

# 超高速・高精度ホブ加工メカニズムの解明

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○上田優希 ◎関 紀旺

## 要 旨

高精度歯車は動力系の低騒音化を実現することから、電気自動車への応用が期待される。それに伴い超高速・高精度ホブ加工技術が期待されているが、その切削特性は未解明である。本研究では2000 m/min以上の超高速ホブ加工実験を行い、切削特性の調査を行った。その結果、切りくず生成機構を解明し、研削やシェービングに匹敵する表面粗さ(0.11 μm Ra)を達成した。また、歯面には圧縮残留応力が生じ、歯車強度も増加することを明らかにした。

## 1. 結論

歯車は動力伝達機構の部品として自動車や航空機、産業機械など幅広い分野で利用される。近年自動車のEVシフトに伴い、高精度かつ軽量の小型歯車による動力伝達機構の低騒音化が求められている。従来、歯車の量産加工では高速度鋼製ホブによって歯車の形状を切り出し、焼き入れの後にシェービングまたは研削を行うことで精度の高い歯車を生産してきた<sup>1)</sup>。しかし、シェービングや研削工程による生産プロセスの複雑化と生産コストの増加が問題となっている。また、研削とシェービングの工具は大型であり、小モジュール歯車の生産に対応していない。

近年、超合金製ホブを用いた超高速・高精度ホブ加工が提案され、シェービングや研削を行わずに、超高速ホブ加工のみによって高精度の歯車仕上げを実現することが急務とされている。一般的な歯車ホブ加工では切削速度200 m/minが主流であるのに対し、超高速ホブ加工では2000 m/min以上にまで達する。これにより加工工程が削減され、加工時間の大幅な短縮が可能である。また、超合金ホブの摩耗が小さく、切削油を使用しないドライカットによって環境負荷も低減できる。さらに、ホブカッタは小型化が可能であり、小モジュール歯車の加工も可能である。以上の優位性から、超高速ホブ加工は次世代の歯車量産技術として期待される。

しかし、2000 m/min級の超高速領域でのホブ加工メカニズムは未だ解明されていないのが現状である。そこで本研究では、超高速ホブ加工メカニズムを解明するために、斜歯歯車の材料として一般的に使用されるクロモリブデン鋼を用いて歯車のホブ加工実験を行い、切削速度や送り量などの加工条件が切りくずや歯車表面に与える影響を調査した。加工メカニズムを解明することで、最適な加工条件の選定や超高速ホブ加工装置の開発に貢献することを目指す。

## 2. 実験方法

ワーク材料にクロモリブデン鋼 SCM415、ホブカッタ材料に超合金 K 種を使用した。数百 m/min の低速加工にはホブ盤 GE15A、1000 m/min 以上の高速加工にはホブ盤 GE15HS、2000 m/min 以上の超高速ホブ加工には大口径ホブカッタ搭載可能な歯車研削盤 ZE15B を用いた(上記装置はいずれも日本電産マシントール(株)製)。図1にホブカッタとワークの回転方向とアキシャル送り方向を示す。表1にホブカッタおよびワークの諸元と切削条件を示す。

加工後、走査型電子顕微鏡(Scanning electron microscope: SEM)

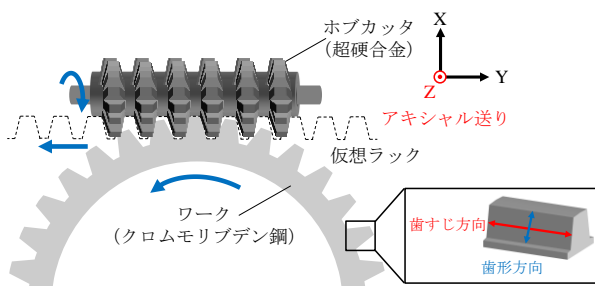


図1 ホブ加工装置の模式図

とエネルギー分散型 X 線分析装置(Energy dispersive X-ray spectrometer: EDX)を用いて切りくずと歯車の表面観察および元素分析を行った。また、透過型電子顕微鏡(Transmission electron microscope: TEM)を用いて切りくずの断面観察を行った。加えて、2次元レーザープローブ、ポータブル型残留応力測定装置およびマイクロビッカース硬度計を用いて、歯車の表面粗さ、残留応力、そしてビッカース硬さの測定を行った。

## 3. 結果および考察

### 3.1 切りくず観察と成分分析

図2に排出された切りくずの外観を示す。低速ホブ加工(図2(a))では銀色であるのに対し、超高速ホブ加工(図2(b))では切りくずが青黒く変色した。図3に切りくず表面のSEM画像を示す。低速時は条痕が見られるが滑らかな表面であった。一方、超高速加工時の切りくず表面に多数の凹凸が見られた。図4に図3(b)の切りくずの断面TEM観察画像とEDX分析結果を示す。切りくず表面に被膜が形成され、被膜は主に鉄と酸素で構成されていた。切りくず表面が濃紺色となり、粒状表面となった原因は、切りくず表面に生じた酸化鉄被膜によるものであると考えられる。

図5にEDXによる切りくずと歯車表面の元素分析結果を示す。切削速度の増加により、切りくずの酸素構成割合が増加した。また、図6に切削後の切りくず、ワーク、カッタ温度をサーモグラフィカメラおよび接触温度計で測定した結果を示す。切削速度の増加により生じる切削熱は主に切りくず側へ流入し、急激な温度上昇が起きていることがわかった。したがって、切りくずの酸化の原因は切りくずの急激な温度上昇によるものであると考えられる。

### 3.2 歯車の表面品質

図7に切削速度に対する歯面歯すじ方向での表面粗さ変化を示す。切削速度2001 m/minまでは、表面粗さにほとんど変化がなかった。2450 m/minではわずかに表面粗さの増加が見られた。

表1 加工条件

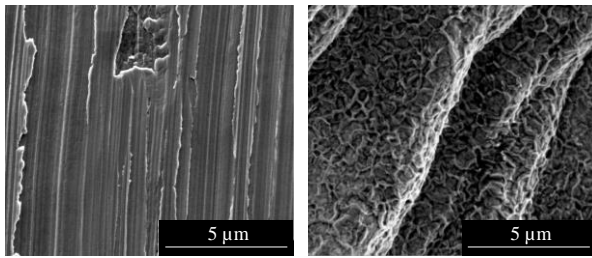
加工機	ホブ盤		歯車研削盤
	GE15A	GE15HS	ZE15B
ホブカッタ	直径 [mm]	65	130
	条数		1
	切刃溝数	20	20
ワーク	モジュール		1.7
	ねじれ角 [deg]		-35
	歯数		39
	歯幅 [mm]		13.5
	歯たけ [mm]		5.3
切削条件	切削速度 [m/min]	200~400	400~1200
	アキシャル送り [mm/t.rev]	0.3~5.0	0.3~7.0
			0.3



(a) 400 m/min

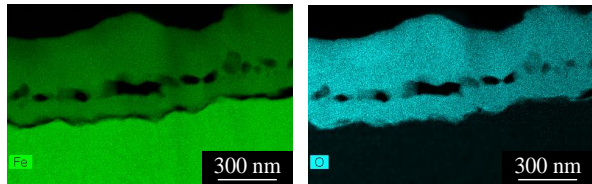
(b) 2450 m/min

図2 切削速度による切りくずの色変化



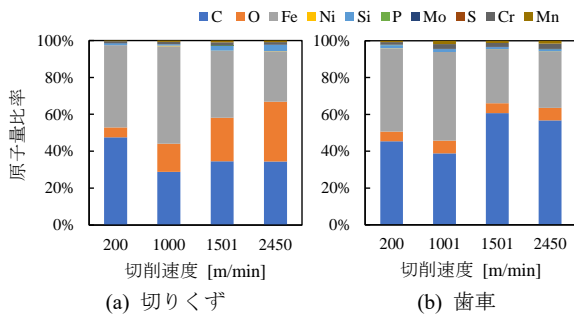
(a) 400 m/min (b) 2450 m/min

図 3 SEMによる切りくず表面観察



(a) Fe (b) O

図 4 切りくずのTEM断面観察とEDX分析



(a) 切りくず (b) 歯車

図 5 EDXによる元素分析結果

超高速ホブ加工後の歯車の表面粗さは $0.11 \mu\text{m Ra}$ 程度であり、PVDコーティングしたハイス工具による歯車シェービング後の表面粗さ $0.16 \mu\text{m Ra}$ より小さい値であった<sup>3)</sup>。超高速ホブ切り加工のみによって、従来のシェービング工程よりも平滑な歯面が得られた。

また、図 5 (b)に示すように、EDXによる歯面の元素分析結果から、切削速度増加による歯面の酸化は顕著ではなかった。これは図 6 に示すようにワークの温度上昇が極めて小さいことが理由として考えられる。

### 3.3 残留応力とビッカース硬さ

図 8 に歯面の歯形方向の残留応力を示す。切削速度 800 m/min までは切削速度が増加すると、残留応力が大きくなり、引張残留応力が生じた。一方、800 m/min 以上では引張残留応力は小さくなり、圧縮残留応力が増加した。

800 m/min 以下の低速切削時には、単位面積あたりの切削時間が長く、切削による高温領域が表面に長時間形成され、多くの熱が加工面内部に拡散される。切削時の熱影響により歯面に膨張変形が生じ、切削後の冷却により表面が収縮するため、引張残留応力が生じたと考えられる。一方、800 m/min 以上の高速切削時は、単位面積あたりの切削時間が極めて短く、切削熱のほとんどが切りくずとともに排出され、ワーク内部への熱伝導が少なくなる。その結果、熱影響よりも切れ刃の機械的作用が残留応力の支配要因となり、切削による表層の引張変形とその回復による圧縮残留応力が生じたと考えられる。先行研究では、機械加工による機械的変形と熱的変形のそれぞれの優位性は主に体積除去率によって定まると報告されている<sup>4)</sup>。本研究では、加工後の残留応力分析結果から、機械的変形と熱的変形の優位性は切りくずの放熱能力によって支配されると考えられる。

図 8 に切削速度増加による歯面のビッカース硬さの変化を示す。切削速度 800 m/min までは切削速度の増加によりビッカース硬さは減少し、1500~2450 m/min では切削速度の増加により

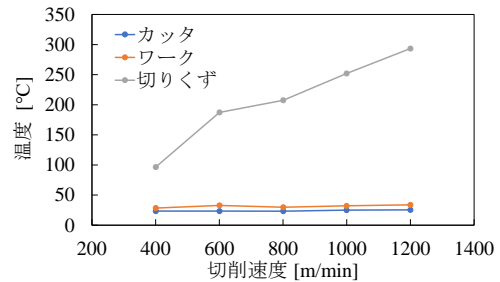


図 6 加工後の温度測定結果

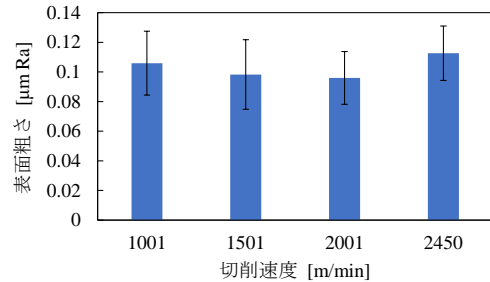


図 7 表面粗さ変化

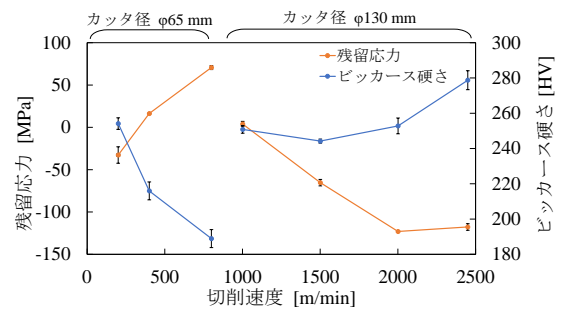


図 8 残留応力とビッカース硬さ変化

ビッカース硬さは徐々に増加した。この結果は、切削速度の増加が歯面の硬さの向上に寄与することを示唆している。

残留応力とビッカース硬さ変化において切削速度 800 m/min と 1001 m/min で不連続な値となったのはカッタ径の違いに起因すると考えられる。先行研究において、炭素鋼の切削<sup>5)</sup>では、残留応力とビッカース硬さに相関関係があることが報告されており、本研究においても残留応力とビッカース硬さに明確な相関関係が確認できた。

## 4. 結論

超高速・高精度ホブ加工における加工特性の調査を行い、以下の結論を得た。

- (1) 切削速度の増加につれて切りくずの温度が大きく上昇し、切りくず表面には酸化層が形成された。一方、歯面の酸化はほとんどなかった。
- (2) 切削速度の増加により、従来のホブ加工と同等あるいはやや小さい表面粗さが得られた。
- (3) 超高速切削時、歯面には熱的変形より機械的変形が優位に生じ、歯面に圧縮残留応力が付与され、硬さが向上した。

また、残留応力とビッカース硬さの相関関係が確認された。

以上のことから、超高速ホブ加工では表面粗さを維持すると同時に残留圧縮応力の付与や硬さの向上が可能であり、歯車量産加工の高効率化、高品質化および低コスト化を実現する方法として大いに期待できると考えられる。

## 参考文献

- 1) B. Karpuschewski et al., MM Sci. J, (2014), 527-532.
- 2) F. Klocke et al., CIRP Annals, 41, (2016), 875-880.
- 3) K. D. Bouzakis et al., CIRP Annals, 57, (2008), 676-696.
- 4) R. S. Pawade et al., Int. J. Mach. Tools Manuf, 48, (2008), 15-28.
- 5) 香川勝一ら, 精密工学会誌, 56, 9, (1990), 128-134.