

# 博士学位論文審査要旨

2018年12月22日

論文題目：差動遊星歯車機構の駆動特性の解明に関する研究

学位申請者：中川 正夫

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

労働人口の減少や高齢化が進む日本社会において、ヒトが主役となるものづくり技術や介護技術などのため、機械の電動化、協働ロボットやパワーアシスト機構などの分野で、差動機構のより高度かつ安全安心な技術が求められてきている。その中で、新たに遊星歯車機構を差動機構として用いる手法が着目されるが、その体系的な研究はなされていない。そこで本論文では、差動遊星歯車機構の回転伝達メカニズムの解明および振動騒音の低減の検討に取り組んでいる。さらに遊星歯車の運動の特性を瞬間中心で体系化して、新たな設計指針とその有効性を検討している。

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章では差動運動を含め自転と公転を有する遊星歯車の瞬間中心に着目する新たな手法を提案している。第3章では差動遊星歯車機構の駆動特性を検討するために必要な新たな試験装置の設計指針とその試作に基づく検討をしている。第4章では差動運動を有する遊星歯車機構に対し、エネルギーの流れに着目したモデル化の手法を提案し、差動機構の実用的な設計手法を提案している。第5章では機構内の遊星歯車の可視化と高速度カメラに用いた差動運動のモニタリングを遂行して過渡応答の特性を解明している。第6章では機構内に存在する複数の遊星歯車の精度のばらつきが駆動特性に与える影響を検討してそれらの品質管理の指針を示している。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、機械の電動化、協働ロボットやパワーアシスト機構などの分野で遊星歯車の差動機構としての新たな応用に対する指針を示すものであり、次世代の駆動系技術に資する新たな知見である。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

2018年12月22日

論文題目：差動遊星歯車機構の駆動特性の解明に関する研究

学位申請者：中川 正夫

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

本論文の提出者は、2016年4月に本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、JSME Mechanical Engineering Journal, Vol.1, Paper15-00338, pp.1-12, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.849, Paper16-00360, pp.1-15, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.866, Paper17-00504, pp.1-18, 精密工学会誌, Vol.83, No.6, pp.572-578, 精密工学会誌, Vol.84, No.1, pp.89-96, 精密工学会誌, Vol.84, No.8, pp.724-730, JSDE 設計工学, Vo.53, No.2, pp.161-176, に掲載され、既に十分な評価を受けている。

2018年12月22日午後1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、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： 差動遊星歯車機構の駆動特性の解明に関する研究  
氏名： 中川 正夫

## 要旨：

産業革命の後、人口および消費エネルギーの爆発的な増加によって有限な資源の枯渇が危惧されている。SDGs (Sustainable Development Goals) や縮小社会でも言及されている省エネルギー・省資源化の人類に課せられた宿命に立ち向かううえで、さらにコンマ数%レベルでの効率向上が求められている。高効率化のソリューションとして近年、超少子高齢化の進む先進国では生産年齢人口層の減少をとまなうイノベーション力低下の懸念からモノとヒトの協業が進められている。ものづくりに不可欠なエネルギーおよび情報に関して、人工知能やIoT (Internet of Things) などによる情報から労働力不足を補いつつ全体の消費エネルギーを抑制する動きがある。

そうした最新技術が注目を集める一方、動力伝達装置においても複数の動力源を用いてそれぞれの欠点を補完しつつ消費エネルギーを低減する差動装置が、ヒトと協業するロボットやパワーアシスト機構などで「人力」と「機械の動力」を合成する機構としてニーズが高まりつつある。今後、超少子高齢化の進行にとまなう、労働人口の減少を補完するための生産性の向上（新興国の人口爆発も同様）や、介護者の身体的な負荷の低減（かつ要介護者の安全確保とストレス軽減）を目的に、ヒトと機械の協業が不可欠になり、さらに差動機構の需要が見込まれる。ヒトと機械の距離が近づくことで、安全性の確保や電動化にとまなう振動騒音の要求レベルの向上など、動力伝達装置に求められる性能がさらに厳しくなる。このようなニーズの多様化にとまなう社会の欲求を満たすイノベーションをおこすために、差動装置においてもAAA (Affordable, Available, Appropriate) 技術のようにQCDS (Quality, Cost, Delivery, Safety) を十分に考慮する必要がある。

そこで本研究では、上記の背景を受けて差動機構としてニーズが高まりつつある遊星歯車機構（以降、差動遊星歯車機構：Differential planetary gear train, D-PGT）に関して、回転伝達メカニズムの解明および振動騒音の低減にむけた駆動特性の解明を目的として研究をおこなった。軽負荷な回転伝達系としてのD-PGTを扱い、座標系や記号の定義と試験機の開発、より簡便で正確なモデリング手法の提案、ハイスピードモニタリングによる過渡応答性の観察と計測、ばらつく歯面精度の振動騒音への影響の解析をおこなった。

第1章では、緒論として社会問題および人と道具の歴史から現代における動力伝達機構の役割、問題点と差動機構の新たなニーズについて概説した。さらに、動力伝達機構の中で最も重要な要素である（平行軸系に限定した）歯車についての研究をまとめることで、D-PGTの回転伝達系を扱う本研究の工学的および工業的な位置づけをおこない、研究の目的について述べた。

第2章では、差動を有さない従来のPGTの場合も含めD-PGTの駆動状態の一般化を試み、プラネットギヤの運動から評価指標としての瞬間中心とセントロイドに着目する手法を提案した。駆動状態の体系的な一般化のためには回転方向の正負を定義する必要があり、プラネットギヤの公転に対する自転の比である自公転角速度比を導入した。その結果、自転と公転の速度分布の重ねあわせからプラネットギヤの瞬間中心を導けることより、その瞬間中心が自公転角速度比の関数として導出されることをしめした。また、自転軸および公転軸まわりで生じる $\mu\text{rad}$ 単位の伝達誤差に起因して瞬間中心およびその軌跡が $\text{mm}$ 単位で変動することが明らかとなり、「光てこ」のように拡大する手法として画像解析から伝達誤差を算出できることがわかった。

第3章では、D-PGTを高精度で高応答に制御・駆動させるための駆動試験機の設計開発をお

こなつた。3 軸を制御するための設計や各要素間の慣性モーメントの比率に着目し、PLC (Programmable Logic Controller) を用いて再現性の高い駆動が可能な試験機に関して考察をおこなつた。FA (Factory Automation) 用の機器を用いることで、運動制御および動力の性能試験を遂行できる一般的なシステム構成が可能であることがわかり、リングギヤ、キャリアおよびサンギヤの3軸を駆動させる場合、それらの軸はリングギヤおよびキャリアを中空として最も慣性モーメントの小さいサンギヤを貫通させる必要があることが明らかとなつた。またラグランジ方程式を基に考察する手法も提案し、自公転角速度比によってこれらの等価慣性モーメントが変化することがわかつた。等価慣性モーメントが駆動状態に応じて変化するが、プラネットギヤの運動に着目することで見通しよくそれらを評価でき、中空キャリアと中空リングギヤの駆動試験機のプラネットギヤの公転運動を考慮していない幾何学的な慣性モーメントを比較すると、最大の慣性モーメントであるリングギヤの中を最小の慣性モーメントのサンギヤを通す構造が慣性モーメントのバランスも良く、駆動状態も過渡・定常ともに安定することがわかつた。

第4章では、第3章で設計した本研究で用いるD-PGTの周波数応答を明らかにするために、構成要素がエネルギーの伝達によって結合されるシステムで統一的に捉えることが可能なBond Graphを用いた簡便で実用的なモデリングを提案した。従来の多自由度の複雑かつ厳密な連成運動の連立方程式から得られた結果、試験機上のハンマリング試験から得られた結果、Bond Graphによって得られた結果を比較し、Bond Graphによるモデリングに関して考察をおこなつた。Bond Graphによるモデル化によってプラネットギヤ、リングギヤ、サンギヤの多自由度の連成の関係の視覚化でき、現場の設計技術者が動力システムの全体を理解するための有効な手段の一つとなることがわかつた。非線形性を有するプラネットギヤまわりのかみあい剛性を正確にモデリングしたことで、Bond Graphのモデルによる結果が実測による固有振動数、振動モードともに非常によく一致していた。従来の連成の運動方程式では十分な精度で解析ができなかつた高次回転モードなどに対しても、高い精度で見落としなく解析が可能であることがわかつた。

第5章では、第4章で得られた非線形性を有するプラネットギヤまわりのかみあい剛性のモデリングの重要性から、プラネットギヤまわりのかみあい剛性による弾性変形や加工誤差・組立誤差などによって生じるかみあい伝達誤差に着目した。アクリル樹脂製キャリアでD-PGT内部を可視化した新機構(U/2K-HV型)を開発、過渡応答時にプラネットギヤまわりのかみあい剛性の変動から生じる現象をハイスピードカメラによるモーションキャプチャーによってとらえた。D-PGTにおけるかみあいは係数励起型の非線形微分方程式であり、かつそれらの見かけの起振力がリングギヤとサンギヤで位相も含めて異なることなどから解析だけではその運動の解明が難しい。特に、起動時や反転では不感帯となるバックラッシの影響も加わることから、ハイスピードモニタリングによる実観察が必要であつた。自動的に座標を検出するにあたり、照明の光量やフレームレート、観測誤差などを詳細に検討する必要がある。検出された座標から瞬間中心を算出する際にも計算誤差も考慮する必要がある。プラネットギヤまわりの内歯かみあいと外歯かみあいのかみあい率や位相が異なることからプラネットギヤが断続的に運動し、その周期的な変動が動力伝達にも影響を及ぼしていることがセントロッドの変動周波数とトルクの周波数解析の比較によって明らかとなつた。プラネットギヤが反転するとき、かみあい歯面の反転も生じ、バックラッシなどの不感帯の影響を受けてプラネットギヤがフローティングで並進することが瞬間中心により確認され、過渡応答性をさらに向上させるためにはバックラッシの設定が重要であることも判明した。また幾何学的要因と等価剛性の観点から、自公転角速度比が正のとき応答性にオーバーシュートを生じやすく、制御特性の維持が難しい一方、自公転角速度比が負のとき、オーバーシュートをともなわない応答性をしめし、入出力軸間の変速比の増加と応答性の向上を両立しやすいこともわかつた。

第6章では、第4章や第5章で重要であつたプラネットギヤまわりのかみあい剛性に加え、加工誤差や組立誤差などの誤差成分のなかでも特にばらつく歯面精度を、誤差の伝播論に基づく検

討を遂行する一方、完全無響室内での駆動試験をすることで暗騒音の影響を最小限に抑えた音響測定も遂行し、D-PGT の駆動時に生じる振動騒音への影響を統計的に評価した。それらの結果より、リングギヤ、サンギヤ、プラネットギヤの全ての歯車の歯面精度と公差を管理し、歯面精度の組みあわせの観点から D-PGT の振動騒音の低減に関する考察をおこなった。かみあい周波数における音圧レベルを下げる場合、異なる精度の歯車の組みあわせは効果的でなく、高い精度の歯車を用いることで音圧レベルは下がる一方、低い精度の歯車を用いた場合でも同じ精度を保つことが望ましいことが明らかとなった。さらに、総音圧は試算・実験値ともに最大かみあい歯面誤差の標準偏差に比例していることから標準偏差に上限値を設けることが有効であることも判明した。また、キャリア固定の駆動状態が音圧レベル・合成加速度の両観点から最も有利であり、キャリアの回転数の上昇にもなって音圧レベル・合成加速度ともに増加するが、同精度のプラネットギヤを組みあわせて最大かみあい歯面誤差の標準偏差を抑制することで、特に合成加速度を抑制でき、振動特性の改善ができることがわかった。

第7章では、結論として D-PGT の駆動特性の解明を目的に本研究をとおして得られた知見をまとめ、今後の課題と展望について述べた。

以上、本研究の差動遊星歯車機構の駆動特性に関する成果は、その設計および品質管理に資する所が大であり、QCDS を考慮しつつ多様化する動力伝達機構へのニーズに対応し、システム全体の消費エネルギーの削減、人との協業性の向上の両立に大きく寄与し、省エネルギー・省資源化という人類に課せられた宿命において、社会の持続可能性に貢献できるものと期待される。