工作機械の性能評価技術の動向*

上 野 滋^{*1}

Trend of Machine Tool Performance Evaluation

Shigeru UENO^{*2}

^{*2} Technical Research Institute of JSPMI,
1-1-12 Hachimanchō, Higashikurume-shi, Tokyo, 203 0042 Japan

Key Words: Machine Tool, Measurement, Accuracy, Dynamic Rigidity, Thermal Deformation, Generating Motion, Positioning

1. はじめに

1776年にWattが最初の中ぐり盤を開発して以来、工作機械は生産にかかわる基本的な機械の一つとなり、現在に至っている。その性能の良否が製品の出来具合、コストなどに反映する。したがって、当初よりその性能評価技術が重要な工作機械の周辺技術として認識されてきている。

工作機械の性能評価には大別して2種ある。一つは出荷時の確認検査またはユーザの受入、あるいは定期的な検査のためのもので、いわば所定のパフォーマンスをクリアするかどうかのチェックであり、試験と評価(主として合否判定)がベアとなっている。今一つは解析のためのもので、主として機械の生産者が工作機械の状態を把握するために行うものである。ここでは試験と解析(原因の究明)がベアとなっている。

他の分類座標軸として加工能力を直接評価する方法(実際に加工を行い、そのときの各種性能の直接評価)と間接的に評価(実加工を伴わずに試験を行い、実加工時の性能を推定する)する方法とがあり、コスト、段取り、再現性などの問題から間接評価が好まれる傾向が年々強くなってきている。

出荷検査方法の発端ともいえるものが、1910年に始まるシュレジンガー規格⁽¹⁾である。この規格に始まる工作機械の精度検査が一般に広く知られており、その発展形態が現在のISO規格といってもよい。その変遷は極めて興味のあるもので、簡単に付録として本

展望の巻末に示した。

今一方の機械性能解析のための評価技術にはあまり系統性がなく、どちらかといえば現象別に発展してきている。例えばびり振動に関しては、1900年にTaylorが初めて言及しているが、熱変位に関しては1940年頃まで待たねばならない。本稿では、両者の評価技術のなかで比較的研究者に縁の薄い前者をISO規格を例にとり、概観し、そして研究対象として見た場合の今後の課題をまとめてみたい。

2. 性能評価技術の種類

前述のように性能評価技術には、検査技術と解析技術がある。実はこのような評価技術に関し、規格から見た体系的な議論は過去行われたことはなく、もっぱら現象論としてのみ扱われてきているのが現実である。さて、検査技術としては幾何的精度検査と運動精度検査、特性検査、さらには加工能力検査があり、いくつかはISO規格(ISO 230)に制定されている。

幾何的精度検査: ISO規格(ISO 230-1)には個別の検査内容が示されているが、その基本は絶対的な基準に基づく測定・検査ではなく、あくまでも現場的な、基準となるマスタ(リファレンス)に対する偏差値を検出する行為となっている。

運動精度検査: NC工作機械の発達に伴い、基本的な運動(直進精度、回転精度など)以外にNC独自の評価手段が発展し、位置決め制御性能が問われるものとなっている。一部がISO 230-2、ISO 230-4として制定されている。

特性検査: これは近年要求の高まっている熱変位問題、騒音問題に対応するもので、いずれもISO 230-3、ISO 230-5として国際規格が制定されている。これら

* 原稿受付 2005年2月4日。

^{*1} 正員、(財)機械振興協会技術研究所(〒203-0042 東京都八幡町1-1-12)。

E-mail: ueno@tri.jspmi.or.jp

といささか意味を異にするものとして安全問題もあるが、ここでは触れない。

最後の加工能力に関しては、加工精度のみで、除去加工能力検査に関しては未着手である。以前より一部自動車産業が独自の加工能力評価方法を導入しているが、一般的とはなっておらず、ISOの専門委員会ではこれを取上げるべきかどうかの議論が再び始まる場所である。

以上の一連のISO規格(通則)の現時点(2005年1月)での構成を示すと次のようになる。一部(part 8, 9)はその内容の特殊性から通則とせず、テクニカルレポートとする予定である。

ISO 230-1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions

ISO 230-2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes.

ISO 230-3: Determination of thermal effects

ISO 230-4: Circular tests for numerically controlled machine tools

ISO 230-5: Noise emissions

ISO 230-6: Diagonal displacement test

ISO 230-7: Axes of rotation-methods for specifying and testing

ISO TR 230-8: Determination of vibration levels

ISOTR 230-9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series 230, basic equations

2・1 静的精度評価 2002年のISO/TC 39/SC 2国際会議にてISO 230-1の抜本的改正が決定され、2004年にその内容は工作機械の運動に関する幾何学的精度、工作機械の機能面の幾何学的精度、加工物の計測・評価、検査装置の4項目に分けられることとなった。ここで扱われる精度とは

(1) 直線運動精度(真直度、角度運動精度;ピッチ、ヨー、ロール)

(2) 直角度、角度割出精度、位置決め精度

であり、いずれもその基本的な測定方法は確立されていると見なされている。他方、値の評価方法に関しては製図規格に準拠しているが、未整理のところがいくつかある。また機能面の幾何学的精度とは、例えばテーブル上面の平面度などを示し、工作機械を構成する要素単体の幾何学的な精度の評価を意味する。

加工物(工作機械の性能評価のための加工試験によって得られた工作物の意)の評価に関しては、すでに参考となる他のISO規格(ISOTR 5460-1985)があり、

これを参照することとなっている。この規格は公差の検査に関する測定手段のガイドラインで、ほとんどの幾何精度の定義に関する代表的な測定例が示されている。

さて、運動精度の評価(工作機械の運動にかかわる動作の正確さ)に関して、その評価方法を含めてその意味を考えると以下の3種の評価に帰結する。

(a) 特定の点を基準点とし、その点に対する定められた方向からのアプローチ精度を評価

(b) 特定の線または円を基準とし、その線に対する定められた運動の平行性、あるいは一致性を評価

(c) 特定の面を基準とし、その面に対する定められた運動の一致性を評価

テストバー、あるいはストレートエッジを用いて運動の真直度を測定する方法は(b)に相当する。

ディスクテストから発展した運動制御能力評価も同じく(b)の良い例である。さらに近年二次元座標エンコーダ(KGM)を利用した評価技術も普及が始まっているが、やはり(b)の発展系と位置付けることができる。

同様に位置決めに関する能力の評価も、以下のよう整理できる。

(a) 特定の点に対する任意方向からのアプローチ精度(位置決め能力・運動制御能力)の評価

(b) 特定の線(線分、直線、円)に対する任意方向からのアプローチ精度(運動制御能力)の評価

(c) 特定の面(平面、球面など)に対する任意方向からのアプローチ精度(運動制御能力)の評価

(d) 特定の線・線分の軌跡の創成能力の評価

ISO 230-2に規定されているものは(a)に近いが、任意の方向ではなく、特定運動軸の、その運動方向に関する位置決め能力となっている。基本的には、三次元物体の加工を目的とする工作機械にあつては、任意方向からのアプローチ性能の評価も十分に考えられるものである。特に多軸制御工作機械にあつては、上記の整理に基づく系統的な評価方法の決定が必要である。

精度評価に関連した近年のトピックスは、測定の不確かさに関する議論である。1993年に発行された「計測における不確かさの表現のガイド」(GUM)は工作機械の精度測定にも大きな影響を及ぼした。特にNC工作機械の位置決め精度の測定では、主に用いられているレーザ干渉測長装置が、空気の揺らぎにより現場環境では思ったほど測定結果の信頼性が高くない(古くから一部の計測専門家が指摘はしていた⁽²⁾)ことが明らかになるにつれて、何が正しいか、何が不確か

なのかという議論にまで及んでいる。同様な課題は光電コリメータを用いた角度測定にもある。現場測定の不確かさに関する議論はわが国ではいまだ本格化していないが、重要な研究課題の一つといえる。

2.2 特性評価 この10年、特性評価の中で熱的挙動、特に熱変位に関する規格化の動きが大きく進み、ISO 230-3という規格となって世に現れた。この規格に関しては制定段階から大きく議論があり、何を評価するのか、そして得られた結果をどう生かすか、という疑問が残った。工作機械の製造する立場から見れば要因追求に対してのつめの甘さが大きく、一方ユーザサイドにしてみれば、試験の手間の多さに比較して最終的な成果があいまいである問題を残している。しかしながら、見方を変えれば自動車の10モード燃費に相当するような試験項目もあり、特定条件下の比較データ収集方法と割切る必要もある。

さらに試験装置に対する考え方の問題も未解決である。環境温度の変化により主軸頭とテーブル間の熱変位を評価するに際してのジグの材質選定は、測定結果に大きく影響を及ぼす。絶対的な評価をすべきなのか、あるいは現場的センスでの相対的な挙動を評価すべきかで、この扱いは異なる。

熱変位の測定に関する規格制定の後、振動測定に関する規格制定の動きが起り、現在ドラフトの段階(ISO TR 230-8)にまできている。この審議では、国際会議の参加メンバーも熱変位のときの議論を記憶しており、IS(国際規格)ではなくTR(技術情報)として位置付けることの合意がなされている。熱変位の議論の際に、得られた結果に基づく特性値の評価の持つ本質的なあいまいさ、危うさを十分に認識した教訓といえよう。

Fig. 1 Machine tool noise sources and its relationship

騒音は比較の早くから規格化された特性評価項目である。その背景に作業環境安全の問題がある。しかしながら個別機械の運転条件に関しては未決定であり、今後の問題となっている。中でも加工中の騒音測定に関して現在大きく議論が分かれている。図1は工作機械の騒音源と、その伝達について整理した例⁽⁹⁾であるが、現在のところ系統的な議論には至っていない。

3. 規格制定における測定方法の基本的考え方

以上 ISO 規格の状況を基に性能評価、特に精度評価の現状を概観したが、一言でいえば精度検査と性能評価が混在している状態、といえる。この数年、全体の番号および内容を見直して再整理する意見も現れたが、現在の根強い規格ユーザの存在が、こうした改革のブレーキとなっている。ここで規格制定における測定方法の基本的な考え方を整理してみると次のようになろう。

- (1) 測定方法および使用機器の精度は、上位トレーサブルであること
- (2) 誰でもが容易に入手できる機器による測定であること
- (3) 特許により保護され、その使用权、優先権が主張されていないこと
- (4) できれば自己検定(self calibration)の可能な方式であること
- (5) 複数の検証方法をあらかじめ用意でき、異なる測定方法間の測定結果の一致があること
- (6) できうる限り測定結果が単一要因の反映であること

同様に加工精度試験方法の基本原則を考えてみよう。本来加工による精度試験は、機械の持つ能力が加工物に反映できるような形態を選び、加工、評価することによって工作機械能力の判定をすることが目的である。そこには能力を最大限に発揮できる形状と、評価可能形状とは一致しない、というジレンマがある。特に測定可能か否かは大きな問題であり、さらには測定の段取りが複雑なゆえに表れるべき加工偏差が測定偏差に埋もれる可能性を認識することが重要である。したがって以下の要件を考慮する必要がある。

- 測定段取りの単純化
- 最小測定器数での評価の実現
- 要因分解可能な切削要素の組合せの包含

4. これからの性能評価技術と研究

研究という立場から見れば、検査規格そのものにあ

まり魅力がないのが現実である。しかし見方を変え、限定されたパラメータ評価により機械の持つ能力をどこまで評価できるか、という命題としてとらえ直せば、多くの可能性と魅力が出てくる。

例えば許容値 (Tolerance) の決定方法がある。本来は、機械製造者が一般的な加工要求を満足させるために必要な構造的精度の値として位置付けられ、極めて経験的に定められたこれら許容値が、構造体のシュミレーションとシミュレーションを前提とした検討により定める、あるいは統計的な運動軌跡の持つ特性を評価し、そこから許容値の幅を定める。逆に与えられた部品図面の加工を想定した場合に必要なとされる機械側の運動精度の推定を行い、結果を統計的に整理して許容値を定める等々の方向に変わる可能性も考えられる。

許容値と実態の関係では、図2に示すようなデータがある⁽⁴⁾。このデータは、現場において使用されているマシニングセンタの双方向位置決め精度 A の実態を調査した結果の一部であるが、ISO 10791-4 規格に定められている許容値 (例えばストローク 1000 mm で 32 μm 、1500 mm で 42 μm) の3倍程度にまで精度が劣化していることがわかる。興味深いことは、このように精度が落ちていても現場ではクレームが出ていない、ということで、ここにはオーバスペックの問題と、加工対象が小形で、実質精度はカバーされている、という可能性が考えられる。

また新たな測定システムの開発課題もある。ここ数年の学会の論文集を調べてみると、多くはないが新しい試みの報告がいくつかあることは将来への大きな布石である。類似の課題として測定装置あるいはシステムの持つ固有精度の評価問題がある。この10年ダブルボールバーなど多数の測定装置が開発され、実用に供されているがこれら測定装置そのものの精度評価の研究は非常に少ない⁽⁵⁾。例えば KGM と呼ばれるグリッド式の装置を用いて円弧運動の精度測定を行った結果と、従来からのダブルボールバーを用いた結果のい

ずれがより真値に近いのか、という研究課題は極めて重要と考える。いわば測定結果の互換性、トレーサビリティを問う問題であるからである。

今一つの課題に国際的にユーザオリエンテッドな規格の増加がある。どちらかといえば、わが国の工作機械関連の規格は製造者サイドに立ったものの考え方が中心であった。他方使う立場から見た性能評価も重要であるが、なぜか特定の強力なユーザ (例えば自動車産業) のみに許された行動であった。近年の ISO 規格はユーザサイドからの評価内容がとみに増加してきており、わが国は後追いの傾向が強い。そろそろ使う立場からの評価技術を、真剣に議論すべき時期が来ている。

5. おわりに

工作機械の性能評価に関する技術に関して、主として規格の立場より見た現状と課題について概観した。新たな動きとして学会内に「RC 216 多軸制御工作機械とその利用技術に関する研究分科会；主査東京農工大堤教授」が設置され、活動が始まっている。今後の成果が期待される。

付 録

工作機械性能試験に関する簡単な歴史—1945 年以前—[本付録は文献(6)、(7)によっている]

1914 年以前；1776 年 Watt が横中ぐり盤を開発。このときの加工精度は 6 ペンス硬貨の厚み以下であった。

1823 年；Clement は案内の剛性とそのガタのない組付けが振動と精度に重要なことを指摘。

1830 年頃；定盤とあたりを見ること (すり合せ) による精度チェックが一般的となる (Whitworth)。

1850 年頃；精度は大体 30 μm 程度。そしてこの精度は 1900 年頃まで変わらなかった。

1860 年頃；Whitworth が工作機械の量産を考える。

1880 年；Taylor は速度、送り力、動力、切削効率など切削に関する研究を開始。1900 年に出版。ASME ではすでに 1887 年、1894 年、1898 年にこの分野に関する論文が出ている。

この頃機械の剛性に関する研究もされる。1898 年頃にボール盤の規格ができる。1912 年にはプレーナの静変形に関する記録が出る。

1892 年；B & S がダイヤルゲージとマイクロメータを発明。その結果、現在の検査規格に近いような旋

Fig. 2 Relation between the machine stroke and deviation A

盤用検査法が B & S で作られる。これが最初のメーカ規格。1890 年代にはダイヤルゲージが一般化。

1896 年頃；Chapman(アメリカ)が工作機械の精度検査を考える。当時の検査方法は直定規とマンドレル、そしてすき見の紙であった。その精度限界は 10~15 μm 。

1908 年；水準器が一般化。5 μm /300 mm の精度。

1900 年；中空マンドレルが作られる(曲がりか 25 μm)。

1900 年；Taylor がびびりに言及。

1909 年；旋盤用振動吸収器がアメリカンマシニストに載る。この頃機械の固有振動数は切削振動数より高くあらねばならない、という論文が出る。

水平横中ぐり盤試験に加工精度試験用試験片が導入。許容精度限界もつけられる(Kearns)。この結果は多分 Richards の成果を元としているものと思われる。

1910 年；シュレジンガー教授(独)の学生が試験方法に関する論文を書く。内容はほとんど現在の検査方法と同様のもの。また検査・調整用のフォーマットも入っていた。

さらに許容値(Normal values)も導入。

1913 年；Savin(ロシア)が検査規格を制定。

1915 年；Burley(UK)が工作機械の検査という本を書く。この本では幾何学的精度のみならず、送り、消費動力、切削力などが触れられている。

1921 年(大正 10 年)；大阪での工作機械展覧会にて出品機の精度検査が実施される。

1926 年より 1929 年の間に日本機械学会に設置された工作機械規格制定委員会にて旋盤他 4 機種の規格が制定される。

1927 年；シュレジンガー規格が出版される。その背景に 1910 年代のロシアからの大量の受注あり。

1933 年；Salmon(仏)が実用的試験方法を提唱。切削試験を主とし、静的あるいは組立精度は付加的なものにとらえる。

こうした問題に関して ISA/TC 39 では第二次大戦以前には合意に至らなかった。

ISO の最初の工作機械精度規格は、旋盤用の ISO 1708 であった。

1935 年頃；加工精度試験規格が受け入れられ始める。

1936 年頃；日本機械学会に工作機械規格改定委員会設置。

1940 年から 42 年の間に臨時日本標準規格(JES)として通則および旋盤等の規格制定される。

1941 年頃；熱の影響に関する研究始まる。

1944 年；大阪工業奨励館にて運転試験に関する研究実施。

戦後動剛性に関する研究開始される(Tobias, Tlus-ty)。

文 献

- (1) Schlesinger, G.S., *Testing Machine Tools*, 1st ed., (1932), Machinery Publishing Co.
- (2) 谷村吉久・藤沼憲幾・桜井好正, レーザ干渉計で測長する場合の誤差要因, 精密機械, 43 9 (1977), 112-118.
- (3) Ueno, S., ISO/TC 39/SC 6 7th meeting, N 80 (1997-10).
- (4) Ueno, S. and Matsumaru, S., Evaluation of numerically controlled machine tool positioning accuracy, *Laser Metrology and Machine Performance VI, Proc. 6th LAMDA MAP 2003*, (2003), 485-493.
- (5) 上野滋, ボールバーの測定精度の評価方法に関する研究, 機論, 67-656, C (2001), 300-305.
- (6) Hemingray, C.P., A brief history of machine tool testing prior to 1945, *Proc. Eng.*, 0141-6359/82/010025 (1982).
- (7) 本田巨範・ほか 4 名, 工作機械性能試験方法調査報告書(昭和 59 年度) (1985), 7-14, (財)工作機械技術振興財団.