

マシニングセンタ実稼働時の新しい熱変形試験法の開発 Development of a New Test Method on the Thermal Deformation of Machining Centers in the Cutting Process

岡部 眞幸 吉浦 研 太田 和良 光本 高野 (職業能力開発総合大学校)

Masayuki Okabe, Ken Yoshiura, Kazuyoshi Ota and Koya Mitsumoto

2003年に制定された熱変形試験方法通則 (JIS B 6193) は、マシニングセンタの熱変形に及ぼす環境温度変動、主軸回転、直進軸運動の影響を個々に評価できる工業規格である。しかし、実稼働時はこれらの要因が同時に影響し合うため、JISの方法を利用して実稼働時の熱変形挙動を間接的にでも予測するのは難しい状況にある。また、現状では実稼働状態の熱変形挙動を把握する試験法の規定は存在しない。本論文では、特に金型加工のような長時間加工を対象として、マシニングセンタの実稼働時の熱変形挙動を評価するための試験法を新たに開発した結果を報告している。

キーワード：マシニングセンタ、熱変形試験法、高速高精度加工、金型加工技術、長時間加工、NC 工作機械

1. 緒 言

NC 工作機械は、その飛躍的な性能向上にもかかわらず、いまだに熱変形問題をかかえている。工作機械の熱変形は数十ミクロンのオーダーで生じることはごく普通であるため、精密加工では熱変形が加工精度低下の大きな原因となる場合が少なくない。このため、熱変形については工作機械のメーカーのみならずユーザも継続して重視している現状にある。

このような熱変形問題に対処するために、さまざまな熱変形対策方法や制御方法に関する研究がこれまでに実施されてきている^{1)~3)}。しかし、現在もなお、有力な熱変形問題の解決策は存在しないといわれている。それは、NC 工作機械の設置環境が異なることが大きな要因であり、ある環境で効果の上がった対策であっても、他の設置環境では効力を発揮しない場合があるからである。このため、設置環境ごとの NC 工作機械の熱変形挙動を個別に試験し詳細に把握する重要性が高まってきた。

このような状況下において、NC 工作機械の熱変形試験標準として ISO と JIS の試験法^{4),5)}が実施されている。両規格は同等であり、機械に及ぼす環境温度変動誤差 (ETVE, Environmental Temperature Variation Error)、主軸回転の影響、および直進軸運動の影響を単独に評価できる。しかし、NC 工作機械の実稼働時はこれらが複合して影響し、加工時は切削負荷の影響も現れるため、現状の ISO や JIS の試験結果から実稼働時の熱変形挙動を予測するのは難しいのが実情である。また、実稼働状態の熱変形試験法に関しては、著者らが先行研究^{6),7)}で開発に着手し始めているものの、他の運動精度や回転精度等の試験標準と比較すると、NC 工作機械の性能評価分野における開発はなお遅れている状況にある。

そこで、本研究では、NC 工作機械の中でも高精度な

金型製造に活用される立て形マシニングセンタ (以降 MC と略す) を対象として、切削を伴う実稼働時の熱変形を測定し評価するための新たな試験法の開発について、現在までの経過を報告するとともに、試験法の妥当性を実験的に検証した結果について報告する。

2. 実稼働時の熱変形試験法の開発経緯

2.1 実稼働時の熱変形試験法開発上の課題

NC 工作機械の実稼働時の熱変形試験を実施するためには、以下のような問題点を克服する必要があり、その解決策を考案することが新しい熱変形試験法を開発する上での課題となる。

通常、熱変形を測定するためには、工作機械のコラム部や主軸頭などの構造要素に熱変位測定用のセンサを取り付けて監視する方法が最も簡便な測定方法として知られている。しかし、この方法の欠点として、センサの位置が切削点と離れており、距離のオフセットが存在するため、工具刃先と工作物間の相対熱変位を正確に捉えにくいという問題がある。

一方、加工の途中で MC が装備する ATC (Automatic Tool Changer、自動工具交換装置) を利用し、加工に使用中の工具を測定専用のテストバー (基準試験片) に交換して熱変位を測定する方法も考えられる。しかし、測定専用のテストバーを準備する必要があり、このような工具交換によって工具刃先の位置精度が変わる可能性があるため、正確な測定値が得られないものと考えられる。

また、主軸頭側に非接触式の変位センサ (例えば：レーザ変位計等) を取り付け、加工中に工作物と主軸頭間の相対熱変位を測定する方法も考えられる。しかしながら、光学式の変位センサは光路を基準にしているため、XYZ 方向の変位測定が切りくずや切削液の影響を直接

受けること、XY 方向では工作物に対して逐次移動する工具に追従しながら変位を測定する方法が比較的複雑になることが上げられる。その結果、熱変形測定システムが高価になってしまうと考えられる。

2.2 実稼働時の熱変形試験法の提案^{6),7)}

前節の課題を解決するために、本研究では加工を行いながら NC 工作機械の熱変形を測定する方法を新たに考案した。本研究で提案する熱変形試験法は次のような特徴を持っている。

- (a) 加工時に使用するツーリングシステム（ツールホルダと工具）をテストバーの代わりに用いる。これによってテストバーの導入は不要になる。
- (b) 加工時に使用するツールホルダと工具を利用することで、測定の手間や費用を軽減することが可能になり、より加工状態に近い正確な測定値が得られる。
- (c) 渦電流式変位計のような比較的安価な変位センサを利用することができる。
- (d) 工作物の至近位置に熱変形測定装置を設置し、加工の途中で工作物側から測定装置側へ工具を移動することで、ATC 動作を介在させずにテーブル上での加工と測定が可能になる。
- (e) 短時間の過渡的な熱変形を除けば、工作機械の熱変形は一般にゆっくりと生じる現象であるため、長時間加工時には数十分間隔で間欠的に監視すれば良いという熱変形現象の特徴を利用できる。

ここで、項目(d)に付随して、工具の位置が工作物側から測定装置側へ移動することに伴って、主軸頭やサドル等の大質量の可動要素が移動するため、工作機械構造上に静的変形が生じ、熱変形の測定値に影響を及ぼす可能性が考えられる。これについては、いくつかの対処法をとることができる。まず、工具の位置の移動が一定であることから、静的変形は熱変形の測定中は同一量であると仮定し、測定結果において一定量のオフセットを補正すればよい。しかし実際に、小形～中形の MC では、静的変形量が数ミクロン以下のオーダーであることに対して、テーブル・工具間の相対熱変形量は数十ミクロンのオーダーに達し、静的変形量よりも 1 桁大きいことがこれまでの多数の先行研究（例えば文献[1]）で明らかにされている。この場合には、可動要素の移動に伴う静的変形の影響を考慮しなくても構わなくなる。本研究では、事前の予備実験によって後者の対処法を採用することとした。

2.3 新しい熱変形試験法の測定原理および測定装置

前節の指針に基づく新しい熱変形試験法の開発に当たって、ここでは測定原理について述べる。

新しい熱変形試験法の測定原理を図 1 に示す。機械テ

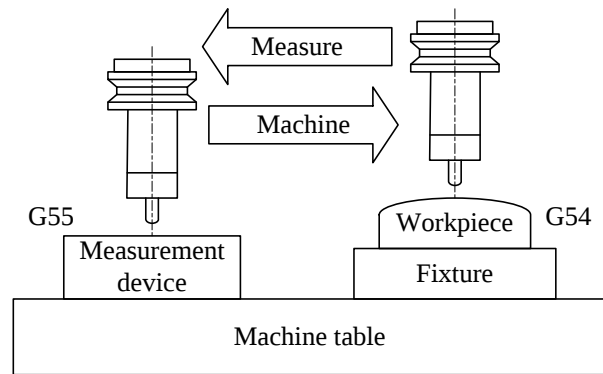


図 1 新しい熱変形試験方法の測定原理

ーブル上の工作物直近に設置した熱変形測定装置により、加工の途中で設定時間ごとに工具を測定装置上に位置決めして熱変形を逐次測定する。測定終了後、工具は工作物側に戻り、再び加工を続け、加工と測定のサイクルを繰り返す。同図では加工対象となる工作物側のワーク座標系に G54 を割り当て、熱変形の逐次測定を行う測定装置側のワーク座標系には G55 を割り当てる。これによって、測定装置をテーブル上の任意の場所に配置した場合でも、測定原点への工具の位置決めを確実にできる。

さらに、本試験法では ISO や JIS に準じた非加工状態の熱変形に加えて、要因が複合した状態の熱変形を測定できるようにする。このため、MC の軸構成と測定装置のセンサ・レイアウトは密接に関係付ける必要がある。

図 2 は熱変形試験の評価対象とした立て形 MC（V33、牧野フライス製作所製）の機械構造と軸構成を示している。同図からわかるように、サドルは X 軸方向の運動を行い、このサドル上を主軸頭が Z 軸方向に移動する構造形式である。また、テーブルは Y 軸方向の運動のみを行

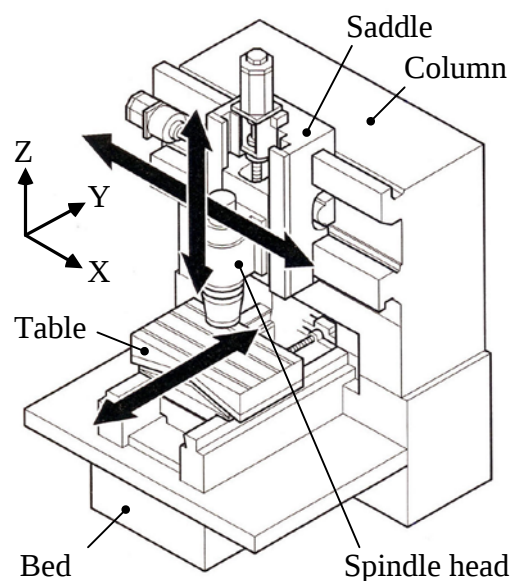


図 2 立て形 MC の機械構造と軸構成

う。機械の基本仕様は、軸ストロークが (X、Y、Z) = (650mm、450mm、350mm)、テーブル作業面寸法が (X、Y) = (750mm、450mm)、主軸回転速度域が $200 \text{ min}^{-1} \sim 20,000 \text{ min}^{-1}$ 、早送り速度が 20m/min、XYZ 軸の最小設定単位が $0.1 \mu\text{m}$ である。特に、主軸の冷却システムは独自のものであり、主軸内部に冷却油を循環させる軸心冷却方式を採用している。この冷却システムは、主軸の高速回転時に主軸軸受部での発熱による主軸の熱膨張と Z 方向熱変位を抑制する効果を持つ。主軸内を循環する冷却油の温度制御は、機外に設置した 2 台のオイルクーラ (MRSD-15A-N-1 および MRCC-07-H-N、ともに関東精機製) を用いて行われる。制御方式はタイマによる冷凍機のオン・オフ制御であり、設定された上限温度と下限温度内で 0.1°C 単位の冷却油温度制御が可能である。この MC では、機械本体の温度と冷却油の温度を比較し、温度差が一定以下となる制御規範が採用されている。

同図の MC の軸構成に合わせて、本研究では図 3 の熱変形測定装置を新たに設計開発した。同図のように、テーブル上に設置する熱変形測定装置には 3 本の渦電流式変位センサを直交配置している。使用した渦電流式変位センサ (GAP-SENSOR PU-05、電子応用製) は切削油を用いる環境下でも使用可能であり、周波数特性が 20kHz、電圧出力が $200 \mu\text{V}/\text{V}$ 、校正時分解能が $0.1 \mu\text{m}$ の基本仕様を持つ。同図のベースを MC のテーブル上に固定し、テーブルー工具間 (テーブルー工具ホルダ間) の相対熱変位 (相対距離) を X、Y、Z 方向について測定する。このとき、X、Y、Z の符号はワーク座標系に一致させる。すなわち、X と Y 方向は、ツールホルダが変位センサに近づく方向 (距離が狭まる方向) がプラスの相対熱変位となり、Z 方向はツールホルダ端面が変位センサから遠ざかる方向 (距離が広がる方向) がプラスの相対熱変位となる。相対熱変位の測定基準面として、X と Y 方向はツールホルダの円筒部外周を利用し、また Z 方向はツールホルダの端面を利用する。さらに、ツールホルダの直径の相違に対応できるようにするため、X と Y 方向の変位センサの取付位置を微調整できるように設計しており、ツールホルダの外径が $50 \pm 20 \text{ mm}$ の範囲であれば使用可能である。

ところで、JIS や ISO が提唱する試験法では、XY 平面をなす測定基準面が Z 軸方向に一定距離を隔てて 2 面含まれており、2 面の変位差から X 軸回り (A 軸に対応) と Y 軸回り (B 軸に対応) の角度変位を評価できるようになっている。そして、既存の規格では測定基準としてツールホルダではなく長尺のテストバー (200~300mm 程度) を用いる。しかし、このような試験法を実稼働中の熱変形試験に適用した場合、ツールホルダとテストバーを ATC で頻繁に交換することが生じ、実際の加工状態の継続性が大きく損なわれるという問題点がある。また、ATC によるツールホルダとテストバーの交換動作の介在は、直前まで加工を続けていた工具刃先の位置精度にば

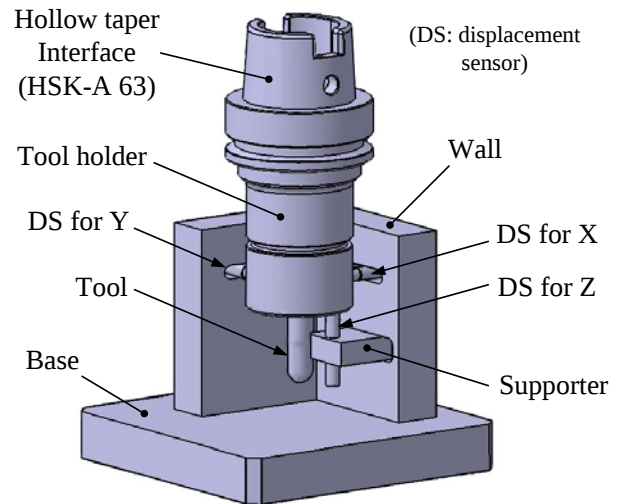


図 3 開発した熱変形測定装置のセンサ・レイアウト

らつきをもたらす原因となることが予測されるため実用的ではないと考えられる。さらに、長尺のテストバーは一般に高速回転には対応していないため、切削条件に応じた回転速度を与えた場合に安全上の問題が生じる場合がある。このため、本試験装置ではツールホルダそのものにテストバーの役割を持たせることとし、実稼働中に工具交換のない状態で熱変形試験を逐次実行できるようにしている。従って、XY の測定基準面は 1 つであるため、X 軸および Y 軸回りの角度変位を評価することはできない。しかし、熱変形に起因する XYZ 方向の刃先位置の変化傾向を、時間の経過、つまり加工の進行とともに評価できるようになるため、本装置のレイアウトでも十分であると考えている。

以上に述べた本試験法と既存規格の試験法の特徴を、試験装置に由来する相違点も含めてまとめると表 1 のようになる。同表から優劣を比較するのではなく、評価可能な項目や所望の試験状態を十分理解した上で試験法を選択し、適切に実施することが肝心である。例えば、JIS と ISO の試験法は MC の非加工状態での熱変形試験であるが、角度変位を評価できる。しかし、加工状態では角度変位は評価できないため、非加工時と加工時の対応関係を把握できない。このような状況は、直角度や平行度のような工具の倒れ (角度変化) が加工結果に及ぼす影響を評価する場合には問題であり、JIS や ISO の方法と今回提案する方法のいずれでも対応できていないため、重要な研究課題である。しかし、金型加工のような自由曲面を加工する場合にはボールエンドミルの刃先位置が曲面形状の絶対的な創成に大きな影響を及ぼすため、加工時に XYZ の並進変位を逐次計測することが重要となる。そこで、金型加工のように角度変位にさほどの重みがないのであれば、本試験法を適用することで非加工時と加工時の工具ー工作物間の相対熱変位 (XYZ の並進変位) を知ることができ、両状態における熱変形の相似性

表 1 熱変形試験法の特徴比較

Items			Test method according to	
			Current research	JIS and ISO
State of MC in progress of the test			1. Air cutting 2. During cutting	1. Air cutting
Evaluable functions	Trans. disp.		in X_1Y_1 and Z	in X_1Y_1 , X_2Y_2 , and Z
	Relative disp.		between tool and work	between test bar and table
	Angular disp.		—	around X and Y axes
	Temperatures		Environment, Inside the MC, Meas. device	Environment, Inside the MC, Meas. device
Measurement objects			1. Tool holders or Test bars 2. Dia. with 32~70mm	1. Test bars only 2. Limited to specific diameter
Reference planes	X-Y		Tool holder cylindrical portion, 1 plane (X_1Y_1)	Test bar cylindrical portion, 2 planes (X_1Y_1 , X_2Y_2)
	Z		Tool holder end face	Test bar end face
No. of sensors	Disp.	X and Y	1 respectively	2 respectively
		Z	1	1
	Temperature		Total of 3	Total of 3
	Total		6 sensors	8 sensors

や相違点、あるいは程度の違いを分析できるようになる。

2.4 開発した熱変形試験システムの構成

本研究では 2 段階で熱変形システムを開発した。第 1 段階の熱変形測定システムは、図 3 に示した熱変形測定装置によって非加工時の熱変形を測定し、JIS と ISO に準拠した測定が可能であることを検証するためのものである。第 1 段階のプロトタイプシステムの構成を図 4 に示す。同図のように測定システムは、試作した熱変形測定装置本体、XYZ 方向用の渦電流式変位センサ（既述の PU-05）と変換器（AEC-5505、電子応用製）、サーミスタ温度計（TR-0106、ティアンドディ製）と温度データロガー（TR-71U、ティアンドディ製）、電圧データロガー（VR-71、ティアンドディ製）、およびデータ収録と処理用の PC からなる。温度については、測定装置のベース温度、MC 主軸頭の表面温度、MC 周囲の環境温度である。測定の時間間隔はデータロガーが内蔵するタイマ機能を利用して設定し、所望時間のデータを取得したのちに結果を PC 側に取り込んでて処理を行った。

この第 1 段階ではまた、市販の熱変形測定システム（DT-10、ナノテックス製）を利用できたため、両者の対応を調べることも行った。この市販の熱変形測定システムは、JIS の ETVE と主軸回転時の熱変形の測定が可能なので、表 1 に示したテストバーを使用する試験法であり、角度変位の評価が可能であった。また変位センサには静電容量式のものを使用している。評価対象とした MC の主軸軸受の転動体がセラミックス製であったため、当初は静電容量式変位センサではコンデンサ回路を形成できずに使用不可ではないかと予想されたが、実測定は可能であった。これは軸受部に潤滑油や不純物が介在するため電氣的な導通が確立されていたと考えられる。

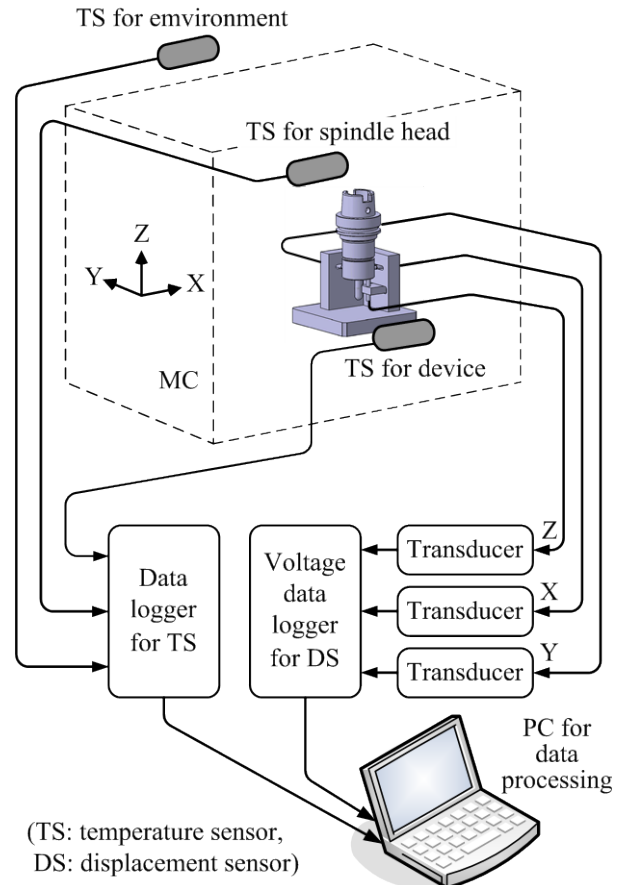


図 4 熱変形測定システムの構成（第 1 段階）

次に、第 2 段階の開発では、実稼働時の熱変形の逐次測定を可能にするために、熱変形測定装置のハードウェアとソフトウェアについて改良を行った。実加工時には加工と測定の両動作の間で工具の位置決めを伴うため、熱変形の測定シーケンスを予め検討しなければならない。

図 5 は、実加工時の熱変形の測定に必要なツールパスの基本構成を示しており、上方から見たツールパスを伴う測定シーケンスの模式図を表している。同図のように一定時間ごとに加工の途中で工具を測定装置上に位置決

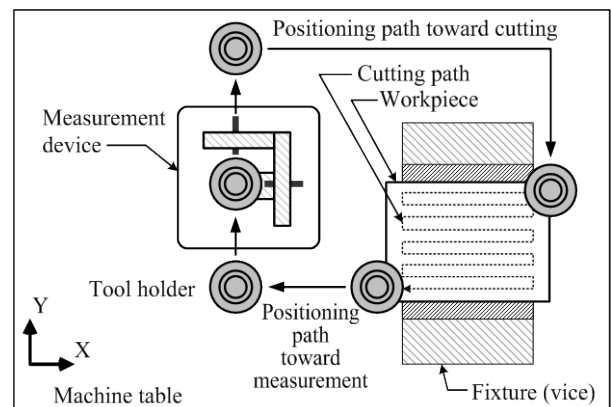


図 5 実稼働時の熱変形測定シーケンス（第 2 段階）

めして熱変形を逐次測定するものである。測定終了後、工具は工作物側に戻り、再び加工を続ける。同図の動作を実現するためには、先の図 4 に示した熱変形測定システムにおいて、加工の途中でツールホルダが測定装置に位置決めされたときに、ホルダの接近を検出して自動的に熱変位データを収録する機能が必要になる。システムの改良においては、図 4 の電圧データロガーを A/D 変換カードに交換して PC で自動計測できるようにした。使用した A/D 変換カードには接点入力機能が備わっており、この機能を活用して 2 線式近接センサ (EV-108M、キーエンス製) を熱変形測定装置に取り付け、工具の位置決め状態を捉えられるようにした。NC プログラム側は一定の時間間隔、あるいは一連のツールパスごとに加工を中断し、MC テーブル上の熱変形測定装置へ位置決めを行うという動作を実行すればよい。熱変形測定装置への位置決めの際に、位置決め後に工具を回転させながら数秒程度 (本研究では 5 秒とした) のドウェルが必要である。このドウェル時間については、熱変形データを採取する際に、変位センサの出力電圧が安定する時間を予め確認することで目安を決定できる。

一方、熱変形測定システム側では、工具の位置決め後に近接センサの動作オン信号をトリガとして、安定後の変位センサ電圧を取り込み、保存するという動作が必要になる。本研究では図 6 のようなデータ収録ソフトウェアの流れを考案し、自動計測プログラムの開発を C++ Builder により行い PC に実装した。同図のように、まずプログラム開始後に測定条件の初期設定を行う。MC 側で NC プログラムを起動して加工が開始すると同時に、熱変形測定システムは、測定装置にツールホルダが接近するまで待ち状態になる。その後、熱変形を測定すべきタイミングが来ると、ツールホルダの熱変形測定装置上への位置決め状態が近接センサによって検出され、熱変形データの収録と保存が実行される。加工途上であれば、ツールホルダが工作物側に再度位置決めされて加工が再開する。同時に、ツールホルダが測定装置上にない間は、自動計測プログラムは再びホルダ待ち状態になる。

本来は NC プログラム内で自動測定用の位置決めが行えるように CAM ソフトウェアとリンクすることで、熱変形測定シーケンス発生マクロの作成が可能になると考える。しかし、現段階ではマニュアル編集により NC プログラムを作成して評価実験を行っている。NC プログラムについては、工作物を加工するメインプログラム、加工パスを繰返し行うサブプログラム、およびツールホルダを測定位置に位置決めするプログラムの 3 つから構成すればよい。作成した NC プログラムを用いて事前に動作確認を行った結果、全体的に問題なくデータ収録を行えることが検証できた。

以上に示したように、第 2 段階における熱変形測定システムの構成は図 4 とさほど大きく変わらないため、ここでは図示を割愛する。なお、温度データの収録につい

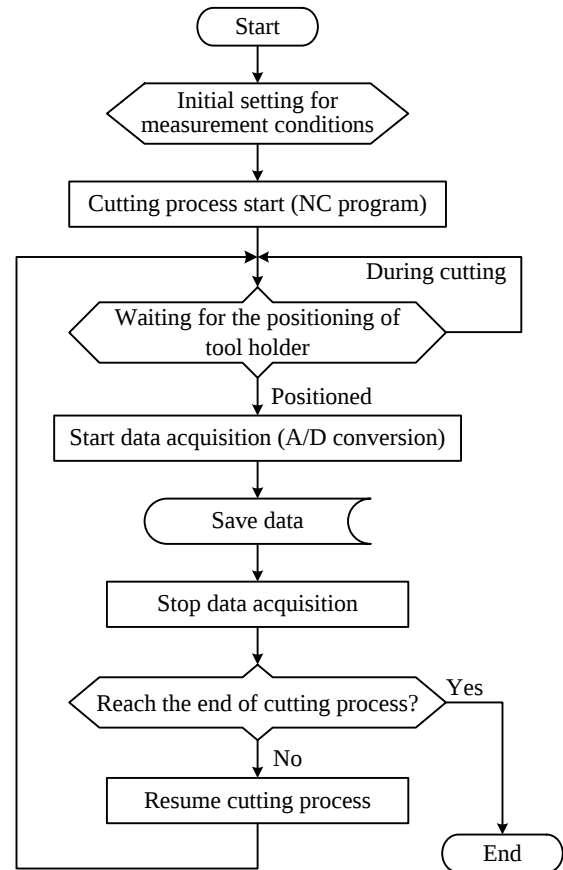


図 6 熱変形測定プログラムの流れ (第 2 段階)

ては、熱変形データの逐次測定間隔とは独立した一定間隔で採取しておく必要があるため、図 4 と同じ構成の温度データロガーによる記録方法を採用した。

3. 非加工時の熱変形試験法の評価

本章でははじめに、開発した熱変形測定システムによって JIS と ISO に規定された試験項目と同等の試験が実施できるかを確認する。その後、非加工時に複数の要因を同時に含む場合の熱変形試験法 (JIS と ISO には規定されていない) を提案するとともに実験的に評価を行い、その妥当性を検討した結果について述べる。

ここで、以降の実験において使用した主要機器は、立て形 MC が V33 (前掲)、ツールホルダが大昭和精機製の HSK-A63-MEGA20N-90 (外径 46mm、基準面からの長さ 90mm)、超硬ボールエンドミルが OSG 製の FX-MG-EBD R5 (2 枚刃、超硬) である。また、熱変形測定装置は MC テーブルの中央に設置した。

3.1 ETVE 試験 (環境温度変動誤差試験) の評価

本試験は工作機械に及ぼす環境温度変化の影響を明らかにし、工作機械の精度試験をしている間に熱が原因で発生する誤差を測定することを目的としている。ここでは、機械の電源を切った状態で、暖機運転せずに試験を

行っている。また、機械の中に余計な発熱が起これないように機内照明を使用しないこととした。さらに、ETVE試験の主旨に基づき、本研究では可能な限り長時間で試験を行うことが望ましいと考えた。実験では24時間と60時間の試験を繰返し行った。なお、本章に述べるすべての試験においては、同一条件の熱変形試験を3回繰返しを行い、試験結果の再現性を評価している。その結果、同一条件の熱変形試験を継続して行う場合には良好な再現性が得られることを別途検証できている⁹⁾。

図7は60時間に渡るETVE試験の結果の一例であり、別途確認したJISとISOの試験結果とほぼ同等の結果となっている。同図を見ると、60時間に渡って環境温度が下がり続けていたことがわかる。その変化は12.5℃にも及んだ。環境温度と同様に主軸頭の温度も約6℃下がっていた。このような温度変化に対して、MCのX軸、Y軸、Z軸の相対熱変位はそれぞれ約5 μm 、13 μm 、および8 μm であった。また、試験開始から6時間までは全軸の熱変位が最も大きく変化しており、この結果からも、特に主軸頭はZ軸のプラス方向に変位し易いことがわかった。測定開始後に環境温度が下がり続けているにもかかわらず、Z軸がプラス方向に熱変位し続けるとともにY軸がマイナス方向に変位し続けており、かつZとYの変化がちょうど逆の関係になっている。このような熱変形は図2の門型コラムが後方に倒れることで生じるものであるため、試験前日までの環境温度変化に起因する熱影響が残っていたものと推定される。しかし、24時間を過ぎると熱影響は完全に消失し、ZとYともに環境温度変化に単純に追従しており、環境温度が下がるにつれて主軸頭は下方に変位している。以上より、試験対象としたMCは、先に示した図2のような本体構造の構成が、環境温度変動に敏感に反応する熱変形特性を有するものと推定される。なお、JISやISOのETVE試験では、測定系の熱膨張補正やセンサ自体の温度補償に関する記述はないが、環境温度変化が比較的大きい場合にはそれらの補正や補償を行うことで、より厳密な評価を行う⁹⁾。

3.2 主軸回転を伴う熱変形試験法の評価

本試験は、主軸の回転によって生じる内部発熱およびその結果生じる温度こう配が工具-工作物間に生じる相対熱変位に及ぼす影響を評価するために行うものである。試験方法は前述のETVE試験とほぼ同様であり、唯一、主軸だけを回転させて実施する点が異なっている。したがって、本試験における実験パラメータとしては、主軸回転速度の大きさ、そして回転と停止を繰り返す回転速度パターンの与え方になる。JISとISOではこれらの実験パラメータを任意に設定してよいことになっており、設定基準については特に示されていない。

一例として、図8はMCの主軸を2,000 min⁻¹で60分

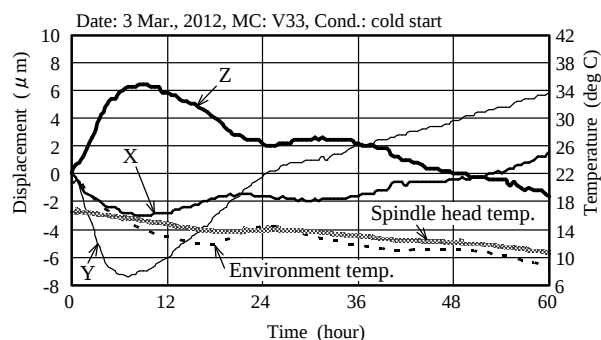


図7 60時間のETVE試験時の熱変形挙動

間運転した後、回転を停止してそのまま60分間放置したときの熱変形挙動である。環境温度の変化が3.5℃であったが、主軸頭の温度変化は1.5℃であった。また、主軸の回転が熱変形に及ぼす影響は、最初の60分間に見ることができる。特に、X軸とZ軸方向の熱変位はY軸方向と比べて大きく現れている。これは、主軸で発生した熱が、主軸頭を介してX軸サドルの案内面に伝わったため、コラム構造の角度変位が現れたものと考えられる。

ところで、この試験方法では、テストバーの代わりにツールホルダを使っているため、測定基準面とした外周部の真円度誤差、端面の傾斜誤差、および振れ誤差が測定データに含まれる可能性がある。本実験において確認したところ、振れや傾斜は一定の偏差を伴って現れたため、これらを補正して測定データから除去が可能であった。また、ツールホルダの真円度は実測により0.5 μm 以内であり、熱変形量よりも相対的に小さいと判断できた。従って、この測定システムは主軸回転を伴う場合の熱変形挙動を問題なく評価できることが確認された。

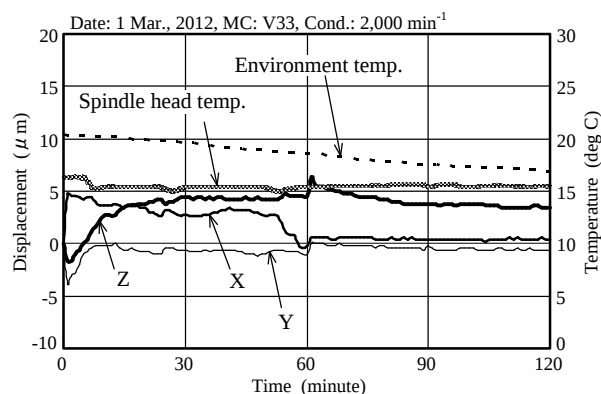


図8 2,000min⁻¹の主軸回転を伴う熱変形試験結果

3.3 直進軸の運動を伴う熱変形試験法の評価

本試験は、直進軸の運動方向について工作物と工具との間で観察される機械構造の変形に及ぼす位置決め系に発生する熱の影響を調べるために行うものである。JISとISOの試験では、2ヶ所の位置における機械軸のドリフト量を測定するだけでなく、暖機運転中の機械スケー

ルの伸び量も測定する。また、この試験は NC 工作機械だけに適用されるものである。

ここで、本研究で行った試験が JIS や ISO と異なる点は、熱変位測定装置が 1 台であることである。このため、熱変形測定装置をスタート点として、例えば主軸頭に往復送り運動を行わせ、移動量の両ストロークエンドで数秒間停止させる（ドウェルを行う）。従って熱変形測定は、主軸頭がスタート点に戻って停止しているときに、ツールホルダの外周と端面で行っている。つまり、JIS では両ストロークエンドでの測定を行っているが、本研究では常に片側での測定になる。本試験の実験パラメータとしては、試験軸の移動量と移動時の切削送り速度である。軸の移動量の目安として、各軸ストロークの 1/3～1/2 が推奨されている。

図 9 は、MC のサドルを片側 200mm のストロークで往復運動させたときの熱変形挙動である。送り軸の方向は X 軸方向であり、ストロークエンドにおけるドウェルを 5 秒とし、切削送り速度は 1200mm/min の例である。前述のように JIS と ISO ではストロークの両端で測定するが、片側のストロークエンドでのみ測定した本試験法であっても、同図のような熱変形挙動が捉えられていることがわかる。特に、XYZ の熱変位データに見られる小刻みな振動の重量は、環境温度変動の影響でないことは同図より明確であり、むしろ X 軸の送り駆動系の運動状態に起因するものと考えられる。また、同図より、X と Y 方向の熱変位は Z 方向の熱変位より大きく現れたため、送り駆動系が熱変形に及ぼす影響を明確に把握できたと考えられる。このように、JIS や ISO と本試験方法の間には、熱変形の取得方法に微妙な相違が存在するものの、同図の結果は既存規格の測定法によって得られた熱変形挙動とほとんど同じであることを別途確認できた⁹⁾。

その一方で、同図の熱変形は環境温度の上昇に追従しているようにも解釈できるが、主軸頭の温度もわずかではあるが上昇しているのは特徴的である。この主軸頭温度の上昇が環境温度変動に追従しているのか、あるいは送り駆動系が往復運動するときに生じる案内面の発熱の影響であるのかは、同図の試験結果だけでは判断できない。これを見極めるには、切削送り速度と移動量を系統的に変化させた実験とその分析が今後必要になる。

3.4 主軸回転と直進軸運動が複合した熱変形試験法の提案と評価

非加工状態で主軸回転と直進軸運動の両要因が複合したときの熱変形試験法は JIS と ISO のいずれにも規定されていない。しかし、複数の要因を同時に含む場合の熱変形試験は実稼働状態に近く、熱変形に及ぼす因子の影響割合や程度を評価するために重要であると考えられる。そこで、本研究では複合的熱変形試験を提案し、次の要領で試験法の妥当性について検証を行った。

測定法としては先の 3.3 節の試験法と同様であるが、

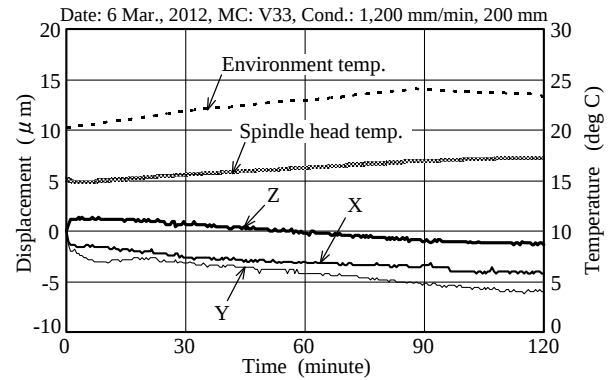


図 9 1,200mm/min の X 軸運動を伴う熱変形試験結果

ここでは X 軸の切削送り運動に加えて主軸も回転している点が異なっている。このとき、予備実験によりツールホルダの外周と端面の振れの影響は、熱変位の測定値に一定幅の変動データとしてオーバーラップしていることが認められた。また、測定面の幾何形状（真円度、平面度）と表面性状の影響は記述のように最大でも 0.5μm 以内であり、熱変位量に比べると相対的に小さいと判断できた。このため、採取した熱変位データからは振れの影響のみを取り除くこととし、フィルタリング処理（移動平均法）を施して熱変形データを得た。

図 10 は複合的熱変形試験の条件として、切削送り速度 1,200mm/min、X 軸方向の片側移動量 200mm、ドウェル時間 5 秒、主軸回転速度 1,440min⁻¹を選定したときの熱変形挙動である。同図のように 120 分の試験時間に渡って環境温度と主軸頭温度はほぼ一定であった。それにもかかわらず、Z 軸方向の熱変位が X 軸方向および Y 軸方向の熱変位よりもはるかに大きく現れている。この Z 軸の熱変位の増大は主として主軸回転の影響であると考えられる。なお、主軸回転速度を 2,000min⁻¹に変更した場合についても確認し、同様の熱変形挙動を観察できた。

ところで、試験対象の MC は X 軸送りがサドル駆動方式（図 2 参照）であるため、熱変形測定装置を設置したテーブルは試験中に静止している。しかしながら、X 軸と Y 軸の両方向の熱変位を見ると比較的小さな変動が重量しているとともに、特に Y 軸方向の熱変位は試験時間

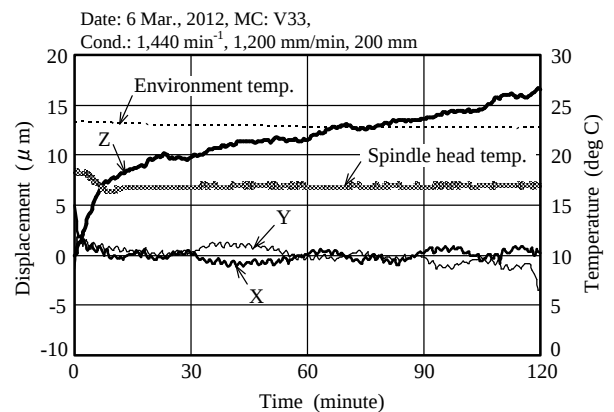


図 10 主軸回転と直進軸運動が複合した場合の熱変形試験結果 (1,440min⁻¹、1,200mm/min)

の経過とともにマイナス方向にドリフトする傾向が見られる。本試験では主軸回転とサドルの直進運動の組み合わせ状態で試験を行ったため、これらの複合した運動に起因して構造の動特性が新たに連成したと考えることもできる。換言すれば、本試験法の実施によって、動的因子と熱的因子の間の影響度合いをある程度識別できるようになることが示唆される。この点については、送り速度と主軸回転速度のパラメータを変えて詳細に追試する必要がある。しかしその一方で、Z 軸の熱変位量のように、主軸側の熱変形が支配的であることも本試験結果からは明確に検証できている。このことから、複合的熱変形試験法は支配的な熱変形の要因を特定可能にすることから、試験方法としての妥当性を持つと考えられる。

本提案とその検証を通して、最も重要なことは、JIS と ISO の既存の個別的試験方法からは知り得なかった新たな熱変形挙動を、簡便な試験法によって評価できるようになったことである。

3.5 本章のまとめ

本研究で試作した熱変形測定装置を用いて JIS と ISO に準拠した 3 種類の熱変形試験を実施した。3.1 節から 3.3 節に示した試験結果から、本研究の熱変形試験法は JIS と ISO の試験法といくつかの違いはあるものの、既存規格の試験内容をカバーすることができ、ほぼ同等の試験結果を得ることができた。また、JIS や ISO に規定されていない主軸回転と直進軸の運動が複合した場合の熱変形試験を行うことによって、既存規格の個別試験内容からは導出の難しいと考えられる熱変形要因とその影響割合をある程度解明できることを明らかにした。本試験法により、NC 工作機械の熱変形挙動をより簡便に評価できるものと考えられる。

4. 加工時の熱変形試験法の評価

本章では、2.4 節に述べた第 2 段階の熱変形試験システムを用いて、実加工状態の熱変形挙動を評価した結果について述べる。

4.1 加工条件および試験方法

本実験では立て形 MC (V33、牧野フライス製作所) を用いて金型材のボールエンドミル加工を行った。工作物材質に NAK55 (長さ 140mm×幅 80 mm×厚さ 25 mm) を選び、中仕上げを想定して切込み 0.2mm、ピックフィード量 0.2mm で平面を加工した。先の図 5 に示したように、工具は X 軸に沿う一方方向切削運動を反復し平面を仕上げる。使用したツーリングシステムは円筒部外径が 46mm のツールホルダ (HSK-A63-MEGA20N-90、大昭和精機製) と TiAlN 系コーティングの R5 超硬ボールエン

ドミル (FX-MG-EBD R5、OSG 製) である。

切削加工条件が熱変形挙動に及ぼす影響を調べるため、2 つのパターンを採用した。1 つは高速加工の切削条件であり、切削速度 225m/min ($7,150\text{min}^{-1}$) と切削送り量 0.11mm/刃 (1,600mm/min) である。他方は低速加工の条件で、切削速度 112m/min ($3,575\text{min}^{-1}$) と切削送り量 0.11mm/刃 (800mm/min) とした。この条件により一面の切削には約 40 分～80 分を要する。このときの切削距離は 64m になる。なお、実加工実験では MC の 2 つのワーク座標系にそれぞれ工作物原点座標 (G54) および熱変形測定位置原点座標 (G55) を設定した。図 11 に実験の様子を示す。同図では工具で工作物を切削中であり、右側のバイスに熱変形測定装置が設置されている。

加工におけるツールパスは工作物の長さ方向に沿って一方方向切削加工を行うもので、NC プログラムでは切削加工時間が約 5 分間になるように 50 回の切削運動を繰返すサブプログラムを呼び出すようにした。この後、ツールホルダは工作物側から熱変形測定装置側に位置決めされ、加工途中の熱変形を逐次測定する。その後、ツールホルダは工作物側の加工開始点に位置決めされて再び加工を行う。こうして、所定の試験時間に渡って工作物の加工と熱変形測定のシーケンスを繰り返す。

本試験法では加工を中断しながら熱変形を逐次測定することになるが、熱変形の測定に要する時間は、ツールホルダの位置決め動作(往復)を含めて約 10 秒であった。この測定時間は加工時間の 5 分に比べると約 3%の割合であり、十分小さいとみなして差支えないものと考えられる。なお、本実験に際しては、測定時間中に熱変形が大きく進行することはなく、また工作物と測定装置間のツールホルダの移動に伴う MC 構造要素の静的変形量は熱変形量より十分小さいという仮定を設けた。この仮定は小形から中形の構造形式の MC について一般的に適用できるものと思われる。

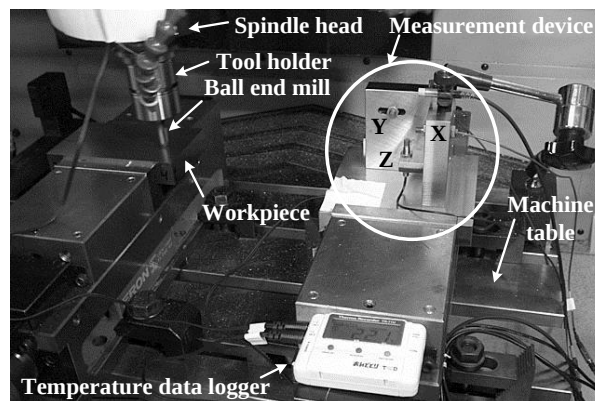


図 11 実加工状態の熱変形試験の様子

4.2 切削加工条件と熱変形挙動の関係

図 12 に回転速度 $7,150\text{min}^{-1}$ 、送り速度 1,600mm/min の

場合の実加工状態の熱変形試験結果を示す。150 分間 (2.5 時間) の実加工が終了後も、環境温度および主軸頭温度はともに 0.5°C の変化しか現れていない。この温度変化に対して、X、Y、Z 軸方向の熱変位はそれぞれ約 $6\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$ 、および $9\mu\text{m}$ となった。

一方、切削条件を半分に落として、回転速度 $3,575\text{min}^{-1}$ 、送り速度 800mm/min で実加工を行った場合の熱変形試験結果を図 13 に示す。切削条件の半減により試験時間が 240 分 (4 時間) に増えている。この試験結果の環境温度と主軸頭温度の変化はそれぞれ 1°C と 0.8°C であり、加工時間が長引いた分だけ、先の高速加工条件よりも温度変化が大きい。これらの温度変化に対する X、Y、Z 軸方向の熱変位はそれぞれ約 $4.4\mu\text{m}$ 、 $4.7\mu\text{m}$ 、および $4.6\mu\text{m}$ となり、先の図 12 の場合よりも小さくなった。

これらの熱変形特性については次のように推定できる。図 13 では加工条件を半分にしたことにより、MC の主軸頭の Z 軸方向の熱変位が約半分になっている。このことから、試験対象とした MC は発熱に対して興味深い熱変形特性を持っているといえ、高速加工条件において短時間で加工を行う場合には発熱が大きいために熱変形は大きくなるが、加工条件を調整して発熱を抑制するようにすれば熱変形を小さく留められる可能性を持つと判断できる。関連して、図 12 と図 13 の特性差の要因として、次節の熱変形特性の評価から、 $10,000\text{min}^{-1}$ 以下では MC の軸芯冷却機能が効果を発揮しにくいのではないかとすることも考えられる。これについては、冷却油の温度、流速、および流量特性と主軸回転速度の関係を追跡調査する必要がある。なお、長時間加工時には工具の磨耗についても検討する必要がある。

4.3 非加工時と実加工時の熱変形挙動の比較

以上に述べた新しい熱変形試験法の開発により、非加工時と実加工時の熱変形挙動を比較検討できるようになる。そこで、本節では 3.4 節に述べた非加工時の主軸回転と直進軸運動が複合した場合の熱変形試験法で得られる結果と、その試験条件と同一の加工条件で実加工を行った時の熱変形挙動の比較を行うこととする。

非加工時と実加工時の試験条件において、切削速度 500m/min ($16,000\text{min}^{-1}$) と切削送り速度 0.05mm/刃 ($1,600\text{mm/min}$) を統一した熱変形試験を行った。使用した MC、ツーリングシステム、および工作物は前節までと同一のものである。ただし、非加工時の試験時間は 120 分 (2 時間) とし、実加工時の試験時間は 150 分 (2.5 時間) とした。しかし、本節では両者の比較評価に主眼を置くため、試験結果の図において横軸と縦軸のスケールを統一して示すこととした。

非加工時の試験結果を図 14 に、実加工時の試験結果を図 15 に示す。熱変形試験を実施した季節の相違により、環境温度に約 10°C の相違があるが、試験時間における環境温度の変化は非加工時が 1.4°C 、実加工時が 1.0°C であ

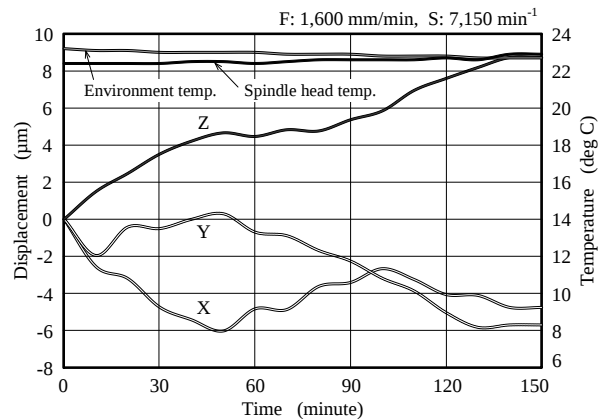


図 12 高速加工時の熱変形試験結果
($1,600\text{mm/min}$ 、 $7,150\text{min}^{-1}$)

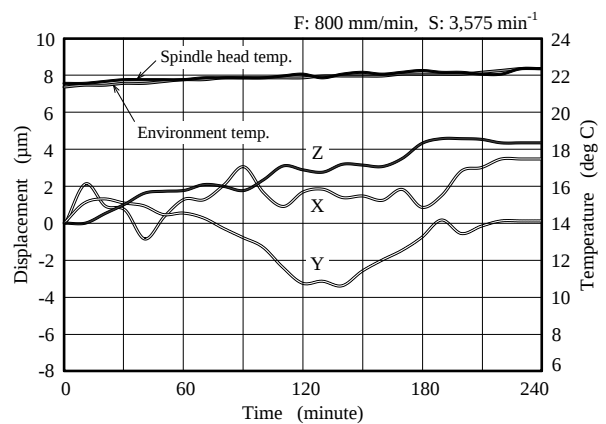


図 13 低速加工時の熱変形試験結果
(800mm/min 、 $3,575\text{min}^{-1}$)

り、さほど大きな相違はないと判断できる。同様に、主軸頭温度の変化についても、非加工時が 1.6°C 、実加工時が 2.2°C であり、さほどの有意差は見られない。

図 14 から、非加工時は X、Y、Z 軸方向の熱変位はともに実加工時より小さいこと、それらはまた環境温度の変化または主軸の発熱状態に追従すること、そして Z 軸方向の熱変位が試験開始後に一旦約 $3\mu\text{m}$ の極大値をとり、その後は急激に減少した後、徐々に増加することが確認できる。試験終了時は各変位ともに $2\mu\text{m}$ 以下となっている。このような Z 軸方向熱変位の特徴的な変化の要因として、測定対象とした MC では主軸の高速回転に伴ってこの機械独自の軸芯冷却方法 (主軸内部に冷却油を循環させて発熱を強制的に奪う冷却方法、製造メーカーの特許) の効果が有効に現れたものと考えられる。

他方、実加工状態の試験結果を示す図 15 を見ると、Z 軸方向の熱変位は MC の主軸冷却機能の効果もあるためか $4.6\mu\text{m}$ に留まっている。しかし、実加工時には X 軸の切削送りだけでなく、工具が切削後に戻るときの X 軸の早送りと、Y 軸方向へのピックフィード時の早送りが含まれてくる。このため、同図では X と Y 軸方向の熱変位が非加工時よりも大きく表れたものと考えられ、X 軸方

向が $3.7\mu\text{m}$ 、Y 軸方向が $9.9\mu\text{m}$ となった。また、実加工時に限った評価を行えば、先の図 12 の切削条件よりも図 15 では切削速度が約 2 倍になっているにもかかわらず、Z 軸方向の熱変位が約半分となっている。その理由として、試験対象の MC では主軸冷却装置の制御特性が高速運転時と低速運転時で異なることが考えられる。またこの結果から、試験対象とした MC は $10,000\text{min}^{-1}$ を超えるような高速運転域のほうが熱変形の影響がより現れにくいと推定できる。

このように、実切削時に早送りが介在する場合の熱変形挙動の評価は、非加工時の熱変形挙動からは予測し得ないものであり、これまでに熱変形試験法として規定されていないが、試験法としての付加価値が十分高いものと考えられる。また、実加工時の総加工時間に占める早送りと切削送りの時間割合は、一般に加工対象とする工作物形状の複雑さや加工様式、ツールパスの生成アルゴリズム等に応じて変動するものである。それらの各種の加工状況においては、実加工時の熱変形挙動を詳細に把握し、加工精度の向上をはかる必要性が高いと考えられる。本研究で開発した新しい熱変形試験法は、この目的に向けて寄与できる有力なツールになるものと思われる。

5. 結 言

本研究では、実稼働時の新しい試験法として、非加工状態ならびに実加工状態の複合的熱変形試験法を開発し、試験法の適用性を実験的に検討した。その結果、現状の JIS や ISO がカバーしていない実稼働条件下で熱変形試験を行うこと、かつ試験法としての妥当性と意義を有することを現時点までに明らかにできた。今後は、本論文で指摘した研究課題等について検討を進めたい。

最後に、本研究の遂行に当たり、熱変形測定システムの開発とその実験検証に熱心に協力された本学研究課程修士生ディマス・トゥルヤント君に感謝の意を表します。

参考文献

1. 竹内芳美, 大久保信行, 佐田登志夫: 精密機械, Vol. 42, No. 11, pp. 1043-1048 (1976).
2. 田辺郁男, 高田孝次, 小川正弘, 山田泰弘: 長岡技術科学大学紀要, Vol. 13, pp. 13-18 (1991).
3. 社本英二, 樋野 励, 富江竜哉, 松原陽介, 森脇俊道: 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 69, No. 686, pp. 2775-2782 (2003).
4. ISO 230-3: 2001, *Test Code for Machine Tools — Part 3: Determination of Thermal Effects*, 2001.
5. 日本規格協会: JIS B 6193: 2003, 工作機械 — 熱変形試験方法通則, 2003.

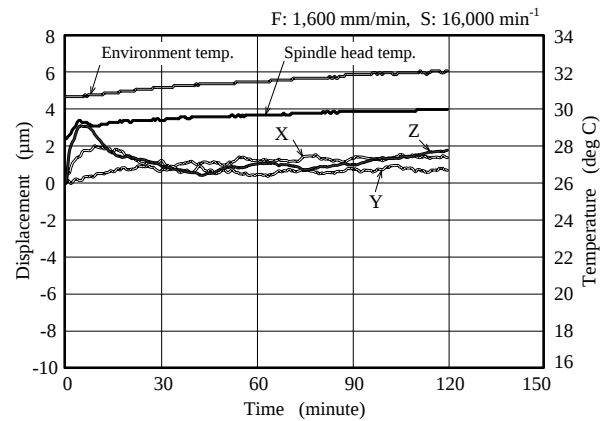


図 14 非加工時の複合的熱変形試験結果
($1,600\text{mm/min}$, $16,000\text{min}^{-1}$)

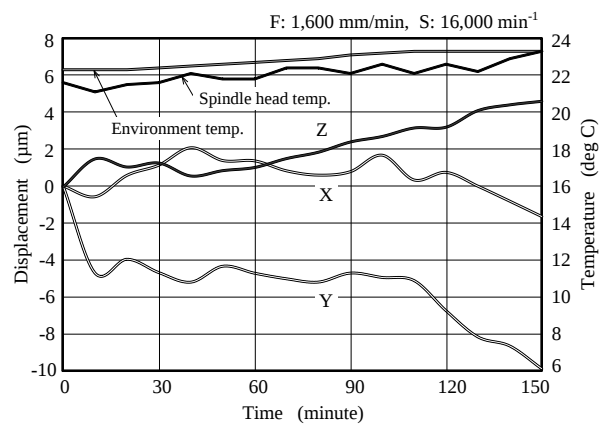


図 15 実加工時の熱変形試験結果
($1,600\text{mm/min}$, $16,000\text{min}^{-1}$)

6. 岡部眞幸, ディマス・トゥルヤント: 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 講演 No. K32, pp. 877-878 (2012).
7. Masayuki OKABE and DIMAS Trulyanto: Proceedings of the 10th International Conference on Progress of Machining Technology (ICPMT2012), pp. 137-140 (2012).
8. 齊 暁勇, 清水伸二, 今井 登: 精密工学会誌, Vol. 65, No. 3, pp. 396-400 (1999).
9. 清水伸二, 澤田憲成, 矢生晋介, 坂本治久: 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 79, No. 808, pp. 4603-4612 (2013).

(原稿受付 2014/01/15、受理 2014/03/26)

*岡部眞幸, 博士 (工学)

職業能力開発総合大学校

能力開発院 基盤ものづくり系 NC・CAM ユニット

〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

E-mail: m-okabe@uitech.ac.jp

Masayuki Okabe, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035

*吉浦 研,

職業能力開発総合大学校

能力開発院 基盤ものづくり系 NC・CAM ユニット

〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

E-mail: yoshiura@uitech.ac.jp

Ken Yoshiura, Polytechnic University, 2-32-1
Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*太田和良, 修士 (工学)

職業能力開発総合大学校

能力開発院 基盤ものづくり系 NC・CAM ユニット

〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

E-mail: ota@uitech.ac.jp

Kazuyoshi Ota, Polytechnic University, 2-32-1
Ogawa-Nishi-Machi, Kodaira, Tokyo 187-0035

*光本高野,

職業能力開発総合大学校, 長期課程 機械システム工学科

〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1

E-mail: s22041@uitech.ac.jp

Koya Mitsui moto, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035

