延性モード切削加工用の超精密変位台の開発*

大塚二郎** 秦 誠一*** 下河辺 明*** 越水重臣**

Development of Ultraprecision Table for Ductile Mode Cutting

Jiro OTSUKA, Seiichi HATA, Akira SHIMOKOHBE and Shigeomi KOSHIMIZU

In order to correct the defects of the conventional ultraprecision tables, the ultraprecision table with a machined point control type was newly developed and the ductile mode cutting for brittle materials was achieved. The table which is subject to Abbe's principle in the vertical cutting direction consists of a piezoelectric actuator and a laser measuring system as the feedback sensor. In the horizontal feed direction it is moved by a DC servomotor and steel-belt. Its vertical positioning resolution is 5 nm, the straightness is 10 nm in the 100 mm stroke and the static rigidity is infinite by a PI-D control, but the dynamic rigidity is a little poor due to mechanical resonance. The silicon cutting test using this table shows a good result which can discriminate between the ductile mode cutting and brittle mode cutting by use of an AE sensor and cutting resistance ratio.

Key words: ultraprecision table, feedback control, nm level positioning, straightness, rigidity, brittle material, ductile mode cutting

1. 緒 言

シリコン、ガラス、各種セラミックス等の硬ぜい材料を超精密に加工しようというとき、仕上では切込みを非常に小さくする延性モード加工¹⁾にして超精密な形状の面を得られるようにすれば、ぜい性モード加工で生じた表面欠陥を取り除くためのラッピング等の工程を省くことができる。

0.1 μm 以下の切込みによる延性モード加工を確実にするには、工具台やテーブルに小さい変位分解能、広い制御帯域、大きい剛性が必要である。このような微小切込みを達成するための研究を概観すると表 1^{2)~6)} のようになる。

これらの超精密変位台は、いずれも図 1 (a) のように工作機械のテーブル上に搭載する構造となっている。この構造では

- (1) 加工点と、測定点が同一直線上にないために、「アッペの原理」を満たさないで、単一の変位センサでは加工点に誤差を生じ、高精度な位置決めを達成するために、ピッチング等の姿勢変化を補正するために複数のセンサ、アクチュエータが必要となる。
- (2) 超精密変位台本体を、送り用のテーブルに載せるために、工作範囲に比べ装置全体が大型化する、などの問題点がある。

本研究では、以上のような問題点を解決するために図 1 (b) のような「加工点制御型超精密変位台」と名付けた超精密変位台を開発して、5 nm 分解能の切込みと 10 nm の高真直度を同時達成できるようにし、次にその応用として、その超精密変位台を用いてぜい性モード加工と延性モード加工のモード判別が可能になるようにしたので報告する。

2. 構造と制御

2.1 構 造

図 1 (b) のような加工点制御型超精密変位台の構造上の特長としては、

- (1) 単一のセンサでもアッペの原理に従っているので、加工点の切込み方向変位の誤差を小さくできる。
- (2) 構造的に切込み機構上に、送り機構（テーブル）を搭載して、アッペの原理に従っているので、送り運動に伴う姿勢変化、振動も切込み制御用のセンサ、アクチュエータで制御・補正できる。
- (3) テーブル下面の超精密基準面にならってテーブルを移動するので、高精度な真直面の加工が実現できる。
- (4) 装置全体を小型化できる。

などが挙げられる。

図 2 はこのような加工点制御型超精密変位台をもう少し詳しく説明したものであり、図 3 はその外観である。

この加工点制御型超精密変位台は、工作物の載ったテーブルを水平方向 (x 方向) に送りながら、圧電素子によりテーブルに nm レベルの垂直方向 (z 方向) の切込み変位を与える。テーブルは軽量化と高剛性化のためにアルミナセラミックスでできている。その下面は $\phi 100$ にわたりアルミニウムコーティングされ、ラッピングにより $\lambda/30$ ($=20$ nm) の平面度を持つ超精密平面となっていて、 x 方向送りの際の基準となっている。テーブルの x 方向の送り機構と z 方向に微小切込み変位を与える機構について、以下に述べる。

(i) x 方向の送り機構

送り要素としてのボールねじは、ナット内のボール循環による微振動を発生したり、ねじ軸の曲がりによるナットふれまわりがテーブルの姿勢変化や真直度の誤差を発生する⁷⁾。本研究では、最終的にはこれらの誤差のうち z 方向の低周波成分のものは変位フィードバック制御により補正されるものの、ここではボールねじをやめて図 2 に示すようにスチールベルトを用いることにした。スチールベルトは切込み方向への干渉がほとんどないという特色も持つ。また、テーブルのガイドとしては、摩擦係数は大きい、動剛性にすぐれるすべり案内を考えしたが、筆者らにそれを高精度に仕上げる能力に欠けているので、転がりガイドの中では比較的高剛性のクロスローラガイド（ユニオンツール社、TGA 15）を用いた。

(ii) z 方向に微小切込み変位を与える機構

図 2 に示すように、2 つの性能の等しい圧電素子 A, B の伸

* 原稿受付 平成 9 年 7 月 16 日

** 正 会 員 静岡理科大学理工学部（袋井市豊沢 2200-2）

*** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所（横浜市緑区長津田町 4259）

Table 1 Previous and authors' studies on developed devices to obtain very small depth of cut

Researcher (AD years)	Details	Stroke μm	Resolution nm	Static rigidity $\text{N}/\mu\text{m}$	Resonant frequency Hz	Band width Hz	Actuator	Preload method	Displacement sensor	Control method	Use
S. R. Patterson and E. B. Magrab ²⁾ (1985)		± 1.25	2.5	190	No	100	PEA	Diaphragm flexure	Capacitance gauge	I control	—
H. Shimizu, et al. ³⁾ (1988)		14.1	40	240	Unknown	25	PEA	Diaphragm flexure	LVDT	P control	Cutting aluminium
Y. Okazaki ⁴⁾ (1988)		± 2.5	5	2 400	No	410	PEA	Parallel spring	Capacitance gauge	I control with state feedback	Cutting aluminium
K. Mizutani, T. Kawano and Y. Tanaka ⁹⁾ (1990)		10	5	800	500	Unknown	PEA	Helical spring	Strain gauge	ID control	Grinding ceramics
M. Inoue and H. Arai ⁶⁾ (1993)		13.5	40	8 000	Unknown	Unknown	PEA	Parallel spring	Capacitance gauge	PI control	Grinding
Authors (1997)		10	5	∞	900	85	PEA	Parallel spring	Laser interferometer	PI-D control	Brittle/ductile mode cutting (silicon)

Fig. 1 Ultraprecision table

Fig. 3 Overview of ultraprecision table

Fig. 2 Structure of ultraprecision table

縮によりサイドプレートが z 方向に微小変位する。サイドプレートは平行ばねで支えられている。工作物上の加工点 P の真下にある超精密平面上の Q の z 方向変位はレーザ測長器(Zygo社 AXIOM 2/20, 分解能 1.25 nm)により測定される。干渉計はベースプレートに固定されていて不動であり、ここでレーザ光路は 90° だけ曲がる。工具刃先の加工点 P はレーザ光路の延長上にある。工具は後に述べるように門型工具台に支えられていて不動である。結局、 P, Q, R は一直線上に並べられていて、アッペの原理に従っている。ここで、距離 QR が一定($=l$)になるように超精密平面上になったフィードバック制御を働かせながらテーブルを x 方向に移動して工作物に真

Fig. 4 Influence of pitching θ

直面を加工しようというものである。

テーブルが右方向へ移動して、図4のようにテーブルに θ だけのピッチングが発生したとする。この状態でも $QR=l$ に制御され、従って、 PQ はいつも一定となる。 P より超精密平面へ垂直におろした足を Q' とすると、

$$PQ' = PQ \cos \theta \quad (1)$$

となるが、アッペの原理に従っているので $PQ' \approx PQ$ とみなしてよく、工作物にはテーブル下面の超精密平面にならった真直面が加工されることになる。実際に、テーブルのピッチングは最大 $\theta=12^\circ$ であり、工作物の厚さも考慮して $PQ=30\text{ mm}$ とすると、このときのコサイン誤差は $5.1 \times 10^{-2}\text{ nm}$ となり、この値は十分無視できる。将来的には、圧電素子 A と B の伸縮に差をつけることによりテーブルのローリングの影響も補正して超精密平面を加工可能にすることも考えている。

2.2 制御

(1) モデル化

図2の装置の z 方向振動系を図5のように簡略化する。図6

Fig. 5 Vibration model in z direction

Fig. 6 Block diagram

は、図5をブロック線図にしたものである。同図で $G_p(s)$ は圧電素子アンプの入力電圧 e から圧電素子変位 z_0 までの伝達関数で、近似的に次式で示される。

$$G_p(s) = \frac{z_0(s)}{e(s)} = \frac{K_{amp}}{T_1 s + 1} \quad (2)$$

ここで K_{amp} は圧電素子アンプのゲインである。また同図中の F_N は、外乱としての切削抵抗の背分力を示す。図6より、次のような関係式が導かれる。

$$z_t(s) = \left(\frac{b_1 s^2 + b_2 s + b_3}{a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5} \right) z_0(s) + \left(\frac{c_1 s^3 + c_2 s^2 + c_3 s + c_4}{a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5} \right) F_N(s) \quad (3)$$

ここで、

z_t : テーブル変位

z_h : サイドプレート変位

m_t : テーブル質量

m_h : サイドプレートとテーブルガイド下面の質量の和

である。

式(3)を次のように置きかえる

$$z_t(s) = G_z(s) z_0(s) + G_F(s) F_N(s) \quad (4)$$

図5, 6で、 c_h (平行ばねの減衰係数) 等いくつかのパラメータが不明なので、テーブル変位の各種の周波数応答試験とステップ応答試験を行って、それらの値を決定した。

図7は、圧電素子アンプへの電圧 e を入力、テーブル変位 z_t を出力とする開ループの周波数応答試験結果を破線で示す。実線は図6を $F_N=0$ として計算した結果で、図5のモデルと実際の装置が $f=1$ kHz 位まである程度一致していることを示

Fig. 7 Frequency characteristic of open-loop

Fig. 8 Block diagram using PI-D control

している。ここで、 $f_1=420$ Hz (実験値のみ)、 $f_2=900$ Hz、 $f_3=2300$ Hz に共振点がみられる。 $f_1=420$ Hz は、図2に示す鋳鉄ベースの共振で、詳しくは3.2節(2)(b)で述べる。 $f_2=900$ Hz は、クロスローラガイドの転動体の z 方向ばね成分 k_t とテーブル質量 m_t による共振点であり、 $f_3=2300$ Hz はばね定数 k_h 、 k_p とサイドプレート質量 m_h による共振点である。これらの共振点をなるべく高周波域へもっていくために、次のような工夫をした。クロスローラガイドの予圧を大きくすることにより k_t を大きくすると同時に、テーブルをセラミックス製にしてその質量 m_t を小さくすることにより f_2 を大きくしている。また、平行ばねの剛性 k_h と圧電素子・サイドプレート間の剛性 k_p をなるべく大きくすると同時に、サイドプレートの質量 m_h を小さくするよう努力して f_3 を大きくした。

(2) 制御法

ここでは、図8に示すような微分先行型のPI-D制御を用いる。これは、通常のPID制御に比べて切削力などの外乱に対して微分動作が有効に働き、目標値の変化に対して微分動作があまり敏感に働かないという特色を持つ⁸⁾⁹⁾。また、 f_1, f_2, f_3 の共振周波数の影響を小さくするために帰還回路に2次形ローパスフィルタを挿入した。このカットオフ周波数とPI-Dの各係数はシミュレーション (MATLAB/SIMULINK による) と位置決め実験を行いながら決定した。ここでは、カットオフ周波数は400 Hz が最適であった。また、レーザ測長器からのノイズのためにDの係数を十分に大きくできなかった。

(3) 閉ループ特性

PI-D制御を適用したときの周波数特性を図9に示す。破線は実験値であり、実線は図8で $F_N=0$ として計算した理論値である。閉ループ制御としたこと、PI-D制御としたこと、帰還回路のローパスフィルタの採用により、 $f_2=900$ Hz と $f_3=2300$ Hz の共振成分を小さくすることができた。ここでの制

Fig. 9 Frequency characteristic of closed loop of Fig. 8

Fig. 10 Vertical table displacement (Table feed speed: 5 mm/s)

御帯域は 85 Hz である。

3. 実験

3.1 z 方向変位精度と変位分解能

テーブルを x 方向に速度 $v=5$ mm/s で送ったとき、無制御（開ループ）時、制御（閉ループ）時のテーブル変位 z_1 を図 10 に示す。ここで、 z_1 はレーザ測長器の出力値を示していて、超精密平面を基準とするテーブル真直度を示していることになる。この図で、無制御時にテーブルのストローク 100 mm での z 方向の誤差は約 $0.5 \mu\text{m}$ である。このカーブの周期成分はクロスローガイドより出たもので、転動体の移動周期に一致する。一方、図 8 の入力指令値 z_r を零として PI-D フィードバック制御により補正を加えた場合、図 10 における z_1 は、ほぼ 10 nm に入っている（図 13 (a) 参照）。本来ならば、 z_1 の測定はテーブル上に直定規を固定してそれに対するテーブルの z 方向変位を測定すべきであるが、筆者らの所にテーブル下面の超精密平面の真直度 20 nm より精度の高い直定規が無かったため、そのような測定は行えなかった。

図 11 に閉ループ制御による 5 nm のステップ応答を繰り返

Fig. 11 Repeated 5 nm step response test results of vertical table displacement

した結果を示す。テーブルの x 方向速度 $v=3$ および 7 mm/s の場合には、 5 nm の位置決め分解能は十分認められるが、同図 (c) の $v=11 \text{ mm/s}$ では、 5 nm の位置決め分解能はややしくなることがわかる。

3.2 剛性試験

(1) 静剛性

門型工具台にひもでつるした質量 1 kg のおもりのひもを切ることにより、テーブルへの外乱（切削の際の背分力 F_N に相当）としてステップ状入力を与える。このとき 60 ms でテーブルの z 方向振動は収まり、PI-D 制御の積分要素のため定常偏差は全く生じない。従って、静剛性は無限大となる。なお、無制御時の静剛性は $187 \text{ N}/\mu\text{m}$ であった。

(2) コンプライアンス

図 8 で力 F_N を入力、変位 z_1 を出力とするときの伝達関数をコンプライアンスというが、これは剛性の逆数になる¹⁰⁾。次のような 2 法によりこれを求めた。

(a) 電磁力加振器による方法 テーブル上面の加工点 P に外部から z 方向の正弦波入力の力 F_N を加えるために、電磁力加振器を十分な剛性を持つ門型工具台に固定し、この工具台をテーブル上に設けた。加振器に正弦波電圧を与えて、テーブル変位 z_1 をレーザ測長器により測定した。しかし、電磁石の鉄芯に発生する渦電流により 100 Hz までのコンプライアンスしか得られなかった。このコンプライアンスは、図 6 から得られる理論値と比較的一致した。

(b) ハンマリング試験法 次に、近似的な方法であるが、インパルスハンマでテーブルを z 方向にたたくインパルスハンマリング法を採用した¹¹⁾。無制御時のコンプライアンスを図 12 (a) に、制御時のコンプライアンスを同図 (b) に示す。ここで、破線は実験値であり、実線は図 8 の理論値を計算したものである。図 12 の (a) と (b) の実験値を比較すると、制御を行うことにより $f=80 \text{ Hz}$ 以下でのコンプライアンスは無制御時より小さくなるので、制御の効果があることを示している。

ところで、 $f_1=420 \text{ Hz}$ の共振は、図 7、図 9 ではあまり認められなかったが、図 12 には大きくなって出現する。これは図 2 で鋳鉄ベースの剛性不足から起こる複雑なベースの振動が QR 間に伝わるためである。次節で述べるとおり、この影響は本研究での切削では無視できるが、切込みを深くして F_N が大きくなる切削を行うときにはもっと剛性の大きいベースに置き換える必要があることを示している。

3.3 切削加工試験

開発した超精密変位台を用いて次のような切削試験を行った。テーブル上に AE センサを内蔵した傾斜台を設置し、その上に単結晶シリコン（結晶面 (100)）を接着剤で固定する。傾斜台をテーブル進行方向に対してわずかに傾け（傾き角 $2.3 \times 10^{-4} \text{ rad}$ ）、門型工具台をテーブルの上の方に設置し、そこには背分力 F_N と主分力 F_T が測定可能な力センサを介してダイヤモンド工具（すくい角 $= -30^\circ$ ）を設ける。テーブルには制御を働かせて x 方向に $v=7 \text{ mm/s}$ で送りながらシリコンを微小斜め切削する実験を行った。

このときのレーザ測長器によるテーブルの z 方向変位を図 13 (a) に示す。ここでわかるとおり z_1 はほぼ 10 nm に入っている。また、切削溝深さより求め

Fig. 12 Compliance test results by impulse hammering

た切込み深さ d を同図 (b) に、同時に測定した AE センサ出力を同図 (c) に、切削抵抗 F_N , F_T を同図 (d) に示す。 $t = 0.1 \sim 0.2$ s は切削せずに上すべりしており、切削は $t = 0.2$ s から始まり、 $t = 0.7$ s で切込み深さ $d = 0.83 \mu\text{m}$ になっている。

AFM で切削後の切削溝を観察した。図 14 は、図 13 (b) の切込み深さ $d_1 = 0.16 \mu\text{m}$ と $d_2 = 0.27 \mu\text{m}$ における切削溝を AFM 観察したものである。図 14 (a) の $d_1 = 0.16 \mu\text{m}$ の AFM 写真では溝はきれいで、さらに $t = 0.2 \sim 0.3$ s の所の切削溝を斜め切断することにより内部にもクラックのないことを確認したので、 $t = 0.2 \sim 0.3$ s では明らかに延性モード加工であることがわかった。 $t = 0.3$ s に相当する切込み深さ $0.17 \mu\text{m}$ より大きい所では切削溝に図 14 (b) に示すような欠けやクラックが観察され、これは図 13 (c) の AE が突発的に発生する時と一致する。また、図 13 (d) で切削抵抗比 F_T/F_N を求めると $t = 0.3$ s よりこの比はおおよそ 0.2 になり、この値が延性/ぜい性モードの遷移点になることが予想される。

このように硬ぜい材料の延性モード加工とぜい性モード加工を、

(i) AE センサを用いる方法¹²⁾、(ii) 切削抵抗比による方法¹³⁾のほかに、フラクトルミネッセンスという発光現象¹⁴⁾を用いる方法により延性モードとぜい性モードの判別を可能にするために、本研究で開発された加工点制御型超精密変位台を用いるが、これらの詳細は次報で報告する。なお、表 1 の末尾に、本変位台の性能を参考に加えた。

4. 結 論

本研究により得られた成果をまとめると次のようになる。

(1) スチールベルトによりテーブルの水平方向移動を行い、圧電素子を用いて垂直方向の微小切込み変位を与える加工点制御型超精密変位台を開発した。そこでは、テーブル下面の超精密平面を基準とする PI-D のフィードバック制御を適用した。

Fig. 13 Cutting test results

(a) Groove without broken edge (Ductile mode)

(b) Groove with broken edges (Brittle mode)

Fig. 14 AFM observation

- (i) 制御帯域は 85 Hz であり、切込み分解能は 5 nm である。テーブル移動ストローク 100 mm に対する加工点の垂直方向真直度は 10 nm である。
- (ii) 制御を行わないとき垂直方向の静剛性は $187 \text{ N}/\mu\text{m}$ であるが、制御を行うと静剛性は無限大になり、80 Hz までは動剛性の向上がみられた。しかし、鋳鉄ベースの剛性不足により大きな切削力を受けるような場合には改造が必要である。
- (2) この加工点制御型超精密変位台を用いて単結晶シリコンの微小斜め切削試験を行ったところ、延性モードとぜい性モードの判別が AE センサの利用により可能になること

がわかり、切削抵抗比でも判別可能になる予測ができた。
本実験条件のもとでの延性、ぜい性遷移点は切込み深さに
して $0.17\text{ }\mu\text{m}$ 付近にあることがわかった。

最後に、本研究の実施に当たって、(財)日本科学協会笹川科学研究助成と大沢科学技術振興財団より金銭的援助をいただいた。装置設計に当たって東京工業高等専門学校の吉村靖夫教授に、装置作製に当たって三井精機工業(株)と黒田精工(株)に、セラミックステープルの下面ラッピングにニコン(株)にご協力とご援助をいただいた。また、実験に当たって東京工業大学精密工学研究所の佐藤海二助教授にご協力いただいた。以上の方々に心より感謝申し上げます。

この研究は、静岡理工科大学機械工学科の卒業研究としても行われ、北川孝和君、八木淳君、松永竹生君、小島伯夫君がそれに従事したことを書き加え、感謝する。

参 考 文 献

- 1) 宮下政和：ぜい性材料の延性モード研削加工技術——ナノ研削技術への道，精密工学会誌，**56**, 5 (1990) 782.
- 2) S. R. Patterson and E. B. Magrab : Design and Testing of a Fast Tool Servo for Diamond Turning, Prec. Eng., **7**, 3, (1985) 123.
- 3) 清水弘幸，吉川浩史，竹内芳美，稲田 久，佐田登志夫：積層型圧電素子を用いた工具微動装置の開発，1988年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1988) 439.
- 4) 岡崎裕一：圧電素子を用いた微小変位台，精密工学会誌，**54**, 7 (1988) 1375.
- 5) K. Mizutani, T. Kawano and Y. Tanaka : A Piezoelectric-drive Table and Its Application to Microgrinding of Ceramic Materials, Prec. Eng., **12**, 4, (1990) 219.
- 6) 井上 誠，荒田秀和：砥石-工作物間距離補正による精密平面研削の研究，1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1993) 123.
- 7) 大塚二郎，坂戸啓一郎：図解精密位置決め機構設計，工業調査会，(1996) 190.
- 8) 須田信英：PID制御，朝倉書店，(1992) 39.
- 9) 宮崎誠一，宮崎 仁：パソコンで学ぶ自動制御の応用学，CQ出版社，(1994) 56.
- 10) 精密工学会：精密加工便覧，コロナ社，(1992) 1285.
- 11) 大久保信行：機械のモータリナリシス，中央大学出版部，(1989) 52.
- 12) 白井信行，市田良夫，ベンクレジナヒル：アコースティックエミッションによるフェライト研削の研削モードのインプロセス識別，砥粒加工学会誌，**41**, 2 (1997) 61.
- 13) 水谷秀行ほか：ファインセラミックスの切削抵抗比と仕上面粗さとの関係，日本機械学会東海学生会第27会卒研発表会前刷，(1996) 107.
- 14) Y. Kawaguchi : Time-resolved Fractoluminescence Spectra of Silica Glass in a Vacuum and Nitrogen Atmosphere, Phys. Rev., B, (1995.10) 9224.