

金属ベルト挙動シミュレーションによる エレメント応力予測技術の開発

Development of Simulation Technique for Element Stress Prediction of Metal Pushing V-belt

斎藤 俊博*
Toshihiro SAITO

宮本 浩二**
Koji MIYAMOTO

要 旨

CVTの骨格部品である金属ベルトの動的強度を予測するためベルト挙動とエレメント応力を同時に解くシミュレーション手法を開発した。本手法ではCVTの高速運転領域のベルト挙動を再現させるため、時系列で大規模接触解析が可能な有限要素法を採用した。本稿では実働時のエレメント強度に着目し、その詳細応力をシミュレートできるよう改良を加えた。エレメント単体の詳細応力を計算する際にイナーシャリリーフと呼ばれる拘束条件を不要とする手法を新たに導入した。その結果、ベルト軌道上の任意の位置でのエレメント詳細応力を求めることが可能になった。さらに、プーリ出入り口近傍でのエレメントネック部応力がベルト動的強度に影響を及ぼしていることを明らかにした。あわせて、この応力を評価する手法も示した。また、エレメントの背面に設けられた段差形状が、ベルト動的強度へ影響を及ぼすことも考察した。

ABSTRACT

A simulation method enabling simultaneous prediction of dynamic behavior and stress distribution on element has been developed for durability evaluation of dynamic strength of metal pushing V-belts. The finite-element-method that enables contact analyses in time history with large-scale model was adopted to reproduce the dynamic behavior of the V-belt in high rotational speed range of CVT. This paper focuses on the element strength in actual operation of CVT, and also discusses modifications made to the previously reported simulation method to enable the prediction of detailed stress. A new technique named inertia-relief is introduced needless of applying the constraint conditions when calculating the detailed stress on element in respectively. This results in allowing the stress distribution on any element to be found at any position on the trajectory of the V-belt. Using this technique, it has been found that the stress on the necks of elements at the entrance and exit of the pulleys affects the dynamic strength of the V-belt. Furthermore, a method of evaluating this stress was also determined. In addition, consideration was given to the effect of the elements tail side concave shape on the dynamic strength of the V-belt.

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)}。伝達容量拡大を検討する上で

最も重要なのが、金属ベルトの動的強度の確保である。その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、変速レシオやプーリ側圧及び、最大許容回転数との関係で経験的に決定される。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^{(3), (4)}。そのような状況でさらなる高回転対応を目指し、最適なベルト形状を見いだすことは技術的にも工数的にも困難になってきている。そのためベルト形状、とくにエレメント形状の動的強度に及ぼす理論的な探究が求められている⁽⁵⁾。既報⁽³⁾ではベルト実働

* 栃木研究所

**株式会社アイティーオー

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及ぼす影響についても報告⁽⁶⁾した。本稿では既報で開発した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を新たに開発した。その結果、従来は知ることのできなかった高速運転領域でのエレメント応力状態をベルト全周にわたって初めて明らかにした。なかでもプーリ出入口近傍でのエレメントネック部応力が金属ベルトの動的強度に影響を及ぼしていることを明らかにできたので報告する。

2. 開発のねらい

CVT の主断面図を Fig. 1 に、自社製金属ベルトを 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、回転速度及び、伝達トルクのレベルによって決定される⁽⁷⁾。経験上、プーリやエレメントの疲労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⁽⁸⁾。そのため、金属ベルトの動的強度を向上させるため、リング材料の不純物を低減させ疲労強度をあげる対策がとられてきた⁽⁹⁾。

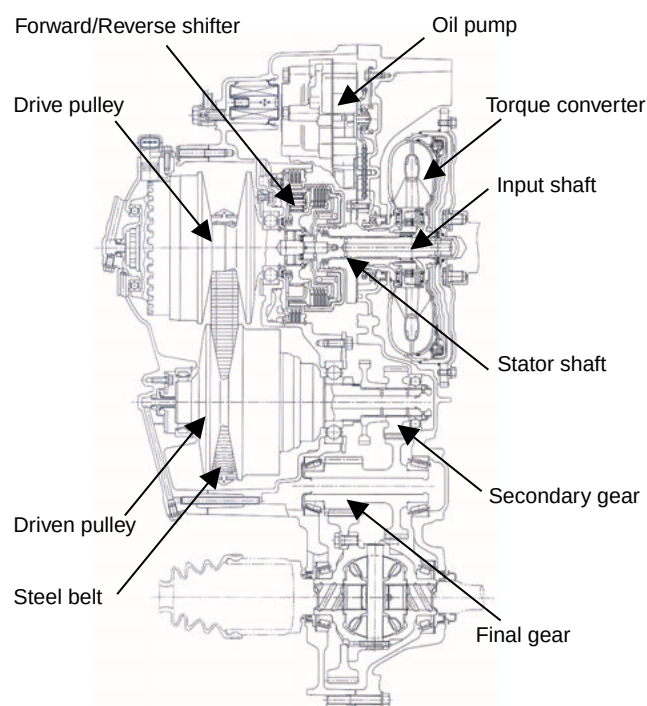


Fig. 1 CVT main section

その一方で、CVTのレシオレンジの拡大や高回転型エンジンとの組み合わせなどのニーズの高まりにより、遠心力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。材料改良によりリング強度が向上してきたため⁽¹⁰⁾、従来より高回転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⁽¹¹⁾(Fig. 3)。これに対応していく上で実働時のエレメント挙動とそれによって発生する応力を知ることが重要である。そこで、本研究では高速回転領域でのエレメント破損メカニズムを明らかにするため、新たにエレメント応力予測技術を開発することをねらいとした。



Fig. 2 Metal pushing V-belt



Fig. 3 Damaged element

3. エレメント応力予測技術

このシミュレーション手法はエレメント応力を求める正攻法であるが、積層リングの動的応力に着目していた時点⁽⁶⁾では計算時間的に成立しなかった。しかしながら、最新の計算領域分割による並列計算技術を採用することで実用的とはいえなくても耐久テストとほぼ同等の時間で計算可能となった。

3.1. 金属ベルト FEM モデル

Fig. 4 に自社製金属ベルトの FEM モデルを示す。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、ノーズ及び、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、リングとリング間及び、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. プーリ剛表面モデル

プーリ剛性はベルトの動的挙動に多大な影響を及ぼすことからコネクタ要素を用いて、たおれ剛性を再現するようにした。軸方向に移動するプーリと固定側シャフトプーリはそれぞれ異なる剛性値を定義した。剛性値そのものは3次元の FEM プーリモデルに静的なベルト荷重とプーリ側圧を加えた際のたわみ量から逆算した。ただし、プーリ表面は剛表面としている。これはプーリを弾性体ソリッド要素でモデル化すると本来のスムーズな表面を再現できなくなるためである。

3.3. ベルトミスアライメント

ドライブプーリとドリブンプーリに巻き付く金属ベルトの中心は1平面内だけで運動するのではなく、わずかながら面外の挙動も起こす。この面外の金属ベルト変位をミスアライメントと呼んでいる。ミスアライメントが大きくなるとベルト寿命が短くなることが耐久テストなどから知られている。しかも、このミスアライメントは仮にプーリを剛体としてもゼロにはならず、その大きさはプーリ軸間距離と変速レシオによって決定される。そのため、シミュレーションモデルは面対称とはせず、3次元のフルモデルとした。

3.4. マルチ解析ステップ

Fig. 5 にベルト挙動シミュレーションの解析ステップを

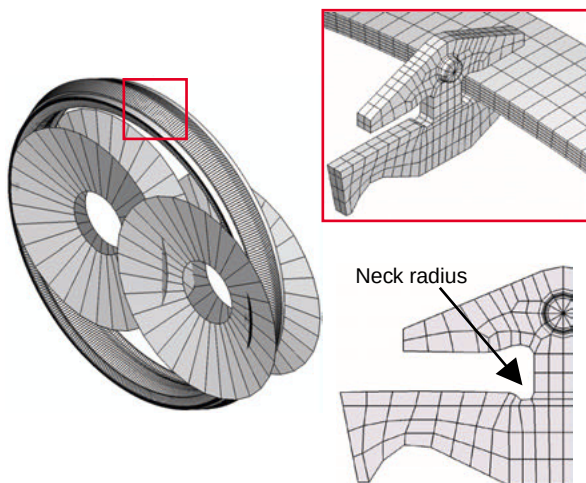


Fig. 4 Belt model defined as deformable bodies

示す。シミュレーションには時系列で大規模接触解析が可能な有限要素コードを採用した。ベルト真円位置を無応力の初期状態とし、両プーリを所定の軸間距離まで移動させてレシオを形成する。次にミスアライメントを片側のプーリに与え、プーリ側圧を加えながらドライブプーリを目標回転数まで徐々に強制回転させる。また、その間にドリブンプーリにエンジン入力トルクに変速レシオを乗じたカウンタトルクを徐々にかけていく。回転数、プーリ側圧及び、トルクがすべて定常状態と判断されるまで継続する。

3.5. シミュレーションシステムとしての精度

実機では運転中に大径巻きつき側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⁽¹²⁾。しかし、本シミュレーション手法ではプーリ側圧を一定値として扱うため、変速レシオとドリブンプーリ回転数がシステムとしての応答となる。すなわち、レシオの時刻歴応答をみればシミュレーションシステムとしての精度を判断できる。Fig. 6 に示すように、本シミュレーションは負荷条件が一定となったところで目標レシオを維持していることがわかる。

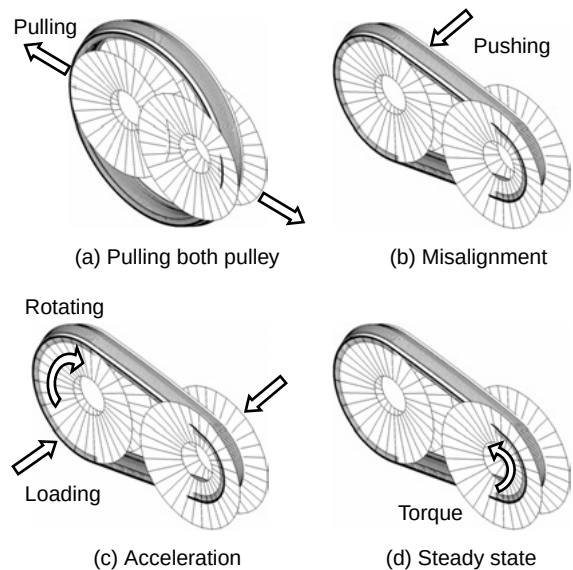


Fig. 5 Analysis procedure

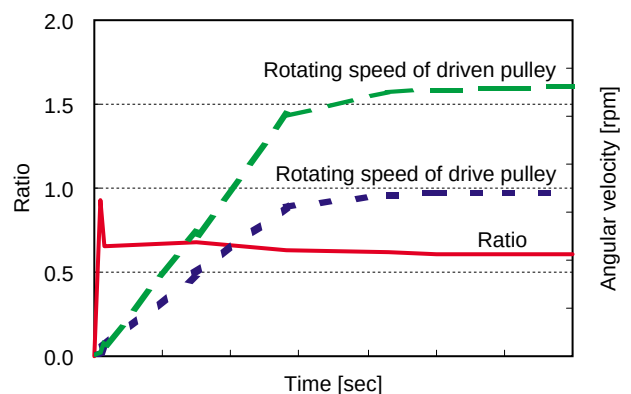


Fig. 6 Time history of ratio

3.6. ベルト実働時のエレメント応力

Fig. 7 にこのシミュレーションにより得られた定常状態でのエレメント応力のコンター図を示す。エレメント間押し力が主要因と考えられるロッキングエッジ付近の圧縮応力がドライブプリー入り口から徐々に立ち上がりドライブプリー出口近傍で最大となり、ドリブプリー出口で消滅する様子が見られる。一方、エレメント破損起点と推定されているエレメントネック部の応力についてはプリー出入口近傍で高くなっている。特にエレメント間押し力が発生しているドライブプリー出口で最大値が発生している。これはFig. 8に見られるように、エレメントV面衝撃荷重がプリーに出入りする瞬間で発生しているためと考えられる⁽¹³⁾。

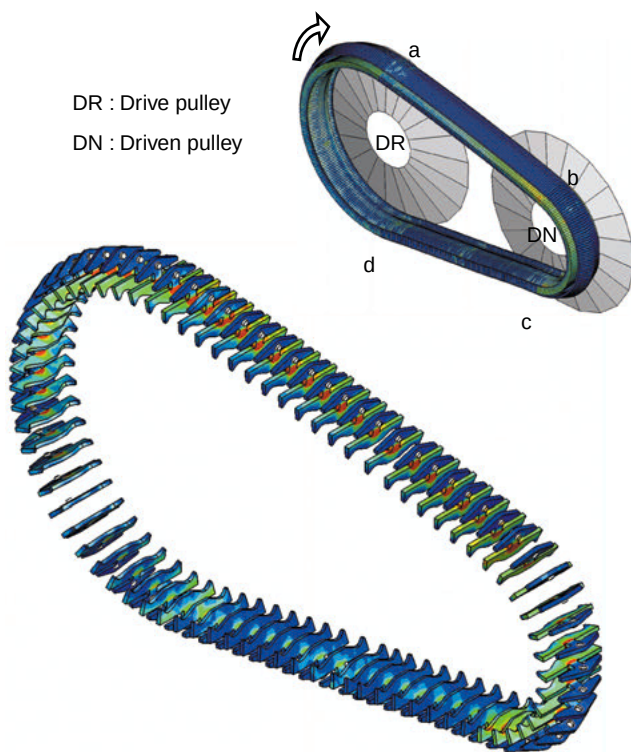


Fig. 7 Element stress distribution

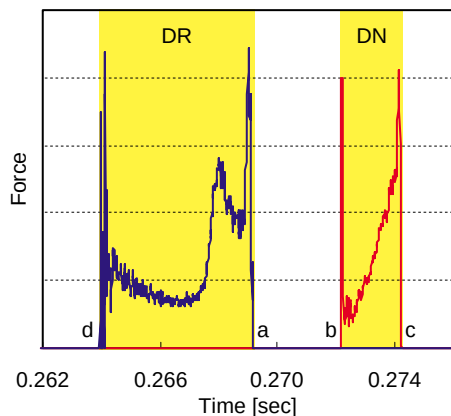


Fig. 8 Reaction force on V-surface

4. エレメント詳細応力予測技術の開発

前章の冒頭で述べたように、すべてのエレメントを弾性体として定義した応力シミュレーションは金属ベルト開発の過程で適用するには計算時間の観点から実用的とはいえない。そこで、既報のエレメントを剛体として定義したベルト挙動シミュレーションの結果を用いてエレメント応力をシミュレートすることを考える。

4.1. イナーシャリリーフ法

剛体エレメントを用いたベルト挙動シミュレーション結果から詳細な応力を求めたいエレメントに作用している接触面圧分布を抽出する。この接触面圧を詳細分割した単体の弾性体エレメントモデルに負荷する。通常はここでエレメントモデルのいくつかの節点に拘束条件を与えて剛体運動を止めなければ静応力解析はできない。しかし、拘束条件を与えてしまうと拘束点まわりに応力集中を起し、本来変形している部分を固定してしまうため正確な応力分布を知ることができない。そこで、新たにイナーシャリリーフと呼ばれる静応力解析手法を採用した。この手法は面圧荷重を与えられたエレメントを空中でバランスさせるため、残差荷重分のイナーシャを重心点に自動的に追加する。その結果、拘束条件を必要としない静応力解析が可能となる。

4.2. エレメント詳細応力分布

Fig. 9 に本手法により得られたエレメントの詳細応力分布を示す。ベルト軌道上のエレメント位置はプリー出入口

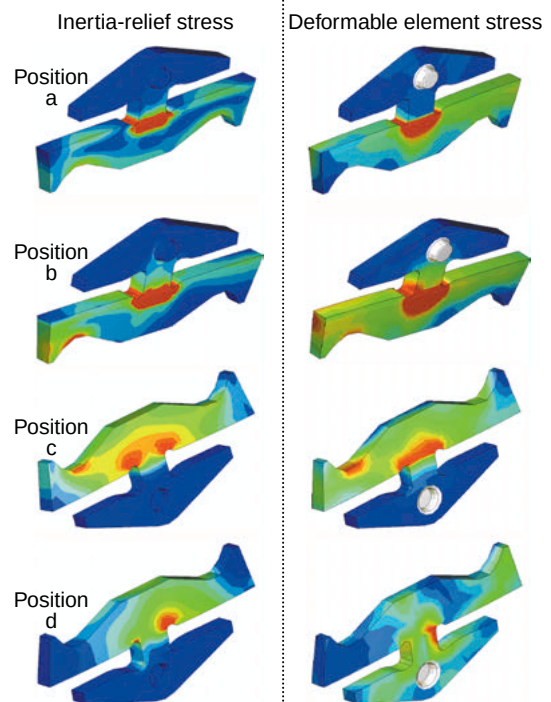


Fig. 9 Stress comparison at each position

口近傍とした(Fig. 7)。また、先の弾性体エレメントで挙動シミュレーションを実行した応力解析結果も合わせて示した。両者に若干の差違は認められるが、おおむね応力分布の傾向を再現している。

5. 高速運転領域のエレメント強度

5.1. エンジン回転数とエレメント応力

高速運転領域でのエレメント詳細応力を Fig. 10 に示す。エンジン回転数が増加するに従い、エレメント応力も急激

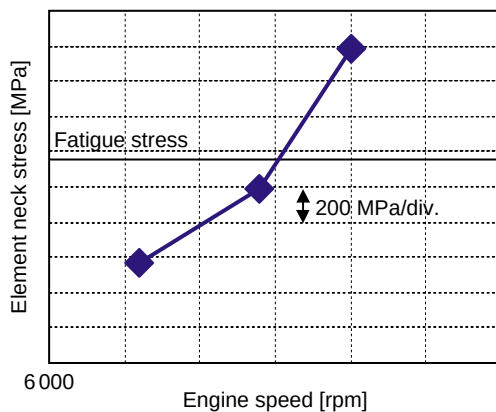


Fig. 10 Element neck stress influenced by engine speed

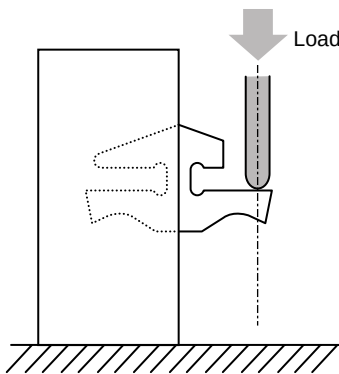


Fig. 11 Schematic of element fatigue test

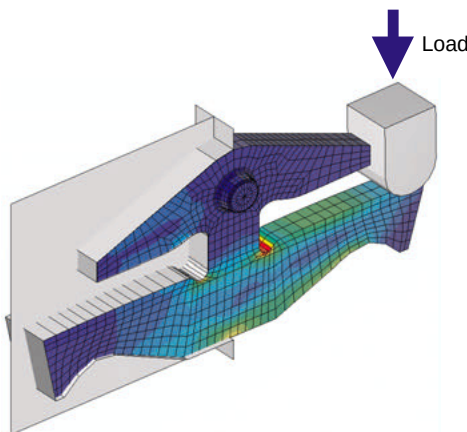


Fig. 12 Element fatigue stress

に増加していることがわかる。ここでプロットしたエレメント応力はプリー出入り口近傍で発生する最大応力値とした。また、着目したエレメント部位はネック部根元Rとした。実際に同じ運転条件で耐久テストをおこなうと回転数の上昇にともないベルト動的強度が厳しくなっており、エレメント応力はテスト結果と傾向が一致した。

5.2. エレメント単体の疲労強度

次に、この実働時のエレメント応力の位置付けを探るため単体の疲労試験をおこなった。Fig. 11にエレメント単体の疲労寿命のテスト装置を示す。このテストではエレメント半分を型に入れて拘束し、エレメントエッジ先端に正弦荷重を加える。このテスト結果からエレメントの疲労限荷重が得られる⁽¹¹⁾。

そこで、Fig. 12に示すエレメント単体解析モデルを用いて疲労限応力を求めた。この解析で用いたエレメントの有限要素モデルはイナーシャリリースによる詳細応力解析で用いたものと同じである。その結果、エレメント単体テストから求めた疲労限応力は耐久テスト結果ともよく一致しており、ベルト実働時のエレメント強度を定量的に判断するものさしとなりうることがわかった。

6. 金属ベルト開発への適用

エレメントの強度を向上させる手段としていくつかの選択肢が考えられる。リング強度の改良と同様にエレメント材料に対する熱処理やショットピーニングなどで表面硬度を改質する方法も有効である。しかし、ここではエレメント形状がベルト動的強度に及ぼす影響を考える。

Fig. 8 に示したように、エレメントV面荷重はプリー出入り口部で衝撃荷重となる。この衝撃荷重はプリーのたおれ剛性と密接な関係があり、たおれ剛性を下げると衝撃荷重も低減し、その結果ベルト動的強度も向上することは既報で明らかにした。そこで、この衝撃荷重を低減するようなエレメント形状について考察する。Fig. 13に示すようにエレメント背面にはエレメント同士の接触面積をコントロールする段差が設けられている。

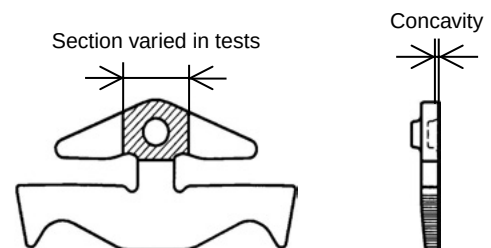


Fig. 13 Concave shape for control of contact area between elements

この段差幅の広い順にX, Y及び, Z仕様とした。Fig. 14にこの段差幅を変更したエレメントを用いてベルト挙動シミュレーションをおこなった結果を示す。V面衝撃荷重が段差幅によって変化している様子がわかる。先述のドライブプリー出口に着目するとその荷重ピークは段差幅によって衝撃荷重が一様に変化するのではなく、最小値が存在することもわかった。実際に段差幅に変更を加えたベルトを耐久テストした結果、V面衝撃荷重ピークの順にベルト寿命が変化した。荷重ピークの最も低いY仕様は最も高回転の運転条件でもベルト動的強度を確保できており、本手法の有効性を確認できた。このことは単にエレメント剛性の観点からだけでは説明がつかず、エレメントの動的挙動や荷重を明らかにして初めて説明が可能となる。

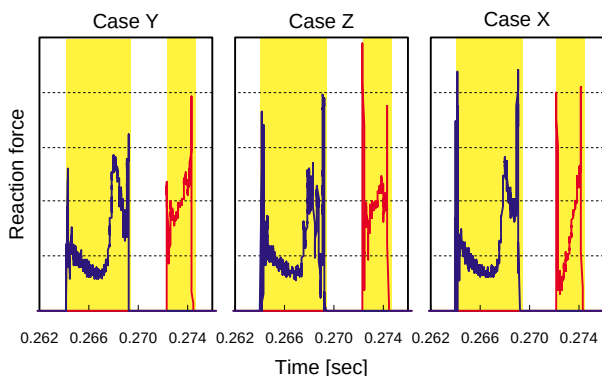


Fig. 14 Reaction forces on V-surface for each case

7. まとめ

金属ベルト実働時の動的強度を明らかにするため、以下の技術を開発した。

- (1) 剛体エレメントによるベルト挙動シミュレーションから抽出した接触面圧とイナーシャリリース法を組み合わせた静解析手法を開発した。
- (2) その結果、ベルト軌道上の任意の位置でのエレメント詳細応力を求めることが可能となった。
- (3) その応力分布は弾性体エレメントによるベルト挙動シミュレーション結果と相関がとれた。

また、このシミュレーション技術を用いて以下の知見が得られた。

- (1) エレメント破損起点と推定されるエレメントネック部の応力はプリー出入口近傍で高くなる。これはエレメントV面衝撃荷重がプリーに出入りする瞬間に発生することによる。
- (2) 高速運転領域ではエレメント応力が急激に増加するためエレメント強度が厳しくなる。エレメント単体テストから得られた疲労限応力は実働時のエレメント強度を判断する指針となりうる。

- (3) エレメント背面の段差幅を適切に設定することによって、高速運転領域でのベルト動的強度を向上させることが可能である。

8. 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、その動的強度の把握が急務である。理論的なアプローチはその複雑な現象ゆえに困難であるが、少しでもこれに貢献できるよう解析技術を高めていきたい。

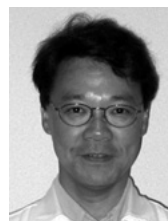
9. 参考文献

- (1) 佐藤 洋一, 浦野 純司, 大橋 章人, 佐久間 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) Kato, Y., et al.: A Study on the Torque Capacity of Belt CVTs for 2.0-liter and 3.5-liter Front-Drive Cars, JSAE Autumn Convention, No.65-03, p.1-4(2003)
- (3) 斎藤 俊博, 岡野 武政: CVT金属ベルト応力シミュレーション技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.125-130
- (4) Shimizu, H., et al.: Development of 3-D Simulation for Analyzing the Dynamic Behavior of a Metal Pushing V-Belt for CVTs, JSAE Spring Convention, No.8-99, p.9-12 (1999)
- (5) Fujita, M., et al.: Development of 3-D simulation for power transmitting analysis of CVT driven by dry hybrid V-belt, San Francisco, VDI-Verlag(2004)
- (6) 斎藤 俊博, 岡野 武政: CVT プ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
- (7) 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 Technical Review, Vol.7, p.49-67
- (8) Pennings, B., et al.: New Push-Belt Design to Increase Power Density of CVTs Featuring a New Maraging Steel, San Francisco, VDI-Verlag(2004)
- (9) 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
- (10) 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)
- (11) 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
- (12) Saito, T., et al.: Development of a Simulation Technique

for CVT Metal Pushing V-belt with Feedback Control,
SAE Paper, 2004-01-1326

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

■ 著 者 ■



齋藤 俊博



宮本 浩二