

高速加工における切削工具の摩耗診断に関する研究

比嘉眞嗣、棚原 靖

1 はじめに

主軸に切削工具を装着したままで高精度に工具摩耗を計測し、その結果を以後の加工工程にフィードバックすることのできる診断装置の開発を目標に研究を実施した。

昨今の機械加工技術の進歩で、切削加工分野においては、工具の高回転化、送り速度の高速化による高速加工が主流を占めている。従来放電加工機で行っていた微細加工製品も、小径工具を利用し高速加工することで放電工程を省くことができ、切削加工のみで行うことが可能になってきている。

ところが、小径工具による切削では加工途中で工具の欠損、摩耗が生じたとしても、一般的には加工中は切削油剤の飛散の影響で加工状態の監視はきわめて難しく切削終了後でしか製品の善し悪しを判断できないのが現状である。そこで、加工途中で工具状態の監視ができることは、このような欠点を補うことができ、製品精度や不良品低減による工程の短縮化効率化にきわめて効果が高いといえる。

以上の考えから、切削工具を主軸にセットしている状態で、レーザ変位計を利用し非接触で工具の摩耗状態を観察計測できるシステムを構築し、且つ、同技術をさらに発展させ、工具摩耗状態を計測監視し、その情報をフィードバックして工作機械の加工情報に働きかけるようなシステムを検討した。

なお、本研究は、各公設試験研究機関との共同研究を機軸に、全体テーマである「生産機械システムのオープン制御技術の開発と応用研究」の名の下に参画した事業であり、本県は「高速加工における切削工具の摩耗診断に関する研究」に関わった研究である。参加機関は、産業技術総合研究所および各地方公設試8機関（神奈川県、奈良県、岩手県、愛媛県、香川県、高知県、広島県と沖縄県）で、また、地元中小企業および大学の産学官の連携事業として行ったものである。

2 実験方法

2-1 実験装置、機器

マシニングセンタの主軸に切削工具を装着したまま、非接触で高精度に工具の破損・摩耗を観察計測し、その結果を以後の加工工程にフィードバックすることのできる診断装置を開発することを目的に、レーザ変位計を利用した図1に示すような工具診断システムを構築した。

主な構成は、レーザ発信器とその測定本体、および測定したデータを編集、演算するためのパソコンの構成で構築した。

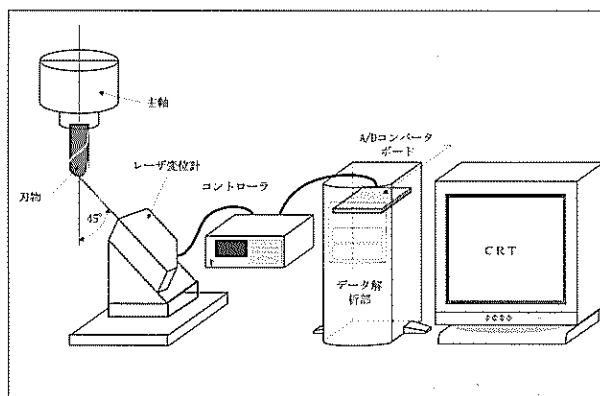


図1 工具診断装置システム構成図

また、対象工具はボールエンドミルを想定しており、工具先端部がはっきり計測できるように、工具の下方斜め45度の角度から、レーザを照射し計測できるシステムにした。

レーザ変位計は、工具を一定速度で回転させながら計測するため、そのサンプリング速度が重要となる。且つ、計測精度に関しても、マイクロメータ精度が要求される。従って、レーザ変位計のサンプリング周波数はできるだけ高い装置を用い、レーザの分解能も高精度のレーザセンサを用いることとした。

今回、用いた装置は、サンプリング最大周波数50kHz、レーザ分解能は $0.2\mu\text{m}$ である。

測定したデータの解析用パソコンの仕様は、データ量が大きいので、できるだけ高速対応のできる高速グラフィックボードをもち且つCPUのクロック数も大きいクラスを利用した。

また、工具はマシニングセンタの主軸に装着した状態での計測とした。

2-2 実験方法

以上のように、レーザ計測装置を構築し、工具径1～6mmのボールエンドミルを対象に、計測実験を行った。

計測条件その他を検討するため、検討項目を拾い出し実験測定を実施し、その計測条件等について整理した。

レーザ計測のため、金属光沢を有する工具は除き、対象工具は、TiAlNの黒色コーティング超硬工具を用いた。また、その過程で、データ処理方法および、計測プログラムに関して計測実験を行いながら修正改良した。図2に、工具へのレーザ計測状況を示す。

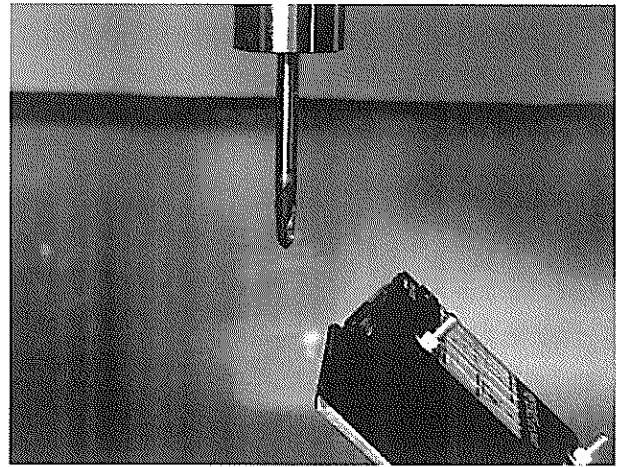


図2 レーザによる工具計測状況

3 結果および考察

3-1 測定概要原理について

本システムを利用した測定方法を以下に示す。

前掲の図1に示す構成図が、本システムの構成であり、測定方法は、以下の通りである。

まず、レーザを工具の中心に向かって照射し、マシニングセンタの加工プログラムを利用し工具摩耗計測位置で工具を一定速度で回転、下降させ、それにより工具全体をレーザでスキャンし、距離情報や輝度情報を取得し工具の形状寸法、および輝度を表示した。

また、図に示すように、工具先端を観察できるように、下方45°の角度から計測することにし、パソコンに取り込んで、角度補正を行い、表示することにした。従って、レーザ測定箇所は、レーザの光軸が工具中心になるように高精度に位置決めする必要がある、その設定の精度が、測定値に大きく影響することとなる。また、工具先端は丸いため、45°の角度から計測した場合、最初に観測される工具の部位は工具の中心ではなく、それより少し離れた部位から計測されることになる。従って、その部分を計測データから除外する必要がある。それにはあらかじめ工具先端の正確な距離を測定しておき、その測定値に達してから、計測データとして取り込むことにした。

概略を図3および図4に示す。

基本的には、図に示すように、一定間隔の距離情報と輝度情報を計測し、取得データをパソコンのグラフ表示ソフトを介して、CRT上に表示するようにしたものである。本システムでは、一旦取得した、データを活用するため、表示パターンは、様々なパターンで表示することが可能である。即ち、画像の拡大、縮小、回転表示等可能であり、あたかも工具を手に取り観察している感覚で、工具の状態を観察することができる。

以下、本システムを実用化するために測定精度に及ぼす項目について種々検討した結果を示す。

3-2 レーザ計測における測定精度の検討

(1) ポイント数

対象工具直径をDとしたとき、その測定精度は、工具1回転あたりのサンプリング数即ちポイント数が、直接測定精度に影響する。

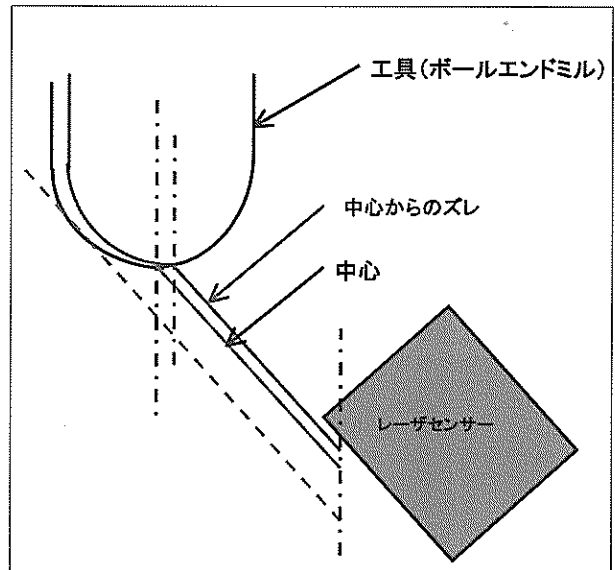


図3 レーザ計測ポイント

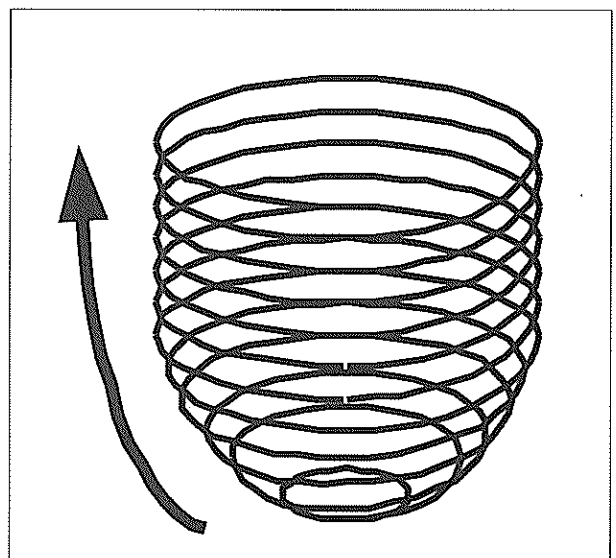


図4 レーザ計測経路

即ち測定精度 σ は、

$$\sigma = \pi \times D / P \times 1000 \quad (\mu\text{m}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

D : 工具径 mm

P : ポイント数

と、式(1)で表される。

ポイント数を増せばそれだけ分解能は高まることになるが、工具径が小さい場合は、それに対応するセンサーの分解能が必要となる。

当初、6~10mmの径を想定しており、6mmで360ポイントの分割で50 μ mであったため、とくにそれほど考慮してなく充分と考えていた。

しかし、小径の1mm径の場合、その分割量では、測定精度5 μ mが必要となり、高分解能の、レーザセンサーが必要となった。

一方、工具径が大きくなると、工具径に応じて逆に分割幅が広くなり測定精度が悪くなるため、分割量即ち1回転あたりのポイント数を増やす必要がでてくる。

以上のことから、今回レーザ変位計を、測定範囲が±3mm、作動範囲が30mmで分解能0.2 μ m仕様のセンサーで対応することとした。サンプリング周波数は最大で50kHzである。この仕様であれば目標の性能は充分カバーすると考えられた。

また同様に、サンプリング周波数が50kHzのため計測のための工具の回転速度はポイント数に応じて制限が加えられるが、600ポイントの場合2,500 min^{-1} が最大でそれ以下の回転数で計測する必要がある。工具径に関しても測定範囲の関係から最大8mmが上限となる。

図5に測定対象工具の最小径1mmの測定結果を示す。計測条件は回転数=1200 min^{-1} 送り20m/min、points=600で工具中心を正確に位置決め設定することで図の様に明瞭に計測することが可能になった。

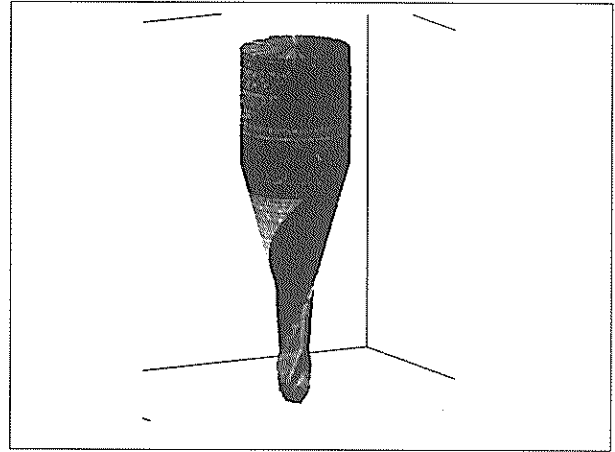


図5 計測結果 (工具径1mm ϕ)

(2) 回転数の影響

ポイント数は工具円周の分解能に影響するが、回転数はZ軸方向即ち工具長さの精度にも大きく影響する。即ちZ軸ピッチZPは次の式で求められる。

$$ZP = f / S \times 1000 \quad (\mu\text{m}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

f : Z軸送り (mm/min)

S : 回転数 (min^{-1})

図6にピッチの違いの測定結果を示す。

回転数600の場合 $f = 20 \sim 40$ の範囲で充分明瞭に観察が可能であった。また総サンプル数も、多量ではなく、従って図形表示もスムーズに表示することができた。

(3) 回転同期の影響

マシニングセンターの回転数と計測データの設定回転数が一致していないと、計測データの正確な座標測定ができないことが予想された。従って、マシニングセンターの設定回転数を変化させて、その影響について調べた。結果を図7~9に示す。

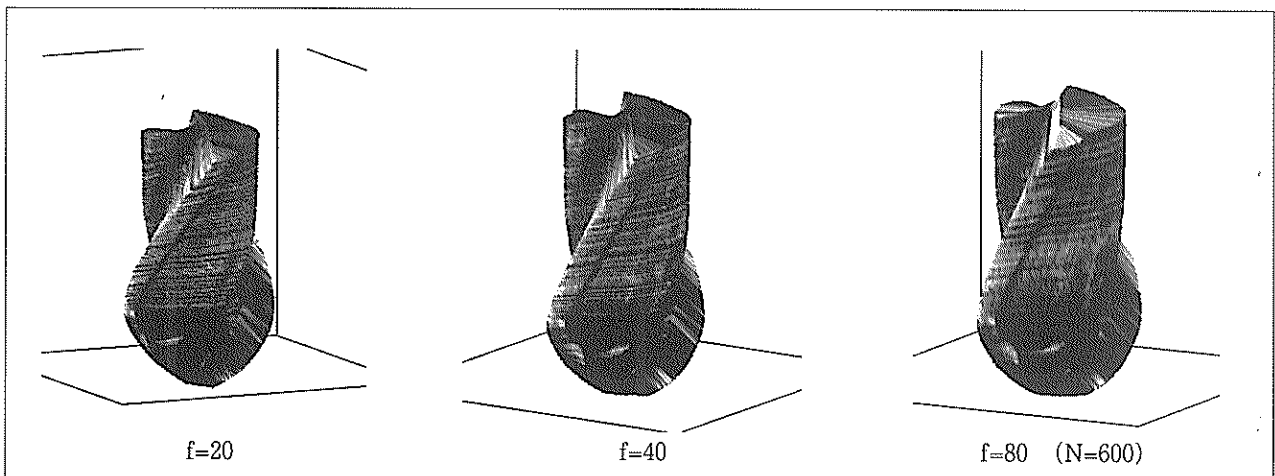


図6 送り速度の違い

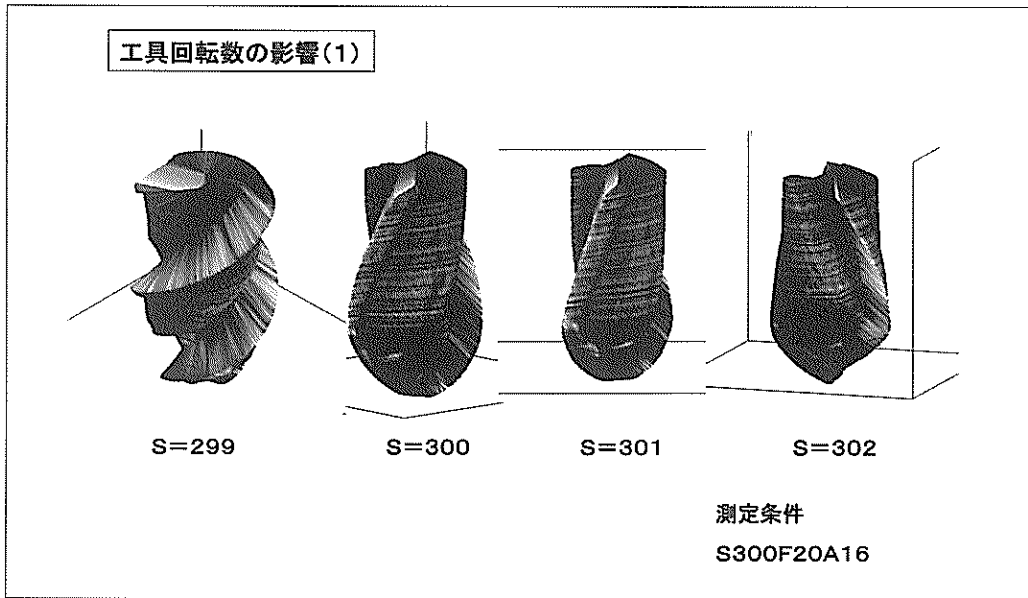


図7 回転同期の影響 (回転数=3000 m⁻¹)

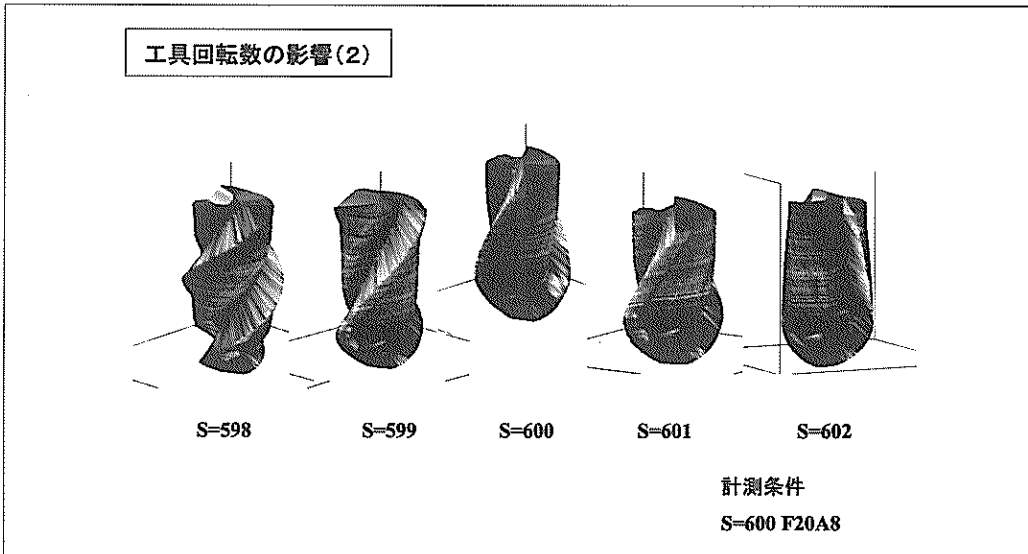


図8 回転同期の影響 (回転数=6000 m⁻¹)

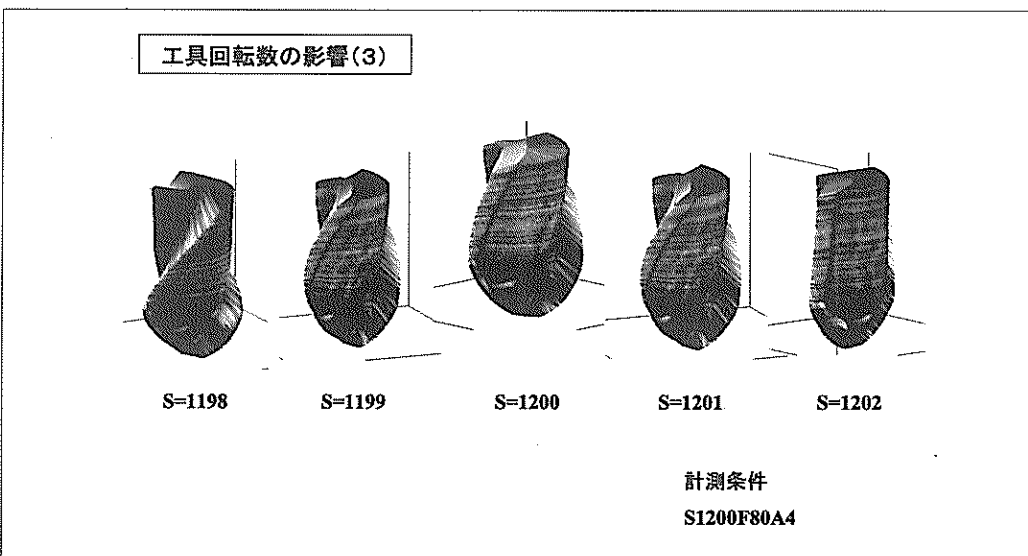


図9 回転同期の影響 (回転数=12000 m⁻¹)

回転数を300、600、1200の3段階で、設定回転数から±2に設定を変えての結果である。図から判断すると、低速回転時では、回転同期は大きく工具形状に影響することがわかる。また、工具の回転が設定より低い場合がその影響も大きいことがわかった。

従って、精度向上のためには、回転数はできるだけ正確であることが望ましく且つ回転数も高い方が誤差も少ないことがわかった。

(4) レーザ測定平均回数の影響

本システムにおけるレーザ計測は、最大サンプリング周波数が50KHzであり、測定精度を高めるために、内部処理として、必要サンプリング数に応じて、繰り返し測定を行い、測定データの精度を向上させるシステムとなっている。従って工具回転数とサンプリング周波数の関係は次の関係式となる。

$$P \times S / 60 < 50,000 \dots\dots\dots(3)$$

P：ポイント数
S：回転数 (min⁻¹)

いま、ポイント数600および回転数600の時、必要周波数は6,000Hzであり、上記式に当てはめると、平均回数AVE=8以下となる。

AVEを変えた工具先端面から見た表示結果を図10に示す。これより、規定以上の設定では、データが平均化され、形状がなだらかとなり測定値に影響がでることがわかった。

すなわち、ポイント数及び工具回転数に応じた適正のAVE設定が必要だということがわかった。

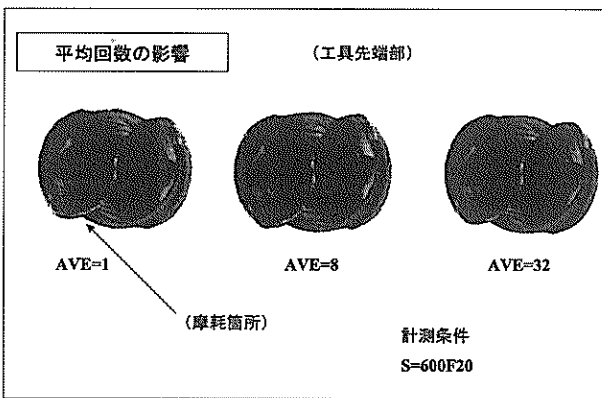


図10 レーザ測定平均回数の影響

(5) レーザセンサ計測方向の検討

本システムでは、工具の回転を利用して計測する。そこで、レーザの反射を安定させるためレーザ変位計を回転による影響が少ないとされる縦位置で測定した。比較検討のため横置き、および縦置きの結果を図11に示す。

これより、縦置きの方が回転方向がより詳細に表示できた。

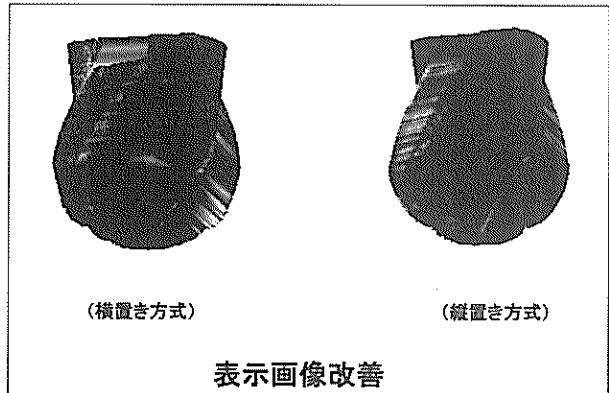


図11 レーザ変位形の設定方法の影響

本方式で行うと、センサ取り付け部の形状が、縦長となり従来の横置きと比べると装置全体が高くなるが、レーザの計測距離には差がなく、特に支障はないと判断し、縦位置設置で、装置設計を検討し試作した。ところが、思いのほかレーザセンサ部が高くなり、計測機カバーも大きく、装置全体としてもかなり大きくなってしまった。また、肝心の工具計測時に、センサカバーが、工具に近づき過ぎ工具干渉を起こす危険性が指摘された。そこで、装置の大きさ、操作性等を考慮し、最初の配置方式である横置き式に再度変更修正することにした。そのため、その修正に関わる測定精度向上の面から、且つ摩耗量計測精度の点からも測定分解能を高める必要性がでてきた。

そこで、測定ポイント数を、600ポイントから2倍の1,200ポイントに増やし、分解能を、15μm (工具径6φ) に高め計測することにした。工具摩耗量は100μm以上と想定しているため充分計測できる数値となった。

ところで、測定ポイント数を増加させることは、即ち、測定データのサンプリング周波数に大きく影響する。

本システムでの、最大サンプリング周波数は50kHzのため、1200ポイントでは、必要周波数が1.2KHzであり、工具の回転数S；(min⁻¹)を考慮すると、50,000 > 1,200 × S / 60 の関係からS < 2,500となる。即ち工具回転数は、2,500以下の設定となる。現在600で設定して測定しており充分対応できる状態であることを確認した。

(6) レーザ計測距離およびマシニングセンター駆動状況の影響

計測途中に、計測値の変動がまま見られたため、レーザ計測での、経時変化について検討した。特に計測距離と、マシニングセンターの駆動中、及び停止中での影響について検討した。

結果を図12に示す。縦軸が測定箇所の距離データの最大値と最小値の差（誤差）（ μm ）を測定したもので、横軸が測定距離で、0を中心にレーザーセンサーの測定距離30mmの前後の距離（mm）である。グラフの上部がマシニングセンターの停止時、下部が駆動時である。

図から計測距離の長い場合すなわち+側は、短い場合と比較して、 $8\mu\text{m}$ の測定誤差が生じ精度的に悪くなることがわかったが、特に支障となる誤差でもない判断できた。また、マシニングセンターの駆動状況にも特に影響されないことがわかった。そこで、変動の原因として、センサーの外部ノイズの影響であろうと判断し、レーザー発信器自体を絶縁することでノイズを防ぐことができた。

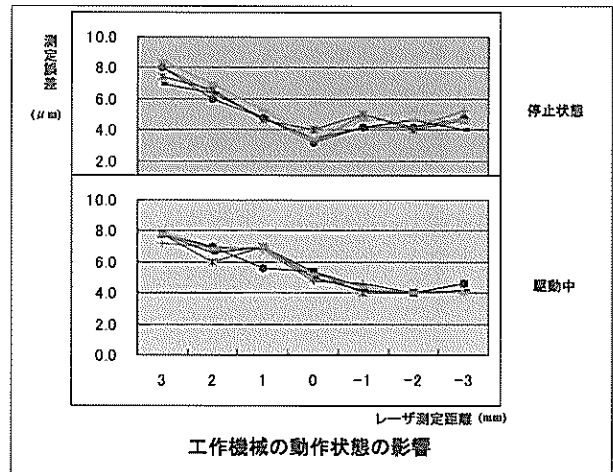


図12 工作機械の動作状況の影響

(7) レーザ計測における、工具中心設定方法の検討

工具中心を、如何に正確に設定するかが、本システムの精度向上の要である。

当初、図13の左図に示すように、先端が針状の中心突起を持つ工具を用い、工具中心を設定していたが、工具自体の製作精度に大きく依存するため、工具中心を正確に設定できなかった。

そこで、改善策として、工具の製作加工精度を利用し、工具外周の真円度を利用し、工具の外周上で計測値のピーク値を探し、マシニングセンターで工具半径分座標値を移動することで、工具中心を正確に設定できるようになった。また、より精度を高めるためには、できるだけ小径エンドミルを利用して求めた方がよいこともわかった。(図14参照)

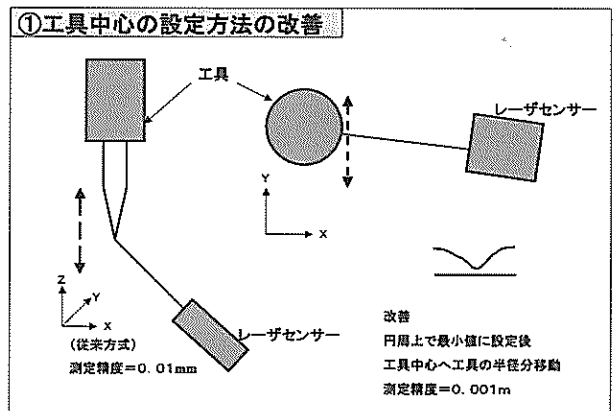


図13 工具中心設定方法の検討

3-2 画像処理の検討

本システムでは、位置情報と、輝度情報を重ね合わせてCRT上に表示するため、輝度情報の濃淡処理をプログラムで処理している。従って、そのしきい値をいろいろ比較検討し、画像に縦断面に縞模様が生じないように改善を試みた。結果を図15に示す。

初期プログラムと比べて、縞模様が少なく目立たなくなり、画像がよりシャープにきめ細かく表示できるように改善することができた。

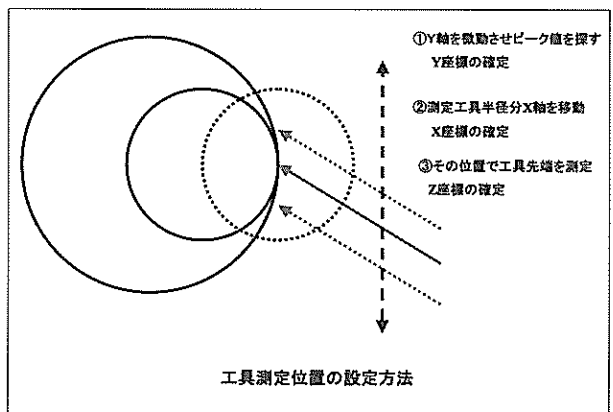


図14 工具中心設定方法手順

3-3 本システムの他の工具への応用について

本システムは、ボールエンドミルを対象工具として検討してきたが、レーザーの仕様から工具の大きさに制限はあるものの、測定原理から多くの回転工具に適用は可能と考えられた。そこで今後の活用を検討し、数種の工具ちなみにドリル、フラットエンドミル（4枚歯）に関して本システムを適用したところ、図16に示すように特に問題なくスムーズに計測することができた。すなわち他

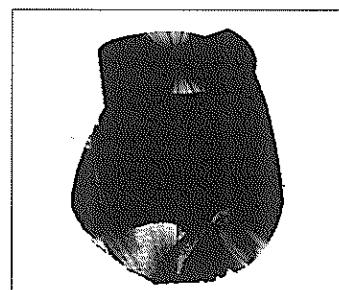


図15 画像改善の検討

工種への適用も十分可能なシステムであることがわかった。

3-4 NCマクロプログラムの検討

図17に示すように、工具診断用NCマクロプログラムを作成し、実験検証した。

基本的な考えは、ある切削加工過程において、工具測定が必要と思われる時、あらかじめ加工NCプログラムの中に、マクロプログラムを付加しておくだけで、工具診断ができるように設定した。

その、マクロプログラムの概略を示す。

マクロプログラムを実行した段階では特に問題なく、計測がスムーズに行え工具診断計測は正常に作動したのを確認した。

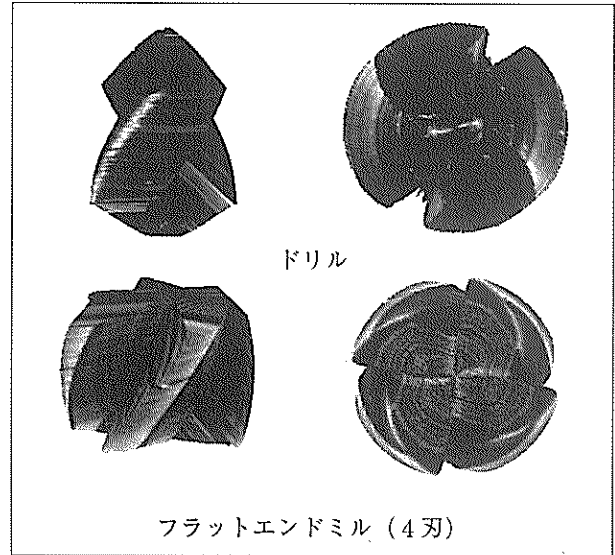


図16 対象工具の拡大

3-5 工具摩耗量計測方法の検討

本システムでは、全データを一旦メモリに保存してから、数値計算および画像処理を行っている。

そこで、当初、データ処理方法の検討として、輝度データの数値で工具摩耗量を計算しようと試みた。図18に輝度の測定データを示す。

しかしながら、図から判断して、輝度データのみでは、レーザの反射率が高い箇所でも輝度が高くなるため輝度情報のみでは正確な摩耗量の計測が困難だとわかった。即ち、摩耗箇所の位置情報も必要であることがわかった。

そこで以下の考え方で刃先の位置情報を読みとることにした。

工具は、基本的には刃先で切削を行うことから、刃先は必然的に工具直径と同じ最大寸法となる。工具摩耗は工具の刃先部分に生じるため、その部分の計測を正確に測定することで、工具摩耗を計測することができる考えた。

まず、レーザ計測データの位置（座標値）情報から、1回転毎のピーク値即ち、1サイクル毎の工具刃先先端位置を割り出すことで、摩耗の計測位置を割り出すことにした。（図19参照）

次に、摩耗量は、工具刃先から一定寸法（300ポイント）の範囲のデータを計測対象として計測プログラムを検討し、計算することにした。

計測データで摩耗量を50 μ m以上とプログラムで設定し、その設定寸法以上になった箇所を、計算して画面に表示し、且つグラフィック表示できるようにプログラムを改良した。結果を図20に示す。また、摩耗量の確実な判断のために、次サイクルの数値も参照し、両サイクルとも摩耗範囲の時のみ規定摩耗であると判断するようにし測定データの異常値の取り込みミスを防ぎよう

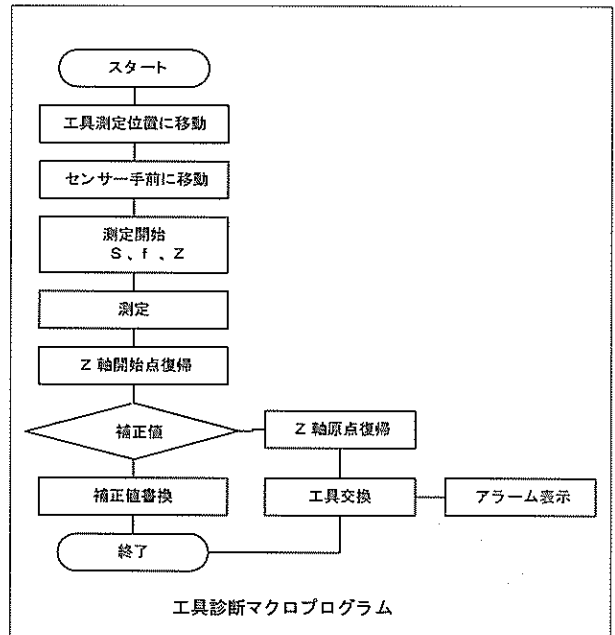


図17 工具診断マクロプログラムフローチャート

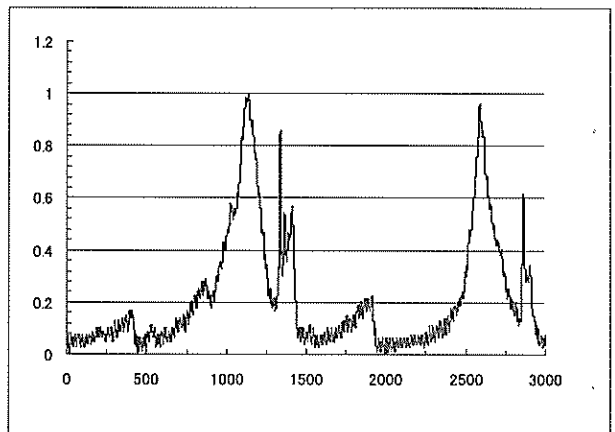


図18 測定データ

にした。

3-6 工具診断装置レーザ計測部の試作開発

以上、工具摩耗計測システムを確立するために、種々検討し、ほぼ実用に耐える計測ができるようになった。そこで、図21に、実際にマシニングセンタに設置し、計測作業ができるように、レーザセンサ部の収納を考慮した工具診断装置を、試作設計製作した。

試作における必要条件は、形状的に小型軽量であること、設置が容易であること、切削油剤から十分に防塵できること、かつ計測工具の洗浄機能を有することとした。

以上の条件で、種々検討し、下図図面の設計を行い、試作機を製作し設置試運転、測定を行った。

結果、十分に実用に適する機能性能であった。図22に試作完成した装置の写真を示す。

4 まとめ

これまでインプロセス（加工中）での工具診断では、三次元加工の場合、工具がワークに隠れて直接工具を観察できないことが予想されたので、本システムでは、インタープロセス（加工途中）方式で工具摩耗を計測することにした。

平成12年度は、工具計測時のレーザ照射角をボールエンドミルにも対応できるように45度に設定すると同時に、装置自体の小型化を図るための設計仕様を策定した。また、工具径1mmの小径工具にも対応できるように高精度のレーザセンサを用い実証試験を行った。平成13年度は、

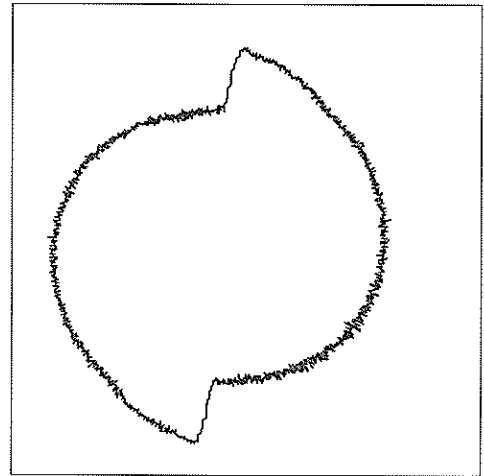


図19 測定データの円筒座標表示

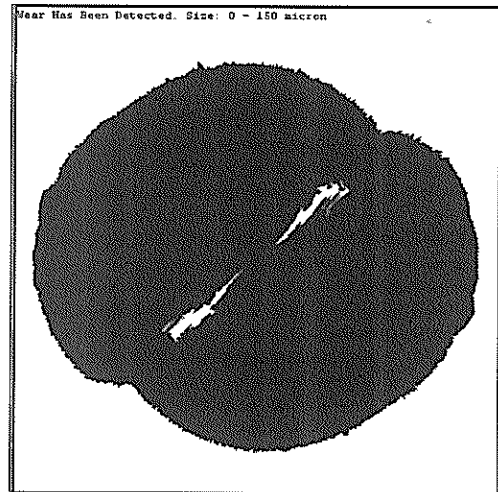


図20 摩耗量 2 値化表示

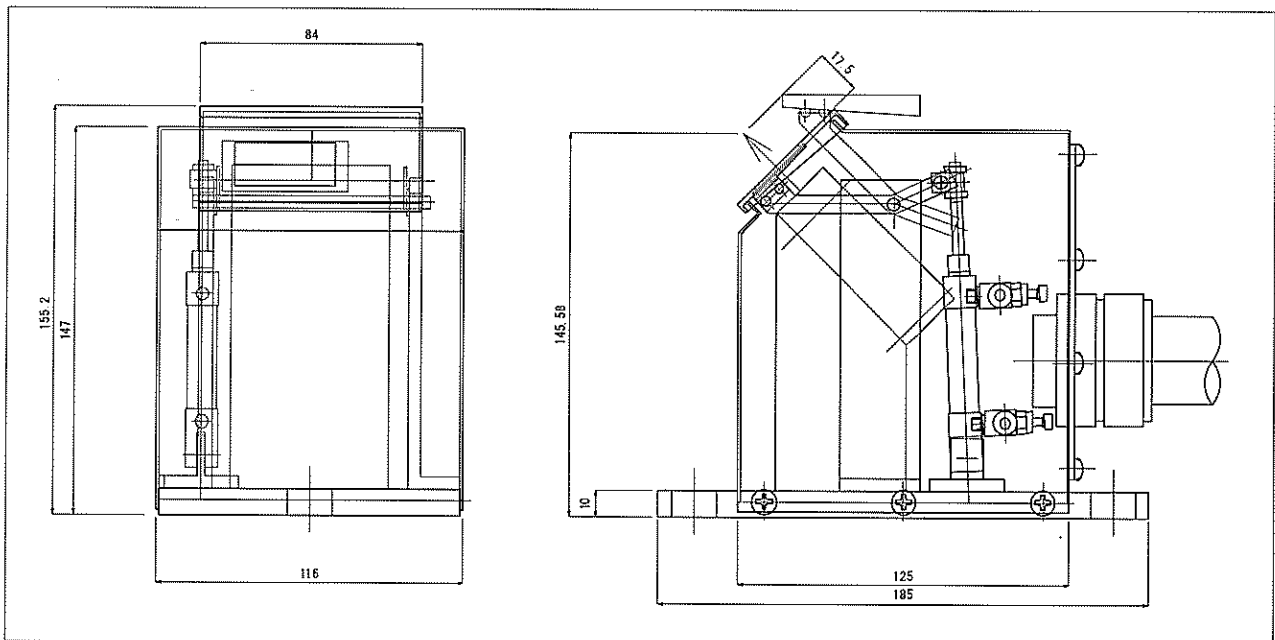


図21 工具診断装置センサ部（設計図面）

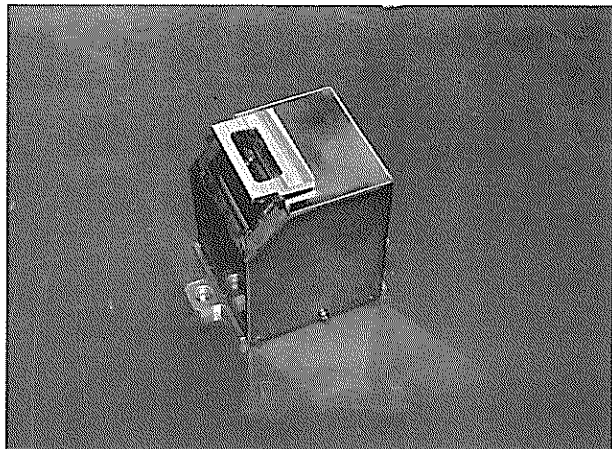


図22 工具診断装置外観

前年度の成果を受けて、工具診断装置の中核となる摩耗幅計測プログラムの作成を重点的に行った。具体的には、工具1周当たりの計測ポイント数を従来の2倍に当たる1,200ポイントに増やすことで分解能の向上を図った。次にレーザセンサから得られるステップ状の輝度データから共分散を求め摩耗幅を算出するプログラムを作成し、モニター上に摩耗幅の二値化画像と数値が表示されることを確認した。

また工具診断装置を試作し、工具の摩耗幅を高精度に計測できるコンパクトな工具摩耗診断装置を開発することができた。

以上、切削工具をマシニングセンタの主軸から取り外すことなく、非接触で、破損や摩耗状態を観察でき、同時に、摩耗幅を高精度に計測できるシステムを開発することができた。

本システムを活用することにより、加工製品の不良低減や、加工精度の向上に果たす効果が高くなると予想される。

また、応用技術開発で、レーザ計測技術を活用させることができ、レーザ利用での計測装置の開発への応用展開の可能性が広がった。

参考文献

- 1) 森 和男 インプロセス加工モニタリング技術 機械技術研究所報告
- 2) 井上泰典 LABVIEW グラフィカルプログラミング 森北出版(株)

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。