

## 2022年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	<b>難削材を含む焼結材料の加工熱を低減する 最適切削加工法の開発</b>
キーワード	① 焼結材（傾斜機能材料）、② 伝熱解析、③ 有限要素法解析

### 研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	カメヤ キョウコ 亀谷 恭子
配付時の所属先・職位等 (令和4年4月1日現在)	成蹊大学 理工学部・助教
現在の所属先・職位等 (令和5年7月1日現在)	成蹊大学 理工学部・助教
プロフィール	2014年上智大学理工学研究科にて博士（工学）を取得。在学時には生産加工学分野において、研削加工面で構成された金属接触部（結合部）の接触剛性および真実接触面積を推定する理論式を提案、実験値との比較を行い提案手法の有用性を検討した。その後東京理科大学工学部機械工学科にて助教として従事。破壊確率およびクリープ余寿命を基礎とした機械構造体の最適検査間隔を検討。現在成蹊大学理工学部機械システム専攻助教。機械学習を利用して、難削材を含む焼結材の最適製造法について検討している。

### 1. 研究の概要

本研究では、難削材を混合させた焼結材（傾斜機能材料）の製造工程をシミュレーションし、加工熱による表面悪化に耐えうる焼結材の製造法を検討した。このために、難削材金属粉末の動力学的挙動を考慮した微細モデルの構築を、動的モンテカルロシミュレーションにより行い、この結果をマルチスケール対応有限要素法解析（FEM解析）に導入することにより、焼結材の熱伝導メカニズムの解明、および得られた結果から切削熱に強い焼結材の製造方法や加工方法の提案を目指した。結果、材料を焼結する以前に行われる溶媒の蒸発過程において、耐熱・耐荷重を向上するには、材料粒子における凝集の把握が重要なことが判明し、さらにその凝集率は材料の粒子拡散運動に関連するパラメータ（ペクレ数）に影響することが分かった。本研究により材料の強度を低下させる影響因子を解明することができ、今後このパラメータを追求することで耐熱・強度が向上する材料の製造法が提案できると考える。

### 2. 研究の動機、目的

近年、歯車や軸継手等、自動車部品や船舶・航空関連部品に焼結材が広く適用されている。焼結材とは、金属粉末をプレス成形し炉やプラズマ放電等で加熱して焼き固めた材料である。特に新たな強化材料として期待されている傾斜機能材料（FGMs）は、異なる2種類以上の金属粉末を連続的に傾斜（変化）させつつ一体化させた不均質材料で、それぞれの材料特性を活かすことができる革新的な焼結材の一種である。

しかしながら焼結材は金属の粉末粒子から作製される為、材料に亀裂・空孔が内在しやすく多孔質になりやすい。このため工作機械で切削する際、多孔質表面の凹凸により切削抵抗が断続的になり、抵抗により生じる摩擦熱が一般的な金属切削とは異なる挙動を示す。特にチタン

合金やステンレス鋼は、熱伝導率が小さく加工点に熱がこもることから難削材と言われており、切削仕上げ面の悪化が問題となっている[1]。仕上げ面が悪い加工物を機械部品として使用した場合、歯車の噛み合わせ部、および案内面摺動部などで起こる摩擦や傷による構造体の破壊、および寿命の低下につながるものが指摘されている（図1）。

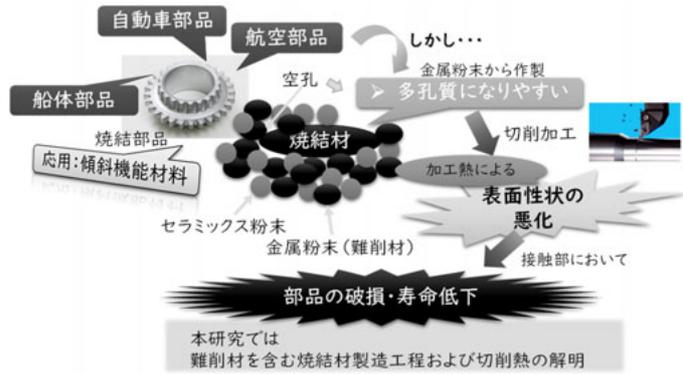


図1 本研究の背景と目的（概要）

傾斜機能材料の製作方法として、溶媒に異なる2種類の材料粉末を混入したスラリーから製作する方法があるが、このスラリー中の粉末の動力学的挙動は未だ解明されていない部分が残っている。しかしながら焼結材内部における難削材粉末の配置によって加工熱の挙動は変化するため、材料内での難削材粉末の配置が、切削加工による仕上げ面向上にとって重要となってくる。

そこで本研究は、各種難削材から成る焼結材の切削加工において、工作物の仕上げ面が悪化しにくく熱変形に強い焼結材の製造方法を、スラリー溶媒を模擬した動的モンテカルロシミュレーション（KMC）とFEM解析により解明することを目的とした。FEM解析とは、機械材料の強度評価や熱変形解析など、安全性能評価のツールとして、近年産業界で用いられている機械設計ツールの1つである。これに筆者が開発した金属粉末挙動プログラムを併用することで、焼結材の製造工程の解明および切削加工による伝熱挙動の解明を実現することができ、難削材を含む焼結材に見合った最適な切削方法の提案を行うことができると考えた。

[1] 上田隆司ほか，日本機械学会論文集，83巻856号，2017年，17-00344.

### 3. 研究の結果

最初に、スラリー溶媒中での材料粒子挙動をKMCシミュレーションにて解明を行った。シミュレーション結果例を図2に示す。図のMCSとはモンテカルロステップであり、時間軸に変わるパラメータである。 $Pe^*$ は無次元ペクレ数を示しており、粒子の拡散速度に関するパラメータである。MCS=3000時の無次元ペクレ数( $Pe^*$ )の違いによる結果比較を図3に示す。図の通り、ペクレ数が低くなるにつれて粒子が凝集し、傾斜機能材料の目的である「異なる2種の金属を段階的に傾斜させる」が困難になることが予測できる。参考までに、スラリー中の各位置における溶媒と材料粒子の比率を図4に示す。図(a)の $Pe^*=1.0$ は上部（液面部）近くを粒子が占め、底面部は溶媒が主となっており材料が傾斜していることがわかる。このため、

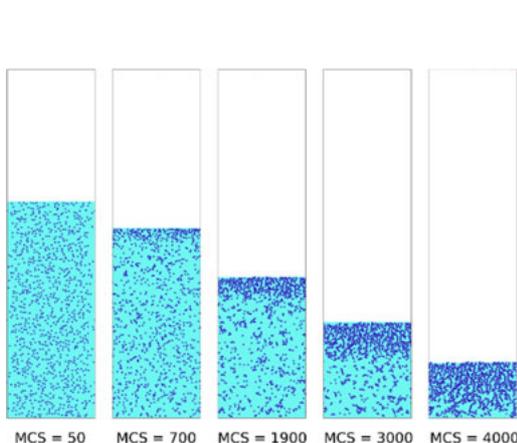


図2 KMCシミュレーション例

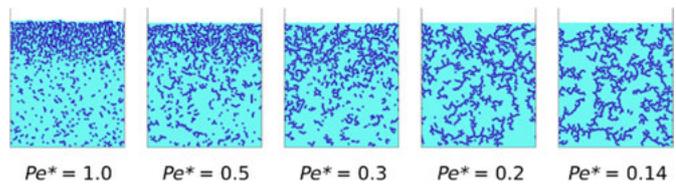


図3 ペクレ数の違いによる粒子の凝集比較

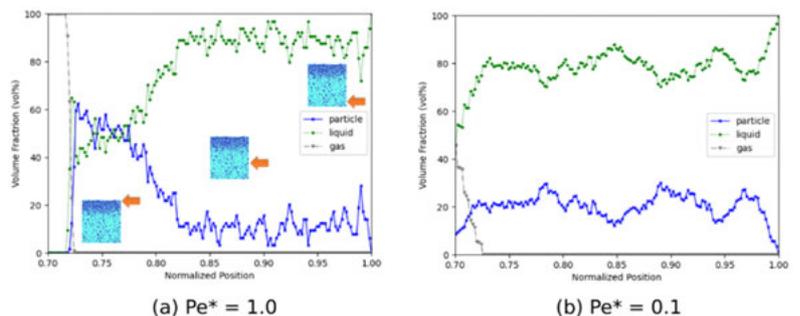


図4 各材料粒子と溶媒の比率

滑らかに傾斜された材料が製造しやすいと考えられる。一方、(b)の  $Pe^*=0.1$  に関しては、どの位置でも粒子と溶媒の比率が同じであり、材料が傾斜していないことがわかる。

年度後半では、上記 KMC シミュレーション結果を基に、FEM 解析による熱伝導解析を行った。作成したモデルの熱伝導解析結果を図 5 に示す。図 3 で示す水色部分をナノレベルの小さな材料粒子、青色部分をマイクロレベルの大きな粒子が存在すると仮定した。材料はマイクロ粒子を熱伝導率が高い銅（熱伝導率:372W/m K）、ナノ粒子を熱伝導率が低いエポキシ樹脂（0.3W/m K）に設定した。入熱は図中  $x$  軸正方向に行い、底面を  $0^\circ\text{C}$ 、上面を  $14.5^\circ\text{C}$  として定常解析を行った。ペクレ数が高い(a)ほうは、材料上部に Cu 粒子が固まっているため熱流束が低く、逆に底面は熱流束が高い。図 5 右側の温度コンター図を見ると、ペクレ数が高い(a)は、材料に偏りが生じているため、温度分布が曲線になっていることがわかる一方、(c)では Cu 粒子が均一に広がっているため、温度の偏りが少ない。これは傾斜機能材料の製造観点から見れば、(a)のほうが良好な材料を得ることが推測できるが、切削加工観点から見れば、(a)は材料に偏りが出来ているため、加工箇所によっては加工が難航し、仕上げ面が(c)より悪くなると考えられる。したがって、実験のほうでは、(a)と(c)の両材料を製造して仕上げ面や切削熱を比較し、どのくらい差があるかを検討する必要があると考えた。

なお、本研究の成果は投稿論文として、2023 年 2 月に出版された[2]。

[2] K.Kameya et al, “Modeling Nanoparticle Agglomeration in the Centrifugal Method to Evaluate Heat-resistant Functionally Graded Materials” Journal of Nanoparticle Research 25(3) (2023).

#### 4. 研究者としてのこれからの展望

複合材料の製造法および加工法は昔から継続して行われている研究であるが、機械学習を適用して最適法を検討した例は、まだ少ない。現在、筆者は機械学習を主力とした研究室に所属しており、AI に関する研究に携わっているため、本研究でも機械学習を適用させて最適製造法の解明を行いたい。またこのように、新しい学問を常に吸収し、年齢を重ねても学際的分野にチャレンジできるような研究者を目指したいと考える。

#### 5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

本研究を行うにあたり、日本私立学校振興・共済事業団の皆様、またご寄付を下さりました企業や個人の皆様に、心より感謝申し上げます。今回、申請書の提出後に産休・育児休暇を取得してしまうこととなってしまいましたが、これに快諾してくださり、育児休暇復帰後に予定通り4月から本助成金を受けることが出来ました。復帰後は忙しく、外部資金を新たに取得することは難しい状況だったため、本助成金は大変助かりました。お陰様ですぐに研究を開始することが出来、また本研究の成果である学術論文[2]の査読では、とても面白い研究だとコメントいただけました。査読で英文を指摘されたため、英文校正を2回依頼したのですが、これも本助成金があったため出来たこととさせていただきます。本研究はまだまだ発展途上であり、今後検討すべき事項が山ほど残っておりますので、頑張っていきたい所存でございます。重ねてになりますが、筆者のような研究者をご支援くださり誠にありがとうございました。

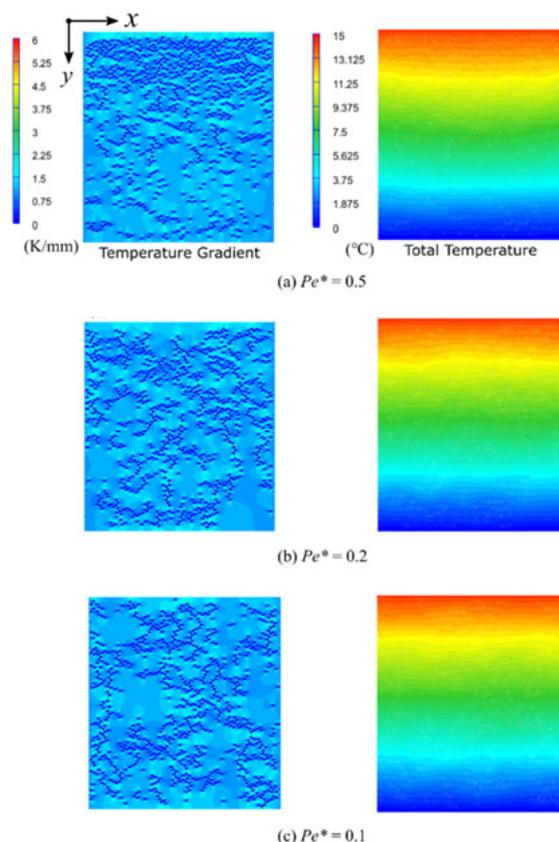


図 5 各ペクレ数における熱伝導解析