

CVT 用金属ベルトのリングに作用する力の研究

Study of Forces Acting on Rings for Metal Pushing V-Belt Type CVT

吉田 秀昭*

Hideaki YOSHIDA

要 旨

金属ベルトのリングに作用している四種類の力は、エレメントがプーリの外側に行くのを妨げる二種類の力（一つは軸推力により生じ、もう一つは遠心力により生じる）とリングーエレメント間の摩擦力、そして、曲げにより生じる力である。

過去の論文にて^{1)~3), 5)}、低回転域に於ける遠心力を除いた三種類の力の分布に関する研究は発表されている。今回、積層リングの遠心力を含んだ四種類全ての力を高回転域で連続測定することに成功したので本論文では、定常状態に於ける最内周リングに作用する四種類の力の分布について述べる。

ABSTRACT

Four forces act in rings for a metal pushing V-belt. These forces are: two kinds of intercepting forces which prevent blocks from going outside of pulleys (one caused by pulley thrust, the other caused by centrifugal force), frictional force acting between the rings and the blocks, and bending force in longitudinal direction.

In the previous paper^{1)~3), 5)}, distribution of three forces, excluding centrifugal force, were presented at low belt speed. We successfully measured all four different forces including centrifugal force acting continuously at practical operating conditions for layered rings. In this paper, distribution of these four forces acting on the innermost ring is described at steady states.

1. まえがき

Fig.1 に示す自動車用無段変速機 (Continuously Variable Transmission: CVT) に採用されている押しブロック式金属Vベルト (以下、金属ベルトと呼ぶ) は、リングとエレメントより構成されている。リングには様々な力が作用しており、金属ベルトの耐久性を論ずる上で、リングに作用する力を把握することは非常に重要である。金属ベルトの耐久性は、入力回転数に大きく依存することが実験から明らかとなっている。つまり、高回転域のリング応力 (遠心力を含んだ応力) を把握することが、CVTを設計する上で非常に重要となっている。最近、リングに作用する力に関する研究がいくつか見られる。しかし、何れに於いても高回転域のリング応力の分布については明らかにされていない。本研究の目的は、CVT用金属ベルトのリングに作用する力を高回転域にて連続測

定し、ベルト寿命を推定する一歩として、リングに作用する力を実験的に明らかにすることである。

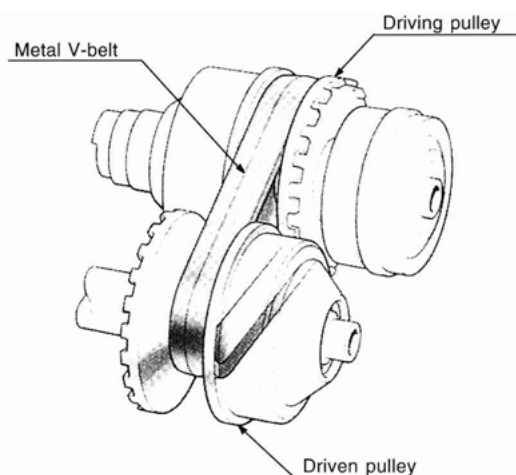


Fig.1 Structure of the metal V-belt and the pulleys for CVT

* 栃木研究所

2. 実験

2. 1. 金属ベルトの構造

本研究では、VanDoorne's Transmissie 社により自動車 CVT 用として開発された金属ベルトを用いた。Fig.2 に示す金属ベルトは一对のリングの束と V 角を有する約 400 個のエレメントにより構成されている。リングの束は、厚さ約 0.2mm の薄いリング 12 層から構成されている。

2. 2. 試験装置

Fig.3 に金属ベルトの試験装置を示す。この装置は、電動モータにより駆動軸を回転させ、従動側に吸収装置を連結し負荷を与えることが可能となっている。駆動側プーリの軸受けはベルト長手方向にスライド可動なテーブルの上に設置され、ロードセルを介して測定装置に固

定されている。これにより、2つのプーリが引き合う力（プーリ軸間力 FS）を測定することができる。

2. 3. 測定方法

金属ベルトの最内周リングの外面にひずみゲージを貼り付け、これら 2 枚のリングを金属ベルトに組み込む。（リングは左右に一枚ずつの状態）Fig.4 に示す高回転域に於けるリング応力を計測するために新たに開発した測定装置を用いて、金属ベルト回転中に於けるひずみゲージの信号を連続で取り込む。試験条件を Table 1 に示す。トルクは無負荷、油温は約 40℃とした。ここで、速度比 i は駆動側プーリ回転数 N_{in} と従動側プーリ回転数 N_{out} に対する比で定義している。Fig.5 (1) に一般的なリングのひずみ波形モデルを、Fig.5 (2) にリング応力分布の模式図を示す。

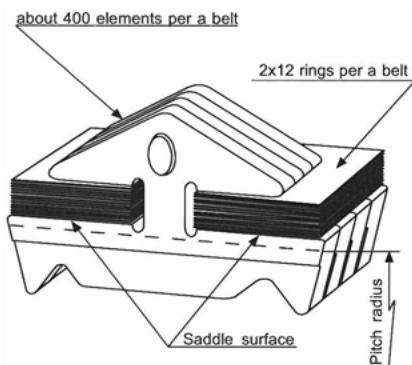


Fig.2 Structure of the metal V-belt assembly

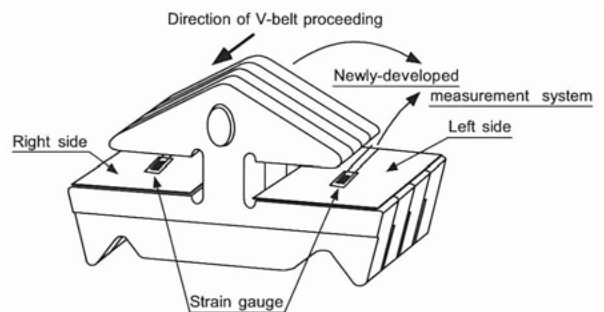


Fig.4 Location of the strain gauges on both Innermost rings

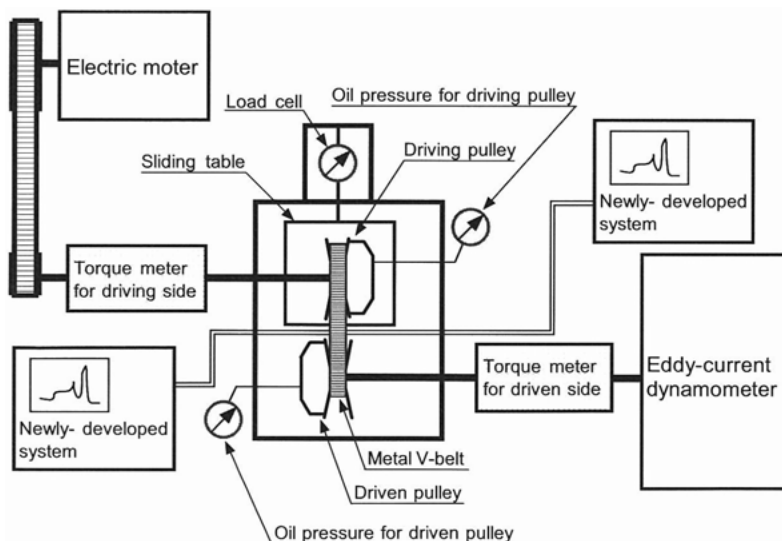


Fig.3 Assembly drawing of a testing machine for the metal pushing V-belt type CVT

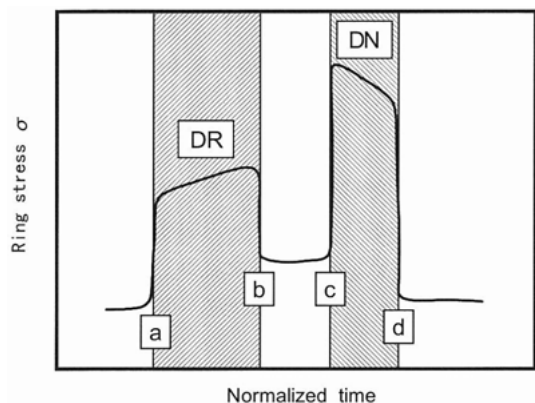


Fig.5 (1) Model of strain wave figure

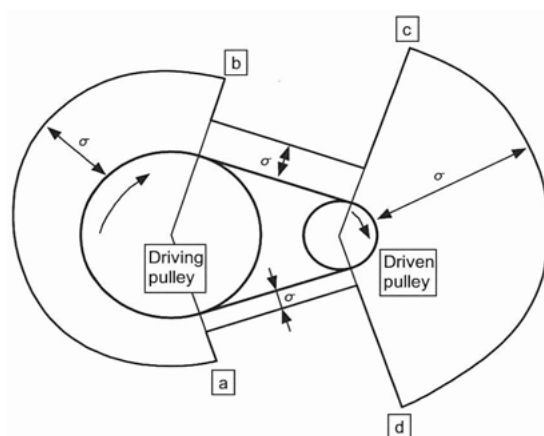


Fig.5 (2) Graphic distribution of ring stress

Table 1 Test conditions

Speed ratio $i=N_{in}/N_{out}$	2.46, 1.00, 0.61, 0.46
Rotational speed of the driving pulley N_{in} [rpm]	100, 1000, 2000
Transmitted torque T_{in} [Nm]	0.0
Thrust of the driven pulley Q_{dn} [N]	1706, 3412, 5119
Oil temperature T_{ATF} [°C]	40

3. 結果および考察

3. 1. リングの応力分布

各速度比、各入力回転数および各軸推力に於けるリング応力測定結果をFig.6～8, 10に示す。横軸は時間、縦軸にリング応力を示す。

速度比 $i=0.61$ 、入力回転数 $N_{in}=1000\text{rpm}$ 、従動側プーリの軸推力 $Q_{dn}=1706\text{N}$ 、無負荷の条件での結果を例として、リングの応力分布を説明する。Fig.6の区間a-b、区間c-dは、金属ベルトが駆動側、従動側のそれぞれのプーリに巻き掛かっている部分を示している。区間b-cは、駆動側プーリの出口から従動側プーリの入口の間である弦部を示している。区間d-aは、従動側プーリの出口から駆動側プーリの入口の間である弦部を示している。解りやすくするために、グラフ中における左側リングの応力は、少し右側にずらして描いてある。リングの左右はFig.4にて定義している。

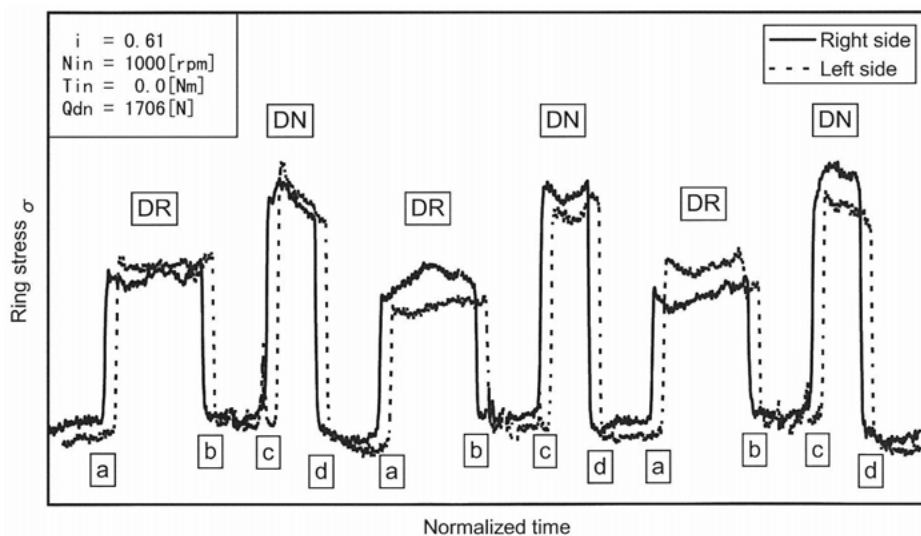


Fig.6 Distribution of ring stress

3. 1. 1. プーリ中のリング応力分布

区間a-b、区間c-dのリングがプーリに巻き掛かっている部分では、曲げ応力がリングに作用し応力値は急激に増加する。そして、各サイクルごとに異なる分布を示している。特に、従動側プーリ中におけるリング応力分布は、Fig.5(1)に示した一般的なひずみ波形モデルの分布とは異なり、複雑に変化していることが解る。

金属ベルトは、サドル面とピッチ径が一致していない構造により (Fig.2)、両プーリ中に於けるサドル面の速度は異なる。小径側プーリ中でのサドル面速度は、リングよりも速くなり、エレメントの挙動が不安定になる。

Fig.6に於いては (速度比 $i=0.61$)、従動側プーリは小径となっており、リングはエレメントの挙動が不安定になることにより生じるエレメントの傾きとサドル面の形状により悪影響を受ける。このため、リング応力分布は複雑に変化していると考ええる。

3. 1. 2. 弦部に於けるリング応力

各速度比に於けるリング応力分布を Fig.7に示す。区間b-c、区間d-aに於けるリング応力は速度比 $i=1.0$ にて等しい。しかし、速度比 $i=2.46$ では、区間d-aに於けるリング応力は区間b-cよりも高く、速度比 $i=0.46$ では、逆に区間b-cに於けるリング応力の方が区間d-aよりも高くなる。これらのことより、リング応力が高くなる側の弦部は、速度比の変化に伴い入れ替わり、常に小径側プーリの入口側の弦部にて高くなることが解る。Fig.6～8、10にも、同様な傾向が見られる。

藤井らの論文⁵⁾では、2つの弦部に於けるリング応力の差は、駆動側、従動側プーリ中に於けるサドル面の速度が異なるためであると述べられている。

本研究では、高回転域に於けるリング応力を測定することにより、既に低回転域では明らかにされていた上述の傾向が、全回転域に於いて成り立つことが確認できた。

3. 1. 3. 左右のリング応力分布

区間b-c、区間d-aに於けるリング応力は、左右にて等しいが、プーリ巻き掛け部に於ける曲げ応力は等しくない。特に、この傾向は従動側プーリにて顕著に現れ、全ての運転条件にて同様である。これは、左右のサドル面の僅かな形状差やブロックの微少な傾きにより、曲げ応力が複雑に変化する事により生じていると考えられる。

このことは、“3. 1. 1. プーリ中のリング応力分布”で述べた理由と同様である。

3. 2. 弦部のリング応力と軸推力の関係

Fig.8に従動側プーリの各軸推力に対するリング応力分布を示す。軸推力が増加するに従い、弦部に於けるリング応力は増加し、弦部間の張力差も増加傾向にあることが解る。

通常 Euler 理論は、弾性平ベルトの伝達機構解析に用いられる。この理論は、ベルトのプーリ上での滑りを考慮した摩擦伝動理論である。Fig.9に示す弾性平ベルトをプーリに巻き掛け動力伝達を行うと、Idle arc と呼ばれる動力伝達を行わない領域と Active arc と呼ばれる動力伝達を行う領域が存在する。Idle arc 領域では、ベルトとプーリの間に滑りは生じず、ベルト張力は一定値 (= 張り側張力 T_1) となる。また、Active arc 領域では、ベルトとプーリの間に滑りが生じ、ベルト張力は減少していきプーリ出口にて緩み側張力(T_2)と等しくなる。金属ベルトのリングは弾性ゴムの特性を有していないが、Euler理論への適用性を検証してみる。

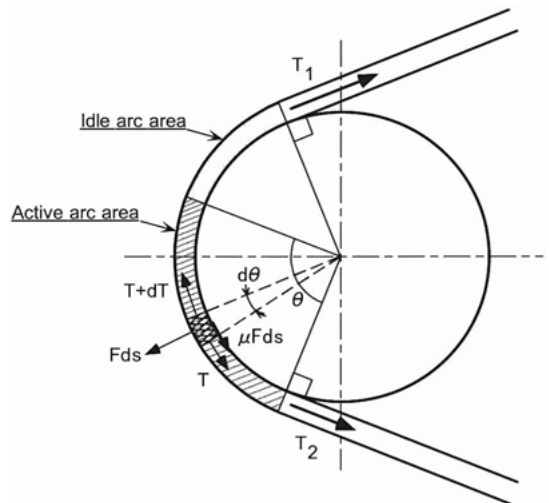


Fig.9 Euler's theory

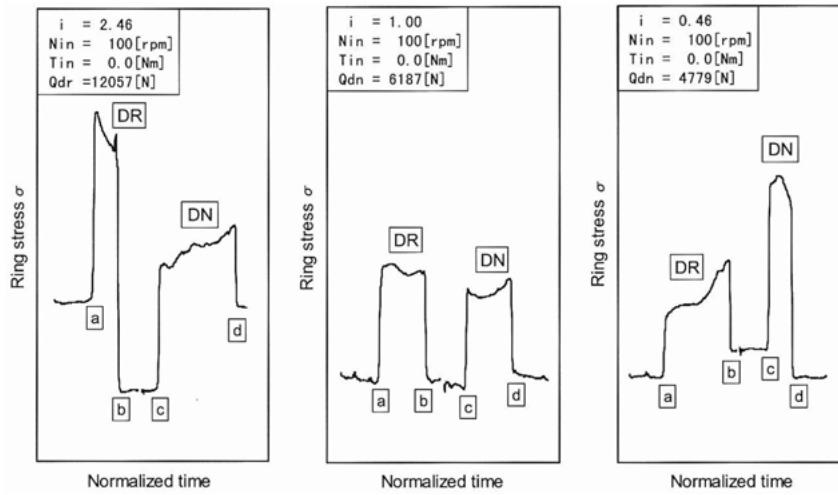


Fig.7 Distribution of ring stress at several speed ratio

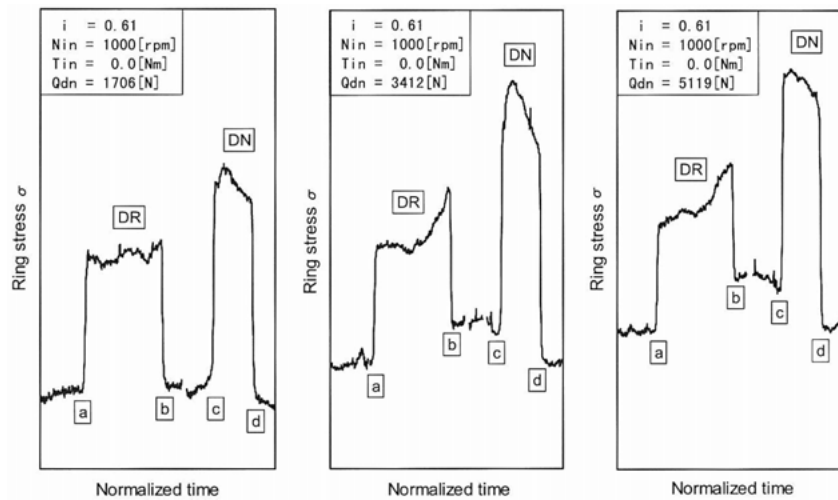


Fig.8 Distribution of ring stress for several driven pulley thrusts

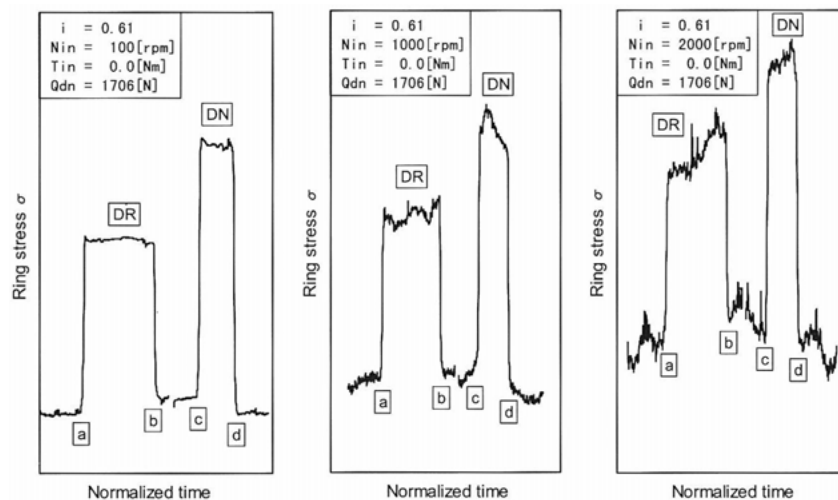


Fig.10 Distribution of ring stress at several rotational speed of the driving pulley

リングとサドル面の速度は、小径側プーリ中では異なる。この結果、左右の最内周リングは、小径側プーリ中ではサドル面全域にて滑りが生じる。Active arc 領域は、小径側プーリのサドル面に接触しているリングの内周面全域であると仮定して、リングーサドル面間の摩擦係数を以下に示す Euler 式を用いて算出する。

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu \theta}$$

T_1 : 張り側張力

T_2 : 緩み側張力

θ : Active arc 領域の角度

μ : リングーサドル面間の摩擦係数

各テスト条件にてリングーサドル面間の摩擦係数を算出すると、ほぼ一定値 ($\mu = 0.09 \sim 0.11$) が得られる。この算出された摩擦係数は、プーリーエレメント間の摩擦係数と同値であり、各速度比に於いても同様な結果が得られた。つまり、速度比とリング張力比 ($= T_1/T_2$) は上式の関係を満たしていることが解る。この結果より、Active arc 領域は小径側プーリのサドル面に後触しているリングの内周面全域であると仮定することにより、Euler 理論を金属ベルトのリングに作用する力の解析に適用できると考える。

3. 3. 弦部のリング張力とベルト速度の関係

Fig.10 に各入力回転数 (N_{in}) に対するリング応力分布を示す。入力回転数の増加に伴い、弦部に於けるリング応力は増加する。入力回転数 $N_{in}=100\text{rpm}$ 時での弦部のリング応力は、一定値を示しているが、入力回転数 $N_{in}=1000, 2000\text{rpm}$ 時では、一定では無く複雑に変化している。特に、この傾向は区間 d-a にて顕著である。この区間 d-a では、エレメント間押し力が生じていないために、エレメントは自由に動くことが出来る。そして、入力回転数の増加に伴いエレメントの挙動は不安定になり、エレメントは最内周リングの内周面に接触する。このために、区間 d-a に於けるリング応力は一定値とならず、複雑に変化していると考えられる。

Fig.11 に弦部のリング応力と入力回転数の関係を示す。グラフ中のリング応力は、Fig.10 で示した区間 b-c でのリング応力の平均値を用いた。グラフより、リングに作用する遠心力とベルト速度の関係が、ある二次関数で

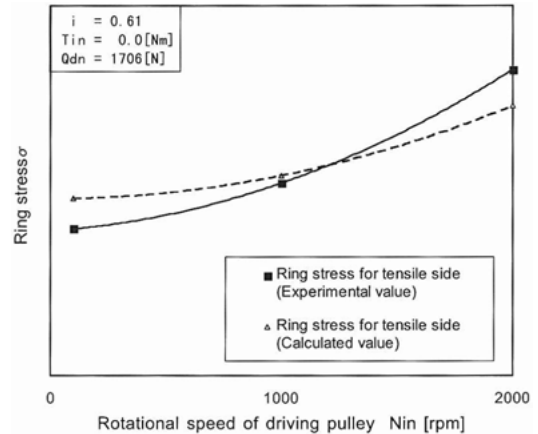


Fig.11 Relationship between ring stress at the strings and rotational speed of driving pulley

表現されていることが確認できる。また、Fig.11 には金原らの理論式⁸⁾により得られた計算値がプロットしてある。実験値と計算値が良い一致を示していることが確認できた。

4. まとめ

高回転域に於ける遠心力を含んだ四つの力を連続測定することにより、以下の結論が得られた。

- (1) 両プーリ中に於けるリング応力分布は、過去の論文にて発表されているひずみ波形モデルとは異なり、複雑な分布を示す。
- (2) 左右のリングに作用している応力は弦部に於いては等しいが、プーリ中に於ける曲げ応力は等しくない。
- (3) 小径側プーリのサドル面に接触しているリングの内周面全域を、Active arc 領域であると仮定して Euler 理論を適用することにより、金属ベルトのリングに作用する力の解析ができる。
- (4) リングに作用している遠心力はベルト速度に対し、二次関数的に増加する。

本研究で得られた左右のリングに作用する応力差は、金属ベルトの耐久性を論ずる上で重要な要因である。この現象を明らかにすることは、本研究の目的である金属ベルトの寿命推定および寿命向上を図る上で非常に重要である。

参考文献

- 1) 勝矢晃弘 他、「CVTベルトの挙動解析」、「自動車技術会学術講演会前刷集」、891041, pp.171-174, 1989
- 2) 大川進 他、「CVT用スチールリング負荷応力計測」、「日本機械学会第69期通常総会講演会講演論文集」、(vol. C) , 1701, pp.285-287, 1992
- 3) 浅山弘樹 他、「金属ベルトの駆動メカニズム」、自動車技術会学術講演会前刷集 941, 9432804, pp.121-124, 1994
- 4) T. Fujii et al, 「A Study of a Metal Pushing V-Belt Type CVT - Part 1: Relation Between Transmitted Torque and Pulley Thrust」, SAE 930666, 1993
- 5) T. Fujii et al, 「A Study of a Metal Pushing V-Belt Type CVT - Part 2: Compression Force Between Metal Blocks and Ring Tension」, SAE 930667, 1993
- 6) S. Kanehara et al, 「A Study on a Metal Pushing V-Belt Type CVT (Part 3: What Forces Act on Metal Blocks?)」, SAE 940735, 1994
- 7) S. Kanehara et al, 「A Study on a Metal Pushing V-Belt Type CVT (Part 4: Forces Act on Metal Blocks when the Speed Ratio is Changing)」, SAE 950671, 1995
- 8) S. Kanehara et al, 「A Study on a Metal Pushing V-Belt Type CVT Macroscopic Consideration for Coefficient of Friction between Belt and pulley」, JSAE 9636277, 1996

■著 者■



吉 田 秀 昭