

氏 名	山 中 将
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻
学 位 論 文 題 目	多条 CBN ウォームによる歯車研削の 生産性向上に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 江村 超
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 江村 超    東北大学教授 加藤 正名 東北大学教授 庄司 克雄

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、多条 CBN ウォームによる歯車研削の生産性向上を目的として行った研究成果をまとめたもので、全編 6 章よりなる。

以下、各章ごとにその要旨を述べる。

### 第 1 章 緒 論

自動車の駆動系歯車は、静粛かつ効率よく動力を伝達する必要があり、その要求レベルは増々、高くなっている。具体的には乗用車の車室内騒音の低減要求が運転の高級感、満足感を満たすために厳しくなっており、ギャノイズ低減が大きな課題になっている。また自動車の設計自由度と燃費を向上させるため、トランスミッションの軽量、コンパクト化が求められ、高精度と両立させた歯車の高強度化も重要な課題になっている。高精度化と高強度化および、その両立の課題に対して歯車の設計、生産ならびに品質管理の各プロセスにおいて多くの技術開発がなされているが、ここでは生産プロセスに注目した。

トランスミッション用歯車の製造工程は一般に熱処理後に仕上げ工程を持たない。したがって、低ノイズのために設計された修整歯形を高精度で実現するためには、熱処理工程を精密に制御して焼入れひずみのばらつきを最小限に管理し、次に焼入れひずみが発生した後に規定の修整歯面になるように、ひずみを見込んでシェービング加工する必要がある。しかし、さらに高精度の歯形を

得るには熱処理後に仕上げ加工を行う必要がある。また高強度化のためには、歯車材料や浸炭焼入れ法の改善と焼入れ後にショットピーニングを行い、曲げ疲労強度の向上を図っている。

以上のように、高精度化・高強度化のために従来の工程に種々のプロセスを付加しているため、加工時間および加工コストが増大し現状では生産性の向上と両立していないと言える。本研究では自動車の駆動系歯車の高精度化・高強度化と生産性の向上を両立させるためにシェービング工程を省略し、焼入れ後に歯車研削にて最終仕上げを行う工程を提案し、その実現性を検討した。歯車研削には種々の方式があるが、ウォーム状砥石を用いた創成研削方式は、特に高いピッチ精度が得られ、歯底研削が可能という特徴がある。さらにCBNホイールを用いて歯底まで研削することにより歯車の強度が向上することが報告されており、これによりさらに高強度の歯車の製造も期待できる。本研究では生産性の向上と歯底研削による高強度化の実現という観点から、上述の歯車研削工程にはウォーム状CBNホイール（以下、CBNウォームと呼ぶ）を用いた歯車研削方式が適切と考えた。

本研究では歯車研削の生産性向上を目的として、多条CBNウォームを用いた歯底までの高速・高能率歯車研削による加工時間の飛躍的短縮と、さらにツールコスト低減と歯形修整のためにビトリファイドボンドCBNウォームの実用化をはかった。

## 第2章 加工システムの概要

本章では加工システムの具備すべき特徴と、それらを具現化するための方法を議論した。本研究で扱う歯車研削加工システムの具備すべき特徴は次の通りである。

- (1) 必要精度を維持しながら短時間で歯車研削が可能
- (2) 低ツールコスト

以上の2点が歯車研削の生産性向上の観点から要求される特徴である。

- (3) CBNウォームを用いた歯底研削による歯車の高強度化
- (4) 歯面修整による歯車騒音の低減

これらは、歯車の高性能、高品位化をはかるために加工システムの機能として要求される特徴である。

加工時間はアキシャル送りを一定にすれば、工作主軸の回転速度に反比例して短縮される。一方、工作主軸の回転速度は砥石軸回転速度とウォームの条数に比例して上げることが可能なので、砥石軸の高速化とウォームの多条化により加工時間が短縮できる。さらにワンパスあたりの切込み量を大きく設定し、与えられた取代を少ない回数で除去する高能率化により短縮できる。これらの実証実験の結果は第4章で述べる。

ツールコストの低減はツーリング可能なビトリファイドボンドCBNホイールを歯車研削に採用し、さらに高寿命化を図るために大径のウォームを採用することにより実現できる。作用砥石面積はウォーム径に比例して大きくなり、同じ取代に対して大径ウォームの方が研削に作用する砥粒の数が増えるので、砥粒1個あたりの負荷が減少する。そこで大径のビトリファイドボンドCBNウォームを試作し、研削性能の評価を行った。詳細は第5章で述べる。

歯底研削のメリットは二つあげられる。一つは歯面から歯元、歯底部に至る範囲を連続的に加工し途中で段差を作らないことにより、応力集中による損傷を防ぐことである。もう一つはCBN研削により圧縮残留応力を誘起し疲労強度を上昇させることである。しかし従来、歯底研削を行うと特にはずば歯車において良好な歯形・歯すじ精度が得られなかった。そこで、これらを解決するため本研究ではダイレクトドライブ方式でかつ高いサーボ剛性を有する工作主軸を用いて高精度な加工を試みた。高強度化の評価は今後の課題とした。

歯車対の接触線に直交する方向にクラウニングを施した歯面が歯車騒音の低減に有効である。プランジシュービングによりこの修整歯面は得られるが、ウォーム状砥石を用いてこのような修整が可能かを検討した。ウォーム状砥石を用いてはずば歯車に対してクラウニング加工をした場合、接触線の方にクラウニングが施され歯面修整方法として適当でない。ウォームの軸方向の各位置で圧力角補正をしたウォームを連続的にシフトしながら加工する方法が有効と考えられる。この方法の実現のためには高精度にCBNウォームを成形する技術が必要であり、後述するビットウォームの機上ツルージングにより対応できる。

さらに本章ではウォーム状砥石を用いた歯車研削機構の幾何学的検討を行いその特徴を述べた。これらは実験結果の考察に有用である。

### 第3章 実験装置および実験方法

本章では実験装置および実験方法について説明した。加工時間短縮の実証実験にはモジュール2.5の電着CBNウォーム（以下、電着ウォームと呼ぶ）を用いた。粒度は#200であり、ねじ研削盤でウォーム状に研削した台金にCBN砥粒を電着して製作した。またモジュール2.5のビットリファイドボンドCBNウォーム（以下、ビットウォームと呼ぶ）を試作し、その実用化の検討と研削性能の評価を行った。この製作には、ねじ部を円周上で分割した形状のセグメントを円筒形の台金に接着する方法を用いた。

研削した歯車の測定にはカール・ツァイス社製の三次元測定機を用いた。試験歯車に設けた円筒面を基準にして歯面を測定するが、円筒面と歯車中心の間に偏心があると見かけ上、歯車精度が低下した結果が出現する。そこで歯みぞの振れの測定データから偏心量とその方向を求め、それらを用いて測定データの補正を行い良好な結果を得た。さらに偏心分だけあらかじめ測定機の座標系を補正してから歯車精度を測定することにより、データの補正をしなくても信頼性の高い高精度な歯車測定が可能になった。

### 第4章 電着ウォームを用いた高速・高能率加工

本章では直径200mmの2条電着ウォームを用いて高速・高能率化の実証実験を行った。最初に砥石軸回転速度を1,000 r/minより7,000 r/minまで変化させて研削実験を行った。従来、このような広範囲で研削速度を変化させて精度評価を行った例は見当たらない。砥石軸回転速度7,000 r/minの場合の加工精度は1,000 r/minの場合と同等以上であり、砥石軸の高速化と多条ウォームによる加工時間の短縮効果を示した。また試作機のコントローラのサーボ剛性は砥石軸の許容ト

ルクの範囲内で十分に高く、高負荷でも高精度な同期制御が可能であり、切込み量を増加させながら加工した結果においても歯車の精度低下は見られなかった。

平歯車の歯底研削を行った場合、歯先が広がる方向の圧力角誤差が発生した。これは歯底部を加工する際の研削抵抗によりウォームの軸方向に強制力が働き、加工中にウォームが振動的に変位したためと考えられる。はずば歯車においてはこの傾向はわずかであった。歯車とウォームのかみ合い長さがはずば歯車の方が長いことと歯車の軸方向に力が分配されるため、研削抵抗の影響が少ないからである。歯すじ精度に関してはダイレクトドライブ式主軸台の効果により高い精度が得られた。

さらに、アキシャル送りと切り込み量を変えて歯底研削を行った結果より、砥石軸の消費動力は単位時間当たりの研削除去量に比例することがわかった。研削除去量は歯車軸直角断面の除去面積を幾何学的に解析した結果より求めた。それによれば歯底研削により除去量は歯面のための研削に比べて約2倍となるが砥石軸の消費動力の上昇は許容トルク限界付近でも1.4倍程度であった。

## 第5章 ビトウォームの実用化

本章ではツールコストの低減をめざし、直径200mmの2条ビトウォームを試作し研削性能の評価を行った。ツールイング方法は綫型工具を用いる方法とポイント型工具を用いる方法に大別されるが、ここではV字形の綫型ダイヤモンドホイールを用いた、ねじ研削方式の機上ツールイング装置を試作し二相型PLLを用いた高精度な同期制御により機上ツールイングを可能にした。

同期運転の制限により常用される周速度の1/100程度の超低周速度で回転するCBNウォームに対してツールイングを行う必要がある。そこで通常の円筒形CBNホイールを用いてツールイング・ドレッシング条件を求めるための基礎実験を行った。その結果、ツールイングカッタの周速度をCBNホイールの周速度で除した速度比 $W=-6$ （符号は正がダウンカット、負がアップカットを示す）でツールイングを行い、 $W=0.6$ でクラッシング効果を期待したドレッシングを行うことにより研削初期より低い研削抵抗で加工できることがわかった。この条件をビトウォームに適用し、半径方向 $1\mu\text{m}$ の切込み量でツールイング・ドレッシングを行った。この二つの作業は砥石軸の消費動力を監視している限りでは差異はないが、後者はビトホイールとツールイングカッタの間にすべり速度がほとんどなく、砥粒層に大きなせん断力が加わり回数を重ねると、ビトウォームの一部が破損に至り、十分なドレッシングの効果が得られないことがわかった。

そこで、高速回転するビトウォームに対してドレッシング可能で、さらに簡単に行えるという観点から、歯車形のGC砥石を工作物にみたくて研削することによりドレッシングを行う方法を考案した。粒度#46のGC砥石を用いた実験結果より研削抵抗が低減し、砥粒切れ刃の改善が可能であることがわかった。このようにしてツールイング・ドレッシングを行ったビトウォームを用いて電着ウォームと同じ研削条件で歯底研削を行った場合、砥石軸の消費動力は電着ウォームの場合に比べて約2倍となり、現状では多少の研削焼けが見られるが両者は同等の歯車精度であり、その実用性は高いと判断した。これらは他に例を見ない研究成果である。

## 第6章 結 論

第6章では、本研究において得られた結果の総括と工学的意義について述べた。加工などの生産システムにおいて生産性の向上はテーマであり、歯車研削においても、その具体的な示唆が切望されていた。本研究では、生産性向上の要求に応えるべく加工システムの具備すべき特徴およびそれらを具現化するための方法を示し、さらに実証実験を行い、その妥当性を評価した。また加工した歯車の精度よりコントローラの特性或 CBN ウォームの研削性能を評価する技術手法の蓄積ができた。以上の成果より多条 CBN ウォームによる歯車研削の生産性向上という目的を達成し、歯車工学に寄与するところが多いと結論できる。

## 審査結果の要旨

自動車の駆動系歯車の高精度化・高強度化と生産性の向上を両立させるためには、焼入れ後に CBN ウォームを用いた歯車研削にて最終仕上げを行うことが有効である。本論文は、多条 CBN ウォームによる歯車研削の生産性向上を目的として行った研究成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は、緒論であり本研究の背景と目的およびその意義について述べている。

第2章では、加工システムの具備すべき特徴と、それらを具現化するための方法を論じている。また、ウォーム状砥石を用いた歯車研削機構の幾何学的検討を行いその特徴を述べている。

第3章では、実験装置および実験方法について説明している。研削した歯車の測定には三次元測定機を用いたが、測定の信頼性向上をはかるために測定方法や測定データの処理方法の改善を行い、高精度で測定できることを示している。

第4章は、直径200mmの2条電着 CBN ウォームを用いた高速・高能率化の実験による実証である。最初に砥石軸回転速度を広範囲に変化させて研削実験を行った。その結果、砥石軸回転速度7,000 r/min の場合の加工精度は1,000 r/min の場合と同等以上であることがわかり、砥石軸の高速化と多条ウォームによる加工時間の短縮が可能であることが示された。また、試作機のコントローラのサーボ剛性は砥石軸の許容トルクの範囲内で十分に高く、高負荷でも高精度な同期制御が可能であり、切込み量を増加させながら加工した場合においても歯車の精度低下がないことを示された。これは重要な実験結果である。

第5章では、ツールコストの低減をめざし、直径200mmの2条ビトリファイドボンド CBN ウォームを試作し、その実用化の検討と研削性能の評価を行っている。評価のため、V字形の総型ダイヤモンドホイールを用いたねじ研削方式の機上ツルージング装置を試作し、二相型 PLL を用いた高精度な同期制御により機上ツルージングを可能とするシステムを構築した。さらに歯車形の GC 砥石によりドレッシングを行う方法を考案し、粒度 #46 の GC 砥石を用いた場合は、提案のドレッシング法により研削抵抗が低減し、砥粒切れ刃の改善が可能であることを示している。このようにしてツルージング・ドレッシングを行ったビットウォームを用いて電着ウォームと同じ研削条件で歯底研削を行った場合、砥石軸の消費動力は電着ウォームの場合に較べて約2倍となるが、加工された歯車精度は同等となることが示された。これは、他に例を見ない優れた研究成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、歯車研削の生産性向上を目的とし、多条 CBN ウォームを用いた加工システムの具備すべき特徴およびそれらを具現化するための方法を示すとともに、実証実験を行い、その妥当性を評価したものである。また、加工した歯車の精度を測定することによりコントローラの特長や CBN ウォームの研削性能を評価する技術手法の蓄積を行い有用な成果を得たもので、精密工学および歯車工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。