

CVT 過渡運転条件における金属ベルトの 応力シミュレーション

Simulation of Stress on Elements of Metal Pushing V-belt for CVT
under Transient Operating Conditions

齋 藤 俊 博*
Toshihiro SAITO

要 旨

発進時のトルクコンバータ付きCVTの金属ベルトは、急激なプーリ推力の立ち上がりを受け、停止状態からわずかな時間でトルク伝達することが求められる。本稿では、金属ベルト挙動とエレメント応力を同時にシミュレートする技術を用いて、発進時の過渡運転条件におけるエレメントネック部廻りの応力履歴を明らかにした。その結果、エレメントネック部応力の支配因子はV面荷重であり、これにエレメント間押し力による曲げが追加される形であることがわかった。シミュレーション結果の確からしさを検証するためエレメントに作用する荷重分布を実験値と比較した結果、定性的な一致が見られた。あわせて、この過渡的な応力を評価する手法についても示す。

ABSTRACT

The metal pushing V-belt of a torque converter-equipped CVT receives a sudden thrust load from the pulleys when the CVT starts operation, and is required to begin transmitting torque from a stationary state in a very short time span. In the research discussed in this paper, the stress history of the area around the element neck under the transient conditions of CVT start-up was studied using a technology enabling simultaneous simulation of the dynamic behavior of the metal pushing V-belt and stresses on the elements. The results of this study indicated that the load on the V surface of the element is the dominant factor in the generation of stress on the element necks, and that bending stress generated by the pushing force between the elements also acts on the element necks. To confirm the accuracy of the simulation, results were compared with the results of tests conducted to determine the load distribution on the element. The two sets of results demonstrated a good qualitative correlation. This paper also discusses the method employed to evaluate transient stress.

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なかで、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、エンジンとの協調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っている^{(1), (2)}。Fig. 1 に示すトルクコンバータ付きCVTの発進時においては、トルク増幅効果により力強い発進特性と、CVTならではのなめらかで伸びのある加速特性を両立させている。

一方、駆動系に負荷される最大入力トルクという観点からすると、車両発進時が最もCVTには厳しい。トルクコンバータ付きCVTのプーリおよび金属ベルトは、停止状態か



Fig. 1 CVT with torque converter

*四輪開発センター

ら急激なプーリ推力の立ち上がりを受け、わずかな時間で最大入力トルクを伝達しなければならない。このとき重要なのが、金属ベルトの動的強度の確保である。動的強度は単に最大入力トルクだけで決まるのではなく、レシオやプーリ側圧および、プーリ回転数の時間変化を含めた過渡的な現象として捉える必要がある。

しかしながら、CVTの発進時におけるプーリと金属ベルト間のすべりに着目した伝達容量の研究は数多く見られるものの^{(3), (4)}、金属ベルトそのものの動的強度を論じる研究はほとんど例をみない⁽⁵⁾。これは、CVT実働時の金属ベルト強度を知る上で欠かせないベルト挙動やエレメント応力を計測することが一般的に困難であることによる⁽⁶⁾。

既報⁽³⁾ではベルト実働時の積層リングに発生する動的応力に着目し、金属ベルト挙動をシミュレートする技術を開発した。また、プーリたおれ剛性がリング応力におよぼす影響についても報告⁽⁷⁾した。さらに、金属ベルト挙動シミュレーション結果から得られるエレメント接触面圧を用いてエレメント単体の詳細応力を計算する手法も開発し、エレメント応力分布をベルト全周にわたって明らかにした⁽⁸⁾。本稿では新たに、発進時の過渡運転条件におけるエレメントネック部廻りの応力履歴をシミュレーションにより初めて明らかにできたので報告する。

2. ねらい

CVTの主断面図を Fig. 2 に示す。駆動トルクは、金属ベルトのエレメントとプーリ間に発生する摩擦力により、ドライブプーリからドリブンプーリに変速し伝達される。この摩擦力は、プーリ側圧によりベルトを挟み込むことに

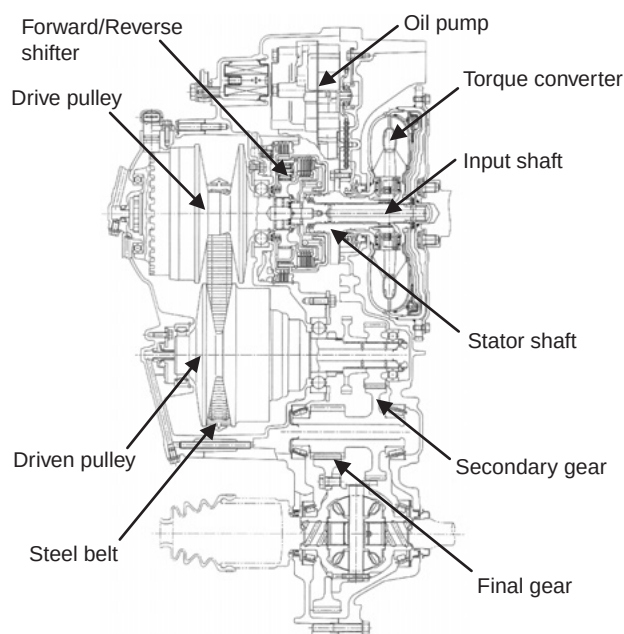


Fig. 2 CVT main section

よって発生させている。運転中の金属ベルトのエレメントやリングに発生する応力レベルは、変速レシオ、プーリ側圧、回転速度および伝達トルクのレベルによって決定される⁽⁹⁾。経験上、プーリやエレメントの疲労寿命に対する繰返し荷重は、リングのそれに比べて小さいことが知られている⁽¹⁰⁾。このため、リング材料の不純物を低減させることで、金属ベルトの疲労強度を向上させる対策がとられてきた⁽¹¹⁾。

その一方で、CVTのレシオレンジの拡大や大排気量エンジンとの組み合わせなどのニーズの高まりにより、発進時のトルク増幅を受けるエレメントの疲労強度を把握することも重要となってきた。材料改良や熱処理技術によりリング強度が向上してきたため⁽¹²⁾、従来より高負荷条件の耐久テストでは破損起点がリングからエレメントに移ってきていることにも現れている⁽¹³⁾。これに対応していく上で、発進時の金属ベルト挙動とそれによって発生するエレメント応力を知ることが重要である。

そこで、本研究では発進時に代表される過渡運転条件でのエレメント応力履歴をシミュレーションにより定量化し、金属ベルト強度の位置づけを明らかにすることをねらいとする。

3. エレメント応力予測技術

CVTの発進時におけるエレメント応力を予測するため、既報の金属ベルト挙動とエレメント応力を同時にシミュレートする技術を応用した。本手法はエレメント応力を求める正攻法であるが、定常状態における積層リングの動的強度に着目していた時点では、プーリ回転数を停止状態から定常状態まで徐々に上げるのにとっても長い計算時間を必要とした。しかしながら、金属ベルトの解析モデルを複数の計算領域に分割することで計算効率が向上してきたことや、プーリ停止状態から発進までの短時間の現象を捉えればよいことなどから、従来よりも半分以下の時間で計算が可能となっている。

3.1. 金属ベルト FEM モデル

Fig. 3 に解析に用いた金属ベルトの FEM モデルを示す。

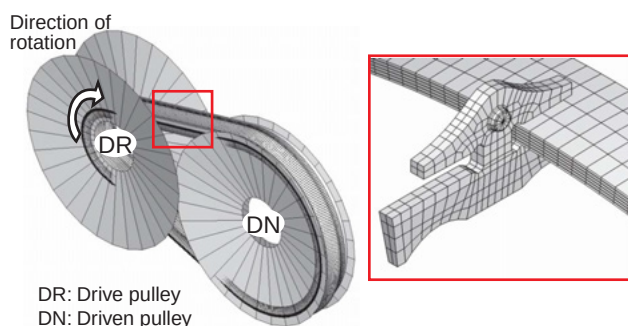


Fig. 3 Belt model defined as flexible bodies

個々のエレメントは、曲げ変形を再現させるため板厚方向に二つの弾性体ソリッド要素を用いた。また、応力集中を起こすと考えられるエレメントネック部のR部分は、三つの弾性体ソリッド要素で分割した。ただし、ノーズおよびホール部分に関しては、詳細形状の再現を優先し剛体要素でモデル化した。一方、リングについてはクラウニングを再現するため幅方向に四つの弾性体シェル要素を用いて各層をモデル化した。さらに、リングとエレメント間、エレメントとエレメント間、リングとリング間およびエレメントとプーリ間には接触面を定義し、それぞれに適切な摩擦特性を与えた。

3.2. CVT 発進時の負荷条件

駆動系に加わるトルクは、エンジン側からのものと車輪側からのものがある。駆動系への大入力トルクはエンジン側からが主と考えられていたが、車輪側から加わるトルクもかなり大きいことが報告されている⁽¹⁴⁾。特にトルクコンバータ付きCVTはドリブンプーリ側にクラッチ機構を持たず、車輪側からのトルクを遮断できないことから注意が必要である。Fig. 4にCVTの発進時における金属ベルトへの負荷条件の時間変化を計測した一例を示す。スロットルを全開にすると直ちにプーリ圧力が立ち上がり、プーリが回転し始めるとともに金属ベルトへの入力トルクも増加し始める。この間、レシオはLOWの状態を維持し続けている。このように、スロットル操作に対する駆動系の応答時間を短くすればするほど、力強い発進特性が得られることになる。なお、この例では金属ベルトへの入力トルクはエンジン側からとなっている。

3.3. CVT 発進時のエレメント応力履歴

実機では、運転中に軸推力の大きい方のプーリ側圧をフィードバック制御し、目標レシオを維持する。本シミュレーション手法では、ドライブおよびドリブンプーリ側圧とドライブ側プーリ回転数、そしてドリブンプーリに伝達トルクを時間変化する波形として入力している。こうして得られたエレメント応力の時刻歴波形をFig. 6に示す。破

線はエレメントの右側ネック部で進行方向後ろ側での応力を、実線は左側ネック部で同じ位置での応力をそれぞれ表す(Fig. 5)。いずれの波形もドライブプーリ出口手前で最大応力となり左右でほとんど変わらないことから、左右対称に荷重を受けていることがわかる。また、Fig. 7にはエレメントのネック部で進行方向前側と後ろ側での応力を比較している。ドライブプーリに巻きついていく区間のほぼ三分の二までは、ともに圧縮応力状態で絶対値も同じ値を示すが、その後は両者に差が現れ始め、プーリ出口直後でエレメント後ろ側での応力は引っ張り応力状態に転じている。これは、エレメントがプーリ出口手前の三分の一付近からトルク伝達要因であるエレメント間押し力を受け始めるためと考えられる。エレメント間押し力は前後から作用するが、

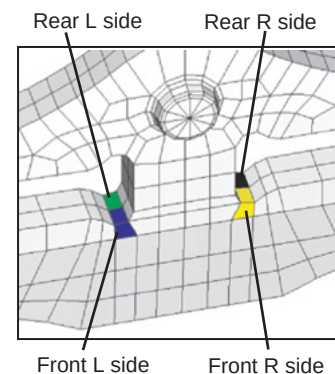


Fig. 5 Evaluation points for element stress

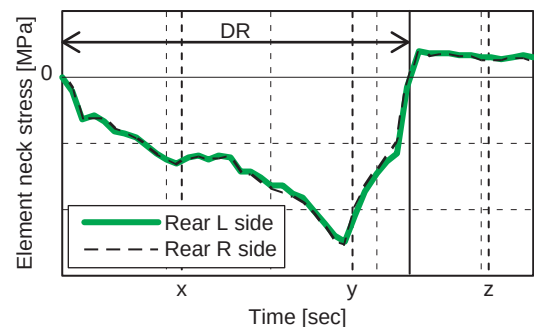


Fig. 6 Time history of element stress

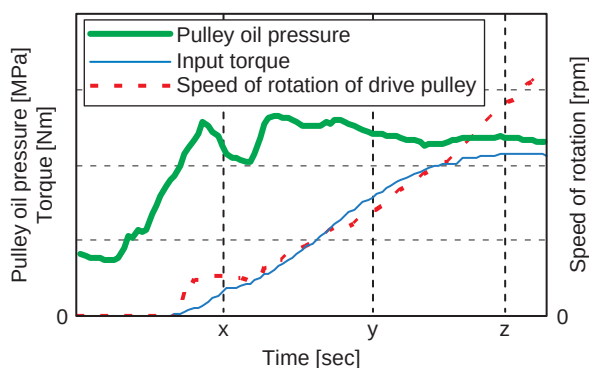


Fig. 4 Load conditions on CVT at start-up

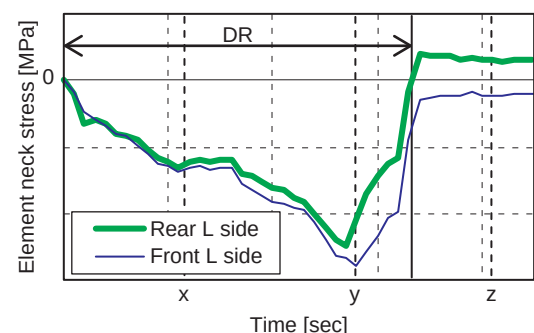


Fig. 7 Comparison of stress on front and rear of element

ドライブプーリに巻きついている間は進行方向の前側のほうが高くなる (Fig. 8)。このためエレメントは進行方向に対し凹型の曲げ変形が生じ、ドライブプーリから出たあとも曲げ変形を保っている (Fig. 9)。

3.4. ベルト全周のエレメント応力分布

前節ではひとつのエレメントに着目して、発進時に生じるネック部の応力を時刻歴波形として示した。定常回転の条件であれば時刻歴波形でベルト全周のエレメント応力分布をとらえることができるが、発進過渡の条件ではベルト全周に対しエレメントはわずかな距離しか移動しない。こ

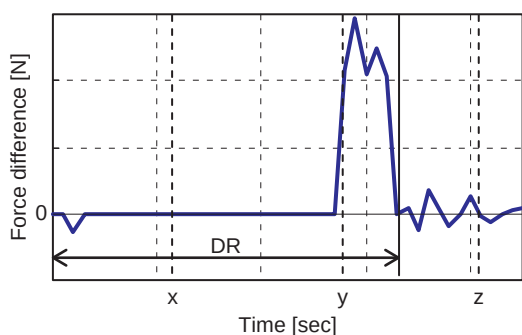


Fig. 8 Force difference between front and rear of element

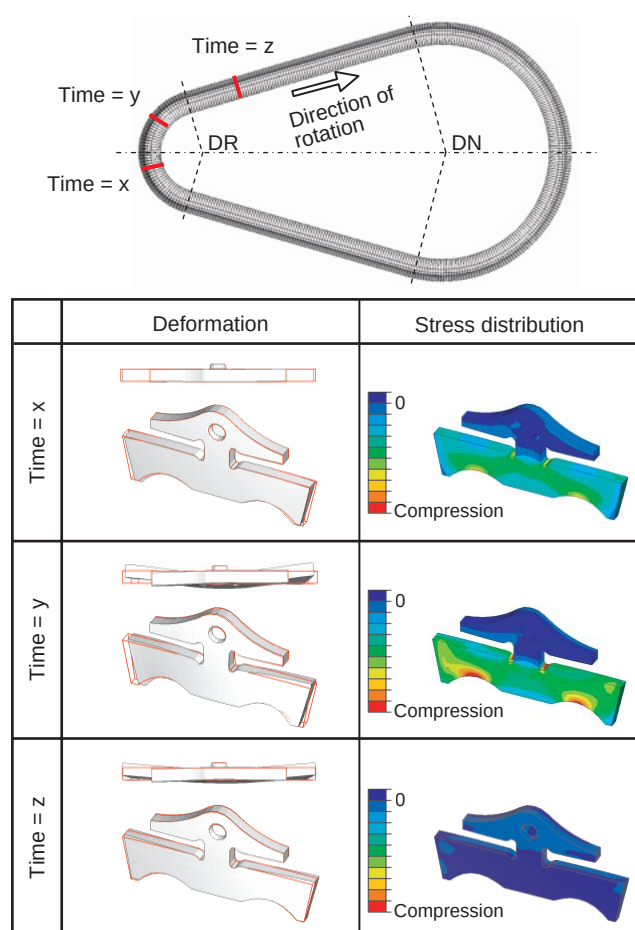


Fig. 9 Deformation of element at start-up

のためベルト全周のエレメント応力分布を知ることは難しくなる。そこで、あるタイミングのベルト全周にわたる応力コンター図を Fig. 10 に示す。また、全エレメントに生じるネック部応力を拾い出した結果を Fig. 11 に示す。抽出したタイミングは、Fig. 4に示すx, yおよびzである。Fig. 11の結果は、ドライブプーリ出口前後でエレメントネック部の応力振幅が最大となることを示しており、その値は Fig. 7 で示した時刻歴波形の応力振幅と一致する。

3.5. 過渡時のエレメント応力発生メカニズム

次に、エレメント応力の支配因子を明らかにするためトルク伝達メカニズムを調べた。金属ベルトのトルク伝達は、エレメント間押し力によるトルク成分とリング張力差によるトルク成分から成ることが知られている。Fig. 12に発進過渡条件でのエレメント間押し力、リング張力およびエレメントV面荷重分布を示す。弦部ab間でのブロック間押し

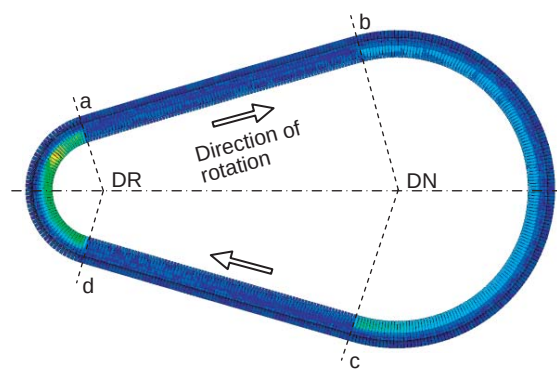


Fig. 10 Element stress distribution

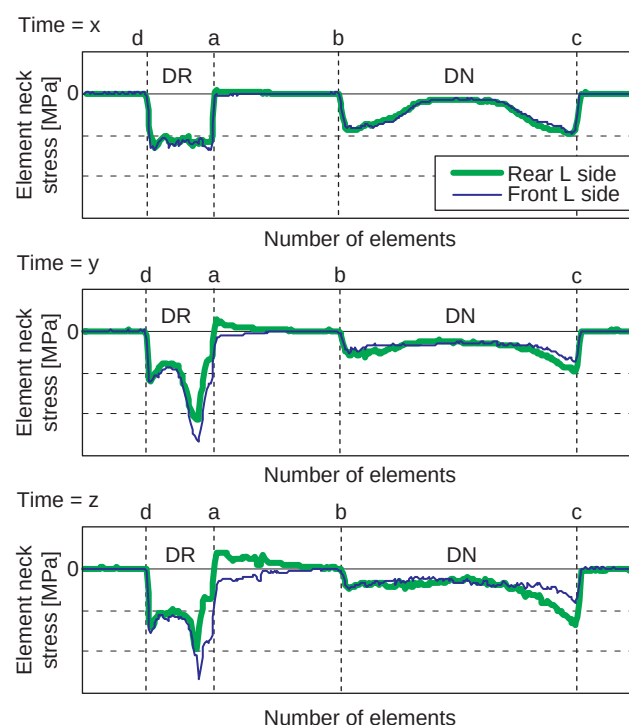


Fig. 11 Instantaneous stress distribution on element neck

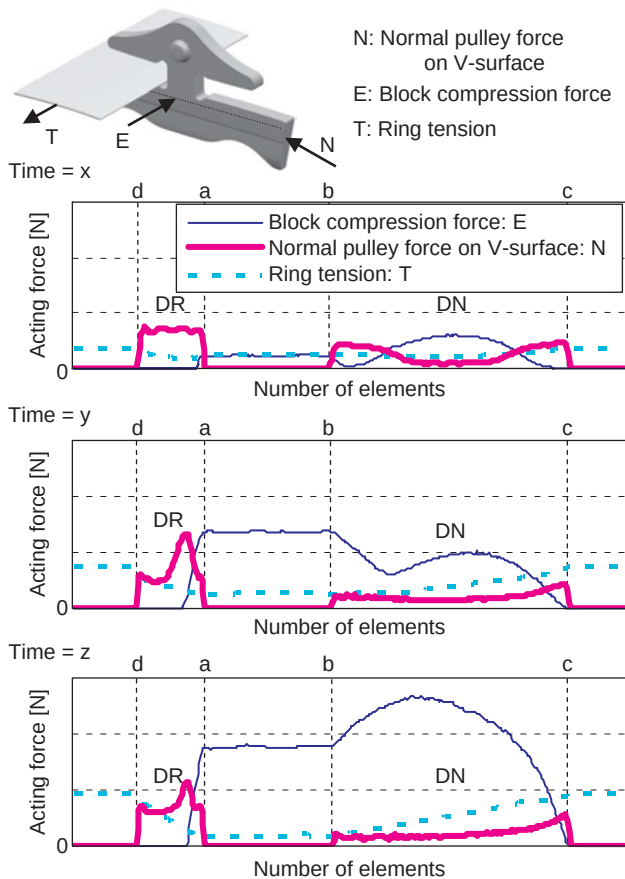


Fig. 12 Instantaneous acting forces across belt

力は時間とともに増加している。また、弦部 cd 間と弦部 ab 間のリング張力差も時間とともに増加しており、トルク伝達に寄与している。

さらに、エレメント V 面荷重分布に注目すると、Fig. 11 のエレメント応力分布と似ていることがわかる。また、エレメント押し力の変化が大きい個所でエレメント応力の前後差が発生していることもわかる。以上のことから、エレメントネック部応力の支配因子は V 面荷重であり、これにエレメント間押し力による曲げが追加される形であると考えられる。

4. 過渡運転状態のエレメント強度

過渡運転条件のエレメント耐久性を評価するため車両を用いて発進、停止を繰り返すのは、膨大なテスト時間を要するため現実的とはいえない。そこで、スロットル開度をパラメータとして負荷条件を振った定常運転条件の耐久テストへ置換することを考える。

4.1. 定常運転条件のエレメント応力

Fig. 13 に、ある定常運転条件におけるエレメントネック部のシミュレーションによる応力波形を示す。

4.2. エレメント応力の検証

前述のエレメント応力を検証するため、ベルトが 1 回転する間にエレメントへ作用する荷重を実験値と比較する。実験値はある方向の荷重だけの感度を上げるためエレメン

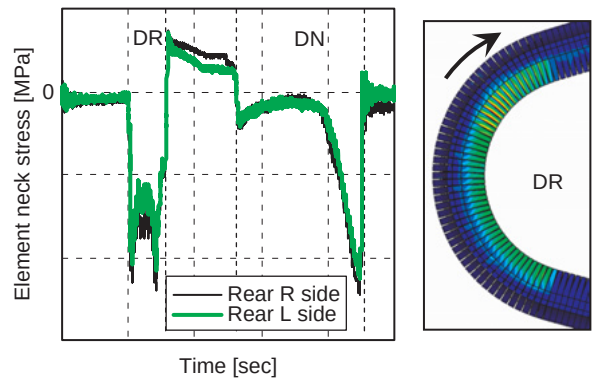


Fig. 13 Element stress in steady-state

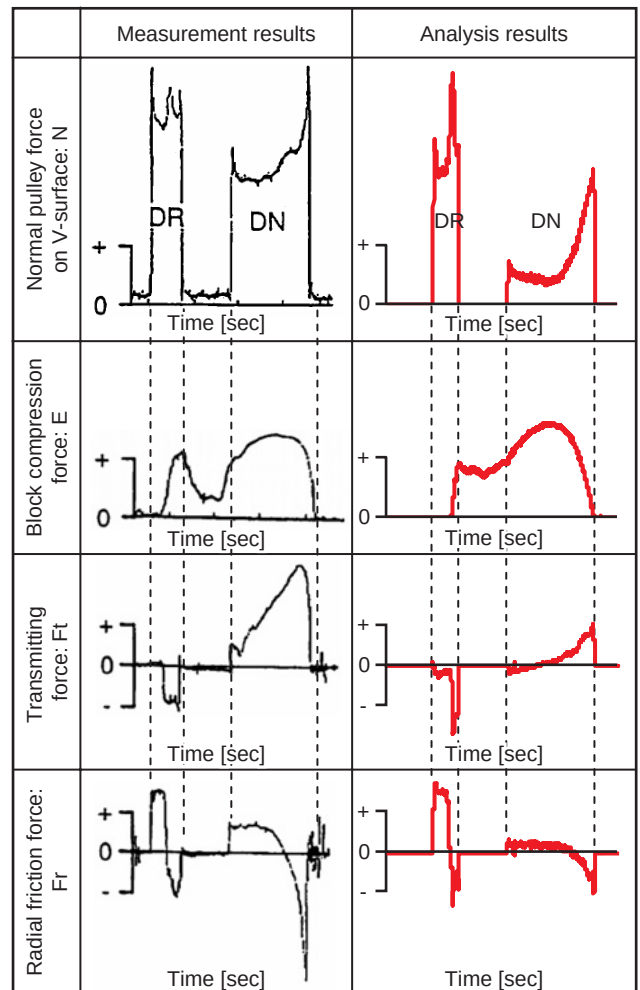
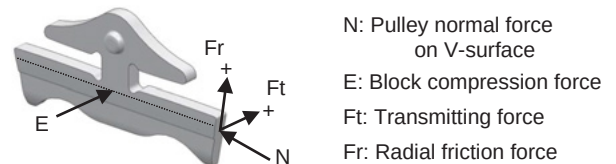


Fig. 14 Comparison of acting forces on element

トに加工を施していた⁽¹⁵⁾。そのため、定量的な検証はできないが、定性的には両者の荷重分布に良好な一致が見られる (Fig. 14)。

4.3. 過渡運転条件の位置づけ

負荷条件を四水準変化させて LOW レシオでの定常耐久テストをおこない、得られたベルト SN 線図を Fig. 15 に示す。縦軸には、定常耐久テスト条件でシミュレーションをおこなったときのエレメントネック部の応力振幅を示す。エレメント強度はエレメントネック部の応力振幅と相関をもつことが示されている。次に、過渡運転条件におけるエレメント強度の位置づけを確認するため、SN 線図上に Fig. 11 で得られた応力振幅を水平線として示す。SN 線図と水平線の交点から、現状の耐久テスト条件は、発進時のような過渡運転条件の使われ方をも包含しており、金属ベルトの動的強度は十分に確保されているといえる。

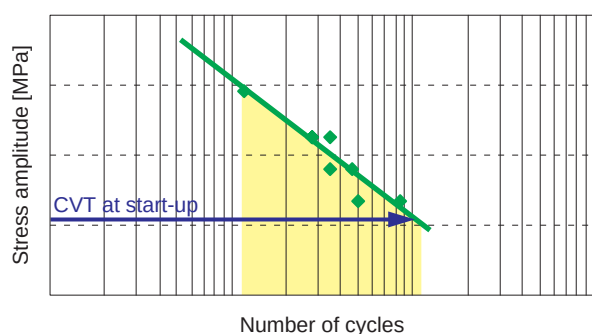


Fig. 15 Stress number diagram

5. まとめ

CVT金属ベルトのエレメント応力予測技術を過渡運転条件に適用することで、以下のことを明らかにした。

- (1) CVT発進時のエレメントネック部応力振幅は、ドライブプーリー出口前後で最大となる。
- (2) エレメントネック部応力の支配因子はV面荷重であり、これにエレメント間押し力による曲げが追加される形であると考えられる。
- (3) 定常運転条件のシミュレーションと耐久テストからエレメントネック部の SN 線図を作成し、過渡運転条件における金属ベルト強度の位置づけを明らかにした。すなわち、過渡運転条件においても、本手法により金属ベルトの動的強度を検討することが可能であることがわかった。

6. あとがき

金属ベルトの伝達容量拡大が急速に求められている現在、金属ベルトの過渡運転条件におけるエレメント応力履歴を

シミュレーションで明らかにすることが可能であることを示した。今後、さらにその精度を高め、高容量でハイレスポンスな CVT 開発につなげていきたい。

参考文献

- (1) 佐藤洋一, 浦野純司, 大橋章人, 左久間信次, 山口正明: 新型Odyssey用CVTの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.87-94
- (2) 加藤芳章, 山下弘, 河野義裕: 3.5L クラス金属ベルト CVTのトルク容量解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.65-03, p.1-4(2003)
- (3) Kobayashi, D., Mabuchi, Y., Katoh, Y.: A Study on the Torque Capacity of a Metal Pushing V-Belt for CVTs, SAE Paper, 980822(1998)
- (4) Pennings, B., Drogen, V. M., Hepp, M., Ginkel, V. E., Brandsma, A.: Van Doorne VDT Fluid Test: A Test Method on Belt-Pulley Level to Select Fluids for Push Belt CVT Applications, SAE Paper, 2003-01-3253(2003)
- (5) 岡田卓也, 野澤啓文, 服部勇仁, 谷裕文: プーリー剛性を考慮した金属ベルトの応力検討, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.47-06, p.15-18(2006)
- (6) 清水宏文, 小林大介, 川島純一, 加藤芳章: 金属Vベルトの動的挙動に関する3次元数値解析手法開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.8-99, p.9-12(1999)
- (7) 斎藤俊博, 岡野武政: CVT プーリー剛性を考慮した金属ベルト応力シミュレーションの適用, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.191-196
- (8) Saito, T., Miyamoto, K.: Application of Technique for Prediction of Stress in Elements of Metal Pushing V-belt by Simulation of Dynamic Behavior, SAE Paper, 2006-01-1307(2006)
- (9) 金原茂, 藤井透: 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
- (10) Pennings, B., et al.: New Push-Belt Design to Increase Power Density of CVTs Featuring a New Maraging Steel, San Francisco, VDI-Verlag(2004)
- (11) 矢ヶ崎徹, 青山英明, 斎藤俊博, 石井和夫, 岡田善成, 有川守: CVT 用金属ベルトの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.14, No.1, p.181-190
- (12) Sluis, V. D., et al.: Stress reduction in push belt rings using residual stresses, Proceedings of CVT2002 Congress, VDI-Berichte 1709, Munich, p.383-402(2002)
- (13) 矢ヶ崎徹, 青山英明, 大貫基範, 岡田善成, 片岡隆平: 2L クラス CVT 用金属ベルトの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.95-102
- (14) 山下幸司, 成瀬利孝: 駆動系に負荷される大入力の手

測技術, MAE テクニカルレポート, No.13(2004)

- (15) Kanehara, S., Fujii, T., Kitagawa, T.: A Study of a Metal Pushing V-Belt Type CVT - Part 3:What Forces Act on Metal Blocks?, SAE Paper, 940735(1994)

■ 著 者 ■



齋藤 俊博