旋削加工における加工精度の解析*

高 田 祥 三** 小 尾 誠*** 佐 田 登 志 夫†

Analysis of Geometrical Error of Workpiece in Turning

Shozo TAKATA, Makoto OBI, Toshio SATA

The geometrical error of the workpiece in turning operation is analysed experimentally in this paper. The experiment reveals that nearly a half of the error is due to thermal expansion of the tool tip and the holder and that the rest comes from the thermal expansion of the workpiece, the deflection of the workpiece and the tool post, the geometrical error of the machine tool and the tool wear. Each error component can be obtained quantitatively by the measurements of displacement of the tool, workpiece and tool post during cutting. Cutting experiments show that the thermal expansion of the tool and the deflection of the workpiece become large with the increase of the depth of cut and feed, while they decrease with the increase of cutting speed. Use of cutting fluid restrains thermal expansion of the tool and workpiece, leading to higher accuracy of the workpiece.

1. ま え が き

切削作業における主要な課題は、加工能率の向上と工作精度の維持とにある。これまでの研究^{1)~4)}によっても、工具の熱変位、工作物の熱変位および切削抵抗による変位等の工作精度への影響はそれぞれ個別的には明らかにされてきている。しかし、加工誤差は、加工の過程において種々の要因が複雑にからみあって作用した結果生ずるものである。したがって、これらの要因を個別的に扱っていたのでは、工作精度の問題の全体をとらえることはできない。要因間の関係を考慮して、総合的に把握しなければならない。すなわち、工作精度というものを、工作機械全体を含んだ精度システムの問題としてとらえ、システムの入力と出力、すなわち、加工誤差を生む種々の要因と最終的な工作物の誤差の関係を明らかにしていかなければならない。

本研究ではその手はじめとして、旋削加工における工作精度の問題を扱う。その中でも特に外丸削りにおける工作物径の寸法変化と、その主要原因と考えられる工作機械の幾何精度、切削抵抗による変位、工具および工作物の熱変位について検討し、それによって生ずる加工誤差を解析する。特に、実際の切削過程において各原因別の誤差を分離測定することによって、各原因と最終的な加工誤差との関係を明らかにすることを試みる。

2. 旋削加工における加工誤差の原因

切削加工において、加工物の寸法および形状を決定するものは、各切削点における工具刃先と工作物の相対的位置関係および工作物の熱変位である。旋盤においては、工作物と工具の関係は図1に示すような位置関係をもって定められている。すなわち、工作物→主軸台、心押台→ベッド→往復台→工具台→工具という経路を形成しており、この経路の各所に種々の要因が作用する結果、経路内の幾何学的関係が狂うことによって加工誤差が生ずる。

誤差をひきおこす原因と、それによって生ずる各種の誤差の関係を明らかにしたのが図2である。図の左側には加工誤差をひきおこす力および熱の発生原因を、真中にはそれが機械に作用した場合に起こる加工誤差の直接的な要因を、そして、一番右側にはその結果工作物に生ずる各種の加工誤差を示してある。力および熱の最大の発生源は、切削過程における切削抵抗と切削熱とであるが、駆動機構、外部環境によるものも相当ある。これら

図1 旋盤各部の位相的關係

* 原稿受付 昭和48年10月24日。昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和47年10月31日)にて発表。

** 学生会員 東京大学工学部(東京都文京区本郷7-3-1)

*** 正会員 山梨大学工学部(甲府市武田4-4-37)

† 正会員 東京大学工学部

図2 旋削加工における加工誤差とその原因

図3 背分力荷重による工作物の荷重点における変位

の原因による力および熱は、工作機械、工具、工作物に作用し、各部に力による変位、熱変位を生じさせ各種の加工誤差を生む。力による変位の誤差としては、工具台が変位することによって工具台変位誤差が、また工作物支持系および工作物の変位によって工作物変位誤差が生ずる。熱変位による誤差としては、工具および工作物の熱膨張によって、それぞれ工具熱変位誤差および工作物熱変位誤差を生ずる。また、工作機械送り機構各部の平行度、水平度および位置決めなどの狂いによって幾何誤差を生ずるが、これはおもに工作機械の初期精度としての幾何精度、位置決め精度に左右される。さらに、工具摩耗の進行によって生ずる工具摩耗誤差がある。

本研究では、外丸削りにおける工作物の径の寸法変化に問題をしぼるため、X軸(JIS B 6310による)方向の位

置決めを行った後に発生する誤差を取扱う。そこで、問題となる誤差について個々に検討をしてみる。幾何誤差は、往復台をZ軸方向へ送ったときの工具刃先の描く軌跡と、工作物回転中心との間の平行度としてとらえられる。この平行からのずれが、そのまま工作物の径の変化として工作物にのり、幾何誤差を生ずる。この平行度は、おもにベッドすべり面のねじれと、ベッドすべり面と主軸回転軸および心押軸との間の平行度によって決定される。しかし、これらの関係は工作機械の熱的狀態によって変化するので、切削時の状態において考える必要がある。

力による変位が原因の、工具台変位誤差、工作物変位誤差は、工作物と工具台のZ軸にそった各点でのコンプライアンスと、そこに働く力がわかればその量を推定することができる。ただし、変位はともに往復台に対して考えるものとする。工作物については、図3に、両センタ支持した比較的細長い工作物に、工具台より-X方向に力を加えたときの各着力点における変位の測定結果を示す。この図からわかるように、工作物の変位は、-X方向、すなわち工具から逃げる方向に生じ、心押台側にいくほど大きくなることがわかる。これは、工作物支持剛性が、主軸台側より心押台側の方が小さいためである。心押台側の工作物支持剛性を低下させている原因は、センタ先端と工作物センタ穴との接触部、回転センタのベアリング部、回転センタと心押軸のはめあい部、心押軸と心押台のはめあい部の剛性の低さにある。したがって、工作物変位誤差としては、工作物の径の増加とともに工作物径が主軸台側に向かって減少するテーパを生ずる。

工具台変位誤差は、工具台の各切削抵抗分力に対する切込み方向の変位によって生ずるものである。実験に使用した旋盤の場合、+X方向の変位を正にとれば、主分力、送り分力、背分力各成分に対するコンプライアンスはそれぞれ $-4.7 \times 10^{-5} \text{ mm/kg}$ 、 $-1.7 \times 10^{-5} \text{ mm/kg}$ 、 $4.7 \times 10^{-5} \text{ mm/kg}$ となっている。切削時に働く力は主分力成分がほかよりずっと大きいため、おもに主分力成分による変位がきき、工具台は-X方向に、すなわち工作物の径を小さくする方向に変位する。

切削中に発生する熱は、一部分工具に伝わり、工具は熱膨張し、工具刃先は工作物に対して前に出ていく。工具の熱膨張は切削の進行とともに増加していくため、工具熱変位誤差として、主軸台側に向かって工作物径が減

図4 測定方法

少するテーパーを生ずる。一方、工作物の側にも熱が伝わり、工作物はしだいに膨張していく。したがって、主軸台側の方がより膨張した状態で削られることになるため、冷却後、工作物熱変位誤差として、やはり主軸台側に向かって工作物径の減少するテーパーを生ずる。

工具摩耗によっては、切削の進行とともに工具の長さが減少していくので、工具摩耗誤差としては、逆に主軸台側に向かって工作物径が増加するテーパーを生ずる。

3. 実験装置および実験方法

以上で検討した各種の誤差が、実際の旋削加工において、どのような大きさと割合を持っているのかを調べるために実験を行った。

実験にはNC旋盤を用い、工具はスローアウェイ型片刃および斜剣バイトを、工具チップは超硬合金P20を使用した。工作物には構造用炭素鋼S45Cの丸棒(径80mm, 長さ600mm)を使い、両センタ支持した。

各種誤差を分離して、しかも同時に測定するために、5個の電気マイクロメータを図4に示すように配置した。図のEM1は、工具台の上におかれ、測定子を切削

直後の工作物手前側(工作物の工具台側の面を手前側、それと反対側の面を向こう側と呼ぶことにする)にあて、工具の長さの変化を測定しようとするものである。EM2は往復台の上におかれ、測定子を工具ホルダの先端にあて、工具ホルダの長さの変化を測定しようとするものである。EM3, EM4は、往復台の上におかれ、測定子を切削直後の工作物の手前側および向こう側にあて、切削後の工作物の形状を測定しようとするものである。EM5は、往復台の上におかれ、測定子を工具台にあて、工具台の変位を測定しようとするものである。なお、これらの電気マイクロメータはすべて $-X$ 方向の変位が正になるようにしてある。また、TCは、工具チップの切れ刃と対向した頂点につけられた熱電対であり、工具チップの温度を測定しようとするものである。

これらの測定により、各種誤差および全テーパー量、工具温度は次のようにして求められる。

(1) 幾何誤差 切削前に、主軸回転数、送り、切削時と同じにして測定を行い、 $(EM3+EM4)/2$ の演算より工作物回転中心の位置を求めることによって得られる。結果はデータレコーダに記録しておく。

(2) 工具熱変位誤差 切削中のEM1の測定結果より工具摩耗誤差を差し引いて得られる。さらに、切削中のEM2の測定よりホルダ熱変位を求めることによって、工具熱変位誤差を、ホルダの熱変位による分とチップの熱変位による分とに分離できる。

(3) 工作物変位誤差 切削中の $(EM3+EM4)/2$ より、データレコーダに記録されている切削前の $(EM3+EM4)/2$ を差し引いて、切削によって生じる工作物回転中心の動きを求めることによって得られる。

(4) 工具台変位誤差 切削中のEM5の測定より求められる。

(5) 工具温度 切削中のTCの測定より求められる。

(6) 全テーパー量 切削後にもう一度同じ条件で測定を行い、 $(EM3-EM4)/2$ の演算により求められる。

(7) 工作物熱変位誤差 切削後の $(EM3-EM4)/2$ より、データレコーダに記録しておいた切削中の $(EM3-EM4)/2$ を差引くことにより求められる。

以上の方法を図示したのが図4の下の方である。

被削材: 構造用炭素鋼 S45C, 切込み: 1 mm, 送り:
0.1 mm/rev, 切削速度: 150 m/min, 乾燥切削

図5 測定結果

4. 実験結果およびその検討

4.1 測定結果

はじめに、旋削加工における加工精度の一般的傾向をみるために、上述の方法により求めた各電気マイクロメータの測定、処理結果の一例について説明する。図5は切込み1 mm, 送り0.1 mm/rev, 切削速度150 m/min, 横切れ刃角30°, 乾燥切削の場合の測定結果である。図はすべて、工具台を手前にして上からみたときの各部の動きに一致するようにしてある。

図5の(a),(b)が切削後の工作物の手前側および向こう側形状である。これらは、往復台の動きを基準にしているため、実際の工作物の形状とは完全には一致しないが、ほぼこれが工作物の加工後の形状といえる。これより、工作物には主軸台側に向かって径の減少するテーパがついていることがわかる。

幾何誤差を表す工作物回転中心は、図5の(c)に示すようになっており、この場合の幾何誤差は、約7 μm/100 mmの主軸台側が細くなるテーパとなっている。

図5の(d),(e)は、工具台および工作物回転中心の変位を示している。両者ともに、切削開始と同時に-X方向に変位し、切削終了時にまたもとにもどっていることがわかる。工具台の変位は切削中ほとんど一定であり、その値は1.5 μmと小さい。工作物変位は、心押台側で11 μm、主軸台側で9 μmとなっており、工作物径のテーパにはそれほどきいていない。

図5の(f)が工具の熱変位である。工具は切削開始とともに急速に伸びていき、切削終了時には40 μmもの変位を生ずる。このうち工具ホルダの熱変位は、図5の(g)に示すように29 μmで、差引き分が工具チップの熱変位と考えられる。図5の切削実験における工具摩耗の進行は、先端の切込みの変化分にして1.1 μmであった。これは、工具の熱変形に比べて無視しうるので、EM1の出力をそのまま工具熱変位とみなした。

図5の(h)は工作物の熱変位で、約2 μmの工作物径のテーパ分を生じている。図5の(i)は工具の温度で、熱変位とよく対応した変化を示している。

図5の(j)からわかるように、加工後の工作物の全テーパ量は半径に対して73 μmにもなっている。なお、(c)~(h)の値は工作物径の誤差にすると半径に対してきいてくる値である。

4.2 テーパの原因

加工誤差中の工作物形状誤差としてのテーパについて、その構成要因を測定結果より調べてみた。図6は、切込み1 mm, 送り0.1 mm/rev, 切削速度150 m/min, 横切れ刃角0°の場合について、加工後の工作物のテーパ量を左側に、各要因別に測定した結果を右側に示してある。この図からわかるように、テーパの主な原因は幾何誤差と工具熱変位誤差であり、それぞれ全テーパ量のおよそ41%と50%を占めている。これに対し、工作物熱変位誤差と、工作物変位誤差のうちテーパに寄与する分の割合は小さく、それぞれ全体の約3%と2%となっている。また、工具摩耗誤差はこれらを打消す方向に現

切削条件は図5に同じ
図6 工作物テーパーの原因

れるが、その量は全体の約2%である。この結果、全テーパー量のうち95%の内容が明らかにされたことになる。すなわち、前章で述べた測定方法により、旋削加工外丸削りにおける工作物テーパーの原因はほぼすべて把握できたといえる。

4.3 切削条件の変化による影響

切削条件の変化の工作物テーパー量に対する影響を検討する。なお、値はすべて、長さ300 mm、直径80 mmの工作物を切削したときと等価なものについて比較する。図7に、送りを変化させた場合の全テーパー量と工具熱変位誤差の変化を示す。両者とも送りの増加とともに増加するが、その差、すなわち工具熱変位誤差以外のテーパーの要因はほとんど変化しない。これは、前節図6で示したように、工具熱変位誤差以外のテーパーの要因の大部分が切削条件に影響されない幾何誤差であるためである。したがって、切削条件の変化による工作物テーパー量の変化は、主に工具熱変位誤差の変化によることがわかる。そこで、さらに切削速度および切込みを変化させたときの工具熱変位誤差の変化を図7に示す。この図からわかるように、切込み、送りが増加すると工具熱変位誤差は増加する。その変化の仕方は、送りの場合がほぼ直線的であるのに対し、切込みの場合は、切込みの大きなところでは増加率が頭打ちの傾向になる。一方、切削速度の増加に対しては、工具熱変位誤差は減少する傾向にある。この結果は、送りおよび切込みが増加した場合とは逆に、切削速度が増加すると切削抵抗が減少し、一定距離の切削に要する切削仕事量が少なくてすむこと、および全切削熱のうち工具に分配される熱量の割合が切削速度の増加とともに減少することから理解される。

被削材：構造用炭素鋼 S45C、乾燥切削
図7 切削条件の変化による影響

4.4 切削剤の効果

これまでの実験結果より、加工誤差のうち最大のものは工具熱変位誤差であることが明らかとなった。そこで、切削剤を使用した場合について実験を行い、各部の熱変位がどのように変化するかをみた。図8にこの実験結果を示す。切削条件は図5のものと同一で、切削剤にはエマルジョンタイプのものを使用した。この図から、切削剤を使用しない場合と比較して、工具熱変位が著しく減少しているのがわかる。また、工具熱変位の中でも工具ホルダの熱変位はほとんど認められず、したがって工具熱変位は大部分工具チップのところで起こっていると考えられる。すなわち、切削剤は、切削点において工具に熱が入ってくるのを防ぐことはできないが、それを工具ホルダの方に伝わらないうちに奪い去ってしまうと考えられる。また、切削剤を使用した場合、この実験条件では工作物熱変位は認められなかった。

4.5 各種加工誤差の割合

全加工誤差において、各種加工誤差の占める割合は切削条件によって変化する。これは、切削条件によって、加工誤差の主要因である熱および力、特に切削抵抗の背分力成分が変化するためである。そこで、熱および力について顕著な相違を与える(a)横切れ刃角0°、切削剤無しの場合、(b)横切れ刃角0°、切削剤使用の場合、(c)横切れ刃角30°、切削剤無しの場合の三つについて実験を行い、このときの工作物加工誤差の構成要因を調べた。図9がその結果を示したものである。この図によれば、切削剤無しの場合全加工誤差の50%以上を占めていた工具熱変位誤差は、切削剤を使用すると大きくその割合を減ずる。また、工作物熱変位誤差は、切削剤の使用により認められなくなる。幾何誤差は、いずれの場合も大

被削材：構造用炭素鋼 S45 C，切込み：1 mm，送り：0.1 mm/rev，切削速度：150 m/min，切削剤：エマルジョンタイプ

図 8 切削剤の効果

きさは一定であるが，切削剤を使用するとその相対的な割合は大きなものとなる．一方，工作物変位誤差は，横切れ刃角が 30° になると切削抵抗背分力成分の増加により倍増し，加工誤差中の割合としてもかなり考慮すべきものとなる．しかし，工具台変位誤差は，横切れ刃角 30° の場合，主分力成分による変位に対する背分力成分による変位の相殺分が増加するためにかえって小さくなる．

5. 対 策

これまでにあげた実験結果からわかるように，工作物形状誤差としてのテーパの原因の大部分は，工具熱変位誤差と幾何誤差にある．このうち幾何誤差は，工作機械の調整により改善されうる．ただし，調整は，工作機械の熱変位による幾何誤差の変化を考慮して，熱的定常状態に近いところで行う必要がある．加工誤差中最も大きなものである工具熱変位誤差に対しては，切削剤の使用が非常に有効である．しかし，それでも工具チップの熱変位はあまり減少せず，加工誤差の大きな要因とし

被削材：構造用炭素鋼 S45 C，切込み：1 mm，送り：0.1 mm/rev，切削速度：150 m/min

図 9 各種加工誤差の割合

て残る．また，切削速度を増加させることも，工具熱変位誤差を減少させるのに効果がある．

一方，工作物変位誤差は，おもに工作物径全体を大きくする誤差となっているため，外丸削りの場合は零点の補正により除くことができる．しかし，基本的には，工作物支持系の剛性を高めることが必要である．特に，センタと工作物センタ穴との接触面の問題などは，さらに剛性の高い新しい支持方式の開発を必要とすると考えられる．

6. 結 論

旋削加工における工作精度，中でも外丸削りににおける工作物の径の寸法変化について検討を加えた結果，以下の結論を得た．

- (1) 外丸削りにおける加工誤差は，幾何誤差，工具台変位誤差，工作物変位誤差，工作物熱変位誤差，工具熱変位誤差，工具摩耗誤差の六つに分けることができる．
- (2) これらの各誤差を分離測定し，工作物のテーパ量について検討した結果，テーパの原因をほぼすべて把握することができた．
- (3) 切削条件の変化に対するテーパ量の変化は主に工具熱変位誤差の変化による．工具熱変位誤差は，切込み，送りが増すと増加し，切削速度が増すと減少する．
- (4) 切削剤を使用すると，熱変位誤差を大きく減少させることができ，加工誤差に対する対策として非常に有効なことが明らかとなった．ただし，この場合

にも工具チップの熱変位はあまり変化せず, 加工誤差の主要な要因として残る。

- (5) 各種誤差の全加工誤差に対する割合を検討した結果, 工具熱変位誤差が50%以上で一番大きく, 幾何誤差がこれに次ぐ。横切れ刃角を30°にすると, 工作物変位誤差が著しく増加し, その割合は10%を超える。切削剤を使用すると熱変位誤差が半減するため, 相対的に他の誤差が目立ってくる。

おわりに, 本実験の測定装置に関して, 多くの協力をいただいた東京精密(株)に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) J. B. Bryan, R. W. Clouser & E. R. McClure:

Expansion of a Cutting Tool during Chip Removal, Ann. CIRP, XVI (1968) 49.

- 2) R. G. Watts & E. R. McClure: Thermal Expansion of the Workpiece during Turning, ASME Tech. Paper, 68-WA/PROD-24 (1968).
3) H. Schuler & P. H. Brammertz: Die Werkstückgüte beim Feindrehen und Feinschleifen und ihr Einfluß auf die Fertigungskosten, Industrie-Anzeiger, 95, 5 (1958) 1471.
4) Specifications and Tests of Metal Cutting Machine Tools, Vol. 1, The University of Manchester Institute of Science and Technology (1970) 53.

情 報

プレス工場のロボット化中間報告

中小企業の多いプレス業界は産業用ロボット導入について利用技術や機能の簡単なものを望んでいる。日本金属プレス工業協会と日本産業用ロボット工業界は, 昨年夏から調査に取り組んでいたプレス工場のロボット化に関する「中間報告」を発表した。この報告は両団体の合同委員会が早稲田大学生産研究所などの協力をえてまとめたもので, 本年度は引き続き中間報告で指摘された問題点を掘り下げて分析し, 年度末に最終報告をまとめる段取りとしている。

調査の概要は次のとおりである。

1. 産業用ロボットの利用状況: 「使用中」が8.3%, 「使用を検討中」が14.6%, 「使用したことはあるが現在使っていない」が3.6%, 「検討したが導入しなかった」が24.7%, 「使用を考えていない」が48.8%。半分以上がなんらかの形でロボット導入を考慮しているが, 実際に導入したのは1割強, このうち稼動しているのは80%に達している。企業規模別にみると大手ほど稼動率が高く, 特に資本金50億円以上の企業では導入予定を含めると30%近くが前向きな姿勢を示している。しかし使用を検討したことのないのも大手に多く, 中小では検討したが導入できなかったという所が多い。このことは小規模企業ほど需要は強いと考えられることを示唆している。事実, 専業で資本金3000万円未満の企業では「検討中」と「検討したが導入しなかった」という二つの回答が50%以上に達している。加工種別では, 使用しているのが打抜きせん断加工で12.8%, 曲げ成形で6.9%, 絞りで8.9%, 圧縮で6.2%, 合成で2.1%, その他の工程で12.7%, 使用検討中を含めると導入の可能性は打抜きせん断, 絞り, 曲げ, 成形で高い傾向にある。逆に合成, 圧縮では導入上の問題が多いことを示している。

2. 導入の状況: 実際に動いている企業では他社製のものを導入したところが多く, 導入しても稼動していない企業, 検討している企業では, 自社製と他社製が同

程度, 導入台数は1台というのが多く, 具体的成果を上げるというより, 試験としての導入が多いと考えられる。多数ロボットによるシステムの利用はまだ現実化していない。加工種別では, 導入予定が打抜きせん断で10社(回答数122社, 以下同じ), 曲げ成形で8社, 絞りで8社, 圧縮で5社, 合成で8社, その他で8社となっている。

3. 導入上の問題点: 過去に使用したが現在使っていない, 検討したが導入しなかった, 導入しない——などについてその理由を分析すると, (1) ロボットを使わず省力化, (2) 価格が高い, (3) 対象製品を変更する場合, 段取り時間がかかりすぎる, (4) 現在のロボットでは省力化はできない, (5) ダウンタイムが長い, (6) レイアウト変更が困難, (7) 使いこなす人がいない, (8) どのようなロボットがあるか不明, (9) 周辺機器の価格が高い, (10) 信頼性に不安がある, (11) 周辺機器の開発が技術的に困難, (12) メンテナンスサービスが心配, (13) 導入計画を策定する人がいない, (14) 導入時のライン停止が長すぎる, (15) 社内では機運が高まらない, (16) ソフトウェア開発のメーカが少ない, などの順となっている。いずれも打抜きせん断加工に多い。プレス作業の生産形態を単にワークの供給, 取出しばかりではなく, サブの要素として生ずる作業にも対応できるようなものを要求している。またソフトウェア, 故障対策など利用技術にも課題が多く, サイクルタイム, 可搬重量, 位置決め精度などハードウェアも価格と合わせて考慮する必要がある。一方, 導入の際の経済的影響も少なくなく, 小規模企業を対象とする場合はこの点をまず考慮すべきだ。

4. ロットサイズ上の問題: プレス作業は多品種少量生産の傾向が強く, 全体の62.1%の作業は1日以内で完了, 1~3日が26%で, 3日以内が8割強となっている。また70.8%がロットサイズ2000以下というのも注目される。こうした中にロボットを導入する場合は段取り時間とサイクルタイムの短縮が望まれる。

(服部 敏夫)