

氏名	なりた ゆきひと
授与学位	成田 幸仁 博士(工学)
学位授与年月日	平成19年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械知能工学専攻
学位論文題目	シャフトドライブ式無段変速機の効率と負荷容量の向上に関する研究
指導教員	東北大学教授 井上 克己
論文審査委員	主査 東北大学教授 井上 克己 東北大学教授 清野 慧 東北大学教授 加藤 康司 東北大学助教授 山中 将

## 論文内容要旨

エンジンの出力トルクと走行に必要なトルクが車両速度に対して変化する自動車では、歯車列を用いる多段変速機や金属ベルトなどを用いる無段変速機によって、トルクと車両速度の適合を行っている。本研究で扱うシャフトドライブ式無段変速機(S-CVT)は、平行軸間に動力を伝達する新しい伝動装置であり、省エネルギーの観点から実用化が望まれている。本論文は、S-CVTの性能向上法を提示する研究成果をまとめたものであり、全5章より構成される。

第1章では、ハーフトロイダル方式や金属ベルト方式等の自動車用CVTの実用化例について述べ、それらについて効率向上が要求されていることを述べた。また、本研究対象であるS-CVTの問題点として、効率が75%であり、先の実用化例と比してさらに低いこと、および負荷容量が10 Nmであり、実用化に必要な値の十分の一程度であることを挙げた。これらの問題を受けて、本研究の目標を負荷容量100 Nm、動力伝達効率90%と設定した。

第2章では、S-CVTの構造、機構および開発の現状について詳細を述べ、これまでの計算や実験で得られた結果を紹介した。また、動力伝達効率と負荷容量の計算を行い、これを通して高効率化と高負荷容量化を実現するための着眼点を示した。ここで得られた結果を以下にまとめる。

- ・ S-CVTの動力損失の原因として、軸受のトルク損失と、動力伝達に伴うすべり率に着

目した。前者は Palmgren の式をトラクション油浴潤滑に拡張して計算し、後者は油膜の弾塑性モデルによりトラクションカーブを求めることで計算した。動力伝達効率の計算結果はこれまでの基礎実験で得られた結果と一致した。

- 上述の二つの着眼点ごとに、動力伝達効率をトルク成分と速度成分とに分けて考えた。トルク成分であるトルク伝達効率と、速度成分である速度伝達効率が動力伝達効率に及ぼす影響の度合いを評価した。トルク伝達効率は 78% であり、動力伝達効率に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。速度伝達効率は 96% であり、動力伝達効率に与える影響は相対的に小さいことを明らかにした。これらにより、動力伝達効率の向上にはトルク損失が占める割合を減少させることが重要であることを示した。
- S-CVT の負荷容量を、面圧の過大な上昇によるディスクとローラの破損を起こさず、かつトラクション係数の低下によるグロススリップを起こさない状態で伝達できる入力トルクの最大値と定義した。許容面圧とトラクション係数の最大値に着目した負荷容量計算手法を提示した。この手法を用いて S-CVT の現状での負荷容量を計算したところ、スピニングが大きい円すいディスクでは 45.2 Nm を得た。また、面圧が上昇しやすい曲面ディスクでは 46.1 Nm を得た。これらの結果より、負荷容量の向上にはそれぞれのディスクの欠点を解消する新しい形状のディスクが必要であることを示した。

第 3 章では、トルク伝達効率と負荷容量の向上を目的として、バックアップローラ機構を考案し、その動力伝達モデルを構築して効率と負荷容量が向上することを示した。また、バックアップローラ機構を試作して S-CVT 試験機に搭載し、実験によりその有効性を明らかにした。得られた結果を以下にまとめる。

- バックアップローラによる動力伝達のモデルをトラクションカーブに基づいて構築した。入出力ディスクと中間ローラの接触点のすべり率は、バックアップローラ上の接触点のすべり率よりも約 3 倍大きいことを示した。また、入出力ディスクと中間ローラの接触点のトラクション係数が、バックアップローラ側に先立って非線形領域に入り、その後は出力トルクの増加割合が減少することを示した。
- バックアップローラによる動力伝達のモデルに基づいて、トルク伝達効率と負荷容量を求めた。バックアップローラが無い場合と比較して、トルク伝達効率は 4~5 ポイント向上することを明らかにした。また、トルク伝達効率 83.3~84.3% を得た。トルク伝達効率の最高値が得られる時の入力トルクは、バックアップローラが無い場合の 1.3 倍であることも明らかにした。バックアップローラ上の接触点のトラクション係数が最大値を超える直前での負荷容量は、1.8~2 倍になることを明らかにした。
- 実験によりトルク伝達効率と負荷容量を測定した。バックアップローラが無い場合と

比較して、トルク伝達効率が 2.5~8.3 ポイント向上した。このときの入力トルクはバックアップローラが無い場合と比較して 1.3 倍となった。また、グロススリップ直前での負荷容量は 1.7~2.1 倍となった。トルク伝達効率の増加割合と負荷容量の増加割合は計算結果とほぼ一致した。

- トルク伝達効率と負荷容量は、96~79.9%と 43.7 Nm~23.1 Nm を得た。負荷容量は計算結果と一致した。トルク伝達効率は、等速状態と増速状態では計算結果よりも 10~13 ポイント高い結果となった。計算に用いた軸受の摩擦係数が高かったことと、実験での推力の測定誤差が原因であると考えられる。減速状態では、計算結果よりも 3 ポイント低い結果となった。これは出力軸の回転速度が約 75min<sup>-1</sup> と遅く、オイルシールや軸継手のトルク損失が他の変速状態と比べて大きかったためと考えられる。
- トルク伝達効率と負荷容量の向上により、バックアップローラ機構の有効性が確認された。
- 動力伝達効率は、等速状態で 94.2%、増速状態で 93.2%を得た。動力伝達効率の目標値である 90%を達成した。

第 4 章では、負荷容量と速度伝達効率の向上を目的として、全変速範囲でスピンが発生しないゼロスピンドィスクを考案し、要求される負荷容量に対して面圧とトラクション係数の限界値までディスク寸法を小型化する最適設計を行って、従来の動力伝達用ディスクに対する優位性を示した。また、特別な動力源を要さず推力を発生させることができる推力カムをバックアップローラにも適用可能とすることを主目的として、入出力側バックアップローラを連結するカウンター軸を考案し、その動力伝達モデルを構築して効率と負荷容量に与える影響を予測した。ゼロスピンドィスク、バックアップローラ、カウンター軸を S-CVT に搭載して性能評価実験を行い、カウンター軸とゼロスピンドィスクの有効性を示した。得られた結果を以下にまとめる。

- 面圧の過大上昇を防ぎ、かつスピンが全変速範囲で発生しないゼロスピンドィスク断面形状を得た。
- 入出力側バックアップローラをカウンター軸で連結した場合の動力伝達のモデルをトラクションカーブに基づいて構築し、トルク伝達効率が向上すること、及び負荷容量はバックアップローラのみの場合と同様であることを示した。ゼロスピンドィスク、バックアップローラ、カウンター軸を S-CVT に適用した場合の動力伝達効率を計算したところ、89.8~93.2%という結果を得た。
- 必要十分な寸法で負荷容量を満たすために、伝達動力をディスクとローラの重量で除したパワーウェイトレシオを評価関数に導入し、面圧とトラクション係数の限界値ま

でディスクとローラ寸法を小型化する最適設計を行って、最適解を得た。最適設計で優秀とされたものの中から、ディスク最小回転半径 35 mm, 中間ローラ半頂角  $42.5^\circ$ , クラウニング半径 32 mm のゼロスピンドISK・ローラを選び、試作した。

- ・ 加工誤差や押付力による変形等の影響について検討するために、最適設計されたゼロスピンドISK・ローラに形状誤差を与えて速度伝達効率を計算した。これにより誤差が速度伝達効率に及ぼす影響は少ないという結果を得た。
- ・ ゼロスピンドISKの優位性を明らかにするために、従来の円すい・曲面ディスクに対しても最適設計を行ったところ、ゼロスピンドISKが与えられた負荷容量に対して最も小型化できるという結果を得た。また三種類のディスクについてトラクションカーブを描くことで、すべり率やトルク容量を比較したところ、ゼロスピンドISKが最も優秀であるという結果を得た。
- ・ ゼロスピンドISK, バックアップローラおよびカウンター軸を S-CVT 試験機に搭載して実験を行った。カウンター軸が機能することを確認する必要があったため、皿バネにより推力を与えて実験を行った。バックアップディスクを支持する軸受の剛性不足により、トルク損失が増加した。その結果、動力伝達効率は期待した値が得られなかった。得られた動力伝達効率は 81.9%であり、計算結果と比較して 11.3 ポイント低下した。
- ・ バックアップローラの場合と異なり、出力トルクは入力トルクが負荷容量に達するまでほぼ一定の割合で増加し、また動力伝達効率の最高値を示す入力トルクと負荷容量はほぼ一致していた。これにより、カウンター軸の機能が確認された。
- ・ すべての変速比で速度伝達効率 99%を得た。また、負荷容量 90 Nm を得た。これらの値は計算結果と一致していた。これにより、ゼロスピンドISKの有効性が確認できた。目標とする負荷容量に対しては 10 Nm 不足していた。これは、推力不足が原因である。
- ・ カウンター軸の動力伝達モデルに基づいて推力カムの設計を行った。中間軸とバックアップローラ軸のそれぞれについて最適なカム角度を求めた。その結果、中間ローラ側とバックアップローラ側のカム角度は、それぞれ  $7.03^\circ$ ,  $7.86^\circ$  となった。この推力カムを用いることにより、負荷容量 100 Nm の達成が期待できる。

第 5 章は本論文の結論である。動力伝達効率 90%, 負荷容量 100 Nm の達成を目標として、S-CVT の研究を行い、実験により動力伝達効率 94%, 負荷容量 90 Nm を確認した。

# 論文審査結果の要旨

原動機から被動機に運動と力を伝える伝動装置には、原動機の出力特性を被動機の使用状態に適合させる変速性能が求められる。エンジンの出力トルクと走行に必要なトルクが速度によって変化する自動車では、歯車列を用いる多段変速機や金属ベルトなどを用いる無段変速機によって所要の変速性能を実現している。本研究で扱うシャフトドライブ式無段変速機 (S-CVT) は、交差軸トラクションドライブ機構を用いて平行軸間に動力を伝達する新しい伝動装置であり、省エネルギーの観点から実用化が望まれている。しかし、この装置は未だ試作段階にあり、実用化に向けて効率と負荷容量の向上が不可欠である。本論文は、これらの課題を解決して、S-CVT の性能向上法を提示する研究の成果をまとめたものであり、全編5章より成る。

第1章は緒論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、S-CVT の動力損失の原因として、軸受のトルク損失と動力伝達に伴うすべり率に着目し、Palmgren の式をトラクション油浴潤滑に拡張して前者を求め、弾塑性モデルによるトラクション曲線から後者を計算している。これによって、軸受のトルク損失が S-CVT の効率に大きく影響すること、および、スピン低減の重要性を知り、負荷容量の向上とスピンを低減するディスク形状の設計が課題解決の鍵であることを示した。これは優れた着眼点である。

第3章では、S-CVT の中間ローラに対向してバックアップローラを付加する新しい機構を提案し、その効果を計算と実験で確認している。先ず、従来の経路とバックアップローラを経由するトルクスプリットの計算法を示して、トルク伝達効率が最高となる条件下で入力トルクが 1.3 倍になり、トラクション係数が最大値となる直前には 1.8–2.0 倍になることを明らかにしている。さらに、試作したバックアップローラ機構を搭載した S-CVT 装置を用いて実験を行い、計算値に近い負荷容量の向上を確認するとともに、本研究の目標としていた動力伝達効率 90% も達成している。これらは S-CVT の負荷容量と効率の向上にとって有用な成果である。

第4章では、変速範囲 1/2.35–2.35 の全域においてスピスがゼロになるディスク形状を考案し、与えられた基本諸元の下で負荷容量を最大にする設計法を示すと同時に、この方法で設計されたゼロスピンディスクを搭載した S-CVT 装置によって全速度範囲で速度伝達効率 99% の実現を確認している。また、前章で提案したバックアップローラ機構に適切な押し付け力を与えるためには推力カムの使用が不可欠であるが、それを可能とする新たな機構として入出力軸側のバックアップローラ間にトルクを伝達するカウンター軸を提案し、トルク配分の計算を行うことによって、中間軸ローラとバックアップローラに最適な推力カムの角度を決定している。これは有用な知見である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、シャフトドライブ式無段変速機の効率と負荷容量の向上を目指して、弾塑性モデルによるトラクション曲線の導出等によって課題解決の本質を明らかにし、バックアップローラ機構、ゼロスピンドィスク、カウンター軸機構を提案することで、シャフトドライブ式無段変速機の性能向上法を提示したものであり、機械工学および設計工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。