

氏名	ながた えいり <b>永田 英理</b>
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第677号
学位授与の日付	平成25年9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>はすば歯車の転造成形に関する研究</b>
審査委員	(主査)教授 森脇一郎 教授 秋山雅義 教授 太田 稔 准教授 射場大輔

## 論文内容の要旨

本研究は、自動車用の高効率電動アクチュエータに用いる大ねじれ角を有するはすば歯車を、冷間で成形転造により精度よく製造することを目的とする。成形転造は、既にねじやスプライン、小型ウォームに応用されている。しかし、研究対象の歯数2、ねじれ角 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ のはすば歯車や、歯数34、ねじれ角 $35^{\circ}$ のはすば歯車を高精度に成形転造することはできなかった。本研究では、これらの歯車を成形転造するに当たり、課題となる成形誤差や転造中に素材が軸方向に移動してしまう「歩み」について、発生メカニズムを幾何学的に考察することで解決した。本論文は、緒論、本論6章、および結論から構成されている。

緒論では、自動車に用いられる電動アクチュエータのトレンド、研究対象の歯車を用いた電動アクチュエータの特長とねらいについて述べている。また、搭載される電動アクチュエータから、歯車に要求される品質特性をまとめている。さらにこの歯車の加工法選定の考え方と課題を整理した。

第2章から第5章では、歯数2でねじれ角 $30^{\circ}$ から $60^{\circ}$ のはすば歯車の成形転造について考察している。相手歯車として、樹脂の成形はすば歯車を想定している。

第2章では、加工法の違いによって発生した歯面粗さが歯車の伝達効率や歯面摩耗等の性能へ及ぼす影響について考察した。ホブ切りおよび成形転造した歯数2、ねじれ角 $60^{\circ}$ のはすば歯車を、樹脂製の相手はすば歯車と組み合わせ運転した。その結果、成形転造した歯車を用いた歯車対は、成形誤差が大きいにもかかわらず、ホブ切り歯車と比較して伝達効率が向上し、歯面摩耗が小さいことがわかった。以上より、この歯車の製造には成形転造が適していることがわかった。さらに、使用を想定したアクチュエータに必要な諸元の歯車を成形転造し、その成形精度と課題について整理した。ねじれ角が小さく、モジュールが大きいほど、「歯すじのうねり」とよばれる誤差の低減が必要であることがわかった。

第3章では第2章で課題として提起された歯すじのうねりについて、その発生メカニズムの解明とそれを解決する新たな転造方法について、シミュレーションと実験により検討した。その結果、ダイスと素材歯車との同時かみあい歯数の変動が周期的に成形荷重を変動させ、成形誤差を引き起こすことが明らかになった。さらにこの誤差を低減するためには、重なりかみあい率が整数となるようにダイスの歯幅を設計するのが有効であることを示した。しか

し、歯すじのうねりは低減されたものの、完全に無くすることはできなかった。

第4章ではさらに成形誤差を低減するために、ダイスの押し込み運動と成形誤差との関係についてシミュレーションと実験により幾何学的に考察した。その結果、ダイスの押し込み運動により、歯すじのうねりや歯形勾配誤差が発生し、それらは押し込みとともに増大することが明らかになった。この成形誤差は、ダイスと素材の回転位相を変えることにより、大幅に低減できることを示した。

第5章では、転造中に素材が軸方向に移動する「歩み」と呼ばれる現象の発生メカニズムを解明し、それを低減するためのダイスの設計法を提案した。歩みは、転造された歯幅の両端に不完全成形部を成形するため、アクチュエータの小型化のために解決すべき重要課題であった。まず、素材の回転運動は、二つの異なる運動モデルより導かれると仮定した。ダイスの歯先円筒と素材の歯底円筒による摩擦車対の回転モデルと、ダイスと素材をはずば歯車対とした回転モデルである。もし素材に初期歯溝が成形された時、これらのモデルから計算される回転速度に差があると、素材が差動並進運動し、ねじの進みや戻りのような運動になる現象を「歩み」と考えた。また、実験によりこの概念の妥当性を確認した。これをもとに、歩みを最小にするダイスの設計法を提案した。第2章から第5章の研究の成果により、電動アクチュエータに用いる小歯車を高精度で成形転造することができた。

第6章、第7章では、将来求められる高容量の高効率型電動アクチュエータに用いる歯数34のはずば歯車（前章までに扱った歯車の相手歯車）の成形転造と熱処理を試みた。

第6章では、この歯車の成形転造による成形可能性を検討した。その結果、この歯車の実用化には歯形精度の向上や不完全成形部の低減等が必要なことを確認した。

第7章では、第6章で成形転造したはずば歯車と、ホブ切りしたはずば歯車それぞれに、同じ熱処理（浸炭焼入れ・焼き戻し）を施し、熱処理による力学特性の変化について検証した。その結果、異なる加工法で製作しても、熱処理後の歪みや金属組織、硬度および残留応力には差異がないことを確認した。

結論では、本研究の成果と今後の課題についてまとめた。

本研究で解明した、成形転造のメカニズム、誤差等の解決法は、特殊な歯車に限定されず、ねじやウォーム等の成形転造にも広く応用が可能である。

## 論文審査の結果の要旨

本研究は、自動車用の電動アクチュエータの省エネルギー化に貢献できるはずば歯車を、世界で初めて冷間成形転造法で製造することを目的としている。従来、成形転造により製造された製品精度は、経験に基づいてトライアンドエラーで解決されることが多かった。本研究では未だ明らかになっていなかった成形転造のメカニズムを解明し、適切な成形条件を理論に基づき決定することも目指している。

成形転造は、主にねじやスプライン、小型ウォームには既に応用されている。しかしこれらの知見に基づいて本研究で対象とする歯数2でねじれ角が $30^{\circ}$ ～ $60^{\circ}$ のはずば歯車を成形することはできなかった。本研究では、これらの歯車を成形転造するに当たり、課題となる成形誤差や転造中に素材が軸方向に移動してしまう「歩み」の発生メカニズムを、ダイスと素材をはずば歯車対とみなし、独自の運動モデルと応用数学を用いたシミュレーション、実

験による幾何学的考察により解明した。またその解決法についても提案している。

本研究で開発した手法を用いて成形転造された歯車はすでに市販されており、このことは提案した理論の信頼性および問題解決に関する手法の妥当性を証明するものと考えられる。

本研究で解明した成形誤差や歩みの発生するメカニズム、およびそれを低減できるダイスの設計法は、本研究で取り扱った特殊な諸元の歯車に限定されず、リードを持つねじやウォームの成形転造にも広く応用が可能であり、それらの機械要素の精度向上や成形領域の拡大に貢献するものと考えられる。

本論文の内容は、以下に示す 6 編の学術論文として公表されており、そのうち 5 編は申請者が筆頭著者である。

- (1) 永田英理, 飯沼和久, 中村守正, 森脇一郎, 小歯数・大ねじれ角を有するはすば歯車の転造成形 (成形可能性の検討), 日本塑性加工学会誌「塑性と加工」, 第 53 巻, 616 号, 439 頁~444 頁 (2012)
- (2) 永田英理, 立川友和, 中村守正, 森脇一郎, 小歯数・大ねじれ角を有するはすば歯車の転造成形 (歯すじ誤差の低減), 日本機械学会論文集 C 編, 第 77 巻, 783 号, 4263 頁~4273 頁 (2011)
- (3) 永田英理, 立川友和, 中村守正, 森脇一郎, 小歯数・大ねじれ角を有するはすば歯車の転造成形 (押し込みによる成形誤差の幾何学的考察), 日本機械学会論文集 C 編, 投稿中
- (4) Tomokazu TACHIKAWA, Eiri NAGATA, Morimasa NAKAMURA and Ichiro MORIWAKI, Form Rolling of Helical Gears with Small Number of Teeth and Large Helix Angle (Geometrical Discussion on Form Deviation Caused by Die Penetration), Proceedings of International Conference on Gears 2013 VDI-Berichte, 投稿中
- (5) 永田英理, 中原好友, 中村守正, 森脇一郎, 小歯数・大ねじれ角を有するはすば歯車の転造成形 (歩みの低減), 日本機械学会論文集 C 編, 第 79 巻, 798 号 371 頁~381 頁 (2013)
- (6) Eiri Nagata, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, “Form Rolling of Helical Gears with Small Number of Teeth and Large Helix Angle Using Round Dies”, Proceedings of 1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging, 1 頁~8 頁 (2012)