

## 熱変形補償機能を内蔵する新たなマザーマシン構成材料の提案

東京大学工学部 機械工学科 杉田研究室 ○井上 立之, 東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 杉田研究室 ©杉田 直彦 教授,  
東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 杉田研究室 木崎 通

### 要 旨

工作機械の静的剛性・高減衰性・熱的安定性といった機能の両立は単一材料では困難である。そのためには異種材料・要素を複合した構造体材料の構成検討が必要である。我々の研究では、鉄系材料の外殻にポリマーコンクリートを注入することで構造内部への温度センサ埋設を実現し、上記全ての要求機能の両立を試みた。本講演ではその構造に対する実験と解析から、新たな設計思想に基づくマザーマシン構成材料の可能性を提案する。

### 1. 研究背景

高精度・高エネルギー加工が要求される工作機械(マザーマシン)を構成する材料には静剛性・動剛性・熱的安定性が必要だが、それらの両立は単一の材料では困難である[1]。これに対して、材料の複合によるアプローチの研究が盛んに行なわれているが、従来最も一般的に利用されてきた鋳鉄に代わる汎用性の高い材料の開発には至っていない。さらに、鋳鉄には動剛性や熱的安定性において不十分な点があるため、新たなマザーマシン構成材料の開発は今日も重要な課題となっている。

### 2. 従来研究

近年、動剛性を改善するにあたって、高い動剛性を有することが知られているポリマーコンクリート(PC材)を、工作機械のベッドや移動体に対して適用した研究が報告されている[2][3][4]。また、工作機械構造体の変形補償の研究として、FBG(Fiber Bragg Grating)センサを用いた手法[5][6]や、温度データに対してニューラルネットワークを用いた手法[7]が報告されている。

### 3. 研究目的

本研究では、静剛性・動剛性・熱的安定性のすべてを両立する複合材料の実現を目標とし、従来材料である鋳鉄との性能比較から提案材料を評価した上で、工作機械の新たな設計手法を提示することを目的とした。

### 4. 提案手法

PC材は、上述の高い動剛性のほかに、融点が1000℃を超える鋳鉄とは異なり、常温成型が可能であるという特徴も有する。その特性を活かし、本研究では、PC材の一種であるミネラルキャストの内部に小型温度センサを複数埋設し、内部の温度分布を随時取得可能な構造を提案する。これにより過渡応答にも

対応した正確な熱変形補償が可能となり、PC材の弱点である熱的安定性を改善することができる。元来有する高い静剛性と動剛性とを併せて、工作機械の構造材料として理想的なものになると考えた(Table.1)。以上の考えに基づき、熱変位連成解析と温度分布の線形補間を組み合わせたFEM解析(Fig.1)により、有効であると考えられるセンサ配置を決定し、梁部と固定部からなる試験片を製作した(Fig.2)。そして、それと同等の静剛性を見積もって設計した鋳鉄製の試験片と比較して、性能を評価する実験を行った。

Table.1 材料特性の比較

材料	熱的安定性	剛性	減衰性
鉄系材料 (鋳鉄)	△	○	△
PC材	○	△	◎
提案構造	◎※	○	◎

※ 熱変形補償により安定性向上

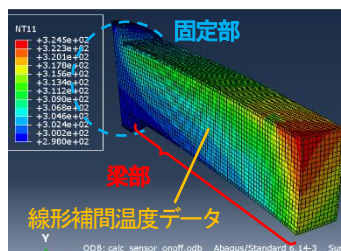


Fig.1 線形補間を用いたFEM熱解析

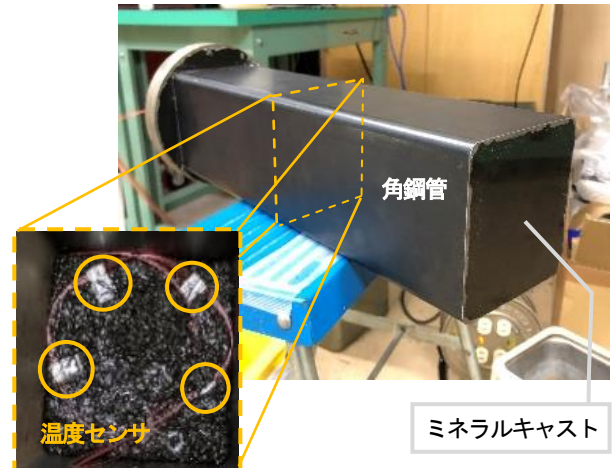


Fig.2 提案構造の試験片

### 5. 性能評価実験

試験片を評価する試験として、以下の3つを行った。

1. 万能試験機によって梁部に圧縮荷重をかける三点曲げ試験(Fig.3)。
2. 試験片を宙に吊るし、加速度センサとリンクしたハンマで打撃することで振動特性を測定するハンマリング試験(Fig.4)。
3. 試験片を片持ち梁に見立てて固定し、梁部上面と先端面を断続的に加熱する実験(Fig.5)。試験片の梁部先端下面の変位を2つのレーザ変位計により測定すると同時に、提案構造の試験片については、埋設した温度センサによって構造内部の54箇所温度情報を取得した。

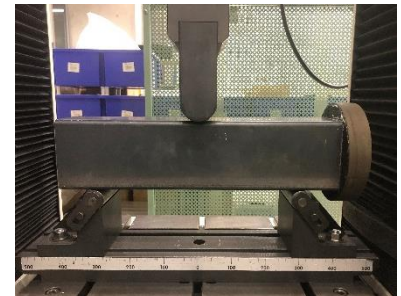


Fig.3 三点曲げ試験



Fig.4 ハンマリング試験



Fig.5 熱変位測定実験

### 6. 従来手法との性能比較

上述の3つの試験結果はFig.6, Fig.7, Fig.8のようになった。ただし、Fig.8はレーザ変位計により実際測定された変位データと、100秒ごとの実測温度データを用いた予測結果をプロットしたグラフである。この熱変位予測では、試験片の製作方法の関係で埋設時の位置決め精度が低いことを考慮し、予測で適用するセンサの位置をX線CT画像データ(Fig.9)から算出し、線形補間解析を行った。

また、特に動剛性と熱的安定性の数値比較をTable.2にまとめた。

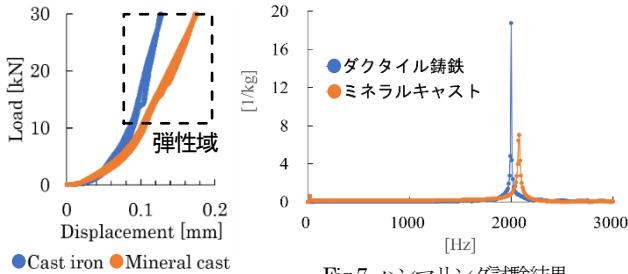


Fig.7 ハンマリング試験結果

Fig.6 三点曲げ試験結果

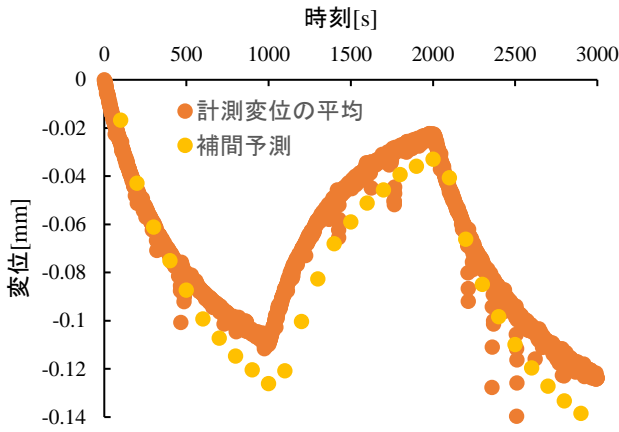


Fig.8 熱変位測定実験温度データに基づく熱変位予測結果

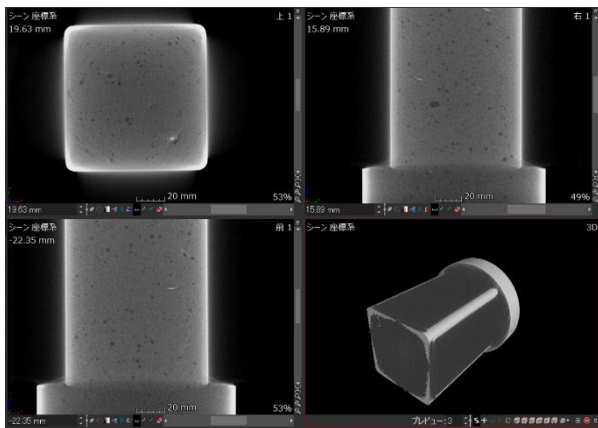


Fig.9 提案構造試験片のX線CT画像データ

これらを見ると、動剛性は減衰率において2.9倍、熱的安定性については、温度センサを表面でなく内部に配置したことにより、変位予測誤差の振幅が小さくなり、状態によっては誤差が26-29%減少した。一方、静剛性は弾性域において鋳鉄試験片の0.5倍にとどまっている。この原因としては、以下の2点が主に考えられる。

Table.2 動剛性と熱的安定性

試験片の種類	鋳鉄	提案構造
振動特性		
固有振動数[Hz]	2000	2080
減衰率[%]	0.155	0.455
熱変形補償の誤差 [μm]		
t = 1000 [s]	+24.9	+17.7
t = 2000 [s]	+1.82	+10.5
t = 3000 [s]	+25.6	+18.9

1. 設計時の解析で鋳鉄試験片に設定した物性値がねずみ鋳鉄相当するものであり、実際に使用したダクタイル鋳鉄と比較してヤング率が0.6倍[8]に過小評価されており、鋳鉄試験片が想定よりも高い静剛性をもつ設計となったこと。

2. Fig.9の構造内部に小さな黒い影として多数確認される、ミネラルキャスト注型時に混入した気泡や、温度センサによる構造欠陥が提案構造の試験片の剛性を低下させたこと。

特に後者の対策としては、注型時に振動を与えながら気泡をなるべく排除すること、センサによる構造欠陥も考慮した解析に基づく剛性設計を行うことなどが挙げられる。

### 7. 結論

1. 新たなマザーマシン構成材料として、複数の温度センサ埋設したPC材を提案した。この材料は、材料内部の温度情報によるリアルタイム熱変位補償を通して、静剛性・動剛性・熱的安定性のすべてにおいて優れた理想的な構造材料と言える。

2. 提案手法に基づいて設計した試験片を用いた実験において、従来の鋳鉄の2.9倍の振動減衰率と、誤差20μmまでで安定した熱的安定性を有することを確認した。

### 参考文献

- [1] H. C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, and F. Bleicher, "Materials in machine tool structures," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 725-748, 2015.
- [2] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, and M. Simoncini, "Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006.
- [3] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, and M. Simoncini, "Hard turning of an alloy steel on a machine tool with a polymer concrete bed," *J. Mater. Process. Technol.*, 2008.
- [4] G. Vitanoski and V. Dukovski, "Design of Polymer Concrete Main Spindle Housing for CNC Lathe," *13th Int. Sci. Conf. Achiev. Mech. Mater. Eng.*, pp. 696-98, 2005.
- [5] F. Aggogeri, A. Borboni, R. Faglia, A. Merlo, and N. Pellegrini, "A Kinematic Model to Compensate the Structural Deformations in Machine Tools Using Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors," 2017.
- [6] J. Huang, Z. Zhou, M. Liu, E. Zhang, M. Chen, and D. Truong, "Mechatronics Real-time measurement of temperature field in heavy-duty machine tools using fiber Bragg grating sensors and analysis of thermal shift errors Optic fiber," *Mechatronics*, vol. 31, pp. 16-21, 2015.
- [7] Z. Huanglin, S. Yong, and Z. Haiyan, "Thermal error compensation on machine tools using rough set artificial neural networks," *2009 WRI World Congr. Comput. Sci. Inf. Eng. CSIE 2009*, vol. 5, pp. 51-55, 2009.
- [8] "金属のヤング率の一覧 | 金属材料の剛性の比較する一覧表," *toishi.info*. [Online]. Available: [https://www.toishi.info/metal/young\\_list.html](https://www.toishi.info/metal/young_list.html).