

## 熱損傷の予測に基づく乾式歯車研削の実現

東京大学工学部機械工学科 ○高橋啓二郎, 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 関根啓悟,  
東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 木崎通, 三菱重工工作機械株式会社技術本部研削盤設計課 勝間俊文,  
東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 ©杉田直彦

### 要旨

現在、歯車研削加工では熱損傷を避けるため主に大量の冷却液を用いている。一方、冷却液を用いない乾式歯車研削では、加工面温度分布から熱損傷を予測した加工法の開発は実現していない。本研究では、熱損傷の予測に基づく乾式歯車研削法の提案を目的とし、歯車埋め込み型のセンサを製作、乾式歯車研削の加工中温度を実測した。実験と解析の結果に基づき、研削焼けの発生しない加工条件を推定し、新規乾式歯車研削法を提案した。

### 1. 序論

歯車研削は(Fig. 1), 歯車製作の仕上げ加工の一種で、熱処理後の硬い歯面を、高精度かつ高速に加工することができる。一方で研削では著しい発熱が生じる。熱損傷を防ぐため通常はクーラントを供給するが、エネルギー消費の増大及び多量の廃液といった問題が知られている。現代では環境対応が求められ、クーラント削減が必要である。そこで本研究ではクーラントを一切用いない歯車の乾式研削を実現することを目的とした。

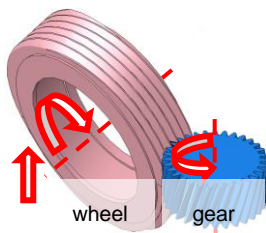


Fig. 1 Schematic of gear grinding

### 2. 新規乾式歯車研削法の提案

乾式歯車研削を実現するためには、実際の研削温度を把握した上で、熱損傷を予め予測する必要がある。そこで本研究では、

- 研削温度を高精度に測定するための温度センサ
- 比研削エネルギーに基づく熱損傷予測手法

を開発し、Fig. 2 に示す流れで乾式研削を実現する。

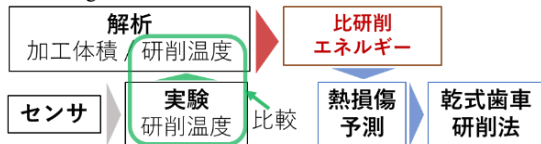


Fig. 2 Flowchart of dry gear grinding development

比研削エネルギーは単位除去体積当たりの研削エネルギーである。解析には歯車研削シミュレータ[1]を用いた。

### 3. 新規温度センサの開発とセンサの特性の評価

現状の歯車研削の温度測定は、細い熱電対の先端を研削面に露出させ、被削材と同時に研削することで熱電対を導通させ行う。この方法を参考に、測定の成功率と精度の高い温度センサを開発した。従来の熱電対は素線間の絶縁体が 50  $\mu\text{m}$  と厚いため、研削による接点の形成が難しいと考えた。そこで熱電対間の絶縁体に高分子ポリマーのパリレンCを用いて、従来の 10 分の 1 の厚さ 5  $\mu\text{m}$  を実現した(Fig. 3)。センサの特性として Thermal transparency および inertia を評価した上で歯車研削面の温度を測定した。

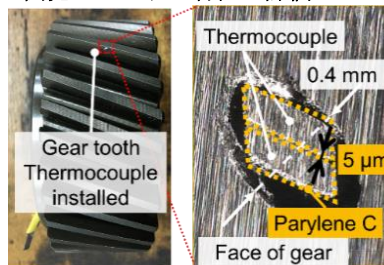


Fig. 3 Thermocouple after grinding

### 4. 熱損傷の予測及び乾式研削の実現

#### (a) 歯車研削温度測定実験

乾式歯車研削における比研削エネルギーを求めるため、歯車研削面の温度測定を行った(Fig. 4)。実験では粗加工と仕上げ加工が

セットとなっており、粗加工ではクーラントを供給し、仕上げ加工で乾式研削を実施した。研削条件は砥石回転数 4000 rpm, 仕上げ加工の取り代を 10, 15, 20  $\mu\text{m}$  と変化させて歯面温度を測定した。

#### (b) 結果と考察

温度測定の成功率は、熱電対の接点形成の確率と同義であり、従来の 20% から 90% に上昇した。0.15ms ごとの温度ピークが立ち上がる直前、歯面と砥石が離れ十分に冷却された点の温度をベース温度として、取り代 15  $\mu\text{m}$  のときの解析と実験から取得したベース温度を Fig. 5 に示す。

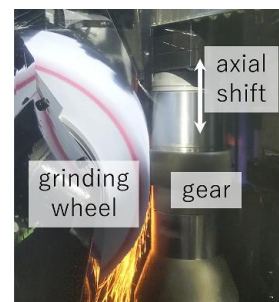


Fig. 4 Dry gear grinding experiment

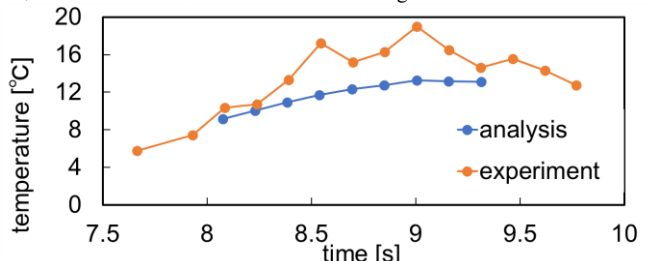


Fig. 5 Result of experiments and analysis

加工中のベース温度の最大上昇量を取得し、比研削エネルギーを算出した。取り代 15  $\mu\text{m}$  について、解析の結果から求めた比研削エネルギーに修正係数をかけた結果を Table 1 に示した。

Table 1 Base temperature rise and specific grinding energy

取り代	ベース温度 (解析値)	ベース温度 (実験値)	修正比研削エネルギー
15 $\mu\text{m}$	13.26 °C	17.0 °C	74 J/mm <sup>3</sup>

比研削エネルギーは、切り込みが大きくなると一定の値に収束することが知られている。別途取得した研削機のトルクの値を用いた考察により、比研削エネルギーは取り代 10  $\mu\text{m}$  以上ではすでに収束しており一定であることが判明した。この比研削エネルギーと解析により求めた加工体積を合わせると、任意の取り代での最高到達温度を推定することができる。熱損傷は 570°C 以上で生じることが知られており、最高温度がこの値を超えないときの最大取り代を求めた。その結果 21  $\mu\text{m}$  であることが明らかになった。

### 5. 結論

- ・熱電対の絶縁体を厚さ 5  $\mu\text{m}$  のパリレンCとした温度センサの開発により、測定成功率が 20% から 90% に向上した。
- ・歯車研削シミュレータの修正を行い、熱損傷の発生しない最大の取り代を求め、新規乾式歯車研削法として、仕上げ加工の取り代 21  $\mu\text{m}$  による加工法を提案した。

#### 参考文献

[1] T. Kizaki, et al., "Direct observation and analysis of heat generation at the grit-workpiece interaction zone in a continuous generating gear grinding," *CIRP Ann.*, vol. 68, no. 1, pp. 417-422, 2019.