

博士學位論文審査要旨

2007年12月17日

論文題目： 差動遊星形無段変速機の伝達性能に関する研究

学位申請者： 岡村暉久夫

審査委員：

主査： 工学研究科 教授 松岡 敬

副査： 同志社大学 名誉教授 坂口 一彦

副査： 工学研究科 教授 藤井 透

要 旨：

従来の無段変速機(CVT)は、入力回転を停止させることなく出力の回転速度が連続的に変速できるということと自動制御できるという長所を活かして、産業機械の自動化推進に貢献してきた。一方、自動車用変速機は、初期の CVT が車両の走行特性の全域に渡って満足できることが要求され、動力伝達よりもむしろ広変速範囲の出力が重視されていた。しかし、摩擦伝動に対する未熟な技術の CVT や歯車伝動による変速機が市場を席巻するようになり、近年まで要求される連続変速機能と動力伝達の両方を満足する CVT が開発されなかった。

本論文は、従来の CVT の課題に鑑みてなされたもので、トラクションドライブの研究成果を適用して、新たに開発した差動遊星機構を有する CVT の最適化設計を試みるとともに伝達性能を総合的に評価し、自動車およびパワーアシストへの実用化の可能性を検討することを目的としている。特に、CVT の伝達性能に関して、接触面の解析では EHL 理論と幾何学的形状を分けて解析できる Tevaarwerk、Johnson の提案する弾塑性モデル、また、接触面の効率では Mägi の提案するスピンプールの概念をそれぞれ採用している。一方、CVT に関しては、入力軸の回転中に出力軸の停止が可能で、かつ、法線力とその反力の処理が容易な差動遊星機構を有する 2K-H 形と 3K 形を新規に提案し、実験によって解析の妥当性を検証している。

本論文は 7 章より構成されている。第 1 章の諸論では、従来の CVT に関わるトラクションドライブの研究および技術の経緯、目的および構成を明記している。

第 2 章では、弾塑性モデルを簡素化したスピンプラメータの概念を採用して伝達効率との関係を明らかにして、CVT の設計において最も重要度の高い法線力発生装置について検討している。ここでは二つの接触点のスピンプラメータの積として全スピンプラメータの概念を導入したところ、全スピンプラメータの増加とともに伝達効率が低下するという相関性が明らかにされ、法線力発生装置には調圧カムを採用した方が、CVT を空転させずに高効率 (80%) で運転できることを明らかにしている。

第 3 章では、個々に行われてきた従来の研究成果に基づいて設計に適した理論を選択し、これらを設計手順に従って解析して伝達効率を求めている。ここでは EHL 理論およびスピンプールの概念を採用して接触面の速度伝達効率とトルク伝達効率を算出し、これらの積として接触面効率を求め、これを効率の計算式に代入して CVT の伝達効率を求めている。さらに、試作機の実験によって解析精度を検証して、EHL 理論に基づく解析が CVT 装置に関して高精度に性能評価できることが考察されている。

第 4 章では、新たにすべりを伴う速比の計算式を提案して、すべり現象を解析するとともに速比=0 近傍におけるストール領域のすべりとトルクとの関係を明らかにしている。次いで、変速リングの移動量をメカニカルフィードバックしてトルク制御できる力平衡装置を設計・試作して、

CVT が重力バランスによるパワーアシストの分野に適用できることを言及している。

第5章では、3K 形 CVT を自動車用変速機に適用して、発進から加速、高速走行までの全走行範囲を単独の機構でまかなえる変速機のサイズ設計とともに車両用変速機として実車搭載できる可能性が検討されている。その結果、3K 形 CVT は同一性能をもつ AT に対して、同じサイズと重量に設計できる可能性が示唆されている。

第6章では、トルク制御と速度制御の両機能を組み合わせて車速を制御するために、カム機構と油圧シリンダを用いて駆動力の増加で減速し、アクセルの踏み込みで増速するトルクコンバータ機能を新たに開発して、走行実験した結果、平地と登坂走行においてアクセル操作のみで駆動力と車速が連続的に変換できて、エンジンは燃費のよい領域で運転できることを検証している。

第7章の結論では、本論文で得られた知見を整理するとともに CVT が介護支援および自動車産業の分野に与える工学的価値について述べている。

本論文は、CVT の解析に関する新たな手法とともに新機構の CVT を提案し、CVT の応用面でも新規分野に展開できる可能性を示唆する総合的な研究であって、CVT の設計手法の構築とその工学的価値の追求は、今後の CVT の発展に極めて有効な知見を与えるものである。

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る。

学力確認結果の要旨

2007年12月17日

論文題目： 差動遊星形無段変速機の伝達性能に関する研究

学位申請者： 岡村暉久夫

審査委員：

主査： 工学研究科 教授 松岡 敬

副査： 同志社大学 名誉教授 坂口 一彦

副査： 工学研究科 教授 藤井 透

要 旨：

本論文提出者は、京都産業大学理学部物理学科を卒業後、1970年4月シンポ工業株式会社(現在の日本電産シンポ株式会社)に入社し、主に開発本部にて減速機、無断変速機および自動車用CVTの開発責任者として従事した後、1999年9月より株式会社モートロンドライブ開発室にて自動車用CVTの設計開発に携わってきた。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集C編に6編が論文として出版公表されており、また、5th Int. Congress on Tribologyに1件、1st Int. Conference on Design Engineering and Scienceの国際会議において2件の論文発表を行い、すでに十分な評価を得ている。

2007年12月15日午前10時より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会(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。さらに講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。なお、ドイツ語に関しては十分な能力を有すると認定されており、また英語に関しては英語による論文発表、ならびに海外の国際会議における講演も行っており、十分な語学力を有しているものと認められる。

以上より、本論文提出者は専門分野、および語学力に関して十分な学力を有すると認める。

博士学位論文要旨

論文題目：差動遊星形無段変速機の伝達性能に関する研究

氏 名：岡村 暉久夫

論文要旨：

従来の無段変速機(CVT)は、摩擦伝動を利用して入力回転を停止させることなく出力の回転速度が連続的に変速できるということと自動制御できるという長所を活かして、産業機械の自動化推進に貢献してきた。一方、自動車用変速機は、初期の CVT が自動車の走行特性の全速度域に渡って満足できることが要求され、動力伝達よりもむしろ広変速範囲の出力が重視されていた。しかし、摩擦伝動に対する技術的な追究がなされないまま、未熟な技術の CVT や歯車伝動による変速機が市場を席巻するようになり、CVT に関しては、近年まで要求される連続変速機能と動力伝達の両方を満足する機構が出現することはなかった。

これらの原因として、CVT の構造的な問題およびトラクションドライブに関する弾性流体潤滑 (EHL) の問題が設計の立場で十分に検討されていなかったことが考えられる。すなわち、EHL 理論は CVT の開発に促して構築されたといえるが、その内容は試験機に使われる試験片の限られた条件での接触面や油膜から得られた実験値と理論とを如何に一致させるかに時間が割かれていた。そうした中での CVT の開発は、摩擦伝動からトラクションドライブに移行したものの、上記の課題が解明されないままに企業ごとに個別に製品化され、多くの新商品が市場に姿を現しては消えて行った。

このような状況が現在まで続いてきた原因として、従来のトラクションドライブ研究の成果を生かして、CVT に速度変換とトルク変換の両機能を満足させることのできる最適化設計がなされてこなかったことがあげられる。しかし、この最適化設計は、トラクションドライブや EHL 理論、機構学、幾何学的解析など、あらゆる分野の研究成果を吟味し、解析や実験などの検証を経て、はじめて可能となるものであって、理論と技術とが乖離されるか、いずれかが先行して成し遂げられるものではない。

本研究は、従来の CVT の課題に鑑みてなされたもので、トラクションドライブの研究成果を適用して、新たに開発した差動遊星機構を有する CVT の最適化設計を試みるとともに伝達性能を総合的に評価し、自動車用変速機およびパワーアシストへの実用化の可能性を検討することを目的とした。なお、各章は、従来技術の課題を明確にし、新しい技術の構築と解析によって課題を解決するとともに実験によって検証するという構成にした。

第 1 章の諸論では、従来の CVT に関わるトラクションドライブの研究および

技術の経緯について述べ、その中から、接触面の解析は、EHL 理論と幾何学的形状を分けて解析することによって、接触面のスピンモーメントとトラクション力が算出できる Tevaarwerk, Johnson の提案する弾塑性モデル、また、接触面の効率¹⁾は Mägi の提案するフォースボールの概念がそれぞれ設計に適していることを見出した。一方、CVT に関しては、入力軸の回転中に出力軸の停止が可能で、かつ、法線力とその反力の処理が容易な差動遊星機構を有する 2K-H 形と 3K 形を新規に提案した。

第 2 章では、最初に弾塑性モデルを簡素化したスピンパラメータの概念を採用して伝達効率との関係を明らかにし、次いで CVT の設計において最も重要度の高い法線力発生装置について検討した。これには接触点が比較的少なくトラクション特性の影響を受けにくい 2K-H 形差動機構の CVT を新規に設計・試作した。この試作機で法線力発生装置にはばね圧の変化および調圧カムのカム角度変化の条件下で実験を行い、最も効率よく運転できる法線力発生装置を決定した。解析と実験の結果、二つの接触点のスピンパラメータの積として全スピンパラメータの概念を導入して解析したところ、全スピンパラメータの増加とともに伝達効率が低下するという規則的な相関性が認められた。また、実験の結果、法線力発生装置にはばねよりも調圧カムを採用した方が、CVT を空転させずに高効率 (80%) で運転できることが分かった。

第 3 章では、構造が最も簡単で十分な強度を有する 3K 形 CVT の伝達性能を検討した。この章の目的は、個々に行われてきた従来の研究成果に基づいて設計に適した理論を選択し、これらを設計手順に従って解析して伝達効率を求めることにある。ここでは法線力発生装置に第 2 章で検討した調圧カムを用いるとともに現在までスピンの大きな機構設計に用いられることのなかった EHL 理論およびフォースボールの概念を採用して接触面の速度伝達効率とトルク伝達効率を算出し、これらの積として接触面効率を求め、これを効率の計算式に代入して CVT の伝達効率を求めた。次いで、試作機を製作して実験によって解析精度を検証したところ、接触面の弾塑性モデルとフォースボールおよび機構的な効率の計算によって導かれた伝達効率は、実験値とよく一致し、EHL 理論に基づく解析が CVT 装置に関して高精度に性能評価できることが分かった。

第 4 章では、EHL 理論が効率のみならず、トラクションドライブ特有のすべり現象についても解析できるため、これを 3K 形 CVT に適用し、新たにすべりを伴う速比の計算式を提案して、すべり現象を解析するとともに速比=0 近傍におけるストール領域のすべりとトルクの関係を検討した。その結果、トルクコンバータ特有のストール特性が、3K 形 CVT の変速リングを移動させることによって可能となり、出力の回転速度のみならずトルクにおいても可制御性が明らかになり、トラクションによるすべり要素として実用化できる可能性とともにトルクコンバータや力平衡装置に適用できることが分かった。このときの 3K 形 CVT のストールトルク比は、トルクコンバータの約 4 倍に達した。

上記検討によって 3K 形 CVT のストール特性は、出力軸回転の停止領域近辺で最大のトルクが発生できるので、変速リングの移動量をメカニカルフィードバックしてトルク制御できる力平衡装置を設計し、実験によって機能を確認したところ、重力バランスによるパワーアシストの分野に適用できることが明らかとなった。結果的に、この力平衡装置は、約 700N の重量を 90W の電動機で昇降できることが分かった。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章での検討結果から 3K 形 CVT が、自動車の発進から加速、高速走行までの全走行範囲を単独の機構でまかなえることが分かったので、この CVT のサイズ設計とともに車両用変速機として実車搭載できる可能性を検討した。試作機の設計に際しては、3K 形 CVT の調圧カムを配置する場所が 3 ヶ所想定できるので、最も効率よく運転できる配置場所を実験によって調べたところ、軌道円板とケーシングの間に設けるのが最適であった。サイズに関しては、転がり軸受に用いられている定格寿命の概念を応用して、ヘルツ応力と寿命の計算式を実験によって求め、この計算式で 3K 形 CVT の各接点の寿命時間を算出した。次いで、この寿命計算の結果と従来の自動車用変速機に用いられている定格寿命とを比較することによって、3K 形 CVT のサイズを決定した。その結果、3K 形 CVT は同一性能をもつ AT に対して、同じサイズと重量に設計することができた。ちなみに、試作機が CVT 単独で構成できたことと量産効果を考慮すると、さらなる小型軽量化の可能性が明らかとなった。

第 6 章では、3K 形 CVT の実車搭載を試みた。これにはトルク制御と速度制御の両機能を組合わせて車速を制御するために、カム機構と油圧シリンダを用いて駆動力の増加で減速し、アクセルの踏み込みで増速するトルクコンバータ機能を新たに開発して、実験によって走行性能を確認した。ここでのカム機構は、出力トルクをカムによって減速方向の軸推力に変換した。一方、油圧シリンダは、エンジンの回転速度を油圧ポンプとオリフィスを用いて変速リングが増速する方向の軸推力とした。したがって、トルクによる低速方向の軸推力とエンジン回転による増速方向の油圧とが平衡した位置で変速リングが静止し、車速が決定されることになる。

このような速度とトルクの制御系を組み込んだ 3K 形 CVT を軽四輪自動車に搭載して、自動車の走行特性を駆動力とエンジン回転数の時間変化としてチャート紙に記録した。その結果、平地と登坂走行においてアクセル操作のみで駆動力と車速が連続的に変換できて、エンジンは燃費のよい領域で運転できることが明らかとなった。

第 7 章の結論では、第 2 章から第 6 章までの各章で得られた知見を整理し、結果として、CVT が介護支援および自動車産業の分野に与える工学的価値について述べた。