

博士学位論文審査要旨

2022年12月24日

論文題目：5軸制御工作機械で創成される小型高強度リブ付きスパイラルベベルギヤの研究開発

学位申請者：齊藤 雅博

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 准教授 中村 守正

要旨：

自動車業界はCASEに代表される大変革期となりつつあり、軽量化、電動化に対するニーズが高まり、その中で動力伝達系の技術革新が求められてきている。重要な伝達系の機械要素として歯車があるが、その生産は主に専用機に依存しており、その制約により小型軽量化が進展していないのが現状である。そこで本論文では、汎用的な5軸制御工作機械を用いた新しい歯車生産技術に基づく、新たな小型軽量スパイラルベベルギヤの設計法の指針を構築したものである。

本論文は全7章で構成され、第1章において本研究の背景および目的とその意義について述べている。第2章では5軸制御工作機械を用いることで創成可能なリブ付きスパイラルベベルギヤの提案をして、その有効性を1DCAEの手法を用いて明らかにしている。第3章では提案するギヤの歯すじ凹凸面が設計強度におよぼす影響を検討している。第4章では各部の応力に着目してリブ形状の最適化を遂行して、高強度化の可能性を明確にしている。第5章では歯のたわみと各部の応力に着目した多目的最適化を遂行し、さらに提案ギヤを試作してその効果を実証している。第6章では試作したギヤを実駆動することで、提案するリブの効果を実証している。第7章では得られた結果とその要点および結論を総括し、今後の展望について述べている。これらの成果は、日本の自動車業界の次世代の技術に向けた新たな指針を示すものである。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2022年12月24日

論文題目：5軸制御工作機械で創成される小型高強度リブ付きスパイラルベベルギヤの研究開発

学位申請者：齊藤 雅博

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 准教授 中村 守正

要 旨：

本論文の提出者は、2020年4月に本学大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集, Vol.85, No.873, pp.18-00472 および Vo.88, No.915 号 pp. 22-00195, 設計工学, Vol.57, No.9, pp. 465-480, Proc. of ICPE2020, 2021LEM21 および MMIE2022, に掲載され、既に十分な評価を受けている。

2022年12月24日15時30分より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員より、論文に関する諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、語学に関しては英語の語学試験に合格しており、さらに多数の国際会議発表の実績も有することから、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力および語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 5軸制御工作機械で創成される小型高強度リブ付きスパイラルベベルギヤの研究開発

氏名： 齊藤 雅博

要旨：

本研究は5軸制御マシニングセンタの形状自由度の高い加工法を用いて具現化した歯幅端部にリブを付加した新しい小型高強度スパイラルベベルギヤについて提案し、その実現にむけて1DCAEの考えを基にした簡易FEMモデルを活用したリブ形状の設計手法の検討から始め、実際に試作を行い、その試作品にて負荷時の応力測定することでリブの効果の検討を遂行した。

第1章では研究背景として、世間でカーボンニュートラルの必要性が高まる中で歯車ではエネルギーロス削減に向けた小型化の必要性について述べた。その中でスパイラルベベルギヤの特徴を述べ、小型化の課題となる強度確保に向けて、スパイラルベベルギヤが負荷増大による歯あたりの歯幅端部方向への移動により破損するため、ピニオンの歯端部にリブをつけることで歯元を補強し歯元曲げ強度を高める手法を提案した。一方でその製造手法として、スパイラルベベルギヤは一般的に専用加工機にて製造されるが、歯幅端部にリブをつけることで専用加工機での製造が不可能となるため、5軸制御マシニングセンタとボールエンドミルを用いることを提案した。

第2章ではスパイラルベベルギヤ対のピニオンにリブをつけることの基本的な考え方を示し、実際に試作することで製造性について述べた。その上でリブ付き歯車の設計手法の検討に向けて1DCAEの考えを基にした簡易的な平板形状のFEMモデルにて解析を遂行した。その中で複数のリブ形状を用意し、リブ形状の変化による影響についても検討した。その結果、一般的なリブ無し歯車の場合は歯幅端部付近への負荷が破壊の主要因となるが、有効歯幅と呼ぶ荷重伝達する部分の歯幅を全歯幅に対してある程度減らすことで歯元破壊の主要因となる歯元応力を低減できることを示した。一方で、提案するリブ付き歯車では歯幅端部にリブを付与することで有効歯幅端部付近への負荷時に発生する歯元応力を低減でき、歯幅方向のリブ厚が十分に厚くなれば、歯幅中央部への負荷が破壊の主要因になることがわかった。加えて最適リブ厚を検討する際、歯幅方向に分布させた点に負荷した時に生じる最大歯元応力を把握し、等応力設計に基づきそれらの応力が等しくなるようにリブ厚を設定することが重要であり、その探索方法の指針として1DCAEに基づいたFEMモデルにて解析を用いることができることを示した。リブ形状の変化による影響については、有効歯幅端部付近への負荷で発生する歯元応力において、リブ形状差による応力低減量の絶対値の違いがあるものの、どの形状でも類似の応力低減傾向がみられることがわかった。加えてリブ付き歯車の設計において、実際の設計では浸炭焼入れに代表される熱処理などによる製造上の制約条件があるため、最大歯元応力が最も低くなるリブ厚を選択できない場合もある点についても注意が必要であることを示した。

第3章では、スパイラルベベルギヤが歯すじに曲率を持つ曲がり歯を有することに着目し、歯すじに曲率をもつ歯車においてリブが与える影響について着目し、この検討に向けて、曲面板の1DCAEモデルの解析を遂行しリブが曲がり歯の歯元曲げ応力に与える影響を考察してその最適化設計の指針を検討した。この結果、まず一般的なリブ無し歯車で平歯と曲がり歯での歯元応力を比べると、歯幅中央付近への負荷で発生する歯元応力はほぼ変わらないが、歯幅端部付近への負荷における歯元応力は曲がり歯のほうが大きいことがわかった。加えて平歯でも曲がり歯でも、歯全体を荷重分担面として使用するよりも歯幅端部の一部を非荷重分担面としたほうが歯元応

力を低減できることがわかった。一方で曲がり歯の歯端部にリブをつけても平歯と同様に歯幅端部付近への負荷で発生する歯元応力の低減効果があることが確認できた。しかしながら、リブ付き歯車は歯端部付近の負荷での歯元応力を低減できるものの、一定以上のリブ厚では歯幅中央付近への負荷が破損に対して支配的になることでリブを付ける利点は少なくなり、加えてリブ接続部で引張・圧縮の繰り返し応力がかかり、それらが歯元応力よりも大きい場合があるためにリブ接続部での破損にも注意して設計する必要があることがわかった。

第4章では第3章で示したリブ接続部での破損にも注意することの必要性について検討した。ここで第2章において検討したリブ形状の一つである三角形リブは十分な応力低減効果が判明していることと、三角形リブは歯面とリブ上部の接続部において鈍角で接続するためリブ接続部に応力集中しにくくなるとの推定から、三角形リブを歯幅端部に設置することを前提にした。歯元およびリブ周辺の応力分布の解明に基づくリブサイズの決定を目指したリブ形状の検討に向けて、1DCAEでの考えを基にした簡易形状での解析を考慮しラック形状のFEMモデルを用いた。その結果、三角形リブを歯幅端部に設置することにより、歯元に加えてリブ下部と歯底の接続部、リブ上部と歯面の接続部付近の3ヶ所に応力が集中するため、それら3ヶ所で生じる応力を考慮してリブ形状を検討する必要があることがわかった。リブ形状の検討指針として、三角形リブの歯丈方向のリブ高さを大きくすると歯元応力は低減できるが、切り欠き効果によりリブ下部に集中する応力が大きくなるため、三角形リブの形状はこれらのトレードオフ関係を十分に考慮する必要があることがわかった。加えてかみ合い進行方向のリブ幅は大きいほうが歯元とリブ下部に集中する応力を低減できることがわかった。さらにリブ上部ではリブより上の歯の剛性とリブがついた部分の歯の剛性の変化点となることで応力集中しやすく、リブ剛性とリブ接続部の切り欠き効果の関係によりリブ上部での応力はリブ高さの変化に対し極小値があることがわかった。それらを踏まえて三角形リブの最適形状を考えたときに歯元、リブ上部、リブ下部の3ヶ所における応力を検討し、それらのトレードオフ関係を考慮してリブ形状を決定する必要があることを示した。

第5章では、スパイラルベベルギヤ対は負荷により歯すじ方向に実歯当たりが移動し高荷重回転時に歯幅方向の端部への抜けが発生することで強度低下が生じることを考慮し、発生応力と歯先たわみの両面においてリブが与える影響について検討した。この検討において第4章での解析モデルと同様に、三角形リブを歯幅端部に付加することを前提に1DCAEの考え方を基にしたラック形状のFEMモデルを用いた解析を遂行した。加えて、前章までは解析結果と実機の比較に至っていないため、三角形リブを付与したリブ付きピニオンを試作し静的な集中荷重をかけて応力集中しやすい歯元、リブ上部、リブ下部の3ヶ所に張り付けた歪ゲージにて応力測定を行い、その実機測定結果と解析結果を対比することでリブの効果について検討を遂行した。解析結果として、歯幅端部の歯先に荷重点がある場合に発生する最大応力と歯先たわみは歯幅中央の歯先に荷重点がある場合の歯元応力や歯のたわみと同等以下までは減らせないまでも、リブによる歯元応力低減効果や歯のたわみの低減効果があることがわかった。実機による応力測定結果においては、簡易モデルを用いたFEM解析結果は歯部では定量的な精度を確保されているが、リブ部で生じる応力に対しては定性的な精度であり定量的な評価にはより詳細な設計情報が必要であることがわかった。加えてこれらの知見を考慮しておけば、詳細な3Dモデルなどが無い歯車諸元検討を行う設計初期段階で強度検討に影響するリブ付き歯車の重要パラメータとなるリブ形状を検討する際には、簡易モデルを用いたFEM解析はリブ形状を見通しよく設計するのに有効であることを示した。

第6章では、第5章の実機での応力測定がリブ付き歯車に静的に集中荷重をかけるのみであり、リブ付きピニオンとギヤをかみ合わせた状態の歯車対として駆動させた場合のリブの効果を観察するまでには至っていなかったことに着目した。そこで第5章で扱ったリブ付きピニオンをギヤとかみ合わせて駆動させ、その時の歯元およびリブ周辺での発生応力を測定することでリブ付

きスパイラルベベルギヤ対の駆動状態におけるリブの影響について考察した。その結果、リブ付きスパイラルベベルギヤ対は 1DCAE に基づいた簡易モデルを用いた FEM 解析により三角形リブ形状を選定することで、駆動状態での実かみ合いにおいても外端部の歯元応力を低減できることがわかった。一方でリブ上部や下部の応力については外端側の有効歯幅端部の歯元の応力よりも小さく、リブ部周辺が破損起点にはならないことがわかった。加えて少歯数のピニオンは歯の基部の直径が小さいため、歯元応力は隣接歯や 180° 対向歯のかみ合いの影響を受け複雑に変化するが、リブ部の応力はそれらの影響が少ないこともわかった。さらに、負荷トルクが増大する場合に歯あたり内の負荷中心が歯幅中央に移動していることが示唆され、歯車対でかみ合わせた状態でもリブによる外端部の歯元の応力低減効果があることがわかった。

第7章では各章を総括したうえで、リブ付きスパイラルベベルギヤの残された課題について触れている。以上により本研究はリブ付きスパイラルベベルギヤについて、リブ形状の検討手段として 1DCAE の考え方に基づいた簡易 FEM モデルの利用の有用性を示し、実機にてリブによる歯元曲げに対する応力低減効果があることを確認した。その上でピニオンの歯端部にリブをつけることで補強するリブ付きスパイラルベベルギヤ対は歯車の小型化に貢献する技術であり、ひいてはエネルギーロス削減に貢献する技術であることを示した。