

## 小径エンドミル精密加工技術に関する研究\*

竹山 隆仁<sup>\*1</sup>・浦上 吉利<sup>\*2</sup>・大崎 悠平<sup>\*1</sup>・荒武 崇幸<sup>\*1</sup>

Study on the Technology of Precision Milling Using Small Diameter End Mill

Takahito TAKEYAMA, Yoshitoshi URAKAMI, Yuhei OSAKI and Takayuki ARATAKE

近年の微細加工の需要増に鑑み、県内機械関連企業への支援を目的として、高付加価値加工の一つである小径エンドミルによる精密加工技術の研究に取り組むこととした。直径1mm未満の小径エンドミル加工においては、加工精度等課題が多く残されている。そこで、本研究では高精度で安定した加工技術の確立を目指し、直径0.2mmのマイクロボールエンドミルによるSKD11生材に対する3次元連続ポケット加工を実施し、切削条件因子が加工精度・工具磨耗に与える影響を確認した。

キーワード：小径エンドミル，微細加工，工具磨耗

### 1 はじめに

各種機器の小型化が進む昨今、付加価値の高い加工の一つとして、小径エンドミルによる微細加工がある。ところが直径1mm未満の小径エンドミル加工においては、加工精度、工具寿命などの未だ解決されていない課題が存在する。そこで、小径エンドミルによる微細加工特性を把握することにより、高精度で安定した当該加工技術を確立することを目的とし、本研究を実施することとした。

今年度は、3次元連続ポケット加工について切削条件と被削材を変えた場合の加工を実施し、加工特性・工具磨耗特性を調査した。

### 2 実験方法

#### 2-1 実験装置

マシニングセンター（牧野フライス機製V55型）の主軸に高速スピンドルモーター（ナカニシ機製HES/E-500型）を取り付けて加工実験を行った。また、クーラントの供給にはオイルミスト装置（フジBC技研機製ブルーベBC-1）を使用した。図1に実験装置を示す。



図1 実験装置

#### 2-2 工具及び被削材

工具はマイクロボールエンドミル（不二越0.2mm，2枚刃）を用いた。被削材はSKD11生材（100mm×60mm×12mmH）とし、その比較対象として同寸法のSUS304を選択した。1μmオーダーの精密加工を行うにあたり、被削材表面の平面度が1μm以下となるよう研削加工した後、傾斜度が1μm以下となるよう専用治具を用いてマシニングセンターに取り付けた。

ボールエンドミルによる加工では、高さ方向のわずかな工具のずれによりポケット形状に大きな誤差が生じてしまう。そこで工具先端の正確な高

\* 小径エンドミル精密加工技術に関する研究（第3報）

\* 1 機械電子部

\* 2 県警察本部

さ位置測定には、高精度リミットスイッチを用いた。

### 2-3 切削加工実験条件

実験で加工したポケット形状は、上面0.35×0.35mmの正方形でコーナーR0.15mm、底面0.3×0.3mm、深さ0.15mmの、0.2mm以上のエンドミルでは加工できないコーナー曲率を持った逆四角錐に近い形状とした。図2にポケット形状を示す。

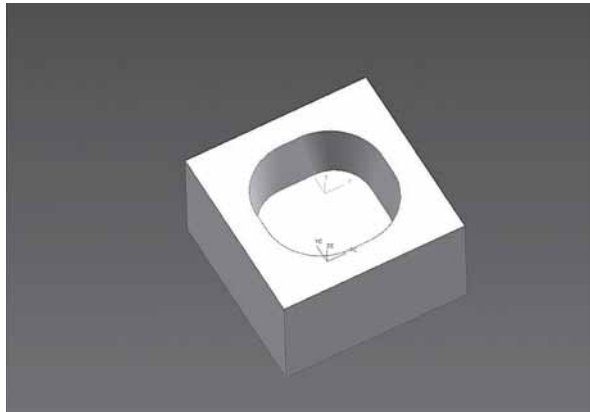


図2 ポケット形状

切削条件は表1のとおりとした。

表1 切削加工条件

送り速度 F	65, 90.3, 118.3mm/min
工具軸方向切込 Ad	0.001, 0.005, 0.01mm
工具径方向切込 Rd	0.003, 0.005, 0.01mm
回転数 N	10000, 30000, 50000rpm
回転方向	ダウンカット

ポケット間のピッチ及び加工箇所数については、X軸ピッチ1mm、Y軸ピッチ1mm、X方向20×Y方向5、計100箇所とした。

切削加工NCデータ作成はU-GRAPHを使用した。

### 2-4 加工の評価

加工の評価は、加工進行に伴うポケットのX軸中心位置誤差、Y軸中心位置誤差、ポケット上面寸法誤差、深さ誤差、バリの高さで行った。中心誤差、上面寸法誤差の測定は工具顕微鏡(NIKON MM-100)、深さ誤差とバリ高さの測定は非接触三次元表面構造解析顕微鏡(ZYGO NEWVIEW 5010)を使用した。

## 3 結果及び考察

前述の中心位置誤差、ポケット上面寸法誤差、深さ誤差、バリ高さについて評価したが、スペースの都合で特徴的なデータのみを記述することをご容赦いただきたい。特に中心位置誤差については、加工条件、加工箇所数、切削長には依存しないという結果が得られたため省略する。

### 3-1 送り速度についての比較

送り速度の影響について調査した。

図3にポケット上面寸法誤差と送り速度Fの関係について示す。横軸は加工箇所数とした。ポケット上面寸法誤差については、基本的には送り速度が小さい方が誤差は小さいが、小さくなりすぎると擦過時間の増大により精度が低下する。

ポケット加工プログラムの速度指令と実測値の差を確認したところ、両者には隔たりがあった。また、ある指令値を上限としてそれ以上増速しないことも判明した。今回のような微小領域で加減速を繰り返すと、工作機械が実際に到達できる速度に限界が生じるようである。なお、グラフでは実測した速度で示している。

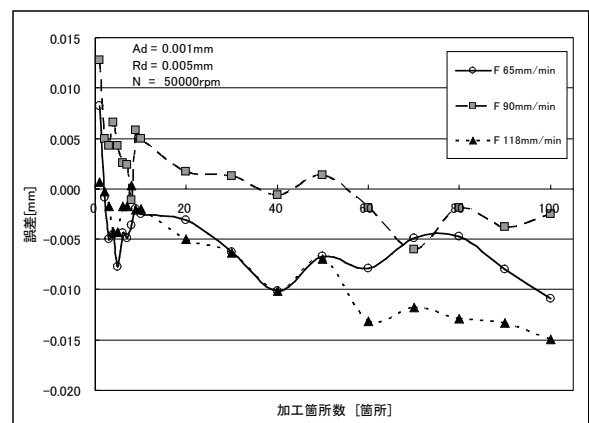


図3 ポケット上面寸法誤差(送り速度による比較)

### 3-2 軸方向切込についての比較

軸方向切込Adの影響について評価した。横軸を加工箇所数としたとき、ポケット上面寸法については、切込が小さいほど誤差がマイナス、即ち穴が小さく仕上がった。切込が小さいほど切削長は長くなり、工具摩耗が進行し精度が悪化する(図4)。ポケット深さ誤差についてみると、切込

が小さいほど穴が浅い(図5)。以上より、軸方向切込が小さいと工具は径方向・軸方向ともに摩耗が大きいと推測される。切削後のエンドミルを観察したところ、すくい面、外周部、先端部に摩耗が見られた。

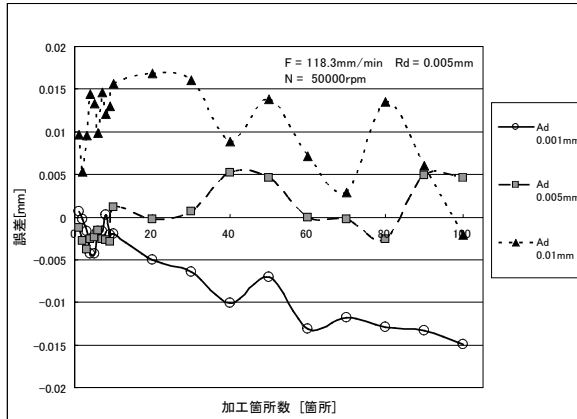


図4 ポケット上面寸法誤差(軸方向切込による比較)

てマイナス方向へ変化する傾向にある。軸方向切込を小さくすると、これらのピークが切削長が大となる方向(グラフの右方向)にずれるようである。

図8, 9にそれぞれ1箇所目と100箇所目の加工状況写真を示す。

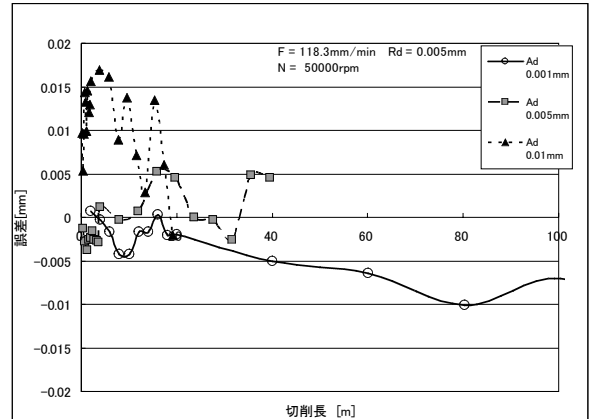


図6 ポケット上面寸法誤差と切削長の関係(切削長100mまで抽出)

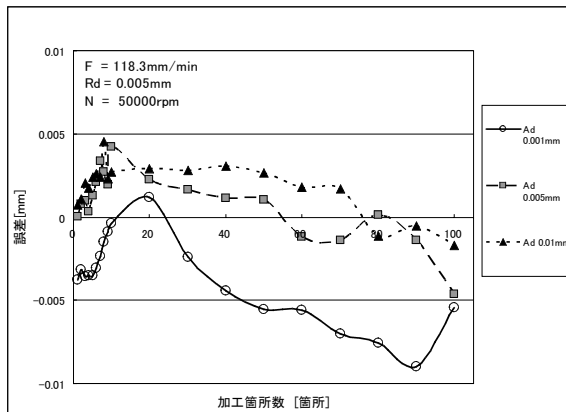


図5 ポケット深さ誤差(軸方向切込による比較)

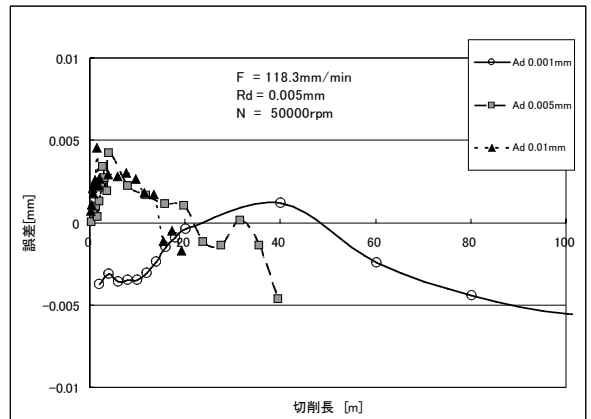


図7 ポケット深さ誤差と切削長の関係(切削長100mまで抽出)

横軸を切削長としたとき、ポケット100箇所での切削長は、軸方向切込Adが0.001mm, 0.005mm, 0.01mmでそれぞれ200.6m, 39.5m, 19.2mである。

切削長19.2mまでで比較するならば、切込が小さい方がポケット上面寸法誤差は小さい(図6)。

ポケット深さはAd0.005mmと0.01mmでは傾向が似ている(図7)。ポケット深さについては切削初期段階ではゼロ付近、またはマイナス方向にあり、切削長が大きくなるにつれてプラスに転じ、ピークを迎える。その後は工具摩耗の進行に伴っ

### 3-3 径方向切込についての比較

ポケット上面寸法誤差について横軸を加工箇所数とすると、切込Rd0.01mmでの誤差が小さい。Rd0.003mmと0.005mmは同等程度の誤差である(図10)。

横軸を切削長とした場合、切削長100mまでの範囲では、Rd0.01mmと0.003mmは切削長10mまでの初期段階で誤差が大きい傾向にある(図11)。

ポケット深さ誤差は、横軸を加工箇所数とすると、Rd0.003mmが切削長は最も長いにも関わらず誤差が小さい傾向にあり、軸方向の工具摩耗が

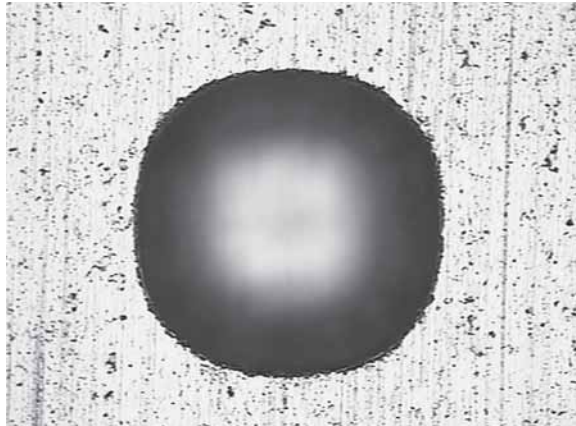


図8 1箇所目の加工状況写真 (F118.3mm/min, Ad0.001mm, Rd0.005mm, N50000rpm)

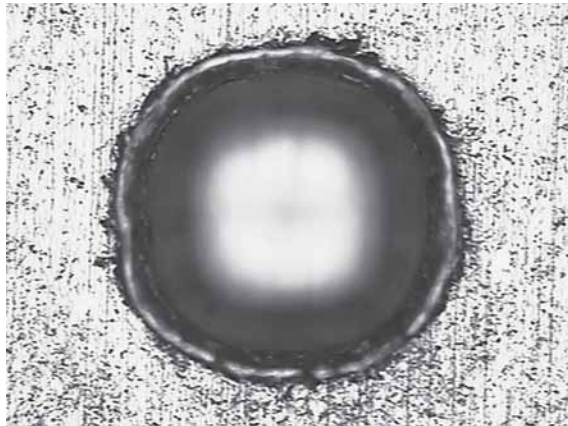


図9 100箇所目の加工状況写真 (図8と同一条件)

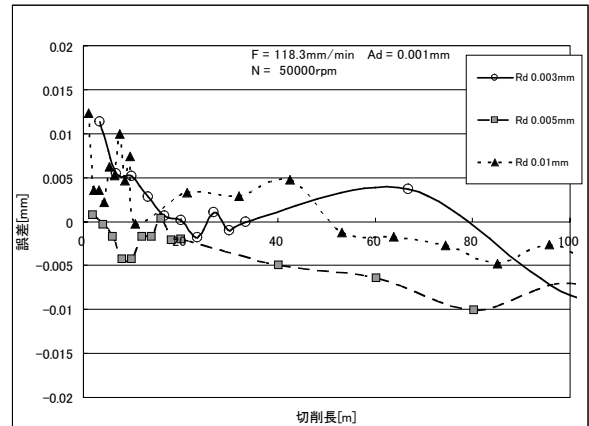


図11 ポケット上面寸法誤差 (径方向切込比較) (切削長100mまで抽出)

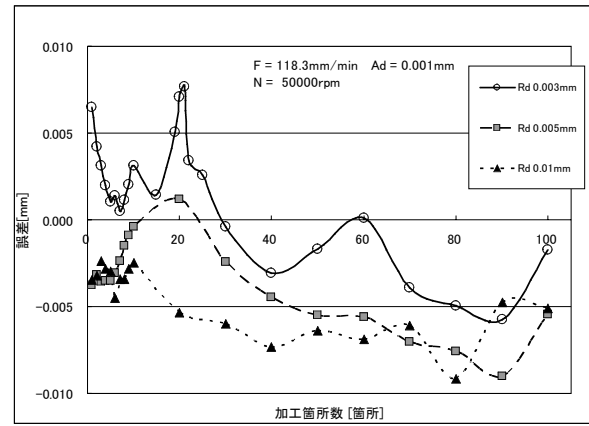


図12 ポケット深さ誤差 (径方向切込の比較)

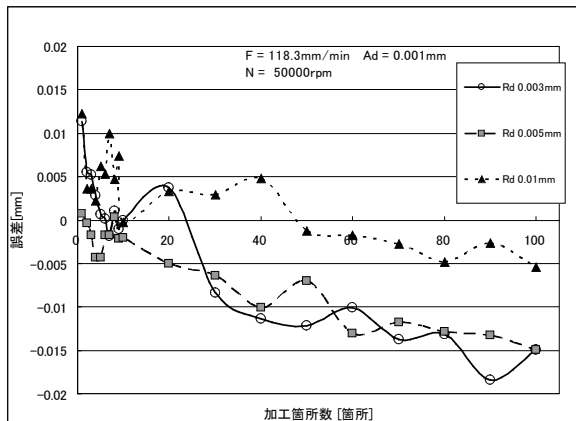


図10 ポケット上面寸法誤差 (径方向切込比較)

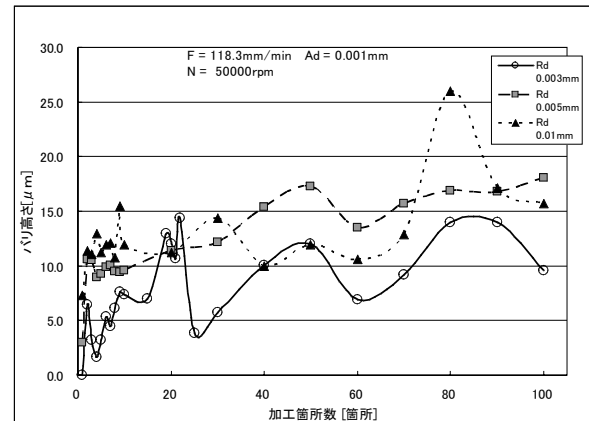


図13 バリの高さ (径方向切込の比較)

小さい。Rd0.005mmと0.01mmは60箇所目以降は同程度の傾向を示す (図12)。

バリ高さについては、横軸を加工箇所数とすると、20箇所目までは同程度であり、それ以降はRd0.003mmが最も小さい (図13)。切込を小さく

することにより精度は向上するが、切削長が長くなると工具摩耗が進行しやすいため、加工精度と表面粗さ及びコストを勘案して切削時間を短くする必要がある。

### 3-4 工具回転数についての比較

工具回転数Nの影響について、軸方向切込Ad 0.001mmと0.01mmとで比較した。ポケット上面寸法誤差については、Ad0.001mmでは回転数が高くなるほど誤差が大きくなった。一方、Ad0.01mmでは、加工箇所数が多くなると、回転数が高いほうが誤差は小さい。これまでの実験結果から、回転数が高いほうが精度が高い傾向にあったが、切込が小さいとその切削長ゆえに回転数の有効性があらわれにくいようである(図14, 15)。

ポケット深さ誤差は回転数が高い方が誤差が小さい傾向にある(図16, 17)。

ポケットの上面寸法(X, Y方向)または深さが加工初期から10μm以上減少した時点を工具摩耗による寿命とした場合の、工具寿命曲線(V-T線図)を図18に示す。

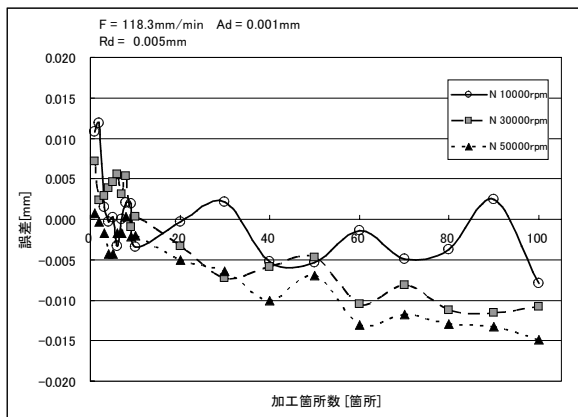


図14 ポケット上面寸法誤差 (回転数による比較, Ad0.001mm)

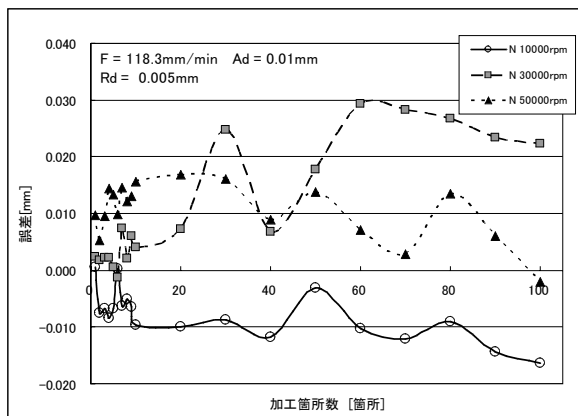


図15 ポケット上面寸法誤差 (回転数による比較, Ad0.01mm)

一般的なエンドミル切削では、切削速度がある値を境として大きくなるにしたがって寿命が短くなるが、今回は回転数が高い方が摩耗が少ないという結果が得られ、切削速度が大きい方が寿命が長くなった。このような状況から、50000rpm以上の回転速度をもつ高速スピンドル装置が加工効率と工具寿命の点から有効と言える。

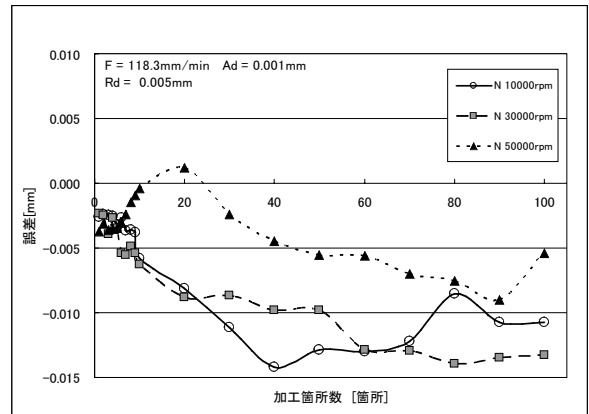


図16 ポケット深さ誤差 (回転数による比較, Ad0.001mm)

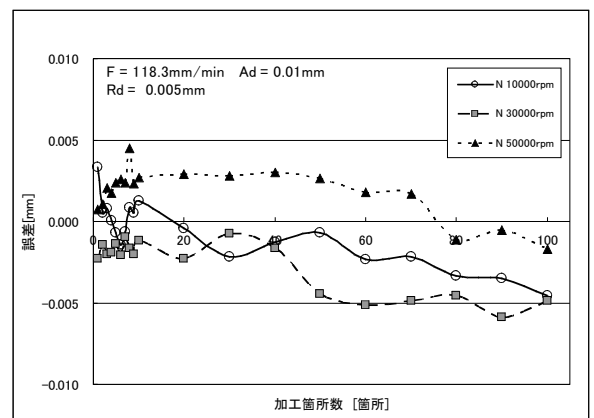


図17 ポケット深さ誤差 (回転数による比較, Ad0.01mm)

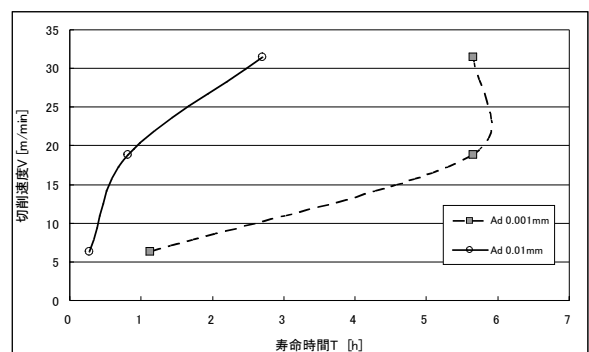


図18 V-T線図

### 3-5 SUS304比較実験

SKD11で最も良好であった加工条件と、最も結果が悪かった条件でSUS304を加工し比較を試みた(図19~22)。

その結果、SUS304は加工箇所数が多くなっても各数値の変動が少ない。つまり摩耗が少ない。特に工具軸方向では顕著である。通常SUS304の方が切削加工しづらい材料であるが、小径エンドミルでは逆の結果となった。

通常、SUS304は加工硬化を生じるため加工しづらいとされている。今回SUS304の方が工具摩耗量が少なかったのは、工具が微小であり加工誘起マルテンサイト変態をするほどの応力が加わらなかったためと推察される。

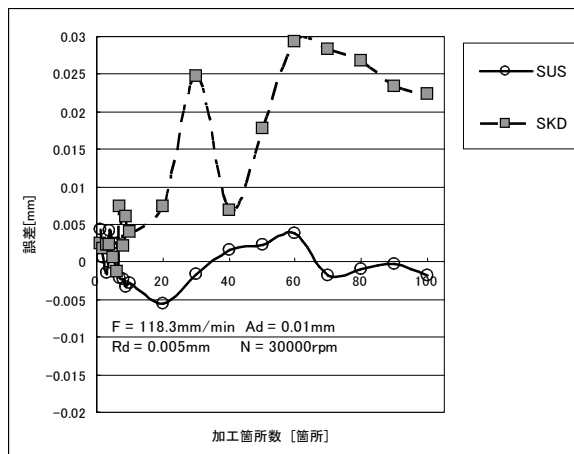


図19 ポケット上面寸法誤差 (SKD11とSUS304の比較)

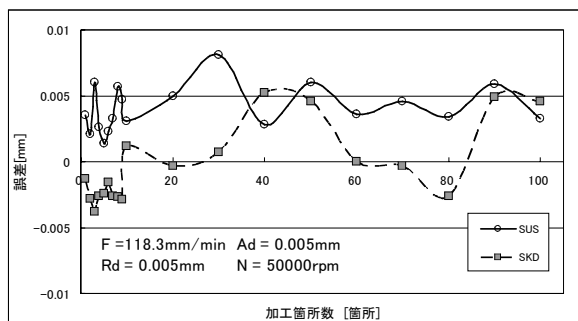


図20 ポケット上面寸法誤差 (SKD11とSUS304の比較)

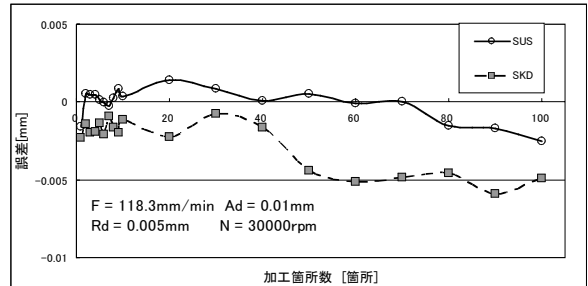


図21 ポケット深さ誤差 (SKD11とSUS304の比較)

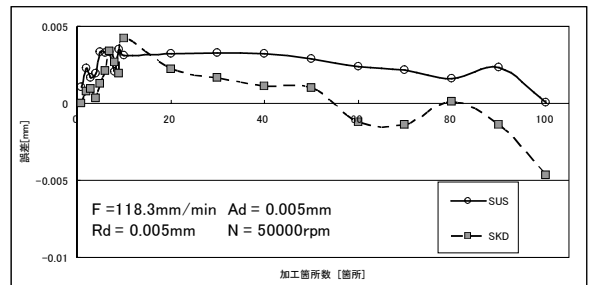


図22 ポケット深さ誤差 (SKD11とSUS304の比較)

### 4 まとめ

3次元連続ポケット加工について切削条件と被削材を変えた場合の加工を実施し、加工特性・工具磨耗特性を調査したところ次の結果を得た。

- 1) 切込を小さくすることにより切削長が長くなると工具摩耗が進行しやすいため、加工精度と表面粗さ、およびコストを勘案し切削時間を短くした方がよい。
- 2) 工具回転数を高くすると切削効率・精度がよいが、切削長を短くすることが重要である。
- 3) SKD11とSUS304との切削比較実験ではSUS304のほうが工具摩耗が小さく、特に工具軸方向では顕著であった。