

# 歯車研削における研削温度分布に基づく新冷却法の開発

東京大学機械工学科 ○関根 啓悟 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 ◎杉田 直彦  
 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 木崎 通 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 池元 優介  
 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

## 要 旨

現在、歯車研削加工において、研削焼けを防止のため大量の冷却液が必要となっており、冷却の効率化が求められている。そこで本研究では歯車研削時の加工面の温度を計測することで様々な冷却方法を評価し、新規冷却法を提案することを目的とした。実験と解析により、独自に開発した冷却液を内部供給する砥石では、冷却液単位体積当たりの排熱量は従来の外部供給に比べて大きいと判明した。

## 1. 研究背景

歯車研削とは、歯車製作工程の仕上げ加工の1種であり、熱処理後の硬い歯車表面を高精度で加工できることから、高精度化が進む現代において歯車製作の重要な位置を占めている。研削加工は、切削加工と研磨加工の中間的位置づけにあり、高精度かつ高速な加工が可能である一方、微小な領域を高エネルギーで加工することから著しい発熱が生じ、研削焼けが生じる。そのため、研削加工において冷却することが必須であるが、現在用いられている冷却手法の多くは高圧供給クーラントである。この手法は、冷却能力に優れているが、廃液が多くエネルギー消費も著しい。環境対応型技術が求められる現代において、環境対応のための対策が必要である。さらに、歯車研削においては、砥石と同時に被削材も回転することから、特定の研削面についてのデータを取得することが難しく、研削面の温度を測定する手法が確立されていない。このような点からも、歯車研削において、研削面温度を測定し、定量的に冷却能力を評価したうえで、環境対応型の技術を開発することが求められているといえる。

## 2. 従来研究

近年、環境対応型技術の観点から高圧供給クーラントのクーラント流量を削減して廃液を減らす試みが多くなされている。吉見らはエアノズルを用いることで砥石の連れ回り空気流を抑制し、クーラント流量を50%削減した[1]。しかし、この機構は砥石と同時に歯車も回転する歯車研削への適応は難しいと考えられる。

## 3. 研究目的

歯車研削における研削面温度測定手法を開発しそれを用いて提案した冷却手法を従来の冷却手法と比較し評価することを目的とする。さらに、その評価を以て提案手法の改良案を提示する。

## 4. 提案手法

砥石内部から外部に向かってクーラントの流路を設け、その流路を用いてクーラントを供給する手法が近年研究されている

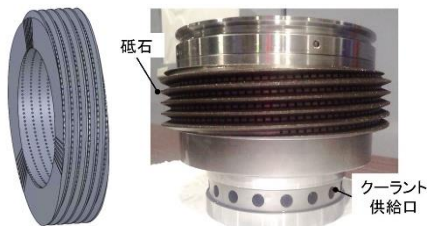


Fig.1 開発したクーラント内部供給砥石

[2]。先行研究においてはこの内部供給法はモデルの段階であるが、外部供給時と異なる方向からクーラントを供給できるため、高冷却機構が期待できる。これらの手法を歯車研削に適応し、クーラント内部供給砥石を開発した(Fig.1)。歯車研削の連続創成研

削に用いられるねじ状砥石において、砥石面のねじ部の歯底部分に直径2mmのクーラント流路を、間隔6mmで空けた。さらに、砥石を歯車研削盤に取り付けるためのユニットが Fig.1 右図であり、クーラント供給口へクーラントを流入させることによって砥石に設けた流路からクーラントが供給される。また、通常のノズルを用いることでクーラントを外部供給することもできる。

## 5. 新規温度測定手法の開発

平面研削の研削面の温度測定手法として、0.1mm程度の太さの熱電対を用いた研究があり[3]、それを参考として熱電対を独自に加工して開発した。熱電対をクーラント内部供給砥石に設置することは難しいと考えられるため、歯車に設置することとした。その際、歯車研削において砥石とともに歯車も高速回転するために有線でのデータのやり取りおよび電源の供給は不可能である。そのため、データ保存用のSDカードや外部から測定開始と終了を操作するため



Fig.2 開発したセンサー

のBluetoothモジュールなどを搭載したデバイスを中空に加工した歯車に埋め込み、センサーを開発した(Fig.2)。熱電対は、末端がデバイスの基盤の一部に接続されており、歯車中空部分から歯車に向かって空けられた直径0.4mmの穴を通り、先端は歯車から5mm程度露出している。このセンサーを用いて、歯車研削面温度測定実験を行った。

## 6. 歯車研削面温度測定実験

### (a) 手法

クーラント流量およびクーラント供給方法の違いによる冷却能力の違いを比較するため、上記のセンサーを用いて歯車研削における研削面の温度測定を行った。研削盤は三菱重工工作機械のZE15Bを用い、砥石回転数は4000rpm、切込み深さは75 $\mu$ mである。変数としたものはクーラント流量で120,160,200[L/min]の3通りを、外部供給と内部供給の場合について温度測定した。

### (b) 結果

結果の一例を以下に示す。なお、Fig.3の結果はクーラントを160L/minで外部供給した時のものである。ピークが15回程度見られることから粗加工時において温度測定点を加工領域が15回程度通過したことがわかる。また、粗加工初期においては切込みが深いためピークの立ち上がり急激であり、その後切込みが徐々に浅くなっていくためにピークが緩やかに小さくなっている

様子が分かる．さらに，周期3でピークの高さが上下していることから，3条砥石のうちのいずれか1条の切込みがほかの2条に比べて浅いということも分かる．

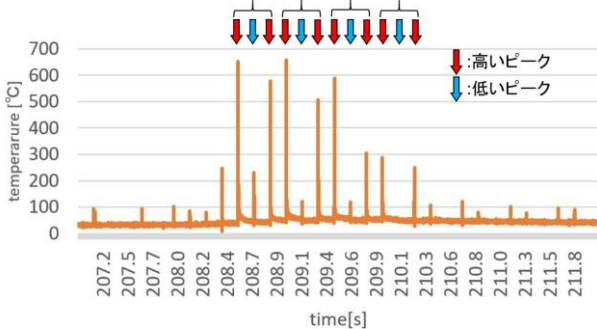


Fig.3 粗加工時5秒間における温度変化のグラフ

Fig.4は1つのピークに着目しピークを拡大したものを供給方法で比較したものである．

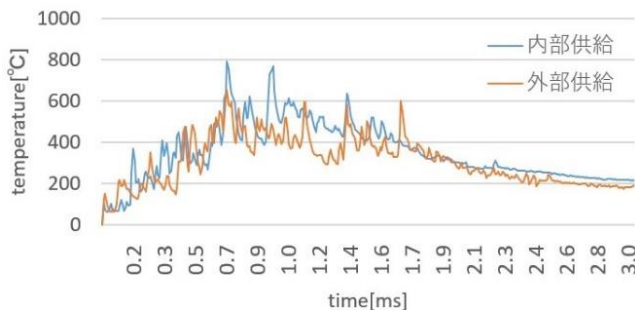


Fig.4 クーラント流量160L/min時の粗加工3ミリ秒間の温度変化

内部供給時は外部供給時と比べて，最高温度にして100°C程度，加工終了後の温度にして20°C程度高くなっていることが分かる．この冷却能力の差を以下で定量的に計算した．

### (c) 考察

加工領域の1度通過する時間である0.002秒間において，研削盤のトルク指令の値から全発熱量 $Q_{ALL}$ を，発熱領域の解析(Fig.5)および最高温度から歯車の発熱に使われた熱量 $Q_{GEAR}$ を見積り，それらの値から冷却効率 $\alpha$ を計算した．その一例を以下に示す．なお，全発熱量のうち，歯車に伝達されなかった熱量はすべてクーラントが除いたとし，

$$\alpha = (Q_{ALL} - Q_{GEAR}) \times 100 / Q_{ALL} \text{ とした.}$$

Table.1 冷却効率の計算

供給方法	最高温度 [°C]	$Q_{GEAR}$ [J]	$Q_{ALL}$ [J]	$\alpha$ [%]
内部供給	789	1.40	3.50	60.0
外部供給	652	1.15	4.28	86.1

冷却効率において内部供給は外部供給に劣るという結果になったが，その一因として，開発したクーラント内部供給砥石は，砥石を中心として放射状にクーラントを流出させる機構であるために加工部に向いているクーラントの量が少ないことが挙げられる．そこで，内部供給時において全クーラントのうち加工部に向いているクーラントのみを考慮して，クーラント単位体積当たりの除熱量(Table.2中では除熱量と表記した)を計算した．外部供給においては，全クーラントが加工部へ向いているとして計算した．

Table.2 クーラント単位体積当たりの除熱量の計算

供給方法	流量[L/min]	$Q_{ALL} - Q_{GEAR}$	除熱量[J/mL]
内部供給	160	2.10	7.07
外部供給	160	3.13	1.34
外部供給	200	2.24	0.888

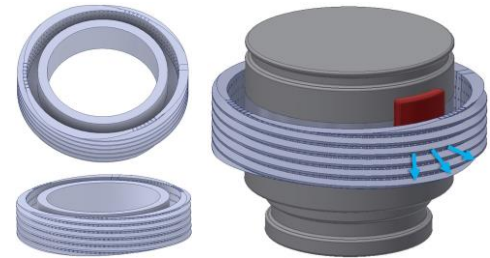
この結果から，外部供給時に比べ内部供給時は冷却効率が劣ると分かった．一方，等方的にクーラントが供給されてしまう内部供給の問題点に注目し，加工部に向いているクーラントのみを考慮すると，内部供給時はクーラント単位体積当たりの除熱量が従来の6-8倍となることが分かった．

## 7. 改良型クーラント内部供給砥石の提案

等方的にクーラントが供給されてしまう問題点を解決し，クーラント流量を削減することを目的として，改良型のクーラント内部供給砥石を右図のように提案した．構造は提案したクーラント内部供給砥石の側面に円形に溝を掘った構造をしている(Fig.6左)．研削盤の砥石軸で回転させるためのユニットを取り付けたものが

Fig.6の右図

である．図中の赤い部分は砥石の溝に挿入されたクーラント供給部で砥石やユニットとは独立しており，砥



石やユニットが回転してもクーラント供給部は回転しない．これにより加工部のみにクーラントを供給することができる．さらに，この砥石において，加工部におけるクーラント供給方法は提案したクーラント内部供給砥石と同じであるから，クーラント単位体積当たりの除熱量は高いと考えられる．これらのことから，改良型クーラント内部供給砥石において大幅なクーラント削減が見込め，実際に従来の外部供給時と同じ冷却効率を示すために必要なクーラント流量を計算すると，理論上13.3L/minが必要とされ，これは従来200L/min必要とされていたものの93%以上のクーラントを理論上削減できる，ということを示している．

## 8. 結論

本研究により以下のような結論が得られた．

- ・提案手法であるクーラント内部供給砥石は，外部供給と比べて冷却効率は4分の3程度であるが，加工部に供給されるクーラントを考慮すれば，クーラント単位体積当たりの除熱量は外部供給時の6-8倍となった．
- ・提案手法を改良した改良型クーラント内部供給砥石において，従来通りの冷却効率を実現するために必要なクーラントは計算において13.3L/minとなり，理論上93%以上のクーラントが削減できるということを示した．

## 参考文献

- [1] T. Yoshimi, S. Oishi, S. Okubo, H. Morita, and T. Shibukawa, “研削加工における少流量クーラント供給技術の開発,” 精密工学会誌, vol. 75, no. 6, pp. 686–689, 2009.
- [2] 森, 良亮, “環境対応型研削加工機に向けたクーラント内部供給工具の開発 Development of through-wheel coolant tool for eco-friendly grinding process,” 2017.
- [3] H. N. Li and D. Axinte, “On a stochastically grain-discretised model for 2D/3D temperature mapping prediction in grinding,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 116, no. January, pp. 60–76, 2017.