

5軸マシニングセンタの加工性能を評価するための加工試験

山本 通¹・才川 大地²・藤原 敏博³

¹機械工学科, ²株式会社カンセツ, ³オークマ株式会社

本研究では、簡単にかつ不具合原因特定を行いやすくすることを目的に5軸MCの新しい加工試験を提案し、2種類の5軸MCを使った実験では、回転軸を反転させた位置で不具合が出やすいことを確認した。その他、加工結果から、回転軸と直進軸の同期が始まる位置での振動のような段差、NCの近回りの影響によると思われる大きな加工誤差等、加工機の性能に関わる多くの情報を得ることができた。また提案した数学モデルを使えば、機械の誤差が加工面にどの程度の影響を与えるかを確認するための指針とできることも確認した。この試験を行い、その機械の特性を理解したうえで機械を使えば、加工不具合を減らすことも可能で、本研究で提案した加工試験は有効であることが明らかになった。

キーワード：5軸マシニングセンタ, 加工試験, 回転軸, バックラッシ

1. 緒言

工作機械では送り軸や回転軸の方向が変わる位置(以下、反転位置という)で起こるバックラッシが加工面に悪影響を及ぼすことがある。磨きレス金型のような加工品位が求められる場合、加工機のバックラッシ量を知らなければ、その機械で磨きレスの加工品位を実現できるのか分からない。直進軸のバックラッシについては多くの研究が行われている^{1, 2)}が、それに比べて回転軸のバックラッシに関する研究例は少ない。特に近年リードタイムを短縮する手段として注目されている5軸マシニングセンタ(以下、5軸MCという)が有する回転軸のバックラッシによる影響が加工面にどの程度影響を及ぼすのかを知らずに工作機械を購入し、製品を加工すると、意図せぬ不具合が発生し、それを解決するために工数がかかり、リードタイム短縮が実現できない。

5軸MCの性能評価方法としては、ダブルボールバーや球と変位計を使用した方法が開発され^{3, 4, 5)}、ISO規格原案として採用されるまでになっている。しかしこのような高価な測定機をユーザが購入することはほとんどない。一方、3軸MCでは実際に切削を行い、性能評価を行う方法も既に提案されているが、5軸MC用としては円すい台加工⁶⁾によるものがあるに過ぎない。そこで、本稿では、回転軸と直進軸の同期加工精度や加工面について確認できる新しい加工試験を提案し、その有効性を確認する。

2. 加工機と加工試験

(1) 加工機

5軸MCの構造形態としては、主軸旋回形、テーブル旋回形と混合形の3種類の形態があることが知られている。このうち、最も多くの台数が出荷されているテーブル旋回形5軸MCについて本研究では、取り扱う。実験で使用した機械構成は、図1(a)と(b)に示すタイプの5軸MCである。

(2) 加工試験

加工機の回転軸性能を簡単に評価できるようにするために、以下のような加工試験を考案した。

被削材として直方体もしくは立方体のブロック材を準備しパイスなどでクランプする。これにボールエンドミルで指定した工具姿勢で平面加工を行い、その加工面を評価する。評価方法としては、目視もしくは広く普及している面粗度計を主に用いる。具体的には、図2に示すように、

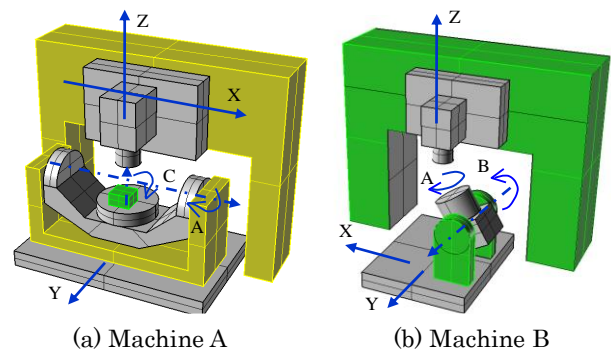


Fig. 1 Experiment environment

直方体形状のワークに一定の切込みを入れ、ワークの上面と平行に回転軸を同期させながらボールエンドミルで平面を加工するものである。例えば、図2に示すA点に角度 θ 傾けた工具を位置決めさせ、B点で傾きがゼロになるように回転軸も回転させながら加工を行う。B点まで到達すると、回転軸の回転方向を変え(反転させ)、C点で角度 θ に戻るよう加工する。このようにすれば、B点で回転軸のバックラッシュによる影響が出ると考えた。また単純な平面を加工するだけなので、プログラム作成、被削材のクランプや測定が行いやすい。なお加工条件は表1に示す通りである。

3. 実験結果

(1) 機械Aの加工結果

提案した加工試験を機械Aで行った結果を図3と図4に示す(ただし図2に示す θ を5度とした)。図3(a)は、回転軸反転位置が発生する位置を上から撮影した写真で、図3(b)はその断面曲線である。回転軸の反転位置でバックラッシュによると考えられる大きな段差が発生していることが分かる。また送り速度で比較すると、1000mm/minに比べ3000mm/minで加工したほうが段差量は大きくなっている。

次に、図4は、送り速度3000mm/min時の加工結果の加工開始位置付近の写真とその断面曲線である。提案した加工試験を行えば、直進軸と回転軸が同期し始める際に、このような加工不具合が起こりやすいかどうか診断できる。

(2) 機械Bの加工結果

提案した加工試験を機械Bで行ったところ、回転軸の反転位置での段差は、図5に示すように機械Aに比べて格段に小さくなった。なお、機械Bの回転軸のストローク制限の関係から機械Aでの加工試験と加工方向が異なるが、それ以外は表1のように機械Aと同じ条件になるように加工を行っている。次に、図6は加工開始位置付近の写真である。機械Aで発生した段差と似た周期的な段差はほとんど

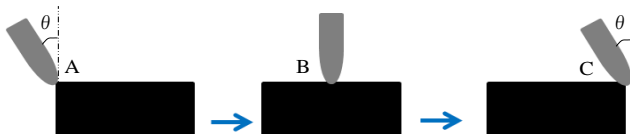


Fig. 2 Machining method

Table 1 Machining condition

Spindle speed	8000 min ⁻¹
Feed rate	1000 or 3000 or 5000 mm/min
Pick feed	0.15mm
Cutting depth	0.03mm
Work material	NAK80 (125×80×50mm)
Tool	R5mm Ball end mill

見られないが、加工開始位置に大きな誤差が発生していることが分かる。送り速度が速いほど誤差量が大きくなっていること等から判断すると、機械が近回りを行っていると考えられるが、その誤差量は驚くべきものであり、このような観点でも機械の評価が行えることが分かる。

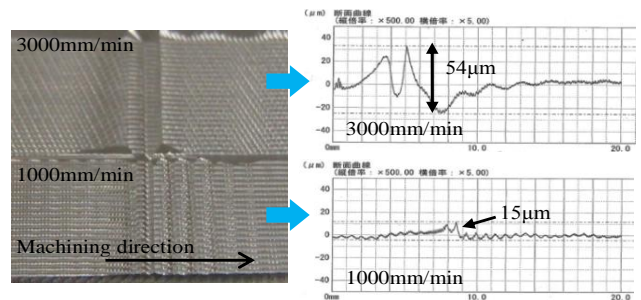
4. 考察

(1) 静的バックラッシュと動的バックラッシュ

ダイヤルゲージ等の変位計で図7に示す方法で測定した機械的な誤差を、本研究では静的バックラッシュと呼ぶ。

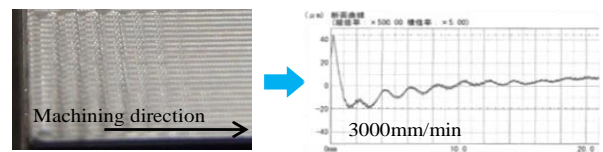
この方法で、回転軸がウォームホイールで構成されている機械Bの回転軸を測定したところ、回転中心から200mm離れた位置で40 μ mの誤差が発生した(これを角度に換算すると、静的バックラッシュは0.011度となる)。

一方、前述したように反転位置の加工面での誤差量は、加工時の送り速度によって異なる結果となった。また機械Bでは、加工面に近い位置で静的バックラッシュが40 μ mあるにも関わらず、加工面での誤差量はそれに比べて少ない。そこで本研究では、このような制御性能も含めたバックラッシュを動的バックラッシュと定義する。



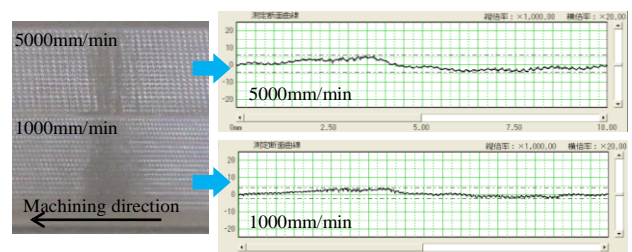
(a) Photograph (b) Profile curve

Fig. 3 Machining result 1 (machine A)



(a) Photograph (b) Profile curve

Fig. 4 Machining result 2 (machine A)



(a) Photograph (b) Profile curve

Fig. 5 Machining result 3 (machine B)

(2) 数学モデル

機械の各誤差が加工面に対しどれだけの影響を与えるかはその誤差の性質と加工面の状況により加工面へ与える度合い(量)は異なる。本研究で提案した加工試験でもワークの設置位置と、どの加工面を加工するかで同じ誤差や性能の機械でも加工面に与える影響は異なるはずである。つまり、機械の特性を正確に知るためには極力、加工面に影響が出るようにワークを設置し、適切な加工面を加工するのが望ましい。そのために各誤差が加工面にどのような影響を与えるかを求めることができるようになる必要がある。そこで本研究では回転軸のバックラッシュがどのように加工面に影響を与えるかを求める数学モデルを考えた。

その数学モデルでは、図8に示すように点P1から回転軸を反時計回りに回転させながら平面加工を行い点P2で回転軸の反転が起こるとする。このとき、回転軸はバックラッシュ θ だけ回転が遅れ、直進軸のみ点P2'へと移動できると仮定すると、ベクトルB1が機械座標系基準での誤差ベクトルとなる。これを回転した角度 α だけ戻したベクトルB2をワーク座標系基準の誤差ベクトルと定義する。その計算式は次式となる。

$$B2 = R(\alpha) \cdot (R(\theta) \cdot R(-\alpha) \cdot P1 - R(-\alpha) \cdot P1) \quad (1)$$

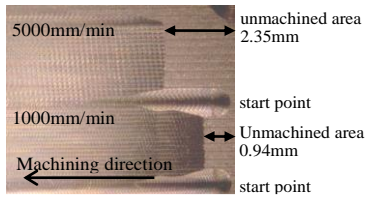


Fig. 6 Machining result 4 (machine B)

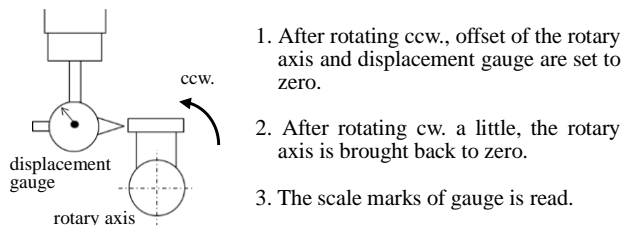


Fig. 7 Measurement method

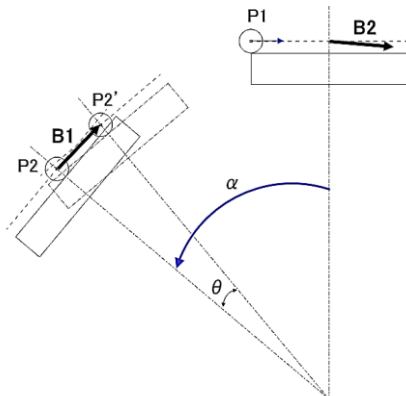


Fig. 8 Mathematical model

ただし、 $R(\alpha)$ は、回転角度 α の回転変換行列である。

ここで、前述のように求めた静的バックラッシュ0.011度と回転中心基準の加工点座標をこの計算式に代入すると、ワーク座標系基準の誤差ベクトルは(49, 0, 0) μm となり、その誤差はワーク上面には発生せず側面に大きく現れることが分かる。3章の実験結果からも分かるように、実際の機械では各機械の制御性能により、この計算結果通りの誤差は発生しないわけであるが、5軸加工を行ううえで、上式を使えば、どの加工面にバックラッシュの影響がどの程度出やすいか等、一つの目安とすることはできる。

(3) 確認実験

提案した数学モデルの妥当性を確認するため、直方体形状のワークの側面に加工試験を行った。その結果を図9に示す。数学モデルでの予想通り、同じ機械で加工したにも関わらず図5で示す結果よりバックラッシュによる加工誤差が大幅に大きくなっている。つまり、数学モデルを使用し、どの加工面をどのように加工すれば、加工機の実力を評価しやすいかの指針とすることができると言える。

(4) 加工結果の振動解析

図10は主軸回転速度8000 min^{-1} 、送り速度800 mm/min で直進軸のみを使い平面加工を行ったときの送り方向の

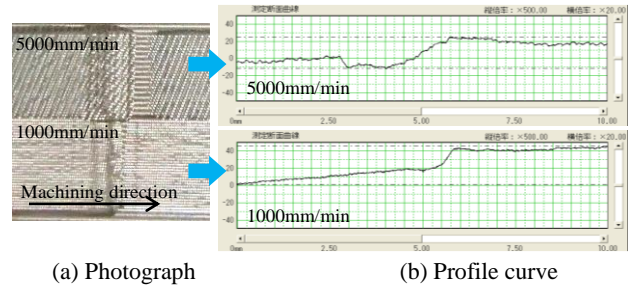


Fig. 9 Machining result 5 (machine B)

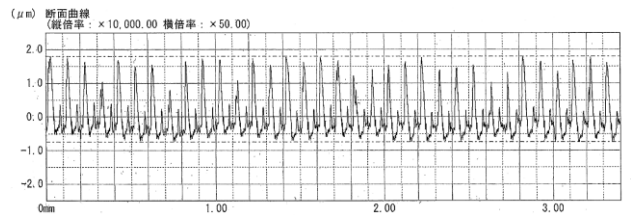


Fig. 10 Profile curve

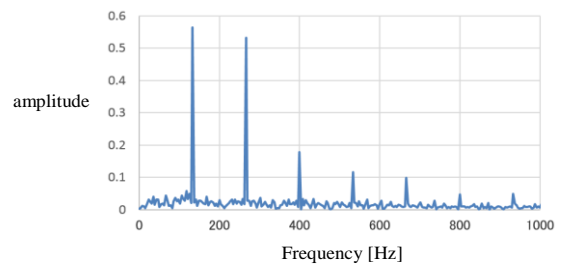


Fig. 11 Frequency analysis

断面曲線である。また図11は図10に示す断面曲線を周波数解析した結果で、133Hzは一回転送り、266Hzは一刀送りに相当し、断面曲線を用いると振動解析が容易に行えることが分かる。ここで図3や図4に示す加工結果を見ると、バックラッシュによる加工不具合以外に周期的な振動も見られる。そこで、この振動の周波数が簡単に特定できると、振動源の特定が容易になり、その振動を抑制することが可能になると考え、同様の解析手法を行った。しかし、提案した加工試験のような加工の場合、指定した送り速度が全領域で出ている保証はなく、仮に図11に示すようなピークが出ても信頼に値しない可能性があることが分かった。

(5) ダブルボールバーによる測定結果との比較

堤らが提案した図12に示すようなダブルボールバーによる測定方法⁷⁾で機械BのB軸を測定した得た結果を図13に示す。図13(b)に示す接線方向の測定結果に注目すると、回転方向が変わると約50μmもの半径誤差が発生している。ここで、前述した静的バックラッシュの測定は、回転中心から200mmの位置で40μmであった。一方、DBBで測定した回転半径誤差も回転中心から250mmの位置で50μmと角度換算で同じであることから、図13(b)で見られる半径誤差は静的バックラッシュの影響によるものであると考えられる。

5. 結言

本研究では、簡単にかつ不具合原因特定を行いやすくすることを目的に5軸MCの新しい加工試験を提案した。本研究で得られた結果を以下に示す。

1) 提案した加工試験により、回転軸を反転させた位置で不具合が出やすいことを確認した。その他にも回転軸と直進軸の同期が始まる位置での振動のような段差、NCの近回りの影響によると思われる大きな加工誤差等、加工試験の結果から加工機の性能に関わる多くの情報を得ることができた。

2) バックラッシュに限定したものだが、提案した数学モデルを使えば、確認したい誤差を効率良く確認するための指針とできることも確認した。

3) 本加工試験は平面を加工するだけなので、加工や測定が容易に行え、CAMや高価な測定機も不要である。本加工試験を実施し、その機械の特性を理解したうえで機械を使えば、加工不具合を減らすことも可能で、本研究で提案した加工試験は有効であると考えられる。

4) 加工中に指定した送り速度で必ずしも機械が動いているとは限らないので、加工結果からの振動周波数特定は、簡単ではないことが分かった。

参考文献

- 1) 上田真大, 下田博一: ボールねじの玉挙動とロストモーション (第1報) -実験装置および玉公転挙動とロストモーションの測定結果-, 精密工学会誌, 76, 12, pp.1371-1376, (2011)
- 2) 杉江弘, 岩崎隆至, 中川秀夫, 幸田盛堂: 工作機械における漸増型ロストモーションのモデル化と補償5, システム制御情報学会論文誌, 14, 3, pp.117-123, (2001)
- 3) 松下哲也, 沖忠洋, 松原厚: テーブルチルト形5軸制御工作機械によるテーパコーン加工精度, 精密工学会誌, 74, 6, pp.632-636, (2008)
- 4) 内海敬三, 小杉達寛, 齋藤明德, 堤正臣, 5軸制御マシニングセンタの静的精度測定方法(基準球と変位計を用いた測定方法), 日本機械学会論文集 (C編), 72, 719, pp.2293-2298, (2006)
- 5) S. Weikert: R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 53, 1, pp.429-432, (2004)
- 6) NAS 979, Uniform cutting tests - NAS series, metal cutting equipment specifications, (1969)
- 7) 齋藤明德, 堤正臣, 牛久健太郎: 5軸制御マシニングセンタのキャリブレーション方法に関する研究(第2報) -同時3軸制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定-, 精密工学会誌, 69, 2, pp.268-273, (2003)

(2015.9.30受付)

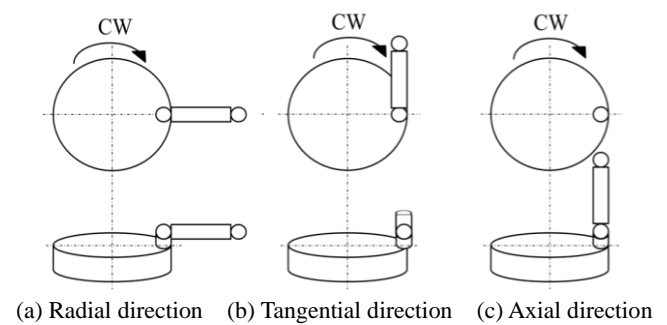


Fig. 12 Measurement method

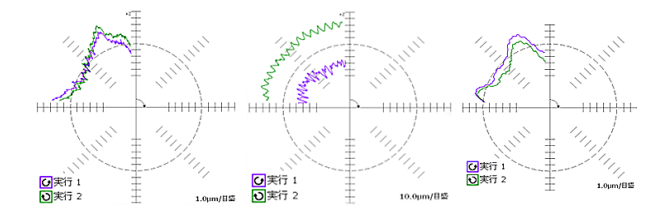


Fig. 13 Result of measurement