

<機上計測>

機上ツール座標測定による精密加工の実現と現状

長谷川 浩幸*

近年の加工技術における進化は目覚ましい。特にここ2～3年における変革は、恐らくそれまでの7～8年間で進歩してきた内容を超えると思われ、今後もこの速度は増すものと容易に想像ができる。進化を推し進めた要因はさまざま考えられるが、大きなものとしてはスピンドルの高回転化と測定技術の確立にあると思われる。スピンドルの高回転化は工具の小径化の流れとなり、高回転スピンドル+最新の切削工具の組み合わせは、たとえば焼き入れ材のダイレクト加工を可能にした。工具の寿命は著しく伸び、小径の工具1本ですべての加工を行ない、さらに全体的な加工時間をも圧縮する。それまでの【粗加工>中仕上げ>(焼き入れ)>最終仕上げ】のような工程を、【(焼き入れ材の購入)>全加工】のように圧倒的な工程と原価の低減を可能にした。

お気づきの方も多々いらっしゃると思うが、最近の加工機械の主軸速度の高回転化や工具メーカーの小径化などは、おのおののメーカーがこれらの技術にあわせるように開発・販売を行ない始めたものである。

その一方で、需要が急速に伸びているのが測定技術である。製品そのものの寸法を測定することも必要だが、でき上がった製品の寸法を測定しても手直すことは非常に困難であり、加工時間や工具の価格を考えると、最初から良品を作るということを前提にものづくりを進めることが理想であり、目標になる。そこで、良品稼働率(直行率)を確実に上げるための測定を考察する。

1. 精度が出ない原因を考える

加工製品の寸法不良に繋がる要因を考えよう。人的なミスや設計上の不良などもあるが、CADシステムが発達している今日、それらに起因する不良は一昔前に比べて少なくなっているように思う。しかしながら、実際には作業者によって不良率は異なるし、ことに精密加工に関しては作業者の習熟度に精度が左右されることは想像に難くないだろう。ではなぜ同じ機械・工具を用いてもそれらの差が出るのかを検証する。

加工機械には必ず主軸が存在する。その主軸を回転させることで、先端に取り付けられた工具により製品を加工する。しかし、この回転運動を行なう際には、電気的あるいは機械的な摩擦による発熱は避けられない。また、回転することによって起こる地球ゴマ現象も物理的に避けられない。熱で変位するZ軸、地球ゴマ現象で変位するX/Y軸(主にY軸)の誤差が製品の寸法不良を引き出す大きな要因となる(図1)。したがって、これ



主軸の変位を連続的に測定。伸びのサチュレートを確認した後、1,100秒付近で停止。その後、伸びがゼロに戻るまでを計測。緩やかに上がっている曲線が伸び量(Z軸)。もう一方がY方向のシフト量。伸びはグラフ左側の目盛りで参照、シフトは右側の目盛りで参照。

図1 スピンドルの伸びとシフト

*HASEGAWA, Hiroyuki / (株)ジェイネット 代表取締役

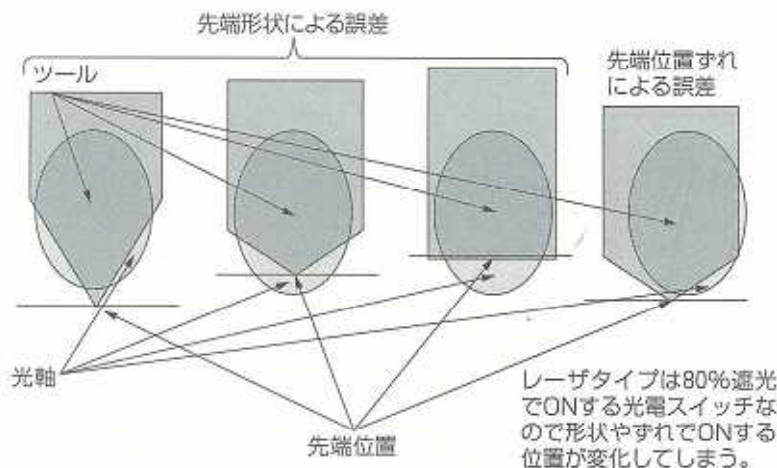


図2 遮光の形状による先端位置測定誤差のイメージ

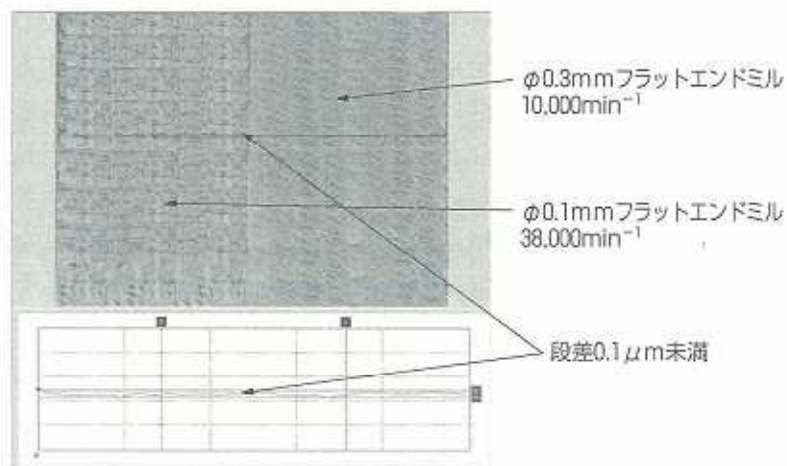


図3 径の違う2つのエンドミルで底面加工を行なった結果

らの変位量を把握しなければ精度を出すことは不可能である。また、これらの変位量は気温や加工回転数でも異なるために難易度は高い。習熟度の高い作業者はこれらの変位量を体験的に把握しており、たとえば、Aの機械では回転数 $20,000\text{min}^{-1}$ のときにZ変位が $20\mu\text{m}$ 、Y変位が $5\mu\text{m}$ など、プログラムに対して補正を行なうことで図面どおりの寸法精度を確保しているのが一般的である。変位量は同じ機械であっても気温や機械のコンディションによって変化するので、まさにこれらの調整は職人技だったわけである。

今までも、誰でもある程度の寸法精度が出せるように目安となっていた測定器は大きく分けて2種類が存在していた。一つは、工具を接触させてZ方向の位置を捉えるタイプで、もう一方はレーザーの光電スイッチを用いて非接触で先端位置を捉えるタイプである。接触式は安価であるために高い普及率で使用されているが、動的な(回転中の)測定ができないために、上記の変位を求めることはできない。一方のレーザー式はレーザーダイオード

を使用した投受光方式の光電スイッチで80%遮光時にオンオフ信号を出すものであり、図2が示すように、ツールの種類が変わったり、X/Y方向に変位があった場合は測定位置がまったくずれてしまったりするために原理的に難しい。

2. 解決策を求める

これらの問題を解決し、機械の動的な精度を含め、ツールの種類が変わっても先端の位置が測定できるものを作る、というのがジェイコア開発の発端であった。あわせてツールの振れや摩耗状態までも測定し、無人での24時間運転を可能にする。これがこの測定器の開発コンセプトである。

そのために、まず熟練工を何人かモデルとしてヒアリングおよび作業工程の検証を行なった。その結果、変位する刃物の先端位置を捉えているのは、製品に当たったときの音(聴覚)や振動(触感)も使うが、一番頼りにしているのは、目(視覚)であることがわかった。そこで、人間の目に代わる画像を用いた測定装置を開発するプロジェクトを始動した。

CCDを核として高速演算プログラム、特に人間の目や脳がどのようにツール先端を判断するのかは開発に時間のかかった案件であった。たとえば、人間の目や脳はツール先端や周りについての切屑や切削液、切削油をツールとは違うものと判断ができるが、0/1信号のデジタル世界だけでは、これもツールの一部として誤判定してしまう。これらの問題を人間と同じアルゴリズムで判断・測定可能にするには、専門家や熟練工のアドバイスをそのままプログラムにする必要があった。また、その一方で物理的な精度を上げる必要に迫られ、1ピクセルを256分割し、内部演算の分解能は 2nm まで細分化することに成功した。

3. 結果を検証する

理論値は十分に満足できるレベルにまで到達したが、大切なのは、その測定器を使用して実際に加工を行ない、でき上がった製品を測定した結果になる。図3をご覧いただきたい。径の違う2つのエンドミルで底面加工を行なった結果である。

左側が $0.1\text{mm}/38,000\text{min}^{-1}$ で、右側が $0.3\text{mm}/10,000\text{min}^{-1}$ のエンドミルで加工を行なった。その結果、段差は $0.1\mu\text{m}$ 未満に収束した。実際に、回転数の違う刃物の先端は、ジェイコアで測定した結果、熱変位などでZ方向に $17\mu\text{m}$ の差異があり、これを補正し、加工を行なった。また、図4をご覧ください。これは本誌7月号(P.15~19)にも掲載された超合金のピンである。理化学研究所の大森素形材研究室にて卓上型の加工機「MOEL」を用いて、ジェイコアで測定して製作された。長さは $40\mu\text{m}$ 、径は $1\mu\text{m}$ となっている。これは、まったく加工のノウハウがない研究員が30分程度で仕上げたものである。しかし、大切なのは $1\mu\text{m}$ のピンを製作することではなく $1\mu\text{m}$ のものでも精度良く製作できるということにある。実際に $\phi 3\mu\text{m}$ のピンは、ジェイコアと加工機械を通信させることで、完全自動で12分に1本の割合で製作している顧客も存在している。

これらの加工を可能にしたのは、日本のお家芸であるCCD技術や、光学系、特にレンズの技術を背景として、画像の高速解析・演算を行ない、加工機械と通信を行ないながら補正をリアルタイムで行なうことに成功したからにはほかならない。図5(a)は $50\mu\text{m}$ の穴が5,000穴あけられたボールグリッドアレイの吸着パッドである。(図5(b)は拡大図)それぞれの穴の表面には 0.1mm の半田ボールを吸着するために 100° のテーパがつけられているが、それぞれのテーパ径に $+0, -5\mu\text{m}$ の公差がある。また、それぞれの穴の座標公差においても基準座標からレンジで $5\mu\text{m}$ となってい

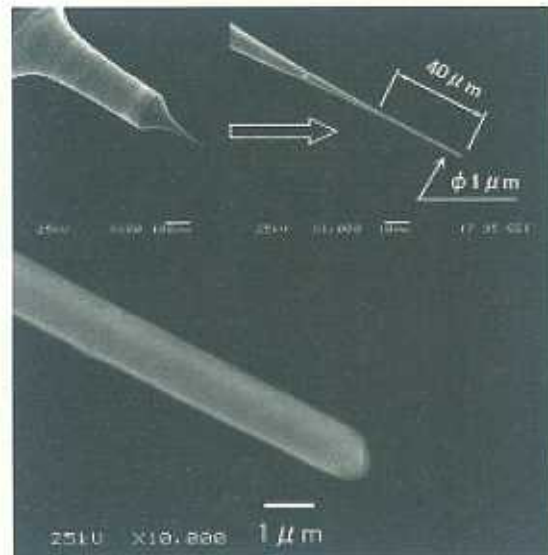
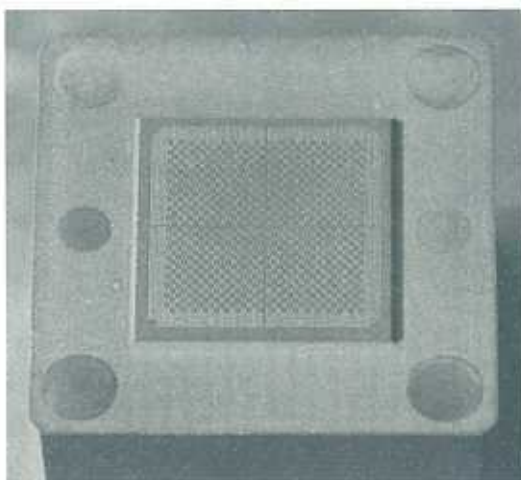
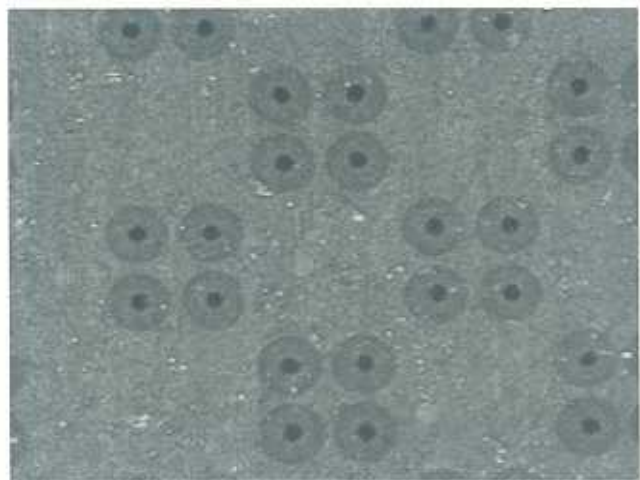


図4 超合金のピン

るため、熟練工が顕微鏡などで確認しながらほぼ3週間かけて製作していた。現在は、ジェイコアで測定し、加工機械にフィードバックを行なうことによって入社後間もないオペレータが2日間で製作している。なお、センタドリルと本ドリルの回転数の違いによる座標変位についても測定・補正を行ない、ドリルに不自然な負荷がかからないために、破損、異常摩耗などが発生しないので5,000穴の加工を1本のドリルで行なっている。熟練工の工数+加工機械の減価償却費が、ほぼ20日分圧縮されたことになる。これは単純に計算すると、836,000円の原価低減となる。図6(a)は0603チップと呼ばれるサイズが $0.6 \times 0.3\text{mm}$ のチップを吸着・固定するためのコレットだが、チップを固定するために中央に爪が4つある。この

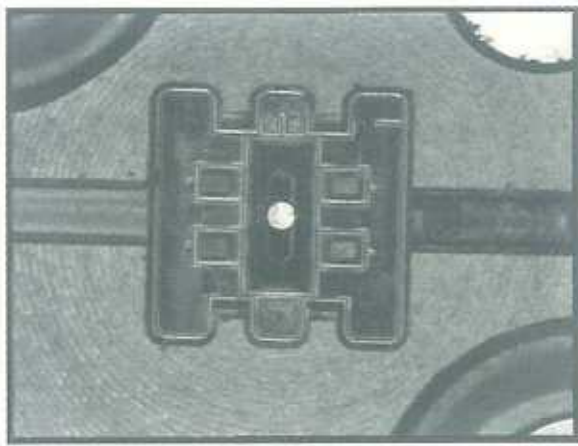


(a) 吸着パッド



(b) (a)を拡大した図

図5 $50\mu\text{m}$ の穴が5,000穴あけられたボールグリッドアレイの吸着パッド



(a) コレット



(b) (a)を拡大した図

図6 0603チップと呼ばれるサイズが0.6×0.3mmのチップを吸着・固定するためのコレット

爪の側面にはそれぞれ3段階のテーパがあるが、その角度公差は、秒単位の精度が求められている(図6(b)は拡大図)。そのために熟練工が一つ一つ確認しながら、1ロット800個を87日間かけて製作していたが、現在は通常のオペレータが、14日間で製作している。この製作に至っては、ほぼ320万円のコストダウンになる。このように、この測定技術の確立は、誰にでも精密加工を実現させることを可能にしたに留まらず、大きなコストダウンを実現した。

4. 使用例を検証する

以上のように、新しい加工の工法を示唆する結果が現されているが、どのような使用法があるかを考えたい。

① 加工機械と通信させ自動補正を実現する
LANあるいはRS-232Cを介して加工機械と通信を行ない、完全自動補正を実現させ、省人化あるいは加工機械の24時間稼働を目指す。

② 必要なときだけ測定を行なう

加工機械に恒久的に載せて測定を行なうのではなく、加工に必要なときにだけ載せて測定を行ない、精度を上げる目的や、加工機械自体の精度や動的な挙動を測定し、メンテナンスの時期などを予測する。図7を参照されたい。これは、回転数別のスピンドルの振れ量を要因別(同芯状の振れ・すりこぎ状の振れ・機械の振動)に出力したものである。要因別の振れ量がわかることで対策も容易になる。座標測定も含めて1台の測定器で複数の加工機械に対応が可能になるの

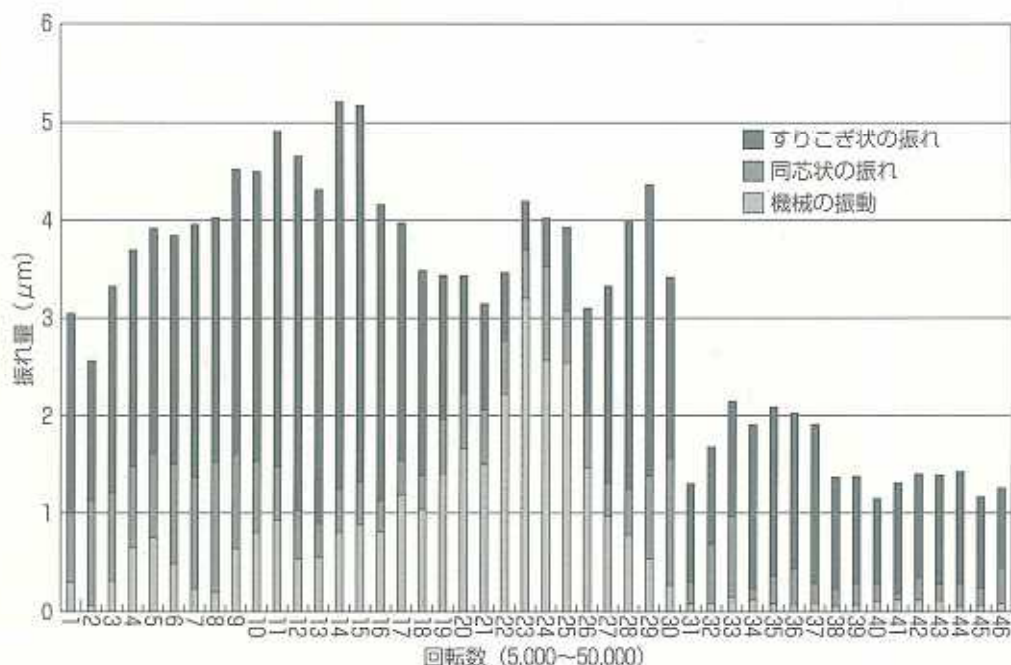


図7 回転数・要因別振れ量測定グラフ

で導入も比較的簡単に判断しやすいと考えられる。

図8に測定の様子を、図9に測定画面を示す。また、図10は研削機における使用例である。

5. 導入形態を考える

さまざまなメリットを引き出すことが可能になる機上ツール先端座標測定だが、考えられる導入機会として大きく2つに分けられると思う。一つは加工機械のオプション設定のような感覚で、加工機械の購入時にあらかじめ取り付けられて販売されるケースで、加工機械との完全自動通信・自動補正までを行ってしまうことで今までとは次元が違う加工環境を提供することが可能になると考えられる。もう一つは、既存の加工機械に後付けて取り付けるケースで、こちらは現在、顧客が保有する加工機械に取り付けることで加工機械の能力を飛躍的に向上させる。今までの精度を大幅に上回る加工が短時間で実現可能になる。

本稿では、機上でツール先端座標を測定するジェイコアについて、データと機能をいくつか挙げさせていただき、実例を含めてご紹介した。

最近では、米国の金融不安が飛び火し、世界同時株安といった現象が起こっている。逆にこんな現状だからこそ、ものづくり日本の復活を考える時期だとも言えるのではないだろうか？ 公差の穏やかな製品はほとんどが海外に流出し、国内に残っている仕事は公差が厳しいものか、あるいは価格の叩きあいの末、残った付加価値の低いものになってしまった。本稿執筆は丁度JIMTOFの時期と重なっているが、たった今、現場から入った情報によると、今年の動向は、大きく分けると航空・宇宙産業向けの大型機と精密加工向けの工作機とになっているようだ。そんな中、機上でツールの座標測定を行なうことで前述のような精度やコストダウンが実現できるとしたら、コストパフォーマンスの優れた投資だと言えよう。精密加工の安定実現は、また新たな市場を必ず生み出し、

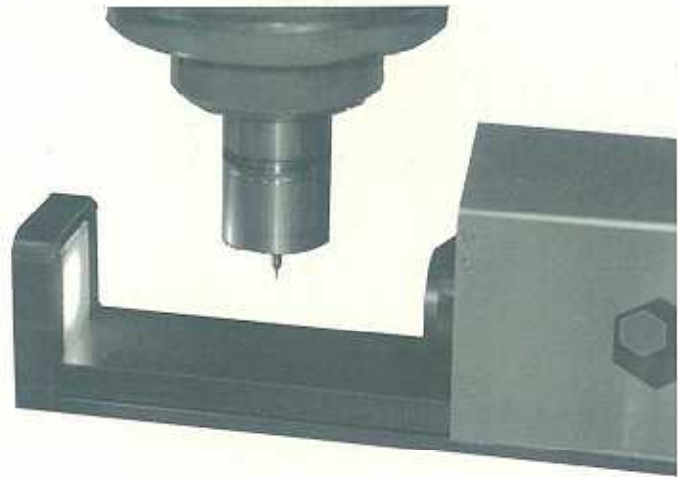


図8 測定中の写真

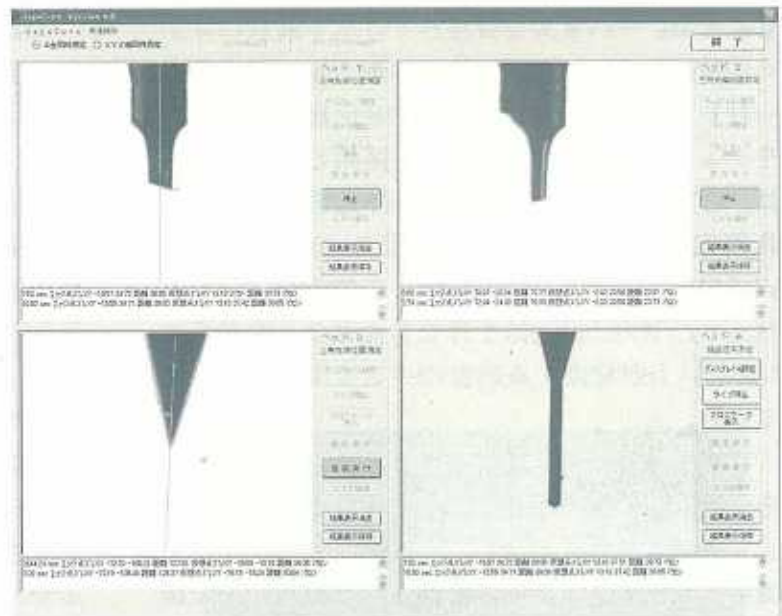


図9 測定画面



図10 研削機における使用例

付加価値が高い製品作りが一般化されれば、内需の拡大にも繋がるだろう。こういった計測技術が日本のものづくりが再び世界をリードする時代創造の端役でも担えれば幸いだと思う。