

総合生産システム専門委員会 5軸工作機械の空間精度の測定と 補正技術の検討*

Measurement of Volumetric Accuracy of 5-Axis Machine Tool and Investigation Compensation Technology

井原之敏** 堤 正臣*** 江口 透† 茨木創一†
Yukitoshi IHARA, Masaomi TSUTSUMI, Toru EGUCHI and Soichi IBARAKI

Key words

manufacturing system, five-axis machine tools, motion accuracy, measurement, standard, compensation

1. はじめに

精密工学会総合生産システム（IMS）専門委員会は、1977年の発足以来42年余が経過した由緒ある専門委員会であり、発足以来生産システムのハードウェアとソフトウェアに関する研究に取り組んできている。2019年2月1日現在で個人委員56名、法人委員21団体が参画しており、最近では2012～14年の「サービス生産システム」¹⁾や、2015～17年の「知能化工作機械の利用技術の検討」などについて、小委員会を設立し、精力的に調査研究活動を行ってきた。昨年に「5軸工作機械の空間精度補正技術調査研究」小委員会を設立し、主に新しく制定された5軸工作機械の精度検査規格の運用方法について調査研究を行うことになったので、その詳細を本稿において報告する。

2. 5軸工作機械とは

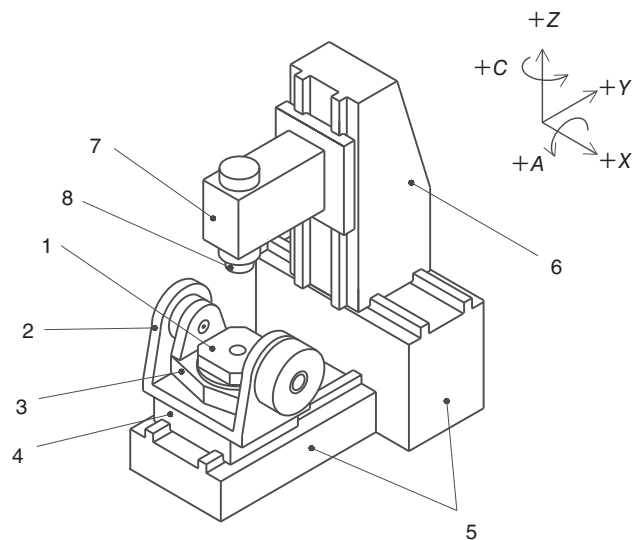
旋盤・フライス盤に代表される工作機械には、主軸と送り軸が存在する。主軸の軸数を増やせば同時に複数の形体を加工することができ、能率が向上する。昔から多軸工作機械と称して主軸を複数備えた機械は存在した。最近の例では、旋盤形複合工作機械にて対向主軸を備えて同時加工できる機械も存在する。しかし、一般的には主軸の多軸化は、汎用性が損なわれる。

本稿で言うところの5軸とは、送り軸を直進3軸に加えて工具姿勢を制御できるように回転2軸を付加した機械のことを指す。これにより、複雑形状部品の加工や、工具の最適姿勢での加工が行えるようになるメリットがある。付加される回転2軸は、主軸側2軸・テーブル側2軸・双方に1軸ずつといった3通りが考えられるが、日本のメーカーが得意とするのは、やや小型の、テーブル側に回転2軸を

付加した機械である（図1）。

一方で、5軸工作機械は「精度が悪い」という定評が存在する。この原因はさまざまであるが、一つの原因として、機械の精度を検査する方法が確立されていなかったことがある。ISOやJISにおいて工作機械の精度検査法が規定されているが、20世紀末において、5軸工作機械の精度検査法が一部を除いてほとんど規定されていなかった。主軸側に回転2軸を備えた機械については静的精度の測定方法が規定され、また、補間精度・工作精度に関してはNAS 979²⁾に円すい台を加工する方法が記載されていたのみである。

そこで、一般社団法人日本工作機械工業会が日本国内のエキスパートを集めて、5軸工作機械の検査はどうあるべきかの議論を始めた。議論は3年間にわたり、日本国内で5軸工作機械を製造している企業で行われている精度検査



記号 1：回転テーブル（C軸）、2：揺りかご（A軸）、
3：トラニオン、4：テーブルサドル（Y軸）、
5：ベッド、6：コラム（X軸）、7：主軸頭（Z軸）、
8：主軸（C1軸）

図1 日本の工作機械メーカーが得意としている立形テーブル旋回形5軸マシニングセンターの図

*原稿受付 令和元年7月22日

**正会員 大阪工業大学工学部機械工学科（大阪市旭区大宮5-16-1）

***名誉会員 東京農工大学名誉教授（東京都小金井市中町2-24-16）

†正会員 広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻（広島県東広島市鏡山1-4-1）

の実態や、5 軸工作機械を用いて機械加工を行っている企業での機械に対する精度検査への期待等の聞き取りを行い、精度検査規格として草案を作成したのが 2006 年初めである。

機械の精度検査に限らず、最近の国内規格 (JIS) は ISO にできる限り準拠するようになってきているので、規格案は ISO/TC39/SC2 にて審議され始めた。

現在は、ISO において新規提案から規格制定までの時間が厳しく管理されているが、当時はそうではなく、2006 年に日本が提案した規格案は各国の関心の的でもあり、審議に十分な時間をかけて、2014 年に横形機械の静的精度 (第 1 部)、補間運動精度 (第 6 部)、工作精度 (第 7 部) について規格が完成した。

JIS 規格化の作業は、少し間を置いて 2016 年に着手し、ISO 規格での誤りを入念にチェックし、2017 年に作業を終了した。2017 年 10 月に、一般社団法人日本機械学会の生産加工・工作機械部門が主催し、2014 年の ISO 規格と、編集作業が完成した JIS 規格の内容についての説明会が開催されている。規格自体は 2018 年に発行された³⁾⁵⁾。

3. 小委員会設立について

3.1 小委員会設立の趣旨

ISO 規格が 2014 年に制定されたことにより、最近の海外の工作機械見本市では、5 軸工作機械の誤差を補正していることを宣伝しているメーカーが出てきている。しかし、残念ながらわが国では JIS 化が遅れたことにも原因があるが、今回制定された規格に記載された試験方法は、普及するには至っていない。

それには、次のような理由が考えられる。

(1) 試験の重要性は理解できるが、規格に記載された内容だけでは、試験方法を十分に理解するのが難しい。

(2) さまざまな測定器が市販されているが、どの測定器を使えばよいのか分からない。

(3) 測定したとしても、そのデータの利用方法、例えば誤差解析をどのようにするのが分からない。

(4) 測定器は、マニュアルを読んですぐに規格に規定された測定ができるようになってきているのか、疑問である。

特に、JIS B 6336-6 に規定された 5 軸マシニングセンタの補間運動精度試験では、専用の測定器を使用することが規定されているが、試験を実施するために測定方法そのものに習熟する必要がある。さらに、試験結果を見て工作機械の良否を判定するだけではなく、その結果を用いて 5 軸工作機械の精度を向上させることも可能になっているが、その方法は広くは知られていない。

そこで、今回設立した小委員会では、工作機械メーカーおよびユーザ、さらには計測器メーカー、ソフトウェアメーカーと研究者とが一緒になって、JIS B 6336-6 の試験方法を正しく理解し、かつその測定結果を活用してわが国の工作機械のさらなる高精度化を目指すことにした。

3.2 小委員会で取り組む予定の内容

計画としては次のような活動を、1 年に 3~4 回実施する予定にしている。

3.2.1 測定器の種類と特徴の理解

現在、JIS B 6336-6 に規定されている 5 軸工作機械用の測定器として、ボールバー、R-test および基準球と変位計の 3 種類が規定されている。この 3 種類の測定器の課題と問題点について明らかにする。

測定器を自作したい場合の情報提供も行う。

3.2.2 測定技術の習得

工作機械の精度試験を行うときに必要な技術について、研究者委員が解説するとともに、実地講習を実施する。

なお、研究者委員と相談の上で、各社を訪問して試験の詳細な手順、NC プログラム作成方法などを指導することも可能とする。

3.2.3 測定結果の有効利用

測定結果から NC のパラメータ補正を行うことによって工作機械の高精度化が可能であるが、パラメータ補正に必要な測定方法、データ処理方法を理解する。

4. 小委員会の活動状況とその内容

本小委員会は 2018 年 5 月の設立以来約 1 年が経過したが、2019 年 5 月現在、学術委員 10 名、企業委員 17 団体で構成されており、いままでに委員会を 3 回実施してきた。活動の内容としては、以下のような項目となる。

4.1 種々の R-test 装置の特徴とその使用方法

4.1.1 装置について

R-test 装置は、3 次元のボールアレイの位置を素早く測定するためにスイスにて考案された⁶⁾。同時期に、NC 装置を製造している FIDIA 社が、5 軸工作機械のパラメータ調整を行うための装置として発表した。スイスは研究用に開発したため特許は申請していないが、FIDIA 社は特許をもっており、許諾を得た IBS 社が現在装置を販売している。

装置自体は、球の中心位置を三つの変位センサで検出するだけあり、誰でも考えつくシステムだといえよう⁷⁾。特許自体はあまりにも包括的なため、現在あまり重要視されていないような状況である。

そこで、

- ・ R-test 装置を自作しようというときのガイダンス
- ・ IBS 社の装置を使用した感想
- ・ 台湾虎尾科技大学が開発したレーザ R-test を使用した感想

が委員会にて紹介された。図 2 は IBS 社の R-test 装置、図 3 は、レーザ R-test 装置を実際に同じ機械に取り付けて測定したときの写真である。両者共、測定装置の供給者が推奨する方法とは異なり、センサーヘッドをテーブル上に取り付けている。こうすることで、得られたデータを座標変換することなく JIS B 6336-6 の BK1 と BK2 に記載されたデータが得られることが確認できた。



図2 IBS社のR-test装置

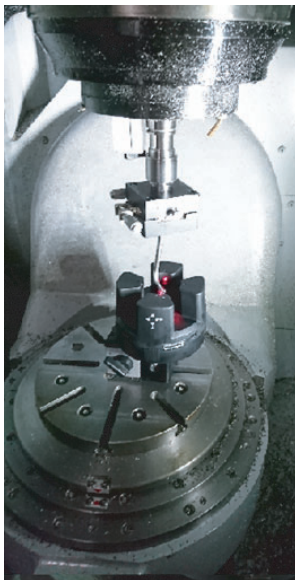


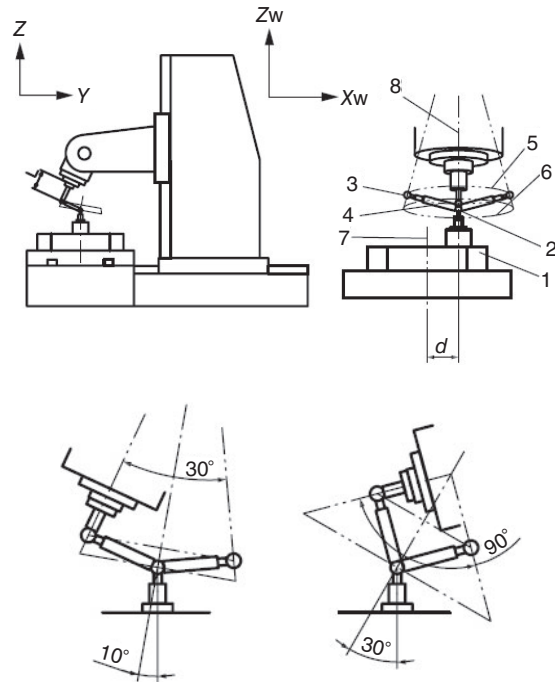
図3 レーザR-test装置

4.1.2 R-testを使用した例

JIS B 6336-6で規定された試験は、同時3軸、同時5軸運動をさせながら連続してデータを取得することを目的としているが、上述のIBS社の装置などは、回転軸を割り出しながら測定する静的な測定を想定したソフトウェアが充実している。

機械の機械精度を定量的に評価し、その補正を行うためには、静的な測定の方が適している。機械の幾何学モデルを利用して、それを行う理論は確立されている⁸⁾。また、測定、誤差原因診断、補正データの生成を行うソフトウェアも開発・販売されている⁹⁾。

また、レーザR-test装置においては、動的測定を行うと、かなりノイズが乗ることが報告されており、ノイズ処



記号 1:回転テーブル, 2:テーブル側球, 3:主軸側球, 4:ボールバー, 5:主軸側球の軌跡, 6:仮想的円すい底面の軌跡, 7:C'軸の軸平均線, 8:プログラムした円すいの中心線

図4 主軸旋回形5軸マシニングセンタでの円すい台ボールバー測定の適用図 (JIS B 6336-6 CK3)

理をするためにかなりのローパスフィルタが挿入されているなどの情報が得られている。

4.2 ボールバーを使用した測定例

ボールバーは、Bryanが提案した装置であり¹⁰⁾、工作機械に円弧補間運動を行わせ、誤差を測定することで機械のさまざまな不具合を見つけることができるため¹¹⁾、現在では工作機械メーカーをはじめ機械の調整には不可欠な装置となっている。

ボールバーも装置自体は単純であり、自作も可能なのだが、ソフトウェアを含めた使い勝手を考えると、Renishaw社の装置を使うのが一般的となっている。ところが、Renishaw社の装置のソフトウェアは、今回制定された同時3軸、同時5軸運動の測定に対応していない。

そこで、ボールバーを使用してどのように測定するか、その際に注意すべき点がどのようなものかを実演を兼ねて体験する試みを行った。また、上述のR-test装置で測定した結果との比較なども報告された。

また、今回の規格改正では、古色蒼然としたNAS 979の円すい台加工を全面的に見直し、条件を厳密に取り決めた方法が、工作精度試験と共にボールバー測定にも規定されているので(図4)、その実施方法なども話題として取り扱った。

4.3 新しい測定方法の提案

NC工作機械は機械の幾何精度と共に、NC装置、サーボ系の性能が問題となる。そこで、NC、サーボ系の性能

がよく表れるような測定について紹介された¹²⁾。

4.4 基準球とタッチセンサを使用した5軸パラメータ補正

冒頭に記したように、5軸工作機械は精度が悪いというのは、回転軸関連の機械のパラメータ調整の必要性が今まで重要視されてこなかったのも一因である。最近、工作機械メーカー、NC装置メーカー、タッチセンサメーカーがパラメータ設定をユーザが簡単に行えるよう、いろいろな測定、補正ソフトウェアを提供している。

また、タッチセンサだけでなく、スキヤニングプローブも最近手頃になってきたので、その紹介も行われた。

4.5 今後の活動予定

ISOの5軸マシニングセンタ関連の規格は、静的精度検査については横形(第1部)のみ改正され、現在は立て形(第2部)の見直しに着手されたところである。日本はやや小型の5軸マシニングセンタを製造しているメーカーが多いため、横形の検査規格より立て形の検査規格がより実用的になると思われる。本小委員会での議論を踏まえて、現在着手されている規格をより良いものに修正する一助となることが期待される。

ISO規格はヨーロッパ主導といわれてきたが、最近では工作機械の精度検査関連でも中国がいろいろな提案をしている。ドイツと並ぶ工作機械先進国である日本が、5軸工作機械に限らず、規格を提案するだけでなく実際に活用することが必要であることを再確認したい。

5. おわりに

本稿では、総合生産システム専門委員会内に最近設立された小委員会における活動について、その概要を紹介した。

本委員会では、委員会メンバーの相互交流を活性化するために、宿泊研修をはじめいろいろな活動を行っています。上述したように、今後も新しい研究分野を模索しながら委員会の活性化を図っていく予定です。本稿にて紹介させていただいた研究分野に興味をお持ちの皆さまの積極的なご参加をお待ちいたしております。

※専門委員会事務局：広島大学 大学院 機械システム工学 専攻 機械設計システム研究室内

電話：082-424-7580

E-mail：ibaraki@hiroshima-u.ac.jp

参考文献

- 1) 貝原俊也, 藤井信忠: “サービス生産システム” および “レジリエントものづくり” への取り組み, 精密工学会誌, **80**, 10 (2014)
- 2) NAS 979: Uniform cutting tests—metal cutting equipment specifications, Aerospace Industries Association of America, (1969) 34-37.
- 3) JIS B 6336-1: マシニングセンター試験条件—第1部: 水平主軸

をもつ機械の幾何精度 (水平Z軸), (2018).

- 4) JIS B 6336-6: マシニングセンター試験条件—第6部: 速度及び補間運動の精度, (2018).
- 5) JIS B 6336-7: マシニングセンター試験条件—第7部: 工作精度, (2018).
- 6) S. Weikert: R-test, a New Device for Accuracy Measurement on Five Axis Machine Tools, Annals of the CIRP, **53**, 1 (2004) 429-432.
- 7) Y. Ihara and Y. Hiramatsu: Design of Motion Accuracy Measurement Device for NC Machine Tools with Three Displacement Sensors, International Journal of Automation Technology, **5**, 6 (2011) 847-854.
- 8) 茨木創一: 工作機械の空間精度—3次元運動誤差の幾何学モデル・補正・測定一, 森北出版 (2017).
- 9) S. Ibaraki, Y. Nagai, H. Otsubo, Y. Sakai, S. Morimoto and Y. Miyazaki: R-Test Analysis Software for Error Calibration of Five-Axis Machine Tools—Application to a Five-Axis Machine Tool with Two Rotary Axes on the Tool Side—, International Journal of Automation Technology, **9**, 4 (2015) 387-395.
- 10) J.B. Bryan: A simple method for testing measuring machines and machine tools, Part 1: Principles and applications, Precision Engineering, **4**, 2 (1982) 61-69.
- 11) JIS B 6190-4: 工作機械試験方法通則—第4部: 数値制御による円運動精度試験, (2008).
- 12) T. Otsuki, H. Sasahara and R. Sato: A method for the evaluation and magnified representation of two-dimensional contouring error, Precision Engineering, **50** (2017) 433-439.



井原之敏

1985年京都大学大学院工学研究科修士課程修了, 京阪電気鉄道(株), 京都大学助手を経て2009年より大阪工業大学工学部機械工学科教授となり現在に至る。工作機械の運動精度測定をはじめとする工作機械・切削加工の研究に従事, 京都大学博士(工学)。



堤正臣

1976年東京工業大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学, 同大学工学部助手・助教授を経て, 1986年東京農工大学助教授, 教授, 理事・副学長, 2018年東京農工大学名誉教授。現在に至る。工作機械の運動精度評価・標準化に関する研究に従事, 博士(工学)。



江口透

1993年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了, 九州工業大学助手, 広島大学助手・助教授を経て, 2007年より広島大学大学院工学研究科准教授となり現在に至る。生産システム, 生産スケジューリングに関する研究に従事, 博士(工学)。



茨木創一

2000年カリフォルニア大学バークレイ校機械工学科でPh.D取得, 2001年から京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻で助教, 准教授, 2016年から広島大学工学研究科機械システム工学専攻教授。工作機械やロボットの3次元運動精度の計測技術などを研究する。