

氏名	きん めいしゅ <b>金 明洙</b>
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博甲第917号
学位授与の日付	平成31年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	<b>歯面形状測定データを用いたインポリュート円筒歯車の新たな評価法</b>
審査委員	(主査)教授 森脇一郎 教授 村田 滋 准教授 射場大輔

## 論文内容の要旨

本論文では、歯車の量産加工現場において行われる製作された歯車の評価方法を研究の対象とし、歯車測定機によって歯面の粗さ評価を行う方法、ホブ切り歯車のピッチ誤差測定のばらつきを抑える方法という二つの提案を行っている。まず、測定用のプローブの形状が粗さの測定結果に及ぼす影響について数値シミュレーションを行い、調査している。次に実際の歯車測定機と通常の形状測定用プローブを用いて、粗さ標準試験片と仕上げの異なる3種類の歯車の粗さ計測を行っている。また、超微細ピッチ歯車の形状測定用に開発された先端形状が非常に小さい特別なプローブを用いた場合の粗さ計測を行っている。さらに、ホブ切り歯車の場合、形状測定時にプローブを接触させる位置によってピッチ誤差計測にばらつきが生じる問題に対して、歯すじデータを計測し、その結果をローパスフィルタによって処理した後にピッチ誤差を導出する方法について提案し、実際の計測によってその有効性を示している。

本論文は全6章で構成されている。まず初めに、第1章で研究の背景と目的を述べた後、第2章ではCNC歯車測定機の構成について述べている。本研究では、CNC歯車測定機を用いた測定データの評価方法について考察し、その改善を行うことを目的とするため、CNC歯車測定機についての解説から始めている。そしてCNC歯車測定機が内包する誤差の要因について考察し、その調整および測定機の運用例について述べている。

第3章では、歯車測定機を利用して歯面の粗さを評価する方法について述べている。通常、歯車測定機では歯面測定データに対してローパスフィルタリングを行った測定データを歯車歯面の形状として評価するが、元の測定データから形状データを引いた残差分のデータ、すなわちハイパスフィルタリングされたデータは、歯面の面粗度に関する情報を有していると考えられる。しかしながら、こうしたデータがこれまで歯面の粗さ評価に利用された例はなく、全て廃棄されていた。そこで第3章では、この残差データを利用し、歯車歯面の表面性状を評価する方法について検討している。特に、歯車測定機で利用されるスタイラスと粗さ測定器で利用されるスタイラスの形状には大きな差があるため、その影響が結果にどのような影響を与えるか調査している。具体的には歯車測定機用のスタイラスの形状をトーラス曲面としてモデル化し、また、粗さ測定器のスタイラスは半球としてモデル化し、3次元形状測定機によってスキャンした標準粗さ試験

片の面データを利用して、その面上の動きの違いをシュミレーションしている。そうして得られた結果を考察することで、歯車測定機によって得られる歯面の擬似粗さの評価方法について検討している。さらに、加工条件の違う 3 種類の歯車の歯面を歯車測定機で実際に計測し、得られた結果とシミュレーションの結果と比較することで歯面粗さの評価方法の妥当性を考察している。

第 4 章では、現在の CNC 歯車測定機の一つの課題である極小モジュール歯車の測定を取り上げている。モジュールサイズが 0.1 の歯車はこれまで測定する方法がなかったが、これを測定するためのスタイラスを考案し、その可能性について検討を行っている。そして、そのアーティファクトによる実際の測定実験を行い、性能評価を行っている。またこのスタイラス先端は極細形状をしていることから、第 3 章で検討した擬似粗さ評価の精度向上が期待できるため、3 章で使用した歯車の擬似粗さ評価を行っている。

第 5 章では、粗切りされた歯車のピッチ誤差測定時のばらつきを抑え、下流工程に向けた精度管理を向上させるための方法について検討している。歯車を粗切りする場合、HOB を用いた創成歯切りを行うことが多い。このとき、歯車歯面には歯すじ方向に旋条痕が残る。そのため、通常の歯面 1 点のみでピッチ測定を行った場合、スタイラスの接触位置によってピッチ誤差の結果が変化し、測定データにばらつきが生じる。こうしたスタイラスの接触位置によって発生するデータのばらつきを抑えるため、歯すじ誤差を評価するために測定されたデータを利用する方法を提案している。具体的には測定された歯すじ曲線にガウシアンフィルタによるローパスフィルタリングを行い、歯すじデータに含まれる粗さ成分を除去した後にピッチ誤差を計算する方法について述べている。

最終章となる第 6 章に本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題と展望について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

ハイブリッド車や電気自動車の普及が進み、従来の主たる騒音源であったエンジンからの振動・音が低減されるに連れ、動力伝達機構であるトランスミッションに低騒音化が要求されている。トランスミッションノイズの低減や動力伝達効率の向上には、その起振源である歯車の歯面精度の向上が必要となる。その結果、ホブ切りによる歯車の粗加工の後に行われていたシェービングによる仕上げ加工が、量産型歯研による仕上げ加工やポリッシュ研磨などの超仕上げ加工に変わりつつある。

量産型歯研による仕上げ工程を組み込んだ歯車の生産効率を上げるためには、その前段階である歯車の粗切り加工における精度管理が重要になる。また、超仕上げが行われた歯面の精度管理には通常の歯車形状評価だけでなく歯面粗さの精度管理も行われる。しかし、計測それ自体は生産に直接的に寄与するものではなく、精度管理のための時間が増加すれば生産のリードタイムを延長することになり、歯車自体のコストアップの要因の一つにもなる。ところが、生産効率を向上させるために加工法の見直しや改善についての議論は活発に行われるのに対して、歯車測定及び精度管理の手法についての見直しや改善についてはあまり議論の対象とされてこなかった。

このような状況を踏まえ、本論文では、現状の歯車測定機を用いて行う測定結果を考察し、歯車の生産効率向上に寄与する新たな評価方法、及び、検査手法の提案を行っている。具体的には、通常、歯面の粗さを評価する際には粗さ測定器が利用されるが、歯車の形状を測定する歯車測定

機で計測したデータから疑似的に粗さを評価することで、単一の測定機で歯車形状から歯面粗さまでの測定を行う手法を確立している。初めに、粗さ測定器と歯車測定機で使用される接触式のプローブ（スタイラス）の形状が大きく異なっているが、その影響について数値計算を介して調査している。その結果、誤差が含まれるが、歯車形状測定用のプローブを用いて歯面の粗さ情報を取得できることを明らかにしている。また、実際に粗さ標準試験片及び仕上げ加工の異なる歯車（ホブ切り品、歯研仕上げ品、スーパーフィニッシュ仕上げ品）を歯車測定機で測定し、異なる仕上げ加工による表面性状の違いがどのように計測されるかについて評価している。その結果、ホブ切りされた歯車と歯研仕上げの歯車の評価には歯車測定機で計測したデータを利用できるが、スーパーフィニッシュされた歯車の歯面評価には適切でないことを報告している。また、超微細ピッチを有する歯車の形状測定用に開発した新型のプローブを用いて、歯面の表面性状評価も行っており、通常のプローブで得られる結果と同様の結果であることを報告している。

本論文ではさらに、歯車の歯すじ方向のデータを利用してピッチ誤差を評価することで精度管理時に発生するばらつきを抑える方法の確立を試みている。ホブ切り歯車のピッチ誤差測定では繰り返し精度が低いという問題があった。そこで、全歯について行った歯すじ形状の測定結果に対してガウシアンフィルタを用いた信号処理を施し、短波長成分（疑似粗さに相当）と長波長成分（疑似うねりに相当）に分離し、長波長成分の歯幅中央付近のデータから単一ピッチ誤差を評価する方法を提案している。この提案した方法で実際の歯車測定結果から求めた単一ピッチ誤差と JIS に基づいたピッチ測定結果から求めた単一ピッチ誤差とを比較した結果、繰り返し測定のバラツキが 62.6% 減少したことを報告している。

本論文で提案した内容は、歯車測定機の新たな可能性を示すもので歯車技術の発展に寄与すると見込まれる内容であり、博士の学位を授与するに値する内容となっている。以下に学位論文の内容に関連している 3 編の公表論文を示す。

#### 公表論文

1. Measurement of tooth flanks with a gear measuring instrument and evaluation of its surface texture (Effect of different probe profiles on measurement results)  
Myungsoo KIM, Daisuke IBA, Tomohiro TATSUMI, Junichi HONGU and Ichiro MORIWAKI  
Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing Vol.11, No.6, 2017, 17-00361
2. Development of a Contact-type Probe for Measurements of Ultra-Fine-Pitch Gears and Application to Pseudo Roughness Evaluation  
Myongsoo Kim, Daisuke Iba, Tomohiro Tatsumi, Junichi Hongu and Ichiro Moriwaki  
Journal of Mechanical Science and Technology 31(12)(2017),pp.5609-5616,  
DOI 10.1007/s12206-017-1101-5
3. ホブ切り歯車の単一ピッチ誤差測定の新たな手法  
(ガウシアンフィルタを通した歯すじ形状測定結果の適用)  
金 明洙, 射場 大輔, 巽 友洋, 本宮 潤一, 中村 守正, 森脇 一郎  
日本機械学会論文集, Vol. 82, No.839,2016, 16-00128