

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月17日現在

機関番号：15201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860032

研究課題名（和文）：加工精度と歯面修整を考慮した一對の平歯車の歯のかみあい剛性の理論解析及び実験検証

研究課題名（英文）：Theoretical and experimental studies on tooth mesh stiffness calculations of a pair of spur gears with machining errors and tooth modifications

研究代表者

李 樹庭 (RI JUTEI)

島根大学・総合理工学研究科・准教授

研究者番号：50609360

研究成果の概要（和文）：三次元有限要素法を用いて、加工誤差と歯面修整を持つ一對の平歯車の歯の接触解析及びかみあい剛性計算の数値方法を提案し、専用三次元有限要素法ソフトを開発した。開発したソフトを用いて、加工誤差と歯面修整を持つ一對の平歯車の歯のかみあい剛性を計算したとともに、歯面接触応力と歯元曲げ応力に及ぼす歯車の歯形誤差、ピッチ誤差、歯形・歯筋修整方法及びその修正量の影響も検討した。

研究成果の概要（英文）：Special software has been developed successfully to conduct loaded tooth contact analysis and tooth mesh stiffness calculations of a pair of spur gears with machining errors and tooth modifications using three-dimensional, finite element method. This software not only can be used to calculate the tooth mesh stiffness, but also can be used to analyze tooth contact stresses and root bending stresses when the pair of gears has tooth profile deviations, tooth pitch errors, tooth profile modification and lead modification.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素・伝達装置・歯車装置

1. 研究開始当初の背景

(1) 歯車装置は機械産業を支える重要な機械要素の一つであるため、様々な歯車装置は多くの機械装置（例えば、車、船、新幹線電車、航空機、風力発電装置及び産業ロボットなど）に使われている。歯車装置の性能改善

や寿命向上がこれらの機械装置の性能改善と長寿命化に直接に結び付いているので、歯車装置に関する基礎研究は多くの国に重要視されてきた。しかし近年、国内・外の経済状況の変化により、日本国内においては歯車装置に関する基礎研究を行う若い研究者が

激減し、新興国に比べると、日本国内では活発な研究が余り行われていないのが現状である。製造業は日本の伝統的な強み分野であり、日本の経済発展に大きく貢献してきた。しかし、近年新興国の台頭により日本の製造業は新興国の強くなってきた競争力に脅かされている。製造業の分野において21世紀にも日本が世界をリードしていけるようにするために、機械を構成するもっとも重要な機械要素の一つである歯車に関する基礎研究を行わなければならないし、歯車装置の未解決問題を解決し、特に企業で解決できない技術難題に挑戦する必要がある。新しい技術の創出により日本の伝統的な強みを守り、日本経済の更なる発展に貢献しなければならない。

(2) 歯車装置に関する研究は古くから行われてきたにも関わらず、この装置について、多くの未解決問題は今でも残っていて、特に歯車の加工精度、組立精度及び歯面修整と歯車の強度及び振動・騒音の関係について、これらの問題はまだ完全に解明されていないのが現状である。設計・製造現場の立場から見ると、まず加工精度と歯面修整を持つ一對の歯車の歯のかみあい剛性の理論計算方法を確立する必要がある。

(3) 歯車性能・強度と加工精度、組立誤差及び歯面修整の関係について、この問題は古くから研究されてきたが、近年、機械装置の高性能化に伴い、歯車装置に対する低振動・低騒音要求は厳しくなりつつあるので、この問題に対する対応もかなり厳しくなっている。設計・製造現場において、歯車の振動・騒音問題を対策するために加工精度の向上や歯面修整といった手法が用いられているが、歯車の振動・騒音と加工精度及び歯面修整の関係がまだ完全に分かっていない中、この取り組みはうまくいく保障がない。加工精度の向上や歯面修整により振動・騒音レベルの低減ができない場合には、トラクションドライブやDDモータを使って歯車装置を置き換えようとする技術者も少なくない。しかしトラクションドライブは大トルクが伝達できない欠点があり、DDモータもコストパフォーマンスが悪いので、量産時の製品信頼性とコストパフォーマンスを考えると、やはり歯車装置は最適なものであるという再認識が生まれるので、近年、歯車装置の高性能化に対する期待感がますます高まっている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、一對の平歯車の歯のかみあい剛性と歯車の加工精度及び歯面修整の関係を理論と実験の両面で研究し、この関係を解明していくとともに、加工誤差と歯面修

整を持つ一對の平歯車の歯のかみあい剛性を理論上で解析できることを目的とする。

(2) 歯車装置の性能と加工精度・歯面修整の関係を解明し、これにより、コスト・コストパフォーマンスがよく、より優れた歯車装置を設計できることを目指している。

(3) 本研究の成果を航空機用薄肉歯車装置の設計と製造に応用し、高信頼性・高付加価値のある航空機用薄肉歯車を設計できるようにすることも目的の一つである。

(4) 加工誤差や歯面修整を持つ歯車装置の接触問題を研究し、得られた成果を加工誤差のある任意二つの機械部品の接触問題に応用できるので、トライボロジー分野においても寄与することになる。

3. 研究の方法

(1) 理論と実験の両面から歯車の歯のかみあい剛性と加工精度・歯面修整の関係を研究し、加工誤差・歯面修整を持つ一對の平歯車の歯のかみあい剛性を正確に解析できる方法を構築した。

(2) 一對の平歯車の歯のかみあい剛性に及ぼす歯車の加工誤差及び歯面修整の影響を理論上で検討できるようにするために、長年の研究で開発してきた一對の加工誤差と歯面修整のない歯車(理想歯車と呼ぶ)の歯の接触解析理論と三次元有限要素法をベースにし、加工精度と歯面修整を持つ一對の平歯車に対して、歯の接触解析が行える方法を提案したとともに、専用有限要素法解析ソフトを開発した。そして歯車の加工誤差を歯面の三次元的な歯形状誤差とピッチ誤差に分けて、また歯面修整を歯形修整(歯先・歯元の円弧と直線修整)と歯筋修整(歯筋クランニングと歯筋レーリビング)に分けて、開発したソフトを用いて、これらの加工誤差と歯面修整を持つ一對の平歯車の歯のかみあい剛性をそれぞれ解析した。解析結果により、歯車の歯のかみあい剛性、歯面荷重の分担率及び歯車の伝達誤差などに及ぼす歯車の加工精度と歯面修整の影響を理論上で検討した。また加工誤差と歯面修整を持つ一對の平歯車の歯面接触応力及び歯元曲げ応力の計算もできるようにソフトを開発した。本ソフトは普通のパソコン上で実行できるので、歯車装置の設計者にとって非常に便利な解析ツールになる。

(3) 実験研究について、加工精度と歯面修整を持つ一對の歯車の歯のかみあい剛性を測定できる実験装置を考案し、三種類のテストピース(一對の研磨平歯車、一對のホブグリ歯車と一對の歯筋クランニング修整歯車)

を試作した。それぞれの歯車対を用いて、有負荷と無負荷の場合において、歯車の入・出力軸の回転角度を高精度ロータリエンコーダで測定し、それぞれの場合の歯車の歯のかみあい剛性を算出する。実験データにより、歯のかみあい剛性に及ぼす歯車の加工誤差や歯筋修整の影響を検討する。

(4) 歯車の歯のかみあい剛性の測定実験により、解析手法及び解析結果の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 図1は加工誤差と歯面修整を持つ一對の平歯車の歯の接触解析用有限要素法モデルである。図2はホブ切り歯車の三次元歯面形状の測定データである。図2に示すような一對の平歯車の三次元歯面形状の測定データを開発した有限要素法ソフトに代入し、この対の歯車の接触解析を行うと、図3に示すようにピッチ点付近でかみ合う時の歯車の歯面接触応力分布の等高線図が得られる。図3において、横軸は歯車の歯筋方向の寸法であり、縦軸は歯形に沿う歯面にある接触領域の幅である。以下の等高線図の場合では、横軸と縦軸は図3と同じ意味である。図4は理想歯車の歯面接触応力分布の等高線図である。図3を図4と比べると、歯車の歯面加工誤差は歯面接触応力分布に大きな影響を及ぼしていることが分かる。図3に示すような加工誤差を持つ一對の平歯車の歯面接触応力の詳細な分布図が得られたのはまだ初めてのことである。

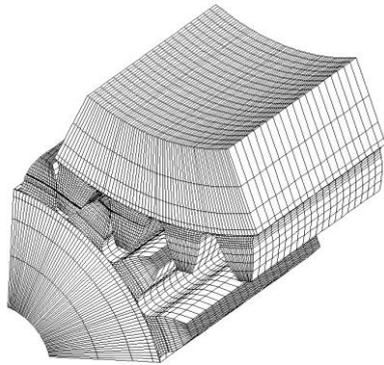


図1 一對の平歯車の接触解析用 FEM モデル

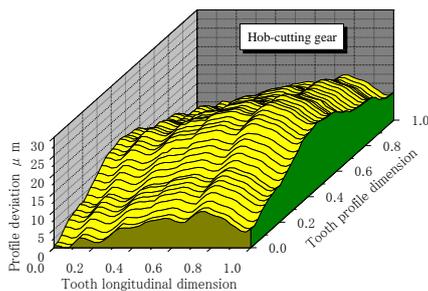


図2 ホブ切り歯車の歯面加工誤差

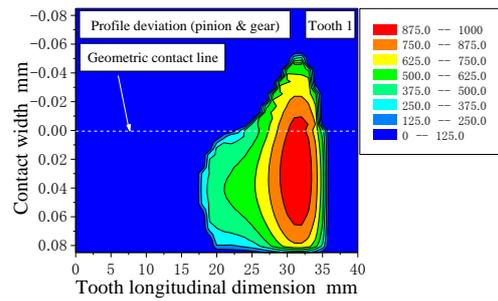


図3 ホブ切り歯車の歯面接触応力分布図

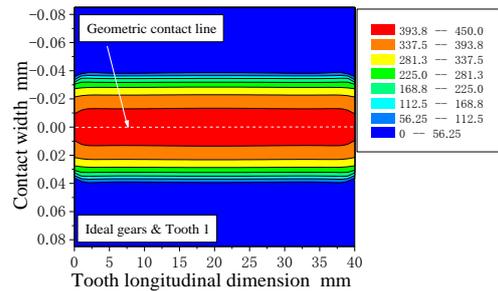
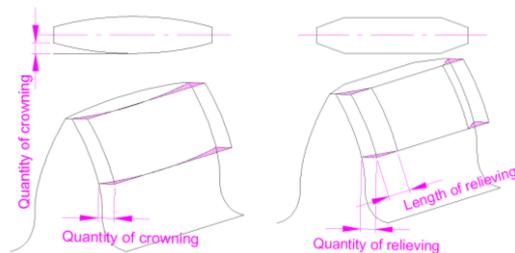


図4 理想歯車の歯面接触応力分布図

(2) 図5は歯車の歯筋クランニング及びレーリビング修整の様子を表すものである。本研究で開発したソフトを用いて歯筋クランニング及びレーリビング修整のある歯車の接触解析を行うと、図6と7に示すようにピッチ点付近でかみ合う時の歯車の歯面接触応力分布の等高線図が得られる。図6は歯筋クランニング修整された歯車の歯面接触応力分布であり、図7は歯筋レーリビング修整された歯車の歯面接触応力分布である。図6と7をそれぞれ図4と比べると、歯車の歯筋修整は歯面接触応力分布に大きな影響を与えていることが分かる。また図7において、レーリビング直線と歯面の歯筋直線との交点部において、エッジロードが発生していることが分かる。図6と7に示す結果も初めてのことである。



(a) クランニング (b) レーリビング
図5 歯車の歯筋修整法

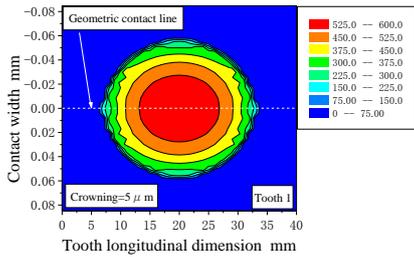


図6 クランニング歯車の歯面接触応力

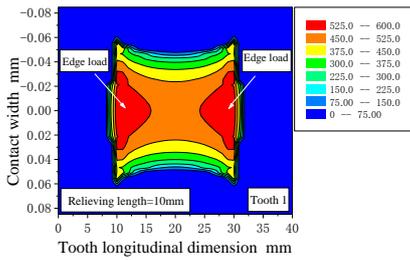


図7 レーリビング歯車の歯面接触応力

(3) 図8は平歯車の歯形円弧修整の様子を表すものである。本研究で開発したソフトを用いて、歯形円弧修整を持つ一对の平歯車の歯の接触解析を行うと、図9に示すような歯面接触応力分布の等高線図が得られる。図9を図3と比べると、歯形円弧修整された歯車の最大歯面接触応力は400MPaから500MPaに増加しているし、最大歯面接触応力の位置も歯車の幾何学的な噛みあい線位置から約0.02mm離れていることが分かる。図9に示すような結果も初めてのことである。

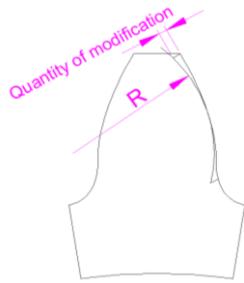


図8 歯形円弧修整法

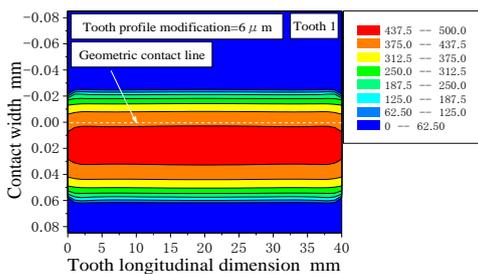


図9 歯形円弧修整歯車の歯面接触応力

(4) 図10は加工誤差を考慮した場合の一对の平歯車の歯のかみあい剛性曲線である。また図11は歯形円弧修整のある一对の平歯車の歯のかみあい剛性曲線である。図10と11において、横軸は歯のかみ合い始めから噛み合い終わりまでの位置を示すものである。この位置の表現に歯車の噛み合い率を用いた。縦軸は歯のかみあい剛性の値である。図10と11より、加工誤差及び歯形修整は歯車の歯のかみあい剛性に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

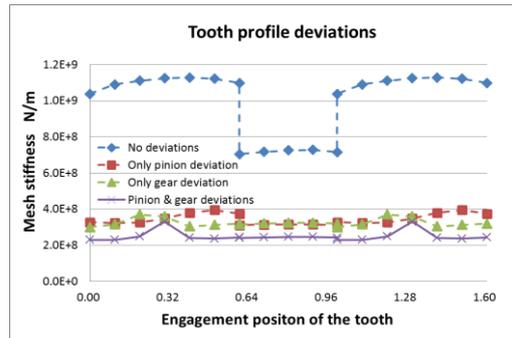


図10 加工誤差を持つ歯車の剛性曲線

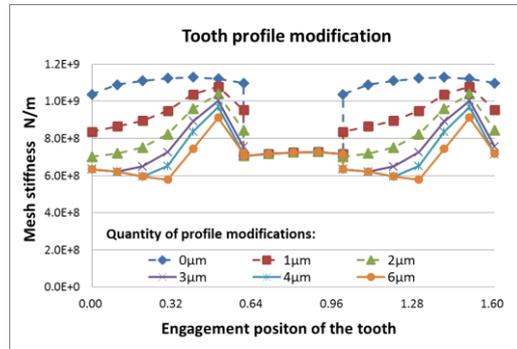


図11 歯形修整のある歯車の剛性曲線

(5) 解析結果の妥当性について、解決結果を理論上で間接的な検証を行ったが、実験検証については、研究費の不足により、歯車の回転変形測定に必要な中空・高精度(1μmの歯のたわみを測定できる)ロータリエンコーダの入手ができなかったため、実験検証に至らなかった。今後、研究費を獲得できた場合には、検証実験を行っていく予定である。

(6) 本研究を通して、一对の平歯車の歯面接触応力、歯元曲げ応力及び歯のかみあい剛性に及ぼす歯車加工誤差と歯面(歯形・歯筋)修整の影響を理論上で詳しく検討できた。本研究で得られた成果を用いれば、今までの計算方法より更に高い精度な歯車強度解析が

できるようになるとともに、加工誤差と歯面修整のなる歯車の歯のかみあい剛性も解析できるようになる。更に本研究で求めた歯車の歯のかみあい剛性を使えば、歯車の振動・騒音に及ぼす加工精度と歯面修整の影響も理論上で検討しやすくなるので、歯車の振動・騒音と加工精度・歯面修整の関係を完全に解明するまで一步近づくことができたと認識している。今後の研究について、研究成果を纏めて、雑誌に投稿していくとともに、加工誤差と歯面修整を持つ歯車の振動・騒音問題を研究していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

- ① 李 樹庭, 平歯車の歯のかみあい剛性に及ぼす歯車加工精度及び歯面修整の影響, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 09 月 10 日, 金沢大学 (金沢市) 角間キャンパス

[その他]

ホームページ等

<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~shutingli/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

李 樹庭 (RI JUTEI)

島根大学・総合理工学研究科・准教授

研究者番号: 50609360

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: