

CVT金属ベルト応力シミュレーション技術の開発

Development of Metal Pushing V-Belt Stress Simulation for Continuously Variable Transmission

斎藤 俊博*
Toshihiro SAITO

岡野 武政*
Takemasa OKANO

要 旨

CVTにおける金属ベルトの高速耐久性を把握するため動的挙動と応力をシミュレートする計算手法を新たに開発した。本手法ではCVTの高回転領域を再現させるため衝突解析に用いられる有限要素法を採用した。金属ベルトの有限要素モデルはエレメント全数及び、積層リング全層を形状定義しており、駆動力の伝達は接触・摩擦で行われる。また、回転数は停止状態から徐々に目標回転数まで立ち上がるように設定した。その結果、高回転領域でのベルト応力を予測することが可能となり、テスト結果との相関も得られたことからベルト耐久性を初めて判断することが可能となった。更に、このシミュレーション手法を広く設計者に普及させるため専用の解析プリ・ポストを開発し、金属ベルトモデルを短時間で作成できる環境を構築した。

ABSTRACT

This paper describes the development of a new method to evaluate dynamic behavior and stress for durability simulations of metal pushing CVT V-belts undergoing high rotational speeds. The finite element method of crash analysis is adopted to simulate the high rotational speed range. A finite element model of the complete metal pushing V-belt including the layered rings is constructed, where the torque is transmitted by the friction of the contact surface. In the simulation, the rotational speed increases from zero to the target speed. Since the simulated belt stresses correlate to test, the durability of the belt has been first predicted successfully. To make this simulation available to designers, a customized pre- and postprocessing tool is developed in order to allow creation of new models in an easy and fast way.

1. まえがき

近年、自動車のさらなる環境対応の要求が高まる中でCVTは走りと低燃費を両立できるトランスミッションとして各社が注目する技術である。その走りにおいてはシフトショックのないスムーズな加速と静粛性を特徴とし、燃費においてはエンジンとの統合制御により燃焼効率の高い回転数を維持することでATをしのぐ低燃費を実現している。そのため、今後ますますCVTの伝達容量を拡大していくニーズが高まる中、骨格部品である金属ベルトの耐久性向上は不可欠であり、要求される限界回転数もより高くなってきている。しかしながら、金属ベルトの伝達メカニズムが接触・摩擦伝達を基本としているため、解析的なアプローチは難しく、もっぱらテストによる確認が繰り返されており、膨大な開発工数を費やしてきた⁽¹⁾。

そこで本稿では、まず限界回転数付近での金属ベルト挙動・応力を予測できるシミュレーション技術を開発し、耐久

SN線図により強度判断を可能とした。更に、この技術を広く設計者にも利用できるようにするため、専用のプリ・ポストを開発したので合わせて報告する。

2. 開発のねらい

今回用いたCVTの主断面をFig.1に示す。図に示すように駆動トルクは金属ベルトによりドライブプーリーからドリブンプーリーに変速し伝達される。また、CVTは対向する1対のムーバブルプーリーが軸方向に移動することでレシオ変速するメカニズムであるため、打ち消すことのできないミスアライメントを有しており、その振幅はプーリー軸間距離と運転レシオで決定される。

金属ベルトはVan Doornes Transmission社製を採用しており、およそ428個のエレメントと2列12枚のリングから構成されている(Fig.2参照)。リング各層はレシオ1.0以外では相対すべり挙動をしており、最内層リングではエレ

*栃木研究所

メント間とも相対すべりがある。高回転領域での破損起点はこの最内層リング内側表面と推定されている。

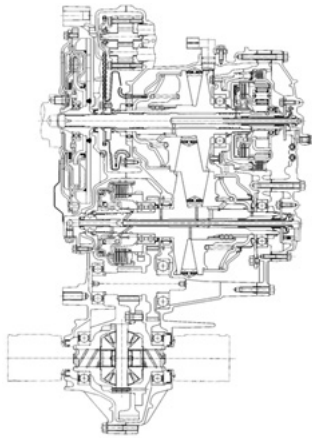


Fig.1 CVT main section

これらのことから本開発のねらいとして、
 (1)限界回転数での最内層リング応力の算出
 (2)高速耐久時の SN 線図の作成
 (3)プーリー剛性のベルト強度への影響
 (4)容易に利用できるシミュレーション技術を定めた。



Fig.2 Metal pushing V-belt

3. シミュレーション開発

3.1. ソルバーの選択

金属ベルトのトルク伝達はエレメント間の押し力とリングの張力差により行われる⁽²⁾。この張力差はリングと各エレメント間の摩擦力により引き起こされていることから、相対挙動を正確に求める必要がある。すなわち、最内層リングの応力を求めるためには金属ベルトのすべての構成部品を忠実にモデル化する必要があり、なおかつ個々のエレメントやリング各層の運動挙動を考慮できる手法でなければならない。

こうした要求を満足させる解法として採用したソルバー

が衝突解析コードに分類される汎用非線形有限要素法である。多くの衝突解析コードは動的な接触問題を解く際の計算効率に主体をおいているが、その中で運動学的にも計算精度を犠牲にしないキネマティックス接触を有するソルバーを採用した。

3.2. シミュレーション手法

Fig.3に解析前の状態の金属ベルトモデルを示す。リング各層は弾性体として定義し、エレメントについては詳細形状を再現させることに主眼を置くため剛体とした。プーリーのモデルは本来弾性体としての扱いが望ましいが、計算時間の観点から剛体としている。

また、解析前の真円形状を金属ベルトのゼロ応力状態としている。

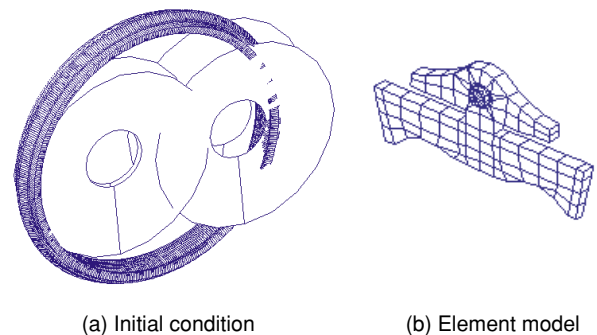


Fig.3 Metal pushing V-belt model

解析のプロセスは実際に金属ベルトを CVT に搭載し運転する時と同様に設定している。まず始めに、プーリー軸間距離を合わせ、その後ドライブ及び、ドリブンプーリー側圧でベルトをクランプし、ドライブプーリーを限界回転数までベルトスリップさせないように加速する。その後、すべての運転条件を一定に維持し、リング応力が定常状態に到達したところで計算を終了する。この方法は解析時間がかかるが、接触・摩擦の不可逆性を精度よく再現するには不可避と

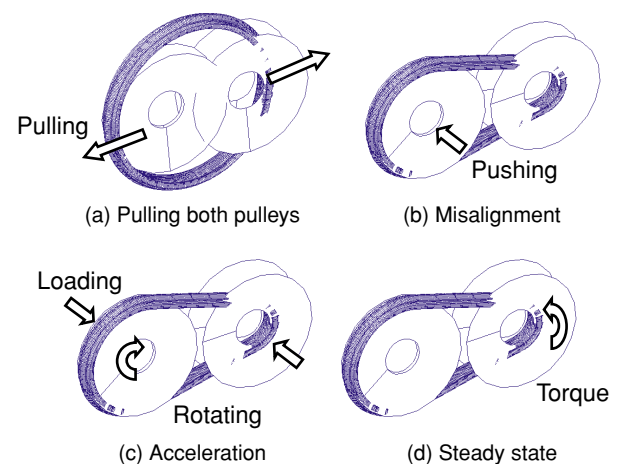


Fig.4 Analysis procedure

考えられる⁽³⁾⁽⁴⁾(Fig.4 参照)。

また、Fig.5にシミュレーションの入力条件と出力結果の関係を示す。この中で、各接触面での摩擦係数は測定結果との整合により決定する必要があるパラメータである。

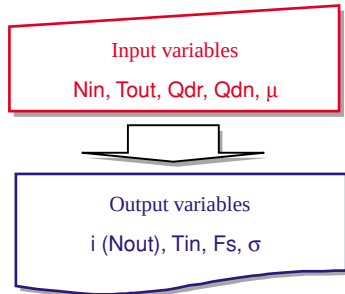


Fig.5 Input and output variables of analysis

3.3. 精度の検証

精度を検証するため、本シミュレーション手法による結果を測定結果と比較したものを Fig.6 に示す。測定はリングを1層だけ組み込んだ金属ベルトを用いており、リング外周表面にはたつ歪みゲージから信号を取り出している⁽⁵⁾。測定条件は1000rpmとし、トルク負荷はかかっていない。リング応力は正確に再現されており、このとき用いた各部の摩擦係数をそのまま限界回転数でのシミュレーションにも流用した⁽⁶⁾。

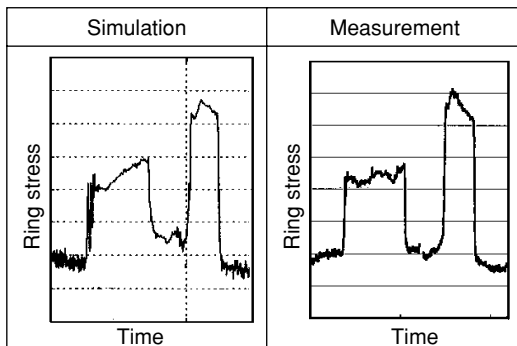


Fig.6 Comparison of results

3.4. 最内層リング応力

本シミュレーションを限界回転数での CVT 運転条件に適用し、得られた最内層リング応力の時刻歴波形をFig.7に示す。計算条件はエンジン回転数が6000rpm、レシオは0.61、伝達トルクは143Nmである。

応力波形が示すとおり、運転条件が定常状態になるとまもなくリング応力もほぼ同じ波形を繰り返していることから、限界回転数での定常状態を再現できていることがわかる。

また、本シミュレーションではベルトミスアライメント

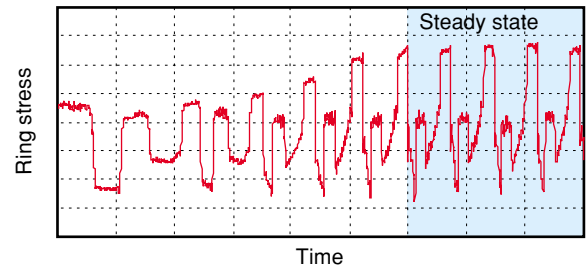


Fig.7 Time history of ring stress

も考慮しているため、左右のリング応力波形で違いが見られる(Fig.8参照)。リングにはミスアライメントによる積層リング間の幅方向すべりを抑制させるため、クラウニング形状が施されており、張力が負荷されると幅方向に応力分布が発生する。ミスアライメントは更にこれを助長し、リング端部応力を上昇させることがわかる。

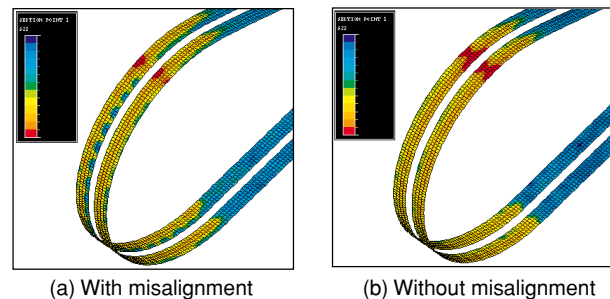


Fig.8 Influence of belt misalignment

4. ベルト耐久性判断

CVTの運転条件はレシオ、伝達トルク、エンジン回転数及び、プーリー側圧で規定される。すなわち、これらのパラメータのそれぞれがリング応力波形に影響を及ぼしており、リング疲労寿命を越えない範囲での応力状態で運転されることが重要である。

4.1. 高速耐久時の SN 線図

そこで、限界回転数付近でのベルト耐久性を調べるため、レシオは固定し伝達トルク、エンジン回転数及び、プーリー側圧を2水準ずつ選び、破損に至るまでのベルト寿命を測定した。その破損形態はいずれも最内層リング内側表面を起点とした疲労破壊と推定された。

一方、これらの運転条件に対応した最内層リング応力を求めるため本シミュレーションを適用した。その結果、Fig.9に見られるような高速耐久テスト時の SN 線図が得られ、相関係数は0.92という高い相関を得た。

以上のことから、限界回転数付近でのベルト耐久性は最内層リング内側の応力振幅で判断できることが初めてわかった。

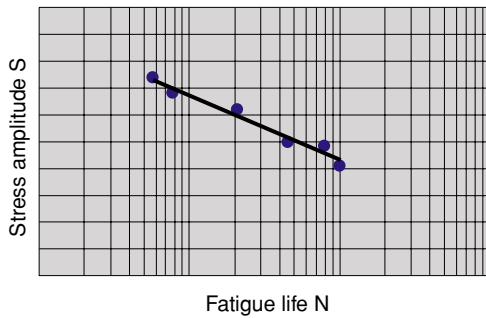


Fig.9 V-belt SN curve

5. ベルト耐久性の向上

ベルト耐久性を向上させる上で金属ベルト諸元そのもののリング応力への影響を調べるのが最も効果的ではあるが、前述のとおり、金属ベルトはVan Doornes Transmission社製を採用しており、諸元変更は難しい。そこで、ベルト挙動に直接影響を及ぼすであろうプーリー剛性について考察をくわえた。

5.1. プーリー剛性の影響

Fig.10 にプーリー剛性の影響を調べるために用いた解析モデルを示す。ドライブ側とドリブン側ともにムーバブルプーリーをモデル化したもので、剛性は等価である。計算時間の都合上、対称条件を用いていることからベルトミスアライメントは考慮していない。すなわち、プーリーのたおれ量がベルト応力に与える影響のみを調べる。

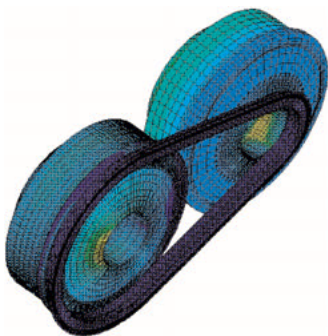


Fig.10 Flexible pulley model

また、Fig.11 に本シミュレーションを適用したときのプーリーたおれ量を先端変位で示す。

プーリーのたおれは先端にいくほど大きくなるためベルトが外側に巻きつくドライブ側で大きくなる。また、ベルト荷重はプーリーに巻きついている領域で変化していることから、Fig.11 の変位は非対称になる。

更に、プーリー幅はベルトが巻きついている領域で広がっており、逆に巻きついていない領域では狭まる。

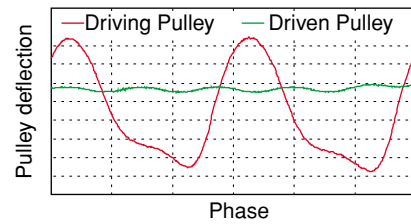


Fig.11 Pulley deflection

このためFig.12に示すようにエレメントV面に作用する荷重はプーリー出入口部での衝撃荷重を増加させる⁽⁷⁾。

このことは金属ベルトから観るとプーリーに飛び込み難くなるとともにプーリーから脱出し難くなることを表わしており、エレメントには厳しい。

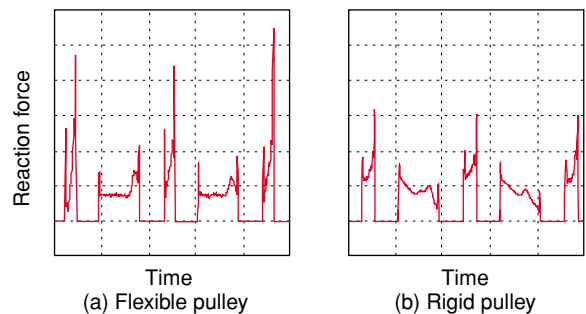


Fig.12 Reaction force on V-surface

このときの最内層リング応力波形をFig.13に示す。プーリーたおれによるリング応力への影響がドライブプーリー巻きつき領域ではっきりと認められる。応力振幅についてもプーリー剛性が低いと若干大きくなっている。

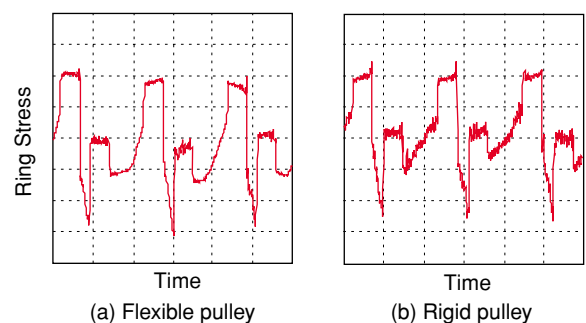


Fig.13 Influence of pulley flexibility

これはプーリーのたおれによってレシオがTop レシオからOD レシオ側へ僅かに変化することで、リング曲げ応力が増加しているものと思われる。

5.2. プーリー剛性バランス

CVT断面図から明らかなおとおり、金属ベルトは左右から剛性の異なる対のプーリーで挟まれている。

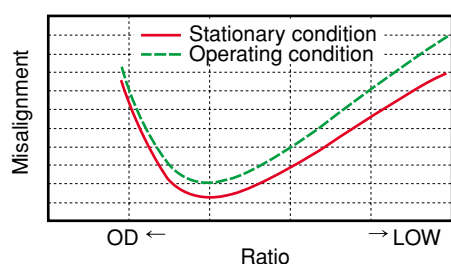


Fig.14 Influence for belt misalignment

7. まとめ

金属ベルトの耐久性を予測するために高回転領域での最内層リング応力を求めるシミュレーション技術を開発した。これにより、次の知見を得た。

- (1) ベルトミスアライメントはリング幅方向に偏りを持った応力分布を発生させるため、リング端部での応力を高める。
- (2) 最内層リングの内側応力振幅を高速耐久時の SN 線図の縦軸とすることで耐久寿命との相関が得られた。
- (3) プーリー剛性によるたおれ変位により、エレメントに作用する V 面荷重はプーリー出入口部で顕著に増加する。
更に、左右のプーリー剛性バランスによるミスアライメント増加を考慮することがベルト耐久性の向上には重要である。
- (4) 開発したシミュレーション技術を設計者にも利用可能にするため寸法入力式の解析システムを構築した。これによって、短時間で金属ベルトモデルの構築が可能になった。

8. あとがき

今後ますます高まる CVT の伝達容量拡大ニーズのなかで、金属ベルトの耐久性を判断する本技術は CVT の基本骨格を決定づける重要な位置づけにある。今後、摩擦係数の同定を進めることによりさらなる精度向上と、常に設計者の視点にたったシミュレーション技術の構築に邁進したい。

最後に本シミュレーションを開発するにあたり、ソルバーの改良や計算時間の短縮で長年多大なる御協力を頂いた Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

9. 参考文献

- (1) 金原 茂ほか：押しブロック式金属ベルトの伝達機構に関する研究, Honda R & D Technical Review, Vol.7,p.49-67(1995)
- (2) 浅山 弘樹ほか：金属製圧縮タイプベルトの駆動メカニズム, 自動車技術, Vol.26, No.2, p.78-81(1972)
- (3) Kido,R.Kusano,T.: A New Approach for Analyzing Load at Steady States Using FEM, SAE Paper 940690,1994
- (4) Shimizu,H.et.al.: Development of 3-D Simulation for Analyzing the Dynamic Behavior of a Metal Pushing V-Belt for CVTs, JSAE paper, Vol.8-99,1999
- (5) Yoshida,H.: A Study of Forces Acting on Rings for Metal Pushing V-Belt Type CVT, SAE Paper970686
- (6) 藤井 透ほか：金属 V ベルトを用いた CVT に関する研

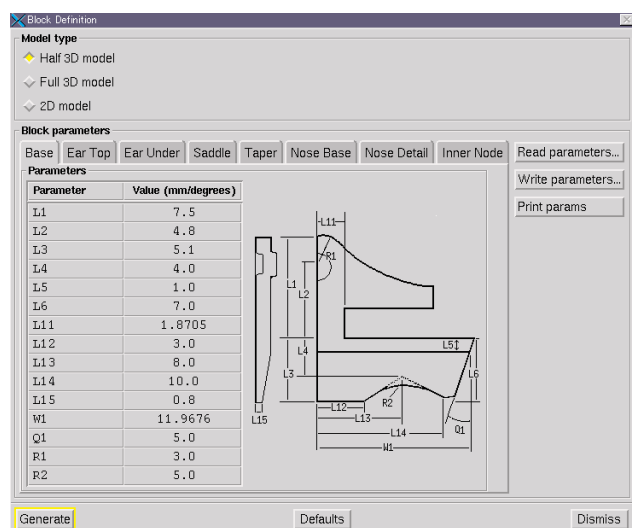


Fig.15 CVT belt system

究, 自動車技術, 学術講演会前刷集 975 1997-10, p.269-272

- (7) Sauer, G.: Grundlagen und Betriebsverhalten eines Zugketten Umschlingungsgetriebes, Nr.293, Dusseldorf: VDI-Verlag 1996.

■ 著 者 ■



斎藤 俊博



岡野 武政