

# 熱流入メカニズムに基づく高効率ドライ歯車研削の実現

東京大学工学部機械工学科 ○鄭 勤如, 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 田中淳一, 三菱重工工作機械株式会社 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

歯車研削は仕上げ加工の一種として高精度と高効率を併せ持つ。一方、研削では著しい発熱が生じ、冷却に用いられるクーラントの供給に多大な電力が消費されることが問題になった。本研究では、乾式歯車研削法を実現することを目標にした。研削理論から多条砥石で発熱を抑える方法を提案し、実験で研削温度と研削力を測定し、エネルギーを評価した。9条砥石は3条砥石比で、単位研削体積の発熱が小さくなることが判明した。

## 1. 序論

現代社会において、歯車は自動車をはじめ、様々な機械の動力伝達のために必要不可欠である。特に近年、ハイブリッド車や電気自動車の普及により、歯車の高精度化がますます求められている。歯車精度を向上させるために、熱処理後に研削を行う手法が多く用いられ、したがって研削加工が歯車精度の決め手となっている。

歯車研削は仕上げ加工の一種として高精度と高効率を併せ持つ。が、研削では著しい発熱が生じ、ワークの品質に悪影響を与える。一般的にはクーラントを用いて冷却を行うが、クーラントの供給に多大な電力が消費されるため、環境に負担をかけることが問題とされてきた。

本研究では、クーラントを一切使わない乾式歯車研削法を実現することを目標にした。

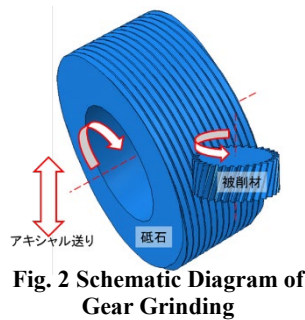


Fig. 2 Schematic Diagram of Gear Grinding

## 2. 新規乾式歯車研削法の提案

平面研削では、ワークと工具の速度比を大きくすると比研削エネルギーが低下することが知られている。一方歯車研削では、砥石と歯車が噛み合いながら加工されるため、速度比を大きくするために砥石の条数を大きくする必要がある。そこで本研究では、多条砥石を使い発熱を抑える方法を提案する。

## 3. 歯車研削における歯面温度と研削力の測定実験

### (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及び熱分配割合を求めるため、歯車研削面の温度と研削力の測定を行った(Fig. 2)。実験では歯車に荒加工と仕上げ加工を行い、荒加工ではクーラントを供給し、仕上げ加工では乾式研削を実施した。実験では3条砥石と9条砥石を用いて、砥石回転数4000rpmで取り代が15 $\mu$ mの条件で実験を行った。

実験では本研究室で開発した二極熱電対温度センサー[1]及びKistlerの回転式動力計を用いて測定を行った。

### (b) 結果と考察

発熱評価のために、以下のパラメータを評価指標とした。

- ・比研削エネルギー[J/mm<sup>3</sup>]：単位除去体積当たりの発熱量
- ・熱分配割合 $\mu$ [%]：発熱の中でワークに流入する割合

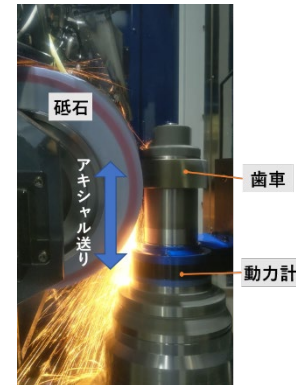


Fig. 3 Dry gear grinding experiment

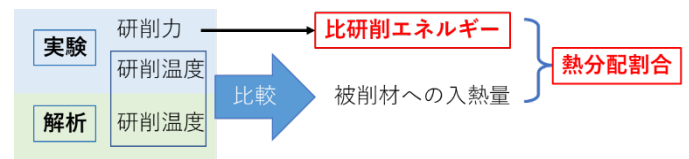


Fig. 1 Flowchart of dry gear grinding development

実験データと解析の比較から比研削エネルギーと熱分配割合を計算した(Fig. 3)。9条では、全体のエネルギーが大きいが、研削効率が3条の3倍になるため、比研削エネルギーが3条の65.3%になった(Table 1)。

Table 1 Result of Specific Grinding Energy (Average of 6 samples)

	3条	9条
研削エネルギー [W]	317.4	621.2
材料除去率 MRR [mm <sup>3</sup> /s]	3.97	11.9
比研削エネルギー $e_c$ [J/mm <sup>3</sup> ]	79.9	52.2

熱分配割合 $\mu$ [%]の計算結果を Table 2 に示す。先行研究から、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の砥粒を用いてドライ平面研削を行う場合、熱分配割合が82%程度と報告された[2]。本実験から得られた歯車研削の熱分配割合が同程度であると判明した。

Table 2 Result of Heat Partition Ratio

	3条	9条
加工全体の比研削エネルギー(実験値) [J/mm <sup>3</sup> ]	72.3	65.3
被削材に流入した比研削エネルギー(解析値) [J/mm <sup>3</sup> ]	58.8	55.2
熱分配割合 $\mu$ [%]	81.3	84.6

単位時間当たりの被削材への入熱量 $Q$ は式(1)で表される。各条数の $Q$ を式(1)で計算した結果、3条では258W、9条では526Wとなり、9条の入熱量が大きいため、温度上昇も大きくなることが判明した。

$$Q = \mu \cdot e_c \cdot MRR \quad (1)$$

そこで、MRR を小さくすることで9条の入熱量を3条の入熱量程度に低減する方法を考えた。 $e_c$ と $\mu$ が加工条件に関係なく一定であると仮定すると、砥石の回転数を4000rpmから1962rpm、或いはアキシャル送りを0.4mm/revから0.2mm/revにすることで、入熱量を低減できる。この場合においても、加工率が3条の1.47倍となる。従って、9条砥石を用いることで高効率な乾式歯車研削が実現可能であると考えられる。

#### 4. 結論および今後の展望

- ・9条砥石を利用することによって比研削エネルギーが3条砥石の65.3%まで減少した。
  - ・3条と9条は熱分配割合が80%程度と計算でき、先行文献と同程度の値であると判明した。
  - ・多条砥石を用いることに加え、材料除去率を調整することで高能率な乾式歯車研削が実現可能と推測した。
- 多条砥石の低材料除去率での加工の効果に関してさらなる実験で検証する必要がある。

#### 参考文献

- [1] 高橋啓二郎, “熱損傷の予測に基づく乾式歯車研削の実現,” 2020.
- [2] M. J. Hadad, T. Tawakoli, M. H. Sadeghi, and B. Sadeghi, “Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 54–55, pp. 10–17, 2012, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010.