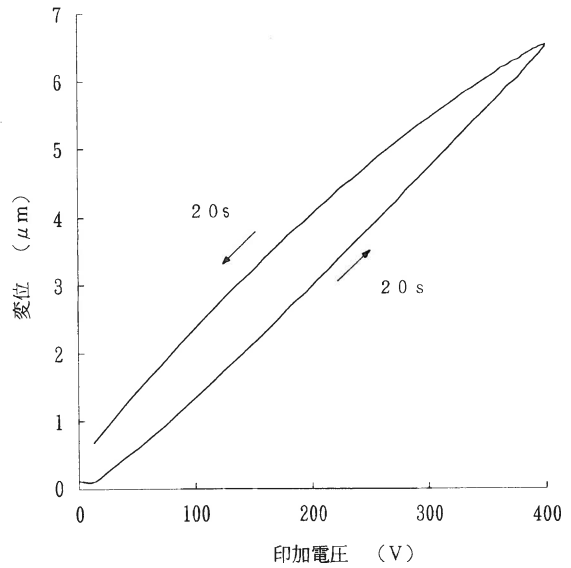


図4 無負荷時における工具台の印加電圧-変位特性

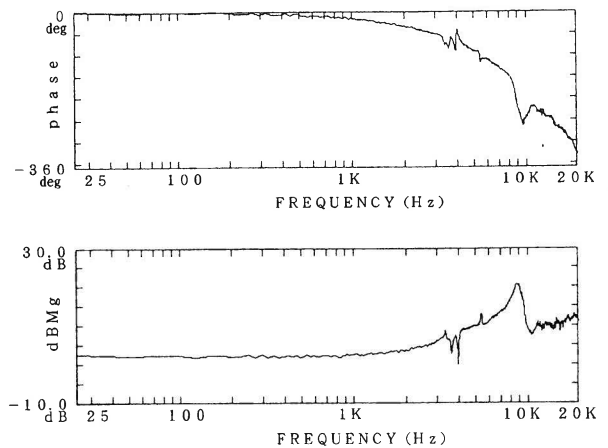


図5 工具台の周波数特性

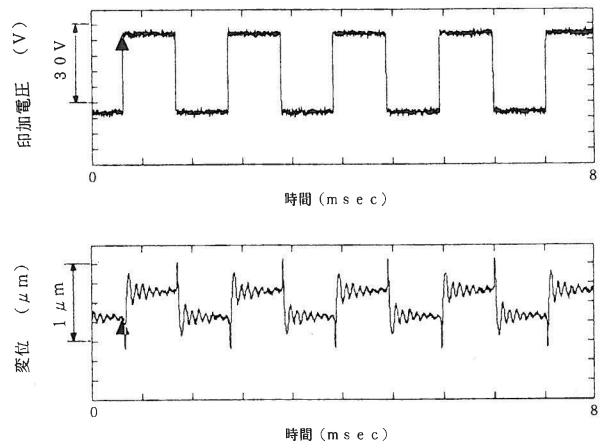


図6 工具台のステップ応答特性 (周波数600Hz, 印可電圧30V)

2. 3 工具台特性の特性改善

2. 3. 1 高速サーボ系の構築

工具台の周波数特性を改善するために変位量を印可電圧にフィードバックする高速工具サーボ系を構成した。図7に制御ループのブロック図を示す。

この制御系は8.5kHz付近に存在する主要な共振点に中心周波数をあわせたノッチフィルタによって共振を押さえた。このノッチフィルタは、不要な信号成分の存在する周波数を阻止するフィルタである。また、10kHz以上の不要帯域における共振を防ぐため、ある周波数(遮断周波数)までの信号を通過させ、それ以上の高い周波数の信号を阻止するローパスフィルタ(2次、遮断周波数10kHz)を設置した。

さらに、低域における十分なループゲインを確保し、静剛性の向上を図るため一次ローパスフィルタを積分器として設置した。

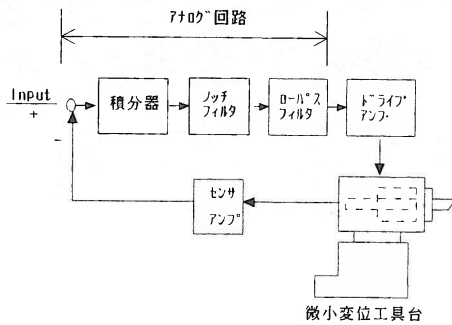


図7 高速工具サーボのブロック図

2. 3. 2 測定方法

測定方法は2. 2. 1に示す方法に準ずる。

2. 3. 3 測定結果

この工具台の周波数特性を改善するために、工具台のチューニングを行いその特性を測定した。まず、制御系に設置した各フィルタの効果を確認するため、オープンループにおける周波数特性を測定した。

図8に測定結果を示す。積分器による低域帯のループゲインの増幅、ノッチフィルタによる共振の減衰、ローパスフィルタによる高域帯のゲインの減衰など、特性改善の効果が明確に現れている。

図9にクローズドループにしてフィードバックをかけた時の周波数特性を示す。カットオフ周波数(-3dB)は約1.2kHzであった。

図10に特性改善後のステップ応答特性を示す。ステップ入力に対し、工具台単体で測定した時はオーバーシュートが見られたが、フィードバックをかけることによりオーバーシュートは見られなくなっている。

図11に特性改善後のインパルス応答特性を示す。工具台単体の時は整定に時間がかかっているが、フィードバック制御によってかなり改善されている。

チューニングの結果、下のような性能が得られた。

作動距離 : 10  $\mu$ m

分解能 : 2 nm

応答バンド幅 : 1.1kHz

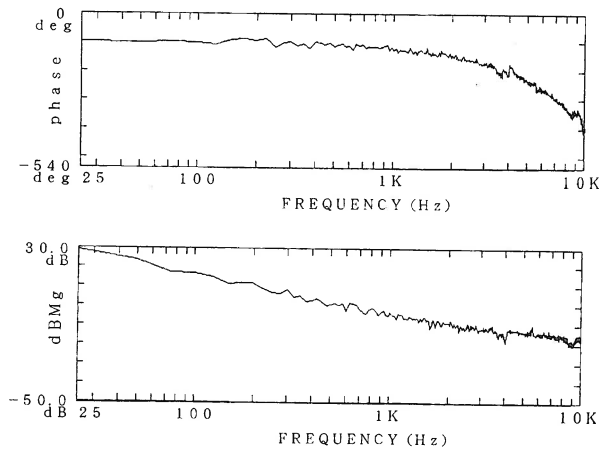


図8 オープンループにおける周波数特性

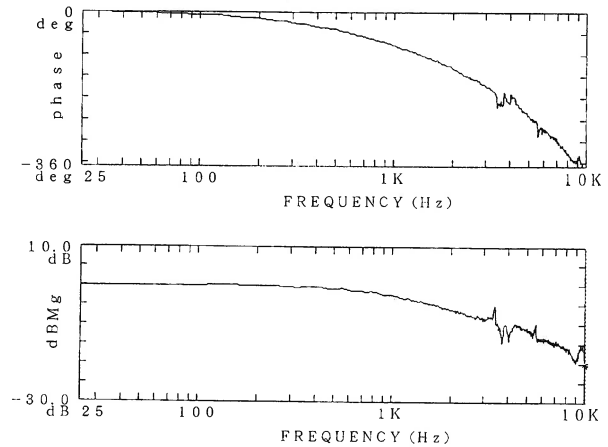


図9 クローズドループにおける周波数特性

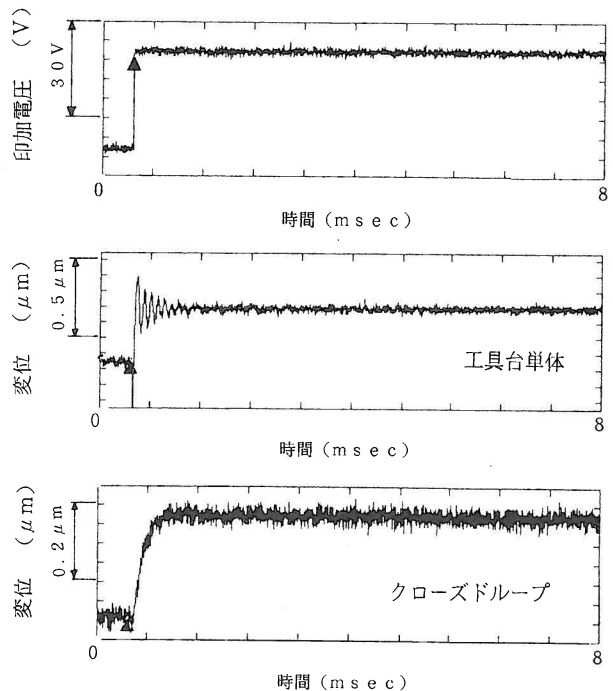


図10 ステップ応答特性の改善

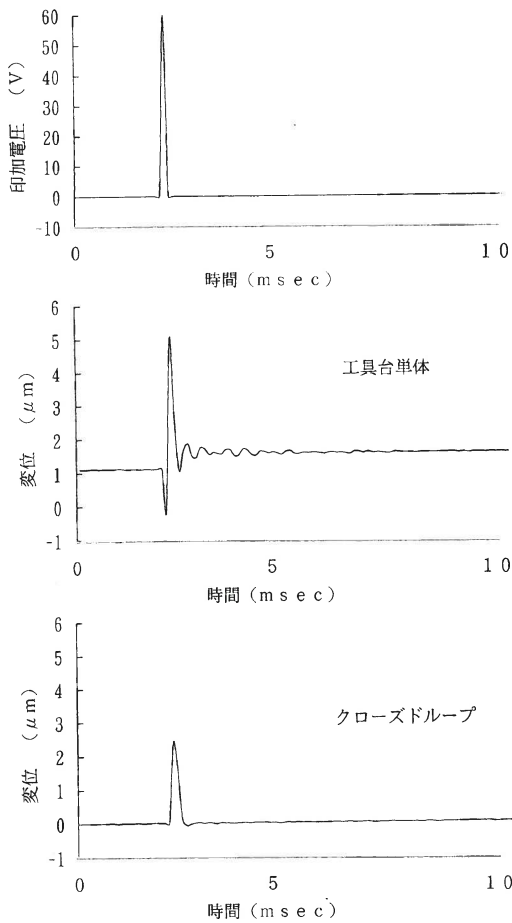


図11 インパルス応答特性の改善

3. 加工制御システムの構築

3.1 加工方法の概略

まず、図12に示すようなダイヤモンドバイトを用いた超精密旋盤による正面旋削加工を考える。X軸方向の送りはスライドテーブルが移動することによって与えられ、回転運動は主軸の回転によって与えられる。スライドテーブル上に工具を固定して(=切込み量固定)加工を行うと、加工面の工具軌跡は図13のようにXY平面上に螺旋を描き、平面旋削を行う。

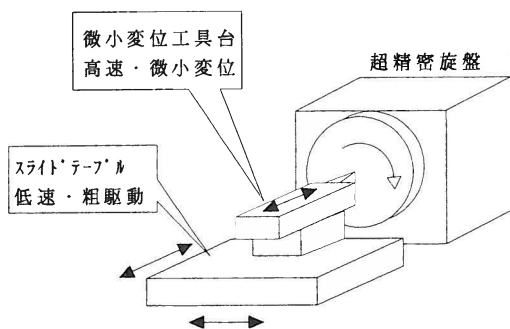


図12 加工の概略図

この時の半径方向の工具軌跡間の距離は送り速度と回転数で決まり、表面粗さはバイトのノーズ半径と主軸1回転当りの送り量(トラックピッチ)でほぼ決定される。

次に、螺旋状の工具軌跡上に一定角度ごとに存在する点を考えると、その高さはそれぞれにおけるZ軸方向の切り込み量で決まる。工具が固定されている場合は各点とも切り込み量は一定であるが、各点の切り込み量を任意に、高速に変化させるような制御を行うことで広い面積で非回転対称な表面形状の生成が可能である。

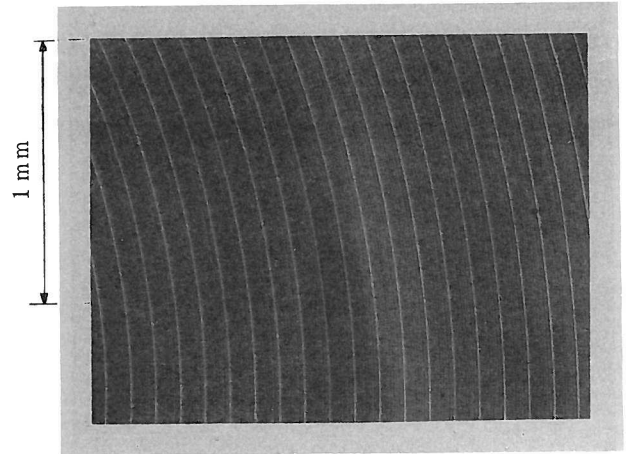


図13 旋削による工具軌跡

3.2 加工システム

加工システムを図14に示す。システムの中心となる超精密旋盤は豊田工機AHN30×25を使用した。微小変位工具台はX軸方向の工具スライドテーブルに設置してある。

供給された加工制御データは1回転当たり4096分割のロータリエンコーダから発するパルスと同期してDMAリングバッファを通りD/Aコンバータを経由して次々に高速工具サーボに供給される。これにより切り込み量を変化させ、微細で非回転対称な加形状の加工が可能となる。

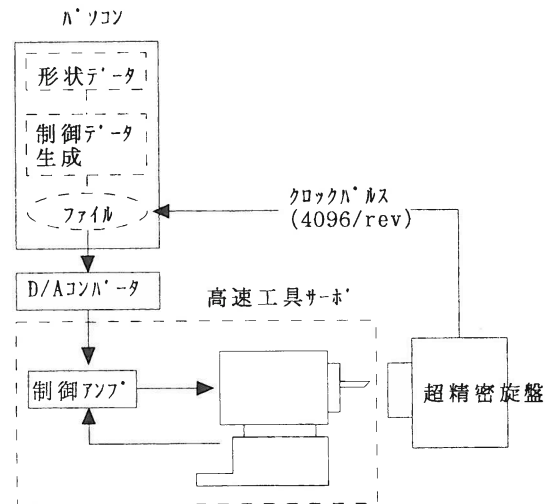


図14 加工制御システム

### 3. 3 制御データ

工具の切り込み量を制御するデータは、あらかじめパソコン上で作成する。

制御データを作成するプログラムと加工を制御するプログラムは「TURBO C++」により作成した。

形状データの作成方法は次の3種類がある。

- ①XY座標軸上の点、線、線に囲まれた面、各面の切り込み量、加工条件などを入力する。入力された形状データは、工具軌跡上の各点の切り込み量の制御データとして変換される。
- ②市販のソフト等からのビットマップデータ上の各点に対し、Z方向の切り込み量のデータを与える。このデータを制御データに変換する。
- ③サインカーブ等の関数で与えられる曲面は、与えられた関数を元に、各座標における切り込み量を計算して制御データを作成する。

この3種類の方法を形状に応じて使い分けられるのでいろいろな形状の生成が可能である。

変換されたデータは、加工制御用プログラムによって旋盤の主軸に取り付けられたロータリエンコーダの出力パルスと同期させながら高速工具サーボに供給される。したがって、旋盤の主軸に回転むらが生じてもそれに影響されることなく加工を行うことができる。

## 4. 切削試験

### 4. 1 試験方法

次に、パソコンで切り込み量の制御データを作成し、非回転対称形状を生成する切削加工試験を行った。

生成される形状には次のような制限がある。

切り込み方向：変位限界：10  $\mu\text{m}$

分解能：2 nm

送り方向：工具のノーズ半径とトラックピッチで決まる理論粗さが発生する。また、段差を築く時、工具ノーズ半径による斜面ができる。

切削方向：主軸回転角分解能が有限（4096/dev）であるため、指令分解能も有限である。

切削加工における加工条件は以下の通りである。

試料：アルミの母材に100  $\mu\text{m}$ 程度のニッケルメッキを施した直径50mmの円筒形試料

主軸回転数：90rpm

X軸送り速度：1 mm/min

工具ノーズ半径：0.4mm

切削油：テレピン油のミスト

### 4. 2 試験結果

以下に本システムで正面切削加工試験を行った加工例を示す。

#### 4. 2. 1 微小文字

図15に微小な文字の加工例を示す。縦約0.4mm×横約0.4mmの範囲に約2  $\mu\text{m}$ 段差をつけて微小な文字を加工できた。

同間隔で斜めにはいる筋は工具軌跡のピッチではなく、トラックピッチである。これは、ハードウェアを改善することで、より微細な形状の生成が加工であり、加工限界ではない。

図16に微小文字を3次元表示したものを示す。



図15 微小文字の加工

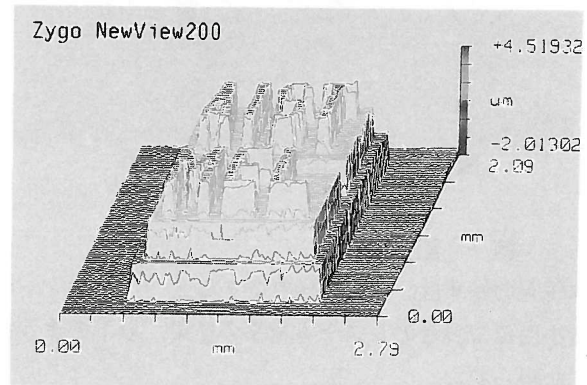


図16 微小文字の3次元表示

#### 4. 2. 2 ビットマップ入力による加工例

図17に、3. 2に示したデータ入力方法②によりビットマップからのデータを元に加工した日本地図を示す。このように既成の図形データ等を流用して、制御データを作成し、加工することも可能である。



図17 ビットマップデータを元にした日本地図

#### 4. 2. 3 二次元正弦波

図18に片振幅 $2\mu\text{m}$ 、波長 $2\text{mm}$ の正弦波を2次元に配した加工例を示す。前述した3つの加工例のように段差加工だけでなく、このように連続した曲面の加工も可能である。

図19に3次元表示したものを示す。

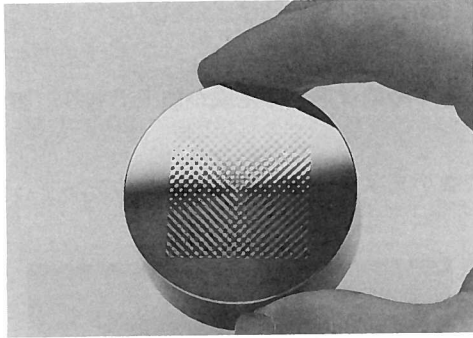


図18 二次元正弦波

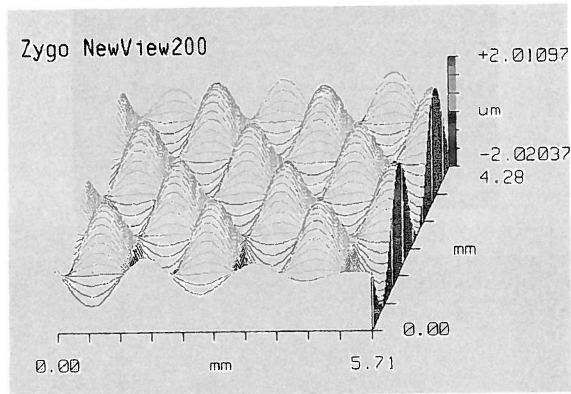


図19 二次元正弦波の3次元表示

#### 5. 結 言

本研究の結果は、以下の通りである。

- ①微小変位工具台のシステム構築の結果、以下のような性能が得られた。

作動距離： $10\mu\text{m}$

分解能： $2\text{nm}$

応答バンド幅： $1.1\text{kHz}$

- ②切削試験の結果、微小な段差（数 $\mu\text{m}$ 以下）を持つ鮮明な非回転対称形状の生成が可能になった。

- ③今後の課題としては、

- a)創成形状の分解能の向上

創成形状の分解能を向上させるには、工具ノーズ径を小さくする、トラックピッチを小さくする、主軸回転数を落とす、工具サーボの応答性を高めるなどの方法が必要である。これには、ハードウェアの改良と膨大な加工制御データ、それを連続的に供給出来る制御系が必要である。

- b)形状精度の向上

形状精度を向上させるには、工具と工作物の環境温度に対する相対変化が最も大きい課題である。

#### 謝 辞

本研究を実施するにあたり、ご指導下さった工業技術院機械技術研究所生産システム部生産機械研究室岡崎祐一主任研究官に深く感謝します。また、同じく生産機械研究室の森和男室長をはじめ生産機械研究室の皆様にも厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1)岡崎祐一：圧電素子を用いた微小変位工具台，精密学会誌，54，7，(1988)1375
- 2)例えば，岡崎祐一：圧電素子を用いた微小変位工具台の開発，機械研ニュース，59，1，(1984)4
- 3)横井与次郎：リニアIC実用回路マニュアル，ラジオ技術社(1980)
- 4)今井聖：信号処理工学，コロナ社(1993)
- 5)石田義久・鎌田弘之：デジタル信号処理のポイント，産業図書(1990)
- 6)桐山清：基本C言語入門，CQ出版社(1995)
- 7)戸川隼人：ザ・C，サイエンス社(1996)