

# CVT用金属Vベルトの積層リングに作用する力の研究

A Study of the Forces Acting on the Layered Rings of a Metal Pushing V-Belt for CVT

赤木 宏文\*  
Hirofumi AKAGI

吉田 秀昭\*  
Hideaki YOSHIDA

## 要 旨

押しブロック式金属Vベルトのリングに作用する力を把握することはベルトの寿命を推定する上で非常に重要である。

本論文では積層リングの積層枚数を一枚ずつ増やしながら最外層リングに作用する応力を連続的に測定することで、積層されたリングの応力分布および張力分担について調べた。その結果、最内層リングに作用する力が積層リングの中で最も高くなることから、最内層リングの寿命を把握することで金属Vベルトの寿命を推定できる結論を得た。

## ABSTRACT

It is very important to grasp the forces acting on the layered rings of a metal pushing V-belt for estimating the durability of the V-belt.

In this paper we measured the ring stress of the outermost rings each time another layer was added. By estimating the distribution of the ring stress and the ring tension for the layered rings from the outermost ring stress, we deduced the following conclusion. The forces acting on the innermost rings were higher than the other layered rings. Therefore the durability of the V-belt can be estimated from the durability of the innermost rings.

## 1. まえがき

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Vベルト)はスチールリングとブロックより構成されている。Fig.1にCVT用の金属Vベルトとプーリの構成を示す。金属Vベルトのリングには様々な力が作用し、それらの力を把握することはベルトの寿命を推定する上で、またCVTの設計にとって非常に重要となる。リングに作用する力はブロックがプーリの外側に行くのを妨げる2種類の力(1つは軸推力により、もう1つは遠心力により生じる)

とリング/ブロック間の摩擦力とリング/リング間の摩擦力および曲げにより生じる力からなる。著者の1人は、単層(金属Vベルトに最内周リングのみをセット)でのリングに作用する力の分布について述べた<sup>1)</sup>。

本論文の目的は、リングを一層ずつ増やしながら最外層リングの応力を測定することにより、積層リングにおける各層間の力の分担を明らかにすることと、それらがベルト寿命に対して及ぼす影響を明らかにすることである。

## 2. 実験

### 2. 1. 金属Vベルトの構造

本研究ではVan Doorne's Transmissie社により自動車CVT用に開発された金属Vベルトを用いた。金属VベルトはFig.2に示すように各12層からなる1対のスチールリングとV角を有するブロック約400個からなる。リングの一層の厚さは約0.2mmである。

### 2. 2. 試験装置

本研究で用いた金属Vベルトのスチールリング応力測定用試験装置をFig.3に示す。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。駆動側プーリの軸受はベルト長手方向に可動なスライドテーブルの上に設置され、ロードセルを介してケースに固定されて

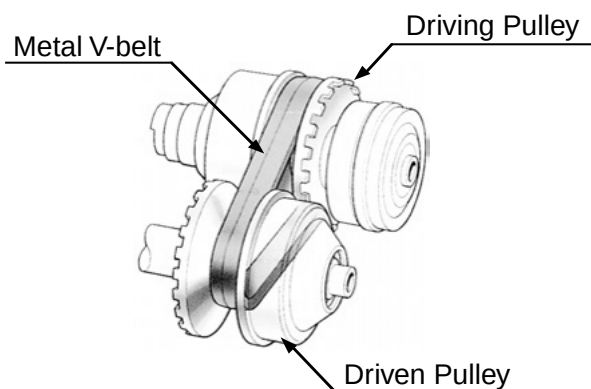


Fig.1 Structure of the metal pushing V-belt and pulley for CVT

いる。このロードセルにより、2つのプーリが引き合う力（プーリ軸推力 $F_s$ ）を測定することができる。また軸推力（プーリがベルトを挟む力）は各プーリの油圧室に取り付けられた油圧センサより、伝達トルクはトルクメータにより測定される。

### 2.3. 測定方法

Fig.4に示すように左右の最外層リングの外面にひずみゲージを貼り付けて金属Vベルトに組み込み、Fig.3に示した試験装置を用いて金属Vベルト回転中におけるひずみゲージの信号を連続的に取り込む。試験条件をTable 1に示す。速度比 $i$ 、駆動側プーリ回転数 $N_{in}$ 、油温 $T_{ATF}$ は一定に保ち、トルク比 $r$ 、従動側プーリ軸推力 $Q_{dn}$ 、積層数 $n$ はTable 1に示したように変化させた。速度比 $i$ 及びトルク比 $r$ は以下のように定義される。

$i$  : 駆動側プーリ回転数／従動側プーリ回転数

$r$  : 伝達トルク／理論最大伝達トルク

理論最大伝達トルクは低軸推力（本試験条件では従動側プーリの軸推力）と速度比により決まる。

Table 1 Experimental conditions

|                                                          |                                   |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Speed ratio<br>$i=N_{in}/N_{out}$                        | 0.61                              |
| Rotational speed of the driving pulley<br>$N_{in}$ [rpm] | 100                               |
| Transmitted torque ratio<br>$r$                          | 0.0, 0.33, 0.50, 0.67, 0.75, 0.83 |
| Thrust of the driven pulley<br>$Q_{dn}$ [N]              | 1710, 3412, 5119, 10231           |
| Total amount of layers<br>$n$                            | 1, 2, 3, 4, 5                     |
| Oil temperature<br>$T_{ATF}$ [°C]                        | 40                                |

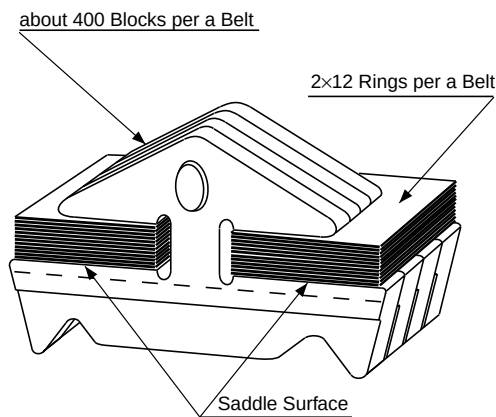


Fig.2 Metal pushing V-belt assembly

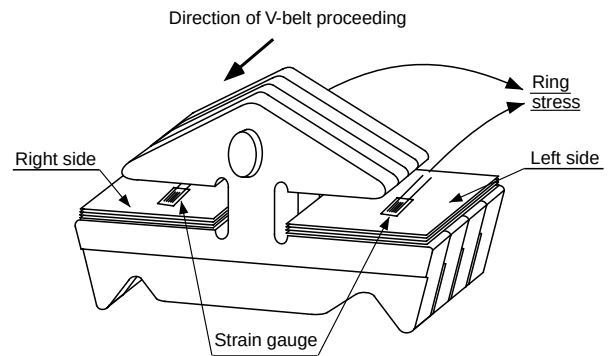


Fig.4 Location of strain gauges on both outermost rings

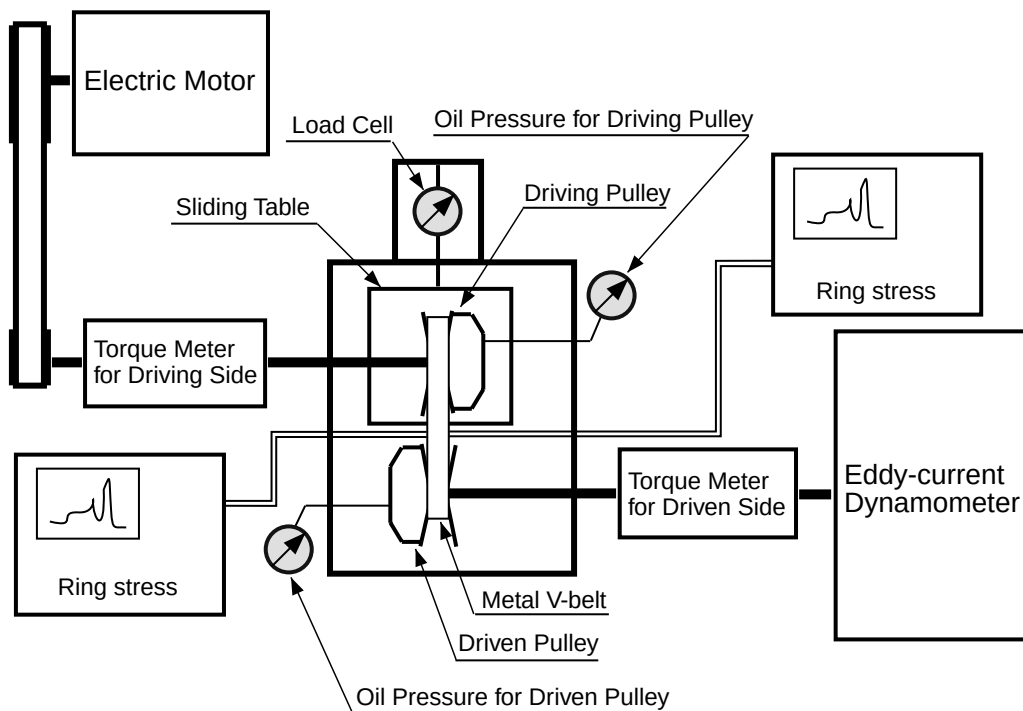


Fig.3 Assembly of an experimental device

### 3. 結果と考察

#### 3. 1. リングの応力分布

リング積層数を1～5枚までしたときの最外層リング応力の測定結果をFig.5に示す。各々の図は各層の応力を同時に計測できないため、リング枚数を1～5枚まで順次増やした時の最外層リング応力の測定結果を表したものであり、各層の応力を同時に測定した結果を表したものではない。この応力測定結果は速度比  $i=0.61$ 、駆動側プーリ回転数  $N_{in}=100\text{rpm}$ 、従動側プーリ軸推力  $Q_{dn}=5119\text{N}$ 、トルク比  $r=0.83$  の試験条件時のものである。横軸にベルト中のひ

ずみゲージの位置に対応した時間、縦軸にスチールリングの応力を取っている。

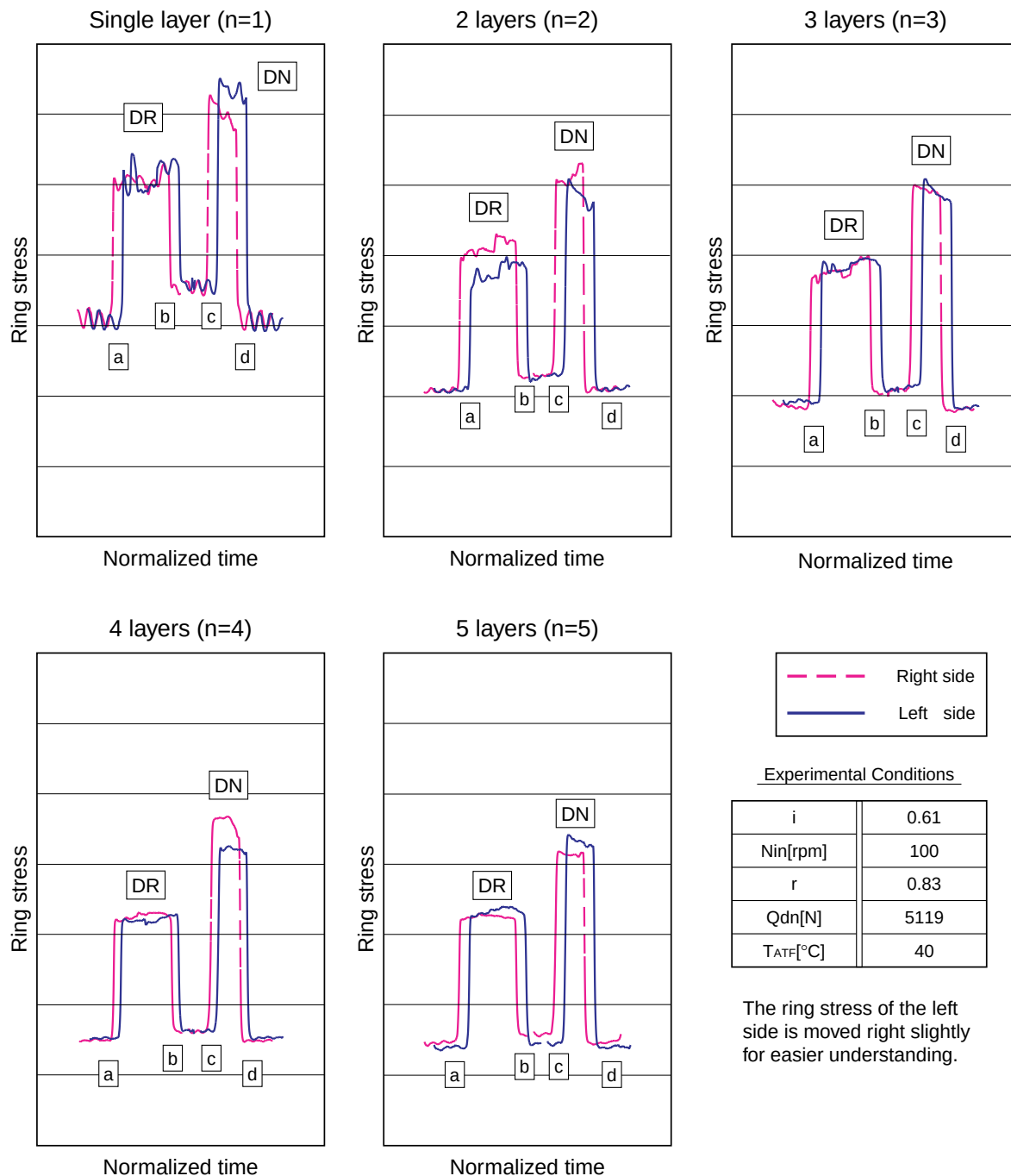
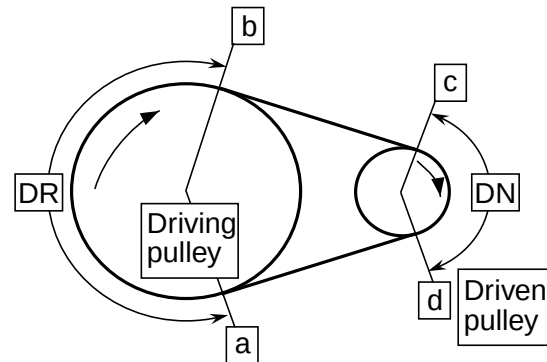


Fig.5 Distribution of ring stress at the outermost rings

Fig.5の中のa, b, c, dは金属Vベルト軌道上の境界点を表しており、区間a-bおよびc-dは金属Vベルトがそれぞれ駆動側および従動側プーリに巻き付いている領域を表している。区間b-cは駆動側プーリ出口から従動側プーリ入口までの弦部を表し、区間d-aは従動側プーリ出口から駆動側プーリ入口までの弦部を表している。区間b-c, d-aでリングの応力が急激に増加しているのはプーリ巻き付き部でリングに曲げ応力が急激に発生するためである。またFig.5は解りやすくするために左側リングの応力を少し右側にずらして表示している。リングの左右はFig.4で定義している。

一般的にリングにはFig.6に示す波形モデルの応力(以下、一般応力波形モデルとする)が働くと考えられている。2つの弦部(区間b-c, d-a)の間には応力差があるものの、それぞれの区間では一定を保ち、プーリ巻き付け部(区間a-b, c-d)では指数関数的に変化する。

Fig.5より、プーリ中(区間a-b, c-d)のリング応力波形は一般応力波形モデルよりも複雑な波形を示すことが分かる。これはVブロックのサドル面(最内周リングと接触する面)形状とブロックの不安定な挙動がプーリ中の曲げ応力に影響を及ぼすためと考えられる。しかしながら、Fig.5から分かるように積層数が増えるにしたがい、最外層リングの応力波形は一般応力波形モデルに近づくことがわかる。これは中間層にあるリングが緩衝の役割を果たし、中間層が増えるにしたがいサドル面形状とブロックの挙動の影響が、小さくなると考えられるためである。したがって、積層リングの中間層リングが多くなる外層リングの応力波形は一般応力波形モデルに近づくと考えられる。

また本試験条件(速度比  $i=0.61$ )下では従動側プーリ中(区間c-d)でサドル面とリングの間に相対速度(滑り)を持つため、従動側プーリ中の方が駆動側プーリ中(区間a-b)に比べて、ブロックはより不安定な挙動を示す。従動側プーリ中の応力波形が駆動側プーリ中よりもより複雑な波形になるのはそのためである。

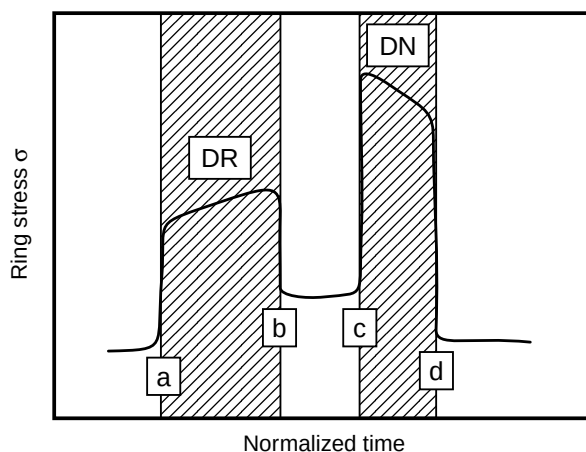


Fig.6 Model of strain wave figure

### 3.2. 左右のリング応力分布

Fig.5より、弦部(区間b-c, d-a)では積層数に関係なく最外層リングの応力は左右で等しいことから、各層でも左右のリング応力が等しくなることが分かる。一方、プーリ中では各積層数で最外層の左右のリング応力が違っているが、積層数が増えるにつれ等しくなる傾向がある。プーリ中のリングの曲げ応力は、サドル面の左右の形状差およびブロックの傾き動作の左右での差があるためにその影響を受け、左右でリング応力に差が生じるものと考えられる。しかし、その影響も積層数が増え、緩衝の役割を果たす中間層のリングが増えるために減少する。したがって積層数が増えるにつれて最外層リングの左右のリング応力が等しくなる傾向を持つと思われる。以上のことから、中間層が多くなる外層リングの左右のリング応力は等しくなると考えられる。

### 3.3. 弦部における各層のリング張力分担

#### 3.3.1. リング平均張力

(張り側張力と緩み側張力との平均)の分担

弦部は、張力の高い張り側と張力の低い緩み側とを有する。その2つの張力の平均を平均張力とした場合、各積層枚数時の最外層リングにおける平均張力の分担率をFig.7に示す。リング張力は計測したリング応力にリング断面積を乗じたものとして扱っている。Fig.7は横軸に積層枚数、縦軸に張力比( $T_m(n)/T_m(all)$ )を取る。 $T_m(n)$ 、 $T_m(all)$ はそれぞれ以下の通り定義される。

$T_m(n)$  : 最外層リングの平均張力

$T_m(all)$  : 各層の平均張力の総和

$T_m(all)$ は単層時の平均張力に等しいものと仮定して扱っている( $T_m(all)=T_m(1)$ )。したがって張力比( $T_m(n)/T_m(all)$ )は全張力に対する最外層リングの平均張力の分担率を示していることになる。Fig.7より、張力比( $T_m(n)/T_m$

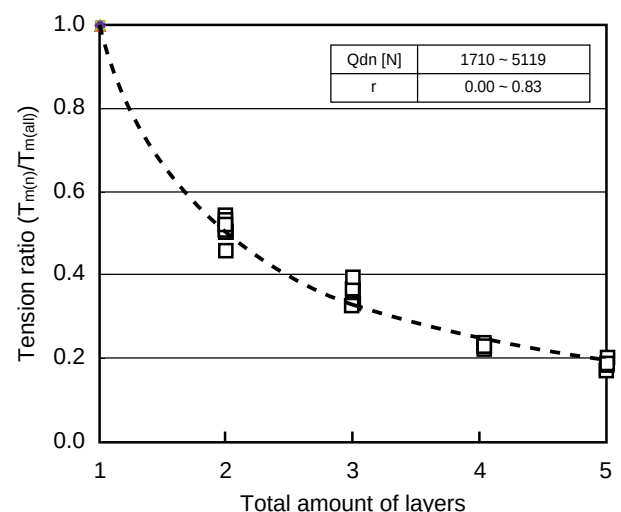


Fig.7 Distribution of ring tension average for the outermost rings

(all))は積層枚数に反比例することから、弦部での平均張力は各層で等しい、つまり均等分担していることが分かる。このことは、ベルトの伝動機構だけを考えた場合、積層リングを単層リングとして単純に扱えることを意味している<sup>2)</sup>。

### 3.3.2. リング張力差

(張り側張力と緩み側張力の差)の分担

金属Vベルトは、リング/サドル面間およびリング/リング間にすべりを生じ、その摩擦によりリングは弦部において張力差(張り側張力と緩み側張力の差)を持つ。その結果、その張力差が動力伝達の一部を担っていることは知られている。すでにリングの張力差そのものについては研究されているものの、各層におけるリング張力差の分担については未だ研究されていない。金属Vベルトの耐久性は最内層リングの耐久性と相関があることが過去の耐久テストによって確認されている。したがって金属Vベルトの耐久性を推定するには最内層リングにおける張力差分担を把握することが重要となってくる。

それぞれの摩擦は相対速度とリング張力に依存するが、本論文では速度比  $i$  を0.61に固定(=2つの相対速度を固定)し、負荷条件はトルク変動による計測誤差を抑えるため無負荷とした。従動側プーリの軸推力は有負荷時に相当する3種類に、すなわちリング張力を3種類に設定してテストを行った。Fig.8に、その時のリング張力差の分担を示す。 $Ta(n)$ 、 $Ta(all)$ はそれぞれ以下のように定義される。

$Ta(n)$  : 最外層リングの張力差

$Ta(all)$  : 張力差の各層での総和(全張力差)

$Ta(all)$ は、単層時の張力差と等しいものと仮定している( $Ta(all) = Ta(1)$ )。以上から張力差比( $Ta(n)/Ta(all)$ )は、全張力差のうち、各積層枚数時で最外層リングが分担する率を表している。またFig.8中の曲線はリング各層で均等分担

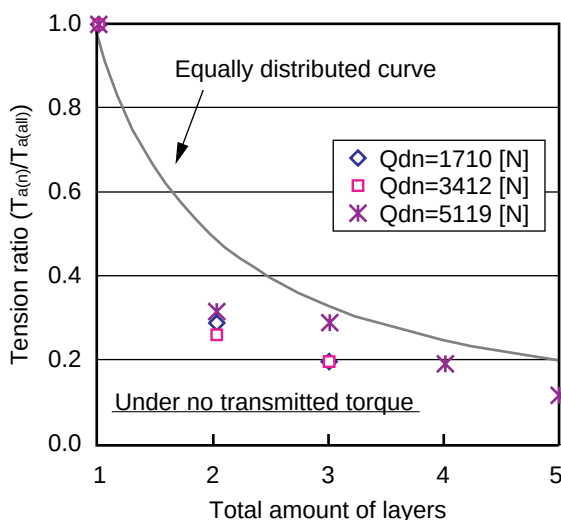


Fig.8 Distribution of ring tension difference for the outermost rings

している状態を表している均等分担線である。同図から張力差比が均等分担線よりも小さいことが分かる。つまり最外層のリングの張力差は全張力差を均等分担している状態より低く、各層の張力差は均等になっていないことを意味している。これはリング/リング間摩擦力とリング/サドル面間摩擦力の違いによるものと考えられる。

各層の張力差比はこの2つの摩擦係数比( $\mu s / \mu r$ )によって理論的に求められることが知られており<sup>3)</sup>、 $\mu s$ はリング/サドル面間摩擦係数を、 $\mu r$ はリング/リング間摩擦係数をそれぞれ示している。2つの摩擦係数はリングの張力にオイラー式を適用することで計算上求められる。実験結果に対してオイラー式を適用して2つの摩擦係数比( $\mu s / \mu r$ )を求めたものをFig.9に示す。同図より摩擦係数比が1.0よりも大きい、すなわちリング/リング間とリング/サドル面間の摩擦係数に差があることが分かる。この摩擦係数比( $\mu s / \mu r$ )をもとに張力差比( $Ta(n)/Ta(all)$ )を計算し、実測値と比較したものをFig.10に示す。計算値の張力

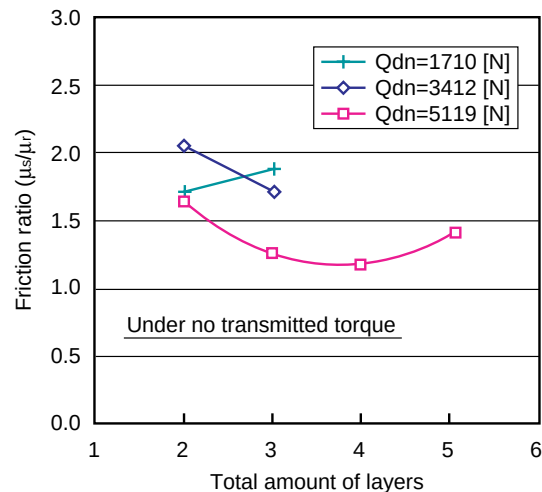


Fig.9 Relation between the amount of layers and friction ratio

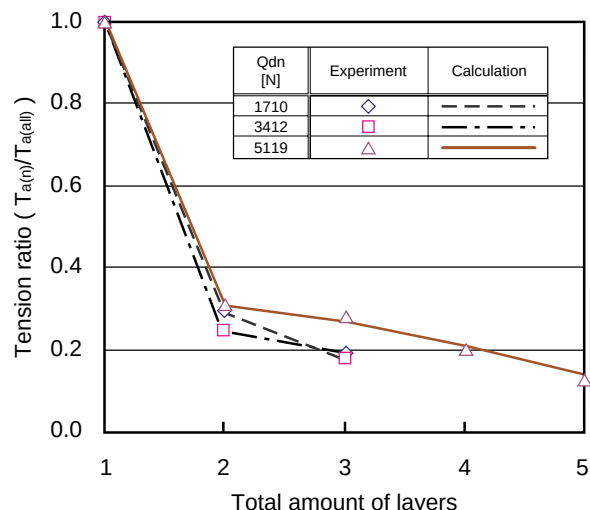


Fig.10 Distribution of ring tension difference for the outermost rings Experiments vs Calculations

差比は実測値とよく一致することから、この2の摩擦係数比に着目した解析方法は張力差の分担を解析する上で非常に有効であることが分かる。したがって、2つの摩擦係数を求めることが張力差の分担を把握する上で重要となる。

最後に、実験より得られた最外層リングの張力差比( $Ta(n)/Ta(all)$ )をもとに各層の張力差比( $Ta(i)/Ta(all)$ )を求めたものをFig.11に示す。例えば、2層時の最外層リングの張力差比を $x$ とし、3層時の最外層リングの張力差比を $y$ とすると、3層時の最内層リングの張力差比( $Ta(1)/Ta(all)$ )は、 $(1-y)(1-x)$ で求まる。積層数が増えた場合も同様である。図中の $Ta(i)$ は各層の張力差を表し、横軸はFig.8, 10と同様にリングの積層枚数を表す。Fig.11より、最内層リングの張力差の分担率が高く、積層数 $n=5$ の時で最内層リングは全張力差の34%を分担していることが分かる。また5層時の摩擦係数比( $\mu_s/\mu_r$ )より12層時における最内層リングの張力差を求めると、全張力差の約35%を分担する結果となる。したがって、ベルトの寿命を考えた場合、最内層リングが他のリングよりも応力が高く、最内層リングの耐久性とベルトの耐久性との相関が実験的に確認されている事実とも論理的に合う。以上のことからベルトの寿命を推定するには、最内層リングの張力差分担を把握することが重要であることが分かる。

#### 4. 結論

積層リングの積層枚数を一枚ずつ増やしながら、最外層リングの応力を連続的に測定することで以下の結論を得た。

- (1) プーリー巻き付き部では、外層に行くにしたがい応力波形は一般応力波形モデルに近づく。
- (2) 左右のリング応力は弦部においては各層で等しい。一方、プーリー巻き付き部では各層で左右異なるが、外層リングに行くにしたがい等しくなる。
- (3) 平均張力(張り側張力と緩み側張力の平均)は各層で等しく分担されている。

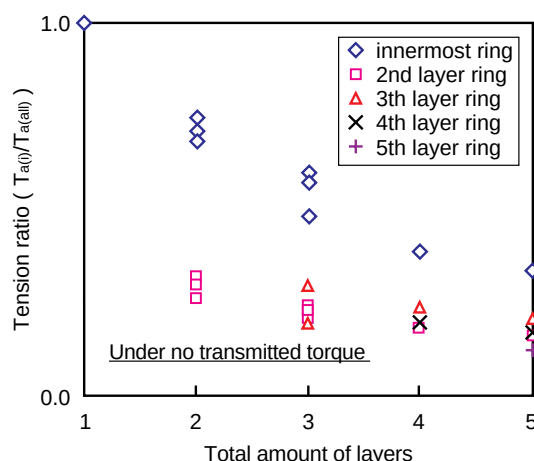


Fig.11 Distribution of ring tension difference for each layer

- (4) 張力差(張り側張力と緩み側張力の差)は各層で均等に分担されず、最内層リングの分担が最も高い。最内層リングは12層の時で、全張力差の約35%を分担する。
- (5) 以上の結論(1)~(4)より、最内層リングの応力が積層リングの中で最も高くなっていることから、最内層リングの寿命を把握することから金属Vベルトの寿命を推定することができる。

#### 参考文献

- 1) Yoshida, H.: A Study of Forces Acting on Rings for a Metal Pushing V-Belt Type CVT, SAE Tech. Paper Series 970686
- 2) Katsuya, K. et al : Analysis of Behavior of CVT Belt, Proc. of JSAE 891041 p.171-174 (1989)
- 3) Kanehara, S. et al : Power Transmitting Mechanisms of CVT Using a Metal V-belt and Load Distribution in Steel Ring, SAE Tech. Paper Series 980824
- 4) Fujii, T. et al : A Study of a Metal Pushing V-Belt Type CVT-Part 1; Relationship between Transmitted Torque and Pulley Thrust, SAE Tech. Paper Series 930666 (1993)
- 5) Fujii, T. et al : A Study of a Metal Pushing V-Belt Type CVT-Part 2; Compression Forces between Metal Blocks and Ring Tension, SAE Tech. Paper Series 930667 (1993)
- 6) Kanehara, S. et al : A Study on a Metal Pushing V-Belt Type CVT (Part3; What Forces Act on Metal Blocks ?), SAE Tech. Paper Series 940735 (1994)
- 7) Kanehara, S. et al : A Study on a Metal Pushing V-Belt Type CVT (Part4; Forces Act on Metal Blocks when the Speed Ratio is Changing), SAE Tech. Paper Series 950671 (1995)
- 8) Kanehara, S. et al : A Study on a Metal Pushing V-Belt Type CVT Microscopic Consideration for Coefficient of Friction between Belt and Pulley, Proc. of JSAE CVT '96 Yokohama
- 9) Ookawa, S. et al : Stress Measurement of CVT Steel-ring by Strain-gauge, Proc. of JSME 1701 p.285-287 (1992)
- 10) Hendriks, E. et al : Aspects of a Metal Pushing V-Belt for Automotive Cut Application, SAE Tech. Paper Series 881734

■ 著 者 ■



赤木 宏文



吉田 秀昭