

# 高速スピンドルによる微細加工の検証

○正中康博、小塚基樹、山本浩治、白木尚康、立花一志、中木村雅史

部局系技術支援室工学技術系第2技術課（装置開発）

## はじめに

部局系技術支援室工学技術系第2技術課（装置開発）では、学部内で実証実験をする多数の教職員、学生、院生からの要望にこたえ、日々の製作業務に奔走している。その業務の内容は多岐にわたっているが、時として、手持ちにある工作機械の仕様を明らかに上回る、微細加工の依頼を迫られるケースも有り、平成20年4月、マシニングセンタの主軸に取り付ける「高速スピンドル」を購入した。工具の直径が1mmを下回る場合、相当数の回転数が得られないと切削加工は成り立たない。これにより主軸回転数で従来の最高で $8,000\text{min}^{-1}$ 、穴加工最小径0.2mmであったものが回転数 $50,000\text{min}^{-1}$ を得ることにより、穴加工最小径0.05mmを目指すことが理論的には可能となった。本研修はそれらの微細加工を実践し検証することを目的とした。

## 1. 使用する工作機械機器と検証機器の概要

### 1) 工作機械

オークマ製立形マシニングセンタ：MB-46VAE

振り幅 X：762mm Y：460mm Z：460mm

主軸回転数 50～8000 $\text{min}^{-1}$



### 2) 高速スピンドル

大昭和精機製

DC ブラシレスモータスピンドル：

T40-DBX5-6S-155

実用回転領域 30,000～50,000 $\text{min}^{-1}$



### 3) 検証機器

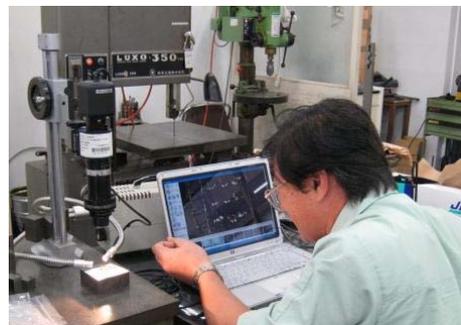
ナカデン製 デジタルマイクロスコープ：FS1400 1/2 型

130万画素 CMOS カラー

中倍率ズームユニットレンズ：NDL-40Z

40倍～240倍 ※本研修では200倍で使用

計測ソフト : FS1400 Measure



## 2. 微細穴加工

ここでは高速スピンドルを用いた小径ドリルによる微細穴加工について説明する。

現在、プリント基板や半導体関連部門では工具の微細化が進んでいることから大学内で行われる実

験装置の製作においても、その需要が増してきている。

### 1) 概要

φ0.05mmのドリルで3種類のフィラージェ (SUS304、リン青銅、SK) に穴あけ加工を行う。

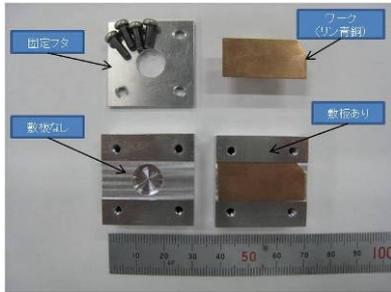


図 1. ワークおよび固定治具

図 1 に穴をあけるワークおよび固定治具を示す。ドリル (刃長 : 0.4mm) は超硬とハイスの2種類を使用した。また、ドリル径が極細であるため専用の刃先測定器 (小型工具対応) を購入し、刃長を測定している。固定治具は、敷板ありのものと敷板なしのもの2種類を用意した。この理由として、穴あけ時のワークのたわみによる影響、バリの状況を確認するためである。

### 2) 加工方法

工作機械はマシニングセンタを使用するが前述のように、最大回転数が不足しているため高速スピンドルを使用した。この場合、マシニングセンタの主軸は常に停止状態にしておく必要がある。通常マシニングセンタで穴加工を行う場合、固定サイクル G83 を使用するが大半のマシニングセンタは主軸停止状態で固定サイクルを実行するとプログラムエラーを起こしてしまう。従ってここでは固定サイクルを使わず、G83 に相似したマクロプログラム (Gコードマクロ) を作成して M130 指令 (切削送り時主軸回転条件切) により加工を行った。また、切削液はドリル径の細さを考慮し、タッピング油を固定フタの凹部に溜めた。図 2 は作成したプログラムを簡単に説明したものである。

通常の深穴あけ用固定サイクル	G83X_Y_Z_R_Q_P_F_ (主軸停止時実行不可能)
マクロを利用したプログラム	G113X_Y_Z_R_Q_P_F_ (主軸停止時実行可能)
G83 : 深穴あけ固定サイクル	
G113 : マクロプログラムを G コードに関連付したプログラム	
X : X 座標 Y : Y 座標 Z : 加工深さ R : 高速戻し位置 (切削開始点)	
Q : 1 回当たりの切り込み量 P : ドウエル (Z 軸停止時間) F : 送り速度	

図 2. 穴加工用プログラム

### 3) 加工条件

表 1 に加工条件を示す。

切削条件は通常次式により算出されるが、ドリル径が微細なことから高速スピンドルの最高回転数を基準とした。

$$N = 1000V / \pi D \quad V : \text{切削速度 (mm/min)} \quad D : \text{ドリル直径 (mm)} \quad N : \text{回転数 (min}^{-1}\text{)} \quad \pi : \text{円周率}$$

表 1 ドリルの加工条件

ドリル材質	ワーク材質	回転数 /min	送り mm/min	切込量 μm	加工深さ mm	敷板
超硬	SUS304、リン青銅、SK	50640	10	1	0.4	有・無
ハイス	SK	50640	10	1	0.4	無
	SK	50640	10	10	0.4	無
	SK	25020	5	1	0.4	無

超硬ドリルについては各材質、敷板の有無に関わらず同条件とした。また超硬ドリルではSK材に複数穴加工ができなかった為、ハイスドリルを使用して条件を変え加工した。

#### 4) 加工結果の検証

##### a. 超硬ドリル敷板なし加工

図3にSK材敷板なし加工のマイクロSCOPE観察を示し、表2に超硬ドリル加工結果を示す。

SUS304は表面・裏面ともほぼ同じサイズの穴が開けられたが、裏面にバリが発生した。

リン青銅は、穴は貫通しているが、裏面に対し、表面の穴径が若干拡大している。ただし、SUS304のような裏面のバリは、あまりみられなかった。

SKは、1つ目の穴は貫通しているが、使用ドリル径に対し1割ほど拡張している。また、バリの発生がみられる。

##### b. 超硬ドリル敷板あり加工

SUS304は、敷板なしのもの比べると穴径はあまり変わらないが、裏面にできたバリは、格段に解消されている。

リン青銅は、敷板なしにみられた表面の穴径の拡大もなく、きれいに開いていた。

SKは、裏面のバリが押しえられてはいるが、表面の穴径に対し裏面の穴径が、1.5倍に拡大している。この拡大のためバリが除去された可能性がある。

##### c. ハイスドリル敷板なし加工

図4にハイスドリルで加工したSK敷板なし加工をマイクロSCOPEで観察したものを示し、図5にハイスドリルの加工前、加工後に観察したものを示す。

各図よりドリル1・2については、摩耗してしまっただのが確認できた。また、ドリル3については、ドリルの偏心により欠損したものと思える。

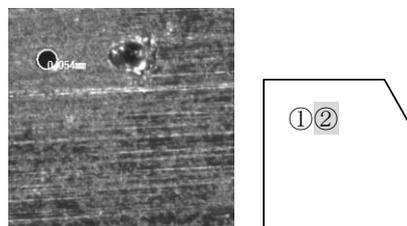


図3 SK敷板なし（表面より観察）

表2 超硬ドリル加工結果

材質	敷板	ドリル破損 (破損番号)	表面平均 穴径(mm)	裏面平均 穴径(mm)
SUS	無	無	0.05	0.05
	有	無	0.05	0.05
リン青銅	無	無	0.05	0.05
	有	無	0.05	0.05
SK材	無	有(②)	0.05	0.06
	有	有(②)	0.05	0.08

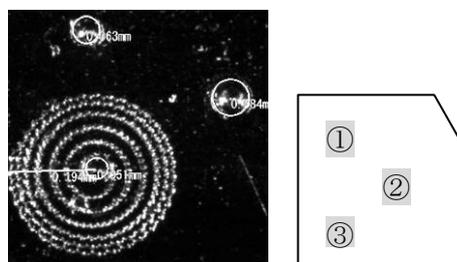
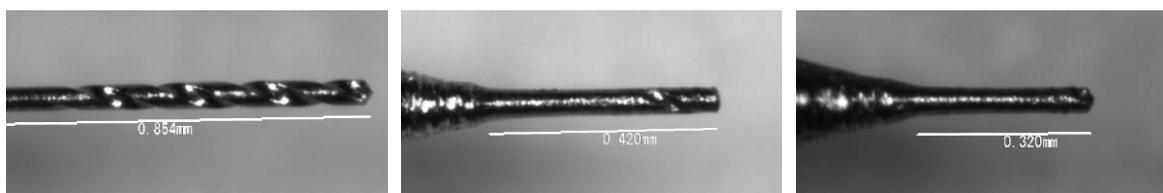


図4 ハイスドリルSK敷板なし  
（表面より観察）



ハイスドリル加工前

ドリル1

ドリル2

図5 ハイスドリル

### 3. エンドミル微細加工について

ここでは高速スピンドルを用いた小径エンドミルによる微細加工について説明する。超硬小径エンドミルは、主に電子機器、民生機器、自動車部品等の精密金型製作に使用されており、需要は今後とも増大していくものと考えられている。本学内でも実験装置の製作で流路に使用する溝加工の業務依頼があった。その際は、溝幅 0.5mm の流路を製作した。今後は、流路を問わずあらゆる分野で微細加工が重要となるのは必至である。

#### 1) フラットエンドミル加工

##### a. 概要

φ0.1mmのフラットエンドミルを用い、加工ワーク(真鍮・ジュラルミン(以後 A7075 と称する))に深さ 0.15mmの溝加工を行う。使用するフラットエンドミルは超硬(刃長 0.2mm)とした。用意したワークは図 6 に示すような立方体(10×10×10)の上部に 1×1×1 の立方体を 4 箇所削り出したもので表面は研削処理を行った。溝は平行溝および溝が交差する時のバリの状態を観察するために格子溝の 2 種類の加工を行った。



図 6. 溝加工用ワーク(真鍮)

##### b. 加工方法

工作機械はマシニングセンタを使用し、加工プログラムは 2 次元 CAM により作成した。加工工程として輪郭加工(指定した 2 次元線上を工具が動く)で CAM を行った。図 7 は工具の動く道(ツールパス)を表している。Z 軸方向の切り込み量(0.01mm)はメーカーのカタログから設定し、溝深さが 0.15mm であることから 15 層で加工を行っている。切削液は、通常の水溶性のものを使用し、工具に影響が出ないように流量を調節した。

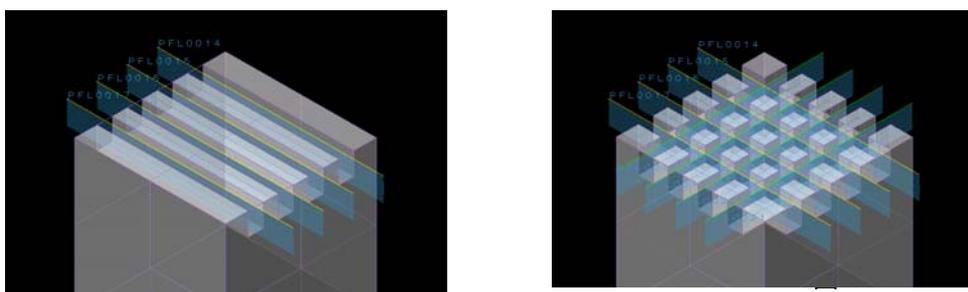


図 7. 2 次元 CAM のツールパス

##### c. 加工条件

加工条件は工具メーカーが推奨しているデータに従った。加工する材質は真鍮、ジュラルミン A7075 の 2 種類であるが、真鍮に対するデータのみが掲載されていたため両者とも同等な条件で加工した。結果は 4-1-d の加工結果の検証であらためて示すが両者とも工具の欠損なく加工を行えた。表 3 は加工条件をまとめたものである。

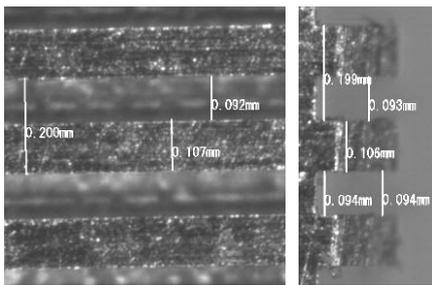
表 3. φ0.1mm フラットエンドミル加工条件

加工ワーク材質	真鍮, A7075
使用工具	φ0.1 フラットエンドミル (超硬) 刃長: 0.2mm
回転数	50640min <sup>-1</sup> (高速スピンドル最高値)
切削送り速度	100mm/min
Z軸切込み量	0.01mm (1回毎に切込む量)
切削液	水溶性
溝幅	0.1mm (工具径)
溝深さ	0.15mm

d. 加工結果の検証

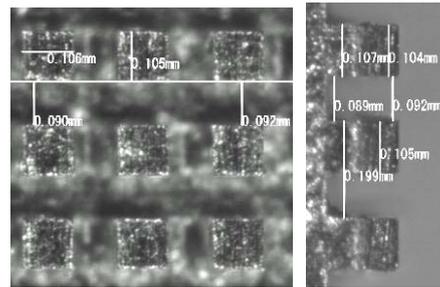
図 8 に真鍮平行溝をマイクロスコップで観察したものを示す。エンドミルの実測値相当の溝幅に仕上がりが、壁の垂直性も確保されている。

図 9 に真鍮格子溝をマイクロスコップで観察したものを示す。平行溝と同じようにエンドミルの実測値相当の溝幅に仕上がりが、壁の垂直性も確保されている。



上面 横面

図 8 真鍮平行溝加工

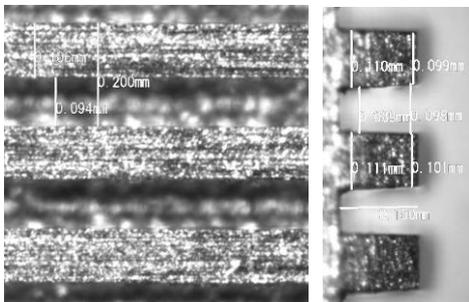


上面 横面

図 9 真鍮格子溝加工

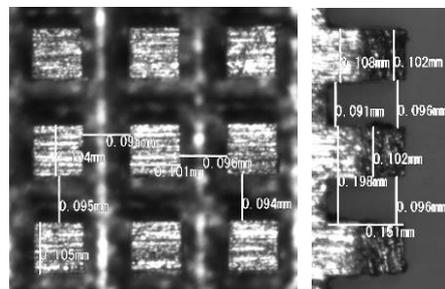
図 10 に A7075 平行溝をマイクロスコップで観察したものを示す。エンドミルの実測値より若干広い幅に加工され、壁の傾斜も多少みられる。

図 11 に A7075 格子溝をマイクロスコップで観察したものを示す。平行溝と同じ傾向が見られた。



上面 横面

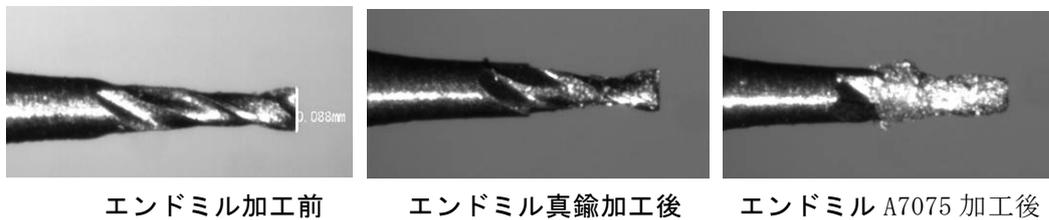
図 10 A7075 平行溝加工



上面 横面

図 11 A7075 格子溝加工

図 12 にフラットエンドミルをマイクロスコープで観察したものを示す。真鍮を加工したもの・A7075 を加工したものとも加工直後は溝に切粉が付着し、悪影響を及ぼしたのかと思われたが、柔らかいブラシで掃除をした結果、良好な状態を維持していた。



エンドミル加工前

エンドミル真鍮加工後

エンドミル A7075 加工後

図 12 フラットエンドミル

## 2) ボールエンドミル加工

### a. 概要

フラットエンドミル加工で製作した格子溝（真鍮・A7075）にボールエンドミル R 0.05 で微細加工を行う。

使用するボールエンドミルは超硬（刃長 0.2mm）とした。フラットエンドミルで加工した溝を利用し、ワーク中央部の立方体（ $0.1 \times 0.1 \times 0.15$ ）9 個について図 13 のような先端球状（R0.5）の円柱を製作する。

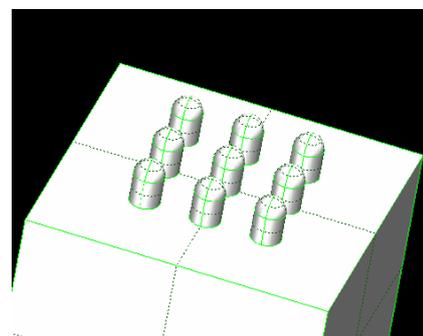


図 13. 3DCAD

### b. 加工方法

前加工としてフラットエンドミルを用いて 2 次元 CAM（図 14）により、9 個の円柱に削り出す加工を行う。その後、本題である円柱の先端を球状にする 3 次元 CAM（図 15）を行う。加工工程は仕上がりが良い等高スパイラル加工を使用し、1 個の円柱に付き 13 層で加工を行うプログラムを作成した。切削液はフラットエンドミル加工と同様に流量を調節した。

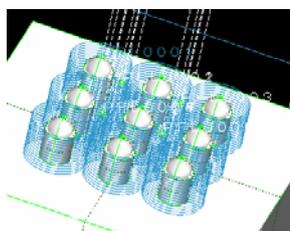


図 14. 円柱用 2 次元 CAM

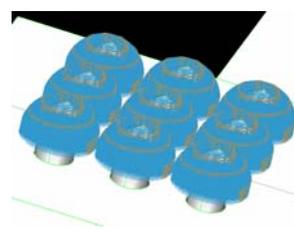


図 15. 3 次元 CAM

### c. 加工条件

加工条件は概ね工具メーカーが推奨しているデータに従った。円柱形状から球状に仕上げるには通常、粗加工を行うが円柱間の隙間が工具径と同じため残し量を設定することができない。そこで、仕上げ加工（等高スパイラル）の CAM データを Z 軸+方向に 0.078mm 間隔で 12 個複写し、合計 13 層の CAM データとして加工を行った。結果は 4-2-d の加工結果の検証であらためて示すが両者とも工具の欠損なく加工を行えた。表 3 は加工条件をまとめたものである。

表 4. R0.5mm ボールエンドミル加工条件

加工ワーク材質	真鍮, A7050
使用工具	ボールエンドミル R0.05 (超硬) 刃長: 0.2mm
回転数	50640min <sup>-1</sup> (高速スピンドル最高値)
切削送り速度	150mm/min
等高スパイラルピッチ	0.003mm
層数	13 層
切削液	水溶性

d. 加工結果の検証

図 16 に真鍮の円柱先端球状についてマイクロスコップで観察したものを示す。ほぼ同じ寸法に加工され、球面も観察した限りではなめらかな加工面が得られた。

図 17 に A7075 の円柱先端球状についてマイクロスコップで観察したものを示す。寸法については、真鍮同様にほぼ同じ寸法を得られたが、加工面のなめらかさは、真鍮と比べると多少光の乱反射が見て取れる。

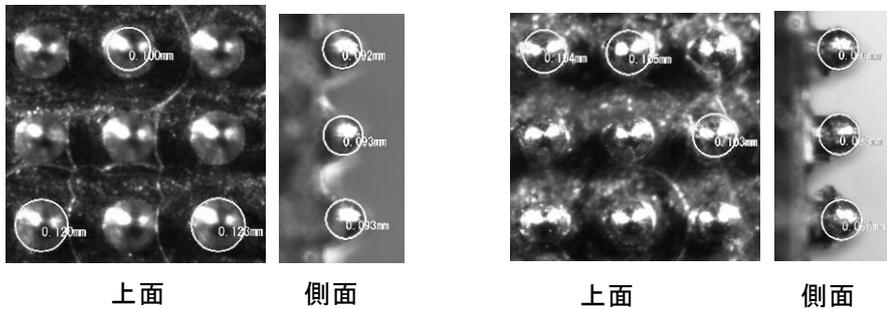


図 16 円柱先端球状 (真鍮)

図 17 円柱先端球状 (A7075)

図 18 に加工で使用したエンドミルをマイクロスコップ観察したものを示す。真鍮を加工したボールエンドミルは溝の 5 割ほどを切り粉が付着しているのに対し、A7075 を加工したものは、溝全体を覆っているように見える。フラットエンドミルと同じようにブラシで除去することはできたが、加工中に影響がなかったかどうかは判断できない。



図 18 エンドミル加工前後

## 4. 考察

ドリル加工について、敷板の使用はバリの発生を考えると通常はある方が良いが、SK の場合は底に溜まった切り粉が抵抗となりドリルがたわむ原因となったと考えられることから敷板を使用しない方が良い。

SK の加工時超硬ドリルが折れたのは靱性が低い為と考え、ハイスドリルを使用して回転数を下げ加工を行ったが良い結果は得られなかった。2. 4) c.項に見られたハイスドリルの偏心した原因は先端が磨耗してしまった為と思われる。ワーク材質の硬さ試験を行い、加工を試みる必要があった。

フラットエンドミルによる溝加工では真鍮は良好な結果が得られたが、A7075 は溝が台形になった。原因として、切り粉がフラットエンドミルのチップポケットに付着したせいと思われる。ボールエンドミルによる球状加工では、真鍮は、良好な面が得られたが、A7075 は表面にむしれと思われる乱反射がみられた。これは、真鍮と比較し、回転数が不足しているのではないかと思われる。

## 5. 今後の課題

ワークを取り付けたまま拡大観察し加工状態を確認できるように、マイクロスコープのスタンドおよび光源等の観察システムを整備することにより加工中の状態を観察できれば、適切な加工条件を設定できることから、より微細な加工が行えると考えられる。

SK への穴あけがドリル 1 本で一箇所しかあける事が出来なかったので条件を変えて加工を試みたい。

エンドミル加工については、工具の欠損無し、寸法は工具の交差の範囲内、マイクロスコープによる観察から加工については問題ないが、条件の見直しにより工具寿命、仕上げ面精度の向上が期待できる。

## 6. まとめ

当初の目的である高速スピンドルおよびマイクロスコープの取り扱いが習熟することが出来た。ただし、購入した高速スピンドルはメンテナンスが容易、工作機械本体に特別な治具を取り付ける必要が無いといったメリットがある反面、電源コード、エアチューブがスピンドルからコントローラに繋がっているので、ATC を行わないこと主軸を回転させないことを常に注意し操作する必要がある。

材質によっては、直径 0.05mm の穴加工、溝加工では 0.1mm を対象とする加工が可能となった。

G コードマクロを自ら作成したことで NC コードに対する知識が深まった。更にマクロプログラムをサブプログラムとし登録することでメインプログラムに XY 座標を設定するだけの簡単なプログラムで多数個の深穴加工を行う事ができた。

以上、本研修を行うにあたり、多くの関係者各位のご協力、ご厚意をたまわりました。ここに深く感謝申し上げます。