

浮上工具方式による超平面切削加工技術

Single-Point Machining Technology of Super-Smooth Surface Using a Flying Tool

榎 本 俊 之*・谷 泰 弘**・佐 藤 壽 芳*・上 村 康 幸*
Toshiyuki ENOMOTO, Yasuhiro TANI, Hisayoshi SATO and Yasuyuki KAMIMURA

1. 緒 言

現在の超精密切削は、加工機械の運動転写原理—極めて運動精度の優れた工作機械で、極めて切れ味のよい工具を用いて、極めて被削性のよい加工物表面に工具形状を転写すること—を基本としている。このため、より高精度の加工面を得るためには、加工機械の運動精度を現状よりも更に高めることが必要となる。これに対して、現在の技術水準では加工機械の運動精度はすでに極限に近い状態まで高められており、より高精度の要求に対応が困難な状況に至っている。そこで、実時間で加工機械の運動誤差を計測しこれを補償・制御することで、より高精度な加工を行おうという「運動誤差補正法」に関する研究^{1)~4)}がなされている。しかし、工具台自身の質量・寸法・剛性からして誤差補償の応答性は0.5kHz程度にしかなめられず、6自由度の運動に高速に対応して誤差を完全に取りきけることは困難である。

そこで、著者らは加工機械の運動誤差によらない切削を実現するために、「浮上工具方式⁵⁾による切削加工技術」を採用した。安田らは浮上スライダにより磁気ディスク面をパニッシュすることを目的としてこの方式を提案したが、加工変質の少ない加工面を得るために、本研究では切れ味のよい工具を用いて切削を行おうとしている。このため、切れ味のよい工具を取り付けたスライダを、磁気ディスクドライブ装置のように動圧により加工物面上に浮上させながら、前加工面基準の切削を行うことを考えた。この方式によれば、工具台となるスライダが小さくその固有振動数が10kHz程度と高いため、切削に影響を与える周波数域の振動が生じにくく、また通常の運動誤差補正法より応答性に優れる。更に、この加工方式によれば、定圧切込みによる切削が実現されるため、研磨加工同様、微小な切込みで加工ができ、硬脆材料に対しても延性モード切削を行える可能性を有している。本稿では、基礎的な実験を行い、この方式の加工メカニ

ズムを確認したので報告する。

2. 実 験 方 法

実験装置は、14インチのランディングオンオフタイプの磁気ディスクドライブ装置を改良したもので、その概略を図1に示す。この方式の磁気ディスクドライブ装置は、現状のCSS方式の装置と異なり、定速回転のディスク上にスライダをローディングする方式であり、切削を目的とした本研究には適している。ディスク(加工物)の駆動に関しては磁気ディスクドライブ装置をそのままの形で使用したが、工具であるスライダの駆動には定速送りを必要とするため、ボイスコイル型のリニアモータをボールねじを使用した送り系に交換した。加工状態については、渦電流型変位センサによりスライダおよびディスクの垂直方向変位を測定し、またAEセンサにより工具とディスクとの接触を検知した。工具となる円板状スライダは熱硬化性樹脂により作成し、そのほぼ中央にサファイアチップを完全に埋め込んだ。その後、スライド面を研磨し、図2のようにチップの突き出し量を3~7μmに調整した。工具の先端形状としては、直径約0.2mmの半球の頂上部分に約φ40μmの逃げ面を持った形状のものを使用した。加工物には、粗仕上げ(1.7μmR_{max}程度)および超精密切削仕上げ(55nmR_{max})のアルミニウムディスクを用いた。

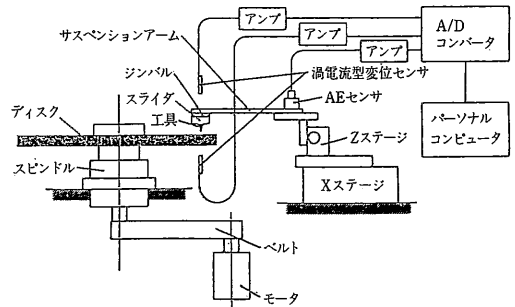


図1 実験装置の構成

*東京大学生産技術研究所 第2部

**東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

研究速報

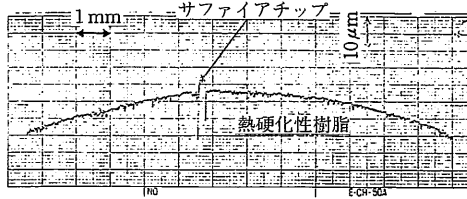


図2 工具の断面形状

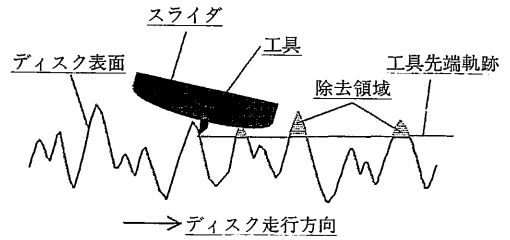


図3 表面粗さの向上の概念

加工実験は、押し付け荷重を約3Nに設定したスライダを外周から回転しているディスク上にロードし、これを半径方向に往復運動させることにより行った。実際には、外周より半径方向に25~35mmの部分を行往させた。なお、ディスク回転数は2400rpm、送り速度は25mm/min(約10.4μm/rev)とした。また、実験時には浮上量の増大・潤滑効果の増加・切削屑の排出促進のために、日本石油(株)製マルパス32(動粘度:31×10⁻⁶m²/s)のミストを加工点に供給した。

3. 粗仕上げのディスクに対する加工実験の結果

3.1 スライダ面の平均化効果による加工面粗さの向上

スライダはサスペンションアームによる押し付け力とディスクとの間に発生する動圧とが釣りあって、ディスク上にある高さを保ち浮上走行する。ここで使用したスライダは直径16.3mmの円板であり、加工物の前加工面の粗さの基本波長は0.1mm以下であった。したがって、スライダは加工面の粗さの基本波長の100倍以上の大きさを有しており、スライダはその面積に対応する加工面に対して浮上高さが決定される。この状態で、従来の切削のように前加工面の粗さより大きい切込み量を与えるのではなく、工具先端が粗さの山と谷の中間に位置するようにスライダの押し付け荷重を調整し、粗さより小さい切込み量を設定することにより切削を行う。この時、切削力は非常に小さい値となり、スライダの浮上に悪影響を及ぼすことが無い。事実その切削力は、測定の結果10mN以下であった。すなわち、本加工方法では、スライダがディスクと接触せず安定に浮上走行できるようになるまで、ディスクは工具によりその突起先端から徐々に削られていく。すなわち、ディスクは図3に示されるよ

うにトランケーション⁹⁾が生じることにより、表面粗さが向上する。

図4に加工回数(スライダの往復回数)に伴う加工面の断面曲線の変化を示す。ここで、表面粗さの測定は触針式粗さ計を用いて、工具の切削方向と直角な方向、つまりディスクの半径方向に行った。また、そのR_{max}・R_aの変化を図5に示す。なお、R_{max}・R_aはディスク上の60ヶ所を測定した平均値で、図中の振幅は標準偏差を表している。図4より、断面形状の山部のみが削られていることがわかる。この変化の様子はトランケーションの把握に適している⁹⁾とされるアボットの負荷曲線において、図6のように明瞭に現れている。すなわち、谷部の曲線形状には全く変化が現れておらず、山部の曲線形状のみ変化している。

この実験時におけるディスクの垂直方向振れの最大差(TIR)が約100μmであったのに対し、毎切削時の切込み量は図5のR_{max}の変化より0.1μm以下であることがわかる。しかも、図7に示されるように、加工後にディスク表面で流れ型の切削屑が観察された。このことより、工具がディスク上を移動する度に、前加工面を基準とした切削が行われ、加工機械の運動誤差によらずに面粗さが向上していくことがわかった。

3.2 加工面に対するスライダの追従遅れによる

表面形状の向上

この加工方法では、スライダの運動に対してスライダ

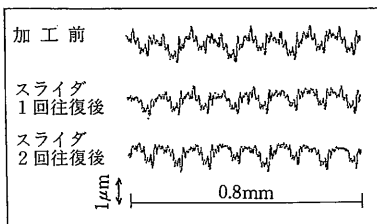


図4 粗仕上げ面の断面曲線の変化

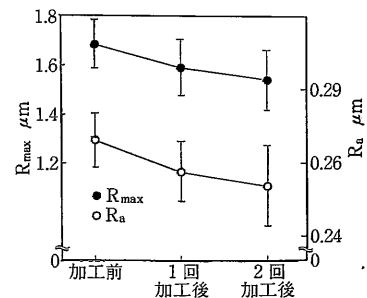


図5 粗仕上げ面の表面粗さの変化

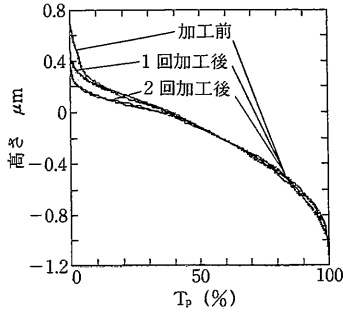


図6 粗仕上げ面のアボットの負荷曲線の変化

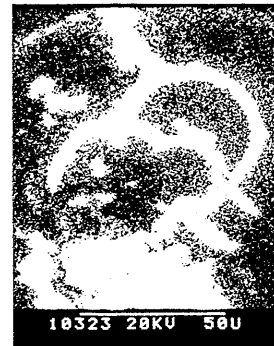


図7 アルミニウム切削屑のKαAl像

が追従遅れを生じることにより、スライダに取り付けた工具の切込み量が変化し、図8に示されるように表面うねりが向上することが予想される。すなわち、急激な変化を持つうねりに対してはスライダが追従しきれなくなり、工具の切込み量が大きくなる。ここでは、その追従性の指針として使用されている、ディスクの垂直方向の加速度成分 (ACC) に着目し、この値の大きさと表面形状の変化との関係について調べた。

図9に切削時のディスクの垂直方向変位・加速度とAEセンサ出力(半波整流方式による平均値出力)、それらと対応する点での加工前後での R_{max} の減少量(実質切込み量)を示す。なお、 R_{max} は同一半径上の12ヶ所について測定した。この図より、ACCの大きい、すなわちスライダがディスク運動に対し追従遅れを生じやすいところほど、切込み量も大きくなる傾向があることがわかる。正確には、ACCの最大のところ(3-4方向の間、9-10方向の間)より少し位相の遅れた箇所(4, 10方向)で切込みが大きくなっている。また、その切込み量の変化がAEセンサ出力に現れている。

以上のことから、本加工方法によりディスク運動に対しスライダが追従遅れを生じやすい部分で工具のディスクに対する切込み量は大きくなることが判明した。しかし、この実験ではディスクの垂直方向の最大振れが約120 μm 近くあったのに対し、切込み量がサブミクロンオーダーであったため、ディスクのうねりの向上を確認するこ

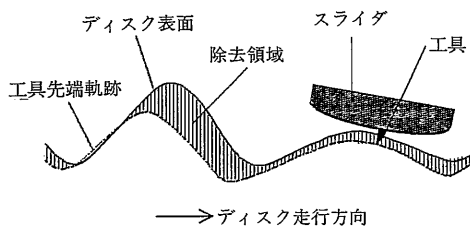


図8 ディスクに対するスライダの追従遅れによる表面形状の向上の概念

とができなかった。

4. 超精密切削仕上げのディスクに対する加工実験の結果

本研究の最終的な目標は、今までにない高精度な超平面の加工を実現することである。前述したように、1.7 $\mu\text{m}R_{max}$ 程度の粗仕上げのディスクに対しては、加工機械がある程度の運動誤差を有していても、その表面粗さを更に向上させることが可能であることがわかった。し

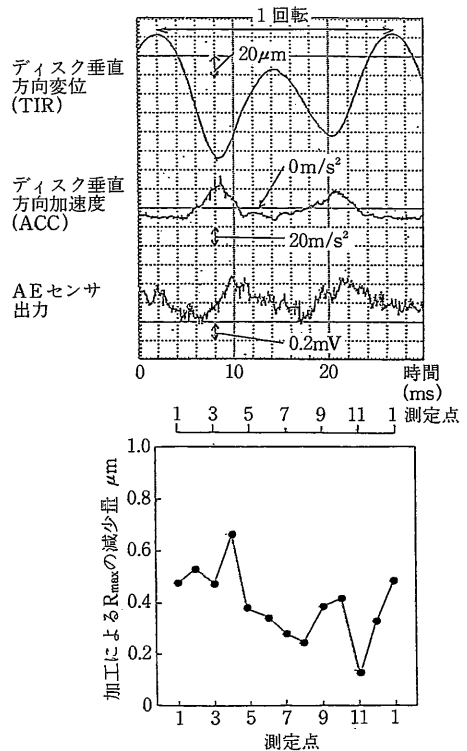


図9 ティスク運動と表面粗さの変化の関係

研究速報

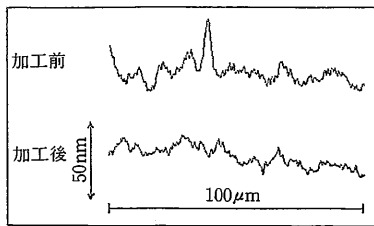


図10 超精密切削仕上げ面の断面曲線の変化

かし、超平面もしくは超精密と呼ばれる領域では R_{max} は10nm以下であり、この加工方式が粗仕上げのディスクに対し適用できても、超精密仕上げをされたディスクに対し適用できるとはいえず、全く異なった加工現象が生じることも考えられる。そこで、現在の加工条件が最適ではないにしても、超精密切削仕上げを行ったアルミニウムディスクに対して本加工方式を適用し、その結果を考察することとした。なお、超精密切削仕上げのディスクに対し加工実験を行う際に、粗仕上げのディスクに対する実験と異なり、以下の2つの条件を付与した。一つは、工具の突き出し量を粗仕上げのディスクに対しては7 μm であったのを、3 μm 程度に抑えることである。もう一つは、ディスクの垂直方向振れの最大差を30 μm 程度に抑えたことである。このことにより浮上量を減少させ、追従性の高い状態で加工ができるようにした。

加工に伴う加工面の断面曲線の変化を図10に示す。また、その R_{max} ・ R_a の変化を図11に示す。なお、この R_{max} ・ R_a はディスク上の36ヶ所を測定した平均値で、図中の振幅は標準偏差を表している。特に、加工前のディスク表面には図10に示されるようなヒゲ状の突起物が散在しているが、加工後には著しく減少していることが認められた。この現象は図11においても認められ、 R_{max} は10nm程度減少しているが、 R_a はほとんど減少していない。

この実験時におけるディスクの垂直方向振れの最大差が約30 μm であったことを考慮すると、図10、図11より、本加工方式により粗仕上げのディスクに対する加工と同様に、超精密切削仕上げのディスク(55nm R_{max} 程度)に対しても加工機械の運動誤差によらずに突起先端から徐々に切削を行うことができ、その表面粗さを向上させることができることが判明した。

5. 結 言

本稿では、浮上工具方式による切削加工技術の加工メカニズムに関して基礎的な実験・検討を行い、その結果以下のような結論を得た。

- (1) 本加工方式によれば、加工機械がある程度の運動誤差を有していても、その運動誤差を加工面に転写す

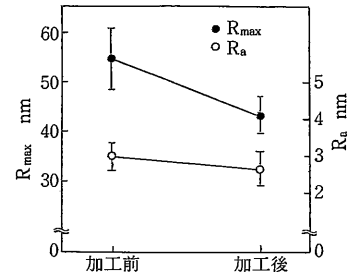


図11 超精密切削仕上げ面の表面粗さの変化

- ることなく、表面粗さを向上させることができる。
- (2) 本方式による加工では、工具先端位置が粗さの山と谷の中間にくるように工具の浮上高さを調整すれば、加工面はその突起先端から徐々に削られることで表面粗さが向上する。
- (3) ディスク運動に対しスライダは追従遅れを生じ、その遅れを生じた部分で工具の切込み量も大きくなる。
- (4) 超精密切削仕上げのディスクに対しても、その表面粗さを向上させることができる。このことより、本加工方式が超平面切削加工の可能性を有していることがわかった。

最後に、東ソー(株)の上野嘉之氏には貴重な御教示を賜り、また、本研究は選定研究の助成を賜わり旭ダイヤモンド工業(株)、(株)神戸製鋼所、(株)東京精密、古河電気工業(株)には工具、加工物等を御提供いただいた。記して、深謝申し上げる。
(1990年3月23日受理)

参 考 文 献

- 1) E. Seya et al: An Accurate Linear Tool-Slide System with Straightness Compensation Control for a Precision Diamond Cutting Machine, Proc. of 6th ICPE, (1987) 569.
- 2) 堀内幸, 原圭吾: 超精密加工機の工具-工作物間運動誤差補償法, 1989年精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1989-11) 131.
- 3) 小寺直, 中筋智明, 原成一, 松永博之: インプロセス除去量制御切削法の開発 (第3報), 1989年精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1989-11) 135.
- 4) 内田出, 河野嗣男, 尾西隆, 岡崎祐一, 小沢則光, 竹内喜代松: インプロセス計測加工精度補償の研究 (第2報), 精密工学会誌, 56, 1 (1990) 134.
- 5) 安田享祐, 金子礼三: 浮上ヘッドスライダによる磁気ディスクパニッシュ法, 日本潤滑学会第32期春季研究発表会予稿集, (1988-5) 445.
- 6) 大坪康郎, 佐々木彰, 丸茂斉, 川島教嗣: ランダムC.S.S.における媒体寿命, 日本潤滑学会第29期通常総会研究発表会予稿集, (1985-5) 361.