

エアスピンドル制御による金型の高精度創成

神奈川大学 / 中尾 陽一

1. はじめに

マイクロ金型に代表される小型精密金型については、今後も益々の加工精度向上が重要である。例えば、ワクチンやインスリン投与ツールとしてのマイクロニードルや、LED 照明用フライアイレンズ金型などがある。このような分野で使用される部品の精密化に伴い、超精密工作機械には、従来にも増して高い精度が求められるようになってきている。

金型への微細な形状創成には、マイクロエンドミルによる加工が必要であり、所望の切削速度と加工効率の実現のために、スピンドル回転数の高速化が必要になる。例えば、高い回転精度を維持しながら、スピンドルの高速回転化が実現できれば、小径回転工具による高能率高精度の微細加工が行える。さらなる加工精度の向上には、転がり軸受ではなく静圧軸受を備えた高精度スピンドルが望ましい。

一方、高速化によってスピンドル内部の発熱が顕著になるため、スピンドルの熱変形抑制技術、さらには熱変形の補償手法が欠かせない技術となる。周知のように、機械加工における加工精度は、工作物・切削工具間の相対位置精度に依存するため、その精度制御技術が長年の課題となっている。上記のいずれの課題も、今後のマイクロ金型等の革新的な精度向上を実現するための重要課題と位置付けられる。

さて、スピンドル内部の熱源および冷却機構との相互作用により、装置内部の温度分布は複雑に変化する。その結果、スピンドルは単純な膨張や収縮だけではなく、ある部分では膨張し、他の部分では収縮するような複雑な熱変形形態も生じる。このようなスピンドルの熱変形の結果、工作物に対する切削工具の変位誤差が発生するため、これらを把握した上で、温度変化予測と熱変形を抑制可能なスピンドルの最適冷却構造設計¹⁾²⁾も望まれる。

2. 目的

本研究は、申請者がこれまでに開発したベルトインモータ方式の空気静圧スピンドルによるマイクロ金型に代表される精密金型の加工精度向上技術の確立を最終的な目的にして、開発したスピンドルに対して、スピンドル内部の詳細な温度分布、3種類の冷却構造がスピンドルの熱変形および軸端変位に及ぼす影響等について、実験的にスピンドルの温度変化の評価を行い、温度特性を明らかにする。さらに、これらの実

験結果で得られた一部のデータを境界条件として、3次元熱流体解析を実施し、実験では詳細把握が困難であるスピンドル内部の温度分布や、各冷却機構がスピンドルの熱変形や軸端変位に及ぼす影響を評価した。

その上で開発スピンドルの特定部位の温度制御により、軸端変位の能動的な制御の実現を目指して、スピンドルのフィードバック温度制御の検討を行う。これらの成果から、加工精度に直接影響するスピンドル軸端の変位を能動的に制御する技術について検討を行った。

3. 実用的な価値、実用化の見込など

本研究では、工作機械用スピンドルの温度分布変化と熱変形を詳細に明らかにするための実験ならびに解析を行ったが、この提案手法は液冷方式が組み込まれた各種スピンドルの熱特性評価に適用できる。

また、著者らが提案しているフィードバック温度制御システムは、スピンドルに代表される工作機械要素の温度制御に有効であることを示している。

4. 研究内容の詳細

4.1 研究対象のスピンドル

図1に本研究が対象とした空気静圧スピンドルの基本構造を示す。本スピンドルは、ラジアル軸受を主軸の前後に配置し、スラスト軸受は軸受面を両側から負荷を支持させる対向式構造となっている。スピンドルには、ベルトインモータが組み込まれている。

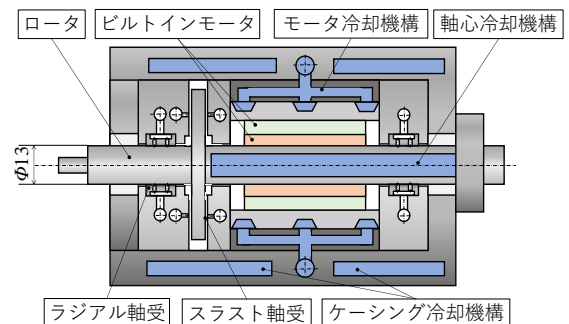


図1 研究対象のスピンドル基本構造

本スピンドルには、水冷方式が採用されている。本スピンドルには3種類の独立構造の冷却流路系が構築されている。具体的には、まずスピンドル回転軸の温度安定性を確保して、回転軸端の熱変位抑制を目的にして、軸心冷却構造が組み込まれている。また、最大の熱源であるベルトインモータの冷却を行うモータ冷却構造がある。さらに、2カ所のラ

ギア軸受, 対向一カ所のスラスト軸受における発熱を冷却するための冷却流路も備えられている。

本研究では, これらの流路に対する冷却を行うことによって, スピンドルの回転軸端の2方向変位制御を検討した。

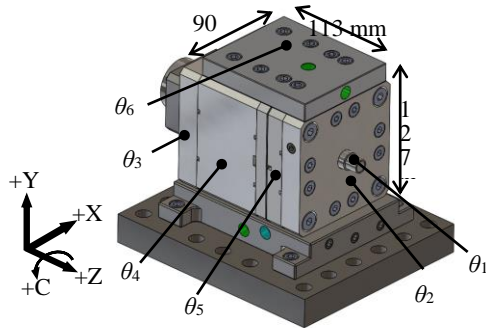


図2 温度評価位置

4.2 温度特性と熱変形の検討

スピンドルの温度特性を把握するために, 図 2 に示すスピンドル各部, 計 6 箇所での温度測定を行った。本実験におけるスピンドルの温度測定部 $\theta_1 \sim \theta_6$ および主要寸法を図中に示す。また, 3 種類の各冷却構造への冷却水の供給および排出温度, 空気静圧軸受各部への圧縮空気の供給温度, スピンドル周囲環境温度の計 10 点を測定した。

実験では, 各冷却構造 (S_s : 軸心冷却構造, M_s : モータ冷却構造, C_s : ケーシング冷却構造) を独立で使用する 3 通りの冷却条件で検討を行った。ここで, 各冷却構造を使用した冷却条件をそれぞれ S , M , C と定義する。このとき, スピンドル周囲環境温度を 20°C , 各冷却構造への冷却流体の供給水温を 15°C , 供給流量を 2 L/min として, 測定開始から 30 分後に冷却水を供給し, 各測定部温度が定常状態になるまで測定を行った。さらに, 以上の実験で得られた結果をシミュレーションのための境界条件として, 3 次元熱流体シミュレーションを実施した。

本研究で使用したシミュレーションは, 二段階に分けて行った³⁾。まず, 第一段階においては, 上述の実験で得られた各流体温度等を境界条件にして流体解析を行い, 各冷却流路壁面の温度および熱伝達係数を決定した。ここで, 本解析のための境界条件として, 各実験で得られた冷却流体の供給および排出部の水温, 流量, 各静圧軸受部への圧縮空気の供給温度, 設置環境温度を与えた。

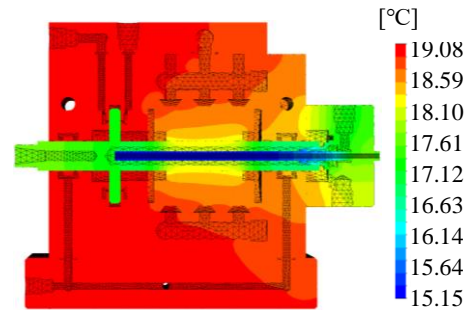
本検討の第二段階では, 第一段階で得られた各流体流路壁面の温度および熱伝達係数を熱伝導解析の境界条件とした。その上でスピンドル内部の温度分布と熱変形を計算した。

4.3 スピンドルの温度分布と熱変形

解析結果より, 3 種類の冷却構造がスピンドル各部温度に及ぼす影響を検討した。図 3 に一連の解析により得られたスピンドル内部の温度分布を示す。

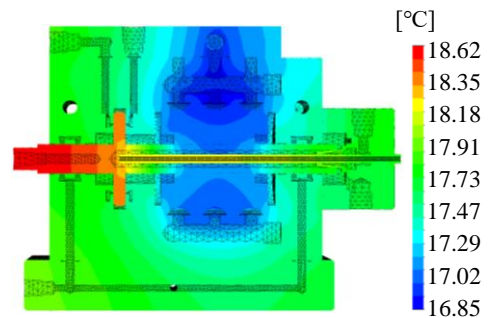
ここで, 図 3(a)~図 3(c)は, それぞれ冷却条件 S , M , C の結果を示している。図 3 から, 各冷却による異なる冷却効果, すなわち 3 種類の冷却構造に異なる機能を付与できる可能性があることがわかる。例えば, 冷却 S においては, スピンドル回転軸と後方にかけての冷却効果が顕著である。また, 冷却 M においては, スピンドル中央部の冷却効果が顕著である。一方, 冷却条件 C においては, スピンドル前部からスピンドルベース部, また静圧軸受周辺にかけての冷却効果が得られる。なお, 冷却条件 C では, 冷却水をスピンドル下部から供給している。

4.4 軸端熱変位の検討結果



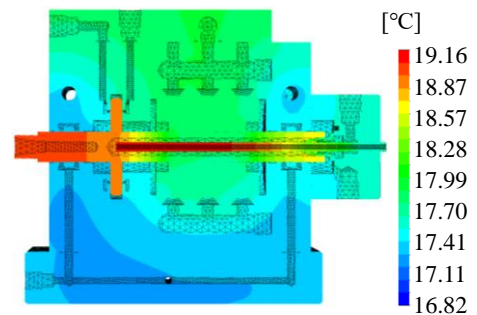
(a) 冷却条件 S

各冷却構造によるスピンドルの熱変形形態の検討を行った。なお, ここでは冷却効果を実験的に明



(b) 冷却条件 M

討を行った。なお, ここでは冷却効果を実験的に明



(c) 冷却条件 C

図3 スピンドル内部温度分布

らかにするために, 意図的に発熱量よりも大きくなるような冷却条件を用いた結果を示す。

図4に、解析結果の一例として、冷却条件Mにおけるスピンドル回転軸の軸方向熱変位(Z軸方向)を示す。図4では、スピンドル内部の温度変化に伴い、スピンドル回転軸の熱変位が生じ、初期状態よりも冷却水によって温度が低下したため、軸両端から中心方向に熱収縮が生じている。また、解析では、単純な熱変形による収縮だけではなく、望ましくないスピンドルの姿勢変化を発生させる反りの検討も行い、回転軸の角度変位による姿勢変化も検討した。

図4 スピンドルシャフトの熱変形

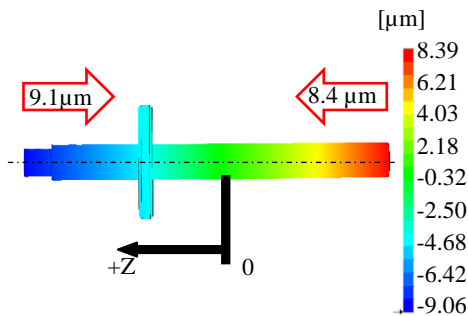


図5には、冷却条件によるスピンドル回転軸の熱変形と姿勢変化を示す。ここで、冷却条件S, M, CでのY軸方向変位を Y_S, Y_M, Y_C , Z軸方向変位を

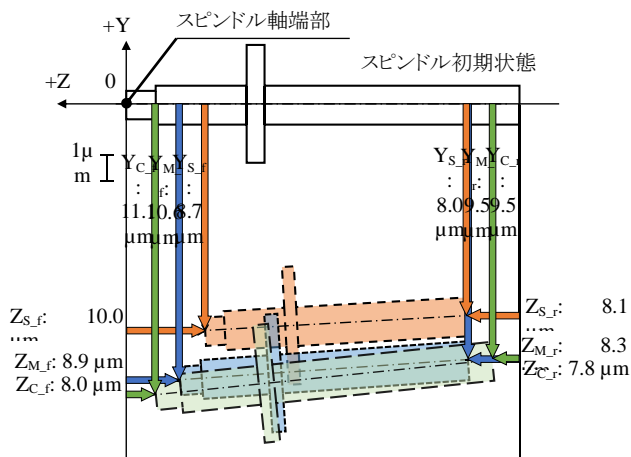


図5 各冷却条件によるスピンドル主軸の熱変形形態 Z_S, Z_M, Z_C と定義する。また、Z軸方向は比較を容易にするために、表示スケールを拡大している。図5より、いずれの冷却条件においても、スピンドル軸端部は左下がりの姿勢変化が生じている。また、図4(c)に示すように左側下部の温度は低いことも左下がり傾向の姿勢変化に影響している。

以上の結果から得られた各冷却条件によるスピンドル回転軸の軸端変位を比較すると、冷却条件Cにおいて、角度変位が 2.7° と最も大きく傾くことが確認できた。また、スピンドル全体の反りの影響が顕著に表れるY方向変位量も大きいことがわかる。

本検討では、熱変形形態を特徴付けるために、

各冷却構造を個別に使用し、冷却水温を 15°C 程度と意図的に低く設定したが、それぞれの冷却構造を組み合わせて使用することで、不適切なスピンドル内部温度分布の抑制に期待できるうえ、スピンドル回転軸の軸端変位を抑制できる可能性が高い。加えて、著者らが開発した温度制御システムを使用すれば、3系統の冷却水温を熱変形状態に応じて、適応的に独立に制御供給することも可能である。

本検討では、各冷却構造への設定冷却水温に対するスピンドル回転軸の上下方向熱変位制御機能付与の可能性を検証するため、図6に示す方法により、スピンドル回転軸の熱変位測定を行った。

その結果、スピンドルの回転に伴って軸端の両方向の変位特性が確認できた。具体的には、例えば、回転数 500 min^{-1} 時においては設定冷却水温を $0.3^\circ\text{C}/\mu\text{m}$ の割合で変化させることにより、スピンドル回転軸の上下方向変位制御が可能であることが明らかになった。そこで、スピンドルに供給する冷却流体温度の能動制御によるスピンドル温度制御に関する検討を行った結果を以下に示す。

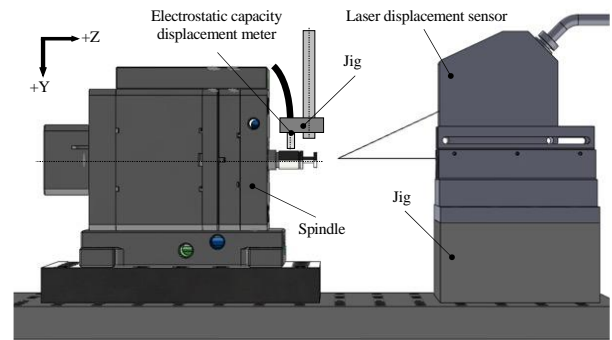


図6 軸端変位の測定

4.5 フィードバック温度制御系

一般に、工作機械の冷却システムは、冷却装置(以下、チラー)から冷却液を供給することにより、制御対象の熱を取り除く。しかしながら、一般的な冷却チラーでは、事前に設定された温度の冷却流体を供給しており、多くの場合、発熱要素の冷却に効果的ではあるものの、運転条件や加工条件の変化に伴い、逐次変化する熱量変化に追従した冷却は困難である。さらには、発熱要素の温度制御を行っているわけではないため、熱量変化に起因する温度変化および熱変形は、制御対象の熱的特性に依存する。そこで、本研究では、制御対象の熱量変化に追従可能な考案したフィードバック温度制御システムを利用した。図7に温度制御システムの基本原理を示す⁴⁾。本温度制御手法では、それぞれ異なる温度に制御された冷却流体を流量制御弁により、任意の流量比で混合させる。ここで、本流量制御弁は、制御電圧により流量を制御するものである。この制御系を用いて、制御対象であるスピンドル温度をフィードバックし、これが発熱量の変化に

関わらず、一定になるように制御を行う。

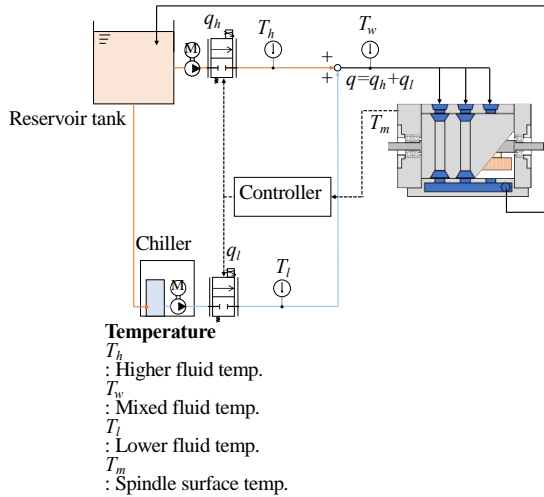


図7 フィードバック温度制御系の構成

4.6 制御結果

スピンドルの温度制御実験には、図1とは異なるが類似の水冷構造を有するビルトインモータスピンドルを使用した。このスピンドルは、回転時に生じる内蔵モータの発熱を抑制するため、モータステータ部を覆うように3本の並行な冷却流路をケーシング内部に配置している。

図7に開発したフィードバック温度制御手法をビルトインモータスピンドルに適用したシステムの概略図を示す。本温度制御システムでは、制御対象であるスピンドル温度 T_m をフィードバックし、目標温度と一致するように、高温側流体と低温側流体の流量制御を行う。ここで、高温側流体温度 T_h 、低温側流体温度 T_l 、混合流体温度 T_w をシース型测温抵抗体で測定し、制御対象であるケーシング前面の温度 T_m を貼付型测温抵抗体により測定を行った。本検討では、スピンドルに供給する混合冷却流体の流量を7 L/minとした。

ここでは、スピンドル回転数のステップ上昇時のスピンドルの温度制御性能を検討した。実験では、スピンドルの回転数 N : $10,000 \text{ min}^{-1}$ 時からステップ上昇 (ΔN : $+5,000 \text{ min}^{-1}$) させ、スピンドルの温度制御性能を評価した。ここで、目標温度を $20 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。また、本実験では、制御性能の比較を行うため、開発した温度制御システムに加え、従来の冷却システムとして市販チラーを単体で用い、同様の実験を行った。

図8は、温度制御システムによる回転数のステップ上昇時におけるスピンドルの温度変化を示しており、異なる制御システムによる制御性能の違いを示している。図8より、従来の冷却システムを使用した場合、スピンドル主軸回転数のステップ上昇に伴い、 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上のスピンドル温度変化が生じ、これが温度の定常制御誤差になることがわかる。この結果は、従来冷却システムでは、スピンドル稼働時に

ける熱量変化の影響を補償することが困難であることを示しており、スピンドルのみならず、工作機械の駆動テーブルなどの構造各要素において、同様の温度変化を生じることを意味する。

一方、開発した温度制御システムは、スピンドル回転数のステップ上昇に伴う過渡的な温度上昇は比較的大きいものの、温度上昇を逐次抑制していることがわかる。すなわち、開発した温度制御システムによるスピンドルの過渡的な温度上昇は、最大で $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度に抑制している。

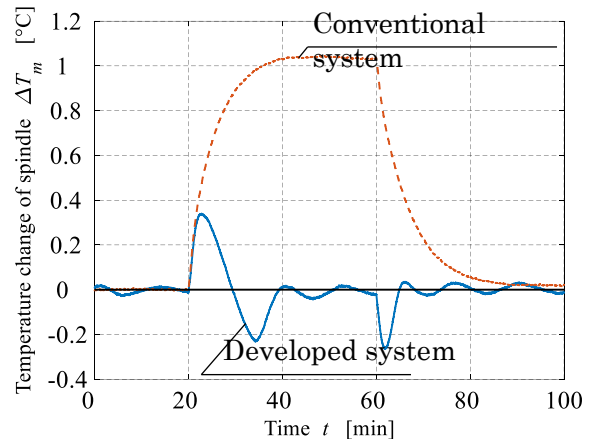


図8 温度制御時の温度特性

以上の結果から、スピンドルの温度制御が実現できたので、スピンドルの温度制御時の軸端熱変位の抑制効果を検証した。

回転中の軸端熱変位の測定には、図9に示すように、スピンドル本体にスーパインバー製の治具を用いて変位計を設置して熱変位を測定した。

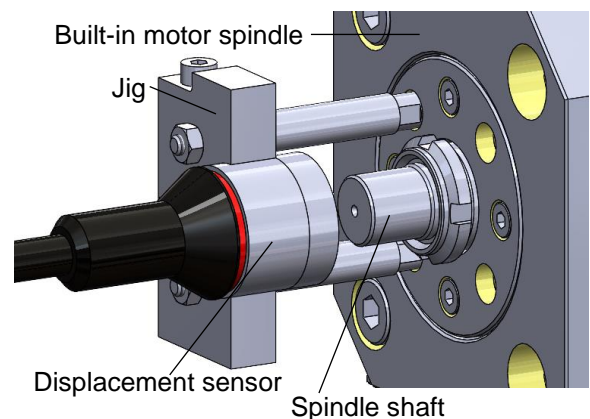


図9 軸端変位の測定方法

図10には、スピンドル温度制御の有無によるスピンドル軸端変位を示す。これによれば、フィードバック温度制御を行わず、市販チラーを使った場合には、スピンドル回転数変化に伴う発熱変化により、

軸端は5 μm 程度の熱変位が発生している。割合で変化していることが確認できる。次にスピンドル温度を制御した場合、軸端熱変位は4 μm 程度に抑制されている。

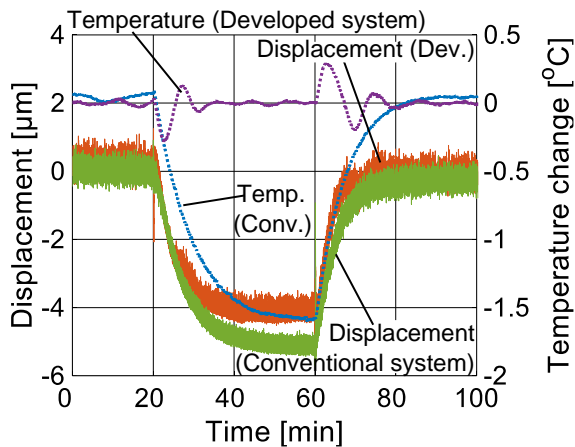


図 10 軸端変位の結果

しかしながら十分な熱変位抑制効果は実現できていない。この理由は以下の通りである。すなわち、今回の実験では、スピンドル温度はスピンドル正面外面に設置した温度センサーで測定し、これを一定にする制御を行っている。しかしながら、スピンドル外面の温度は、スピンドル内部や回転軸のスピンドル本体温度とは異なり、環境温度の影響をより強く受けるため、内部温度よりも低くなる。このため、スピンドル回転軸の軸端熱変位を抑制するためには、スピンドル外面温度ではなく、軸端熱変位に直接的に影響する温度をフィードバックし、これを一定に制御するように改善するのが良い。

5. まとめ

本研究では、マイクロ金型に代表される小型

精密金型の加工精度向上を目的にして、工作機械用スピンドル内部の発熱による温度変化と熱変形問題について、実験と3次元熱流体解析による研究を行った。また、著者らが提案するフィードバック温度制御システムをスピンドルの温度制御に適用した。

以上の研究により、空気静圧ビルトインモータスピンドル内部の温度変化と熱変形形態を明らかにした上、内部冷却による加工誤差を抑制するための冷却方法を検討した。さらに、スピンドルの温度制御による温度安定化が実現できることを明らかにした。

今後、本研究の成果を利用して、空気静圧ビルトインモータスピンドルに取り付けた小径エンドミルの熱変位を抑制するように能動的変位制御の研究に展開したいと考えている。

6. 参考文献

- 1) K. Ota, et.al.: Development of thermal displacement prediction model and thermal deformation measurement methods, ICTIMT2023, 3-14, 2023.
- 2) Y. Nakao, et.al.: Thermal characteristics of spindle supported with water lubricated hydrostatic bearing, Int. J of Automation Technol., 8, 4, pp. 530-538, 2014.
- 3) D. Fedorynenko, Y. Nakao Evaluation of thermal stability of ultra-precision water-lubricated spindle, Precision Eng., Vol. 80, pp. 127-137, 2023.
- 4) 小高, 川瀬, 楠山, 中尾, 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, pp. 208-213, 2020.