

機関番号：32621

研究種目：基礎研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560113

研究課題名 (和文) 多軸・複合工作機械の熱変形特性向上のための結合部設計指針の確立

研究課題名 (英文) Design guide of joints for improving of the thermal characteristics of multi-axis and multi-tasking machine tools

研究代表者

清水 伸二 (SHIMIZU SHINJI)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：70146801

研究成果の概要 (和文)：

多軸・複合工作機械の熱変形特性向上のための結合部の設計指針について検討した結果、以下の事項が明らかとなった。1) 結合面の接触状態に偏りがあると、接触熱抵抗は、一様な接触状態時より、大きくなる。2) 結合面接触熱抵抗を考慮して、構造の熱変形解析を行うことにより、多軸・複合工作機械の熱変形特性をほぼ推定可能である。3) 結合面の接触熱抵抗を制御することにより、工作機械の熱変形特性を改善できる。

研究成果の概要 (英文)：

The design guide of joints is considered to improve the thermal characteristics of multi-axis and multi-tasking machine tools. As the results, the following matters are made clear. 1) The thermal contact resistance becomes larger than the one under the uniform contact condition, if the contact condition of the joint interface has deviation. 2) Thermal characteristics of multi-axis and multi-tasking machine tools can be nearly estimated by analyzing the thermal deformation with consideration of the thermal contact resistance of joints. 3) The thermal characteristics of the machine tools can be improved by controlling the thermal contact resistance of the joint interface.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 2,200,000 | 660,000 | 2,860,000 |
| 2009年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2010年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 総計 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：複合工作機械，結合部接触熱抵抗，熱変形，設計指針，FEM 解析

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初には、既に多くの多軸複合工作機械が開発され、ものづくり現場に浸透してきていた。この要因は、多軸複合工作機械上では、異種の加工を対等のレベルで行えることから、工程短縮が図れ、生産性の向上が期待できること、段取りの削減ができること、工作物の工程間移動が無いこと、高精度加工が期待できることなどが挙げられる。しかしながら、その多様な送り運動を実現するために、多軸複合工作機械の構造形態は、必然的に

に複雑なものとなる。このため、従来のマシニングセンタやターニングセンタ等に比べて、構造要素が多く、結果的に多くの結合部が構造内に存在することになる。そして、これら結合部は機械の静・動剛性はもとより、加工精度低下の主たる要因とされる機械の熱変形特性にも複雑な影響を与え、その制御が困難になっていた。しかしながら、この結合部が機械の熱特性に及ぼすメカニズムは明確にされておらず、その熱変形抑制のための結合部の設計指針についても殆ど検討さ

れていない状況であった。

2. 研究の目的

以上の背景の下、本研究では、これまで単純な結合面に対して検討してきた接触熱抵抗を、より現実的な接触状態で検討し、さらに実用的なものにするとともに、新たな接触熱抵抗の制御法を検討する。またそれらを適用した多軸複合工作機械の熱変形特性の解析法を確立するとともに、熱変形特性向上の観点から、結合部の最適化のための設計指針について検討し、その基本的方向性を示す。

3. 研究の方法

(1) 結合部の結合面接触状態が結合面接触熱抵抗に及ぼす影響

① 実験的検討

本研究の最大の特徴は、真実接触面積を正確に求め、それに基づいて、結合面の接触熱抵抗を評価することにある。従来は、これを公称面積に基づいて行っており、そのことが、接触熱抵抗の定量的測定を困難にしていた。図1は、これを可能にする実験装置の概要を示している。装置は、基本的に、超音波測定部、荷重負荷部、加熱部、温度測定部から構成されている。真実接触面積は、結合面全体にわたり超音波プローブをスキャンして、結合面各部での超音波の透過率を求めることにより、真実接触部の分布状態とともに測定できる。

本研究では、主として、結合面の接触状態に偏りがある場合の接触熱抵抗を詳細に測定して、その特性について明らかにする。

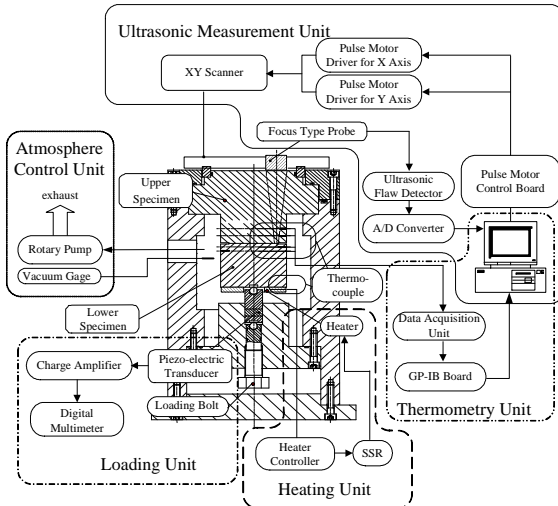


図1 実験装置の概要

② 解析的検討

図2は、結合面の接触状態に偏りが無い場合と有る場合の熱流の状態を模式的に示したものである。図2(a)は結合面が接触率100%であり、熱流は結合面に垂直方向にしか生じない。一方、図2(b)は接触部A及びBに向かって、熱流が縮

流していることがわかる。この縮流は、図2(a)で存在しない結合面に平行方向な熱流を生じることから、熱損失を生じ、結果として、接触熱抵抗を生じさせるものと思われる。

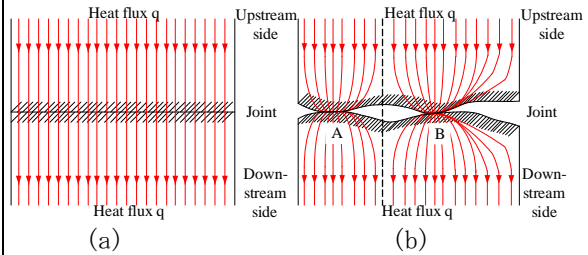


図2 結合面の接触状態と熱流

この結合面に平行方向の熱流量を検討するために、図3のような電気抵抗回路モデルを提案した。この電気抵抗回路モデルは、縦 L [mm]、横 L_b [mm]、厚さ t [mm]、結合面に垂直な x 方向の n 本の流路及び結合面に平行な y 方向の m 本の流路で構成されている。また、試料の内部抵抗として、 x 方向の内部抵抗を r [K/W]、長さを l [mm]、 y 方向の内部抵抗を r_b [K/W]、長さを l_b [mm]とする。上流から x 方向の各流路に均等に加える伝熱量を Q [W]として、キルヒホッフの法則を利用して、各流路に流れる伝熱量を計算する。座標は結合面の位置で $x=0$ 、試料左端で $y=0$ とする。材質はS45Cとして、熱伝導率 λ は、 0.0486 [W/mm \cdot K]とした。

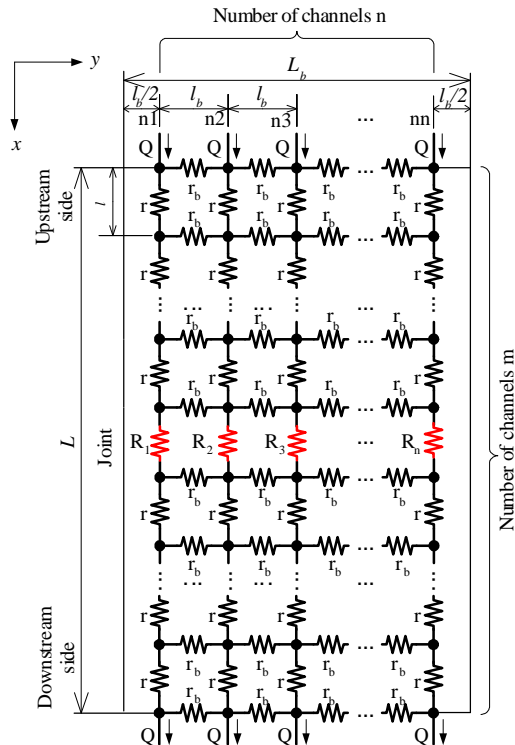


図3 解析のための電気抵抗回路モデル

(2) 結合部を考慮に入れた多軸複合工作機械の熱変位特性のFEM解析

①解析的検討

図3は、本研究で対象とした多軸複合工作機械の構造形態をモデル化したものである。基本的に、ベッド、第一主軸台、第二主軸台、キャリッジベース、キャリッジ、旋回ミリング主軸頭、ボールねじ、Z軸モータから構成されている。本解析モデルでは、基本的に全ての構造要素は実機の寸法に基づいている。特にベッドとキャリッジについては、中空構造とし、内部には本機と同様のリブも設けた。また、キャリッジベースとベッド間、キャリッジとキャリッジベース間には、それぞれZ軸案内面とY軸案内面が設けられている。この案内結合部には、著者らがこれまでに提案した方法を用いて、結合部の接触熱抵抗を設定した。案内には、転がり案内が用いられていることから、この部分での接触率を0.5%であるとして、接触熱抵抗を $2.2\text{mm}^2\text{K/W}$ に設定した。この値を標準値として、接触熱抵抗の影響についても検討した。

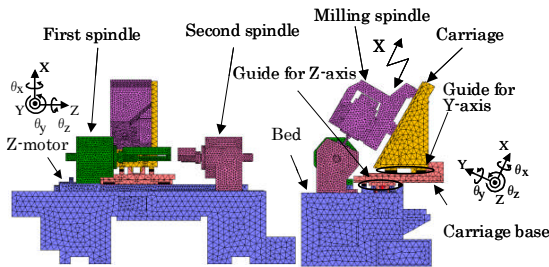


図3 多軸複合工作機械のFEM解析モデル

熱源としては、Z軸直進運動を想定して、Z軸モータ、Z軸案内面およびZ軸ボールねじとした。なお、それぞれの熱源にはZ軸運動時の案内面、Z軸モータおよびZ軸ボールねじの温度を実測した結果に基づいて、4時間後にそれぞれの温度が初期温度+10°C、初期温度+3°Cおよび初期温度+6°Cになるように熱流束を与えた。その結果、熱流束は、それぞれ 0.43W/mm^2 、 0.11W/mm^2 および 0.02W/mm^2 となった。その他の主な解析条件としては、構造材料を鋳鉄とし、また解析時間は前述の温度測定した際の実験結果と比較するために、4時間のZ軸直進運動をするものと仮定して解析を行った。

②実験的検証

上述の結合部の接触熱抵抗を考慮に入れたFEM解析手法の妥当性を検討するため、キャリッジベースに4時間の往復運動をさせたときの熱変位特性を実測した。その際の運動条件は、解析の際に、発熱部での熱流速を推定した時と同条件で行った。

(3) 結合部の設計指針についての検討

ここでは、上記(1)、(2)での検討結果を基に、接触熱抵抗を考慮に入れた結合部の

設計指針についてまとめる。

4. 研究成果

(1) 結合部の結合面接触状態が結合面接触熱抵抗に及ぼす影響

①結合面接触状態に偏りがある場合の接触熱抵抗

図4は、下部試料の結合面形状が、理想的なもの(b)、凸形状で接触状態に偏りがあるもの(c)、(d)と理想的な結合面形状を持った上部試料(a)との組合せに対して、接触熱抵抗 R を測定した結果を示している。図中の○は上部試料aと下部試料dを結合させ測定した結果、△は上部試料aと下部試料cを結合させ測定した結果、□は上部試料aと下部試料bを結合させ測定した結果である。

また、図中の円形の図は、接触率 Er^* が8[%]における、それぞれの試料の結合面接触状態図を示している。この図は、色の濃淡でその測定点での接触率 Er^* の大きさを示しており、色が濃くなるほど接触率 Er^* が高く、色が薄くなるほど接触率 Er^* が小さいことを示している。

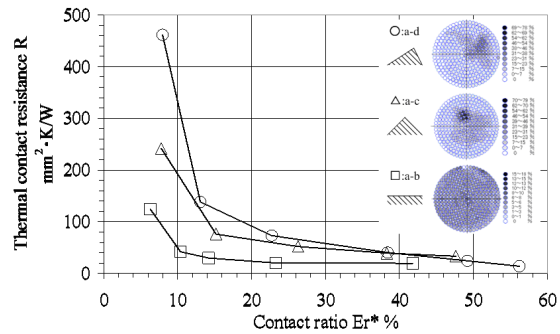


図4 結合面形状と接触熱抵抗の関係

図を見ると、同じ接触率 Er^* であっても、接触熱抵抗 R の値は、真実接触面積の分布状態によって異なっている。また、真実接触面積の分布状態が片寄ると、接触熱抵抗 R の値は大きくなっている。例えば、接触率 Er^* が8[%]における接触熱抵抗 R の値を比較すると、試料の組合せa-d(○)では、接触熱抵抗 R の値は約 $460\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ 、試料の組合せa-c(△)では、接触熱抵抗 R の値は約 $240\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ 、試料の組合せa-b(□)では、接触熱抵抗 R の値は約 $120\text{mm}^2\cdot\text{K/W}$ となっており、接触熱抵抗 R の値は、真実接触面積が不均一でかつ片寄って分布している状態(○)ほど大きく、均一に分布している状態(□)において最も小さくなっている。

そこで、さらに正確に接触熱抵抗特性を把握するために、多様な結合面形状を持った多くの試料を準備して、接触熱抵抗の測定を行った。その結果を図5に示す。図中の(○)は

均一接触状態での接触熱抵抗 R の測定値であり、図中の (×) は不均一接触状態での接触熱抵抗 R の測定値である。また、図中の実線は、均一接触状態での接触熱抵抗 R の測定値を Holm の縮流理論式によって近似したものである。

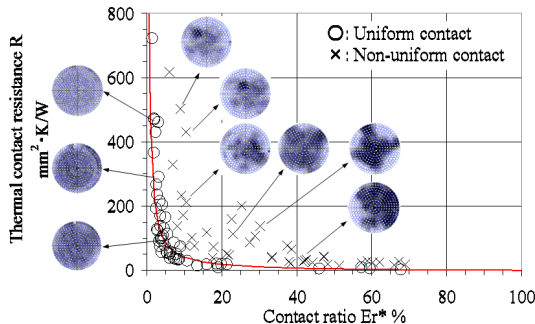


図5 結合面接触状態と接触熱抵抗

その結果、不均一接触状態の接触熱抵抗 R の測定値 (×) は、実線で示している Holm の縮流理論の曲線より上方にばらついているものが多い。また、同じ接触率 Er^* の場合、接触熱抵抗 R の値は、均一接触状態のときが最も小さくなり、不均一接触状態になるほどその値は大きくなっている。

以上のように、接触熱抵抗 R は、真実接触面積の大きさだけでなくその分布状態にも影響を受けることがわかり、その偏りが大きいほど、接触熱抵抗は、大きくなることが明らかとなった。

② 解析的検討

図6は、以上のような特性を示すメカニズムについて検討するための FEM 解析モデルである。接触状態の偏りがどのように接触熱抵抗に影響するかを調べるために、接触域の中心位置を試料中央から端へ徐々に変化させた5つのモデルを用いた。モデルは、縦100mm、横50mmであり、材質がS45Cとして、熱伝導率 λ は $0.0486[\text{W}/\text{mm} \cdot \text{K}]$ とした。また、結合面凸高さは 0.1mm 、接触長さは 10mm とし、試料上面に $0.02[\text{W}/\text{mm}^2]$ の熱流束 q 、試料下面に $-0.02[\text{W}/\text{mm}^2]$ の q を境界条件として与えた。また、電気抵抗回路モデルでは、図6の FEM 解析モデルの model1, model2, ..., model5 と同じ条件になるように各接触熱抵抗を配置した。

熱流は結合面に対して対称になるため上部試料の熱流だけ考えれば良い。y 方向の熱流を考えるために、電気抵抗回路モデルにおいて y 方向の流路 ni から $ni+1$ ($i=1, 2, \dots, n-1$) に流れる熱量を上部試料の x 方向について総和したものを Q_y として求めた。図7はこの解析から得られた熱量分布を示している。図は左右の熱量が0になる2点と x 方向の流路数 $n=50$ の間の49点の熱量を5つのモデルについて示している。図をみると、接触部の両端が、熱量の増減の変

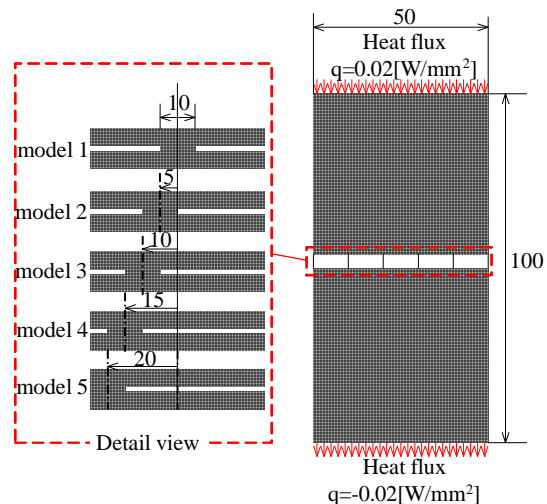


図6 接触状態に偏りがある FEM 解析モデル

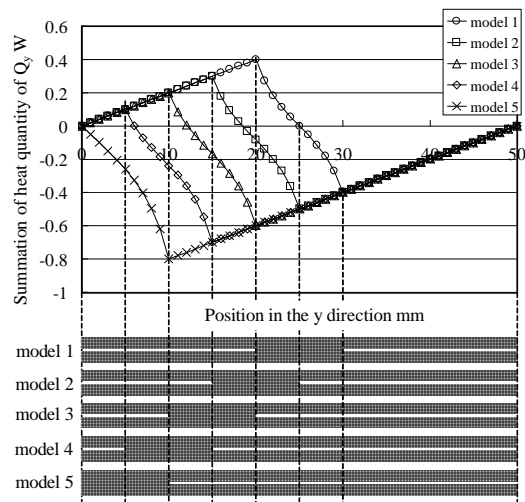


図7 接触状態に偏りがある場合の y 方向熱流量分布

換点になっていることがわかる。

電気抵抗回路モデルにおいて、y 方向の内部抵抗 r_b を通過する熱量が存在すると y 方向の熱損失が生じる。図8は、この熱損失量を考えるための model12 の熱量分布を基にした模式図である。 r_b が y と比例するので、 Q_y と y 軸により囲まれた面積 S は熱損失量を表すパラメータといえる。図9は FEM 解析で求めた接触熱抵抗 R と電気抵抗回路モデルで求めた面積 S との関係を示している。接触状態の偏りが大きいほど、 R も大きくなっている。これは y 方向の熱流により、熱損失が生じているからであり、この y 方向の熱損失量を表す S と接触熱抵抗 R には相関性があることがわかる。以上のように、接触状態に偏りがあると、結合面に平行な熱流により、熱損失が生じ、その結果として、接触熱抵抗が大きくなることがわかった。

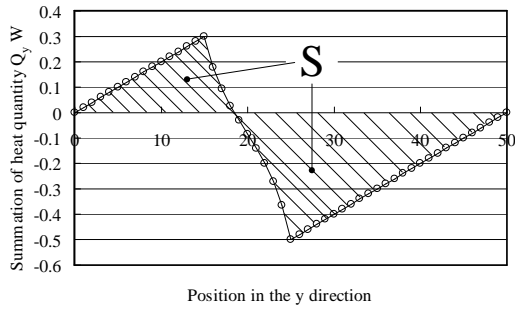


図8 熱流量分布と熱損失量 S

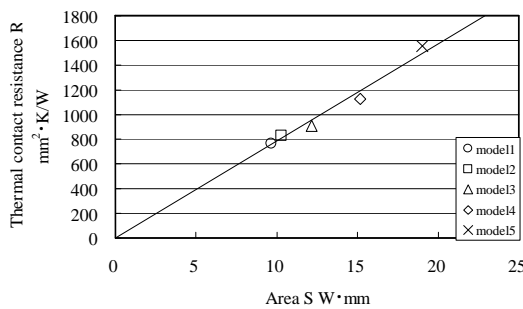


図9 接触熱抵抗と熱損失量 S の関係

(2) 結合部を考慮に入れた多軸複合作業機械の熱変位特性の FEM 解析

図 10 は、多軸・複合作業機械を 4 時間 Z 軸運動させた後の温度分布と熱変形モードの解析結果を機械の上面、正面および右側面について示している。なお熱変形については、変形状態をわかりやすくするために変位を 2000 倍に拡大して示している。

同図より、ベッドとキャリッジベースの温度分布を比較すると、キャリッジベースの熱容量は比較的小さいにもかかわらずキャリッジベースの温度上昇は小さい。これはベッ

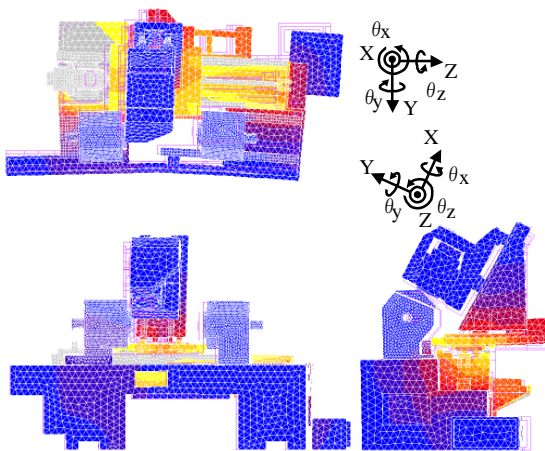


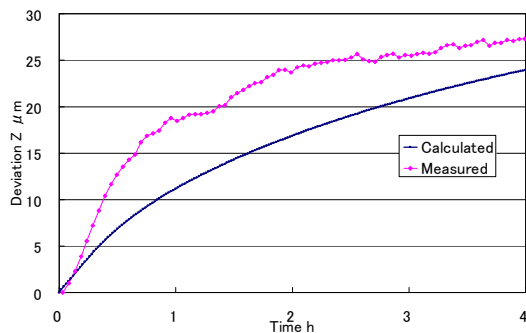
図 10 温度分布と熱変形モード解析結果

ドとキャリッジベースの間の結合部で与えた接触熱抵抗によって熱伝導が妨げられているためと思われる。同様にキャリッジとキャリッジベース間においても熱伝導が抑制されているのがわかる。このため、Z 軸運動に伴う発熱による熱変形モードはベッドの熱変形が支配的となっていることがわかる。

図 11 はミリング主軸と工作物主軸間の Z 方向の相対熱変位を示している。同図には、実験によって測定した熱変位も示した。この図より、解析による熱変位は実験結果と同様に、時間とともに +Z 方向に変位しており、同様の傾向を示していることがわかる。

また、図 12 はミリング主軸と工作物主軸間の X 方向の相対変位を示している。実験結果では測定開始直後はほとんど変位せず、その後緩やかに +X 方向に変位している。これに対して、FEM 解析による熱変位については最初から比較的緩やかに増加しており、多少傾向が異なるものの、定性的には実験結果と一致していることが分かる。ただし、両者ともに FEM 解析結果の時定数は、実験結果の時定数に比べて大きくなっている。このような過渡的な変位挙動に対しては、結合部の接触熱抵抗の大きさをより正確に見積もることや、構造表面を介しての環境との相互熱伝達についても考慮する必要があるものと考えられる。

以上のように、結合部の接触熱抵抗を考慮



することにより、多軸・複合作業機械の熱変

図 11 Z 方向の相対熱変位特性

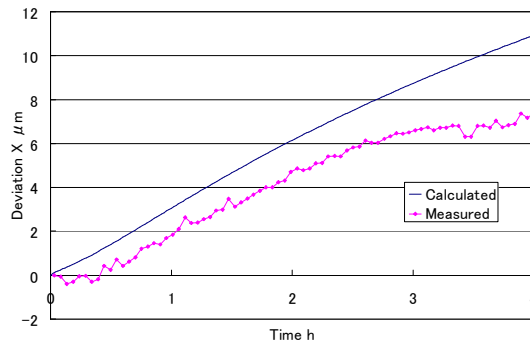


図 12 X 方向の相対熱変位特性形をより正確に推定できることが明らかとなった。

図 13 は、上述の解析で用いた接触熱抵抗を標準値として、接触熱抵抗を変化させた場合の工具と工作物間の X 方向相対熱変位と時間の関係について解析した結果を示している。同図より、どの場合も一度わずかに負の方向に変位した後に、正の方向に変位することがわかる。さらに、接触熱抵抗の大きさによって変位量に差が生じていることもわかる。また、標準値に対し接触熱抵抗を小さくすると急激に相対変位は大きくなるが、標準値以上の接触熱抵抗では、熱変位もその変化も小さくなることがわかる。このことから、本複合工作機械では、Y 軸案内面、Z 軸案内面の結合部における接触熱抵抗を大きくすることは、基本的に X 方向の熱変位成分を小さくする効果あることがわかる。

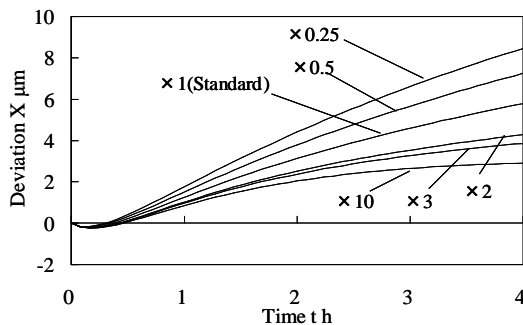


図 13 接触熱抵抗値が熱変位に及ぼす影響

(3) 結合面接触熱抵抗を考慮に入れた結合部設計指針について

以上の成果にもとづき、結合部の設計指針について、まとめてみると以下ようになる。

- 1) 結合面接触状態の偏りの程度により、接触熱抵抗が変化し、偏りが大きいほど、接触熱抵抗が大きくなる。したがって、構造上、どうしても熱的に対象にできない場合は、結合部の接触状態に偏りを与える、あるいは接触率を変化させることにより、熱的対称性を実現できる。
- 2) 接触熱抵抗は、結合面に平行に流れる熱流があると更に大きくなることから、接触部領域の間隔を目的に応じて変化させることにより、熱変形を抑制できる。
- 3) 工作機械構造内に存在する接触熱抵抗を変化させることにより、工具工作物間の熱変位を大きく抑制できる可能性がある。
- 4) 結合部の結合面接触熱抵抗を考慮に入れて、熱変形予測を行うことは、非常に有効である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 清水伸二, 野村宗平, 坂本治久, 矢生晋介, 結合面の不均一接触状態が結合部接触熱抵抗に及ぼす影響, 精密工学会, 査読有り, 76巻, 6号, 2010, 653-657.

[学会発表] (計 3 件)

- ① 清水伸二, 上芝原 翔, 野村宗平, 坂本治久, 結合面の接触状態の偏りが接触熱抵抗に及ぼすメカニズムの考察, 精密工学会, 2011年3月15日, 東洋大学
- ② Shinji Shimizu, Shuhei Nomura, Haruhisa Sakamoto, Shinsuke Yagyū, The influence of real contact distribution on thermal contact resistance of the joint, European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, June 4th, 2009, San Sebastian, Spain.
- ③ 矢生晋介, 小川達也, 清水伸二, 複合工作機械の熱変位特性の高効率評価法, 日本機械学会 生産加工・工作機械部門講演会, 2008年11月22日, 長良川国際会議場

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 伸二 (SHIMIZU SHINJI)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号: 70146801

(2) 研究分担者

坂本 治久 (SAKAMOTO HARUHISA)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号: 40276514