

令和3年度 博士論文

少数位置の温度測定による
CNC 旋盤熱変形予測式の
効率的な決定方法

金沢大学大学院 自然科学研究科

機械科学専攻

学 籍 番 号 1824032002

氏 名 石野 嘉章

主任指導教員 立矢 宏 教授

提 出 年 月 令和3年10月

【記号表】

本論文で使用する主な記号を以下に示す。

a_i	: 実験定数 [$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$]
a_{ij}	: 偏重回帰係数 [μm]
a_m	: 切片 [μm]
b_j	: 実験定数 [$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$]
C	: 主軸刃物間距離 [μm]
e_k	: 校正係数
k_{ij}	: 係数
n	: 温度測定点数
O	: X - Z 座標系の原点
X	: X - Z 座標系の X 軸方向
y	: 加工径変化幅の推定値 [μm]
Z	: X - Z 座標系の Z 軸方向
ΔC	: 主軸刃物間距離の変化 [μm]
ΔC_h	: 機械可動部による主軸刃物間距離の変化 [μm]
ΔC_w	: 機械非可動部による主軸刃物間距離の変化 [μm]
ΔD	: 加工径変化 [μm]
ΔT_b	: 刃物台部の温度変化 [$^\circ\text{C}$]
ΔT_h	: 主軸部の温度変化 [$^\circ\text{C}$]
ΔT_{ref}	: 参照温の温度変化 [$^\circ\text{C}$]
ΔT_w	: 油圧部の温度変化 [$^\circ\text{C}$]
ΔT_i	: 測定点 i の温度変化 [$^\circ\text{C}$]
α	: 係数 [$^\circ\text{C}^{-1}$]

少数位置の温度測定による CNC 旋盤

熱変形予測式の効率的な決定方法

【目次】

第1章	緒論	
1.1	研究の背景と目的	-1-
1.2	従来の研究	-2-
1.3	本論文の構成	-5-
第2章	校正係数による熱変形予測式の補正	
2.1	緒言	-7-
2.2	対象装置	-7-
2.3	切削模擬試験結果を用いた熱変形予測式の決定方法	-9-
2.3.1	切削模擬試験の試験方法と試験結果	-10-
2.3.2	待機試験の実施と機械非可動部の熱変形予測式の決定	-14-
2.3.3	機械可動部の熱変形予測式の決定	-19-
2.3.4	熱変形予測式による予測結果の確認と実切削試験への適用	-22-
2.3.5	一時停止を含む試験条件への適用	-24-
2.3.6	気温変動環境下への適用	-25-
2.3.7	切削油使用環境下への適用	-26-
2.4	校正係数による切削油使用時の熱変形補正方法	-28-
2.4.1	校正係数の導入および決定	-28-
2.4.2	シミュレーションによる検討	-29-
2.5	実切削試験による検討	-31-
2.6	結言	-36-
第3章	実験計画法による広い切削条件に適用可能な校正係数の決定	
3.1	緒言	-37-
3.2	校正係数の決定方法	-38-
3.3	実験計画法による試験条件の決定	-39-
3.4	校正係数の決定	-43-
3.5	実切削試験による熱変形補正と効果の確認	-50-
3.5.1	実験計画法による条件下での熱変形補正の確認	-50-
3.5.2	実験計画法で用いた条件以外での熱変形補正の確認	-52-

3.5.3	従来の方法との熱変形補正の効果の比較	-55-
3.6	結言	-58-
第4章	汎用的な熱変形予測式の決定方法	
4.1	緒言	-59-
4.2	熱変形予測式および温度測定点の決定方法	-59-
4.2.1	汎用的な熱変形予測式の設定	-59-
4.2.2	温度測定点の選出および実験定数の決定結果	-60-
4.2.3	熱変形予測式決定のための試験条件	-61-
4.3	主軸サイズ6インチの旋盤への適用 -XT-6-	-63-
4.3.1	対象装置	-63-
4.3.2	温度測定点の選出および実験定数の決定結果	-65-
4.4	主軸サイズ8インチの旋盤への適用 -XT-8-	-69-
4.4.1	対象装置	-69-
4.4.2	温度測定点の選出および実験定数の決定結果	-70-
4.5	結言	-73-
第5章	因子の変更による熱変形予測式決定の効率化	
5.1	緒言	-75-
5.2	対象装置における補正効果に関する分析と考察	-75-
5.3	実験計画法における因子の変更	-77-
5.3.1	分散分析を用いた因子の寄与率評価と因子の変更	-77-
5.3.2	因子の変更による熱変形予測式の決定と考察	-78-
5.4	結言	-82-
第6章	All pair 法を用いた熱変形予測式の決定	
6.1	緒言	-83-
6.2	All pair 法による試験条件の計画方法	-83-
6.3	All pair 法を用いた試験計画と実施 -XT-6-	-85-
6.3.1	All pair 法を用いた熱変形予測式と実験定数の決定	-85-
6.3.2	補正効果の確認	-87-
6.3.3	All Pair 法を用いた対象装置に対する分析と考察	-89-
6.4	All pair 法を用いた試験計画と実施 -XT-8-	-92-
6.4.1	All pair 法を用いた熱変形予測式と実験定数の決定	-92-
6.4.2	All pair 法を用いた熱変形予測式による補正効果と考察	-94-
6.4.3	All Pair 法を用いた対象装置に対する分析と考察	-96-

6.5 All pair 法におけるさらなる試験数削減の検討	-97-
6.5.1 XT-6 を対象とする試験数削減の検討	-98-
6.5.1.1 因子 C から特定の水準を削減した場合	-98-
6.5.1.2 因子 D から特定の水準を削減した場合	-99-
6.5.1.3 水準 C2 および D2 を同時に削減した場合	-101-
6.5.2 XT-8 を対象とする試験数削減の検討	-102-
6.5.3 考察	-103-
6.6 結言	-104-
第 7 章 結論	-106-
参考文献	-109-
謝辞	-116-

第1章 緒論

1.1 研究の背景と目的

自動車をはじめ、様々な工業製品の構成部品を製作する工作機械は、産業および経済を支える非常に重要な装置である⁽¹⁾。工作機械の生産台数は、その用途から景気変動の影響を受けやすく、また自身の販売台数、すなわち製造業における設備投資の程度は、製造業の景気の先行き指標として用いられることがある⁽²⁾。近年における工作機械の年間販売台数は、2010年以降増減を繰り返しつつも、全体的には増加傾向を示してきたが、2017年から2018年の9万台をピークに、以降は減少傾向を示している⁽³⁾。その一方で、国内製造業においてはグローバル化にともなう生産競争の激化から、製造業では製品の品質、生産コストが重要視されており⁽⁴⁾、その実現のために、部品加工の高精度化や高速化を目指した研究が多数行われている⁽⁵⁾。これらのうち、生産コストに直結する加工の高速化や生産効率の向上については、軽量化や動作の最適化による生産速度の高速化を目指した取組み⁽⁶⁾や、生産性向上に寄与する装置の小形化に関する研究⁽⁷⁾が事例として挙げられるが、これらは同時に加工精度に及ぼす影響についても考慮がなされている⁽⁸⁾。加工精度は、構成部品の加工精度が直接あるいは間接的に最終製品の性能に影響を及ぼすことから、さらなる高精度化が強く求められている⁽⁹⁾。

高精度化については、加工内容や部品に応じて、加工面粗さや寸法誤差、幾何学的誤差などの様々な評価値に対して求められる。これに対して、工具を含む機械の局部的または機械全体の弾性変形や振動など、種々の変形が高精度化の妨げとなっており、機械の剛性向上が有効な対策とされてきた⁽¹⁰⁾。しかし、これら加工精度に影響する変形において、熱変形についてはその限りではなく、また切削熱や自身の発熱など、熱的な要因も様々であることから、種々な手法が提案されている⁽¹¹⁾が、その抑制は非常に困難である。さらに、数十 μm 単位の変形が生じ得る熱変形は、上記の剛性向上による高精度化が対象とする数 μm 単位のびびり振動などの変形に対して大きいことから、加工誤差としての影響は非常に強いといえる。

そこで本論文では、工作機械の高精度化を妨げる熱変形に対して、簡便な手法でこれを抑制することを検討することとした。

1.2 従来の研究

工作機械の熱変形を抑制するため、様々な対策が研究されている。これらの熱変形対策は、熱変形を直接抑制する方法と、熱変形の発生は許容し、構造上の工夫や、補正を行うことで加工誤差を抑制する2つの方法に大別される。

前者は、非加工時のアイドルストップによる機械発熱の抑制⁽¹²⁾や主軸部⁽¹³⁾、⁽¹⁴⁾、スライド部⁽¹⁵⁾などの熱変形を生じる箇所の直接冷却する手法や、循環する潤滑油を冷却する手法⁽¹⁶⁾があげられる。これらの対策は、切削油の吐出⁽¹⁷⁾や、機械動作条件の最適化の検討がなされている事例も一部存在するが⁽¹²⁾、⁽¹⁸⁾、冷却装置の使用は工作機械本体に対して消費エネルギーが増大し、また冷却装置の設置によって単位面積あたりの生産効率が低下することが懸念される。

後者は、構造の工夫の例として、主軸の軸心位置が保たれるようにする方法⁽¹⁹⁾や静水圧主軸に対して油圧ではなく水を用いる方法⁽²⁰⁾、構造部材として線膨張係数の小さな CFRP を用いることで熱変形による影響を相殺または低減する方法⁽²¹⁾が提案されている。しかし、設計上の制約が大きく、既存の機械に対して適用できない。

これに対して、補正による加工誤差の抑制については、解析によって機械の熱変形を予測する手法が多数提案されており⁽²²⁾、また、上述の対策と異なり設計上の制約がないことから、既存の機械に対しても適用することが可能である。しかし、解析のためのモデル構築は難しく、予測対象ごとに解析に用いる様々な情報を取得する必要がある、高い予測精度と解析速度が要求される。解析の高精度化については、多数の研究がなされているが、主軸部⁽²³⁾-⁽²⁵⁾や工具刃先⁽²⁶⁾、スライド⁽²⁷⁾やボールねじ⁽²⁸⁾など、多くは工作機械を構成する一部のユニットや部品に着目した事例である。これら工作機械の構成ユニットごとに温度を測定し、個別に求めた熱変形予測量を重ね合わせることで、機械全体の熱変形量を予測する手法も提案されている⁽²⁹⁾、⁽³⁰⁾が、これらはユニットごとに1つ以上の温度測定点を必要とするため、機械全体の熱変形を予測するために必要な温度測定点は膨大な数となり、温度を測定するシステムも複雑になると考えられる。これについては、例えば5軸加工機を対象とした、感度解析を用いた熱変形予測用の温度測定点の最適な選択方法および温度測定点数削減の提案⁽³¹⁾や温度データの効率的な処理方法⁽²⁸⁾、解析モデルをベースとした、温度測定点数の増減が熱変形予測精度に及ぼす影響の調査⁽³²⁾がなされている。また、構造上、温度測定が困難な場

所についても温度測定が必要と考えられるが、これは保守の観点から望ましくない。これについては、対象の温度測定点を、伝達関数を用いて機械表面などの別の温度測定点で代用する手法⁽³³⁾⁻⁽³⁵⁾や、温度ではなく電流や電圧といった測定の容易な物理量などで代用する手法⁽³⁶⁾が提案されている。ただし、これらはいずれも熱変形の予測に、行列式や高次式など、比較的複雑な計算を必要とする。

また、加工中にリアルタイムで解析を行うため、解析モデルを上述の解析より粗大なブロックの集合とし、そのブロック内における温度分布は均一として解析を簡略化する手法が提案されている^{(37), (38)}が、同提案においても熱変形の予測には複雑な計算式を必要とする。これらを踏まえ、NC への負担を軽減し、実時間での補正を安定して行うためには解析をとまなわない方法が望ましい。

解析をとまなわない熱変形の予測手法としては、ニューラルネットワークを用いて工作機械全体の熱変形を対象とする予測を行う手法^{(30), (39)}や、近年の計測技術の発達による短時間での熱変位の直接測定とその結果を用いた補正手法^{(40), (41)}、さらには直接測定した 3 次元的な変形を 2 次元平面に投影することで簡便に補正を行う手法などが提案されている⁽⁴⁴⁾が、前者はニューラルネットワークを工作機械へ搭載することが困難であり、後者は加工中に測定動作を個別に行う必要から、加工を行いながら実時間で補正を行うことは難しい。

そのため、熱変形をリアルタイムに補正するためには、少数位置の温度測定結果から、簡便な式で熱変形量を予測し、補正を行うことが望ましいと考えられる。そこで、本論文の先行研究として、比較的大形の CNC 旋盤を対象とした、機械各部の温度変化から熱変形量を簡便な予測式を用いて予測し、補正を行う手法が提案されており、加工誤差をおよそ 70%低減させた⁽⁴⁴⁾。この手法では、加工精度が受ける熱影響は、工作機械の熱変形による主軸と刃物台との相対距離(以後、主軸刃物間距離と呼ぶ)の変化によるものと定義し、その影響は、主軸部、およびボールねじ部それぞれの熱影響の和であるとする。それぞれの熱影響を予測する熱変形予測式を、機械各部の温度変化を用いて独立に決定した。特に変形の大きな主軸部の熱変形予測式について、種々の条件で主軸を回転させ、そのときの主軸刃物間距離の変化を測定することで予測式を決定した。その結果、主軸部の温度変化と主軸刃物間距離の変化は線形の関係を示し、予測式は主軸部温度を変数とする単純な一次式で表すことができた。

ただし、近年では工作機械が小形化される傾向にあり、従来型旋盤に比べて熱源配置が緊密となる。またそれらを考慮し、あらかじめ熱変形を考慮した熱源の配置検討などの対策がなされている場合が多く⁽⁶⁾、熱変形挙動も複雑化することが予想される。さらに、これらの対策は想定された条件下では優れた加工精度を実現可能であるが、それ以外の条件下では、例えば他の工作機械で熱変形に及ぼす影響が確認されている環境温度の変化⁽⁴⁵⁾や、特定のユニットの発熱量のみが増加するなどにより、複雑な熱変形挙動を示すことが予想される⁽⁴⁶⁾。そのため、上記の手法がそのまま小形化された工作機械に適用できない。

そこで本論文では、小形 CNC 旋盤を対象に、先行研究の主旨である予測式形を簡便なものとし、少数の温度測定点を用いることを踏襲し、先行研究と同様に切削模擬試験を実施し、小形旋盤の熱変形挙動を把握する。得られた結果から熱変形予測式を決定し、複数の条件下で実切削試験に対して予測式を適用し、その補正効果を確認するとともに、予測式のさらなる高精度化を図る。

また、決定した熱変形予測式の決定手法を他の旋盤に対して適用し、その汎用性を確認するとともに、決定手法のさらなる効率化、最適化を検討する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す.

第 1 章 緒論

研究の背景, 目的および従来の研究について述べ, 本論文の構成を示す.

第 2 章 校正係数による熱変形予測式の補正

従来に比べて比較的小形な旋盤が複雑な熱変形挙動を示すことを述べ, 同機種を対象とした熱変形予測式の決定方法, さらに切削油を用いない場合を対象として決定した熱変形予測式を, 切削油を用いる場合へも適用可能とする, 校正係数を用いる方法を述べ, その補正効果を示す.

第 3 章 実験計画法による広い切削条件に適用可能な校正係数の決定

2 章において, 熱変形予測式の適用範囲拡大のために導入した校正係数について, その適用範囲を拡大し, 切削油使用の有無両条件に切り替え不要とすることを検討する. さらに, 適用範囲の拡大に対して, 実験計画法を用いることで実切削試験を比較的少数に抑制することを検討する. 上記の手法で決定した熱変形予測式を複数の条件に適用することで補正効果を確認し, 2 章で提案した手法との比較を行う.

第 4 章 汎用的な熱変形予測式の決定方法

3 章における提案手法は, 対象装置における予測式の形, 温度測定点および実験定数が十分に検討されていることが前提であった. 4 章ではこれらの前提を必要としない, 汎用的かつ効率的に熱変形予測式を決定する手法の確立を検討する. 熱変形予測式の決定については, 温度変化の類似性を評価値として用いることで, 効率的に温度測定点および実験定数を決定することを検討する.

第 5 章 因子の変更による熱変形予測式決定の効率化

4 章までで提案した実験計画法を用いる手法では, 因子および水準に対する制約から, 決定した 9 条件の実切削試験を切削油使用の有無両条件下でそれぞれ実施し, その影響を考慮する必要があった. これに対して 5 章では, 4 章の試験結果に対して分散分析を行うことで因子が熱変形に及ぼす影響を評価し, 影響の低い因子を, 切

削油使用の有無の影響を含む新たな因子に変更することで、より少数の試験から熱変形予測式を決定する手法の確立を検討する。

第6章 All pair 法を用いた熱変形予測式の決定

6章では、実験計画法に比べて因子および水準決定の自由度が高い All pair 法を用いて、切削油使用の有無を因子に加えた試験計画を立案することで、より効率よく熱変形予測式を決定する手法の確立を検討する。

第7章 結論

本論文における結論を要約して述べる。

第2章 校正係数による熱変形予測式の補正

2.1 緒言

工作機械における熱変形は、加工精度に影響を及ぼすことから、切削加工の高精度化に対しては、その抑制が重要な課題である。本論文で対象とする CNC 旋盤においても同様であり、第1章で述べたように、熱変形をリアルタイムで予測し、補正を行う簡便なシステムが望まれる。

上記に対して、本論文における先行研究として、従来形の CNC 旋盤を対象とした簡便な熱変形補正手法を提案している⁽⁴⁴⁾。同方法は、対象とする従来形の CNC 旋盤において、その熱変形挙動が主軸部温度変化量と線形性を示していたことから、熱変形を予測することが容易であった。これに対して、本論文で対象とする従来形に対して相対的に小形な CNC 旋盤は、熱源配置の緊密化や種々の熱変形対策により熱変形挙動が複雑化し、先行研究と同手法で熱変形予測式を決定することは困難である。

そこで本章では、上記の相対的に小形化された旋盤を対象に、その熱変形挙動を調査し、決定した熱変形予測式を用いて補正を行うことで、工作機械周囲の気温変動や機械の稼働状態について、種々の条件下における加工径変化量を抑制することを目的とする。

2.2 対象装置

対象とする装置は、主軸に 6 インチの油圧駆動である三爪チャックとタレット形の刃物台を持つ、2 軸スライド構造の CNC 旋盤である。装置の全体写真を図 2.1 に、主な仕様を表 2.1 に、カバーを取り外した内部構造の 3 次元簡易モデルを図 2.2 に示す。装置は、長さ、幅および高さがおおよそ 4.0、3.0 および 3.0 m であるビニールで覆った簡易的な空調室内に設置し、冷房能力 10.9 kW、暖房能力 14.0 kW の空調装置を用いることで周囲環境の温度(以後、環境温度と記す)の調整を行った。なお、環境温度は、装置、ビニール壁面および送風経路上から十分に離れた位置で、装置各部の温度測定と同様に T 型熱電対を用いて測定した。

切削油ポンプの最大吐出容量は約 160 l/min であり、装置底部の容量 130 l の切削油タンクから吸い上げた切削油を、刃物台および機内の吐出口より、ワーク表面お

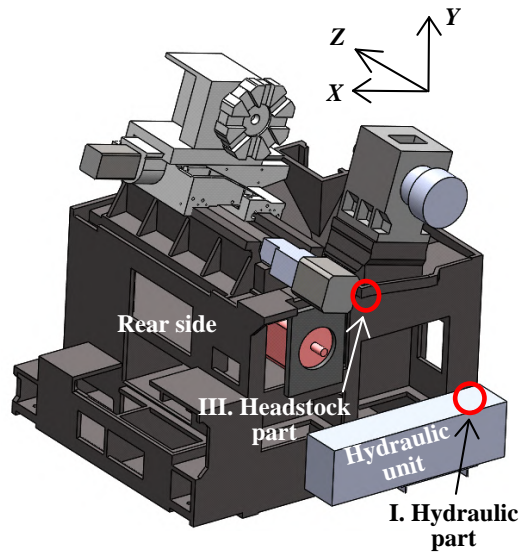
よび機内可動部のカバーに向けて吐出するように設定している。前者は切削性の向上, 後者は切り屑の堆積防止を目的とする。なお, 切削油の温度管理は行っていない。



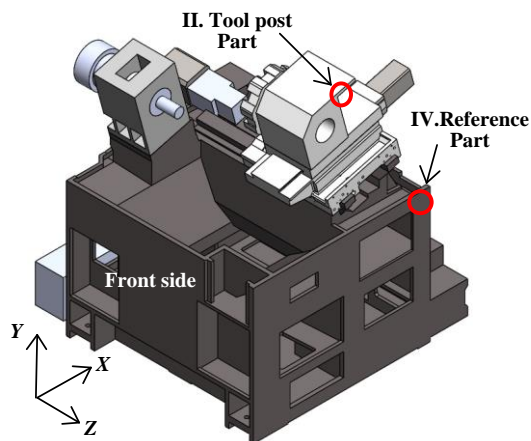
Fig. 2.1 Overall view of the lathe. The CNC lathe XC-100 (Takamatsu Machinery Co., LTD.)

Table 2.1 Specification of XC-100.

Head stock	Height oh the center from floor (mm)	1,050
	Max. spindle speed (min^{-1})	4,500
Tool post	Max. stroke of X axis (mm)	120
	Max. stroke of Z axis (mm)	130
Motor	Power of spindle motor (kW)	AC 7.5/5.5
	Power of hydraulic motor (kW)	AC 0.75
Weight (kg)		1,900
Size : length×width×height (mm)		1,150×1,360×1,730



(a) 3D model (left)



(b) 3D model (right)

Fig. 2.2 Schematic views of XC-100.

2.3 切削模擬試験結果を用いた熱変形予測式の決定方法

旋盤では、主軸に設置したワークを回転させ、工具先端を押しあてて加工することから、機械各部の熱変形によって生じる加工径変化は、主軸刃物間距離の変化となる。そこで本節では、実際の加工動作を模擬した試験(以後、切削模擬試験と呼ぶ)の実施によって対象とする旋盤の熱変形挙動を調査し、得られた結果から熱変形予測式を決定することを検討した。

2.3.1 切削模擬試験の試験方法と試験結果

対象とする旋盤の熱変形挙動を調査するため、切削模擬試験を実施し、主軸刃物間距離の変化を測定した。図 2.3 に試験装置の可動軸付近の概略を示す。

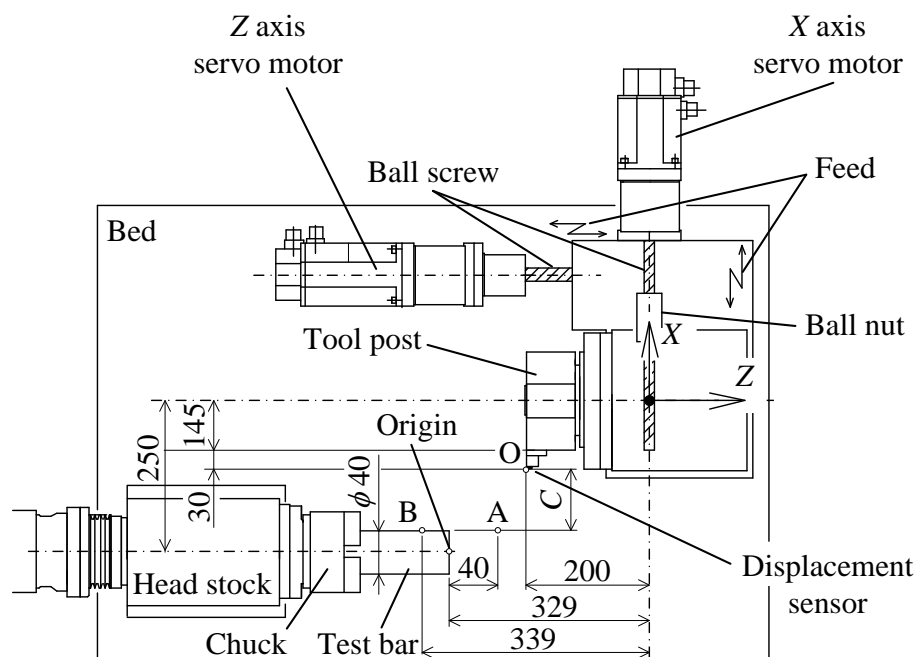


Fig. 2.3 Method of measuring deformation C.

図 2.3 に示すように、主軸刃物間距離 C の熱影響による変化量 ΔC は、検知物(図中では Test Bar と記載)として主軸に設置した $\phi 40 \times 70$ mm の S45C 材の外径部と刃物台との距離の変化を、切削バイトの代わりにホルダ形の治具に取り付けた渦電流式変位センサ(Keyence 製 EX-305)を使用することで測定することで得られる。なお、使用した変位センサの分解能は $0.4 \mu\text{m}$ である。また、装置の温度変化は、機体各部の全 30 点に貼付した T 型熱電対によって測定した。なお、測定位置は解析などを参考に選定しており、従来の熱変形補正手法での試験結果を参考に設置した図 2.2(a)の III を主軸部のほか、機械各部の熱源から最も遠く、外気温の変動に近い温度変化を示す参照部温度として図 2.2(b)の温度測定点 IV、刃物台の温度変化を測定する図 2.2(b)の II, ならびに作動油の温度変化を測定する図 2.2(a)の I を上記の 30 箇所に含んでいる。

切削模擬試験における刃物台および治具の一連の動作を図 2.4 に示す。図 2.4 に

示すように、主軸を回転させてから治具を図 2.3 の原点 O から A の位置に移動させて、A から検知物端面までの 40 mm を、実加工の外径切削と同様に切削送り 360 mm/min での荒加工、切削送り 200 mm/min での仕上げ加工を 1 動作ずつ行う。その後、主軸を停止させ、治具を B の位置に移動して主軸刃物間距離 C を測定し、原点 O に戻る一連の動作を 1 サイクルとした。なお、サイクルタイムは 60 秒とした。

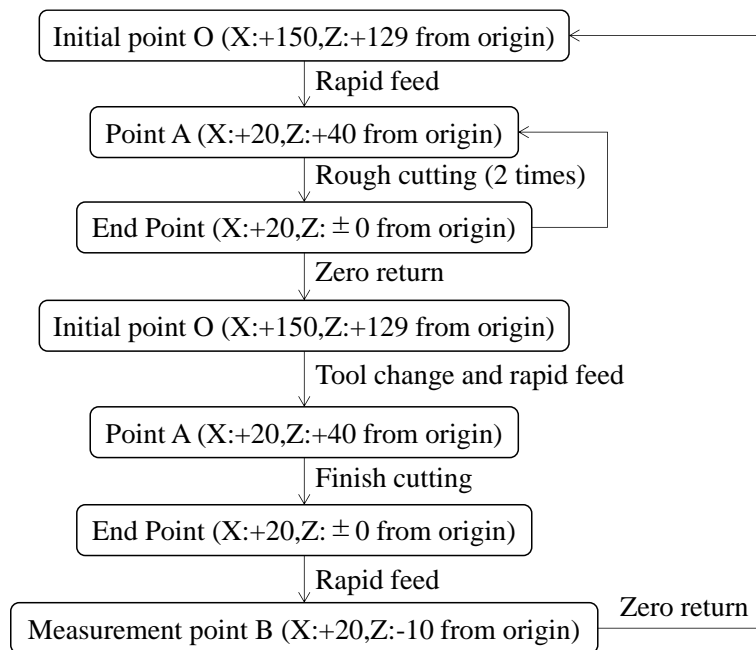


Fig. 2.4 Operational flow of the cutting simulation test

切削模擬試験では、機械の電源を投入し、油圧系統が動作してから 10 分後に、上記のサイクル動作を 8 時間繰り返し実施した。なお、試験は表 2.2 に示す条件を種々組み合わせて実施し、環境温度を複数の条件下で変化させて行うことで、その影響が熱変形挙動に及ぼす影響も調査した。一例として、環境温度の変化のみが異なる 2 条件で実施した試験について、測定した試験開始時の主軸部温度と、参照部温度の試験中の時間変化を表 2.3 に示す。また、試験中の主軸刃物間距離 C の時間変化を図 2.5(a)に、主軸刃物台距離の変化に対し、主軸刃物間距離に影響を及ぼすと思われる主軸部の温度測定結果との関係を図 2.5(b)に示す。なお、主軸刃物間距離の変化についてはその変化傾向を示すため、プロット間を線をつないでいる。以後すべての試験結果についても同様の表示とした。

Table 2.2 Conditions of cutting simulation test

	Rough processing	Finishing
Spindle speed (min^{-1})	2000, 3000, 4000	2000, 3000, 4000
times	2	1
Feeding rate (mm/min)	360	200
Temperature	Increase, constant	
Cutting fluid	Non use	
Cycle time (s)	60	

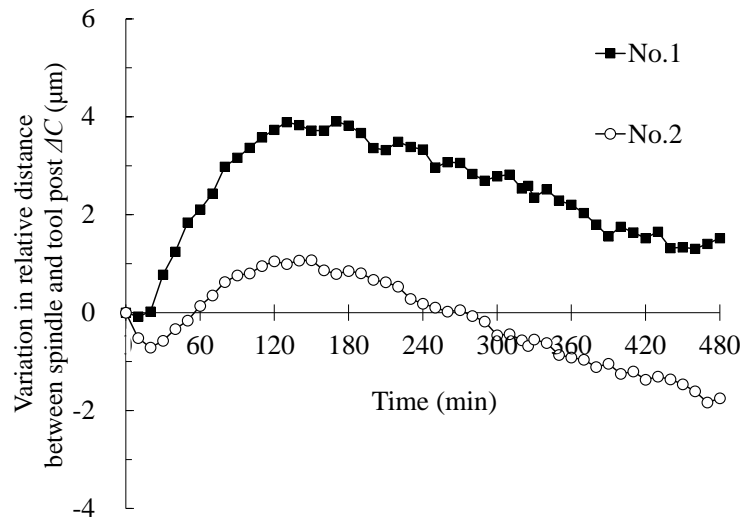
Table 2.3 Cutting simulation test temperature conditions

No.	Variation in the reference temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Initial temperature of the head stock ($^{\circ}\text{C}$)
1	4.8	21.3
2	1.8	18

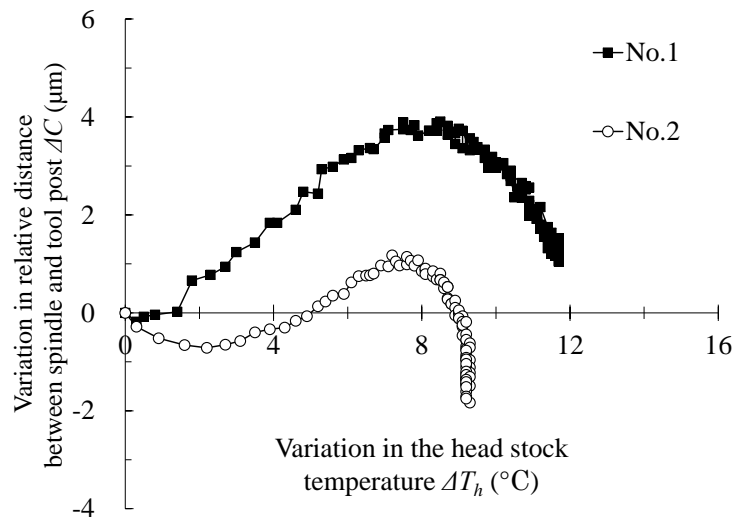
表 2.3 に示す No.1 および 2 の結果は、試験開始時を基準に、試験終了までの外気温がそれぞれ 5°C 上昇、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ となる条件であり、同一の稼働条件でありながら主軸刃物間距離の変化挙動に差が生じていることから、外気温が上記の挙動の差に影響していると考えられる。

図 2.5(a)より、環境温度の変動が小さい No.2 の条件において、主軸刃物間距離の変化は $\pm 2\ \mu\text{m}$ と小さい値を示す。このことから、対象の旋盤は 2.1 節で述べたように、想定された気温変動が一様な、恒温条件下では、安定した加工精度を示すことが確認された。

しかし、同図における No.1 に対して環境温度が変化することで、No.2 の結果が示すように、加工径変化挙動が大きく変化することが確認されており、大きな環境温度の変動など、同旋盤が想定外の条件下で使用される場合は、加工径変化が増大することが懸念される。



(a) Variation in C with time



(b) Variation in C with temperature of the head stock

Fig. 2.5 Cutting simulation test results

また、図 2.5(b)に示すように、主軸刃物間距離の変化と主軸部温度との関係は非線形であり、さらに図 2.5(a)と同様に、気温変動の増大によってその関係が変化することが確認された。このように両者は、2.1 節で述べたように従来の旋盤のような線形関係ではなく、複雑な関係を示すことから、従来と同様の方法で熱変形挙動を数式化することは困難である。

上述のように主軸温度変化に対する主軸刃物間距離の変化が非線形の関係を示す原因として、対象とする旋盤は比較的大形の旋盤に比べて熱源が緊密に配置されたことがあげられる。この影響により、油圧装置などの機械の稼働状態によらず発熱す

る熱源(以後、機械非可動部と記す)による影響が増大したため、従来の方法のように主軸などの機械の稼働状態に発熱が依存する熱源(以後、機械可動部と記す)による熱影響のみを考慮するだけでは補正を行うことができない。

そこで次項では、機械非可動部による熱影響を調査し、その影響を考慮することで機械全体の熱変形量を予想することを検討する。

2.3.2 待機試験の実施と機械非可動部の熱変形予測式の決定

2.3.1 項で述べたように、対象とする旋盤の熱変形挙動は複雑であり、機械可動部の温度変化のみから機械全体の熱変形を予測することは困難である。そこで本項では、機械全体の熱変形が機械可動部と機械非可動部の和であるとし、両者の影響をそれぞれ独立に考慮することを試みる。具体的には、まず機械非可動部の熱影響を機械可動部が動作していない状態で測定し(以後、待機試験と呼ぶ)、機械非可動部の熱変形予測式を導くことを検討する。

つぎに、機械可動部の熱変形予測式の決定に関して、油圧部を動かさずに可動部である主軸部のみを動作させることが不可能なため、機械可動部の熱影響を直接測定することはできない。そこで、以上で得られた機械非可動部の熱変形予測式を用い、切削模擬試験結果から機械非可動部の熱変形量を差し引くことで、機械可動部の発熱による主軸刃物間距離の変化を求める。得られた結果から機械可動部に関する熱変形予測式熱を決定する。

待機試験では、対象とする旋盤の電源を投入後、油圧部を動作させた状態で刃物台を図 2.3 の B の位置まで移動させた状態で維持し、各部の温度と主軸刃物間距離の変化量を測定した。温度および主軸刃物間距離の測定には、切削模擬試験で用いた熱電対および変位センサを使用した。この時、環境温度を種々変化させ、それらが熱変形挙動に及ぼす影響もあわせて調査した。実施した待機試験結果の一例を図 2.6 に示す。また、主軸部の初期温度、ならびに参照部温度の変化を表 2.4 に示す。

図 2.6 に示すように、主軸刃物間距離の変化は、気温変動の小さい No.3 の条件においても $7\ \mu\text{m}$ であり、図 2.4(a)に示す切削模擬試験結果と比較して同程度以上であった。また、気温変動の大きな No.4 では、No.3 と大きく異なる挙動を示した。

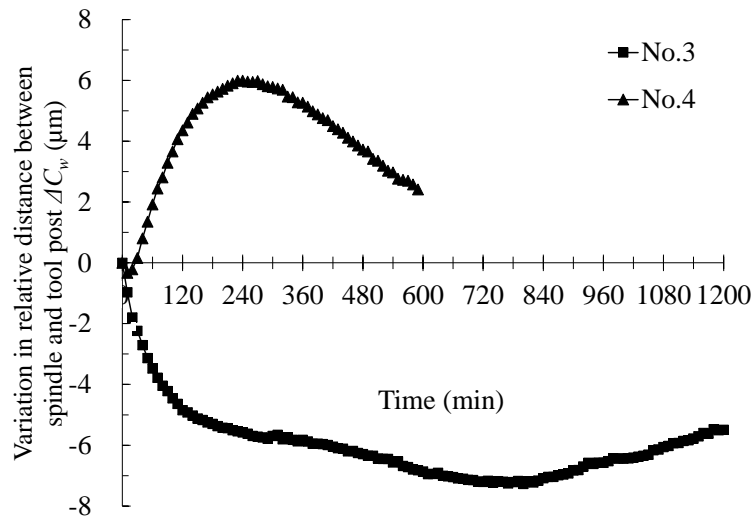


Fig. 2.6 Results in the waiting test

Table 2.4 Temperature conditions of the waiting test

No.	Variation in the reference temperature (°C)	Initial temperature of the head stock(°C)
3	1.4	21.0
4	9.5	16.8

以上のように、機械非可動部の発熱による影響は機械全体の熱変形において非常に大きく、その挙動も環境温度によって複雑に変化することが確認された。そこで機械非可動部の熱変形予測式に用いる温度測定点を決定するため待機試験結果から、全 30 箇所の温度測定結果に対し、各温度測定間における温度変化の相関係数を算出した。表 2.5 に待機試験の 1 条件における相関係数の算出結果の例を示す。

表 2.5 では、相関係数の大小でハッチング色を塗り分けており、黄色は相関係数 0.9 以上と強い相関を示す箇所、水色は 0.7 以上 0.9 未満の中程度の相関を示す箇所、0.7 未満の相関の低い箇所は無色としてある。表 2.5 の結果から、算出した相関係数は図 2.2 に示す I~IV の温度測定結果と強い相関を示しており、同表において各温度測定点を主軸部、油圧部、刃物台部、その他(参照部含む)の 4 つに分類した。このように分類された各グループから代表点 1 点を選出し、これを用いて熱変形予測式を決定することとした。

次に、機械非可動部の熱変形予測式に用いる温度測定点を決定するため、待機試験結果における主軸刃物台距離の変化と、各部の温度変化との相関係数を算出した。

その結果を表 2.6 に示す.

表 2.6 より, 機械可動部に含まれる主軸を除いた油圧部, 刃物台部, その他のそれぞれに相関係数 0.7 以上となる箇所が存在することから, これら 3 箇所の温度変化を用いて機械非可動部の熱変形予測式を決定することとした.

決定した温度測定点は, 上記のように 0.7 以上の相関係数を示し, かつ熱電対の設置が容易な箇所として, 図 2.2 に示す I, II, IV を選択した. これら 3 点の温度変化量を用いて, 機械非可動部の熱変形予測式を以下の一次多項式と仮定した.

$$\Delta C_w = a_1 \Delta T_w + a_2 \Delta T_b + a_3 \Delta T_{ref} \quad (2.1)$$

ここで, ΔC_w は機械非可動部の主軸刃物間距離の変化量, ΔT_w は測定点 I における油圧部の温度変化, ΔT_b は測定点 II における刃物台部の温度変化, ΔT_{ref} は測定点 IV における参照部の温度変化を示す. a_i ($i=1\sim 3$) は測定値から決定される実験定数であり, 待機試験結果における主軸刃物間距離の変化と, 式(2.1)における ΔC_w との差が最小となるように, 非線形最小二乗法を用いて表 2.7 のように決定される.

表 2.7 の実験定数および式(2.1)を用いて, 待機試験結果の主軸刃物間距離の変化をシミュレーションした結果を図 2.7 に示す. 図 2.7 では待機試験中の主軸刃物間距離の変化を時刻に対してプロットしており, 塗りつぶしのプロットが測定値, 白抜きのプロットがシミュレーション結果である.

Table 2.5 Correlation coefficients with variation of each measurement temperature in the waiting test

Measurement point	Spindle(1)	Other(1)	Spindle(2)	Spindle(3)	Oil unit(1)	Other(2)	Other(3)	Other(4)	Spindle(4)	Spindle(5)
Spindle(1)		0.971	0.986	0.985	0.981	0.973	0.970	0.915	0.960	0.958
Other(1)			0.973	0.967	0.960	0.951	0.966	0.903	0.931	0.931
Spindle(2)				0.984	0.984	0.980	0.973	0.906	0.963	0.963
Spindle(3)						0.979	0.973	0.892	0.980	0.980
Oil unit(1)							0.991	0.967	0.920	0.957
Other(2)								0.969	0.905	0.964
Other(3)									0.844	0.973
Other(4)										0.808
Spindle(4)										
Spindle(5)										

Measurement point	Oil unit(2)	Other(5)	Spindle(6)	Oil unit(3)	Spindle(7)	Other(6)	Oil	Spindle(8)	Spindle(9)	Other(7)
Spindle(1)	0.940	0.931	0.953	0.926	0.946	0.883	0.891	0.880	0.836	0.834
Other(1)	0.955	0.912	0.932	0.941	0.915	0.914	0.920	0.918	0.816	0.826
Spindle(2)	0.950	0.951	0.954	0.941	0.952	0.896	0.901	0.892	0.829	0.811
Spindle(3)	0.949	0.932	0.968	0.940	0.970	0.887	0.903	0.898	0.812	0.793
Oil unit(1)	0.938	0.934	0.941	0.946	0.946	0.916	0.914	0.903	0.837	0.824
Other(2)	0.943	0.949	0.943	0.957	0.956	0.923	0.921	0.911	0.819	0.794
Other(3)	0.990	0.934	0.970	0.973	0.966	0.919	0.948	0.937	0.735	0.728
Other(4)	0.800	0.860	0.778	0.844	0.784	0.878	0.827	0.819	0.949	0.959
Spindle(4)	0.959	0.928	0.987	0.935	0.997	0.830	0.891	0.884	0.717	0.678
Spindle(5)	0.961	0.911	0.996	0.925	0.987	0.840	0.883	0.875	0.712	0.671
Oil unit(2)		0.916	0.959	0.973	0.953	0.916	0.955	0.946	0.689	0.674
Other(5)			0.905	0.931	0.930	0.887	0.877	0.867	0.790	0.736
Spindle(6)				0.951	0.985	0.823	0.870	0.861	0.692	0.655
Oil unit(3)					0.929	0.974	0.989	0.984	0.742	0.722
Spindle(7)						0.839	0.880	0.873	0.690	0.644
Other(6)							0.981	0.976	0.871	0.782
Oil								0.994	0.720	0.716
Spindle(8)									0.718	0.711
Spindle(9)										0.944
Other(7)										

Measurement point	Tool post(1)	Other(8)	Tool post(2)	Tool post(3)	Tool post(4)	Spindle(10)	Other(9)	R. T.	Other(10)	Other(11)
Spindle(1)	0.838	0.856	0.835	0.788	0.759	0.661	0.498	0.418	0.234	0.255
Other(1)	0.896	0.834	0.854	0.775	0.772	0.656	0.495	0.394	0.203	0.239
Spindle(2)	0.852	0.885	0.837	0.822	0.751	0.622	0.452	0.370	0.206	0.206
Spindle(3)	0.822	0.862	0.833	0.794	0.714	0.598	0.409	0.355	0.399	0.179
Oil unit(1)	0.787	0.836	0.790	0.756	0.672	0.613	0.421	0.399	0.219	0.220
Other(2)	0.775	0.853	0.785	0.776	0.646	0.576	0.361	0.335	0.178	0.154
Other(3)	0.854	0.863	0.826	0.818	0.736	0.521	0.341	0.278	0.033	0.083
Other(4)	0.722	0.704	0.671	0.592	0.601	0.828	0.631	0.604	0.531	0.488
Spindle(4)	0.803	0.890	0.829	0.842	0.705	0.467	0.277	0.220	0.024	0.028
Spindle(5)	0.826	0.897	0.854	0.856	0.738	0.457	0.298	0.222	0.009	0.037
Oil unit(2)	0.873	0.853	0.825	0.822	0.730	0.470	0.288	0.217	-0.042	0.020
Other(5)	0.808	0.928	0.741	0.871	0.682	0.548	0.328	0.213	0.150	0.055
Spindle(6)	0.836	0.901	0.869	0.867	0.759	0.446	0.303	0.211	-0.008	0.029
Oil unit(3)	0.759	0.816	0.733	0.760	0.611	0.507	0.250	0.241	0.025	0.034
Spindle(7)	0.789	0.899	0.816	0.855	0.689	0.426	0.231	0.167	-0.013	-0.027
Other(6)	0.737	0.718	0.640	0.643	0.520	0.577	0.300	0.326	0.138	0.133
Oil	0.767	0.737	0.693	0.682	0.565	0.513	0.246	0.272	0.017	0.061
Spindle(8)	0.767	0.728	0.695	0.673	0.552	0.515	0.237	0.266	0.021	0.057
Spindle(9)	0.646	0.666	0.607	0.548	0.539	0.862	0.668	0.645	0.642	0.564
Other(7)	0.651	0.571	0.607	0.454	0.568	0.912	0.755	0.726	0.668	0.650
Tool post(1)		0.823	0.877	0.826	0.904	0.551	0.516	0.267	0.089	0.170
Other(8)			0.803	0.957	0.770	0.394	0.270	0.055	0.028	-0.062
Tool post(2)				0.805	0.870	0.484	0.478	0.269	0.078	0.174
Tool post(3)					0.793	0.292	0.209	-0.044	-0.094	-0.156
Tool post(4)						0.512	0.298	0.298	0.114	0.245
Spindle(10)							0.867	0.794	0.780	0.779
Other(9)								0.817	0.762	0.871
R. T.									0.753	0.916
Other(10)										0.861

Table 2.6 Correlation coefficients of variation in relative distance with temperature variation at each measurement point in the waiting test

Air	Oil	Oil unit (1)	Oil unit (2)	Oil unit (3)	Other (1)	Other (2)	Other (3)	Other (4)	Other (5)
0.63	0.85	0.77	0.85	0.85	0.80	0.88	0.69	0.73	0.87
Other (6)	Other (7)	Other (8)	Other (9)	Other (10)	Other (11)	Spindle (1)	Spindle (2)	Spindle (3)	Spindle (4)
0.84	0.68	0.76	0.63	0.65	0.66	0.86	0.75	0.79	0.79
Spindle (5)	Spindle (6)	Spindle (7)	Spindle (8)	Spindle (9)	Spindle (10)	Tool post (1)	Tool post (2)	Tool post (3)	Tool post (4)
0.80	0.80	0.79	0.85	0.78	0.66	0.75	0.70	0.66	0.61

Table 2.7 Coefficient of Eq. (2.1)

a_i ($\mu\text{m} / ^\circ\text{C}$)		
a_1	a_2	a_3
-0.632	-1.772	3.066

図 2.7 に示すように、シミュレーション結果と測定結果がよく一致しており、式(2.1)を用いて機械非可動部の主軸刃物間距離の近似が可能であることが確認された。

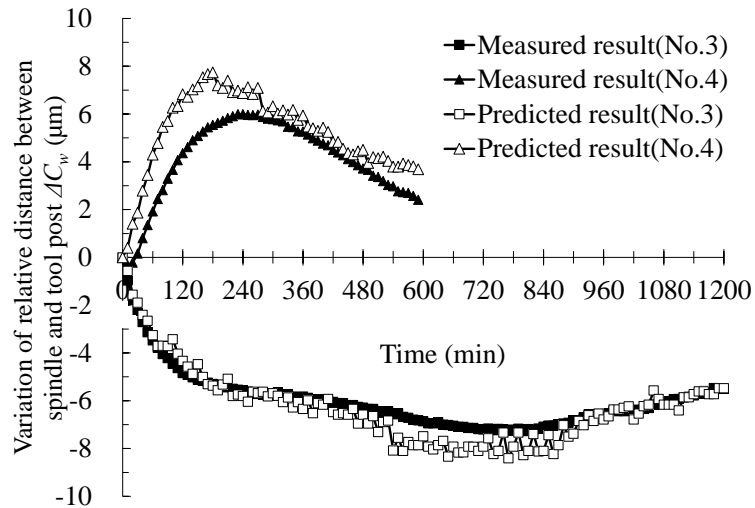


Fig. 2.7 Predicted results in waiting test

2.3.3 機械可動部の熱変形予測式の決定

本項では機械可動部の熱変形予測式を検討する。2.3.2 項で述べたように、機械可動部のみを動作させることが不可能なため、ここでは切削模擬試験結果から、2.3.2 項で決定した式(2.1)を用いて算出される機械非可動部の主軸刃物間距離変化の予測結果を差し引くことで、機械可動部のみによる主軸刃物間距離の変化を抽出する。そのため、機械全体の主軸刃物間距離の変化は以下の式(2.2)のように定義する。

$$\Delta C = \Delta C_w + \Delta C_h \quad (2.2)$$

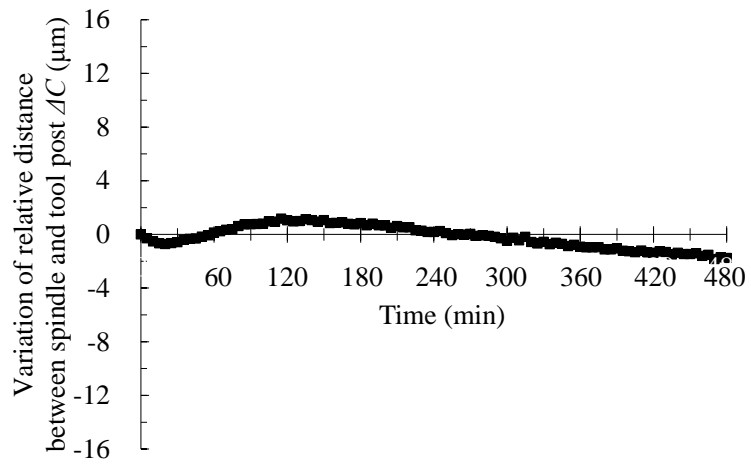
ここで、 ΔC は機械全体の主軸刃物間距離の変化を示し、 ΔC_h は機械可動部の主軸刃物間距離の変化を示す。式(2.2)および式(2.1)を用い、 ΔC_h を算出した例を図 2.8 に示す。図 2.8(a)に示す切削模擬試験結果から、式(2.1)で計算された図 2.8(b)に示す ΔC_w を差し引くことで、図 2.8(c)に示す ΔC_h が抽出される。

このようにして得られる ΔC_h に対して、主軸部との温度変化との関係をプロットした結果を図 2.9 に示す。

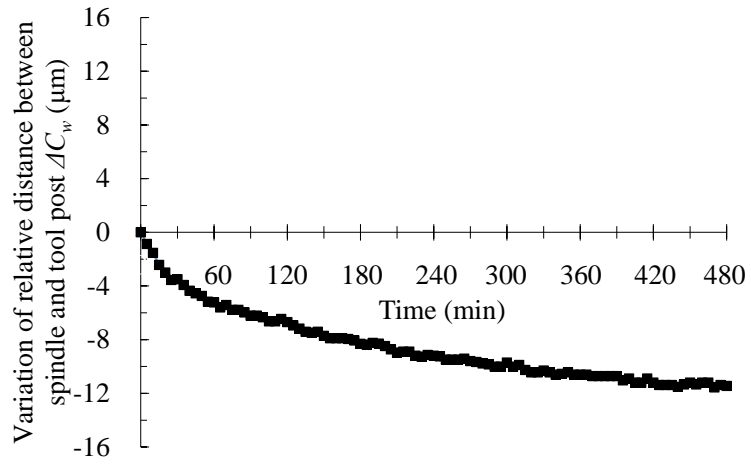
図 2.9 に示すように、機械可動部の主軸刃物間距離の変化 ΔC_h は、主軸部の温度変化 ΔT_h と線形性を示すことが確認される。ただし、図 2.9 の No.4 に示すように、試験条件によってその傾きは変化しており、また、 ΔT_h が一定温度以上となると線形性が失われる。これは、抽出された ΔC_h は、切削模擬試験結果から気温変動による影響を含む ΔC_w が差し引かれていることに対し、 ΔT_h にも気温変動による影響が含まれるためであると考えられる。そこで、機械可動部の熱変形予測式は、主軸部の温度変化のみではなく、参照温度部の温度変化を考慮し、以下のように式形を仮定した。

$$\Delta C_h = b_1 \Delta T_h + b_2 \Delta T_{ref} \quad (2.3)$$

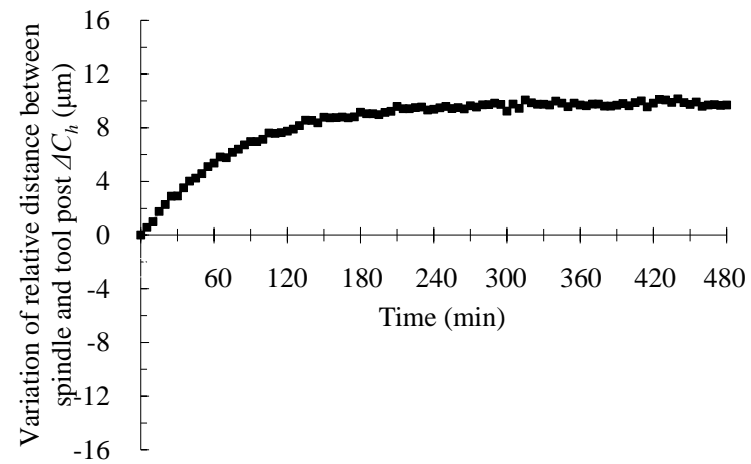
ここで、 ΔT_h は主軸部の温度変化を示しており、他の温度測定点と同様に、表 2.5 の結果および熱電対の設置の容易さから、図 2.2 の III の温度測定結果を用いる。また b_j ($j = 1 \sim 2$) は実験定数であり、抽出された ΔC_h と式(2.3)による計算値との差が最小となるように表 2.8 のとおり値が決定された。



(a)Result of cutting simulation test



(b)Predicted result of ΔC_w



(c)Calculated result of ΔC_h

Fig. 2.8 Variation in relative distance

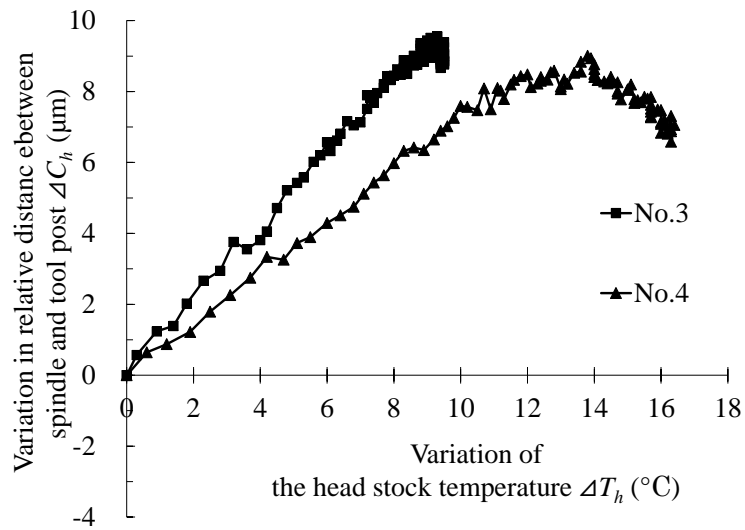


Fig. 2.9 Relationship between ΔC_h and ΔT_h

式(2.3)を用いて、機械可動部の主軸刃物間距離の変化 ΔC_h をシミュレーションした結果を図 2.10 に示す. 図 2.10 では待機試験中の主軸刃物間距離の変化を時刻に対して示しており、塗りつぶしのプロットが測定値、白抜きのプロットがシミュレーション結果である. 図 2.10 に示すように、シミュレーション結果と測定結果がよく一致しており、式(2.3)を用いて機械非可動部の主軸刃物間距離の近似が可動であることが確認された.

Table 2.8 Coefficients of Eq. (2.3)

b_k ($\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)	
b_1	b_2
1.20	-0.99

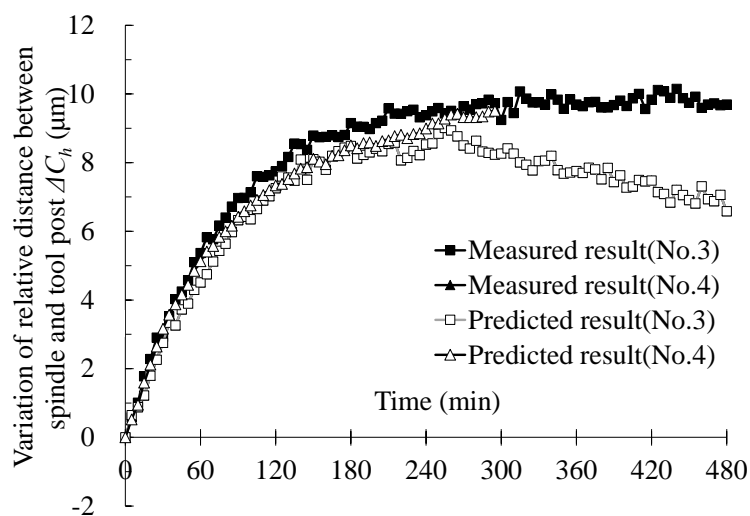


Fig. 2.10 Predicted results of ΔC_h

2.3.4 熱変形予測式による予測結果の確認と実切削試験への適用

2.3.3 項までで決定した熱変形予測式について、切削試験を実際に行い、熱変形予測式の妥当性を確認する。被削材形状を直径 40 mm、長さ 70 mm の快削黄銅 C3604BD 材とし、切削長は 40 mm とした。試験時間は、待機状態を 10 分間設けた後の 8 時間とした。切削開始より 5 分後までは連続して、30 分後までは 5 分ごとに、それ以降は 10 分ごとに都度、未加工のワークを供給して実切削を行った。また、実切削を行わない時間帯は切削プログラムを繰り返して稼働させ続けた。切削条件を表 2.9 に示す。

Table 2.9 Cutting condition

	Rough processing	Finishing
Spindle speed (min^{-1})	2000, 3000, 4000	2000, 3000, 4000
Depth of cut (mm)	0.1	0.05
Feed rate (mm/min)	360	200
Cycle time (s)	60	

加工後のワーク直径は、恒温室で1日保管した後に、分解能 $0.15 \mu\text{m}$ である2次元寸法測定器(Keyence 製 TM-3000)で測定を行った。なお、補正の効果は、補正を行わず切削したワークの加工径の測定値から、切削時に測定した温度変化量を用い、式(2.2)から得られる予測変形量を差し引くことで確認する。ただし、 ΔC は半径値であるため、以後は2倍することで直径に換算して取り扱う。

主軸回転数を 2000 min^{-1} とし、気温変動を $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内とする恒温環境下で切削試験を実施した。図 2.11 に実切削による加工径の変化を◆で、式(2.2)より得られる加工径の変化の予測量を■で、同値をもとに補正を行った場合の加工径変化の予測値を▲でそれぞれ示す。なお、以後の切削試験結果については、加工径の変化挙動を示す目的で、各プロットを線でつなぐこととした。

図 2.11 より、提案する熱変形予測式で補正を行うことで、主軸回転数が 2000 min^{-1} の場合では加工径変化の最大値と最小値の差である加工径変化幅が $5 \mu\text{m}$ から $3 \mu\text{m}$ に減少することが確認された。減少量としては微小であるが、変化量の平均値および変化量の標準偏差はそれぞれ、補正を行うことで $3.2 \mu\text{m}$ から $1.2 \mu\text{m}$ 、 $0.9 \mu\text{m}$ から $0.7 \mu\text{m}$ に低減しており、熱変形予測式を用いることで、熱変形を正確に予測し、補正を行うことが可能であることが確認された。その他の条件でも同様の結果が確認されており、本補正方法が有効であることが確認された。

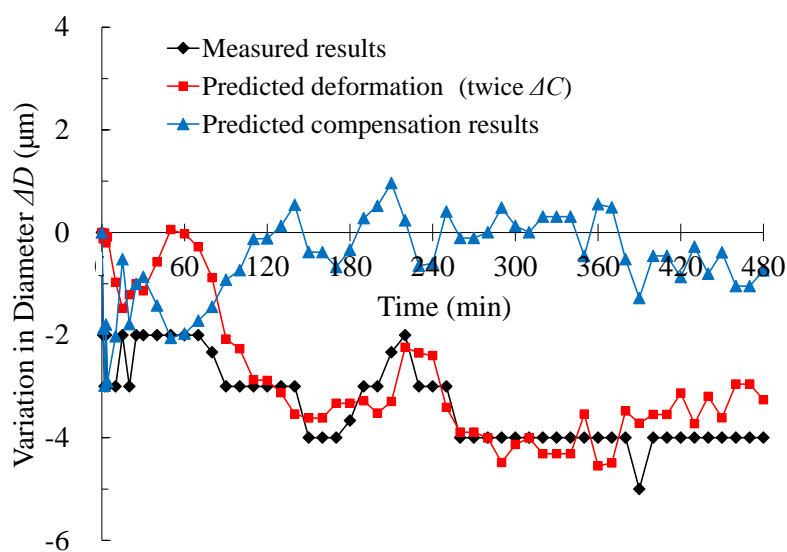


Fig. 2.11 Continuous cutting result under constant room temperature

2.3.5 一時停止を含む試験条件への適用

前項までは、試験時間中に機械が稼働し続ける条件下で妥当性を確認した。しかし実際には、工具交換などの保守で加工を中断する場合は想定される。そこで、この機械の断続的な停止を考慮して、一時停止を含む稼働条件下での熱変形に対する補正効果を確認した。稼働条件として、試験開始から 60 分後に 10 分間、180 分後に 60 分間、360 分後に 20 分間装置を停止させて実切削試験を行った。ただし、主軸回転数は 2000 min^{-1} とし、試験時間中の気温変動が $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内とする恒温環境下で実施した。その結果を図 2.12 に示す。なお、図中のハッチング部分は停止区間を示す。

図 2.12 より、試験開始より 240 分後の機械再稼働後、試験片の加工径は負方向へ大きく変化しており、図 2.11 に比べて、加工径変化は増加する。式(2.2)より算出される予測変形量はこの現象に追従しており、補正した場合の加工径変化幅の予測値は、図 2.12 に示すように、それぞれ $11 \text{ }\mu\text{m}$ から $6 \text{ }\mu\text{m}$ に減少しており、提案する熱変形予測式が、機械の一時停止を含む条件にも適用可能あることが確認された。

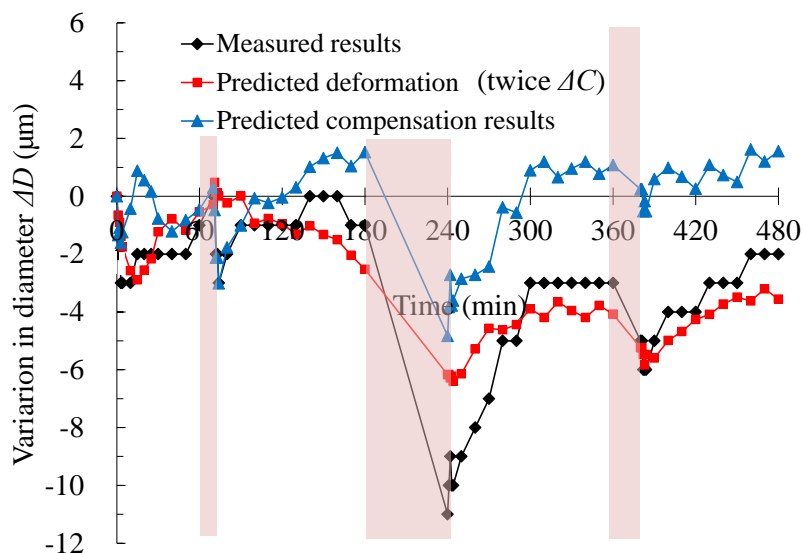
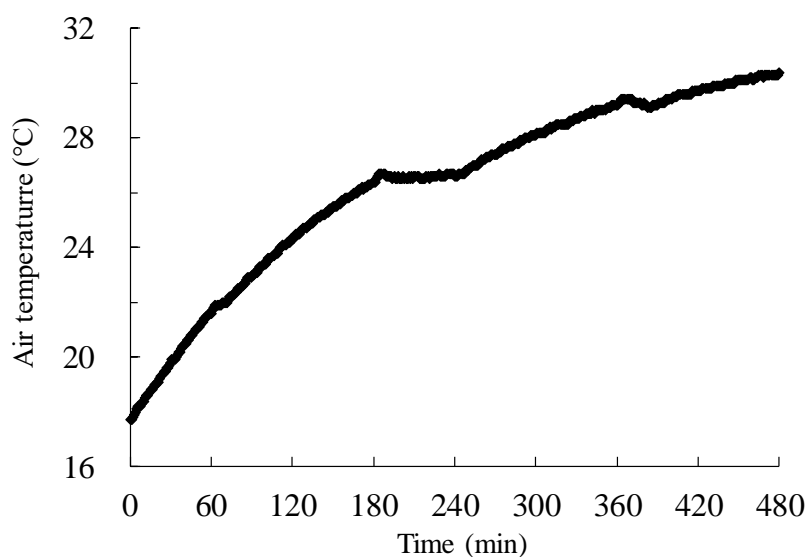


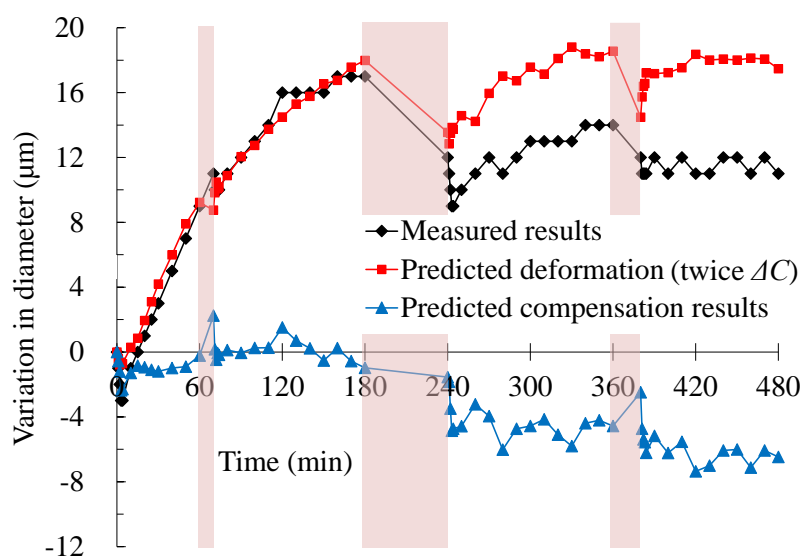
Fig. 2.12 Discontinuous cutting result under constant room temperature

2.3.6 気温変動環境下への適用

次に、環境温度が上昇する環境下での切削試験を行った。稼働条件は 2.3.5 項と同一である。主軸回転数は 2000 min^{-1} とし、環境温度は試験開始直前まで冷房を稼働させ、開始時から空調を停止することで、気温が上昇する条件下で試験を行った。図 2.13(a)に試験時の気温変化、図 2.13(b)に試験結果をそれぞれ示す。



(a) Temperature variation



(b) Result of cutting test

Fig. 2.13 Results in the temperature increasing condition

図 2.13 より, 気温が上昇することで, 加工径は正の方向へ変化し, 加工径変化幅は増加する. このような傾向に対し, 式(2.2)を用いて補正を行うことで, 加工径変化幅を 18 μm から 8 μm に減少させ得ることがわかる.

2.3.7 切削油使用環境下への適用

前項までは, 切削油を用いない条件下で試験を行った. しかし, 実用性を考慮すると熱変形予測式は切削油を使用した加工に対しても補正可能にすることが望まれる.

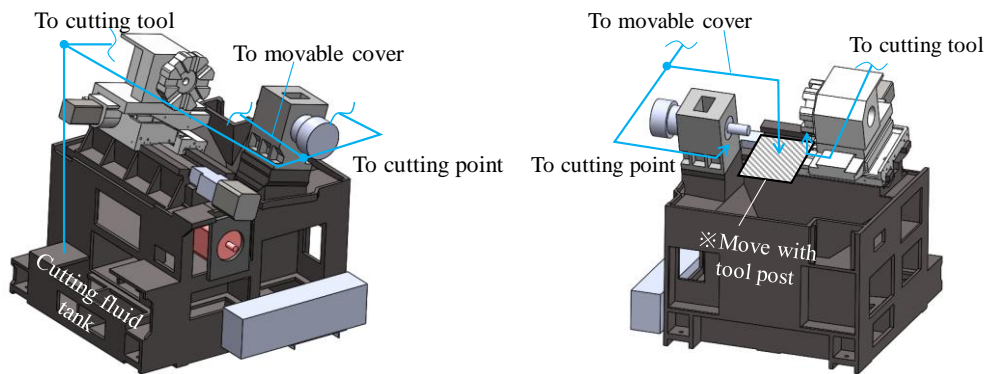
そこで, 前項までで決定した熱変形予測式を, 切削油を使用した条件に適用し, 補正効果の確認を行う. 切削条件を表 2.10 に示す. 被削材には, 直径 40 mm, 長さ 70 mm の被削性の S45C 材を用い, 切削長は 40 mm とする.

本項では使用する切削油に, 水溶性切削油(出光興産製アルファクール EW)を使用した. 切削油は図 2.14(a)および(b)に示すように, 主軸部近傍のノズル 2 ヶ所から, ワークの加工部および刃物台とともに動作するカバー部にそれぞれ吐出され, また刃物台の固定ノズルから工具刃先へ吐出される. なお, S45C を切削する場合, 加工径変化には構造体の熱変形による影響に加え, 工具摩耗の影響が含まれる. そのため, 仕上げ用の工具は, 15 分ごとに切削する工具 A と 5 分ごとに切削する工具 B の 2 つを使用する. これにより, 工具摩耗の影響を抑えた工具 A で切削した試験片の加工径が, 構造体の熱変形による影響として確認できるようにした. ただし, 工具 B に関しては, 切削開始から 10 分までは 2 分ごとに実切削を行う. 実切削を行わない時間帯は切削プログラムを繰返して稼働させ続け, 試験時間は 8 時間とした.

切削油を使用する実切削試験は, 試験時間中の気温変動が ± 2 $^{\circ}\text{C}$ 以内とする恒温環境下で実施した. その結果を図 2.15 に示す. 実切削による加工径の変化を◆で, 式(2.2)より得られる加工径の変化の予測量を●で, 同値をもとに補正を行ったシミュレーション結果を▲で示す.

Table 2.10 Cutting condition

	Rough processing	Finishing
Spindle speed (min^{-1})	2000	2000
Depth of cut (mm)	2.0	1.0
Feed rate (mm/min)	360	200
Cycle time (s)	60	



(a) Supplying cutting fluid to each nozzle (b) Discharging point of cutting fluid

Fig. 2.14 Schematic view of discharging cutting fluid.

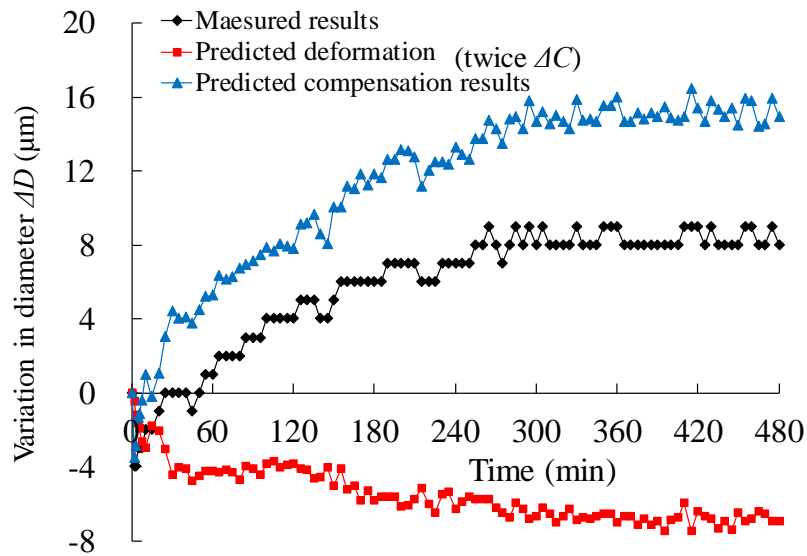


Fig. 2.15 Diameter variations in continuous cutting tests with cutting fluid

図 2.15 に示すように、式(2.2)を用いた予測結果は実測値と一致せず、補正を行うことで加工径変化幅は $6 \mu\text{m}$ から $14 \mu\text{m}$ に増大した。これは、切削時は切削油を使用す

ることにより、試験機各部に切削油の温度が影響され、切削油を用いなかった熱変形予測式を決定した切削模擬試験および前項までの実切削加工とは機械各部の温度変化や熱変形が異なったために、補正効果が得られなかったと考えられる。

2.4 校正係数による切削油使用時の熱変形補正方法

2.4.1 校正係数の導入および決定

2.3.7 項に示したように、熱変形予測式は、切削油を使用しない条件に対して熱変形を精度良く予測し、補正が行えた。しかし、切削油を用いた条件下では、熱変形を正確に予測できず、良好な補正効果を得られなかった。切削油については、他の工作機械において熱変形に影響を及ぼすことが報告されている^{(47),(48)}。対象の旋盤においては、切削油を使用する加工では、切削油をベッド下部にあるタンクに貯めており、また切削室内では切削油が循環しているため、ベッド下部、刃物台などは切削油の温度変化に影響されると考えられる。切削油は被削材を冷却し、切削熱による加工点近傍の熱変形を抑制している一方、切削油の温度は切削熱を吸収して上昇してしまう。そのため、その影響を受けるベッド下部や刃物台は温度上昇し、機械各部で生じる熱変形が切削油を用いない場合と異なったためと考えられる。

そこで本項では、2.3 節で決定した熱変形予測式に対し、切削油を使用する条件で行った実切削試験結果と予測結果とが一致するように予測式の各項に校正係数を挿入することで対応することを検討する。校正係数を導入した熱変形予測式を以下に示す。

$$\Delta C_w = e_1 \times a_1 \Delta T_w + e_2 \times a_2 \Delta T_b + e_3 \times a_3 \Delta T_{ref} \quad (2.4)$$

$$\Delta C_h = e_4 \times b_1 \Delta T_h + e_3 \times b_2 \Delta T_{ref} \quad (2.5)$$

ここで、 e_k ($k = 1 \sim 3$)は校正係数であり、式(2.4)および(2.5)を用いた式(2.2)によって計算される予測値が、切削油を用いた実切削試験における実測値と一致するように非線形最小二乗法によってその値が決定される。その値を表 2.11 に示す。このように決定した熱変形予測式を用いて、次項から切削油を用いた実切削試験への妥当性確認を行う。

Table 2.11 Calibration coefficients

e_1	e_2	e_3	e_4
1.73	0.40	0.19	1.53

2.4.2 シミュレーションによる検討

本項では、2.4.1 項で決定した校正係数を熱変形予測式に導入した、実切削試験結果に対して適用することで、補正を行った場合の効果をシミュレーションで検討する。

2.3.7 項と同様に、切削油を用いた実切削試験を実施し、式(2.4)および式(2.5)を用いて加工径変化量を予測し、補正効果をシミュレーションで求めた。その結果を図 2.16 に示す。なお、各プロットは図 2.15 と同一である。

図 2.16 より、校正係数を導入した式(2.2)を用いて補正を行うことで、加工径変化幅を $7\ \mu\text{m}$ から $3\ \mu\text{m}$ に減少させ得ることがわかる。

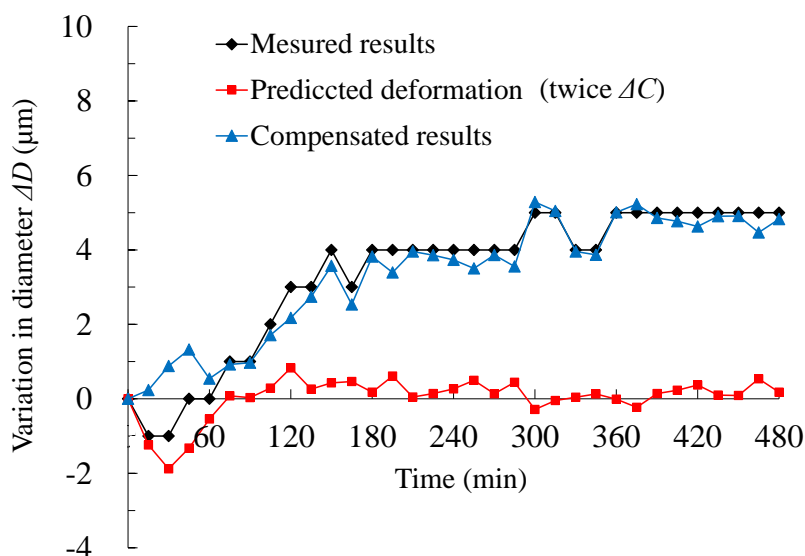


Fig. 2.16 Diameter variations in continuous cutting tests with cutting fluid

次に、2.3.5 項と同様に、一時停止を含む条件下で切削油を用いて実切削試験を行い、熱変形予測式の妥当性を確認する。試験結果の例を図 2.17 に示す。図 2.17 に示すように、一時停止を含む条件下でも、良好に補正を行うことが確認された。

さらに、気温変動を含む条件下で実切削を行った場合の適用結果を図 2.18 に示

す. 図 2.18(a)は試験時の環境温度の測定結果, 図 2.18(b)は加工径変化量の時間変化である. 図 2.18(b)に示すように, 一時停止を含み, かつ気温が上昇する条件下でも, 良好に補正を行うことが確認された.

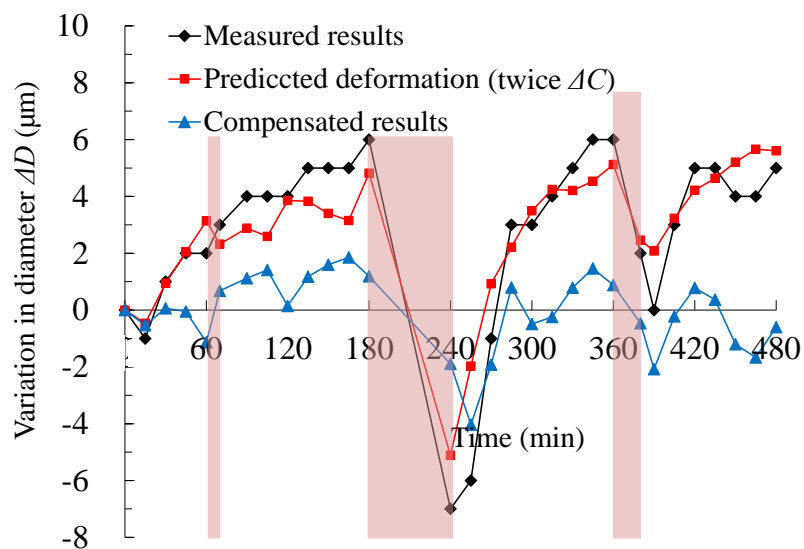
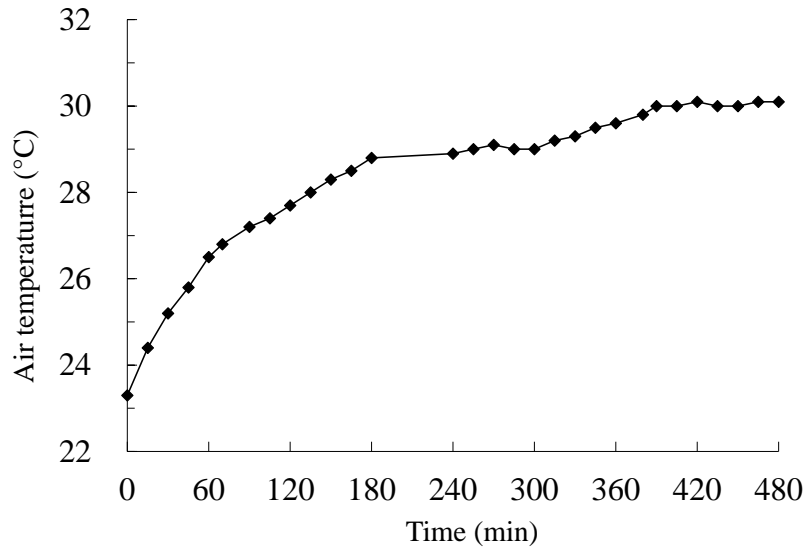
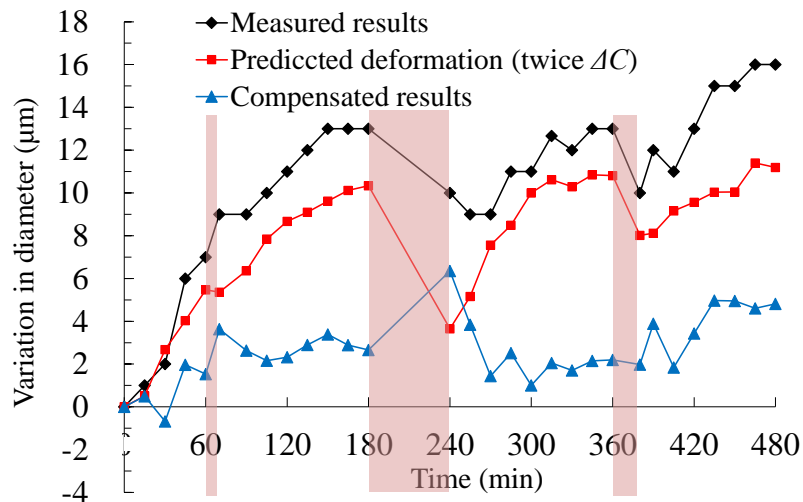


Fig. 2.17 Diameter variations in continuous cutting tests with cutting fluid



(a) Temperature variation



(b) Diameter variation

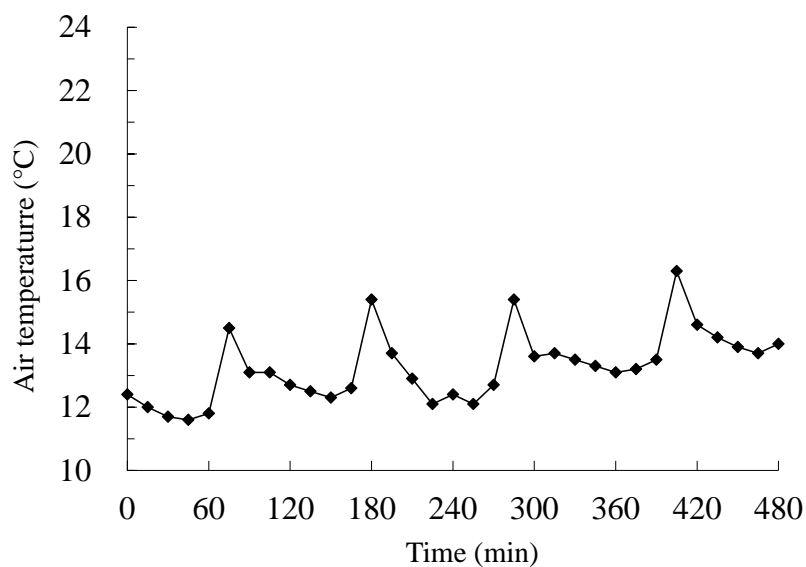
Fig. 2.18 Diameter variations in continuous cutting tests with cutting fluid under temperature increasing condition

2.5 実切削試験による検討

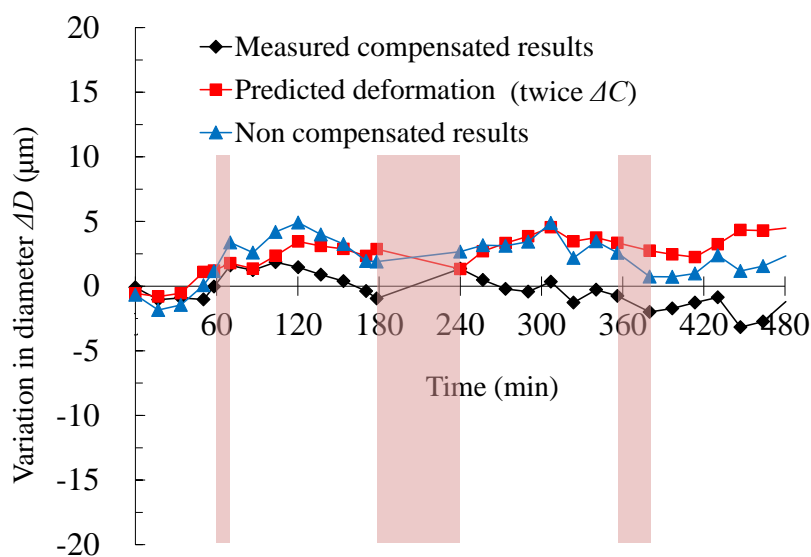
本節では、2.4.1 項までに決定した熱変形予測式を対象の CNC 旋盤にシステムとして組み込み、加工中に計測した温度変化を用いて加工径変化を 1 サイクルごとに予測し、加工プログラム内の位置指令に対してオフセット量として差し引くことで補正を行

いながら実切削試験を行う。ここでは 2.4.2 項と同様に、表 2.11 の加工条件を用いて種々の環境下で切削油を用いた実切削試験を行い、補正効果を確認する。

なお、本節では 2.4.2 項と異なり、実測値は補正後の加工径変化である。そのため、補正前の加工径変化は、補正に用いた予測変形量を抽出し、実測値に予測変形量を加算することで得られる計算値である。



(a)Temperature variation



(b)Diameter variation

Fig. 2.19 Diameter variations in continuous cutting tests with cutting fluid under constant temperature condition

図 2.19 に、恒温環境下で実施した一時停止試験結果を示す。図 2.19(a)は試験時の環境温度の測定結果、図 2.19(b)は加工径変化量の時間変化である。図 2.19(b)において、実測値である補正後の加工径変化を◆、予測変形量を■、計算値である補正前の加工径変化を▲で示す。図 2.19(b)に示すように、補正を行うことで、加工径変化幅は $7\ \mu\text{m}$ から $4\ \mu\text{m}$ に低減しており、良好な補正が行えることが確認された。

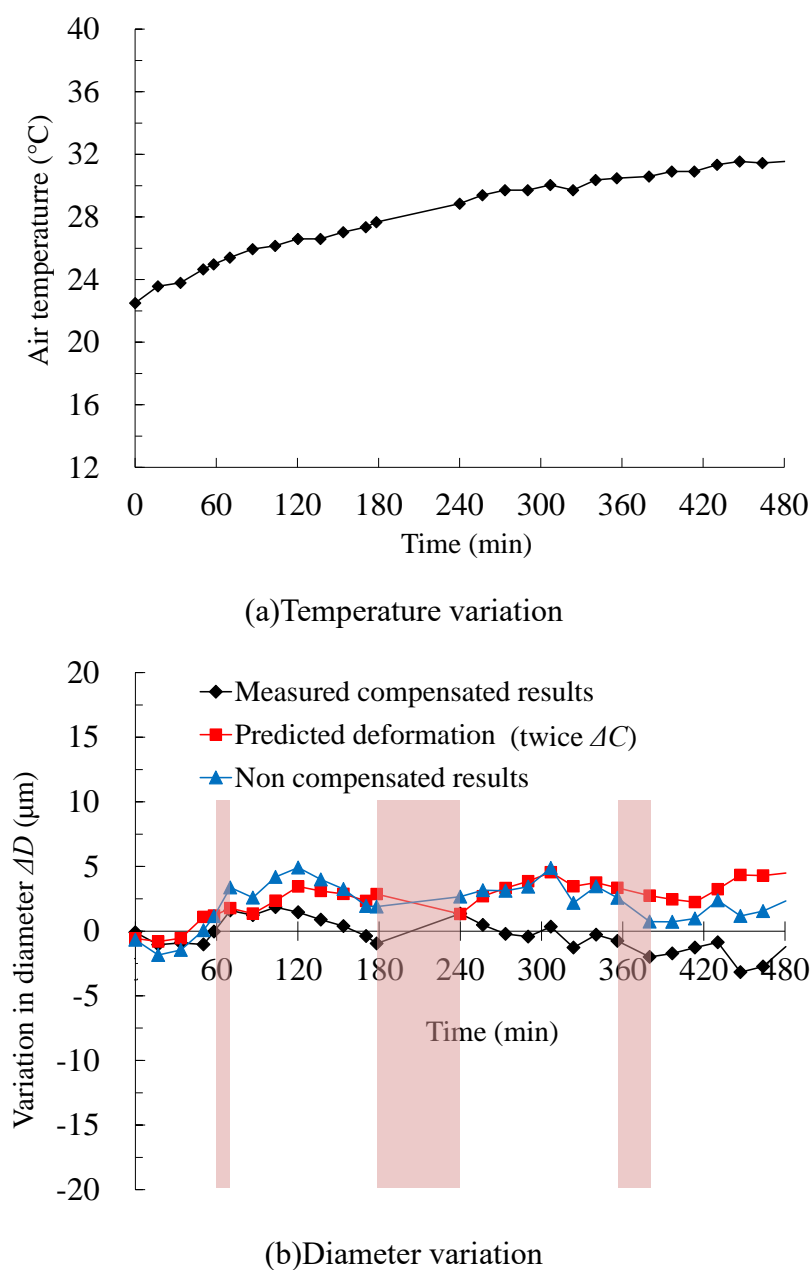


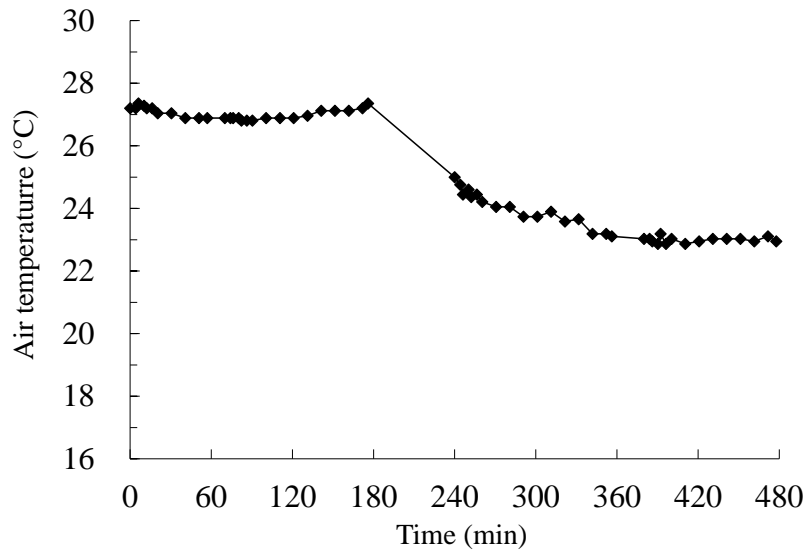
Fig. 2.20 Diameter variations in continuous cutting tests with cutting fluid under temperature increasing condition

次に、環境温度が上昇する環境下において実切削試験を行い、補正効果を確認した。その結果を図 2.20 に示す。図 2.20(a)は試験中の環境温度の時間変化、図 2.20(b)は加工径変化の時間変化である。また、各プロットが示す値は図 2.19 と同じである。

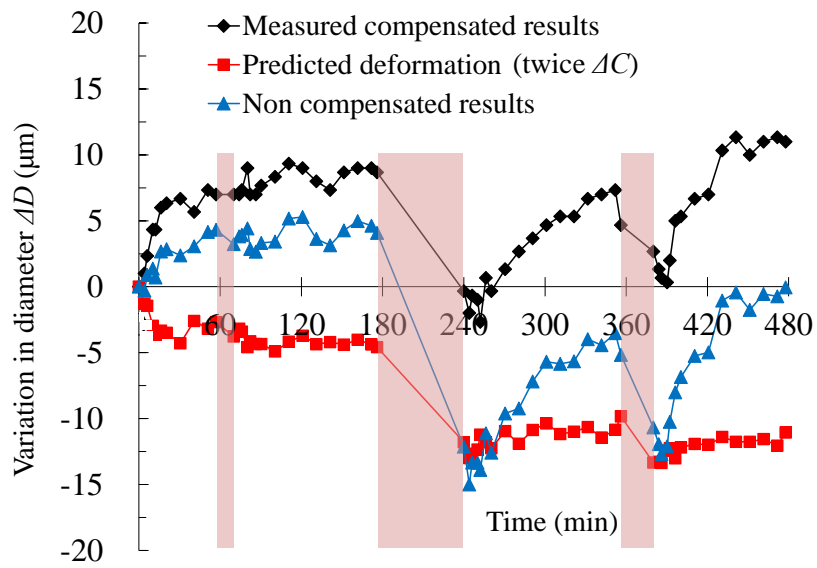
図 2.20(b)に示すように、環境温度が上昇する条件下において、加工径変化幅は補正前、補正後ともに $5\ \mu\text{m}$ 程度であり、補正効果は確認できなかった。これは、 $9\ ^\circ\text{C}$ 程度の大きな環境温度の変動に対して、本試験条件における補正無しの加工径変化幅は微小であったためであると考えられる。ただし、加工径変化量の平均値および標準偏差に着目すると、補正をおこなうことでそれぞれ $2.4\ \mu\text{m}$ から $1.1\ \mu\text{m}$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$ から $0.7\ \mu\text{m}$ に低減しており、補正効果が得られていることが確認される。

続いて、2.3.1 項で述べた熱変形予測式の決定過程において、試験条件に含まれていない環境温度が降下する条件下で実切削試験を行い、補正効果を確認する。試験結果を図 2.21 に示す。図 2.21(a)は試験中の環境温度の変化、図 2.21(b)は加工径変化量の時間変化である。また、各プロットは図 2.20 と同様である。

図 2.21(b)に示すように、環境温度が降下する条件下において、加工径変化量は補正を行うことで $16\ \mu\text{m}$ から $12\ \mu\text{m}$ 程度に抑制されることが確認された。以上より、本章で提案する熱変形予測式は、想定外の気環境温度の降下を含む種々の条件に対して適用可能であると考えられる。



(a) Temperature variation



(b) Diameter variation

Fig. 2.21 Diameter variations in continuous cutting tests with cutting fluid under temperature decreasing condition

2.6 結言

本章では、従来に比べて小形化された旋盤を対象に、提案する熱変形予測式を用いた補正を行うことで、複数の条件下で加工径変化幅を抑制することが可能であることを確認した。

対象とする旋盤は、熱源が集中することを考慮し、その配置を工夫することで想定された使用条件下では安定した加工径変化を示すが、それ以外の条件では加工径変化が複雑化するため、従来の旋盤と同様の補正手法を適用することはできなかった。

このような複雑な熱変形挙動を予測するため、機械全体の熱変形を可動部、非可動部それぞれの影響の和であるとして、切削模擬試験および待機試験で得られた結果を用いて、それらの影響を個別に抽出することで、熱変形予測式を決定することができた。

上記で得られた熱変形予測式を用いた補正を行うことで、切削油を用いない実切削試験に対し、良好な補正結果を得ることができたが、切削油を用いた実切削試験においては、補正を適切に行うことができなかった。

そこで、切削模擬試験で得られた熱変形予測式に対し、切削油を用いた実切削試験結果と予測式による予測結果との差を補正する校正係数を導入することで、切削油を用いた実切削試験に熱変形予測式を適用可能とした。これにより、切削油を用いた実切削試験においても良好な補正効果を得ることが確認でき、熱変形予測式は校正係数の有無を切り替えることで、切削油使用の有無両条件にて寄与することが可能となった。

第3章 実験計画法による広い切削条件に適用可能な校正係数の決定

3.1 緒言

2章で述べたように、熱源配置が緊密な旋盤では、従来に比べて複雑な熱変形挙動を示す。このような複雑な熱変形挙動に対し、2章ではこれを機械可動部と機械非可動部それぞれの熱影響によるものとして切り分けて扱うことで熱変形予測式を決定した。得られた熱変形予測式を用いて補正を行うことで、切削油を使用しない条件下では良好な補正効果を得ることができたが、切削油を使用する条件下では良好な補正効果を得ることができなかった。

そこで、熱変形予測式に校正係数を導入することで、同環境下でも適用可能な熱変形予測式を決定した。このように決定された熱変形予測式を用い、補正を行いながら複数条件下で切削試験を実施することで、その補正効果を確認した。しかし、以上の方法では、切削油使用の有無に応じて校正係数を切り替える必要がある。

使用条件に応じて係数切り替えを行う場合、本予測式を組み込んだ補正システムにおいて校正係数を切り替える機能を設ける必要がある。そのため、ソフトウェアが複雑化することに加えて、加工条件を変更した際に校正係数を切り替え損ねる誤操作のリスクを生じさせ得る。そのため、切削油使用の有無などの機械使用条件によらず、単一の校正係数で補正可能であることが望ましい。また、2章で用いた試験条件は経験的に決定しており、得られた結果の適用範囲に対する妥当性の確認も十分ではない。

熱変形予測式を実用的かつ汎用的にするためには、様々な試験条件に対し、少数の系統的な試験から、試験条件による切り替えを必要としない校正係数を決定する必要がある。また、上記の熱変形予測式は、適用が想定され試験条件下において、その補正効果が保証されることが望ましい。

そこで本章では、2章と同一の旋盤を対象とし、2章で提案した熱変形予測式の式形を基に、実験計画法を利用することで、比較的少数の実切削試験から、切削油の使用の有無によらず、想定された試験条件に適用可能な校正係数を決定する方法を検討する。また、得られた校正係数を用いた熱変形予測式を用いて実切削試験に対して補正を行い、同式の有効性を確認する。

3.2 校正係数の決定方法

対象とする CNC 旋盤において、2.5 節と同様の NC システム内に組み込んだ熱変形を補正するシステムを用いて、1 サイクルごとに工具位置の補正を行いながら実切削試験を実施する。熱変形予測式の式形は以下に示す式を用いる。なお、以下の式形は、2 章で決定した式(2.1), (2.3), (2.2)と基本的に同じである。

$$\Delta C_w = e_1 \times a_1 \Delta T_w + e_2 \times a_2 \Delta T_t + e_3 \times a_3 \Delta T_{ref} \quad (3.1)$$

$$\Delta C_h = e_4 \times b_1 \Delta T_h + e_5 \times b_2 \Delta T_{ref} \quad (3.2)$$

$$\Delta C = \Delta C_w + \Delta C_h \quad (3.3)$$

ここで、 ΔT_w 、 ΔT_t 、 ΔT_{ref} および ΔT_h は、それぞれ図 3.1(図 2.2 の再掲)に示すとおり油圧ユニット近傍、刃物台近傍、参照部および主軸部モータ付近の温度変化量であり、2 章と同一である。

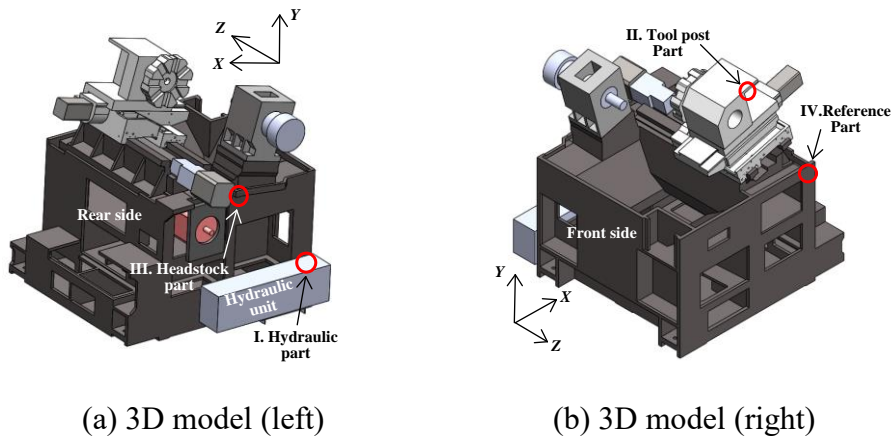


Fig. 3.1 Schematic views of XC-100.

ΔC_h および ΔC_w はそれぞれ機械可動部および機械非可動部の影響による主軸刃物間距離の熱変形量であり、式(3.3)で示すこれらの和が測定によって得られる主軸刃物間距離 C の熱変形による変化量 ΔC となる。

式(3.1), (3.2)において、実験定数 a_i ($i=1\sim 3$), b_j ($j=1\sim 2$)の値は、2.3 節で述べたように、機械可動部、機械非可動部それぞれの影響について、切削模擬試験および待機試験における主軸刃物間距離の変化との関係から決定した。

e_k ($k=1\sim 4$)は、2.4 節で述べたとおり、切削模擬試験では考慮できない切削油使用の影響について、熱変形予測の結果が、切削油を用いて実施した実切削試験の結果と一致するように決定した校正係数である。表 3.1 に、2 章で決定した a_i , b_j , e_k の値を示す。なお、2.3 節で決定した、切削油を用いない場合の熱変形予測式である式(2.1)および(2.3)には校正係数 e_k を必要としないが、ここでは表 3.1 の(c)に示すように、式(3.1)および(3.2)の校正係数 e_k を 1 として扱う。

以上の予測式を用いた補正方法の適用により、校正係数を切り替えることで、切削油使用の有無いずれの条件下においても、補正前に比べて加工径変化幅は半減または $10\ \mu\text{m}$ 程度に抑制されることを 2.5 節で確認した。

Table 3.1 Coefficients of the thermal prediction equations using the different calibration coefficients with or without cutting fluid.

(a) Experimental coefficients of Eq. (3.1)

Coefficient	a_1	a_2	a_3
Value [$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$]	-0.632	-1.772	3.066

(b) Experimental coefficients of Eq. (3.2)

Coefficient	b_1	b_2
Value [$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$]	1.2	-0.99

(c) Calibration coefficients determined in section 2.5

Cutting fluid	e_1	e_2	e_3	e_4
No use	1	1	1	1
Use	1.73	0.40	0.19	1.53

本章では、設定した試験条件に対して実験計画法を用いて立案した試験計画に従い、実切削試験を切削油用の有無両条件下で実施し、得られた結果すべてを用いることで、切削油使用の有無によらず補正が可能となる校正係数を決定することを検討する。

3.3 実験計画法による試験条件の決定

工作機械の発熱状態や熱変形に影響を与える要因として、主軸回転数や環境温度の変化傾向などがあげられる。2 章で提案した手法では、これらの要因を種々変化さ

せた複数の条件下で試験を行い、主軸刃物間距離を測定した。ただし、これらの条件の組合せは経験的に決定しており、試験数や条件設定の妥当性は検討されていない。多数の条件下で試験を行えば、より広範囲な条件に適用可能な熱変形予測式を導くことが可能であるが、試験回数に応じてコストや時間なども増加する。特にワークの準備や交換が必要な実切削試験を、多数回実施することは容易でない。

そこで、本節では実切削試験を対象に、適切な試験条件の組み合わせを効率良く決定するための方法として実験計画法を用いる。実験計画法は、想定される試験条件の組合せから、適切な結果を得るための効率のよい実施条件を決定する方法であり、様々な分野で利用されている。工作機械においてはマイクロエンドミル加工が表面粗さに及ぼす影響の評価⁽⁴⁹⁾や、旋削時のチャタリング発生に影響する加工条件の評価などにおいて、試験条件を決定するために用いられる事例が存在する⁽⁵⁰⁾。

本節では、式(3.1)～(3.3)に示した熱変形予測式の形および実験定数 a_i , b_j は切削模擬試験によってすでに決定されているとして、実験計画法で決定した実切削試験を実施することで、これまで切削油の影響に対する補正に用いていた校正係数 e_k を、切削油使用の有無にかかわらず広範囲な条件に適用可能な値として決定する。

実験計画法では、結果に影響を及ぼす要因を因子、因子の程度を水準とよび、適切な試験条件として各因子の水準の組合せを決定する。本論文では因子として、2章と同じく、温度変化と主軸回転数に着目する。ただし、主軸回転数は加工径によって定まることから、加工径を因子とする。さらに、難削材や加工時間の短いワークの加工を想定し、加工長さや荒加工の加工回数を因子として加えることで、従来よりも詳細に試験条件を設定することが可能となる。

以上のように決定した、本論文における因子である加工径、加工長さ、加工回数、温度変化のそれぞれに対して複数の水準を設定し、L9 直交表を用いて試験条件を決定する。L9 直交表は、3 水準の要因を最大 4 つまで設定できる。加工径は加工終了時の値を、加工回数は 1 サイクル中の荒加工の回数を、加工長さは主軸回転軸方向の加工範囲である。これらの各因子に対し、表 3.2 に示すようにそれぞれ 3 つの水準を設ける。実切削試験では、上記の因子および水準にしたがって荒加工を行い、その後 1 回の仕上げ加工を行うことで 1 サイクルの加工とした。

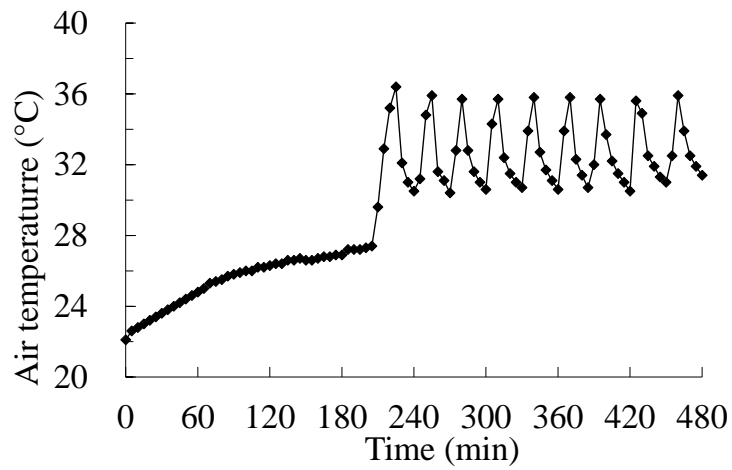
Table 3.2 Factors and levels for the cutting test.

Factor		Level		
		1	2	3
[1]	Diameter [mm]	50	35	20
[2]	Length [mm]	10	30	50
[3]	Times	1	4	5
[4]	Temperature	Increase	Constant	Decrease

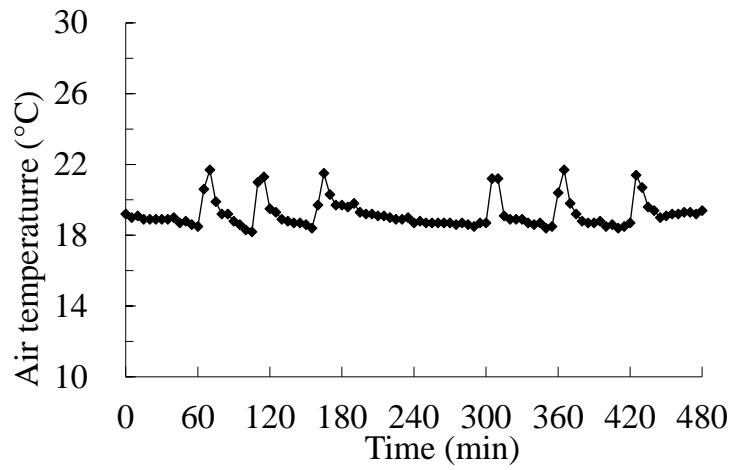
温度変化について、環境温度が上昇する条件では、試験開始前まで 20 °C、試験開始後から 3 時間までは 25 °C、それ以降は 30 °C に、恒温条件では試験開始前から試験終了まで常時 20 °C に、環境温度が降下する条件では試験開始前まで 30 °C、試験開始後から 3 時間までは 25 °C、それ以降は 20 °C に空調装置の温度設定を変更して環境温度を調整した。なお、いずれの場合も、試験開始の 8 時間以上前から空調装置を作動させ、試験開始前の設定温度を維持した。また、温度調整には冷暖房の自動切り替え機能は使用せず、環境温度の上昇時に暖房機能を、降下時に冷房機能をそれぞれ使用した。

試験時間は 2.3.5 項と同様に、一般的な装置の使用状況を想定して 8 時間とした。ただし、試験時間中に保守作業などによる加工停止を想定した装置停止の時間を、試験開始後 1 時間で 10 分間、3 時間で 60 分間、5 時間で 20 分間設定した。なお、上述の空調装置の温度設定は、試験開始後 3 時間の装置停止にあわせて調整した。

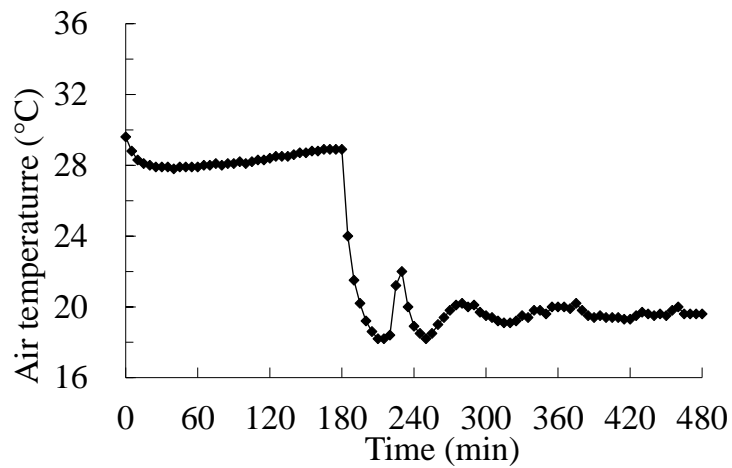
各条件で測定した環境温度の例を図 3.2 に示す。図 3.2(a), (c) に示すように、気温上昇、気温降下それぞれの条件で 10 °C 程度の温度変化が、図 3.2(b) に示すように恒温条件で一様な状態が確認された。なお、いずれの条件でも環境温度の変動が ± 2 °C 程度生じているが、これらは空調装置が制御上、ごく短時間での作動と停止に追従できないためである。また、上述の冷暖房機能の設定により、図 3.2(a) の試験開始後から 3 時間後までのように、空調室外の気温によっては空調装置が動作せず、環境温度の変動がランプ状となる場合がある。しかし、これらの変動が式(3.1)および(3.2)に示した工作機械の参照部の温度変化 ΔT_{ref} に及ぼす影響はわずかである。



(a) Temperature increasing



(b) Constant temperature



(c) Temperature decreasing

Fig. 3.2 Examples of temperature variation results.

なお、切削油の使用は、2章と同様に、有無の2通りとし、本論文では因子として取り扱わない。ただし、L9直交表より決定される9つの試験条件については、切削油使用の有無両条件下でそれぞれ実切削試験を実施することで、切削油が装置の熱変形に及ぼす影響を確認する。切削油を使用するいずれの実切削試験においても、切削油は同一とし、吐出方法や吐出量は2.3.1項と同一である。

L9直交表にしたがって、表3.2に示す各因子に対する水準を直交表に割り振った試験条件L1～L9を表3.3に示す。これらの試験の実施結果より、切削油使用の有無にかかわらず幅広い条件で適用でき、これまでに提案した補正方法と同様に、補正後の加工径変形幅を10 μ m程度以下に抑制することを目標とする熱変形予測式を導く。

Table 3.3 Conditions for the cutting test.

Test Number	Diameter [mm]	Length [mm]	Times	Temperature
L1	50	10	1	Increase
L2	50	30	4	Constant
L3	50	50	5	Decrease
L4	35	10	4	Decrease
L5	35	30	5	Increase
L6	35	50	1	Constant
L7	20	10	5	Constant
L8	20	30	1	Decrease
L9	20	50	4	Increase

3.4 校正係数の決定

切削油使用の有無にかかわらず適用可能な校正係数の値を決定するために、表3.3に示す実験計画法で決定したL1～L9の実切削試験を、切削油使用の有無両方の条件下で実施した。加工条件を表3.4に示す。ワークは、切削油を使用しない試験ではC3604BD快削黄銅材を、切削油を使用する試験ではS45C材を使用し、加工時の半径切込みは、表3.4に示すようにワークの材質ごとに設定した。

Table 3.4 Common cutting conditions.

Cutting fluid	Material	Depth of cut (mm)		Cutting speed (m/min)		Feed rate (mm/min)	
		Rough processing	Finishing	Rough processing	Finishing	Rough processing	Finishing
Non use	S45C	0.2	0.1	150	250	0.3	0.1
Use	C3604BD	2.0	0.5				

なお、工具摩耗による影響を抑え、切削熱を含む装置稼働で生じる熱変形の影響のみを抽出することを目的に、試験では連続して切削を行うのではなく、ダミー動作用のワークを用いて切削時と同じ主軸回転数および送り量を用いた動作を実切削の間に数回行った。その回数は切削油を使用しない場合は 4 回、切削油を用いる場合は 14 回とした。この回数差は、切削油を使用する試験では、切削油を使用しない試験に対して材質および加工条件の差異から工具に対する切削負荷が大きいため、より工具摩耗が生じやすく、その影響を少なくするためである。なお、切削油使用の有無にかかわらず、上記の動作中に工具とワークが接触しないよう、ダミー動作用のワーク直径は、仕上げ寸法に対し 1 mm 小さくした。

試験時間は 2 章と同じく 8 時間とし、装置の電源投入後、油圧ユニットが稼働してから 10 分後に試験を開始した。ワークの切削前の直径は、上述の荒加工および仕上げ加工によって表 3.3 に示す加工径となるように調整した。切削後のワークの加工径は、恒温室で 1 日保管した後に寸法測定器で測定した。以降の試験で用いるワークの材質や形状、加工条件、加工径の測定方法は本節と同一である。なお、実測値として取り扱う加工径変化は加工後のワークの直径の変化であり、これは主軸刃物間距離の変化 ΔC の 2 倍の値となる。

校正係数 e_k ($k=1\sim 4$) の値は、式(3.1)~(3.3)より得られる主軸刃物間距離の変化 ΔC が、実切削試験によって得られる加工径変化の測定値と一致するように準ニュートン法を用いて決定した。得られた校正係数を表 3.5 に示す。なお、式(3.1), (3.2)の実験定数 a_i ($i=1\sim 3$), b_j ($j=1\sim 2$) には表 3.1 の値を、温度変化量 ΔT_w , ΔT_t , ΔT_{ref} , ΔT_h は、L1~L9 の実切削試験での測定値を用いた。準ニュートン法による校正係数の決定時には、切削油使用の有無それぞれの場合で実施した、18 条件すべての実切削試験での測定値を同時に用いた。

Table 3.5 Calibration coefficients.

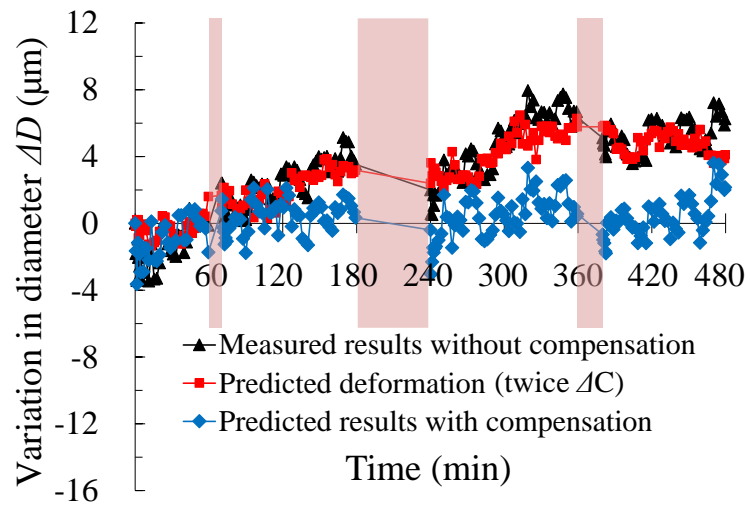
e_1	e_2	e_3	e_4
1.55	0.62	0.29	1.46

表 3.5 の値を用いて、式(3.3)による加工径変化の計算値と実測値との相関係数を試験条件ごとに求めた結果を表 3.6 に示す。表 3.6 に示すように、相関係数は平均で 0.85 と比較的高い値を示した。

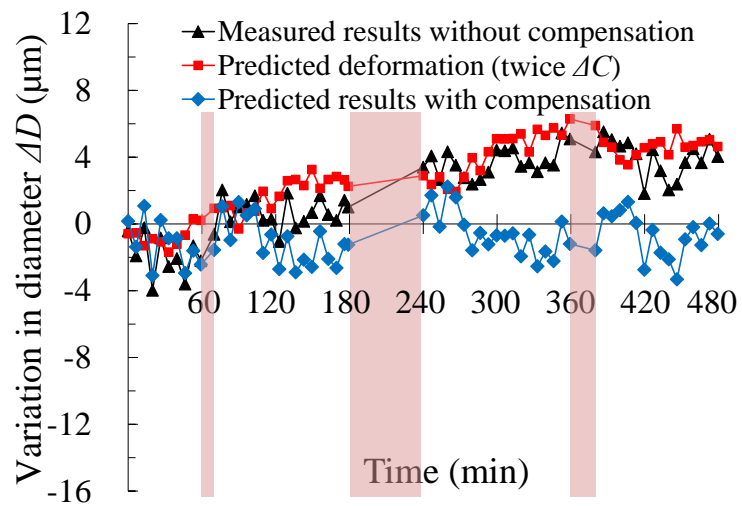
Table 3.6 Correlation coefficients between the diameter variations of measured and predicted.

Cutting fluid	Test number								
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Not use	0.89	0.98	0.98	0.98	0.45	0.92	0.88	0.99	0.78
Use	0.83	0.83	0.92	0.97	0.77	0.62	0.71	0.96	0.91

式(3.3)による実測値の近似結果の例を図 3.3, 3.4, 3.5 に示す。図 3.3(a), (b)は気温を上昇させた L1, 図 3.4(a), (b)は恒温とした L6, 図 3.5(a), (b)は気温を降下させた L8 の条件での結果である。なお、図 3.3(a), 3.4(a), 3.5(a)が切削油を使用しない場合、図 3.3(b), 3.4(b), 3.5(b)が切削油を使用した場合である。各図における▲および■は、それぞれ加工径変化量の実測値および式(3.3)による計算結果を示している。参考として、実測された加工径変化から式(3.3)による加工径変化の予測結果を差し引いて求めた、補正を行った場合を想定した加工径変化を各図に◆で示す。

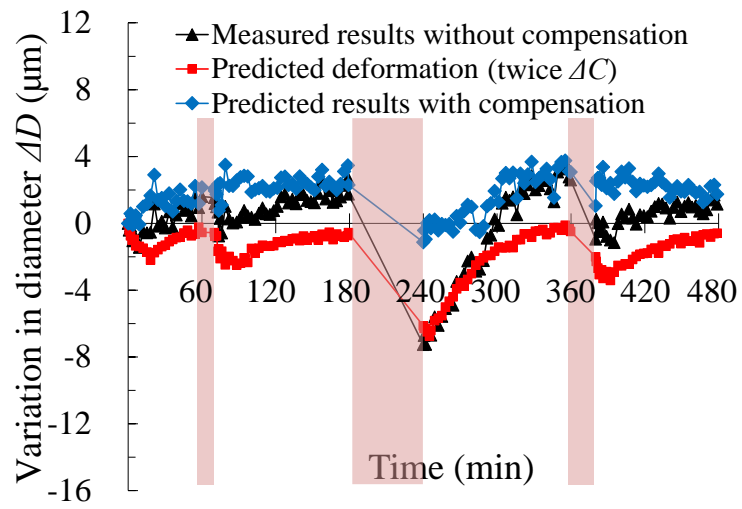


(a) L1 results (without cutting fluid)

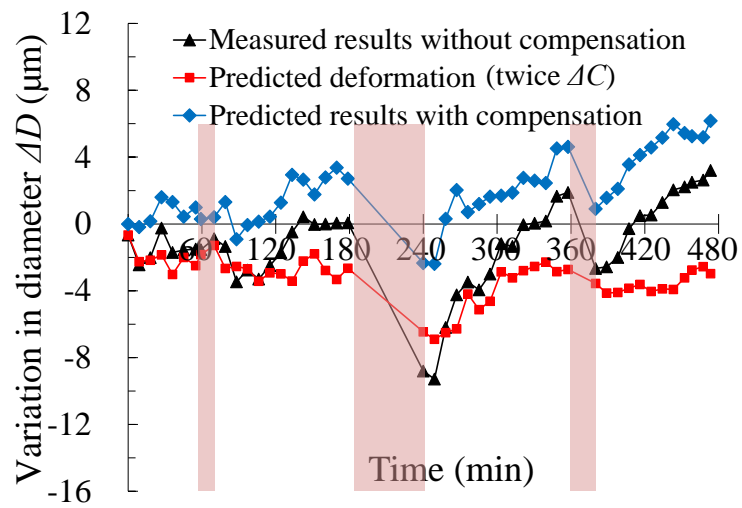


(b) L1 results (with cutting fluid)

Fig. 3.3 Examples of the test results of L1 shown in Table 3.4 with calibration coefficients shown in Table 3.6.

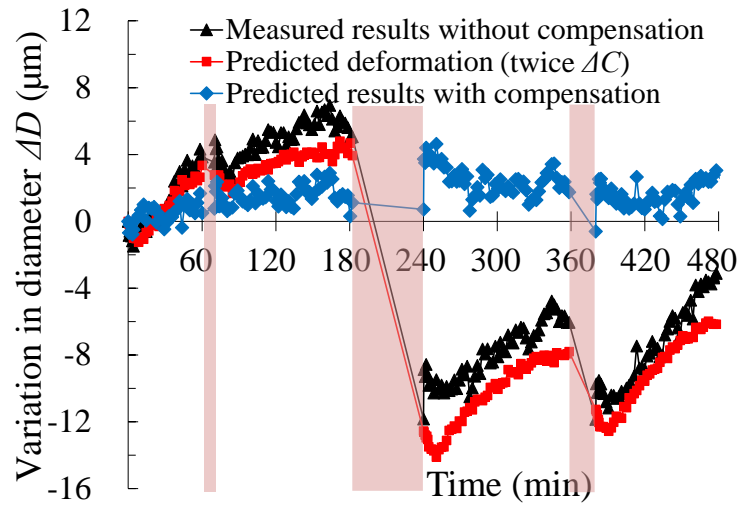


(a) L6 results (without cutting fluid)

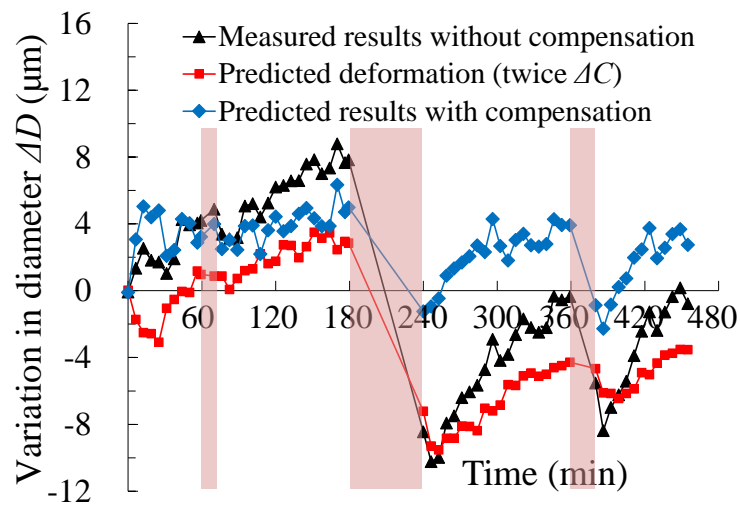


(b) L6 results (with cutting fluid)

Fig. 3.4 Examples of the test results of L6 shown in Table 3.4 with calibration coefficients shown in Table 3.6.



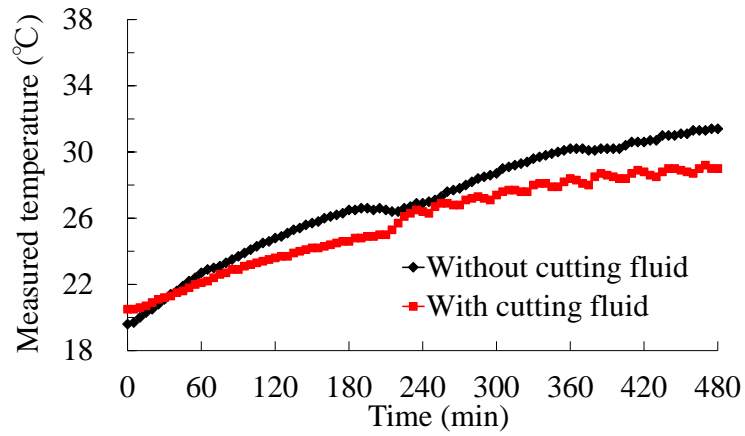
(a) L8 results (without cutting fluid)



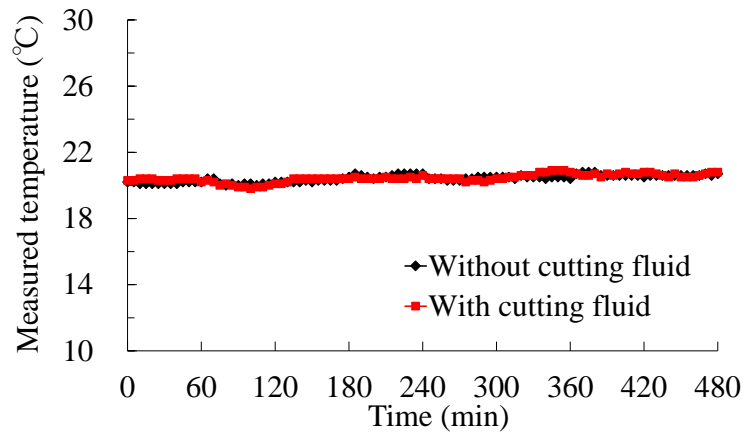
(b) L8 results (with cutting fluid)

Fig. 3.5 Examples of the test results of L8 shown in Table 3.4 with calibration coefficients shown in Table 3.6.

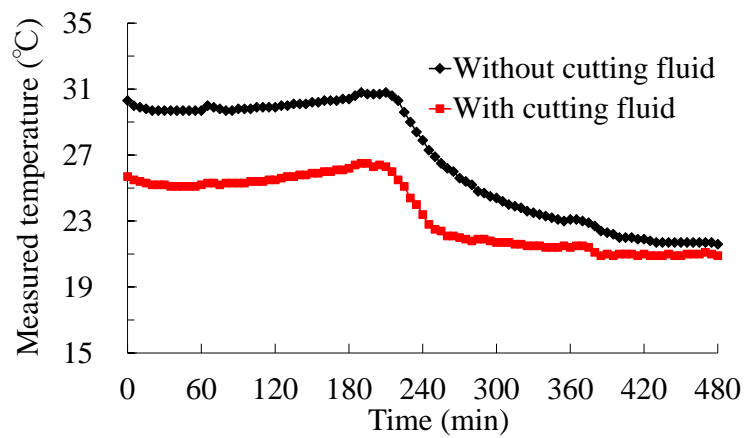
L1, L6 および L8 の各条件における参照部温度 ΔT_{ref} の測定結果は、それぞれ図 3.6(a), (b) および (c) に示すとおりである。参照部温度 ΔT_{ref} は、気温が変化する条件下では図 3.6(a) および (c) に示すように 10 °C 程度の温度変化を示し、恒温条件下においては、図 3.6(b) に示すようにほぼ一定である。また、図 3.6(a), (b), (c) に示すように、図 3.2 で見られた環境温度の急激な変動による影響はわずかである。



(a) L1 (Temperature increasing)



(b) L6 (Constant temperature)



(c) L8 (Temperature decreasing)

Fig. 3.6 Results in temperature variation measured at point IV in Fig. 2.2 (c).

以上の結果より、切削油使用の有無いずれにおいても相関係数が平均的な L1 の条件での結果である図 3.3, 比較的高い L8 の条件での結果である図 3.4 において、熱変形予測式による計算値は実測値とよく一致している。同様な傾向は、図 3.4(a)に示す切削油を使用しない L6 の条件を含む相関係数が約 0.8 以上である他のいずれの条件においても確認された。

3.5 実切削試験による熱変形補正と効果の確認

本節では、3.4 節において補正効果をシミュレーションで検討した熱変形予測式を、対象とする CNC 旋盤に搭載し、補正を行いながら加工を行うことで、補正効果の確認を行う。なお、補正システムは、2.5 節と同様に装置各部の温度変化から予測変形量を 1 サイクルごとに算出し、加工プログラムの指令値から差し引くことで工具位置の補正を行う。

3.5.1 実験計画法による条件下での熱変形補正の確認

本項では、熱変形予測式に式(3.1)~(3.3)を、校正定数に表 3.2(a), (b)の値を使用し、さらに、校正係数には切削油使用の有無にかかわらず表 3.5 の値を用い、実験計画法で決定した 3.4 節と同一の試験条件下で熱変形補正を行いながら切削試験を実施することで、その効果を確認する。本項における実測値は 3.4 節と異なり、熱変形予測式を用いて補正を行った加工径変化であり、補正を行わない場合の加工径変化は、実測値から補正に用いた加工径変化の予測値を差引くことで得た計算値である。なお、補正効果は加工径変化幅のほか、加工径変化の平均値および標準偏差の 3 項目について、補正前後で比較することで評価を行う。

切削油を使用しない場合および使用する場合それぞれで、熱変形補正を適用して L1~L9 の条件について実切削試験を実施した結果を表 3.7 に示す。表 3.7(a), (b)に示すように、切削油を使用しない場合、使用した場合の両条件において、補正を行うことで各 9 条件の加工径変化幅、加工径変化量の平均値、標準偏差のすべての評価値の平均値が低下することが確認された。以上より、校正係数を切り替えることなく、良好に補正が行えていることが確認された。

試験結果の一例として L3 の条件で、切削油を使用しない場合の試験における加工径の時間に対する変化を図 3.7 に示す。図 3.7 の▲は実測した補正後の加工径変化、■は式(3.3)による加工径変化の予測値、◆は実測値に予測変形量を加算して得た、補正を行わなかった場合の加工径変化の予測値を示している。図 3.7 に示すように、補正によって加工径変化幅は 18.6 μm から 6.1 μm に、加工径変化量の平均値および標準偏差はそれぞれ 8.8 μm から 1.7 μm 、6.7 μm から 0.9 μm に低減していることがわかる。

Table 3.7 Results of the cutting test.

(a) Results without cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	11.4	7.3	3.7	1.0	2.1	0.8
L2	10.6	4.1	4.9	1.9	2.5	1.0
L3	18.6	6.1	8.8	1.7	6.7	0.9
L4	21.9	9.0	10.8	2.3	6.8	1.3
L5	10.7	10.6	2.7	2.1	2.0	1.3
L6	10.9	4.9	1.6	1.9	1.6	1.0
L7	12.1	4.8	2.0	1.5	2.0	0.9
L8	18.8	5.4	5.9	1.7	2.9	0.9
L9	11.6	8.5	3.9	1.7	2.5	1.2
Average	14.1	6.7	4.9	1.8	3.2	1.0

(b) Results with cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	9.5	5.6	2.7	1.3	1.6	0.9
L2	11.4	6.0	0.1	0.0	0.6	0.2
L3	18.5	8.4	5.6	4.0	3.9	1.8
L4	20.0	9.9	8.5	2.2	6.7	2.0
L5	6.8	4.5	2.4	1.0	1.3	0.7
L6	12.5	8.6	2.1	2.3	2.0	1.7
L7	10.2	6.4	2.5	3.1	1.8	1.5
L8	19.0	8.6	4.2	2.9	2.7	1.3
L9	9.1	3.9	5.3	0.9	2.3	0.6
Average	13.0	6.9	3.7	2.0	2.5	1.2

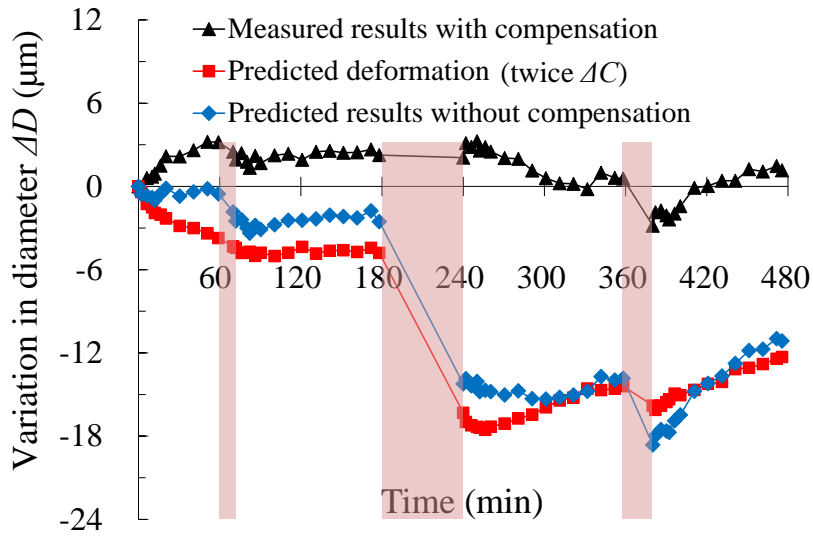


Fig. 3.7 Examples of the test result (L3 without cutting fluid).

3.5.2 実験計画法で用いた条件以外での熱変形補正の確認

本項では、決定した熱変形予測式が、3.5.1 項までで示した L9 直交表による試験条件に含まれない場合においても適用可能であることを確認する。対象とした試験の条件を表 3.8 に示す。加工長さ、加工回数は表 3.3 に示す水準の範囲内であり、気温変化の条件は 2.3.6 項で加工径変化が、2.3.5 項の恒温条件下の結果に対して、顕著に発生したことから、気温上昇とした。なお、加工径は、表 3.3 に示す水準の範囲には含まれないが、ほぼ近傍の値である。なお、表 3.8 に示す以外の条件は、ワークおよび実加工の間隔を含めて表 3.4 と同一である。

Table 3.8 Test conditions of the compensation simulation

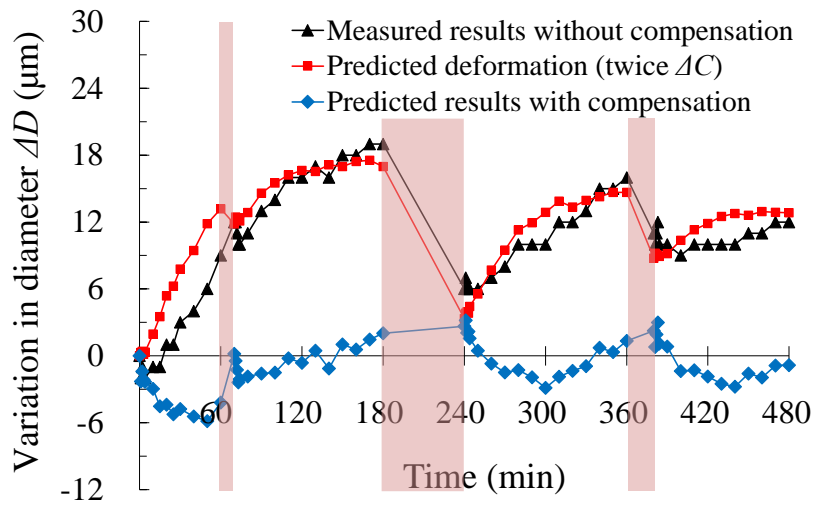
No.	Diameter [mm]	Length [mm]	Times	Temperature	Cutting fluid
1	10	40	2	Increase	No use
2	25	40	2	Increase	Use

同条件の実切削試験における加工径変化量の実測値を図 3.8(a), 3.9(a)に▲で示す。なお、熱変形予測式による補正は行っていない。参照温度に関して切削油

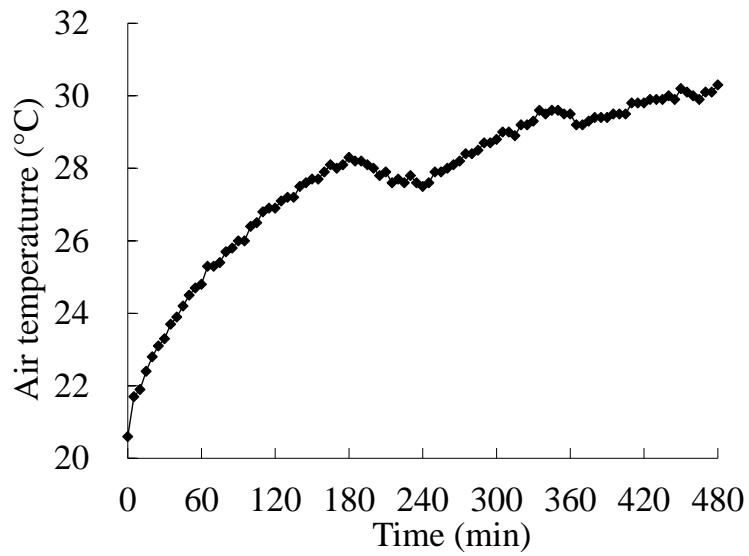
を使用しない場合および使用した場合の変化を図 3.8(b)および図 3.9(b)に示す。図 3.8(b), 3.9(b)に示すように、参照温度は 10 °C 程度上昇している。

これらの結果に対して式(3.3)を用い、校正係数には 3.5.1 項と同様に表 3.5 の値を用いて加工径変化を予測した結果を■、補正を行った場合の加工径変化の計算値を◆で図 3.8(a), 3.9(a)に示す。補正を行うことで切削油を使用しない場合、使用した場合それぞれで図 3.8(a), 図 3.9(a)に示すように、加工径変化幅は 19 μm から 6 μm , 20 μm から 12 μm となり、おおむね 10 μm 程度に低減されている。加工径変化量の平均値および標準偏差についても同様に、補正を行うことでそれぞれ 11 μm から 2 μm および 5.1 μm から 1.7 μm , 15 μm から 5 μm および 5.1 μm から 2.7 μm に低減されることを確認した。

以上のように、L9 直交表で決定される試験条件で決定した校正係数は、同表に含まれない条件においても、想定した試験条件の近傍では良好に補正が行えることが確認された。

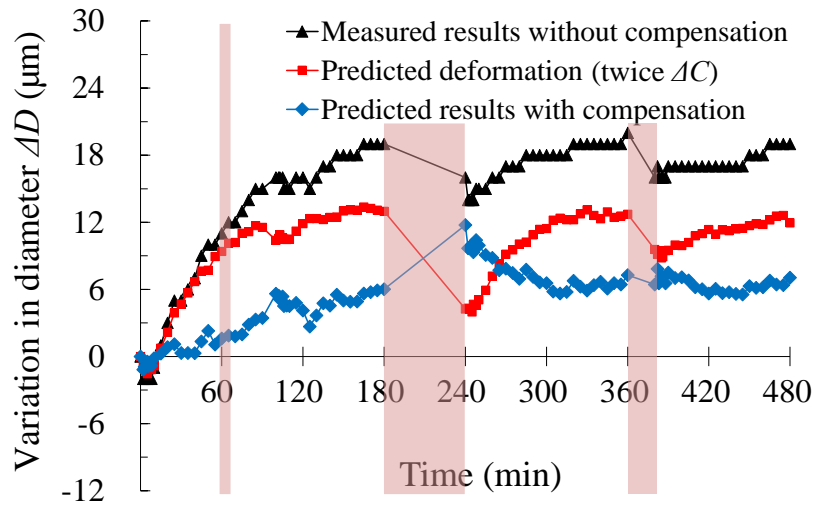


(a) Compensation simulation result

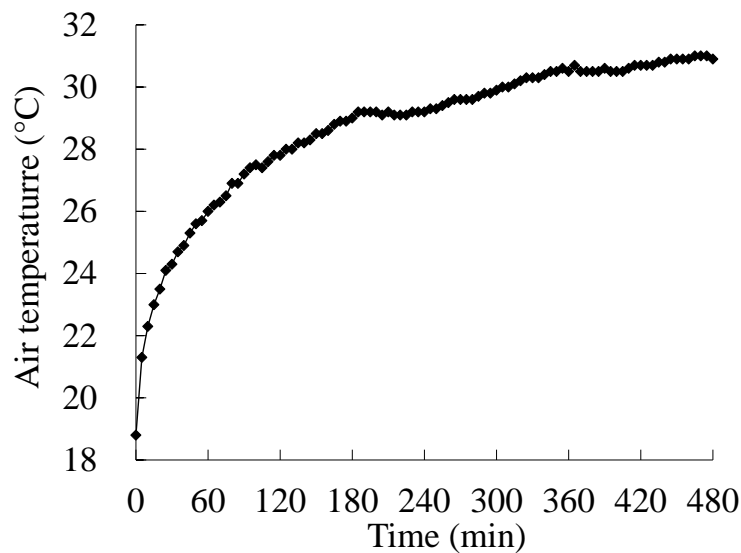


(b) Temperature variation

Fig. 3.8 Results of No.1 shown in Table 9 without cutting fluid.



(a) Compensation simulation result



(b) Temperature variation

Fig. 3.9 Results of No.2 shown in Table 9 with cutting fluid.

3.5.3 従来の方法との熱変形補正の効果の比較

3.5.2 項において、本章で決定した熱変形予測式が、試験条件として想定した因子および水準の範囲内で、かつ L9 直交表で決定した試験条件に含まれない条件下でも適用可能であることを確認した。本項では、2 章で提案した熱変形予測式を L9 直交表の試験条件に適用することでその補正効果をシミュレーションで

検討し、本章における熱変形予測式と同様に予測式決定に用いた試験条件以外にも適用することが可能か確認する。具体的には、3.5.1 項で実施した実切削試験結果における補正前の加工径変化を対象に、試験中の温度変化量と熱変形予測式(3.2)、(3.3)および表 3.1(c)の校正係数を用いることで、2 章で決定した熱変形予測式を用いた補正効果のシミュレーションを行う。シミュレーション結果を表 3.9 に示す。

Table 3.9 Results of the cutting test.

(a) Results without cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	11.4	11.2	0.7	1.1	1.7	2.4
L2	10.6	5.2	0.4	0.1	1.5	0.5
L3	27.4	15.9	0.5	0.5	2.7	2.3
L4	21.9	18.8	1.6	1.0	4.7	3.3
L5	10.7	10.5	0.2	0.6	1.0	2.0
L6	10.9	8.8	0.2	0.5	0.9	1.4
L7	12.1	8.2	0.3	0.5	1.1	1.4
L8	18.8	22.3	1.2	2.4	2.8	5.8
L9	11.6	8.8	0.4	0.5	1.5	1.5
Average	15.0	12.2	0.6	0.8	2.0	2.3

(b) Results without cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	9.5	7.2	0.2	0.1	0.8	0.5
L2	11.4	5.7	0.1	0.0	0.6	0.2
L3	18.5	9.7	0.1	0.1	0.9	0.7
L4	20.0	11.3	0.4	0.1	2.4	0.7
L5	6.8	7.7	0.1	0.1	0.5	0.4
L6	12.5	7.8	0.1	0.1	0.6	0.5
L7	10.2	6.9	0.1	0.2	0.7	0.9
L8	19.0	9.0	0.3	0.2	1.3	1.0
L9	9.1	5.8	0.2	0.0	1.1	0.2
Average	13.0	7.9	0.2	0.1	1.0	0.6

2章で決定した熱変形予測式を適用した場合、切削油を使用しない条件下では、表 3.9(a)に示すように評価値の平均値において、補正を行うことで加工径変化幅は $15.0\ \mu\text{m}$ から $12.2\ \mu\text{m}$ に低減するが、加工径変化量の平均値および標準偏差はそれぞれ $0.6\ \mu\text{m}$ から $0.8\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\ \mu\text{m}$ から $2.3\ \mu\text{m}$ に増加した。また、切削油を使用する条件下では、表 3.9(b)に示すように評価値すべてにおいて、補正を行うことでその平均値が低減することを確認した。

さらに切削油を使用しない条件下では、L8 の条件において補正後の加工径変化幅が $20\ \mu\text{m}$ を超過するなど、同補正方法を適用できない条件が存在することが確認された。

ここで、上記のように補正方法によって改善率に差異が生じた要因について考察する。2章で提案した予測式の決定方法において、実施する試験のサイクルタイムは 60 秒に統一し、主軸回転数と環境温度を種々変化させて試験を実施した。また、切削油を用いた試験条件において、切削模擬試験から決定された実験定数を用いることで補正を行うことができたが、同予測式は切削油を用いた条件には適用できず、校正係数を導入することで同条件における補正を行うことができた。

これに対して、本章で提案する補正方法では、2章の方法で試験条件としていた環境温度の変化と上記の主軸回転数に相当する加工径のほか、加工回数や加工長さを加えた 4 つの要素を因子として、試験条件を決定した。そのため、本章では上記の加工回数と加工長さそれぞれの水準の組合せによってサイクルタイムが変動する。

これにより、主軸の回転時間や回転開始および停止動作の頻度といった、主軸部の温度変化に関わる影響が考慮されたために、サイクルタイムが試験間で統一されたことで、これらの影響が考慮されなかった 2章の結果と比較し、より広範囲の試験条件に対して良好な改善率を示したと考えられる。加えて、実験計画法の適用により、試験条件の範囲拡大に対して少ない試験実施数で、切削油使用の有無にかかわらず適用可能な校正係数が決定された。また、決定された校正係数は、上記のように従来の切り替えが必要な場合と比べて同等以上の効果が期待できることを確認した。

以上の結果から、実験計画法により決定した校正係数を用いることで、従来の補正方法と異なり校正係数を切削油使用の有無によって切り替える必要のない本補正方法の妥当性が確認された。

3.6 結言

本章では、切削模擬試験で得られた試験結果を用いて決定される熱変形予測式について、実験計画法による比較的少数の試験実施により、校正係数を決定する手法を提案した。これにより、前章で述べた従来の手法では切削油使用の有無で切り替えが必要であった校正係数を、切削油使用の有無によらず同一の値とし、予測式を用いた補正を用いることで加工径変化量を、切削油使用の有無を含む幅広い条件下で 10 μm 程度に抑制可能であることを確認した。これにより、ワークの消費などをともなう実切削試験の実施を少数にしながら、実験計画法で設定した条件の範囲で適用することが可能な校正係数を導くことができた。

本章で決定した校正係数は、上述のように切削油の使用条件による切り替えが不要なため、数値制御への組み込み時および装置使用時の設定も簡略化でき、さらに係数の設定誤りを防ぐことが可能となる。

本章では、従来の熱変形予測式を基として、校正係数決定に必要な実切削試験に対して実験計画法を適用したが、これらの手法は熱変形予測式の決定時への適用も有効であると考えられる。そこで次章では、熱変形補正の対象機種を変更し、対象機種における熱変形予測式の決定に必要な試験条件決定に実験計画法の適用を試みる。あわせて、前章で述べた可動部、非可動部の影響を求めるために実施した切削模擬試験についても、実験計画法を用いた実切削試験結果から熱変形予測式を決定することで省略するなど、より効率化できないかを検討する。

第4章 汎用的な熱変形予測式の決定方法

4.1 緒言

3章では、実験計画法を試験条件の選定に適用することで、比較的少数の実切削試験の実施によって熱変形予測式を決定し、その適用範囲の妥当性を確認することができた。しかし、熱変形予測式の形、実験定数ならびに温度測定点については、切削模擬試験を含む十分な数の試験実施や、結果に対する分析・考察を行うことで決定されていることが前提であり、適用範囲の拡大ならびに決定方法が効率化されたのは、校正係数の決定についてのみである。そのため、上記の熱変形予測式の決定方法の適用は、対象とした旋盤でのみ有効性が確認されており、同手法が他の旋盤に対して適用可能かは不明である。

そこで本章では、対象とする旋盤を選ばず、汎用的に適用可能な熱変形予測式を決定する効率的な方法を検討する。具体的には、まず、工作機械の各部に生じる温度変化の類似性を基に温度測定位置の候補を分類し、類似した温度変化量を示す測定位置から代表とする測定位置を選択する。次に、選択した温度測定位置における温度変化を変数とする簡便な熱変形予測式の基本形を設定し、温度測定位置の組み合わせを変えて得られる複数の予測式の候補から、最適な式を選択する。さらに、予測式決定に用いる試験実施数は、実験計画法を用いることで効率化する。

これらにより、3章のように対象装置ごとに熱変形予測式の形および温度測定点を多数のデータの考察や経験から決定することが不要となるため、汎用的かつ効率的に適用可能な熱変形予測式が決定可能となる。以上の提案手法を複数の旋盤に対して適用し、決定した熱変形予測式を用いて、実切削試験に対して熱変形補正を行うことで、その効果を確認する。

4.2 熱変形予測式および温度測定点の決定方法

4.2.1 汎用的な熱変形予測式の設定

3章では、切削模擬試験および待機試験によって決定した熱変形予測式に対して、温度測定点および実験定数を決定し、その後実験計画法を用いた実切削試験を

行うことで、校正係数を効率的に決定した。しかし、同提案手法は上述の切削模擬試験など、装置の特性を把握するための十分な試験と分析がされていることを前提としていた。そのため、それらの特性が明らかでない装置を対象とする場合は、上記の予測式決定のための試験に加えて、特性把握のための多数の試験実施が必要とされる。

これに対し、熱変形予測式を簡便な形に設定し、各種切削試験の結果のみから機械的に温度測定点および実験定数を決定することが可能となれば、本提案を用いて熱変形予測式の決定手法が、対象とする装置を選ばずに適用可能となると考えられる。

そこで本項ではまず、上記の熱変形予測式の式形を式(4.1)のように設定した。

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n a_i \Delta T_i \quad (4.1)$$

ここで、 ΔC は主軸刃物間距離の変化の予測量、 a_i ($i = 1 \sim n$) は実験定数、 ΔT_j ($j = 1 \sim n$) は各温度測定点における温度変化量、 n は温度測定点数である。熱変形予測式は、3章の結果および同章における熱変形予測式(3.1)および(3.2)から、温度測定点4か所に対応可能であると判断して、本論文では $n = 4$ を採用した。予測式中の実験定数は、各温度測定点を組み合わせることで予測式の候補を取得し、それらを用いて得られる予測量と、実施した試験の加工径変化との残差二乗和が最小となるように決定される。なお、実切削試験における温度測定は、機械全体の数十か所で行うため、温度測定点すべてを組み合わせ、予測量ならびに実験定数を計算することには莫大な時間が必要であり、非効率である。そのため、この計算を効率化するため、温度測定点をその類似性に応じて分類することを検討する。

4.2.2 温度測定点の選出および実験定数の決定結果

本項では、熱変形予測式に用いる温度測定点について、その温度変化傾向から同様の傾向を示す箇所で分類する手法を検討する。

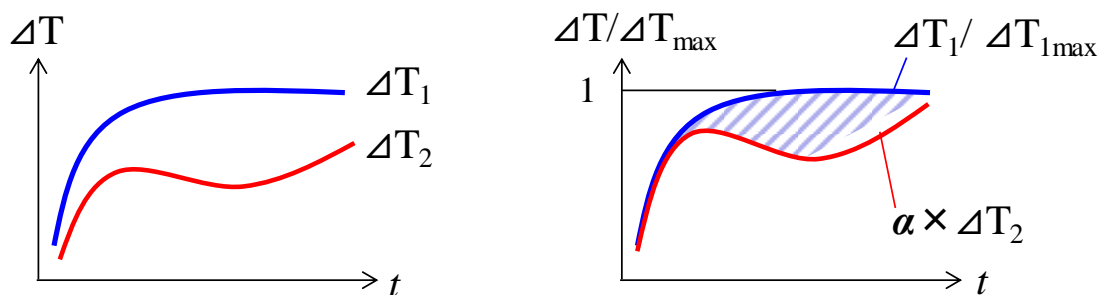
異なる温度測定点同士の温度変化傾向を評価するため、本項では類似度というパラメータを定義する。類似度の算出方法は以下に示すとおりである。

先ず、図 4.1(a)に示すように、ある試験条件において、比較する温度測定点 2 つを

任意に選出する. ここでは測定点 1 を基準側, 測定点 2 を比較対象とする.

基準側の温度変化 ΔT_1 に対し, 図 4.1(b)に示すように温度測定点 1 の最大温度変化 $\Delta T_{1\max}$ で除することで, 温度測定点 1 の温度変化を無次元化する. ついで, 比較対象の温度測定点 2 の温度変化 ΔT_2 に対して係数 α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) を乗じ, これと上記の無次元化した測定点 1 の温度変化 ($\Delta T_1 / \Delta T_{1\max}$) との残差二乗和を算出する. この残差二乗和を, 対象とするすべての試験に対して算出し, これらの総和を測定点 1 と測定点 2 の類似度と定義する. そのため, この類似度は値が小さいほど, 両温度測定点の温度変化傾向は強い相関を示すこととなる. なお, 係数 α は類似度が最小となるように決定される.

以上の類似度を, すべての温度測定点の組合せに対して実施し, 類似度の低い順に温度測定点の組み合わせを抽出し, 分類することとした. 予測式の決定に際しては, これら分類されたグループの中から代表点を 1~2 点程度選択する.



(a) Comparison of temperature variation

(b) Calculation of similarity

Fig. 4.1 Resemblance calculation of temperature measurement points

4.2.3 熱変形予測式決定のための試験条件

熱変形予測式の決定に用いる試験条件は, 3 章と同様の因子および水準を引き続き適用する. 因子および水準の組合せを表 4.1 に, これらを L9 直交表に適用し, 決定した試験条件を表 4.2 に示す.

実切削試験は 3 章と同様に切削油使用の有無両条件下で実施する. 被削材も同様に, 切削油を使用しない場合は C3604BD 材, 切削油を使用する場合は S45C 材を使用し, 切削条件は表 4.3 の値を用いる.

なお、被削材は5分ごとに1度加工を行い、それ以外はダミー用ワークを取り付けて、実切削試験と同様の動作を行う。また、試験開始から1時間、3時間、5時間後に、休憩時間を想定した機械停止時間をそれぞれ10分、60分、20分設けた。

以上で決定した手法を用いて、主軸サイズの異なる2つのCNC旋盤を対象に、本提案手法を適用し、その効果を確認する。

Table 4.1 Factors and Levels

Factor		Level		
		1	2	3
[1]	Diameter (mm)	50	35	20
[2]	Length (mm)	10	30	50
[3]	Times	1	4	5
[4]	Temperature	Increase	Constant	Decrease

Table 4.2 List of test conditions assigned to the L9 orthogonal table

Test Number	Diameter (mm)	Length (mm)	Times	Temperature
L1	50	10	1	Increase
L2	50	30	4	Constant
L3	50	50	5	Decrease
L4	35	10	4	Decrease
L5	35	30	5	Increase
L6	35	50	1	Constant
L7	20	10	5	Constant
L8	20	30	1	Decrease
L9	20	50	4	Increase

Table 4.3 Cutting conditions

Cutting fluid	Depth of cut (mm)		Cutting speed (m/min)		Feed rate (mm/min)	
	Rough processing	Finishing	Rough processing	Finishing	Rough processing	Finishing
Non use	0.2	0.1	150	250	0.3	0.1
Use	2.0	0.5				

4.3 主軸サイズ 6 インチの旋盤への適用 -XT-6-

本節では、2 および 3 章で対象とした XC-100 と同じ主軸サイズの CNC 旋盤 XT-6 を対象に、実験計画法を用いて試験条件を決定し、熱変形予測式を導くとともに、その補正効果を確認する。

4.3.1 対象装置

対象とする装置は、主軸に 6 インチの油圧駆動である三爪チャックとタレット形の刃物台を持つ、2 軸スライド構造の CNC 旋盤 XT-6 である。装置の主な仕様を表 4.4 に、全体写真を図 4.2(a)に、内部構造の 3 次元簡易モデルを図 4.2(b), (c)に、可動部の概略を図 4.2(d)に示す。

装置は XC-100 と同様に、長さ、幅および高さがおおよそ 4.0, 3.0 および 3.0 m であるビニールで覆った簡易的な空調室内に設置し、冷房能力 10.9 kW, 暖房能力 14.0 kW の空調装置を用いることで環境温度の調整を行った。なお、環境温度は、装置、ビニール壁面および送風経路上から十分に離れた位置で、T 形熱電対を用いて測定した。また、機械各部の温度は、表 4.5 に示す機械各部の 22 ヶ所に設置した T 形熱電対を用いて測定した。

Table 4.4 Specifications of CNC lathe XT-6

Head stock	Height oh the center from floor (mm)	950
	Max. spindle speed (min^{-1})	4,500
Tool post	Max. stroke of X axis (mm)	90
	Max. stroke of Z axis (mm)	280
Motor	Power of spindle motor (kW)	AC 7.5/5.5
	Power of hydraulic motor (kW)	AC 0.75
Weight (kg)		2,300
Size : length×width×height (mm)		1,360×1,370×1,700

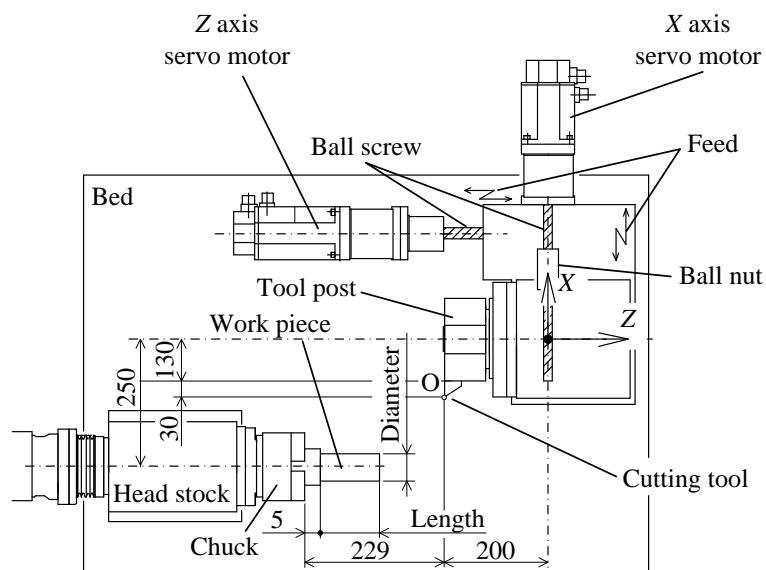
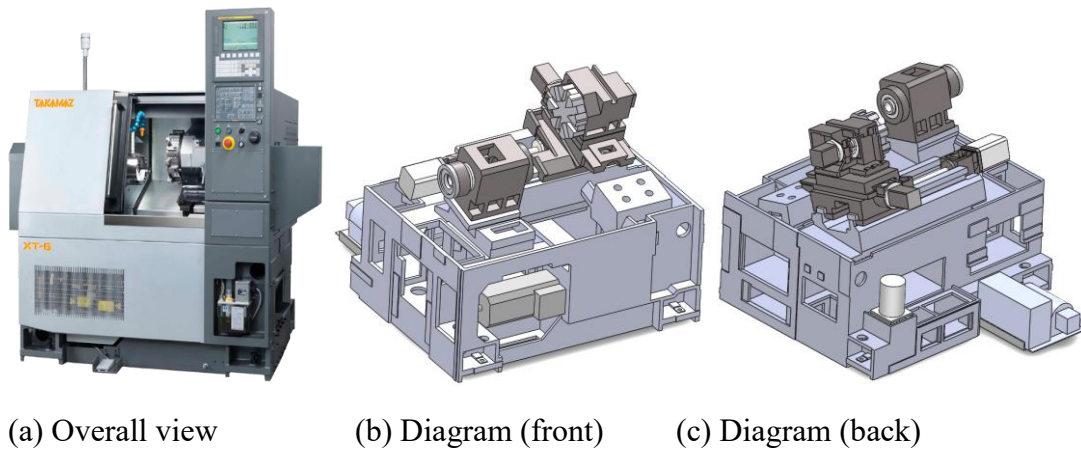


Fig. 4.2 Overall view of XT-6

Table 4.5 List of temperature measurement points

Ch 1	Chuck side of head stock	Ch 12	Left front side of inside bed
Ch 2	Cylinder side of head stock	Ch 13	Spindle motor
Ch 3	Chucking cylinder	Ch 14	Front side of bed under head stock base
Ch 4	Front side of head stock	Ch 15	X axis ball screw
Ch 5	Rear side of head stock	Ch 16	Hydraulic unit
Ch 6	Bed under Z axis servo motor	Ch 17	Bed under headstock
Ch 7	Z axis servo motor	Ch 18	Room temperature
Ch 8	Left front side of bed	Ch 19	Outdoor temperature
Ch 9	Left rear side of bed	Ch 20	Housing of turret
Ch 10	Right front side of bed	Ch 21	Bed around hydraulic unit
Ch 11	Right rear side of bed	Ch 22	Rear side of bed under head stock base

4.3.2 温度測定点の選出および実験定数の決定結果

表 4.2 および 4.3 の条件に従い、実切削試験を実施し、類似度の算出を行った。なお、実際の試験において、切削油を使用する L2 および L3 の条件においてのみ、加工径変化幅が他の条件に対して大幅に増加する結果が確認された。そこで、他の条件と同様に 5 分ごとに加工を行いながら、同刃物台の別の位置に同様に設置した工具を用いて、15分ごとに同条件で加工を行い、両者の加工径変化を比較した。その一例として、切削油を用いた L3 の条件における試験結果を図 4.3 に示す。図 4.3 の△は 5 分ごとの加工径変化、▲は 15 分ごとの加工径変化を示す。

図 4.3 に示すように、5 分ごとの結果は 15 分ごとの結果に比べて加工径が増大する結果となったことから、両者の差は工具摩耗による影響と考えられる。そのため、本項における実切削試験の L2 および L3 の条件においては、工具摩耗による影響を軽減するため、切削熱などの影響を考慮する目的で他の条件と同様に 5 分ごとに加工を行い、これに加えて 5 分ごとと同様の別の工具を用いて 15 分ごとに加工径変化の測定用に加工を行うこととした。

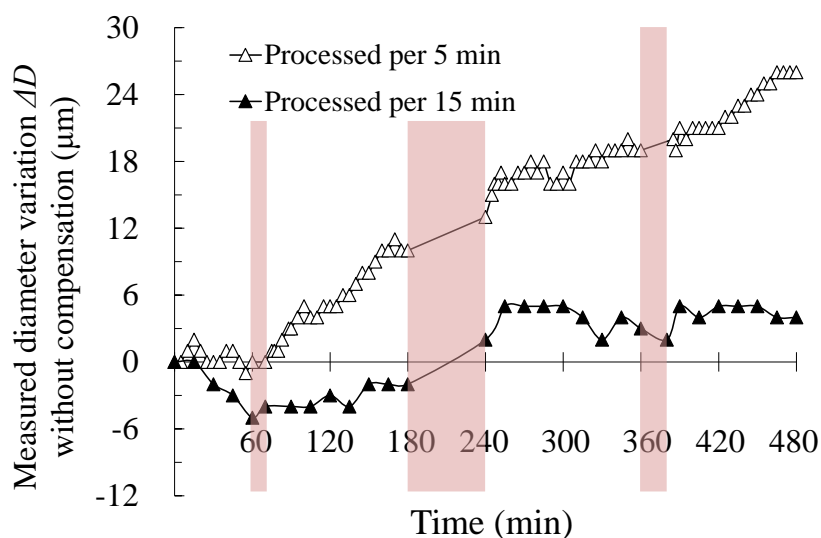


Fig. 4.3 Results in L3 condition with cutting fluid

算出した類似度の結果を図 4.4 に示す。この結果に対して、同一温度測定点を除く 2 点間の類似度を、その値の低いものから順次抽出し、重複する組合せを省いてグル

一プ分けを行った. その結果を表 4.6 に示す. 表 4.6 に示すように, 図 4.4 の結果から温度測定点は 9 グループに分類された. なお, 同表において, 同じグループに含まれる温度測定点の温度変化は, 同様の傾向となることを示す.

	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8	Ch9	Ch10	Ch11	Ch12	Ch13	Ch14	Ch15	Ch16	Ch17	Ch18	Ch19	Ch20	Ch21	Ch22
Ch1	700	707	701	726	696	683	699	715	730	580	581	677	703	688	595	700	702	626	594	673	698	700
Ch2		183	298	251	189	203	230	203	190	342	196	187	387	307	187	320	250	191	342	196	207	183
Ch3			92	326	304	377	110	340	443	638	420	116	66	396	297	82	393	485	465	406	396	330
Ch4				251	272	266	272	261	258	349	237	247	423	305	234	352	251	238	371	265	280	258
Ch5					176	205	240	224	180	320	163	195	399	327	196	324	269	166	339	193	194	176
Ch6						209	310	222	212	298	173	250	481	361	197	394	301	182	339	200	220	191
Ch7							114	269	351	563	357	127	102	358	253	118	334	382	424	342	344	263
Ch8								212	205	343	218	224	445	319	218	361	281	210	344	243	228	226
Ch9									227	294	183	247	573	370	242	463	308	199	332	214	226	187
Ch10										177	203	438	684	377	319	634	343	266	337	275	252	308
Ch11											158	274	523	321	175	449	248	188	284	139	188	153
Ch12												129	131	330	223	130	288	256	395	282	271	205
Ch13													40	494	377	73	507	589	524	516	516	431
Ch14														360	339	424	337	343	421	378	406	326
Ch15																197	309	278	218	355	197	242
Ch16																	92	419	507	483	438	428
Ch17																		284	264	375	301	320
Ch18																			182	328	173	201
Ch19																				230	307	354
Ch20																					194	219
Ch21																						238
Ch22																						

Fig. 4.4 Calculated resemblance of each temperature measurement point of XT-6 calculated from the test results of all 18 conditions

Table 4.6 Grouping results of temperature measurement points

Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	Group 9
Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch8	Ch10	Ch14	Ch17	Ch19
	Ch22	Ch7						
	Ch5	Ch12						
	Ch11	Ch13						
	Ch18	Ch16						
	Ch20							
	Ch21							
	Ch9							
	Ch6							
	Ch15							

上記の結果を参考に, 各グループから代表となる温度測定点を選択し, 式(4.1)に選択した温度測定点を総当たりで組み合わせることで, 熱変形予測式の候補を取得する. これらの予測式の候補すべてに対して実切削試験結果への近似を行うことで, 実験定数 a_i および温度測定点を計算した. なお, この近似には Excel のソルバ機能を用

いて、加工径変化の実測値と ΔC の直径換算値との残差二乗和が最小となるように行った。上記のように実験定数を計算した熱変形予測式の中から、温度測定の容易さと近似結果を用いた各試験結果への補正効果を参考に最適な熱変形予測式を決定した。決定した熱変形予測式の温度測定点および実験定数を表 4.7 に示す。

Table 4.7 Temperature measurement points and experimental constants

i	1	2	3	4
ΔT_i	Ch.6	Ch.8	Ch.17	Ch.20
a_i	2.69	-2.41	0.25	0.13

表 4.7 の値および式(4.1)を用いて、実施した切削油を使用しない場合および切削油を使用する場合の全 18 条件に対して、加工径変化量を近似した結果をそれぞれ表 4.8(a)および(b)に示す。実施した 9 条件の加工径変化幅は、切削油を用いない場合、切削油を用いる場合で補正を行うことでそれぞれ平均 9.6 μm から 4.6 μm , 8.3 μm から 6.7 μm に低減することが確認された。加工径変化量の平均値および標準偏差についても、同様に補正を行うことで値が低減することが確認された。なお、切削油を用いる場合の L3, L6 および L8 の条件において、加工径変化幅は補正により増大するが、これは補正前の加工径変化量が 7 μm 以下と微小であり、近似が困難であったためと考えられる。また、これらの条件における加工径変化量の平均値および標準偏差も補正前後で値は同程度であり、加工径変化挙動自体は補正前と同様であることが確認された。

Table 4.8 Correction effect using approximate results calculated by the prediction equation

(a) Without cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	12.0	4.7	6.8	1.5	2.9	1.1
L2	7.0	3.7	3.4	2.0	2.0	0.9
L3	9.0	3.4	4.1	0.9	2.7	0.8
L4	9.0	5.5	4.2	1.7	2.7	1.2
L5	11.0	3.6	6.4	1.0	2.6	0.8
L6	10.0	4.8	3.7	2.5	2.8	1.0
L7	8.0	3.9	3.5	1.5	2.3	1.0
L8	9.0	6.2	4.5	3.3	2.5	1.3
L9	11.0	5.8	5.5	2.3	2.9	1.7
Average	9.6	4.6	4.7	1.9	2.6	1.1

(b) With cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	8.0	6.0	3.5	2.2	2.4	1.3
L2	7.0	6.9	1.0	0.7	1.9	1.4
L3	5.0	8.9	1.1	1.2	1.8	2.4
L4	10.0	4.6	3.6	2.3	2.4	1.1
L5	10.0	4.0	5.4	1.7	3.2	1.2
L6	6.0	6.9	2.8	3.2	1.6	1.7
L7	13.0	8.4	8.9	6.1	2.9	1.4
L8	5.0	6.9	2.4	2.7	1.5	1.7
L9	11.0	7.4	3.2	2.1	3.0	1.7
Average	8.3	6.7	3.5	2.5	2.3	1.6

4.4 主軸サイズ 8 インチの旋盤への適用 -XT-8-

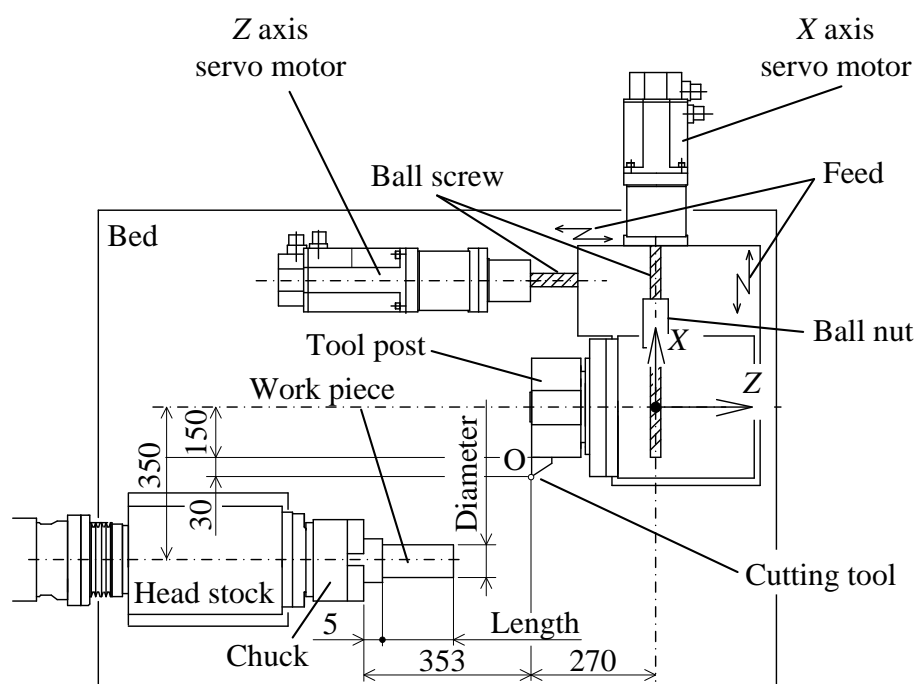
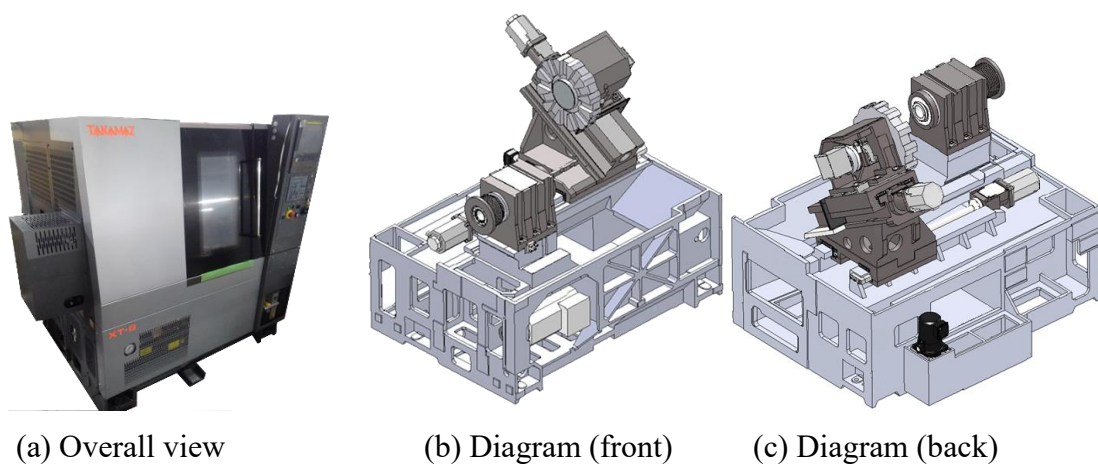
4.3 節では、類似度および実験計画法を用いた熱変形予測式の決定手法を主軸サイズ 6 インチの旋盤に適用することで、切削模擬試験を実施することなく、効率的に熱変形予測式を決定可能であることを確認した。そこで本節では、4.2 節で提案し、4.3 節で有効性を確認した手法を、同節における対象と異なる機種へ適用し、決定した熱変形予測式による補正効果を確認する。

4.4.1 対象装置

対象とする装置は、主軸に 8 インチの油圧駆動である三爪チャックを持つ、2 軸スライド構造のタレット形の CNC 旋盤 XT-8 である。装置の主な仕様を表 4.9 に、全体写真を図 4.5(a)に、内部構造の 3 次元簡易モデルを図 4.5(b),(c)に、可動部の概略を図 4.5(d)に示す。対象とする機種は、3 章および 4.3 節で対象とした、主軸サイズ 6 インチの旋盤に比べて大きく、また表 4.9 に示すように、主軸モータの出力も増加している。

Table 4.9 Specifications of XT-8

Head stock	Height oh the center from floor (mm)	1,050
	Max. spindle speed (min^{-1})	3,500
Tool post	Max. stroke of X axis (mm)	190
	Max. stroke of Z axis (mm)	400
Motor	Power of spindle motor (kW)	AC 11.5/7.5
	Power of hydraulic motor (kW)	AC 1.5
Weight (kg)		3,200
Size : length×width×height (mm)		1,600×1,535×1,700



(d) Movable parts overview chart

Fig. 4.5 Overall view of XT-8

4.4.2 温度測定点の選出および実験定数の決定結果

実切削試験は、4.3 節において XT-6 用に決定した表 4.1 および表 4.2 の条件を用いる。試験は切削油使用の有無両条件下で行い、被削材はそれぞれ S45C 材、C3604BD 材とした。切削条件は表 4.3 の通りとした。なお、試験中の温度測定については、3 章と同様に T 型熱電対を使用し、表 4.10 に示す全 30 箇所測定を行った。

Table 4.10 List of temperature measurement points

Ch 1	Chuck side of head stock	Ch16	Spindle motor BKT
Ch 2	Cylinder side of head stock	Ch17	Middle side of bed behind machining camber
Ch 3	Chucking cylinder	Ch18	Hydraulic oil
Ch 4	Left front side of bed	Ch19	Room temperature
Ch 5	Left rear side of bed	Ch20	Inside air temperature control panel
Ch 6	Right front side of bed	Ch21	Inside air temperature of power unit
Ch 7	Right rear side of bed	Ch22	Air temperature around head stock
Ch 8	Bed under Z axis servo motor	Ch23	Air temperature around Z axis slide
Ch 9	Front side of Z axis slide	Ch24	Air temperature around cutting area
Ch 10	Inner front side of head stock base	Ch25	Air temperature around spindle motor
Ch 11	Inner middle side of head stock base	Ch26	Cutting fluid
Ch 12	Inner rear side of head stock base	Ch27	Inside air temperature of bed
Ch 13	X axis sball screw	Ch28	Front side of bed behind machining camber
Ch 14	Housing of turet	Ch29	Rear side of bed behind machining camber
Ch 15	Spindle motor	Ch30	Outdoor temperature

式(4.1)に用いる温度測定点は、4.2.2 項と同様に各温度測定点の類似度を算出し、分類した各グループから代表点を選出して決定する。温度測定点のグループ分けの結果を表 4.11 に示す。

Table 4.11 Grouping results of temperature measurement points

Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	Group 9	Group 10	Group 11	Group 12	Group 13	Group 14	Group 15	Group 16	Group 17
Ch1	Ch5	Ch6	Ch7	Ch10	Ch11	Ch12	Ch13	Ch14	Ch17	Ch19	Ch20	Ch24	Ch25	Ch26	Ch29	Ch30
Ch2									Ch22							
Ch3									Ch23							
Ch4									Ch27							
Ch8									Ch28							
Ch9																
Ch15																
Ch16																
Ch18																
Ch21																

表 4.11 に示すように、温度測定点は 17 のグループに分類した。上記のグループ分けの結果を参考に、4.2.3 項と同様に、実験定数 a_i および温度測定点を決定した。決定した温度測定点および実験定数を表 4.12 に示す。

Table 4.12 Temperature measurement points and experimental constants

i	1	2	3	4
ΔT_i	Ch.4	Ch.5	Ch.9	Ch.28
a_i	-1.91	-1.38	2.91	0.41

Table 4.13 Correction effect using approximate results calculated by the prediction equation

(a) Without cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	25.0	18.4	6.7	5.1	3.9	3.4
L2	11.0	5.0	6.1	2.2	2.5	0.9
L3	14.0	12.2	5.3	7.1	3.3	2.6
L4	19.0	12.9	7.1	6.8	4.3	2.7
L5	20.0	11.1	8.6	2.7	5.8	2.2
L6	13.0	5.5	7.6	3.2	3.1	1.1
L7	21.0	12.2	13.3	8.3	4.7	2.1
L8	20.0	6.7	4.7	1.7	3.0	1.1
L9	23.0	13.9	11.6	3.4	7.0	2.0
Average	18.4	10.9	7.9	4.5	4.2	2.0

(b) With cutting fluid

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	18.0	13.1	13.0	8.8	3.7	2.8
L2	8.0	8.2	1.6	2.6	1.3	1.5
L3	9.0	12.5	2.2	2.9	2.1	1.9
L4	12.0	8.3	4.7	1.8	2.1	1.3
L5	9.0	7.2	5.5	2.8	2.1	1.5
L6	9.0	10.3	2.5	5.4	1.9	2.1
L7	17.0	13.8	10.0	4.0	3.7	2.0
L8	17.0	6.8	7.1	1.7	4.3	1.2
L9	15.0	8.3	9.0	1.5	2.8	1.2
Average	12.7	9.8	6.2	3.5	2.7	1.7

表 4.12 に示した値および式(4.1)を用い、切削油の有無両条件下で直交表 9 条件に従って実施した全 18 試験の実切削試験結果に対して、加工径変化量を近似した結果をそれぞれ表 4.13(a)および(b)に示す。補正を行うことで、切削油を使用しない場合、切削油を使用する場合の加工形変化幅の平均はそれぞれ 18.4 μm から 10.9 μm 、12.7 μm から 9.8 μm に低減することが確認された。加工径変化量の平均値および標準偏差についても同様に、補正を行うことで値が低減することが確認された。なお、表 4.13(b)の L2, L3, L6 の条件において、補正後の加工径変化幅は補正前に比べて増加したが、これは補正前の加工径変化量が 10 μm 以下とわずかであり、補正が困難であったためと考えられる。

補正後の加工径変化幅は切削油を用いない場合の L1 の条件を除き、10 μm 程度に抑制されており、また上述の L1 においても加工径変化幅に加えて、加工径変化量の平均値および標準偏差も低減することから、本補正方法が主軸サイズの大きな XT-8 に対しても有効であることが確認された。

以上より、本章で提案した熱変形予測式の決定手法が、対象とする機種によらず汎用的に適用可能であることが確認された。

4.5 結言

本章では、3 章で提案した、実験計画法を用いた効率的に校正係数を決定し、熱変形予測式の適用範囲を拡大する手法に対して、引き続き実験計画法を用いて効率的に、かつ対象とする装置を選ばない汎用的に適用可能な熱変形予測式の決定方法を提案し、主軸サイズの異なる XT-6 および XT-8 の 2 機種を対象としてその有効性を確認した。その結果、両機種において 3 章で述べた XC-100 と同程度の補正効果が得られることを確認し、提案する手法の汎用性を示した。

さらに、3 章までは特定の機種を対象に、多数の試験結果を用いた考察と経験から決定していた温度測定点を、類似度に従って分類したグループから代表点を選択し、それらの組合せで得られる予測式の候補を用いて切削試験結果への近似を行うことによって、機械的に決定可能であることを示した。これにより、対象とする機種を変更しても、実験計画法で決定した熱変形予測式決定に必要な試験を実施することで、温

度測定点を効率よく決定することが可能となる。

ただし、実験計画法には制約が存在し、各因子の水準数が同数である必要がある。本論文では 2 章で述べたように切削油が熱変形に影響を及ぼすことが確認されており、3 章および 4 章ではその影響を考慮するため、実験計画法で決定した L9 直交表の条件を、切削油使用の有無両条件下でそれぞれ実施している。そのため、実験計画法を用いて予測式決定の効率化が行われても、多数の実切削試験を必要とする。

そこで次章では、切削油使用の有無を含む因子を新たに設定し、本章で実施した試験結果の分析結果から、試験結果におよぼす影響の小さな因子と変更することで試験実施数を削減し、より効率よく熱変形予測式を決定する手法を検討する。

第5章 因子の変更による熱変形予測式決定の効率化

5.1 緒言

4章では、対象とする旋盤を選ばず、汎用的に適用可能な熱変形予測式の効率的な決定方法を決定し、その効果を実際に複数の旋盤で確認した。試験条件の決定には実験計画法を用いたが、実験計画法には制約が存在し、各因子の水準数を同一とする必要がある。本論文においては、2章で述べたように切削油が熱変形に強く影響することが分かっているが、その影響は切削油使用の有無2通りの条件で検討しており、因子としては2水準に相当する。そのため、3水準の因子4つを用いるL9直交表を採用した3章および4章では、この切削油を因子として取り扱うことができず、その使用の有無両条件下でそれぞれL9直交表の試験を実施する必要があった。

そこで本章では、上記の切削油使用の有無を考慮しつつ、試験実施数を削減することを検討する。具体的には4章で実施した試験結果を対象に、因子が試験結果に及ぼす影響を分析し、その影響が小さい因子を特定する。その因子を、新たに設定する切削油の影響を含むと考えられる因子に変更することで、9条件の試験実施のみで切削油使用の有無を考慮しつつ、良好な補正が可能な熱変形予測式を決定することを検討する。

5.2 対象装置における補正効果に関する分析と考察

本節では、4章の試験結果に対して分析を行うことで、同章で設定した因子および水準が試験結果に及ぼす影響の程度を調査した。本節では、4.3節で対象としたXT-6で検討を行う。

そこで、表4.8のXT-6における結果に対して分散分析を行い、各因子が試験結果に及ぼす影響の評価を行った。その結果を、それぞれ表5.1(a)および(b)に示す。

Table 5.1 Results of analysis of variance for XT-6 test results

(a) Without coolant

Factor	Without compensation		With compensation	
	Variation	Contribution rate	Variation	Contribution rate
Diameter	0.9	4.4%	2.8	32.6%
Lenth	1.6	7.7%	0.1	0.8%
Times	2.9	14.3%	4.5	52.1%
Temperature	14.9	73.6%	1.2	14.5%

(b) With coolant

Factor	Without compensation		With compensation	
	Variation	Contribution rate	Variation	Contribution rate
Diameter	14.0	21.9%	14.8	38.8%
Lenth	18.0	28.1%	7.1	18.6%
Times	18.0	28.1%	12.8	33.3%
Temperature	14.0	21.9%	3.5	9.2%

表 5.1 は、表 4.8 の結果から計算される因子ごとの変動と、それらの変動を誤差変動で除することで無次元化した寄与率を、補正前後それぞれで示した値である。ここで寄与率は、その値が大きいほど、対応する因子が加工径変化幅の大小に対して強く影響することを示す。表 5.1 (a)では、補正前は気温変動の寄与率が最大であり、同因子の寄与率は補正後、大きく減少することが確認された。これは、切削油を用いない場合において、最も影響の大きな気温変動の影響に対して、補正を行うことでその影響が抑制されたためと考えられる。また、加工径および加工回数については、補正前後で寄与率が增大しているが、これらは気温変動の寄与率が補正による相対的な比率の変化によると考えられる。なお、補正前後の変動に着目すると、加工回数はその他の因子に比べて変化が小さく、決定した予測式の影響が比較的小さい因子であると考えられる。

また表 5.1(b)に示す切削油を使用した結果に着目すると、補正前はいずれの因子も寄与率は同程度であるが、補正後は気温変動の寄与率が最小になっており、熱変形予測式による補正が、切削油を用いない場合と同様に、気温変動による影響を低下さ

せるように作用していることがわかる。その他の因子については、補正前後で寄与率が多少変化しているが、気温変動ほど明確な変化は見られなかった。また、変動に着目すると、加工径および加工回数の両因子は、補正前後で変化しておらず、補正による影響が比較的小さい因子であると考えられる。

以上のことから、4章で決定したXT-6を対象とする熱変形予測式は、主に気温変動による影響を低減させるように作用しており、その他の因子については加工径変化に及ぼす影響および熱変形予測式によって受ける影響が比較的小さいことが確認された。その中でも、特に加工長さについては、切削油を用いない条件下において寄与率が小さく、また切削油使用の有無両条件下において、補正の影響をあまり受けない因子であることが確認された。

そこで次節では、上記の加工回数を影響の小さな因子と見なし、切削油の影響を含む別の因子に変更することを検討する。

5.3 実験計画法における因子の変更

5.3.1 分散分析を用いた因子の寄与率評価と因子の変更

本項では、XT-6を対象に、5.2節で実施した分散分析の結果から決定した比較的影響の小さな因子である加工回数を、切削油の影響を含む新たな因子に変更することで、L9直交表の9条件を切削油使用の有無両条件下で試験実施をすることなく、これまでと同程度の熱変形予測式を決定することを検討する。

上記のように、切削油を因子として取り扱うため、本項では新たに切削負荷を因子に設け、その水準として無、小、大の3つを設定することとした。各水準にはそれぞれ、切削模擬試験、切削油を使用しない実切削試験、切削油を使用する実切削試験を割り当てることとした。本提案手法を用いることで、9条件の試験を切削油使用の有無両条件下でそれぞれ実施する必要がなくなり、また切削模擬試験を含むことで、実切削試験の数を削減することが可能となる。

5.3.2 因子の変更による熱変形予測式の決定と考察

本項では、5.3.1 項で提案した手法により熱変形予測式を決定し、その補正効果をシミュレーションによって評価する。変更した因子と水準の組合せを表 5.2 に、それらを割り付けた L9 直交表を表 5.3 に示す。

なお、予測式決定には、切削抵抗の因子における水準の低、高に対応する実切削試験として表 4.8 から、該当する条件の試験結果を使用し、同因子における水準の無には、予備試験として実施した切削模擬試験の結果を用いた。これらの試験結果に対し、類似度の算出結果から温度測定点のグループ分けを行った結果を表 5.4 に示す。

Table 5.2 Combinations of factor and level

Factor		Level		
		1	2	3
[1]	Diameter (mm)	50	35	20
[2]	Length (mm)	10	30	50
[3]	Cutting force	Less	Low	High
[4]	Temperature	Increase	Constant	Decrease

Table 5.3 L9 orthogonal table

Test number	Diameter (mm)	Length (mm)	Cutting force	Temperature
L1	50	10	1	Increase
L2	50	30	4	Constant
L3	50	50	5	Decrease
L4	35	10	4	Decrease
L5	35	30	5	increase
L6	35	50	1	Constant
L7	20	10	5	Constant
L8	20	30	1	Decrease
L9	20	50	4	Increase

Table 5.4 Grouping results of the temperature measurement points

Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	Group 9
Ch1	Ch3	Ch8	Ch9	Ch12	Ch14	Ch17	Ch19	Ch22
Ch2	Ch7							
Ch4	Ch13							
Ch5	Ch16							
Ch6								
Ch10								
Ch11								
Ch15								
Ch18								
Ch20								
Ch21								

この類似度算出結果を用いて、決定した温度測定点と実験定数の組合せを表 5.5 に、この時の予測式による近似結果を表 5.6 にそれぞれ示す。

表 5.6 に示すように、加工径変化幅、加工径変化量の平均値および標準偏差は、補正を行うことでこれらの評価値すべてにおいて 9 条件の平均値が減少しており、決定した熱変形予測式を用いることで良好な補正が行える。また、L3 のみ加工径変化幅は増大するが、その量は 2 μm 程度と微小である。

上記の熱変形予測式を、表 4.8 の試験結果に対して適用し、補正効果のシミュレーションを行った、その結果を表 5.7 に示す。

Table 5.5 Temperature measurement points and experimental constants

i	1	2	3	4
ΔT_i	Ch.6	Ch.8	Ch.12	Ch.20
a_i	2.37	-1.32	-0.57	0.18

Table 5.6 Approximate results from the thermal deformation prediction equation

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	23.2	9.3	3.2	1.5	5.5	1.0
L2	7.0	3.4	3.4	1.0	1.9	0.6
L3	10.0	12.1	3.5	6.0	1.5	4.2
L4	12.0	6.7	4.3	1.4	2.7	0.9
L5	19.0	6.0	5.5	2.9	3.1	1.6
L6	5.8	4.0	2.2	2.1	1.0	0.6
L7	13.0	7.0	9.0	4.8	2.7	1.1
L8	11.2	4.6	1.2	1.8	2.9	1.0
L9	19.0	6.3	5.6	1.2	2.9	0.9
Average	13.4	6.6	4.2	2.5	2.7	1.3

表 5.7 に示すように、本項で提案する手法は、切削油を使用しない場合、切削油を使用する場合で加工径変化幅、加工径変化量の平均値および標準偏差のすべての評価値において、補正を行うことで値が低減することを確認した。また、それらの加工径変化幅は切削油を使用しない場合で 50~60%程度、切削油を使用する場合で 20~30%程度低減されており、補正効果は 4.2.3 項の表 4.8 で示した結果と同程度であった。ただし、切削油を用いる場合においては L2 条件など、補正前で加工径変化幅が 10 μm を超過している条件に対しても補正後の加工径変化が 10 μm を超過、あるいは加工径変化幅が増大する結果が存在することが確認された。

以上で用いた熱変形予測式を決定するための実験で、因子とした切削負荷の無および低の 2 水準についてはいずれも、切削油を使用しない条件下で実施した試験であった。そのため、決定した熱変形予測式が、切削油を使用しない場合には適するが、使用する場合には必ずしも適していなかったと考えられる。

以上のように、本項で提案する実切削試験の実施数を削減する手法は、一部の条件において良好な補正を行うことができないことを確認した。ただし、L1 条件などにおいては、4.2.3 項で示す結果よりも良好な補正効果を示しており、このことから高精度な補正を行うためには、適切な試験条件の設定が必要であると考えられる。

Table 5.7 Simulation results of the correction effect of the determined thermal deformation prediction equation

(a) Without coolant

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	22.0	7.2	6.9	1.4	2.8	1.0
L2	7.0	3.4	3.4	1.0	1.9	0.6
L3	10.0	6.5	4.1	1.8	2.7	1.2
L4	12.0	6.7	4.3	1.4	2.7	0.9
L5	19.0	5.0	6.5	0.9	2.5	0.6
L6	12.0	4.4	3.8	1.2	2.7	0.8
L7	13.0	4.7	3.5	0.9	2.3	0.7
L8	10.0	5.9	4.6	1.3	2.5	0.9
L9	19.0	11.9	5.6	5.8	2.9	3.0
Average	13.8	6.2	4.7	1.8	2.6	1.1

(b) With coolant

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	14.0	5.4	3.5	2.9	2.4	1.3
L2	13.0	14.0	1.0	0.6	1.9	1.4
L3	10.0	12.1	1.1	1.8	1.8	3.6
L4	14.0	9.2	3.6	2.1	2.4	1.7
L5	19.0	6.1	5.5	2.9	3.1	1.6
L6	10.0	11.2	2.8	4.5	1.6	2.0
L7	13.0	7.0	9.0	4.7	2.7	1.1
L8	10.0	8.9	2.5	4.5	1.5	2.0
L9	15.0	10.9	3.2	2.1	3.0	1.4
Average	13.1	9.4	3.6	2.9	2.3	1.8

5.4 結言

本章では, 4 章で有用性が確認された実験計画法を用いた汎用的かつ効率的な熱変形予測式の決定手法に対して, その結果に対して分散分析を実施し, 熱変形への寄与率が小さな因子を切削油の影響を含む因子である切削抵抗に変更することで, 試験実施数を削減することを検討した. その結果, 特定の条件に対しては, 4 章の手法と同程度の補正効果を得られることが確認されたが, 他の条件においては補正後の加工径変化幅が増大する結果となった. そのため, 試験実施数を削減した本提案では, 試験実施数削減前と同程度の補正が行えないことが確認された.

上記の結果は, 新たに用いた切削抵抗において, 切削油使用の有無それぞれの影響を含む水準が同数ではなく, また切削模擬試験結果を用いたことによる実切削試験との差が, 熱変形予測式の適用範囲および予測精度に影響を及ぼしたためと考えられる.

そこで次章では, 実験計画法の制約や, 水準の偏りによる影響を避けつつ, 試験実施数をより少数とするため, All Pair 法を用いて試験計画を立案し, 熱変形予測式を決定する手法を検討する.

第 6 章 All Pair 法を用いた熱変形予測式の決定

6.1 緒言

5 章では, 4 章で提案した汎用的な決定方法による熱変形予測式での補正結果に対して分散分析を実施し, その結果から加工径変化に及ぼす影響の小さな因子を切削油に関する因子に変更することで, 試験実施数を削減することを検討した. 検討結果を用いて決定した予測式を適用した結果, 一部の条件に対して補正効果を得ることができず, 提案した手法は適用困難であることが確認された. これは, 切削油使用の有無を因子とするために切削模擬試験結果を用いたことで, 切削油使用の有無それぞれの試験数の偏りが生じ, また同試験結果に切削負荷による影響が含まれていなかったことが要因として考えられる.

そこで本章では, 試験条件の決定に実験計画法のような制約のない All Pair 法を用いることで, 切削油使用の有無を因子として組み込み, 4 章と同様に汎用的な熱変形予測式を効率よく決定する手法を確立する.

6.2 All Pair 法による試験条件の計画方法

実験計画法を用いた熱変形予測式の決定手法に対して, さらなる試験実施数削減を目的に, 5.1 節では切削抵抗を因子に設け, 既存の因子と入れ替えることを検討したが, 一部の条件で補正効果を得ることができなかつた, これは, 上記の切削抵抗の因子において, 切削油を使用する条件としない条件との試験数が同数ではなく, その一方に条件が偏つたためと考えられる.

そこで本節では, 実験計画法に代わり, All Pair 法を用いて試験計画を立案, 実施することで, より少数の試験実施数から熱変形予測式を決定することを検討する.

All Pair 法は, 任意の因子 2 つについて, 各水準の組合せが少なくとも 1 回は出現すること保証する因子と水準の組合せ表を得る手法であり, 主にソフトウェアのテスト条件を決定するために用いられる. 実験計画法では各因子に対して同数の水準を設ける必要があるが, All Pair 法においてはその制約は無く, また上記の性質から, 実験計画法に対して一般的に少数となる.

試験条件には、表 4.2 に対して切削油を、その使用の有無 2 つの水準を持つ因子として追加した。試験条件を表 6.1 に示す。これら 5 つの因子に対し、実験計画法における直交表に相当する因子と水準の組合せ表を作成する。本節では、Microsoft 社製のソフトウェア PICT を使用し、組合せ表を作成した。作成した組合せ表を表 6.2 に、同表に表 6.1 の試験条件を割り当てた結果を表 6.3 に示す。なお、これらの試験条件において、N3, N5 の条件はそれぞれ切削油を使用しない場合の L7, L5 の条件と同一であり、また N2, N4, N7, N8, N10 の条件はそれぞれ切削油を使用する場合の L2, L9, L8, L4, L1 の条件と同一である。

次節より、表 6.3 に示す試験条件を用いて試験を実施し、熱変形予測式の決定と、それを用いた補正効果の確認を行う。

Table 6.1 Test conditions used in the All Pair method

Factor	Level		
	Cutting fluid	Non use	Use
Diameter (mm)	50	35	20
Length (mm)	10	30	50
Times	1	4	5
Temperature	Increase	Constant	Decrease

Table 6.2 Combination of constants and levels using the All Pair method

Test number	Factor				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
N1	1	2	3	1	3
N2	2	1	2	2	2
N3	1	3	1	3	2
N4	2	3	3	2	1
N5	1	2	2	3	1
N6	1	1	3	1	2
N7	2	3	2	1	3
N8	2	2	1	2	3
N9	2	2	3	3	2
N10	2	1	1	1	1
N11	1	1	1	3	3
N12	1	2	2	2	2

Table 6.3 Test conditions determined using the All Pair method

Test number	Cutting fluid	Diameter (mm)	Length (mm)	Times	Temperature
N1	Non use	35	50	1	Decrease
N2	Use	50	30	4	Constant
N3	Non use	20	10	5	Constant
N4	Use	20	50	4	Increase
N5	Non use	35	30	5	Increase
N6	Non use	50	50	1	Constant
N7	Use	20	30	1	Decrease
N8	Use	35	10	4	Decrease
N9	Use	35	50	5	Constant
N10	Use	50	10	1	Increase
N11	Non use	50	10	5	Decrease
N12	Non use	35	30	4	Constant

6.3 All Pair 法を用いた試験計画と実施 -XT-6-

本節では All Pair 法を用いた熱変形予測式の決定方法の有効性を確認するため、主軸サイズが 6 インチの XT-6 を対象として、表 6.3 の試験条件に従って実切削試験を実施し、その結果を用いて予測式を決定する。同手法によって決定した予測式を用いて、補正効果のシミュレーションを行う。なお、被削材を含む切削条件については、4.2.3 項の表 4.3 に示す条件を使用する。

6.3.1 All Pair 法を用いた熱変形予測式と実験定数の決定

表 6.3 に示す 12 条件の実切削試験を実施した結果を用いて、4.2.3 項と同様に類似度を算出し、温度測定点のグループ分けを行った結果を表 6.4 に示す。なお、温度変化は表 4.5 と同一の全 22 ヶ所で測定した。

表 6.4 に示す 12 のグループから 4.2.3 項と同様に、類似度の算出結果を用いて代表となる温度測定点を選定し、項数 $n = 4$ とした式(4.1)に対してそれらを組み合わせることで得られる予測式の候補を用いた予測量と、各条件における加工径変化との差が最小となるように、予測式の候補ごとに温度測定点および実験定数を計算し、その中から組合せを決定した。

Table 6.4 Grouping of temperature measurement points for simulated cutting tests using the All Pair method

Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Group6	Group7	Group8	Group9	Group10	Group11	Group12
Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch8	Ch9	Ch10	Ch15	Ch18	Ch19	Ch20	Ch21
Ch17		Ch7									
Ch5		Ch13									
Ch14		Ch16									
Ch22		Ch12									
Ch6											
Ch11											
Ch20											

決定した温度測定点および実験定数を表 6.5 に示す. また, 決定した予測式による近似の結果を表 6.6 に示す. 表 6.6 に示すように, 補正により加工径変化幅は 12 条件の平均で 12.2 μm から 7.2 μm , 加工径変化量の平均値および標準偏差はそれぞれ 3.2 μm から 2.1 μm , 2.2 μm から 1.3 μm に低減することが確認された. なお, N2 の条件は補正前後で加工径変化幅は大きく変化しないが, 加工径変化量の平均値および標準偏差はともに低減しており, 補正後の加工径変化量はより 0 に近寄ることがわかる. 以上により, All Pair 法を用いた熱変形予測式の決定手法は, 良好な補正効果が期待できる.

Table 6.5 Combination of temperature measurement points and experimental constants determined using the All Pair method

i	1	2	3	4
ΔT_i	Ch.1	Ch.8	Ch.10	Ch.22
a_i	1.94	-1.90	0.69	-0.24

Table 6.6 Approximation results using the prediction equation

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
N1	10.0	5.8	1.9	2.2	2.4	1.2
N2	13.0	12.7	3.2	2.2	2.2	1.7
N3	13.0	6.3	3.5	2.9	2.3	1.6
N4	15.0	6.4	3.2	1.5	3.0	1.0
N5	19.0	7.2	6.5	1.9	2.5	1.2
N6	12.0	6.4	3.1	2.0	1.8	1.3
N7	10.0	6.6	2.5	2.0	1.5	1.2
N8	14.0	9.4	3.6	1.6	2.4	1.2
N9	9.0	6.4	2.8	2.4	3.0	1.5
N10	14.0	7.3	3.5	3.5	2.4	1.5
N11	5.0	5.0	1.8	0.8	1.3	0.6
N12	12.0	7.2	3.0	1.7	1.8	1.1
Average	12.2	7.2	3.2	2.1	2.2	1.3

6.3.2 補正効果の確認

6.3.1 項で有効性が確認された All Pair 法を用いた熱変形予測式について、決定した熱変形予測式を表 6.3 に示す以外の条件に対して適用することで、その有効性を確認する。対象とする試験条件は、表 4.2 の実験計画法で決定した試験条件から、表 6.3 と重複する条件を除外して設定した。具体的には、切削油を使用しない場合の L1, L2, L3, L4, L6, L8, L9 の条件と、切削油を使用する場合の L3, L5, L6, L7 の条件を対象とした。

これらの条件に対して、式(4.1)および 6.3.1 項で決定した実験定数を適用した結果を表 6.7 に示す。表 6.7(a)および(b)に示すように、加工径変化幅の平均値は、切削油を使用しない場合、切削油を使用する場合ともに低減されており、条件別に見ても加工径変化幅が 10 μm 程度に抑制される。なお、切削油を用いる場合の L3 の条件については、加工径変化幅が増大する結果となったが、これは補正前の加工径変化幅が最大 10 μm 程度と小さく、熱変形予測が困難であったためと考えられる。

以上の結果は、4.2.2 項の表 4.8 と比較した場合、補正を行うことで各評価値はおおむね同程度低減することが確認できる。これにより、本節で対象とする主軸サイズ 6 イ

ンチの旋盤 XT-6 において、All Pair 法を用いて熱変形予測式を決定する手法は、4.2.2 項で提案した実験計画法を用いて熱変形予測式を決定する手法に対して、試験実施数を 18 条件から 12 条件に削減しながら、実験計画法を用いる手法と同程度の補正効果が得られることが確認された。

Table 6.7 Correction effect of the thermal deformation prediction equation determined using the All Pair method

(a) Without coolant

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	22.0	8.8	6.9	2.5	2.8	1.5
L2	7.0	5.0	3.4	2.7	1.9	1.0
L3	10.0	6.6	4.1	1.0	2.7	0.8
L4	12.0	5.8	4.3	1.0	2.7	0.7
L6	12.0	5.8	3.8	3.5	2.7	1.3
L8	10.0	7.6	4.6	3.3	2.5	1.4
L9	19.0	10.0	5.6	1.9	2.9	1.4
Average	13.1	7.1	4.7	2.3	2.6	1.2

(b) With coolant

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L3	10.0	13.0	3.5	6.6	1.5	4.1
L5	19.0	9.1	5.5	3.4	3.1	2.3
L6	10.0	8.5	2.8	2.2	1.6	1.4
L7	13.0	10.5	9.0	8.0	2.7	1.8
Average	13.0	10.3	5.2	5.0	2.2	2.4

6.3.3 All Pair 法を用いた対象装置に対する分析と考察

6.3.1 項の結果に対して、4.4 節と同様に分散分析を行い、補正効果に対して分析を行う。ただし、5.3.1 項と異なり、All Pair 法では因子ごとの水準数が同一でなはなないため、分散分析を行うことができない。そこで本項では、各試験の加工径変化幅を式(6.1)の重回帰式で表現し、式中の偏回帰係数を用いて、実験計画法の分散分析から得られる要因効果図に相当する、各因子の影響を評価する方法を検討する。

$$y = a_m + a_{A1}k_{A1} + a_{A2}k_{A2} + \dots + a_{ij}k_{ij} \quad (6.1)$$

ここで、 y は任意の試験における加工径変化幅の推定値、 a_{ij} は任意の因子における任意の水準の偏回帰係数、 k_{ij} は任意の試験における水準の有無を示す変数(有の場合は1、無の場合は0を代入)、 a_m は切片である。例として、N1の条件における加工径変化幅の推定値は、式(6.2)で表される。

$$y = a_m + a_{A1}k_{A1} + a_{B2}k_{B2} + a_{C3}k_{C3} + a_{D1}k_{D1} + a_{E3}k_{E3} \quad (6.2)$$

なお、式中の a_m および a_{ij} は、試験ごとの加工径変化幅と y との残差二乗和を計算し、この残差二乗和が最小となるように決定される。このとき、加工径変化幅と式(6.1)の y が一致すれば、同式により複数の試験結果を表現することが可能となるため、 k_{ij} の大小関係が、各水準の影響の大小関係と考えることが可能となる。なお、各変数項の i および j は、表 6.1 の因子と水準の組合せに対して、表 6.8 に示すように割り当てた。この時、All Pair 法を用いて決定した各条件に対し、 k_{ij} は表 6.9 に示すとおりとなる。

Table 6.8 Assignment of parameters i and j to factors and levels

Factor		Level		
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$
Cutting fluid	$i = A$	Non use	Use	-
Diameter (mm)	$i = B$	50	35	20
Length (mm)	$i = C$	10	30	50
Times	$i = D$	1	4	5
Temperature	$i = E$	Increase	Constant	Decrease

Table 6.9 Parameter k_{ij} assigned to each tests

No.	k_{ij}													
	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
N1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
N2	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
N3	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
N4	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
N5	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
N6	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
N7	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1
N8	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
N9	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
N10	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
N11	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
N12	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Table 6.10 Predicted results of diameter variation

(a) Without compensation

	Diameter variation (Max.-Min.) [μm]											
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
Measured result	10.0	13.0	13.0	15.0	19.0	12.0	10.0	13.0	10.0	14.0	5.0	12.0
Predicted result	9.9	11.6	12.0	15.6	17.1	10.3	10.4	10.9	11.2	15.3	6.7	14.9
Prediction error	0.1	1.4	1.0	0.6	1.9	1.7	0.4	2.1	1.2	1.3	1.7	2.9

(b) With compensation

	Diameter variation (Max.-Min.) [μm]											
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
Measured result	5.8	12.7	6.3	6.2	7.2	6.4	6.5	9.4	7.2	7.3	5.0	7.2
Predicted result	4.8	11.3	5.4	6.6	6.4	6.4	7.1	8.8	7.9	7.7	6.0	8.9
Prediction error	1.0	1.5	0.9	0.3	0.8	0.0	0.6	0.6	0.7	0.5	1.0	1.7

6.3.2 項の表 6.6 の結果に対して、式(6.1)を適用して加工径変化幅を推定した結果を表 6.10 に示す. 表 6.10 の(a)に示す補正前の推定結果, および(b)に示す補正後の推定結果から, 推定式(6.1)を用いることで加工径変化幅を比較的良好に推定可能なことが確認できる. この時の a_{ij} の値を表 6.11 に, これらを因子ごとにプロットしたものを図 6.1 に示す. 推定式(6.1)を用いて各試験の加工径変化幅を推定可能であることから, 偏重回帰係数 a_{ij} を用いることで, 図 6.1 に示すように因子内の各水準が加工径変化量に及ぼす影響を評価することが可能となる.

Table 6.11 Regression coefficients and intercepts

	a_m	a_{ij} [μm]														
	[μm]	a_{A1}	a_{A2}	a_{B1}	a_{B2}	a_{B3}	a_{C1}	a_{C2}	a_{C3}	a_{D1}	a_{D2}	a_{D3}	a_{E1}	a_{E2}	a_{E3}	
Without compensation	12.40	0.17	-0.17	-1.63	1.31	0.32	0.41	0.69	-1.10	0.65	0.47	-1.13	3.65	-0.16	-3.50	
With compensation	7.06	-0.95	0.95	0.73	0.28	-1.01	-0.07	0.87	-0.80	-0.45	0.87	-0.42	-0.47	0.79	-0.32	

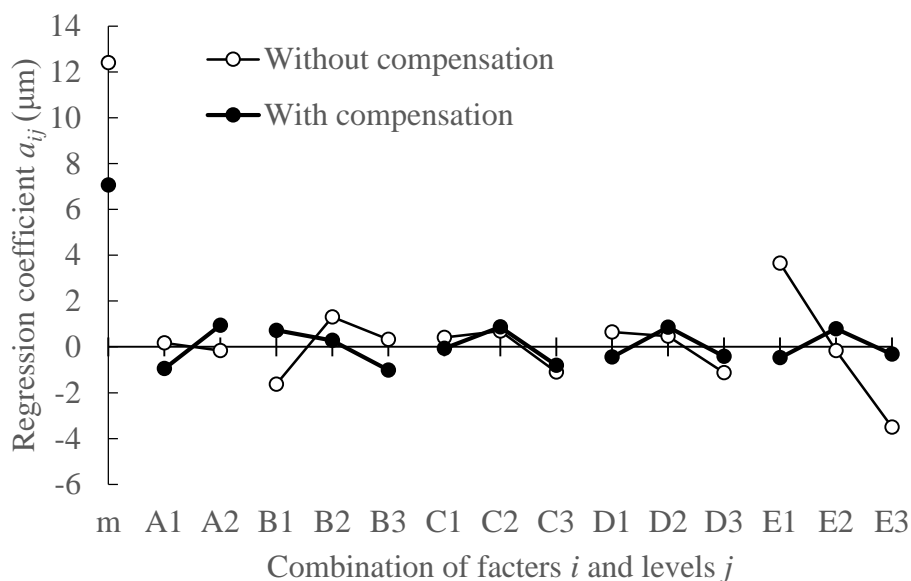


Fig. 6.1 Regression coefficients with and without compensation

図 6.1 に示すように, 切片 a_m の値は補正によって低減しており, 推定式による補正効果を反映できていることがわかる. また, 各因子の a_{ij} に着目すると, 気温変動 E において, 水準間の偏重回帰係数の大小関係が補正前後で大きく変化しており, 同因

子が補正による影響を強く受けることが分かる。その他の因子については、補正前の a_{ij} の水準間における大小関係が気温変動 E のように一様ではないことが確認されており、これは設定した因子が相互に干渉しているためと思われる。そのため補正効果を評価することが困難ではあるが、これらの中でも特に加工長さ C については、補正前後で a_{ij} の水準間における大小関係に大きな変化は見られず、補正による影響が比較的小さいと考えられる。

6.4 All Pair 法を用いた試験計画と実施 -XT-8-

本節では、主軸サイズが 8 インチの XT-8 を対象に、6.3 節と同様に All Pair 法と用いた熱変形予測式の決定手法を適用し、その有効性と汎用性を確認する。実切削試験に関する条件は 6.3 節と同様に、試験条件に表 6.3 の条件を用い、被削材および切削条件は、表 4.3 の条件を用いることとした。

6.4.1 All Pair 法を用いた熱変形予測式と実験定数の決定

6.2 節に記載した条件で実施した実切削試験結果を用いて、類似度を算出し、温度測定点のグループ分けを行った結果を表 6.12 に示す。なお、温度測定には表 4.5 と同一の位置を用いた。

この結果を用いて、6.3 節と同様に、4.2.2 項に示す式(4.1)と各条件における実切削試験結果との差が最小となるように、温度測定点および実験定数を決定した。その結果を表 6.13 に示す。

表 6.13 の結果を用いた予測式による加工径変化量の近似結果を表 6.14 に示す。表 6.14 に示すように、補正を行うことで加工径変化幅は $10\ \mu\text{m}$ となり、概ね良好に近似が行えることが確認された。なお、N9 の条件においては補正を行うことで加工径変化幅が増大したが、これは補正前の加工径変化が $10\ \mu\text{m}$ と微小であったためと考えられる。また、補正後の加工径変化量も $10\ \mu\text{m}$ 程度に収まっていることから、近似による加工径の増大は微小であると判断する。

Table 6.12 Grouping of temperature measurement points for simulated cutting tests using the All Pair method

Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8
Ch1	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch9	Ch12	Ch13
Ch2				Ch10			
Ch3				Ch11			
Ch8				Ch16			
Ch15				Ch17			
Ch18				Ch22			
				Ch23			
				Ch25			
				Ch28			
				Ch29			

Group 9	Group 10	Group 11	Group 12	Group 13	Group 14	Group 15	Group 16
Ch14	Ch19	Ch20	Ch21	Ch24	Ch26	Ch27	Ch30

Table 6.13 Combination of temperature measurement points and experimental constants determined using the All Pair method

i	1	2	3	4
ΔT_i	Ch.4	Ch.5	Ch.9	Ch.13
a_i	-1.42	-1.71	3.00	-0.19

Table 6.14 Approximate results of machining diameter change using the All Pair method

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
N1	16.0	9.4	5.9	2.6	4.5	2.1
N2	8.0	7.8	1.6	1.6	1.3	1.2
N3	21.0	13.7	13.3	8.8	4.7	2.4
N4	15.0	12.5	9.0	3.0	2.8	2.4
N5	20.0	19.7	8.6	4.8	5.8	2.7
N6	21.0	13.5	11.2	4.6	6.0	2.6
N7	17.0	15.5	7.1	2.8	4.3	1.9
N8	12.0	10.0	4.7	1.8	2.1	1.4
N9	8.0	10.7	1.6	5.2	1.1	2.5
N10	18.0	8.2	13.0	4.4	3.7	2.2
N11	23.0	12.6	10.3	6.8	5.5	2.8
N12	10.0	7.5	2.6	4.6	1.6	1.7
Average	15.8	11.8	7.4	4.2	3.6	2.2

6.4.2 All Pair 法を用いた熱変形予測式による補正効果と考察

6.4.1 項で有効性が確認された All Pair 法を用いた熱変形予測式について、決定した熱変形予測式を表 6.3 以外の条件に対して適用することで、その有効性を確認する。対象とする試験条件は 6.3.2 項と同様に、表 4.2 の実験計画法で決定した試験条件から、表 6.3 と重複する条件を除外しており、切削油を使用しない場合は L1, L2, L3, L4, L6, L8, L9 の条件、切削油を使用する場合は L3, L5, L6, L7 の条件が該当する。

これらの条件に対して、6.4.1 項で決定した熱変形予測式を適用した結果を表 6.15 に示す。表 6.15(a)および(b)に示すように、切削油を使用しない場合の加工径変化幅は補正によって低減されたが、切削油を使用する場合の加工径変化幅が僅かに増大した。ただし、表 6.15(b)に示すように、条件 L3, 5L, L6 については、加工径変化量は 10 μm 以下と小さく、補正後の加工径変化量も 10 μm 程度に収まっている。また、同 L7 の条件について、表 4.10(b)と同程度の補正を行えることが確認された。

以上の結果から、XT-8 の実切削試験においても、All Pair 法を用いて熱変形予測

式を決定する手法は、4 章における実験計画法で熱変形予測式を決定する手法に対して、試験実施数を 18 条件から 12 条件に削減しながら、実験計画法を用いる手法と同程度の補正効果が得られることを確認した。

Table 6.15 Correction effect of the thermal deformation prediction equation determined using the All Pair method.

(a) Without coolant

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L1	25.0	24.2	6.7	8.3	3.9	5.4
L2	11.0	6.4	6.1	1.6	2.5	0.9
L3	14.0	11.1	5.3	5.3	3.3	2.7
L4	19.0	11.7	7.1	5.2	4.3	2.9
L6	13.0	6.7	7.6	3.4	3.1	1.4
L8	20.0	8.6	4.7	1.6	3.0	1.0
L9	23.0	18.6	11.6	5.5	7.0	3.2
Average	17.9	12.5	7.0	4.4	3.9	2.5

(b) With coolant

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
L3	9.0	12.9	2.2	2.8	2.1	1.9
L5	9.0	10.5	5.5	5.1	2.1	2.3
L6	9.0	11.4	2.5	6.5	1.9	2.4
L7	17.0	13.3	10.0	3.8	3.7	2.0
Average	11.0	12.0	5.0	4.6	2.4	2.2

6.4.3 All Pair 法を用いた対象装置に対する分析と考察

6.4.1 項の結果に対して、6.3.3 項と同様に補正効果に対して分析と考察を行う。表 6.14 の結果に対して、式(6.1)を用いて加工径変化の推定を行った。その結果を表 6.16 に示す。

Table 6.16 Predicted results of diameter variation

(a) Without compensation

	Diameter variation (Max.-Min.) [μm]											
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
Measured result	16.0	8.0	21.0	15.0	20.0	21.0	17.0	12.0	8.0	18.0	23.0	10.0
Predicted result	17.8	8.8	21.3	15.2	18.8	18.6	16.5	10.1	8.3	19.0	23.5	10.9
Prediction error	1.8	0.8	0.3	0.2	1.2	2.4	0.5	1.9	0.3	1.0	0.5	0.9

(b) With compensation

	Diameter variation (Max.-Min.) [μm]											
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
Measured result	11.0	8.6	13.1	7.5	14.9	15.4	6.0	8.3	12.0	9.1	17.1	5.4
Predicted result	11.6	8.2	12.8	7.8	13.6	13.8	6.0	6.6	12.7	10.2	18.1	7.1
Prediction error	0.6	0.4	0.4	0.3	1.4	1.7	0.0	1.7	0.7	1.0	1.0	1.7

表 6.16 の(a)および(b)に示すように、式(6.1)を用いることで切削油を使用しない場合、する場合の加工径変化幅を比較的良好に推定可能であることが確認された。このときの偏重回帰係数 a_{ij} の値を表 6.17 に、因子ごとに値をプロットしたものを図 6.2 に示す。図 6.2 に示すように、切片 a_m の値は補正によって低減しており、補正効果が得られていることが確認された。また偏重回帰係数 a_{ij} については、加工径 B において水準間の大小関係が変化しており、同因子が補正による影響を比較的強く受けたものと考えられる。ただし、補正前の偏重回帰係数 a_{ij} に着目すると、3 水準を持つすべての因子において、その大小関係が水準に対して一様に変化していないことから、因子間で交互作用が生じていると考えられるため、留意が必要である。

Table 6.17 Regression coefficients and intercepts

	a_m	a_{ij} [μm]													
	[μm]	a_{A1}	a_{A2}	a_{B1}	a_{B2}	a_{B3}	a_{C1}	a_{C2}	a_{C3}	a_{D1}	a_{D2}	a_{D3}	a_{E1}	a_{E2}	a_{E3}
Without compensation	16.58	3.06	-3.06	0.99	-3.10	2.10	1.26	-0.85	-0.42	1.12	-2.15	1.02	2.10	-2.70	0.59
With compensation	10.76	1.26	-1.26	2.50	-1.04	-1.46	-0.50	-1.08	1.58	-1.53	-1.97	3.50	0.19	-0.79	0.61

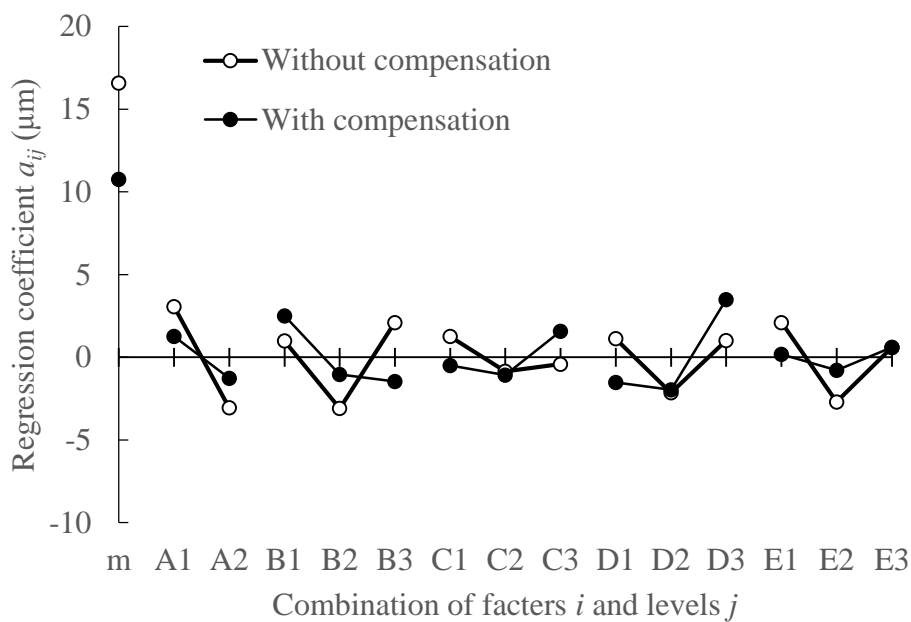


Fig. 6.2 Regression coefficients with and without compensation

6.5 All Pair 法におけるさらなる試験数削減の検討

以上で述べたように、All Pair 法を用いることで、実験計画法を用いる 4 章の手法に対して、より少数の試験結果から汎用的な熱変形予測式を決定可能であることを確認した。これに対して、6.3.3 および 6.4.3 項で実施した考察から、決定した予測式を用いた補正による影響は、因子および水準ごとに差が存在することを確認した。そのため、予測式決定に用いる因子および水準の中から、予測式決定に強く作用しないものを省いても、予測結果および補正結果に及ぼす影響は比較的軽微であると予想される。

そこで、本節では 6.3 および 6.4 節で算出した補正前の偏重回帰係数の結果を基に、影響の小さな試験条件を削減して予測式を決定することを検討する。

6.5.1 XT-6 を対象とする試験数削減の検討

本項では、主軸サイズ 6 インチの旋盤 XT-6 を対象に、6.3.3 項の考察を基に試験数削減を検討する。図 6.1 の結果および 6.3.3 項の考察より、加工長さ C および加工回数 D の両因子において、補正による影響が小さいことが確認されている。そのため、本項ではこれら両因子から特定の水準を選択し、より少数の試験から熱変形予測式を決定することを検討する。具体的には、表 6.6 の結果を対象に、因子 C, D から選択した特定の水準を、単独またはその両条件を除く試験結果から、4 章で提案した手法を用いて熱変形予測式を決定し、表 6.6 の結果に対して補正を行う。その結果に対して、6.3 節で示した All Pair 法の 12 条件から決定した熱変形予測式による補正効果との比較を行い、その妥当性を検討する。

6.5.1.1 因子 C から特定の水準を削減した場合

本目では、図 6.1 の結果において因子 C に着目し、試験数削減を検討する。同図において、補正前の C1 および C2 の偏重回帰係数 a_{ij} は同程度であることから、水準間の試験条件の幅を確保する目的で水準 C2 を選択し、同水準に関わる試験を除いた結果から熱変形予測式を決定し、その結果を用いて補正を行った場合の補正効果を検討する。表 6.9 より、水準 C2 を含む試験は N2, N5, N7, N12 の 4 つである。これらを除く 8 条件から、4 章と同様に類似度を計算し、6.5.1 項の考察を基に試験数削減を検討する。表 6.18 に温度測定点および実験定数、表 6.19 に上記の予測式を表 6.6 に適用した結果を示す。

表 6.19 に示すように、補正を行うことで加工径変化幅、加工径変化量および動標準偏差の平均値の評価値すべてにおいて、その平均値が低減することが確認された。また、表 6.6 の結果と比較すると、補正効果は試験数削減前と同程度であった。

Table 6.18 Combination of temperature measurement points and experimental constants determined using the results of the All Pair method without the C2 condition

i	1	2	3	4
ΔT_i	CH12	CH14	CH15	CH22
a_i	-0.92	-1.01	0.47	1.91

Table 6.19 Compensation results of the equation determined from the test results without the C2 condition

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
N1	10.0	6.5	1.9	2.4	2.4	1.3
N2	13.0	13.2	3.2	2.1	2.2	2.0
N3	13.0	6.3	3.5	2.2	2.3	1.5
N4	15.0	6.4	3.2	1.4	3.0	0.9
N5	19.0	7.3	6.5	2.0	2.5	1.2
N6	12.0	6.6	3.1	1.9	1.8	1.2
N7	10.0	7.0	2.5	2.8	1.5	1.5
N8	14.0	9.2	3.6	1.9	2.4	1.2
N9	9.0	6.4	2.8	2.3	3.0	1.6
N10	14.0	7.0	3.5	3.6	2.4	1.5
N11	5.0	4.9	1.8	0.8	1.3	0.6
N12	12.0	7.1	3.0	1.6	1.8	1.1
Average	12.2	7.3	3.2	2.1	2.2	1.3

6.5.1.2 因子 D から特定の水準を削減した場合

本目では、表 6.6 の結果に対して、図 6.1 の結果において因子 D に着目し、試験数削減を検討する。同図において、補正前の D1 および D2 の偏重回帰係数 a_{ij} は同程度であることから、水準間の試験条件の幅を確保する目的で水準 D2 を選択し、同水準に関わる試験を除いた結果から熱変形予測式を決定し、その結果を用いて補正を行った場合の補正効果を検討する。表 6.9 より、水準 D2 を含む試験は N2, N4, N8, N12 の 4 つである。これらを除く 8 条件から、6.5.1.1 目と同様に試験数削減を検討す

る. 表 6.20 に温度測定点および実験定数, 表 6.21 に上記の予測式を表 6.6 に適用した結果を示す.

表 6.21 に示すように, 補正を行うことで加工径変化幅, 加工径変化量および動標準偏差の平均値の評価値すべてにおいて, その平均値が低減することが確認された. また, 表 6.6 の結果と比較すると, 補正効果は試験数削減前と同程度であった.

Table 6.20 Combination of temperature measurement points and experimental constants determined using the results of the All Pair method without the D2 condition

i	1	2	3	4
ΔT_i	CH12	CH14	CH15	CH22
a_i	-0.84	-1.27	0.42	2.13

Table 6.21 Compensation results of the equation determined from the test results without the D2 condition

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
N1	10.0	6.0	1.9	2.2	2.4	1.2
N2	13.0	12.5	3.2	2.3	2.2	1.6
N3	13.0	6.5	3.5	3.1	2.3	1.7
N4	15.0	6.4	3.2	1.8	3.0	1.3
N5	19.0	7.4	6.5	1.7	2.5	1.1
N6	12.0	6.6	3.1	2.2	1.8	1.4
N7	10.0	7.0	2.5	2.0	1.5	1.2
N8	14.0	9.8	3.6	1.8	2.4	1.2
N9	9.0	6.8	2.8	2.6	3.0	1.6
N10	14.0	7.4	3.5	2.9	2.4	1.4
N11	5.0	4.7	1.8	0.8	1.3	0.5
N12	12.0	7.3	3.0	1.8	1.8	1.2
Average	12.2	7.4	3.2	2.1	2.2	1.3

6.5.1.3 水準 C2 および D2 を同時に削減した場合

本目では、6.5.1.1 目、6.5.1.2 目で選択した水準 C2 および D2 の両水準に関わる試験を除いた結果から熱変形予測式を決定し、その結果を用いて補正を行った場合の補正効果を検討する。表 6.9 より、水準 D2 を含む試験は N2, N4, N5, N7, N8, N12 の 6 つである。これらを除く 6 条件から、6.5.1.1 目と同様に試験数削減を検討する。表 6.22 に温度測定点および実験定数、表 6.23 に上記の予測式を表 6.6 に適用した結果を示す。

Table 6.22 Combination of temperature measurement points and experimental constants determined using the results of the All Pair method without the conditions C2 and D2

i	1	2	3	4
ΔT_i	CH12	CH14	CH15	CH22
a_i	-1.11	-0.43	0.30	1.79

Table 6.23 Compensation results of the equation determined from the test results without the conditions C2 and D2

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
N1	10.0	7.8	1.9	2.9	2.4	1.5
N2	13.0	13.9	3.2	2.3	2.2	2.4
N3	13.0	6.3	3.5	1.7	2.3	1.0
N4	15.0	7.7	3.2	1.9	3.0	1.3
N5	19.0	6.8	6.5	1.3	2.5	1.0
N6	12.0	6.3	3.1	2.1	1.8	1.3
N7	10.0	9.8	2.5	5.2	1.5	2.3
N8	14.0	9.9	3.6	3.4	2.4	2.3
N9	9.0	6.9	2.8	2.7	3.0	1.6
N10	14.0	6.6	3.5	2.7	2.4	1.3
N11	5.0	4.5	1.8	0.7	1.3	0.5
N12	12.0	6.5	3.0	1.6	1.8	1.1
Average	12.2	7.7	3.2	2.4	2.2	1.5

表 6.23 に示すように、補正を行うことで加工径変化幅、加工径変化量および動標準偏差の平均値の評価値すべてにおいて、その平均値が低減することが確認された。ただし、これらの評価値は表 6.19 および表 6.21 に対して大きく、また表 6.6 の結果と比較すると、N7 条件において補正効果が劣る結果であった。

6.5.2 XT-8 を対象とする試験数削減の検討

本項では、主軸サイズ 8 インチの旋盤 XT-8 を対象に、6.4.3 項の考察を基に試験数削減を検討する。図 6.2 の結果および 6.4.3 項の考察より、因子 B,C,D については、補正効果の影響について明確な差が確認できなかった。そのため、本項では、補正前の偏重回帰係数 a_{ij} に着目し、水準 2 と水準 3 の差が微小な因子 C から、水準の幅を確保するため、C2 を削減して、より少数の試験から熱変形予測式を決定することを検討する。表 6.9 より、水準 C2 を含む試験は N2, N5, N7, N12 の 4 つである。これらを除く 8 条件から、6.5.1 項と同様に熱変形予測式を決定し、表 6.14 の結果に適用することで補正効果の確認を行った。表 6.24 に温度測定点および実験定数、表 6.25 に上記の予測式を適用した結果を示す。

表 6.25 において、加工径変化幅、加工径変化量の平均値および標準偏差のすべての評価値において、全試験の平均値が補正前より低減することが確認された。また、これらの平均値は表 6.14 の結果とほぼ同程度であり、少数の試験からでもある程度の補正効果が得られることが確認された。ただし、条件 N5 においては、補正を行うことで加工径変化幅が増大する結果となった。

Table 6.24 Combination of temperature measurement points and experimental constants determined using the results of the All Pair method without the C2 condition

i	1	2	3	4
ΔT_i	CH1	CH9	CH16	CH17
a_i	-0.10	1.31	-2.68	0.61

Table 6.25 Compensation results of the equation determined from the test results without the C2 condition

No.	Variation in diameter (Max-Min) [μm]		Average in diameter variation [μm]		Standard deviation in diameter variation [μm]	
	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)	Without compensation (Measured)	With compensation (Predicted)
N1	16.0	8.7	5.9	2.0	4.5	1.5
N2	8.0	7.4	1.6	1.4	1.3	1.1
N3	21.0	13.2	13.3	8.6	4.7	2.5
N4	15.0	14.6	9.0	5.6	2.8	3.6
N5	20.0	22.3	8.6	6.3	5.8	4.4
N6	21.0	13.2	11.2	4.7	6.0	3.0
N7	17.0	14.7	7.1	2.4	4.3	1.8
N8	12.0	9.3	4.7	2.5	2.1	1.7
N9	8.0	10.9	1.6	5.2	1.1	2.6
N10	18.0	9.0	13.0	4.9	3.7	2.4
N11	23.0	10.7	10.3	4.8	5.5	2.8
N12	10.0	6.3	2.6	3.7	1.6	1.5
Average	15.8	11.7	7.4	4.4	3.6	2.4

6.5.3 考察

6.5 節で提案した, All Pair 法で実施した 12 条件の実切削試験結果に対して, 因子内の各水準が加工径変化幅に及ぼす影響を調査し, その結果を基に試験数をさらに削減する手法を検討した. その結果, XT-6 においては, 提案手法を用いて決定した熱変形予測式を用いることで, 試験実施数を 12 条件から 8 条件に削減しながらも, 削減前と同程度の補正が可能であることを確認した. さらに, 削減する水準を複数にした場合, 試験実施数をさらに削減することが可能となるが, 補正効果は削減前に比べて低下することが確認された. また, XT-8 においては, XT-6 と同様に補正を行うことが可能であるが, 一部の試験条件で加工径変化幅が補正前に比べて増大する結果が確認された. これは, XT-6 では補正による影響が因子ごとに明確に異なり, 削除すべき水準を容易に特定できたことに対し, XT-8 では因子ごとの補正による影響がおおむね同程度であり, 水準の削減による影響が XT-6 よりも明確に現れたためと考えられる.

また、図 6.2 において、補正前の偏重回帰係数 a_{ij} に着目すると、因子内におけるそれらの大小関係は水準に対して一様に変化していないことから、因子間に交互作用が生じていると推測される。そのため、XT-8 では補正による影響の差が因子間で生じず、水準削除による補正効果の低下が見られたと考えられる。

以上の考察から、適切な水準を選択することが出来れば、All Pair 法からさらに試験実施数を削減することは可能であるが、試験条件に用いる因子については、交互作用が無く互いに独立となるよう設定することが前提条件である。また、本章における検討は、All Pair 法に用いる 12 条件の試験結果がすでに存在することを前提とし、その結果に対する分析結果から削減する水準を選択した上で、決定した予測式を既存の試験結果に対して適用することで補正効果を確認する簡易的な手法で実施している。そのため、不要な水準を事前に削減して立案した試験計画から熱変形予測式を決定する、本来想定すべき手法とは、結果が異なる可能性が考えられる。

以上のことから、All Pair 法から影響の小さな水準を省くことで試験実施数を削減する本提案手法は、試験結果が存在しない状態では水準の決定が行えないことと、その有用性を確認するためにはより多くの試験実施を必要とすることから、運用することは現実的ではなく、むしろ因子および水準を適切に設定することで、より高精度な熱変形予測式を決定することが重要であると結論できる。ただし、6.5.1 項および 6.5.2 項において、不要な水準には C2 が選択されていることから、十分に試験結果が得られている装置と類似した機械構造を持つ別の装置を対象とし、かつ因子および水準を適切に選択できれば、事前に水準を削減した状態でも補正を良好に行える予測式を決定可能であると考えられる。

6.6 結言

本章では、All Pair 法を用いた熱変形予測式の決定手法を提案し、4 章で提案した実験計画法を用いる汎用的な手法と同程度の補正効果を、より少数の実切削試験から決定可能であることを示した。

また、得られた試験結果を分析し、補正の影響が小さな水準を省くことで、さらに試験実施数を削減することを検討したが、同提案手法は多くの前提条件を必要とするため、対象装置に応じた因子および水準を適切に決定することで熱変形予測式をさらに

高精度化することがより重要であることを確認した。今後はこれらの因子および水準を適切に決定するため、因子または因子の評価値として、切削動力や消費電力などのエネルギーに着目することを検討する。

第7章 結論

本論文では、工作機械の熱変形量を予測して補正することで、熱変形によって生じる加工誤差を低減することを目的に、旋盤を対象とする、機械各部の少数位置の温度変化から幅広い条件に対して適用可能な熱変形予測式を、少数の試験実施によって効率よく決定する手法を提案した。

まず、従来形に比べて小形化された旋盤を対象とした熱変形予測式を決定するため、切削模擬試験を実施し、機械全体の熱変形を機械可動部と機械非可動部のそれぞれの影響に分けて独立に熱変形予測式を決定した。それらの予測式の和を機械全体の熱変形予測式として、切削油を使用しない条件下において実施した種々の試験でその補正効果を確認した。次に、同予測式の適用範囲を確認するため、切削油を使用した条件で実施した実切削試験に対して適用したが、補正をおこなうことは困難であった。そこで、切削油を用いた条件に対して同予測式を適用可能とするため、予測式中に校正係数を導入することで熱変形予測式を補正することを提案し、その有効性を確認した。しかし、この手法は切削油使用の有無によって校正係数を切り替える必要があり、システムの複雑化や使用時の人為的ミスを招くこと可能性があることから、条件による値の切替えを必要とせず、幅広い条件に適用可能な校正係数を、実験計画法を用いることで効率よく決定する手法を提案し、同予測式を用いることで、校正係数を切り替える場合と同程度の補正が行えることを確認した。なお、上記の提案手法は、十分に検討がなされており、温度測定点や熱変形予測式の式形が決定されていることが前提であった。そのため本論文ではさらに、そういった前提のない旋盤に対しても汎用的に適用可能な熱変形予測式を決定する手法を提案し、その有効性を示した。実験計画法を用いる場合、試験条件に対する制約のために切削油使用の有無でそれぞれ試験実施を行う必要があったが、試験条件に対する制約の少ない All Pair 法を用いることで、予測式決定に必要な試験実施数をより少数とすることを可能とした。さらに、これらの試験結果を分析することで、加工径変化に与える影響の小さな因子を特定し、これに関わる試験を除外した場合でも、同程度の補正が行えることを確認し、予測式決定のためのさらなる効率化の可能性を示した。

本論文で得られた結論を要約すると、以下のとおりである。

(1) 比較的小形の CNC 旋盤を対象とした熱変形予測式を、切削模擬試験結果から

機械可動部と機械非可動部の影響部ごとにそれぞれ決定することを検討した。その結果、決定した熱変形予測式が、切削油を使用しない条件下において実施した種々の条件で実施した実切削試験において、加工径変化を良好に予測可能であることを確認した。しかし、同予測式は切削油を用いない条件に対して良好に熱変形予測を行うことができず、同条件への適用が困難であることが確認された。

- (2) 上記の熱変形予測式に対して、校正係数を各変数項に導入することで熱変形予測式を補正し、切削油を使用した条件に対して予測式を適用可能とすることを検討した。その結果、切削油を用いた実切削試験結果に対する近似を行うことで決定した校正係数を用いることで、熱変形予測式が、種々の条件で実施した切削油を使用した実切削試験における加工径変化を良好に予測可能であることを確認した。
- (3) 切削油使用の有無で値を切替えていた校正係数について、値の切替えを行うことなく幅広い条件に対して適用可能な値を効率よく決定することを検討した。実験計画法を用いて立案した試験条件に従い、切削油使用の有無両条件下で実施した試験結果すべてから決定した校正係数を用いた熱変形予測式は、実験計画法の条件だけでなく、それ以外の条件で実施した試験結果に対しても良好に加工径変化を予測することが可能であることを確認した。
- (4) これまで対象としてきた、事前に十分な試験実施と分析によって、熱変形予測式や温度測定点が決まっている旋盤ではなく、対象と様々な旋盤に対して汎用的に適用可能な熱変形予測式を決定する手法を提案した。単純な式形で定義した熱変形予測式に対して、温度変化の類似性からグループ分けを行い、そのグループから選択した温度測定点の代表点を組み合わせることで、熱変形予測式の候補を決定し、その中から最適な予測式を選択することとした。また試験実施数は、これまで同様に実験計画法を用いて決定し、切削油使用の有無両条件下でそれぞれ 9 条件の実切削試験を実施した。その結果、主軸サイズの異なる複数の旋盤に対して、提案手法によって効率よく決定した熱変形予測式が、良好に加工径変化を予測可能であることを確認した。
- (5) 実験計画法における因子と水準の制約によって、切削油使用の有無の影響を考慮するためには、両条件下で同条件の試験実施を行う必要があった。これに対して、分散分析を行うことで試験結果に対して影響の小さな因子を特定し、これを

切削油の影響を考慮した別の因子に変更することで、試験実施数を 18 条件から 9 条件に削減することを検討した。9 条件の結果から決定した熱変形予測式を 18 条件の試験結果に対して適用したが、一部の試験では加工径変化を良好に予測することができなかった。これは、切削油の影響を考慮した因子において、その影響が設定した特定の水準に偏ったためと考えられる。

- (6) 制約の存在する実験計画法に対して、より自由度の高い All Pair 法を用いることで、より少数の試験から効率よく熱変形予測式を決定する手法を検討した。その結果、切削油の影響を考慮した 12 条件の試験実施から熱変形予測式が、18 条件の試験実施を必要とする実験計画法を用いた場合と同程度の予測が可能であることを確認し、本手法を用いることでより効率的に熱変形予測式が決定可能であることを示した。
- (7) All Pair 法を用いた熱変形予測式の決定手法に対して、実験計画法における分散分析に相当する分析を実施し、加工径変化に及ぼす影響の小さな試験を省くことで、熱変形予測式決定に必要な試験数をさらに削減することを検討した。その結果、試験条件を 12 条件から 8 条件程度まで削減することは可能であるが、予測精度が多少悪化することが確認された。一方で、上記の分析結果から、加工径変化に対して各因子の影響が互いに干渉する傾向が確認された。

以上より、本論文においては上記の All Pair 法による手法を用いることで、旋盤に対して少数位置の温度測定によって熱変形を予測し補正するシステムを、最も効率よく適用することが可能となると結論する。なお、All Pair 法を用いた熱変形予測式の決定においては、上述のように各因子が互いに干渉しあう傾向が確認されており、これより適切に設定することで、熱変形予測をさらに高精度することが可能と考えられる。また試験実施数についても、予測精度が保証される範囲内であれば、少数であることが望ましいと思われる。そのため今後は、熱変形予測式の高精度化と、さらなる試験数削減について検討する予定である。これらの検討については、今後多数の装置に適用し、機械構造などの類似性と、装置ごとの因子に対する加工径変化への影響の程度との関連性を調査することで、新たに適用対象とする装置に対して、事前に削除可能な試験条件を選択し、試験実施数を削減することを試みる。

参考文献

- (1) 岩田憲明: 工作機械業界の現状と問題点と対応策, 経営と経済, Vol. 59 No. 2 (1979), pp.1-14.
- (2) 水野順子: 韓国機械産業の企業間分業構造と技術移転: 電子・工作機械産業の事例, 経済協力シリーズ, Vol. 162 (1992), pp.37-54.
- (3) 経済産業省生産動態統計年報 機械統計編, <https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html#menu6>, (閲覧日 2021年10月16日).
- (4) 望月和明, 筒井徹: 中小企業の競争力と経営課題に関する実態調査, 商工金融, Vol. 1 (2013), pp. 35-57.
- (5) 難波義治, 高橋一郎, 塚本真也, 梅川徳次, 早川伸哉, 大村悦二, 今井智康, 原田孝, 三井公之: 加工学・加工機器, 日本機械学会誌, Vol. 106, No. 1017 (2003), pp. 630-634.
- (6) 山田恵吾, 山野真, 浅井隆平, 金子義幸, 鈴木直彦: 生産性を高めた省エネルギー・省スペースCNCタレット旋盤の開発, 日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会講演論文集 (2012), 0806.
- (7) 三島望: 工作機械の設計評価の研究 - 小型化を志向した設計パラメータ評価 -, 精密工学会誌, Vol. 67, No. 11 (2011), pp. 1787-1791.
- (8) 千田治光: 工作機械の智能化の現状と加工事例, 精密工学会誌, Vol. 78 No.9 (2012), pp.748-751.
- (9) 清水伸二: 工作機械の精度評価技術の現状と今後の課題, 計測と制御, Vol.

41 No. 11 (2002), pp.775-780.

- (10) 品川幹, 社本英二: 案内面での摩擦減衰を考慮した工作機械のびびり振動安定性予測 (基本的モデルの構築と摩擦および剛性がおよぼす影響の検討), 日本機械学会誌, Vol. 78, No. 787 (2012), pp. 1013–1025.
- (11) 上野浩: 工作機械の智能化技術, システム/制御/情報, Vol.61 No.3 (2017), pp. 107-112.
- (12) 加藤慎, 河野大輔, 吉岡勇人, 杉田直彦, 浜口顕秀, 高野和雅, 飯島一憲, 柿沼康弘: 新構造材料適用省エネルギー型工作機械の熱変位および章エネルギー性能評価, 日本機械学会論文集, Vol. 86, No.884 (2020), pp. 20-00002.
- (13) Srinivas, N. G., Ashvarya M. and Ashok, N. B.: A model-based cooling strategy for motorized spindle to reduce thermal errors, International journal of machine tools and manufacture, Vol. 132 (2018), pp. 3-16.
- (14) 小高勢也, 川瀬美真, 楠山順平, 中尾陽一: 工作機械用温度制御システムの開発と制御性能の基礎的評価, 砥粒加工学会誌, Vol. 64, No. 4 (2020), pp. 208-213.
- (15) Uhlmann, E., Slein, S., Polte, M. and Triebel, F.: Modeling of a thermoelectric self-cooling system based on thermal resistance networks for linear direct drives in machine tools, Journal of machine engineering, Vol. 20, No. 1 (2020), pp. 43-574.
- (16) Brecher, C. and Adam, W.: Compensation of thermos-dependent machine tool deformation due to spindle load on reduced modeling effort, International journal of automation technology, Vol. 5, No.5 (2011), pp. 679-687.
- (17) Linart, L., Juliane, W. and Jurgen, W.: Analysis of the consumption of fluidic

systems in machine tools, *Procedia CIRP*, Vol. 63 (2017), pp. 573-579.

- (18) 杉田直彦, 吉岡勇人, 柿沼康彦, 河野大輔: 新構造材料適用省エネ型工作機械の研究開発, 2019年度精密工学会春季大会講演会論文集 (2019), C02.
- (19) 田辺郁男, 西山晃, 安藤涼, 高橋智: 熱不感機能を有する旋盤の開発 (ニューラルネットワークの逆解放を用いた制御), *日本機械学会論文集*, Vol. 82, No.839 (2016), pp. 15-0634.
- (20) 清水康弘, 矢口翔, 林晃生, 中尾陽一: 高い熱的安定性を有する水静圧スピンドルの開発, *日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会講演論文集* (2017), 1117.
- (21) Mohring, H. C.: Composites in production machine, *Procedia CIRP*, Vol. 66 (2017), pp. 2-9.
- (22) Mayr, J., Jedrzewski, J., Uhlmann, E., Donmez, M. A., Knapp, W., Harting, F., Wendt, K., Marowaki, T., Shore, P., Schmitt, R., Brecher, C., Wurz, T. and Wegener, K.: Thermal issues in machine tools, *CIRP annals - Manufacturing technology*, Vol. 61 (2012), pp. 771-791.
- (23) Yang, Y., Du, Z., Feng, X. and Yang, J.: Real-time thermal modeling approach of a machine tool spindle based on bond graph method, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 113 (2021), pp. 99-115.
- (24) Yao, X., Hu, T., Yin, G. and Chang, C.: Thermal error modeling and prediction analysis based on OM algorithm for machine tool's spindle, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 106 (2020), pp. 3345-3356.
- (25) 金邊穂純, 生島俊平, 楠山順平, 中尾陽一: 工作機械における統合的溫度

予測モデルの基礎的研究 (第 1 報: 熱伝達係数の測定とモデルへの適用), 日本機械学会 2020 年度年次大会講演論文集 (2020), S13107.

- (26) 笹原弘之: 切削過程の有限要素シミュレーション, 精密工学会誌 Vol. 87, No. 5 (2021), pp. 422-425.
- (27) Mayr, J., Blaser, P., Ryser, A. and Hernandez-Becerro, P.: An adaptive self-learning compensation approach for thermal errors on 5-axis machine tools handling an arbitrary set of sample rate, CIRP annals-manufacturing technology Vol. 67 (2018), pp. 551-554.
- (28) Li, T., Zhao, C. and Zhang, Y.: Adapting real-time model on thermal error of ball screw feed drive systems of CNC machine tools, International journal of advanced manufacturing technology, Vol. 94 (2018), pp.3853-3861.
- (29) Liang, Y. C., Li, W. D., Lou, P. and Hu, J. M.: Thermal error prediction for heavy-duty CNC machines enabled by long short-term memory networks and fog-cloud architecture, Journal of manufacturing systems, (2020), in press.
- (30) Viroubal, J.: Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method, Precision engineering, Vol. 36 (2012), pp. 121-127.
- (31) Miao, E., Liu, Y., Liu, H., Gao, Z., and Li, W.: Study on the effects of changes in temperature-sensitive points on thermal errors compensation model for CNC machine tool, International journal of machine tools & manufacturing, Vol. 97 (2115), pp. 50-59.
- (32) 丸山裕也, 木崎通, 柚木田直彦, 古立哲, 中村真吾, 山田泰成: 切削液の挙動を考慮したマシニングセンタの熱変位補償 - 必要な測温点配置の検討 -,

2019 年度精密工学会春季大会技術講演会講演論文集 (2019), pp. 225-226.

- (33) 川崎博生, 菅将宏, 鈴木文寛: 工作機械の熱変形予測, 日本機械学会中国四国支部第 55 期総会・講演会講演論文集 (2017), K901.
- (34) 三島治夫, 榎原宏昌, 鈴木文寛, 大谷幸三, 池田雅弘, 片山剛之丞: 表面温度測定に基づく工作機械モデルの熱変形測定, 日本機械学会中国四国支部講演会講演論文集, Vol.50 (2012), 407.
- (35) 岩村明洋, 鈴木文寛: 工作機械の熱変形予測と抑制, 日本機械学会中国四国支部総会・講演会講演論文集, Vol.57 (2019), 1009.
- (36) Brecher, C. and Adam, W.: Compensation of thermos-dependent machine tool deformation due to spindle load on reduced modeling effort, International journal of automation technology, Vol. 5, No.5 (2011), pp. 679-687.
- (37) 岩井英樹, 佐々木雄二, 桜井康匡, 若園賀生: 工作機械熱変位補償技術の研究 (第 3 報) – リアルタイム熱変位補正による加工評価 -, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2013), pp. 9-10.
- (38) 岩井英樹, 佐々木雄二, 桜井康匡, 若園賀生, 岡裕司: リアルタイム熱変位補正システムの開発, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 2 (2017), pp. 121-124.
- (39) Fujiyama, M., Nari,atsu. K., Irino, N., Mori, M. and Ibaraki, S.: Adaptive thermal displacement compensation method based on deeplearning, CIRP journal of manufacturing science and technology, Vol. 25 (2019), pp.22-25.
- (40) Mayr, J., Muller, M., and Weikert, S.: Automated thermal main spindle & B-axis error compensation of 5-axis machine tools, CIRP annals – Manufacturing technology, Vol. 65 (2016), pp. 479-482.

- (41) 木谷晋也, 入野成弘, 丸山重明, 谷口佳代子, 藤森徹, 山崎和雄: リニアスケールを用いた工作機械精度変化のリアルタイム測定・補正システムの開発, 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2019), M15.
- (42) 木谷晋也, 入野成弘, 丸山重明, 谷口佳代子, 藤森徹, 曾雌眞和, 山崎和雄: デュアルリニアスケールを用いた工作機械制度測定システムの温度特性の実験的解析 Experimental thermal behavior analysis of measurement system for machine tool accuracy using dual-liner scale (in Japanese), 2020年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2020), A60.
- (43) 下池昌広, 茨木創一, 入野成弘: 工作機械の熱変形を2次元平面的に捉える手法, 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2019), K32.
- (44) 金子義幸, 立矢宏, 田村英晃, 新庄弘嗣, 磯部稔: 工作機械の熱変形の定式化による簡便な加工誤差補正方法 -連続稼働条件での適用-, 日本機械学会論文集, Vol. 73, No.726 (2007), pp. 371-378.
- (45) Zhang, C., Gao, F. and Li, Y.: Thermal error characteristic analysis and modeling for machine tools due to time-varying environmental temperature, Precision engineering, Vol. 47 (2017), pp. 231-238.
- (46) Tachiya, H., Hirata, H., Ueno, T., Kaneko, Y., Nakagaki, K. and Ishino, Y.: Evaluation of compensation for thermal deformation in a compact CNC lathe, International journal of automation technology, Vol. 6 No.2 (2012), pp. 137-146.
- (47) Shi, X., Zhu, K., Wang, W., Fan, L. and Gao, J.: A thermal characteristic analysis model considering cutting fluid thermal effect for gear grinding machine under load, The international journal of advanced manufacturing technology, Vol. 99 (2018), pp. 1755-1769.

- (48) Shi. X., Yang, X., Chen, G. and Wang, W.: Thermal structure design optimization and temperature control for worm gear grinding machine using flood cooling technology, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 108 (2020), pp. 2419-2431.
- (49) Wang, W., Kwen, S. H. and Yang, S.: A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniature machine tool, *Journal of materials processing technology*, Vol. 162-163 (2005), pp. 702-708.
- (50) Khorasani, A. M., Aghchai, A. J. and Khorram, A.: Chatter prediction in turning process of conical workpieces by using case-based reasoning (CBR) method and Taguchi design of experiment, *International journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 55 (2011), pp. 457-464.

謝辞

本論文を書き終わるにあたり、本研究室に所属して3年と半年の間、公私に渡り幅広く御指導頂いた立矢宏教授に心から感謝致します。また、試験結果に対する分析や考察につきまして、御指導、御協力頂きました福井工業高等専門学校の伊勢大成講師におかれましても、この場を借りて御礼申し上げます。

細川晃教授、浅川直紀教授、古本達明教授、渡邊千尋教授の皆様には、審査を対応頂きましたこと、御礼申し上げます。頂きました貴重な御意見につきまして、今後の研究に活用させて頂きたく思います。

本研究を行うにあたり、高松機械工業株式会社の高松宗一郎社長をはじめ、関係される皆様におかれましては、手厚い御支援を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。また、技術部の打越吉弘部長、金子義幸次長、鈴木直彦課長、ならびに総務部の大門拓志係長におかれましては、打合せ参加や進捗に対しての御指導を含め、直接的な御助力を頂き、ありがとうございました。

最後になりますが、限られた時間ではありましたが、本研究室を2020年度に修了された上野祐亮氏、梅北浩志諒氏、ならびに本研究室修士2年の北村春樹氏、修士1年の横山義和氏、学部4年の斎藤豪志氏をはじめ、皆様と研究生活を共に過ごすことができたことを幸せに思います。ありがとうございました。

2021年10月13日

石野 嘉章