

# 博士学位論文審査要旨

2018年2月13日

論文題目： 金属Vベルト式CVTの摩擦伝動限界の予測に関する研究

学位申請者： 坂上 恭平

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤井 透

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 大窪 和也

副査： 室蘭工業大学もの創造系領域 准教授 成田 幸仁

要 旨：

多数のエLEMENTからなる金属Vベルトを用いたCVT（無段変速機）を自動車用変速機として用いることにより、全車速域でエンジンを高効率に運転できる。しかし、CVTを効率高く動作させるためには、ベルトが滑らない必要最小限のプーリ推力でベルトをクランプする必要がある。

本研究では、はじめに定トルク下に於ける微小滑りから動力が伝達できなくなる全滑りへと移行する伝動メカニズムを明らかにした。また、同メカニズムの変化を基準に「摩擦伝動限界」も定義した。実験と数値解析結果との比較から、プーリ推力が高いとプーリフランジと固着するELEMENTはあるが、ELEMENT間に疎密が生じ、これが局所的な微小滑りを引き起こすことを明らかにした。推力が減少すると固着領域が減少し、プーリ中の全ELEMENTがプーリに対して滑る（全滑り）。そこで、全滑り発生点を摩擦伝動限界と定義した。

次いで、増速時の伝動効率に及ぼす駆動トルク変動の影響を明らかにした。定常時に比べ、駆動トルクが短時間・周期的に変化した場合でもプーリV溝中でのベルト滑り量が増加する。トルク変動が顕著な場合、平均トルクを基に見積もったプーリ推力では、極めて短期間であるが一時的に全滑り状態を超える状況に達することのあることを示した。

ベルト／プーリ間の摩擦係数は経年変化する。摩擦係数に依らず、与えられたプーリ推力における（現在の）滑り状態と滑り限界との割合を見積もることができれば、プーリ推力を適切に下げられる。そのためには、現在のベルトの運転状態を判別できる手法が望まれる。CVTではトルク変動が伴うことを念頭に、動的ベルト伝動応答をばね-質量で表わした数値モデルを提案した。駆動／従動プーリ間のトルク変動に関する伝達関数の変化と対応する「滑り識別子」も提案、これにより現在のCVTの運転状況を把握する手法を見出した。実験の結果、本手法の有効性を確認した。

以上、本研究により、従来明らかにされていなかったCVTの伝動限界付近でのベルト挙動と、そのメカニズムを明らかにするとともに、経験と実験に頼っていたCVTのプーリ推力設定に関し、新たな概念の基、革新的制御手法を構築した。これによりプーリ推力を最適化した結果、走行時の伝動効率が顕著に向上し、省エネ、環境へも貢献できる変速システムが構築された。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位を授与するにふさわしいと認められる。

## 学力確認結果の要旨

2018年2月13日

論文題目： 金属Vベルト式CVTの摩擦伝動限界の予測に関する研究

学位申請者： 坂上 恭平

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤井 透

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 大窪 和也

副査： 室蘭工業大学もの創造系領域 准教授 成田 幸仁

要 旨：

本論文提出者は、2006年4月同志社大学工学部機械システム工学科から飛び入学により同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士前期課程に入学した。2008年3月同研究科を修了後、同年4月に本田技研工業（株）に入社した。その後、（株）本田技術研究所に転籍し、大学院生時代から携わってきた金属Vベルト式CVTについて一貫して研究開発を行ってきた。

本論文の主たる内容は、自動車技術会論文集に1編、SAE International Journal of Enginesに2編、Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturingに1編、VDI Proc. of CVT-Hybrid International Conference 2010に1編、Full paper 査読付き論文として掲載されている。また、国際会議を含む国内外で多くの研究発表を行い、国内外の学会において十分な評価を得ている。

2018年2月3日、審査委員により約1時間にわたって提出された学位論文に関連して、学力の確認を行った結果、いずれも十分な学力を有することを確認した。また、論文提出者は英語による複数の論文発表を行うとともに、国際会議で口頭発表も行っている。これにより、十分な語学力を有することを確認した。

以上のことから、本学位申請者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 金属Vベルト式CVTの摩擦伝動限界の予測に関する研究  
氏名： 坂上 恭平

## 要旨：

本研究では、高出力の動力伝達が可能な CVT 用金属 V ベルトに着目し、摩擦伝動限界の予測技術を構築することを目的とした。

自動車用 CVT では油圧によってプーリ推力を発生させ、金属 V ベルトをプーリにより挟みつけることにより、エンジンから供給された動力を駆動輪へと伝達する。このとき動力伝達が可能な摩擦力が得られるよう適切なプーリ推力を決定しなければならない。プーリ推力の決定を困難にする要因として摩擦特性の経年変化や環境条件による影響が挙げられる。プーリ推力を決定するには上記の摩擦特性を摩擦係数によって代表させるが、多様なユースケースに対応しようとするほど膨大な数の摩擦試験が必要となる。摩擦試験を繰り返すほどに同一個体であっても摩擦が進展することで、摩擦係数に変化が生じる可能性がある。このように摩擦係数を正確に把握しようとするほど多くの摩擦試験を実施するほど、試験誤差による不確定要素が介入し、プーリ推力が過剰になるといった悪循環を生じることになる。プーリ推力が過剰になれば伝動効率の低下や強度不足による CVT の大型化を招くことになり望ましいことではない。この問題に対して、車両走行中に摩擦伝動限界の予測ができることが理想である。摩擦伝動限界の予測結果に基づきプーリ推力を逐次補正すれば、もはや摩擦係数自体が不要となる。

第 2 章では、摩擦伝動限界の定義を行った。金属 V ベルトは常に微小滑りを生じていることが知られており、プーリ推力と滑り速度との関係は明確に滑りの有無で二分することができない。したがって、微小滑りから動力伝達が不能となるまでの滑りの発生および進展メカニズムを明らかにし、そのメカニズムの変化を基準に摩擦伝動限界の定義を試みた。定常状態における金属 V ベルトの力学的振る舞いを解析的に調べ、エレメント間の隙間とエレメントの弾性変形により巻き付き位置に応じてエレメント配置に疎密が生じていることがわかった。その結果、同一ベルトにおいても巻き付き位置によって異なる速度分布が生じ、局所的に滑ることから微小滑りが生じていることがわかった。このとき、巻き付き位置によってはエレメントとプーリとが滑らずに連れまわる固着領域が存在する。プーリ推力が伝達トルクに対して減少すると固着領域が減少し、ついにはプーリ中の全てのエレメントがプーリに対して滑る状態（全滑り状態）に至る。解析結果では、全滑り発生に伴って滑り速度が急峻に増加することから全滑りの発生開始付近において伝動効率は最大となった。弾性滑り量は伝達トルク（圧縮力）に依存しプーリ推力の影響を受けないことから、弾性滑りの範囲ではプーリ推力を低減してもアブレイブ摩耗や凝着摩耗の進展が加速されるとは考えにくい。したがって、伝動効率の最大化と耐久性観点から全滑り発生点を摩擦伝動限界と定義した。エレメント - プーリ間の接線方向摩擦力の分布と伝動効率の変化を測定し、伝動効率が最大となる時全滑りが生じていることが実験的にも確かめられた。

第 3 章では、金属 V ベルトを用いた CVT は自動車など内燃式エンジンと組み合わせて用いられることが多いことから、トルク変動下における伝動状態の考察を行った。速度比 0.45 の条件下で、CVT の伝動効率に及ぼす駆動トルク変動の影響を調べた。その結果、駆動トルクが短時間・周期的に変化した場合でも定常時に比べ、プーリ V 溝中でのベルト滑り量が増加することがわかった。平均トルクを対象に見積もったプーリ推力では、トルク変動中、一時的にトルク比は 1 を超える場合もあり、プーリ中でのベルトの滑りが顕著になることがわかった。そのため、伝動効率を高い水準に維持するためにはトルク比の変動幅を考慮する必要があることがわかった。

また、トルク変動時には圧縮力も変動することからベルト弦部に振動が生じていることがわかった。そのため、駆動プーリから従動プーリへの動的トルク伝達を表現するためには、ベルト剛性を考慮した振動モデルが必要であることがわかった。

第4章では、現在の滑り状態を運転中に判別可能な手法の構築を試みた。まず第3章で得られた知見から、ベルト剛性を一次元のばね要素で代表し、ベルト-プーリ間の摩擦力を滑り速度に依存する粘性減衰項で表現した数値モデルを提案した。駆動プーリにトルク変動が入力された場合、駆動プーリには変動トルクに対応した回転変動が生じる。数値モデルの入力は駆動プーリの回転変動とした。実車運転中のトルク計測が困難であるのに対し、プーリ回転数の測定が容易であることから実車運転中におけるモデルパラメータの同定を狙ったものである。この数値モデルでは駆動プーリに生じた回転変動が従動プーリに伝達されるまでの伝達関数を提供する。本研究では速度比が1未満の増速条件に着目するため従動側での全滑りに重点を置き、駆動側での微小滑りが無視できるという前提に基づき上記の数値モデルを解析的に解いた。この数値モデルによれば、全滑りの発生を境に振動モードが変化することが示された。すなわち、弾性滑り状態ではベルトと従動プーリとが一体となってベルト剛性に由来した固有振動を生じ、全滑り状態ではベルトと従動プーリの運動が分離しベルトのみが固有の振動を生じる。この振動モードの変化に着目して現在の滑り状態を判別するための指標である滑り識別子を導入した。滑り識別子が1を超えた場合に全滑りが発生していることを意味し、値の大きさは全滑りに対する現在の滑り速度の相対的大きさを表す。滑り識別子は駆動プーリと従動プーリの回転数（変動）より求めることができ、特別なセンサを要することなく滑り状態を判別することができる。第2章で得られた知見として、滑り速度の影響因子は駆動プーリ回転数（ベルト周速）と伝達トルクであった。滑り識別子の有効性を検証するにあたり、駆動プーリ回転数とトルクを変化させた条件において実験を行った。伝動効率が最大となる点をトルク比1とすると、8%以内の精度（トルク比1.08）で全滑りを判定可能なことが確かめられた。滑り識別子は動作点まわりの線形化により求まる伝達関数を評価しているともいえるので、現象の非線形性に伴う安定性を検討した。摩擦勾配が負となる自己進展滑り領域を除いて系は安定であり、自己進展滑り領域においてもその滑り程度は判定できないが摩擦伝動限界を超えていることは判定できる。このことから摩擦伝動限界を予測し、維持するといった目的に対し、滑り識別子は指標として実用上十分な安定性を有していることがわかった。

第5章では、滑り識別子を実際の車両制御へ応用し、その効果を確認した。走行中に検出された滑り識別子に基づき油圧制御を行った。その結果、任意のトルク比で運転することが可能となった。プーリ推力を最適化した結果、クルーズ走行時の伝動効率を2.6%向上することができた。

以上、本研究では摩擦伝動限界の予測と滑り状態の定量評価を可能とする手法の提案を行った。