工作機械検査規格の標準化研究*

Research for Standardization of Acceptance Tests for Machine Tools

堤 正臣**

Masaomi TSUTSUMI

Key words ISO standard, machine tool, geometric test, movement test, five-axis machining centre

1. はじめに

筆者は、1986年から工作機械の受渡し検査規格の日本工業標準 (JIS) と国際標準 (ISO 規格) の開発に深く関わってきた。1985年ごろまでの検査規格は、測定器として3種の神器と呼ばれる直定規、水準器、ダイヤルゲージを使用するものがほとんどで、Schlesinger が1932年に体系付けた試験方法¹⁾に準拠していた。例えば、ISO 230-1 (静的精度試験方法通則)²⁾に規定されている試験は、例外的に光学式測定器による方法としてオートコリメータやレーザ干渉計を用いた測定方法が規定されているものの、直定規、水準器、ダイヤルゲージの三つの測定器を用いて行うことを基本としていた。

それが最近の規格では、これらの測定器だけでなく新しい測定方法や測定器がどんどんと標準として盛り込まれるようになってきた。この変化の兆しは、マシニングセンタの検査規格の開発時 (1990年前後) からのことである。筆者は、幸いにもこの変化の兆しが現れたときから今まで検査規格の開発に関与し、その過程で問題になった課題を解決するための研究を行ってきた。本稿では四半世紀の間に ISO/TC39 (工作機械)/SC2 (受渡し検査) における検査規格の開発にどう関わってきたかを紹介する。

2. ISO 試験方法規格通則改正

2.1 ISO 230-1 への円運動試験方法の採用

ボールバーは、今では工作機械の運動精度試験には欠かせない測定器になっている。このボールバーは、Bryan³⁾が紹介したのが最初で、その後に垣野ら⁴⁾がボールバーを使用した NC 工作機械の運動誤差診断技術確立し、どの国よりも早く日本で普及が進んだ。

この試験方法を ISO 規格に取り込むよう強く主張したのがスイス代表の Knapp であった。彼は、円盤と2次元変位計とを用いた円盤法 (Circular test) と呼ぶ測定方法

を CIRP に発表していた⁵⁾。彼は、ISO230-1²⁾の改正作業を行っている会議の席で資料もないまま円運動測定方法の重要性を訴え、意見交換した結果、翌日の会議までに原案を作ってくれば委員会で検討することが決まった。彼は、翌日会議の席上に手書きの提案書を配布し、一通りの説明の後に承認された。それは現在の ISO230-1:1996 (JIS B 6191)⁶⁾の6.63に記載されているとおりである (図1参照)。

この会議の結果を国内で報告するとともに、日本工作機械工業会の国内対策委員会を通して国内の測定方法および測定器の実情を調査した。その結果、すでに牧野フライス製作所が独自の1次元変位計を用いた円運動精度測定装置 (CMD) (図1 (b) 参照) を開発し使用していたことが判明した。その他、特許も調査し、委員会として牧野フライス製作所の開発した装置を規格に盛り込むことを ISO に提案し、認められた。

その一方で、特許が成立している円盤法⁷⁾ (図1 (c) 参

図1 円弧補間運動測定装置 (ISO 230-1)

*原稿受付 平成24年5月1日

**正会員 東京農工大学大学院生物システム応用科学府 (東京都小金井市中町2-24-16)

図2 二つの位置決めサイクル (ISO 230-2) (図中の○印が目標点. この点で送り停止させ、読みを記録する. 矢印は、目標点への接近の方向を表す.)

照) およびボールバー法⁸⁾ (図1 (d) 参照) に代わる方法として、筆者らは提案された基準バーと一次元変位計による方法の開発に取り組み、3種類の測定器の比較試験を行い、それぞれの特徴を明らかにすることができた⁹⁾. 円盤法は、接触式2次元変位計の測定子を基準円盤の円筒面に当てて連続的に測定するため、円盤と測定子との間に作用する摩擦力によって測定子が引きずられて8~12°の位相遅れを生じることを確認し、その補正方法を発表した¹⁰⁾.

改正されたISO 230-1が1996年に発行されて以降、この3種類の測定方法のうち、実際に普及したのはボールバーだけであった。その後、これら3種類の測定器以外にも、交差格子をもつ2次元エンコーダが登場し、高精度で微小な円弧を測定するとき使用されるようになっていく。

2.2 ISO 230-2における標準測定サイクル

次にISO230-2 (位置決め精度試験方法通則)¹¹⁾の改正のための研究も行った。日本は、もともとISO230-2で規定している統計的な評価方法は、いささか煩雑であるという理由から、JIS独自の評価方法を規定していた。ISO230-2の改正の焦点は、測定値のばらつきを3sから2sに変更することであったが、もう一つ問題が図2に示す測定サイクルに関するものであった。直線サイクルと折返しサイクルの二つの測定サイクルのうち、どちらを選択するかは、受渡し当事者間で決めることになっていた。日本は、一つの測定サイクルだけにすることを提案していた。そのために種々条件を変えてデータを取得し、結果が異なることを証明することになった。その役割を日本が引き受け、筆者の研究室でデータをとった。その結果、二つの測定サイクルのデータは全く異なり、偶然偏差と系統偏差に加えて、ある一定方向に全てのデータがシフトする傾向が現れることから、別途熱影響を考慮するか、または熱影響を極力小さくして測定する必要があることを指摘した¹²⁾。

工作機械メーカーにも協力を仰ぎ、位置決め精度試験のデータの提供を受けた。その結果、位置決め精度の偏差は、ボールねじの発熱と密接に関係しており、暖機運転を行った後に測定を行っても位置によっては冷却されることがあること、また、全ての測定データが一方方向に変化する傾向が支配的で、偶然偏差だけを導くのは難しいことが筆者らの実

験装置だけでないことがわかった。その結果を基にISOは、折返しサイクルを附属書(参考)とし、熱影響が測定データに含まれることを記述することになった。

現在、このISO230-2に従って測定した繰返し精度の結果は、通常の商取引に使われるだけでなく、工作機械の輸出の縛りとなっている。すなわち、工作機械を輸出する場合は、この規格に基づいて測定した繰返し精度の値の大きさによって政府に届けるか、または特定国への輸出には承認が必要になっている。

3. マシニングセンタのISO 検査規格

3.1 新時代の検査規格

ISOの場でマシニングセンタの検査規格の開発が始まったとき、すでにわが国は、横形(1986年)と立て形(1985年)の両方のマシニングセンタの検査規格をJISとして定めていた。この二つの規格は、運転試験、静的精度試験、位置決め精度試験および工作精度試験から構成されており、広く利用されていた。その他に、JISには、バックラッシュ試験、剛性試験、最小設定単位送り試験、ロストモーション試験など、今のISO規格にはない独特の試験項目が規定されていた。

ISOの会議に出席したとき、9部構成(現在は10部構成)のマシニングセンタ規格原案がWD(作業草案)やCD(委員会草案)として審議されている最中であった。その中身は、従来のJISが踏襲してきた静的精度試験だけでなく、位置決め精度、パレットの位置決め精度、円弧補間運動精度、工作精度、輪郭運動性能、工具交換・パレット交換時間、熱変形、騒音放射など多岐にわたり、かつ膨大な数の検査事項が検討されており、JISに規定している項目と大きく異なっていた。

筆者にとっては大変に新鮮な検査事項ばかりに映り、これが決まれば大変なことになると思った。そこで、すぐに工作機械メーカーの技術担当の取締役などに、“このまま放っておくと大変になります”と話をした。ところが、“決まれば、そのようにやりますよ”という返事が返ってくるだけで、標準化に積極的に関わらなければならないというような姿勢は見られなかった。

取締役では重要性を認識してもらえないと判断し、工作機械工業会の了解を得て日本機械学会で講習会を開くことにした¹³⁾。幸いにも多数の参加者を得てISOで開発中のマシニングセンタの検査規格がどのようなものであるかを広く理解してもらい、業界に関心をもってもらうことができた。

ISOで審議中のマシニングセンタ検査規格案には、主軸頭に回転2軸をもつ5軸マシニングセンタの静的精度検査と運動検査とが規定されることになっていた。ISO会議の席上で当時のTC39の議長であるイタリア代表に、“テーブル旋回形の5軸制御マシニングセンタの規格は作らないのか”と尋ねたところ、“それは工作機器の課題であって工作機械の課題ではない”との回答があり、作る考えのないことがわかった。1990年代の初めはそれほど日本で普

図3 提案した同時3軸運動の例 (Y, Z軸を同時制御して円弧補間運動を行わせ、それと同期してA軸を回転させる運動)

及していたわけではなかったが、多くの企業がテーブル旋回形を製造していたことから、いずれISO規格が必要になると思っていた。

3.2 5軸制御マシニングセンタの検査方法の開発

幸いにも大学で5軸制御マシニングセンタの購入予算が付き、通常の3軸制御マシニングセンタの上に傾斜回転テーブルを搭載したものを設備できた。これを機会にこのマシニングセンタを使って研究を始めることにした。当時入学してきた博士後期課程の学生に、発行されて間もない文献¹⁴⁾を渡しボールバーで同時多軸制御運動の研究を行う計画を立ててもらった。当初は、同時4軸制御運動の軌跡から幾何偏差を同定する方法¹⁵⁾の開発に取り組んだが、次の方法として同時3軸制御運動(図3参照)について検討した。その結果、ボールバーで測定した軌跡の偏心量と5軸機に固有の幾何偏差との間に一定の関係が成立することに気づいた。この結果は、将来、5軸機の検査規格として標準化するに値する測定方法であると判断し、国際雑誌に投稿した¹⁶⁾。

研究に着手したとき5軸機の精度測定方法に関する研究を調査したところ、垣野ら¹⁷⁾と坂本ら¹⁸⁾が行っていた。その後、筆者らと同時期にMayerら¹⁹⁾がボールバーを使用した誤差評価方法に関する研究を行っていた。

1999年にNEDOの委託を受けて、日本工作機械工業会が立てた2010年から2025年を見通した工作機械の長期戦略²⁰⁾の中で、今後取り組むべき課題として多軸制御工作機械の性能評価技術を上げた。それを受けて日本工作機械工業会は多軸工作機械のJIS原案作成委員会を2003年に設置し、原案の作成に着手した。

委員会では、5軸機を製造している企業および使用している企業への訪問調査を行った。平行して5軸機に必要な検査内容を検討した。

その結果、既存の規格を改正するのではなく新たに5軸機専用の規格を作成することとし、対象を静的精度試験、位置決め精度試験、補間運動試験および工作精度試験に絞ることにした。

3.3 ISOでの審議

JIS原案がほぼ完成した時点でISOに新作業項目として提案した。これは突然提案したものではなく、正式に提案

図4 同時3軸制御運動の測定方法

する一年以上も前からISO/TC39/SC2の会議で、日本代表委員から非公式に日本は5軸制御マシニングセンタの検査規格を開発しており、ISOに提案する考えのあることを表明してもらっていた。事前の根回しの後に原案を提出し、日本はISO/TC39/SC2/WG3の議長を確保することができた。

翻訳して提出したJIS原案をもとに審議が始まったが、その原案に対して多くの意見が出された。特に5軸機用に新たな規格を制定するとなると軸数が増えるたびに規格を作らなければならないという意見から、現在あるマシニングセンタの検査規格ISO 10791シリーズを改正することが決まった。改正するのは、静的精度、補間運動、および工作精度に関わる試験で、5軸機の試験方法を附属書として追加することになった。

この審議の過程で、特にISO 10791-6(マシニングセンタの補間運動試験)の審議において筆者らがいままで考えていなかったことが指摘され、研究面では得るところが多かった。例えば、テーブル旋回形を中心に研究してきた筆者らの解析は、旋回軸で構成される円筒座標系を基準にして測定し、解析することを基本にしていた。それに対して図4に示すように直交座標系を基準に測定すべきであるとの意見が出され、その違いを明確にすることができた。また、ボールバーで測定を行うのではなくFidia社(イタリア)やIBS社(オランダ)の開発した専用の測定器で測定することが標準とされ、ボールバーによる測定は、測定器だけが記述されることになりそうになったことから、筆者らはR-test装置を入手し、ボールバーとの違いを明確にすることができ、すべての測定で同様の結果が得られることを確かめた。

3.4 標準化のための研究

ところで、5軸制御マシニングセンタの検査規格としてNAS 979がよく知られている。この規格は1969年に制定されたままで改正されることなく今でも使われており、規格としては珍しい長寿規格である。原案作成は、JIS原案

作成委員会の井原副主査が担当し、解析的な研究も行うことになった。その成果はすぐに論文として発表された²¹⁾。その後、ISO に工作精度検査の試験条件を提案すると、新たな試験条件を追加するように要求があり、それが追加された。現在、DIS 段階にあるが、この測定は、工作精度試験としても行う他に、ボールバーを利用して切削しないで測定できることから、ISO/DIS 10791-6 にも試験項目として入れられている。

筆者らは、円すい台の半頂角を 15° とし、円すい台を 10° 傾けてテーブルに取り付けることを考えた。この数字は、NAS 979 の条件には近い値である。それに対してスイスからは、半頂角 45° 、傾斜角 30° にすると、軸の移動範囲が大きくなることから、日本提案よりも得られた結果に軸の誤差が現れやすいとの提案²²⁾があり、この条件も追加することになった。しかし、この方法は、筆者らの最近の研究²³⁾で、確かに直交軸の動きは大きく、直交軸に誤差があれば現れる可能性があるが、逆に旋回軸の誤差がボールバーの感度方向の影響でほとんど軌跡に現れなくなることがわかっている。

4. お わ り に

本稿では、筆者が取り組んできた標準化のための研究をほぼ時系列で紹介した。マシニングセンタの ISO 規格は、第 1 部（静的精度検査：横形）、第 2 部（静的精度検査：立て形）、第 3 部（静的精度：主軸頭交換形）、第 6 部（補間運動精度）、第 7 部（工作精度）が改正されることになっている。その中には約 100 ページもある部もある。10 年に及ぶ 5 軸制御マシニングセンタの標準化に対する取り組みを通して、個人の力ではなく、多くの研究者・技術者が協働する必要があることを改めて認識した。しかも協働する者が全て得るものがあることも重要な要素である。いま、いくつかの新しい規格を作るべく作業が始まっており、日本の積極的な貢献が期待されている。

5 軸制御マシニングセンタ検査規格の ISO 化に当たって、元機械振興協会理事上野滋氏の助言、大阪工業大学井原之敏教授の WG3 の議長として、京都大学茨木創一准教授のセクレタリとしての多大な貢献がそれぞれあったことを付記し、この稿を閉じたい。

参 考 文 献

- 1) G. Schlesinger: Testing Machine Tools (5th ed.), The Machinery Publishing, (1954).
- 2) ISO 230-1: 1996, Test Code for Machine Tools-Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Finishing Conditions.
- 3) J.B. Bryan: A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools Part 1: Principles and Applications, Precision Engineering, **4**, 2 (1982) 61.
- 4) 垣野義昭, 井原之敏, 篠原章翁: DBB 法による NC 工作機械の精度評価法, リアライズ社, (1990).
- 5) W. Knapp and E. Matthias: Test of the Three-dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and Its Relation to the Machine Errors, CIRP Annals, **32**, 1 (1983) 459.

- 6) JIS B 6191, 工作機械—静的精度試験方法及び工作精度試験方法通則, 日本規格協会, (1999).
- 7) W. クナッ: 工作機械の精度の検査のための測定方法及びこの方法を実施するための装置, 公開特許公報 (A), 昭 59-79110, (1984).
- 8) 垣野義昭: NC 工作機械の運動誤差補正方法及び装置, 公開特許公報 (A), 昭 62-79947, (1987).
- 9) 堤正臣, 酒井浩二, 金貞淳: NC 工作機械の円運動の新しい測定方法 (標準化のための代替方法の開発), 日本機械学会論文集 (C), **58**, 545 (1992) 271.
- 10) 堤正臣, 小山田重徳, 全彦燦, 高見保夫, W. Knapp: 2 次元プロローブと基準円板とを用いた円運動測定データの自動補正方法, 精密工学会誌, **61**, 9 (1995) 1307.
- 11) ISO 230-2: 1997, Test Code for Machine Tools-Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning Numerically Controlled Axes.
- 12) 神崎和宏, 堤正臣, 陳亮: 数値制御工作機械の位置決め精度評価方法に関する研究, 日本機械学会論文集 (C), **59**, 560 (1993) 1286.
- 13) 堤正臣: ISO 検査規格の概要と JIS 化, マシニングセンタの ISO 精度検査と今後の対応, 日本機械学会講習会, No. 910-15 (1991).
- 14) 稲崎一郎, 岸浪建史, 坂本重彦, 杉村延広, 竹内芳美, 田中文基, 工作機械の形状創成理論—その基礎と応用—, 養賢堂, (1997).
- 15) 齋藤明徳, 宮川元成, 堤正臣: 同時 4 軸制御による 5 軸制御マシニングセンタの位置偏差および幾何偏差推定方法, 精密工学会誌, **67**, 2 (2001) 306.
- 16) M. Tsutsumi and A. Saito: Identification and Compensation of Systematic Deviations Particular to 5-axis Machining Centers, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **43**, 8 (2003) 771.
- 17) 垣野義昭, 井原之敏, 佐藤浩毅, 大坪寿, NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第 7 報): DBB 法による 5 軸制御工作機械の運動精度の測定, 精密工学会誌, **60**, 5 (1994) 718.
- 18) 坂本重彦, 稲崎一郎, 塚本顕彦, 市来崎哲雄: ボールバーによる五軸マシニングセンタの組立誤差同定法, 日本機械学会論文集 (C), **63**, 605 (1997) 262.
- 19) J.R.R. Mayer, A.Y. Mir and C. Fortin: Calibration of a Five-axis Machine Tool for Position Independent Geometric Error Parameters Using a Telescoping Magnetic Ball Bar, Proceedings of the 33rd International MATADOR Conference, (1999) 275.
- 20) 産業技術戦略策定基盤調査 (分野別技術戦略〈機械産業技術分野 [工作機械分野]〉) 平成 11 年度調査報告書, NEDO-P-9957, 新エネルギー・産業総合技術開発機構, (2000) 64.
- 21) 井原之敏, 田中和也: 多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法 (第 1 報)—主軸旋回形 5 軸 MC でのボールバー測定と実加工との比較, 精密工学会誌, **71**, 12 (2005) 1553.
- 22) S. Bossoni: Geometric and Dynamic Evaluation and Optimization of Machining Centers, Dissertation of ETH Zurich, No. 18382 (2009) 142.
- 23) 加藤教之, 堤正臣, 土橋祐, 佐藤隆太, 弓座大輔, 崔成日, 井原之敏: 円すい台加工を模擬した 5 軸制御マシニングセンタの 3 次元円弧補間運動軌跡の解析, 日本機械学会論文集 (C), **78**, 787 (2012) 964.

堤 正臣

1976 年東京工業大学大学院博士課程満期退学。博士 (工学)。同年東京工業大学工学部助手。1995 年同助教授を経て、1988 年東京農工大学教授 (現在に至る)。主に工作機械の性能評価、数値制御および機械要素に関する研究に従事。