

工作機械の熱変位対応技術

Technical Approach to Thermal Distortion in Machine Tools

久保幸人 Y. KUBO

Thermal distortion in machine tools greatly affects the changes in dimension of grinding work and causes various wastages in production field.

This report presents technical approaches to thermal distortion that would contribute to substantial improvement in quality and manufacturing efficiency and to energy savingness.

Key Words: thermal distortion, centerless grinding machine, optical linear scale, temperature compensation

1. はじめに

工作機械の熱変位は、加工物寸法精度に多大なる影響をおよぼし、以下の無駄を生むことにつながる。

不良品の発生による生産能率の低下および資源の無駄

予備運転の実施によるエネルギーの浪費
人の介入を要することによる人件費の発生

これらの無駄を極小化する技術の確立により、顧客の品質およびコストに寄与し、世界で勝ち抜くメーカーとしての基盤を確実なものにしたい。

本報では、2001年7月に完成した小型・超精密センタレス研削盤C3015F(図1)を題材に、予備運転の0化を目的とした熱変位対策手法について述べる。



図1 小型・超精密センタレス研削盤 C3015F

Compact, ultra-precision centerless grinding machine, C3015F

2. センタレス研削盤

センタレス研削盤は、研削砥石、調整車、ブレードから成り、加工物は研削砥石と調整車の中間

にあって調整車外周面とブレード頂面で構成されるV面上に支持されている(図2)。

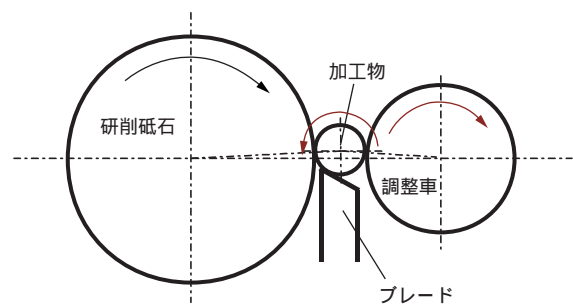


図2 センタレス研削盤の構成

Schematic drawing of centerless grinding machine

研削砥石により加工物が研削されると加工物に回転駆動力が発生するが、調整車との摩擦力で制動されることによって、加工物は研削砥石の周速とは独立に調整車の周速でゆっくりと回転する。

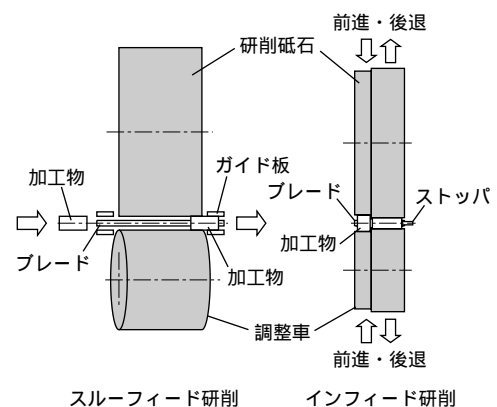


図3 センタレス研削盤における加工方式

Grinding methods in centerless grinding

センタレス研削盤と同様に、軸物外周面を加工するものに円筒研削盤があるが、センタレス研削盤は円筒研削盤に対して以下の～に示す利点があり、低コスト、高精度の量産加工に幅広く使用されている。

加工物の全面を支持しているため加工物支持剛性が高く高精度、高能率研削が可能。

センタ穴のように加工物支持のための特別な前加工を必要としない。

加工物真円度を改善する造円作用が大きい。

このような利点のあるセンタレス研削盤であるが、構造上の問題点も存在する。

図4にその構造を示すが、構成要素である研削砥石および調整車がそれぞれ研削砥石台および調整車台に回転自在な状態で支持されており、研削砥石台と調整車台はその下部にてベッドを介してつながっている。

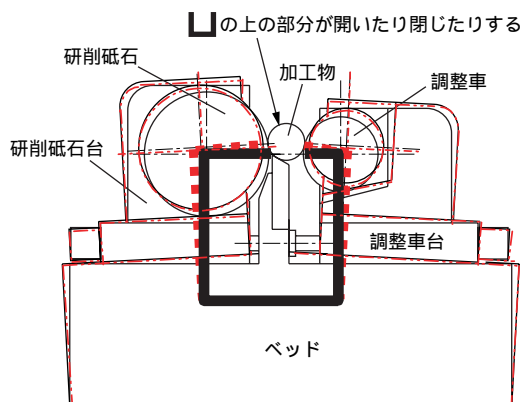


図4 センタレス研削盤の構造

Structure of centerless grinding machine

この構造をC型構造と呼び、研削位置がベッド上面から高い位置にあることから、研削位置において機械の静剛性、動剛性、熱変位の影響を受けやすく、これらが表1に示すように加工精度に悪影響をおよぼすこととなる。

表1 C型構造が加工精度に及ぼす影響

Effects of C-frame structure on grinding accuracies

	加工精度			
	寸法精度	真円度	円筒度	面粗度
静剛性				-
動剛性	-		-	-
熱変位		-		-

この中でも、静剛性、動剛性については特性をつかむことが比較的容易で、実験データなどの活用により対処可能であるが、熱変位については非常に難解なものである。

3. センタレス研削盤の熱変位対策

3.1 熱変位の特性把握

今回使用した、小型・超精密センタレス研削盤C3015Fの構造を図5に示す。

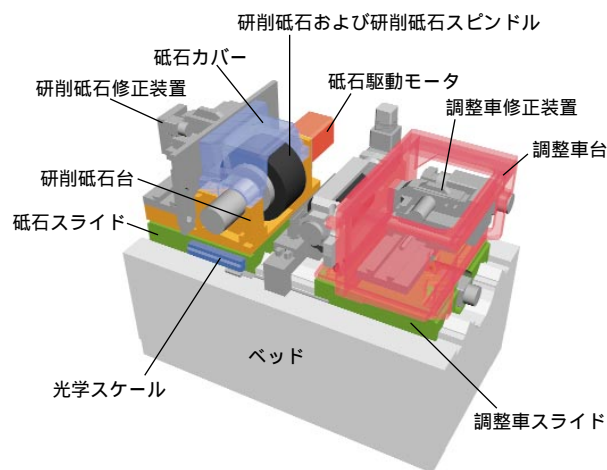


図5 C3015Fの構造

Construction of C3015F

本機最大の特徴は、光学スケールを研削砥石台、調整車台間に配し、加工物寸法精度に最も影響のある「研削砥石 - 調整車間距離」をフルクローズド制御により常に監視している点(図6)で、まずは、この構造が熱変位に対してどのような効果があるかを検証した。

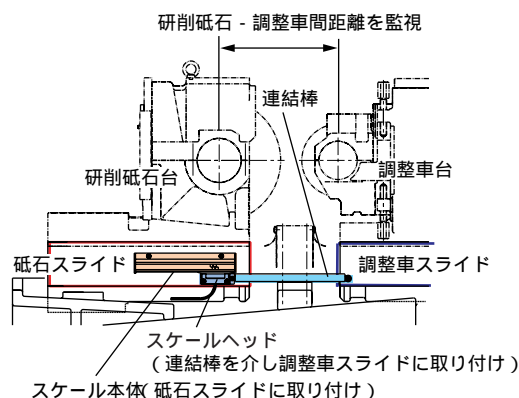


図6 光学スケールの配置

Arrangement of optical linear scale

光学スケールを使用している目的は、0.1 μmステップの微小位置決めを行うことにあるが、この検証では光学スケールによるフルクローズド制御を無効としたうえで、定位置スルーフィード研

削を行い、スケール本体とスケールヘッドに生じるズレ(砥石スライド - 調整車スライド間の変位)を時系列データとして取得している。

この変位は、光学スケール取付部位以下の熱変位であり、これと加工物寸法変化とを対比させたものを図7に示す。

またテストの方法としては、予備運転無しに機械起動後直ちに加工を開始しており、研削液温度は研削液タンクに備えた油温調節器によって一定に保たれている。

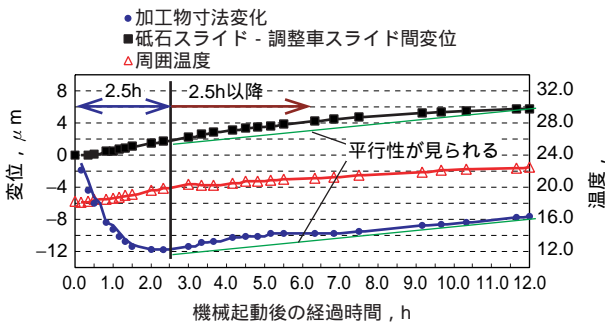


図7 スライド以下の熱変位と加工物寸法変化
Thermal distortion generated underneath slide and workpiece dimensional changes

これにより得られた結果は次の通りである。

砥石スライド - 調整車スライド間は、周囲温度変化に依存して加工物寸法がプラスとなる方向に変位する。

機械起動後2.5時間以降について、加工物寸法変化と砥石スライド - 調整車スライド間変位とに平行性が見られることから、光学スケールを有効にしフルクロード制御を行うことにより、スケール取付部以下(各スライド以下)の熱変位を補間可能である。

一方、機械起動後2.5時間以内では加工物寸法変化がマイナス方向へ大きく推移しているが、この要因の大半を研削砥石台の熱変位が占めることを同時に検証できている。

これによりセンタレス研削盤における熱変位の特性を以下のとおり把握することができた。

- ・スライド以下の部分とスライドから上の部分
が、それぞれ異なる要因によって別々に熱変位し、加工物寸法変化にはこの2つの熱変位が重なったものとして現れる。

したがって機械全体での熱変位を考えるにあたり、それぞれを分けて考えるとともに、その要因に対し個別に対策する必要がある(表2)。

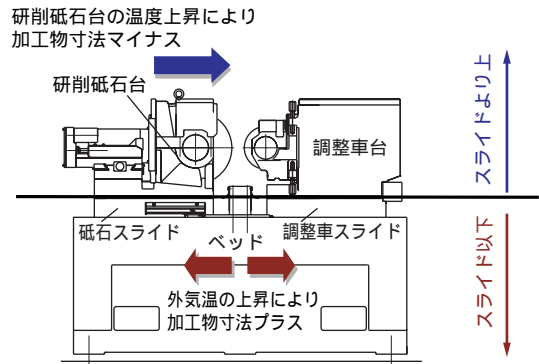


図8 センタレス研削盤における熱変位の特性
Thermal distortion characteristics in centerless grinding machines

表2 熱変位の要素と要因
Elements and causes of thermal distortion

	加工物寸法に影響を与える熱変位要素	熱変位の要因
スライドより上	・ 研削砥石台	・ 砥石駆動モータ ・ 砥石スピンドル
スライド以下	・ ベッド ・ 送りネジ軸	・ 周囲温度 ・ 研削液温度

3.2 研削砥石台の熱変位対策

前述のとおりC3015Fではフルクロード制御を行うことにより、スライド以下の熱変位について無視できる。

したがって、本機熱変位対策では研削砥石台の熱変位のみに着目している。

研削砥石台の熱変位は、機械の自己発熱によるものであることが明らかであり、その要素は

1. 砥石駆動モータ、2. 砥石スピンドルの2点である。

熱の伝わり方には、伝導伝熱、対流伝熱、ふく射伝熱の3つのモードが挙げられるが、研削砥石台の熱変位に関しては伝導伝熱、つまり接触面からの熱の流れ込みが支配する。

図9に研削砥石台周辺の構造図を示す。

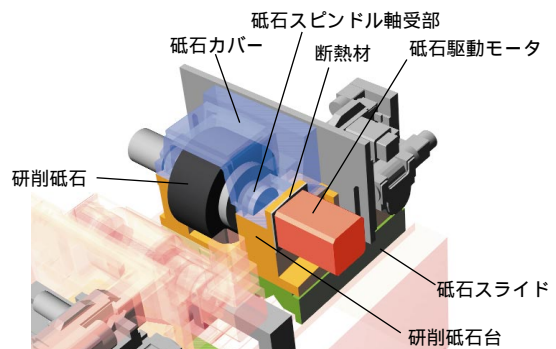


図9 研削砥石台周辺の構造
Structure around grinding wheel spindle head

まず砥石駆動モータからの伝熱については、当初からモータと研削砥石台との接触面に断熱材を挟み込み伝熱の遮へいを試みているが、断熱材がモータから発生する熱の容量を受け止めきれず、図10に示すように連続加工時において加工物寸法はマイナスになっていく一方である。

対策として、モータと研削砥石台の間に水冷式のスペーサを挿入することで、同じく図10に示すようにモータから発生した熱を完全に遮へいすることに成功している。

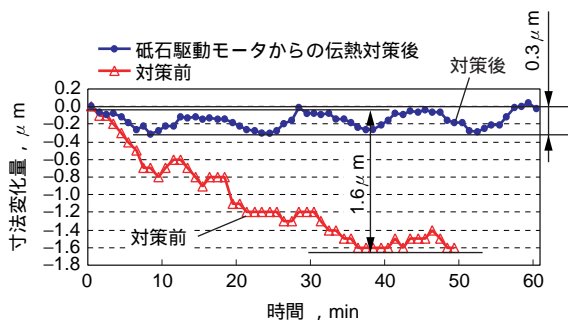


図10 連続加工時における加工物寸法変化

Dimensional changes in continuous grinding operation

次に砥石スピンドルからの伝熱については、砥石スピンドル軸受部の発熱に起因しており、構造上の制約からこの部分の伝熱を遮へいする方法はない。

伝熱を遮へいする方法以外には「スピンドル軸に冷却水を流す」、「油静圧軸受を採用し静圧油温度をコントロールする」など、軸受部の発熱を限りなく0に近づけることが考えられるが、そのいずれもが付帯装置を要するとともに非常に大きなエネルギーを消費するため、省エネルギーの観点からも望ましくはない。

そこで、研削砥石台の取付構造に着目し、これを変更することにより、先に述べた駆動モータからの伝熱遮へいと合わせて、研削砥石台の熱変位を当初の13.2 μmに対し、6.5 μmと約1/2程度にまで改善することに成功している(図11)。

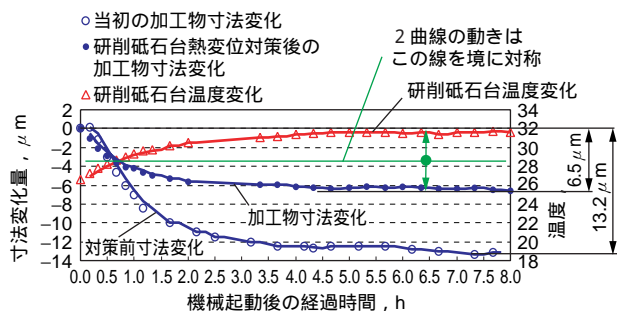


図11 研削砥石台熱変位対策による効果

Effects by improving thermal distortion of grinding wheel spindle head

しかしながら、この寸法変化量は依然大きく、さらなる改善が望まれる。

そこで最終的に温度補正という手法を用いて対策を試みることとなった。

3.3 温度補正の実施

温度補正の概要としては、寸法変化と関連する温度変化部位を捉え、その温度変化に対してスライドを移動し熱変位を補正するもので、図11より加工物寸法変化と研削砥石台温度変化に関連性が認められることから温度補正が有効であると判断した。

図12に温度補正のシステム図を示す。

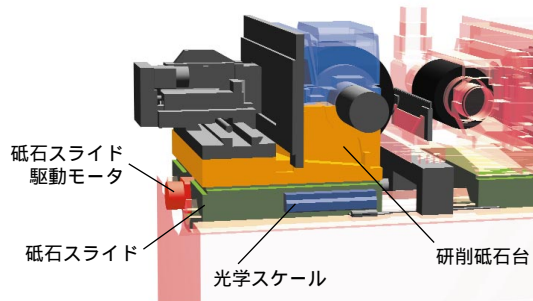
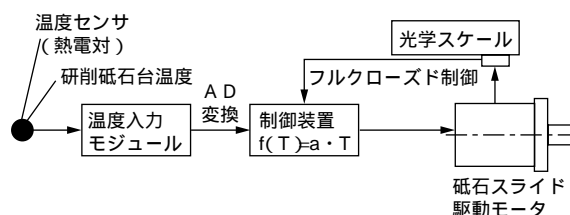


図12 温度補正システム図

System diagram of temperature compensation

図12において、温度センサは研削砥石台に組み込んでおり、研削砥石台の温度変化を制御装置へリアルタイムで取り込み、この温度変化量に対してスライド位置の制御を行っている。

ここで、温度測定箇所は実験により最適な部位を選定している。

また、この制御装置に取り込んだ温度変化量を補正量へ置き換えるために計算式を用いるが、この数式は以下に示す様に簡単な一次式で定義しており、これこそが今回の大きな特徴である。

$$\begin{matrix} \text{スライド補正量} & \text{補正係数} & \text{研削砥石台} \\ (\mu\text{m}) & (\mu\text{m}/^\circ\text{C}) & \text{温度変化量} (^\circ\text{C}) \end{matrix}$$

$$f(T) = a \times T$$

補正係数 a は、図11に示した加工物寸法変化と研削砥石台温度変化の関係より決定している。

以上すべての熱変位対策により、機械起動直後の加工物寸法変化を当初の13.2 μmから2 μm以内へと飛躍的に抑制することができた。

この結果を図13に示す。

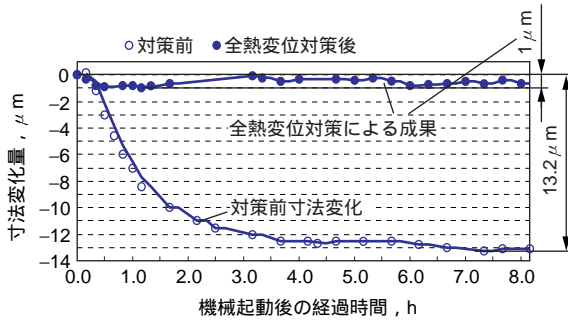


図13 全熱変位対策による結果

Outcome of adopting all the countermeasures on thermal distortion

なお、前述にて効果を2 μmとしているのは、何度も再現性の確認を行った際のばらつきを考慮しているためである。

3.4 センタレス研削盤における熱変位対策の要点

センタレス研削盤における熱変位対策の要点を以下に示す。

- ・熱変位はスライド以下の部分とスライドより上の部分とを個別に考える。
- ・スライド以下の熱変位については、周囲温度、クーラント温度等の環境に依存し、スケールを最適に配置しフルクロード制御を行なうことにより、かなりの効果が期待できる。
- ・スライドより上の熱変位については、自己発熱要素からの伝熱を抑えるとともに熱の影響を受けにくい構造とすることが効果的である。
- ・温度補正に関して、今回計算式を一次式で定義できているが、これは種々の対策により、可能な限り熱変位要素を取り除いた結果であり、すべてを温度補正で解決しようとする、数式が複雑になる、補正係数が大きくなるなどにて、誤差を生じることになりかねないので注意が必要である。

4. おわりに

熱変位対策の手法としては、加工物寸法に影響する各部位の熱変位について個々にその方向および量を適確に捉えるとともにその依存要因を十分に分析し段階的に対処していくことが重要となる。

今回、センタレス研削盤における熱変位対策を取り上げ、前述の手法を実行するとともに最終的に温度補正を実施することにより熱変位抑制に成

功したが、この手法はセンタレス研削盤以外での適用も有効である。

これにより「モノづくりの品質およびコストにおいて、世界で勝ち抜く基盤技術」を確立していただけるものと確信する。

筆者



久保幸人*
Y. KUBO

* 光洋機械工業株式会社
開発技術部