高硬度材の高速エンドミル加工に関する研究 (第1報)*

——空気静圧主軸の動特性と加工面粗さ——

嶽 岡 悦 雄** 斎 藤 博** 相 田 収 平**
宮 口 弘 明** 石 川 淳** 岩 部 洋 育***

High Speed End Milling of Hardened Steel (1st Report)
- Dynamic Characteristics of Air Spindle and Surface Roughness -

Etsuo TAKECKA, Hiroshi SATTOU, Shuhei AIDA, Hiroaki MIYAGUCHI, Atsusi ISIKAWA and Hiroyasu IWABE

This study deals with the technology of the high speed end milling of hardened steel by the milling machine with an air spindle. Lately, high speed milling machines with ball bearing type spindle have been developed, and several tests related to the high speed or high efficient milling of hardened steel have been tried. But, there are a number of unclarified points regarding to the cutting mechanism of the high speed milling. This paper therefore tries to clarify the cutting mechanism and aims to present basic data on practical use for the high speed end milling of hardened steel. The main results are as follows; (1) The dynamic characteristics of the air spindle are obtained by experiments. (2) The stability diagrams are obtained by experiments based on the surface roughness and observation with the eye of machined surface. (3) In case of unstable conditions, self-excited and forced chatter occur. The later generates because of the excitation by the cutting force of intermittent machining. (4) It is shown that the stability range of machining by 2-flute end mill becomes larger than that by 6-flute end mill, because the frequency of intermittent machining by 2-flute is smaller than the natural frequency of the air spindle.

Key words: high speed end milling, hardened steel, air spindle, surface roughness, dynamic characteristics, chatter, stability diagram

1. 緒 言

近年、自動車および家庭電化製品の部品の金型加工においては、原価低減やリードタイム短縮のため、従来の放電加工に代わり焼入れ鋼を直接に、しかも高能率で加工する技術が求められている。こうした状況の中で、最近では、マシニングセンタやNCフライス盤に転がり軸受で毎分2万ないし10万回転の高速主軸を装備した工作機械が開発されている。また、工具材料および切れ刃形状を改良した各種工具を用いて、高硬度材の高速または高能率加工が試みられている^{1)~4)}。

一方、非鉄金属の超精密加工用主軸として実用化された空気静圧軸受は、最近高回転精度に加えて、従来から問題とされていた剛性が大きく改善されてきており、高速回転時においても焼付きを起こしにくい製品が開発されている⁵⁾。しかし、これらの装置を用いた高硬度材の高速切削に関する研究は少なく、その切削機構については不明な点が多い。

そこで、本研究は空気静圧主軸を装備した工作機械を用いて、高硬度材の高速エンドミル加工を行い、その実用化のための基礎資料を得ることを目的とする。本報では、まず主軸系の伝達関数を求めてその動特性を明らかにするとともに、負のすくい角を持つ特殊形状エンドミルを用いて焼入れ鋼 (SKD11) の高速エンドミル加工を行い、加工面性状との関係について検討を行った。実験では広い切削速度の範囲における主軸部の加速度振動を切削中に測定し、加工面に残されたびびりの発生およびその振動数との関係についても検討した。また、仕上げ面粗さの変化に基づいて切削の安定性の判別を試み、工具ホルダ

による動特性の差や、刃数が切削の安定性に及ぼす影響を示した。その結果びびり振動が発生しない切削条件を容易に選択することが可能となり、空気静圧主軸を装備した工作機械を用いて高硬度材を安定して切削できることが明らかとなった。

2. 実験条件および方法

2. 1 加工機械および空気静圧主軸

実験に使用した機械は立形マシニングセンタ (東芝機械, JRV-40) から転がり軸受方式の主軸と自動工具交換装置を取り外して、空気静圧主軸 (東芝機械, ABC-60M) を搭載したものである。表1はこの機械の主な仕様を示す。

図1は空気静圧主軸の構造と工具ホルダおよび工具の取付け状態を示したものである。主軸には出力5kWのACサーボモータが組み込まれており、その最高回転数は毎分3万回転である。直径60mm、長さ290mmの主軸材料にはインバーを使用して発熱による変形を押さえている。また、焼付きを防止するため、軸受部には固体潤滑性の高い材料であるカーボンを使用している。空気

Table 1 Specifications of machine tool

Length of table traverse (X,Y,Z)	600×410×470 mm
Working surface	900×450 mm
Spindle type	Air Spindle
Spindle speed	3000 - 30000 min ⁻¹
Feed	20000 mm/min
Numerical controller	TOSNUC-777.2 0.001 mm / pulse
Machine weight	4000 kgf

*原稿受付 平成7年6月9日

**正 会 員 新潟県工業技術総合研究所 (新潟市鏡石1-11-1)

***正 会 員 新潟大学工学部 (新潟市五十嵐2の町8050)

Fig. 1 Structure of air spindle

Table 2 Specifications of air spindle

Diameter		60 mm
Stiffness	Radial	40 N/μm
	Thrust	70 N/μm
Load Capacity	Radial	280 N
	Thrust	490 N

静圧主軸の静的剛性および負荷容量は表2に示すとおりである。

2.2 主軸の動特性の測定方法

加工実験に先立ち、図2に示す方法で主軸の動特性を求めた。すなわち主軸に工具ホルダおよび工具を取り付け、58.8 MPaの圧縮空気を供給し、静止させた状態で工具ホルダの下端より10mmの位置にロードセル（PCB, 208A03）および動電型加振機（新日本測器, 513-A）を用いて正弦波加振を行った。なお、加振位置は工具のシャンク部で、その断面は円形状である。また、応答変位は容量型変位計（ADE, 3046）により測定して

Fig. 2 Measurement of transfer function

り、入力信号と応答信号をFFTアナライザ（YHP, 3562A）で演算することにより自己コンプライアンス伝達関数を求めている。

2.3 加工実験の条件および方法

加工実験に使用した工具は、切れ刃部の軸直角断面が正六角形をしており、すくい角が -60° の超硬ソリッドエンドミルである。主な諸元は、直径12mm、刃数6および2、ねじれ角 30° および逃げ角 30° であり、切れ刃にはTiNコーティングが施してある。2枚刃の工具は、6枚刃のうちの対向する切れ刃の1組を除いた4枚を外径から約0.5mm削ったものである。

工具ホルダには油圧方式（ホルダH）および弾性変形方式（ホルダE）の2種類を用いており、図1に示す工具ホルダ部の長さL1はそれぞれ65および46mmである。なお、工具の突出し長さL2はともに35mmとした。

被削材にはSKD11の焼入れ材（HRC62）を用い、その寸法は $36 \times 36 \times 36$ mmの立方体である。この被削材をバイスに固定し、X軸方向に送りを与えて表3に示す切削条件により側面加工を行った。なお、軸方向切込みが1回の切削で2mmから7mmまで変化するように被削材をバイスに固定する際に約 8° 傾けている。また、切削中には図2に示すように、主軸頭部に加速度計（PCB, 308B）を取り付けてY軸方向の振動加速度を計測しており、加工面の粗さは表面粗さ計（Rank Taylor Hobson, Form-Talysurf）により送り方向に測定した。

Table 3 Cutting conditions

Cutting speed	113–1130 m/min
Feed	0.01 mm/tooth
Axial depth of cut	2–7 mm
Radial depth of cut	0.025 mm
Coolant	Dry
Type of milling	Down-milling

3. 実験結果および考察

3.1 主軸の動特性

図3は、図2の方法で工具ホルダおよび工具を介して主軸に正弦波加振を行うことにより得られたY軸方向の自己コンプライアンス伝達関数である。図においては2種類の工具ホルダを用いた結果を比較しており、1kHz以下の周波数領域ではともに約

Fig. 3 Transfer function of air spindle

90, 140, 400および720Hzに顕著なモードが見られるが、これは主軸ハウジング部、コラムなど機械構造全体が関与するモードであることが確認されている。上記の周波数領域では2つの伝達関数はほぼ一致しており、工具ホルダによる差は少ない。しかし1kHz以上の周波数領域では、工具ホルダによる差が生じており、それぞれ3つの特徴的なモードが現れている。その周波数はホルダHにおいて1285, 2120および3173 Hzであり、ホルダEにおいて1377, 2393および4159 Hzである。これらの固有振動数は図に示していないが、X軸方向の測定においてもほぼ同じ値が得られており、高い周波数領域における主軸系の動特性に加振方向による差すなわち異方性はほとんどないと考えられる。そのため後述するびり振動の主モード方向は切削合力の方向にほぼ一致することが予想される。切削合力の方向は次報で検討する切削力の測定結果よりY軸に対して14ないし18°送り方向に傾いているため、図3に示した主軸系の伝達関数はY軸方向加振の結果を採用している。なお、図よりホルダHに比べてEを用いた方が固有振動数が高くなっているが、この主な理由は図1に示した工具ホルダ部の長さL1がホルダEにおいて短いことによるものと考えられる。

図3に示した主軸系の動特性の変化をより詳細に検討するため、有限要素法により主軸系の構造解析を行い、固有振動数とモード形を求めた。解析はソリッド要素を用い、解析を容易にするために空気層の影響を無視して、工具ホルダおよび工具を含む主軸全体を自由支持として行った。解析の結果、曲げの

モードとねじりのモードが見られたが、一般にねじりのモードによる主軸半径方向の変位は、曲げモードのそれに比べて十分小さく、無視できるため、実験で得られたモードはそれぞれ1次、2次および3次の曲げモードであると考えられる。表4は各モードの振動数の計算値と図3に示した実験結果とを比較したものであり、両者の値はほぼ一致している。なお、3次のモードにおける計算値とともに実験値より約15~25%大きくなっているが、この理由は明らかではなく、今後の検討課題である。

3. 2 側面加工による主軸部の加速度振動と加工面性状

図4は、側面加工により得られた加工面の写真、主軸部の振動加速度および加工面の粗さ曲線を示したものである。軸方向切込みの増加による切削状態の変化は次に述べる3つの場合に分類することができ、図4はその代表的な例である。主軸回転数 $N=15000, 17000$ および 23000 min^{-1} の順にそれらの特徴を整理すると次のようになる。

- (i) 軸方向切込みが変化しても安定した切削が行われる場合
- (ii) 切削開始直後からびりが生ずる場合
- (iii) 軸方向切込みの増加により安定状態から不安定状態に変化する場合

粗さ曲線が平坦で最大高さ粗さが小さい(i)の場合 ($N=15000 \text{ min}^{-1}$) は、加速度振動も小さく、加工面にびりマークを確認することはできない。一方、(ii)の場合 ($N=17000 \text{ min}^{-1}$) および(iii)の場合 ($N=23000 \text{ min}^{-1}$) の後半部では、粗さ曲線および加速度振動が大きく変動しており、切削中にびりが発生したことがわかる。びりの種類を加工面の写真、後述する結果および星によるびりの判定表⁹⁾により判別すると、前者は摩擦形の自励びり、後者は力外乱形の強制びりと考えられる。

図5は、(iii)の場合 ($N=23000 \text{ min}^{-1}$) について、切削の安定している時間領域とびりが発生している時間領域における振動加速度を、時間軸を拡大して示すとともに、それぞれのスペクトルを比較したものである。図(a)に示す安定状態における振動加速度は軸方向切込みが小さい領域の挙動であり、加速度振動の変動は小さい。また、そのスペクトルから振動成分は断続切

Table 4 Results of modal analysis and FEM analysis (Hz)

		Model1	Model2	Model3
Holder H	Experiment	1285	2120	3173
	FEM analysis	1159	2250	3994
Holder E	Experiment	1377	2393	4159
	FEM analysis	1251	2519	4765

Fig. 4 Machined surface, surface roughness and acceleration (Holder H)

(a) Stable case

(b) Unstable case

Fig. 5 Acceleration of spindle head for stable and unstable cases

Fig. 6 Surface roughness curve ($N=23000 \text{ min}^{-1}$)

削による振動数 2300Hzとその整数倍および整数分の 1 から構成されている。一方図(b)に示す不安定な状態における加速度振動は、その変動が大きくなるとともに周期の長い振動成分で変調され、うなり現象が生じている。そのためスペクトルには図(a)と同様に断続切削による振動数を基本とするいくつかの周波数が現れているが、それらの周波数より約45Hz低い周波数成分もはっきり確認できる。図6は、図4に示した(iii)の場合の粗さ曲線を拡大して示しているが、図5(b)に対応する加工面（右側）に残されたびりマークからびり振動数を推定すると、加速度振動の変調周波数である45Hzに一致している。

Fig. 7 Stability diagram for holder H

Fig. 8 Stability diagram for holder E

実験条件の範囲では、断続切削の周波数は300ないし3000Hzであり、主軸回転数が毎分1万回転を越える領域で、主軸系の持つ固有振動数が断続切削による周波数の範囲内に含まれることになる。さらに図に示していないが、断続切削による周波数が主軸系の持つ固有振動数の値に近接すると主軸部の加速度振動が増大する傾向にあり、図4(iii)のびりマークが断続切削の変動切削力による強制びりであることを裏付けている。

3. 3 切削の安定性に及ぼす工具ホルダおよび刃数の影響

次に、加工面性状に基づいて切削の安定性の判別を行う。実験条件の範囲では、得られた加工面の性状は図6に示した粗さ曲線および目視によるびりマークの有無に基づいて、次の3つのタイプに分類することができる。なお、図6には識別した各タイプとその範囲の例を併記した。

- a)タイプA：びりマークが観察されるが、最大高さ粗さが $R_{\max} < 2 \mu\text{m}$ となる場合
- b)タイプB：びりマークが観察され、最大高さ粗さが $R_{\max} \geq 2 \mu\text{m}$ となる場合
- c)タイプC：びりマークが確認されず、最大高さ粗さが $R_{\max} < 2 \mu\text{m}$ となる場合

本研究では、タイプAおよびCの加工面が得られる場合を切削の安定性が良いと判別している。一方、タイプBに分類される加工面は図6に示されるように強制びりが発生し、その多くは最大高さ粗さが3～10 μm と大きい。また、図4(ii)に示した

Fig.9 Stability diagram for 2 flutes end mill

ように、自励びりによって不規則で大きな最大高さ粗さ ($R_{max}=30\mu m$) が生じる場合もあり、そのような加工面も上記のタイプBに分類し、切削の安定性が悪いと判別している。

図7および8は、工具ホルダHおよびEを用い、主軸回転数および軸方向切込みを変化させた場合の加工面の性状を上記分類に基づいて整理したものである。実験では軸方向切込みを2mmから1mm間隔に、主軸回転数を3000 min^{-1} から1000 min^{-1} 間隔に変化させており、図中の○印はタイプA、●印はタイプBを示し、無印はタイプCを意味する。両図より主軸回転数の増加に伴ってタイプAおよびCに分類される比較的安定した切削領域と、タイプBに分類される不安定な切削領域が交互に現れることがわかる。また、軸方向切込みが小さくなる条件ほどタイプAまたはCとなる場合が多く、切削状態は安定する傾向にある。フライス削りにおける上記のような切削安定性に関する特徴は、主軸回転数がそれほど高くない通常的主軸回転数領域ではすでに理論解析や実験により明らかにされているが⁷⁾、高速のエンドミル加工においても共通する現象が見られる。

一方、図7と8を比較すると、工具ホルダEによる切削の安定領域は、Hに比べて軸方向切込みが大きい方向ならびに主軸回転数が高い方向に広がる傾向にある。この理由は図3に示した主軸系の動特性において、工具ホルダEを用いた場合の主軸系の固有振動数がHを用いた場合に比べて高いためと考えられる。しかし2次および3次のモードコンプライアンス値は工具ホルダHよりも大きくなっている。そのため、切削力の作用する切れ刃部における動特性の差は小さくなって、工具ホルダEによる切削の安定性に大きな変化が生じなかったものと考えられる。

図9は、工具ホルダEを用いて、2枚刃により図8と同様の実験を行った結果である。図8に示した6枚刃の場合と比較すると、タイプBに分類される領域は狭くなっており、タイプAおよびCに分類される切削の安定領域は逆に大きく広がっている。この理由は刃数が2枚に減少したため、断続切削の周波数が6枚刃に比べて1/3の100ないし1000Hzとなり、表4に示した主軸系の固有振動数の存在する周波数領域まで達しないことによるものと考えられる。したがって、エンドミル加工で代表される断続切削の高速加工において、安定した切削を実現するためには少なくとも切れ刃による周波数が主軸系の固有振動数に一致しないように主軸回転数および刃数を選択することが大切である。実用的には図9の結果を用いて選択すればよい。

4. 結 言

空気静圧主軸を装備した工作機械を用いて高硬度材の高速エンドミル加工を行い、主軸系の動特性と切削の安定性の関係について検討を行った。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 工具ホルダおよび工具を含む主軸系の伝達関数を求めた。実験の条件では、1 kHzを越える周波数領域に3つの特徴的なモードが存在し、これらが主軸の曲げモードであることを有限要素法により明らかにした。
- (2) 加工面性状を最大高さ粗さおよび目視による判定から3つのタイプに分類し、この分類に基づいて主軸回転数および軸方向切込みの変化に対する切削の安定線図を作成した。その結果、主軸回転数の増加に伴い、安定した切削領域とびりりる発生する不安定な領域が交互に現れている。
- (3) 不安定な切削状態では、摩擦形の自励びりおよび力外乱形の強制びりりが発生し、加工面の最大高さ粗さは大きくなる。後者の場合は断続切削の変動力が強制振動源となっている。
- (4) 工具ホルダにより主軸系の伝達関数が変化し、その変化に対応して実験の条件では工具ホルダEによる切削の安定領域がHに比べて広がる。しかし、その程度は大きくない。
- (5) 2枚刃を用いて断続切削による強制振動の周波数を低くすると、主軸系の固有振動数に達しない周波数領域での加工となるため、6枚刃に比べて切削の安定領域が大きく広がる。

最後に、この研究は新潟県の戦略技術開発研究として行ったものであり、遂行するうえで東京大学の中川威雄教授、株式会社松岡技術研究所の松岡甫篁所長、理化学研究所の安斎正博博士および株式会社新潟鐵工所の池田直弘氏にご指導いただいた。また、加工実験等では東芝機械株式会社の塩崎正人氏にご協力いただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 池田直弘、高橋一郎、松岡甫篁、中川威雄：超高速NCフライスによる型材切削、1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、(1990) 1115。
- 2) 池田直弘、高橋一郎、松岡甫篁、中川威雄：超高速NCフライスによる型材切削（第2報）、1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(1991) 265。
- 3) 池田直弘、高橋一郎、松岡甫篁、中川威雄：超高速NCフライスによる型材切削（第3報）、1992年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(1992) 173。
- 4) 北嶋弘一、田中行雄、海道正樹、南野修司、黒田誉人、岸本 深：高性能エンドミルの研究（第1報）、1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、(1993) 577。
- 5) 田中克敏：付加価値を超精密加工に求めて、第24回工作機械関連技術者会議テキスト（1994）A1-1-1。
- 6) 星 鐵太郎：機械加工びりり現象—解析と対策、工業調査会、(1977) 115。
- 7) S.A.Tobias (米津栄、下郷太郎訳)：工作機械の振動、コロナ社、(1968) 207。