

確率的重みづけ法による研削発熱シミュレーターの開発

東京大学工学部機械工学科 杉田研究室 所属 ○イ ヒジユン 東京大学工学部機械工学科 杉田研究室 所属 ◎杉田 直彦 教授

要 旨

研削における発熱のシミュレーション手法である、従来の砥粒点熱源モデルの問題点、すなわち材料表面粗さの発熱に与える影響を反映できない点を解決する方法を提案する。砥粒断面積にランダムな重みづけを付与することで、研削面の粗い表面形状が発熱に与える効果を再現する。これを検証するため、熱電対を用いた研削温度の実測実験を行い、シミュレーション結果と比較した。その結果、一部の加工条件においてのみ提案手法によるシミュレーションの再現性向上が確認できた。

1 研究背景

研削は、精密かつ低価な金属の仕上げ工程として古くから用いられてきた。しかし、切削に比べ加工時の発熱が大きく、材料が変性しやすい。発熱をコントロールするためには、加工時どのように発熱しているかを知る必要があり、それを容易に推定するためには発熱を正確に予測できるシミュレーターが必要である。

2 従来研究

これまでに、砥石上の砥粒を点熱源としてモデル化したシミュレーター [1]や砥粒の3次元プロファイルを考慮したシミュレーター [2]が提案された。また、研削温度の測定にも熱電対や [3] 光ファイバーによる局所赤外線測定など [4]の手法がなされてきた。

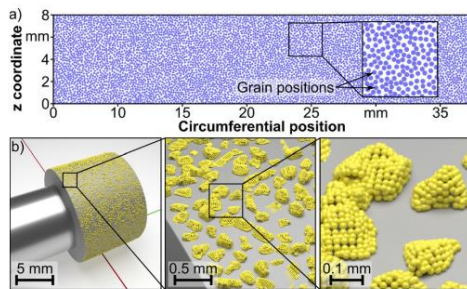


Fig. 1 砥粒の3次元モデル [2]

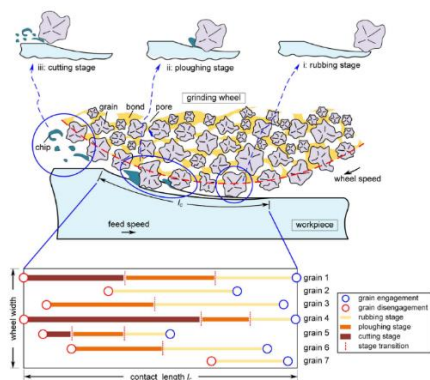


Fig. 2 砥粒点熱源モデル [1]

3 研究目的

本研究では提案手法を用いて点熱源モデルの発熱シミュレーターに材料表面粗さの効果を反映し、研削実験を行いその再現性を評価する。

4 提案手法

本研究では点熱源モデルのシミュレーションで、計算に用いられる砥粒の加工断面積に0~1のランダムな重みづけを与える。

それによって粗い材料表面形状の影響を疑似的に再現する。

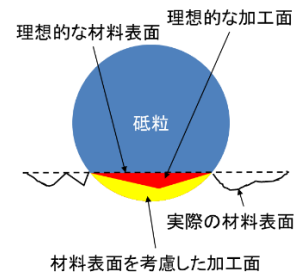


Fig. 3 材料表面形状の砥粒加工断面積に与える影響

5 シミュレーションの構築

5.1 クランク-ニコルソン法

本研究における熱伝導の数値計算には有限差分法の1つであるクランク-ニコルソン法を用いる。この方法は単純なジオメトリを持つ系において有限要素法より計算量が少ないので、メッシュを細かくできるという利点を持つ。支配方程式は式(1)を用いた。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, t) \quad (1)$$

Fig. 4 クランク-ニコルソン法

Fig. 4 クランク-ニコルソン法

5.2 発熱モデル

工具に加わる加工反力から系の総発熱 Q_{tot} を計算した。それから、式(2)で表したように、提案手法を適用した各砥粒の加工断面積 S_i に比例するように総発熱を分配した。

$$q_i = \frac{S_i}{\sum_j^n S_j} Q_{tot} \quad (2)$$

5.3 シミュレーション結果

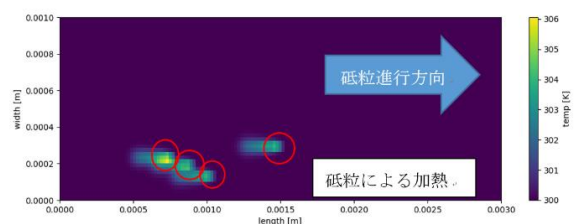


Fig. 5 シミュレーションの様子

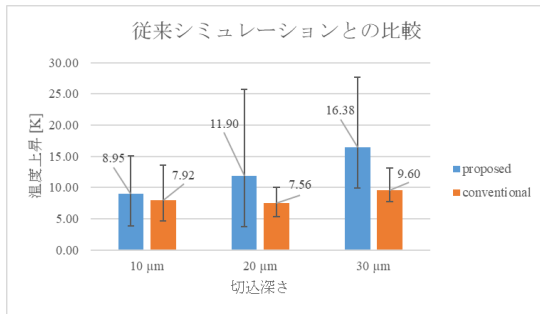


Fig. 6 従来シミュレーションと提案手法の比較

重みづけにより加工断面積が従来手法より減少したの
で、平均温度上昇値が増加した。

6 実験によるシミュレーターの検証

6.1 実験系の構築

Ni-Cr-Mo 合金に径 0.6 mm の穴をあけ、細く加工した熱電対を埋め込んだ。3 軸マシニングセンターを用いて試験片を熱電対ごと研削することで熱電対に電気的接点を作り、表面温度を計測する。熱電対の信号処理にはマイコンを用いた。また、マシニングセンターに内蔵された力センサーを用いて研削反力の測定も行った。

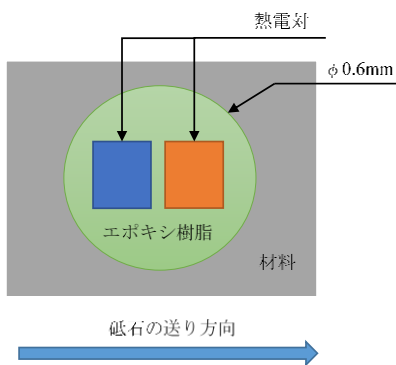


Fig. 7 設置された熱電対の模式図

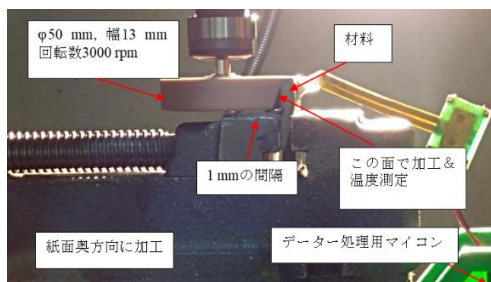


Fig. 8 実験の様子

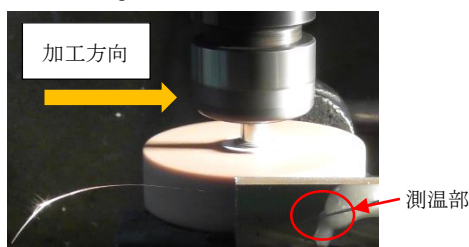


Fig. 9 実験の様子

6.2 実験結果及び考察

砥粒一つによる局所的な温度上昇を比較した。切込深さ 10 μm では提案手法が実験結果をよりよく再現したが、20

μm, 30 μm では実験とシミュレーションに大きな差が表れた。これの原因として工具の振動による工具接触面積の不均一や切りくずの燃焼による追加熱量などを挙げられる。これについては、追加実験による検証が必要である。

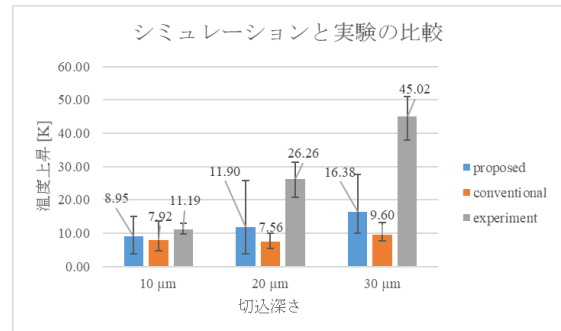


Fig. 10 シミュレーションと実験の温度上昇比較

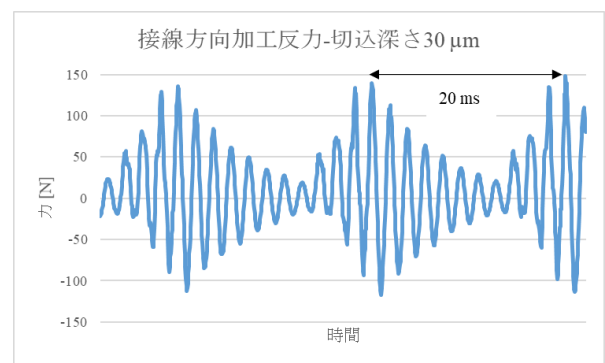


Fig. 11 工具振動による加工反力の様子

7 結論

本研究では研削加工の熱シミュレーションに用いられる砥粒点熱源モデルの改良案を提案し、それをシミュレーションとして実装した。以下に本研究の結論を述べる。

- 従来の砥粒点熱源の問題点であった実際の加工断面積を再現できないという点を改良する手段として、計算された加工断面積にランダムな重みづけを与える手法を提案した。
- 案した手法を、クランカーニコルソン法をベースにした有限差分シミュレーションとして実装した。
- SCM 材試験片と 3 軸マシニングセンターを用いて、熱電対により平面研削時の材料表面温度を実測した。得られた結果を用いてシミュレーションの有効性の検証を試みたが、一部の試験条件のみシミュレーションの性能向上を確認した。

参考文献

- [1] Li, Hao Nan; Axinte, Dragos, "On a stochastically grain-discretised model for 2D/3D temperature mapping prediction in grinding," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no. 116, pp. 60-76, 2017.
- [2] P. Wiederkehr, T. Siebrecht and N. Potthoff, "Stochastic modeling of grain wear in geometric physically-based grinding simulations," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, p. 4, 2018.
- [3] 高沢孝哉, "研削面表層温度分布の理論 とその測定法," 第 30 卷, 第 11, 1964.
- [4] T. Ueda, H. Tanaka, A. Torii, T. Sugita, "Measurement of Grinding Temperature of Active Grains Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber," 1993.