

報告番号	甲 第 13738 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 機構学に基づく無段変速機用チェーンの騒音および動力損失低減を目指した形状に関する研究  
(Study on shapes of continuously variable transmission chain for reduction of noise and power loss based on mechanism analysis)

氏 名 中澤 輝彦

## 論 文 内 容 の 要 旨

自動車関連の CO<sub>2</sub> 排出を減らすためには、電動化の加速のみならず、内燃機関を使用するエンジン車やハイブリッド車の燃費を改善することも短中期的に重要となる。エンジン車、ハイブリッド車の動力源であるエンジンは、回転数とトルクとの関係の中で最も効率よく動作する領域を持っている。エンジンの動力をタイヤに伝える役割をもつ変速機は、自身の動力損失を低減する技術や軽量化の技術とともに、エンジンの高効率領域を多用できるように多段化もしくは無段化、更には変速比幅を拡大する方向に進化することで燃費改善に貢献してきた。

無段変速機(Continuously Variable Transmission, 以下, CVT と呼ぶ)は上述したエンジンの高効率領域を多用できる利点から主にエンジン車で採用が進められている。現在主流となっているベルト式 CVT は主に入力軸および出力軸に設けられた円錐状のプーリと、それに巻き掛けた V ベルト(V 型断面を持つベルト)で構成されている。V ベルトは円錐状のプーリ 2 組に挟圧され、摩擦力により入力から出力へ動力を伝達する。また、CVT では、片側のプーリを軸上でスライドさせてプーリセットの溝幅を変えることができる。これにより、V ベルトのプーリへの巻き掛かり径を無段階に設定することが可能となる。従来の多段変速機では、半径比が固定された複数の歯車対を用いてローギヤからハイギヤへと段階的に変速がおこなわれるのに対し、CVT では前述したように半径比が固定されず連続的に変速比を得ることが可能となる。

自動車用ベルト式 CVT の V ベルトとしては、金属ベルトが主流である。金属ベルトは一般にエレ

メントとリングと呼ばれる部品から構成される。エレメントは厚さ 2mm 前後の鋼板を精密に打ち抜いたもので、両側にプーリと接する傾斜面を持っている。リングは厚さ 0.2mm 程度の高強度材料の薄板(主にマルエージング鋼)を溶接して円環状にし、内から外へ層状に重ね合わせたものである。金属ベルトはエレメントを数百個重ね合わせ、二組のリングを用いて、エレメントの左右両側から挟み込む形で、部品同士の接触により束ねて構成されている。金属ベルトではこのように構成する部品が多く、各部品同士が相対的なすべりを許容する構造を採っている。そのため各部品間に摩擦損失が生じやすい。

近年では V ベルトとしてチェーンが注目されている。CVT 用チェーンは主にピンと呼ばれる細長い部品と、リンクと呼ばれる薄板の部品から構成されており、部品間の相対的なすべりが許容される金属ベルトと比較して、構造上部品間のすべりが小さく、発生する動力損失が少ない。実際にどの程度の効果が期待されるかを確かめるため、CVT 実験装置を用いて金属ベルトとチェーンの損失を比較した結果、ある条件において 32 から 36% の損失低減が確認できた。

一方、チェーンを構成するピンは金属ベルトのエレメントと同様、両端面がプーリと接する構造となっており、両者の間に発生する摩擦力によって動力が伝達される。また、ピンはピッチと呼ばれる間隔で配置されている。よって、チェーンがプーリに巻き掛かる過程では、ピンが間欠的にプーリに進入もしくは離脱するため、チェーンの弦部が上下方向に運動する。これは CVT の振動・騒音性能をはじめ動力損失や強度を含む基本性能に影響を及ぼし、CVT 用チェーンの課題となる。この挙動はピッチのほかに、チェーンを構成する部品形状によっても変化する。従って、ピンが間欠的にプーリに進入もしくは離脱することに起因した 1 ピッチ分の周期的な挙動を、部品形状や諸元等から幾何的に検討することは、CVT 用チェーンの基本性能を予測する上で重要となる。しかしながら、形状が性能に及ぼす影響を、実験検証を踏まえて詳細に定式化した研究例は非常に少ないのが現状である。

本論文では、CVT 用チェーンについて機構学に基づいたモデリングをおこない、解析、考察、実験により騒音低減および動力損失低減に寄与するチェーンの形状を検討した。特にチェーンの性能に影響を及ぼす、ピンが間欠的にプーリに進入もしくは離脱することに起因した振動的な挙動に着目した。その結果、騒音に関してはチェーン弦部の振動を低減するピン断面曲線を、損失に関してはすべりを低減するピンとプーリとの接触点の位置を提案した。さらに、検証実験をおこなうことでこれらの提案の有効性を確認し、設計上の指針としてまとめた。本論文は全 6 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、前記した本研究の背景と工学的意義について述べ、CVT 用チェーンの性能向上に関する従来の研究を概観すると共に、本論文の目的を示した。

第 2 章では、CVT 用チェーンの騒音について、起振力となるチェーンの挙動を実験により抽出し、モデル化をおこなった。はじめに CVT 実験装置を用いて騒音計測をおこない、ピッチと呼ばれる、チェーンを構成するピンが配置される間隔に起因する周波数の騒音が大きくなることを確認した。そして、その条件下でプーリの加速度計測を実施し、プーリの軸方向並進の動きと回転変動の成分が大きくなることを明らかにした。さらに、これらのプーリの動きの起振力となるチェーンの周期的

な挙動を静解析できるシンプルな機構学モデルを構築した。この機構学モデルでは、チェーンの挙動に影響を及ぼす形状・諸元を含め、入力プーリの微小回転ごとに各部品 of 静的な力のつり合いを解くことで、チェーン弦部の周期的な挙動を検討可能にした。また、このモデルを用いてパラメータスタディを実施した。チェーンがプーリに巻き掛かる過程で、ピッチが有限であるために生じる弦部の上下方向の振動(多角形効果)を弦部変位と定義した。解析では弦部変位や出力プーリの回転変動(ピンのプーリとの接触点の回転角度振幅)について、入出力プーリの巻き掛かり径、ピンの断面曲線、入出力プーリの軸間距離および変速比をパラメータとした場合の影響を明らかにした。特に変速比をパラメータとしたとき、弦部変位や出力プーリの回転変動(ピンのプーリとの接触点の回転角度振幅)が、変速比が最大あるいは最小値となる 2.0 や 0.5 付近で大きく、変速比が中央値となる 1.0 付近では小さくなることを明らかにした。また、機構学モデルの検証をおこなうため、CVT 実験装置と加速度計を搭載したチェーンを用いて弦部変位を計測した。その結果、前述した解析結果と定性的に一致することを確認し、機構学モデルの妥当性を検証できた。この機構学モデルにより、摩擦や変形などを考慮した大規模なモデルを計算することなく、チェーンの諸元に応じて、振動の基本性能を予測できることを示した。また、機構学モデルから求められるプーリ近傍の弦部変位と出力プーリの回転変動(ピンのプーリとの接触点の回転角度振幅)の 2 つの周期的な振動を低減できる形状を採用すれば、騒音低減の見込みがあることを示した。

第 3 章では騒音を低減するためのチェーン形状を、解析と実験により検討した。はじめに第 2 章で明らかにした騒音の要因の一つと推測される弦部の振動(弦部変位)に着目し、この振動を低減するピン断面曲線を提案した。第 2 章で定式化した機構学モデルを用いて、提案したピン形状の振動特性を従来のピン形状の振動特性と比較することで、騒音が低減できることを予測した。また、ピン断面曲線が提案形状と従来形状の二種類のチェーンを試作し、CVT 実験装置を用いて騒音計測を実施した。そして、計測した騒音の傾向が解析結果と一致していることを確認した。提案形状を採用することで、従来形状と比較し、特に増速側や減速側で騒音を低減できることを確かめた。この実験結果より、機構学モデルの有用性を改めて検証できた。

第 4 章では、チェーンの振動的な挙動が CVT の動力損失に及ぼす影響を解析と実験により調べた。CVT 用チェーンがプーリに進入もしくは離脱する際に生じるピンとプーリとのすべり距離に着目し、動力損失を定式化した。また、ピンとプーリとのすべり距離が異なるチェーンを 16 種類試作し、CVT 実験装置を用いて計測した動力損失を計算値と比較することで定式化したモデルを実験的に検証し、その妥当性を確認した。

第 5 章では、チェーンの動力損失を最小にするため、チェーンが 1 周する間のピンとプーリとのすべり距離に着目した。そして、ピンのプーリとの接触点位置を決めるパラメータの最適化をおこなった。また、プーリと接触するピンの数の違いについても検討をおこなった。まず、ピンのプーリとの接触点位置を決めるパラメータがチェーンの動力損失に影響することを解析と実験の双方により確認した。そして、動力損失を最小にするパラメータの値を明らかにした。また、プーリと接触するピンの数が少ないユニットを用いたチェーンの方が、動力損失が少ないことを解析と実験の双方により明らかにした。

第6章では本論文の研究をまとめ、結論を述べた。CVT用チェーンの課題である振動・騒音と、長所である効率(低損失)について、それらの特性を向上させるための理想形状を導出する技術について実験検証を踏まえて体系化することができた。そして、得られた知見を設計指針として用いることで、低騒音および低損失な無段変速機用チェーンを設計することが可能であることを結論付けた。