

# Change of Pitch Angle of Element for Metal V-belt Type CVT Due to Increase of Transmitting Torque

Seiji MITSUBAYASHI\*, Kazuki OSHIMA\*\*, Kiyotaka OBUNAI\*\*\*, Kazuya OKUBO\*\*\*\*

(Received October 14, 2022)

The object of this study is to investigate the change of pitch angle of element for metal V-belt Type CVT due to increase of the transmitting torque during steady-state belt of rotation using a bench-type testing machine. Acceleration sensors were attached to the V-belt to measure acceleration of each element. The pitch angle of each element at the strings also near the entrances and exit was continuously measured by calculating the 3-axis accelerations during the belt travel. Macroscopic change of pitch angle was almost followed by the geometrical change of the angle during the orbital motion of the belt. However, local change of pitch angle near the entrance and exit of the pulley was not explained by the angle of the geometrical posture movement of elements. The pitch angle of each element was locally increased near the entrance and exit of the driven pulley as the load torque was increased, while the opposite tendency was observed near those locations of the driving pulley.

**Key words** : power transmission, Continuously Variable Transmission (CVT), metal V-belt, orbital change, pitch angle

**キーワード** : 動力伝達, 無段変速機 (CVT), 金属 V ベルト, 軌跡変化, ピッチ角

## 金属 V ベルト式 CVT の伝達トルクの増加に伴うエレメントピッチ角の変化

三林 誠治, 大嶋 一輝, 小武内 清貴, 大窪 和也

### 1. はじめに

化石燃料の枯渇の問題および環境保護の観点から自動車などへの燃費低減への要求が高まってきている。これらの要求に応えるために、自動車メーカーは変速機をはじめとするパワートレインの高効率化に取り組んでいる<sup>1-7)</sup>。その中でも、押し式のエレメントを有する金属 V ベルト式 CVT が数多く実用化されている。金属 V ベルト式 CVT は Fig. 1 に示すよう

な V 角を有する駆動/従動プーリと V ベルトとで構成される<sup>8-9)</sup>。金属 V ベルト式 CVT では摩擦による動力伝達が行われており、歯車伝動に比べて大きな押し付け荷重が必要なため、伝動損失が大きくなることが問題になっている<sup>10-12)</sup>。このような厳しい条件下で自動車の低燃費化の要求に応えるためには、大きな押し付け荷重を支えるエレメントの挙動を明らかにする必要がある。エレメントの挙動に関して

\*Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto  
Telephone: +81-774-65-6421, Email: cyjf1501@mail4.doshisha.ac.jp

\*\*Graduate School of Science and Engineering (at that time), Doshisha University, Kyoto

\*\*\*Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto  
Telephone: +81-774-65-6972, Email: kiobunai@mail.doshisha.ac.jp

\*\*\*\*Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto  
Telephone: +81-774-65-6444, Email: kokubo@mail.doshisha.ac.jp

はこれまでにいくつかの研究事例が報告されている<sup>13-14)</sup>。しかしながら、著者らが知る限りエレメントの挙動が走行時のベルトの傾斜に及ぼす影響は明確にされていない。そこで本研究の目的を、ベルトの傾斜の指標であるピッチ角の伝達トルクの増加に伴う変化を明らかにすることとした。本研究では、ベルト上に加速度センサを取り付けたエレメントを金属Vベルトに組み込み、走行試験を実施した。測定された加速度からベルト軌跡を類推することにより、伝達トルクの増加に伴うベルト軌跡の変化を調べた。

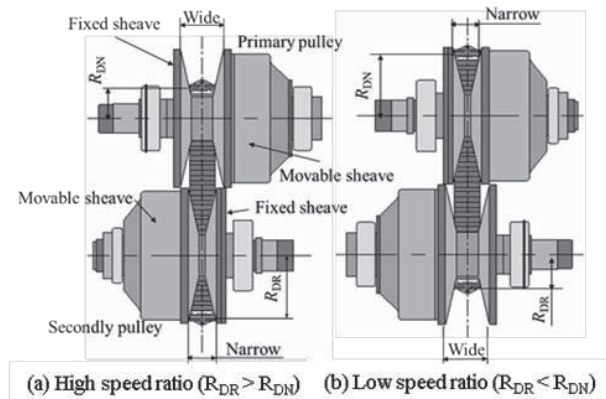


Fig. 1. Schematic view of CVT system.

## 2. 実験方法・試験条件

### 2.1 試験装置

本研究に用いた走行試験機の模式図を Fig. 2 に示す。本装置では、AC モータで発生させた動力を駆動軸から CVT ユニートを介して従動軸へ伝達させ、動力を電磁ブレーキにより吸収させた。トルクメータと回転数検出機を駆動軸、従動軸それぞれに設置し、駆動軸、従動軸トルクおよび駆動軸、従動軸回転数を検出した。試験条件を Table 1 に示す。本研究では測定を可能とするために駆動軸の回転数を低速の 5rpm とした。金属間接触によるベルトおよびプーリの摩耗を軽減するため、ユニット中の各接触部に CVT fluid による潤滑を行なった。また、油圧を用いて駆動軸推力および従動軸推力を作用した。変速の速度比を安定させるために、走行試験を駆動プーリ溝内

にカラーを取り付けた状態で行った。

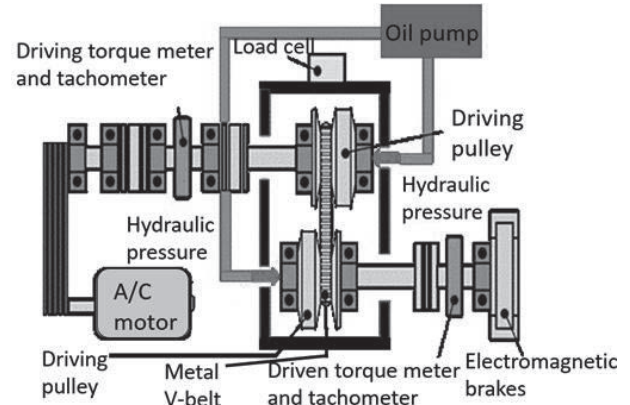


Fig. 2. Schematic view of testing system.

Table 1. Test conditions.

Rotational speed of driving pulley $N_{DR}$ [rpm]	5.0
Speed ratio $i$ [-]	1.0
Clamping force of driving pulley $F_{DR}$ [kN]	7.4
Clamping force of driven pulley $F_{DN}$ [kN]	6.3
Torque $\tau$ [Nm]	$\approx 0, 10, 20, 30, 40,$ 50

ここで、速度比  $i$  は従動軸回転数  $N_{DN}$  に対する駆動軸回転数  $N_{DR}$  の比を表し、次式により定義した。

$$i = \frac{N_{DR}}{N_{DN}} \quad (1)$$

### 2.2 CVT エレメントの加速度の測定

ベルトを構成するエレメントに T 字に加工した鋼板を溶着し、加速度測定用エレメントを作製した。このエレメントの鋼板上部に 3D プリンタを用いて製作したケースに収納された加速度センサを設置し、ネジ止めすることにより、ベルト上に実装した。Fig. 3

に加速度の座標系の定義を示す。エレメントの進行方向を  $x$  座標、横方向を  $y$  座標、上下方向を  $z$  座標と定義した。Fig. 4 に測定に使用したセンサを示す。本研究では、低ノイズの 3 軸加速度センサ(Analog Devices 製 ADXL355)および光センサ(CdS cell)の 2 種類のセンサを用いた。加速度センサでベルト周回時のエレメントの加速度を測定し、光センサでベルトに向けられた光源からのレーザ光を検知した。また、Fig. 5 に光センサで検知するレーザ光を照射する機器とその位置関係を示す。センサが従動プリーの入口に位置した時点で計測を開始した。

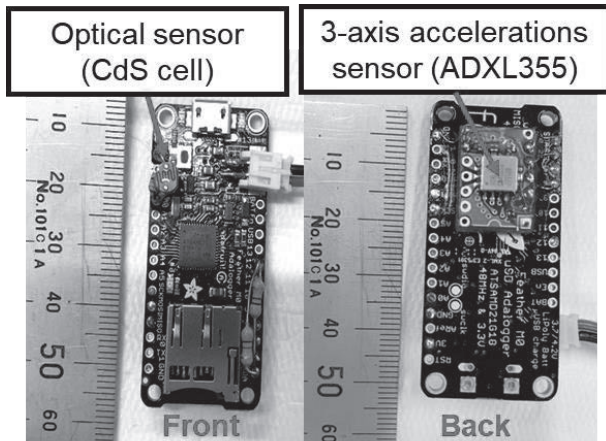


Fig. 3. Magnified view of acceleration sensor.

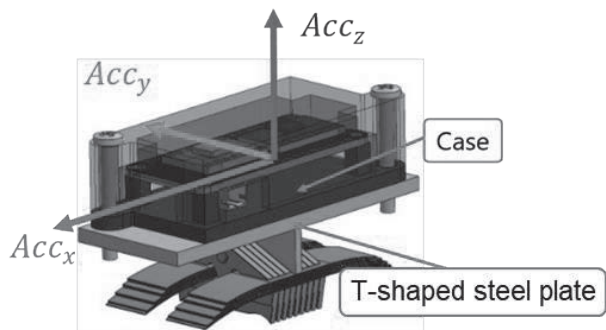


Fig. 4. Definition of local coordinate of acceleration.

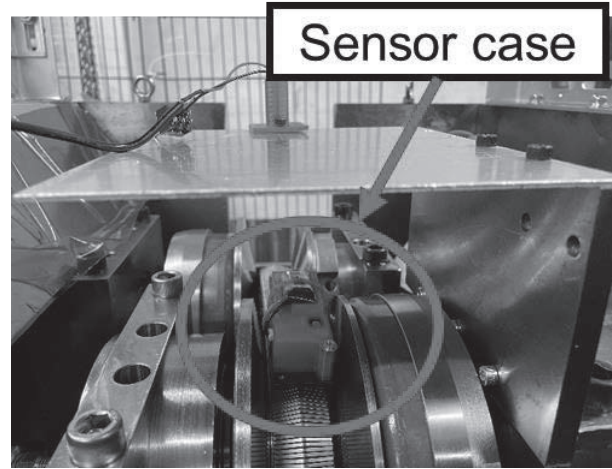


Fig. 5. Acceleration sensor mounted on belt.

### 2.3 加速度データの平滑化処理

エレメントの加速度データには機械振動などの様々なノイズが含まれる。本研究ではそのノイズを除去するために FIR(Finite Impulse Response)フィルタ<sup>15)</sup>を用いた。FIR フィルタは重み関数を用いた移動平均であり以下の式(2)により定義される。

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k)h(k) \quad (2)$$

ここで、 $x(n)$ 、 $y(n)$ および  $h(k)$ はそれぞれ入力の離散時間信号、出力の離散時間信号、および重み関数を表す。FIR フィルタの乗算に用いる係数の数であるタップ数を用いて FIR フィルタを作成する際には両端の境界で大きな歪みが生じることが知られている。そこで、本研究ではその歪みによる影響を低減するための重みつけのパラメータ群を決定するために窓関数を用いた。窓関数には周波数分解能に優れているハミング窓を適用し以下の式(3)を用いた<sup>16)</sup>。

$$h(n) = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (3)$$

$$(0 \leq n \leq N-1)$$

## 2.4 遠心加速度成分の除去

エレメントがプリー溝中で巻き付く時には、エレメントは回転運動するため円周外側方向に遠心力を受ける。これによりエレメントの半径方向には遠心加速度が生じるため、エレメントの純粋な挙動による加速度を取得するためには遠心加速度成分を除去する必要がある。そこで、プリー溝中での遠心加速度を算出するために遠心加速度  $a_{cen}$  を以下の式(4)で定義した。

$$a_{cen} = r\omega^2 = r\left(\frac{\pi N}{30}\right)^2 \quad (4)$$

ここで、 $r$ 、 $\omega$ および $N$ はそれぞれエレメントの巻き付き半径、エレメントの回転角速度およびプリーへの巻き付き時のエレメントの回転数を表す。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 伝達トルクの増加に伴うベルト軌跡の変化

Fig. 6 に加速度センサにより測定されたベルト進行方向のエレメントの加速度を示す。図中の横軸は、ベルトの1周を1となるようにベルト周長で無次元化されたエレメントの位置を表す。図中のDRの記号は駆動プリーの溝内、DNの記号は従動プリーの溝内を表す。また、DRおよびDNの範囲以外の位置はベルトの弦部に相当する。Fig. 6が示すように、加速度センサにより検出されたエレメントの加速度にはベルトの回転時のエレメントにかかる重力加速度成分が含まれる。そこで、以下に示す式(5)を用いて試験機から見た全体座標でのエレメントのピッチ角  $\theta_{pG}$  を算出した。

$$\theta_{pG} = \sin^{-1}\left(\frac{-Acc_x}{\sqrt{g^2 - Acc_y^2}}\right) \quad (5)$$

ここで、振動によるノイズや遠心力を除去した加速

度の大きさは重力加速度の大きさである  $g=9.81[\text{m/s}^2]$  と等しいとみなした。また、 $Acc_x$  および  $Acc_y$  はエレメントの2軸方向の加速度を表す。

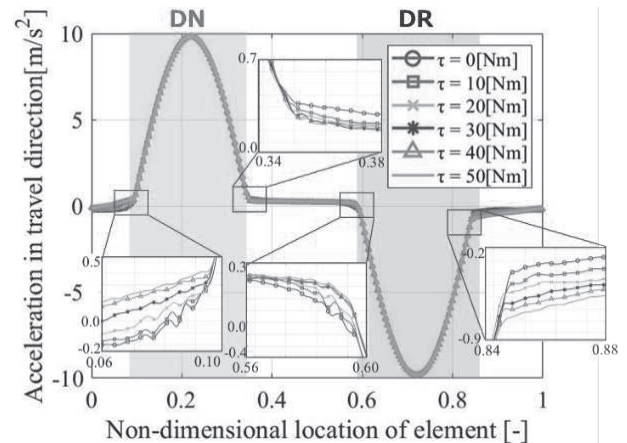


Fig. 6. Acceleration in travel direction of element.

Fig. 7 に式(5)を用いて算出したベルト1周分でのエレメントのピッチ角  $\theta_{pG}$  の変化を示す。図示方法を Fig. 6 と同様とした。ここで、図中のDRの記号は駆動プリーの溝内、DNの記号は従動プリーの溝内を表す。また、DRおよびDNの範囲以外の位置はベルトの弦部に相当する。Fig. 7が示すように、ベルト周回中の巨視的なピッチ角  $\theta_{pG}$  の変化は概ね幾何学的な変化に従う傾向が見られた。しかし、プリーの入口および出口付近でのピッチ角  $\theta_{pG}$  の変化は幾何学的な姿勢角では説明できないことが分かった。また、伝達トルクの増加に伴いピッチ角  $\theta_{pG}$  は従動プリー出入口付近で局所的に増加した一方で、駆動プリーではその逆の挙動をする傾向が見られた。このことから、伝達トルクの増加に伴い、ベルトの緩み側ではエレメントが真円軌跡に対し外側に移動する一方でベルトの張り側ではエレメントが真円軌跡に対し内側に移動する傾向があることが分かった。

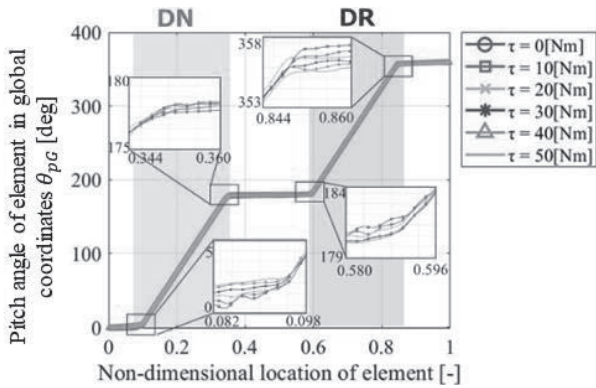


Fig. 7. Change of pitch angle of element in global coordinates.

ここで、ベルト周速  $v_b$  および式(5)により算出されたピッチ角  $\theta_{PG}$  を元に一周分のベルトの軌跡を算出した。ベルト周速  $v_b$  を一定と仮定すると、ベルト周長  $L$  とベルトの回転周期  $T$  を用いてベルト速度  $v_b$  は式(6)で表される。また、エレメントの姿勢角を考慮すると、サンプリング時間  $\Delta T$  経過した時のエレメントの変位  $\Delta x$  および  $\Delta y$  は式(7)-(8)で表される。

$$v_b = \frac{L}{T} \tag{6}$$

$$\Delta x = v_b \cos \theta_{PG} \Delta T \tag{7}$$

$$\Delta y = v_b \sin \theta_{PG} \Delta T \tag{8}$$

ここで、ベルトの回転周期  $T$  を光センサがレーザ光を検出する時間から再び検出するまでの時間とした。周回するベルトの軌跡の算出の際には従動軸中心を原点とした。サンプリング時間  $\Delta T$  経過した時のエレメントの変位  $\Delta x$  および  $\Delta y$  を足し合わせることで、式(9)および式(10)を用いて周回するベルトの巻き付き軌跡を算出した。ベルトがプーリに真円に巻付く時に想定される軌跡(以下、真円軌跡)を算出した。

$$x(i) = \sum_{j=1}^i \Delta x(j) \tag{9}$$

$$y(i) = \sum_{j=1}^i \Delta y(j) \tag{10}$$

ここで、ベルトの長手方向の剛性は十分大きいので、真円軌跡の算出の際にはベルト周速をベルト走行位置によらず一定とし、プーリ巻き付き中でのエレメントの角速度をプーリへの巻き付き位置によらず一定とみなした。

Fig. 8 に算出した周回するベルトの軌跡を示す。ここで、図中の DR の記号は駆動プーリの溝内、DN の記号は従動プーリの溝内を表す。また、DR および DN の範囲以外の位置はベルトの弦部に相当する。Fig. 8 より駆動および従動プーリの入口付近では真円軌跡と比べ外側へ押し出される一方で、駆動および従動プーリの出口付近では内側に入り込む傾向が見られた。

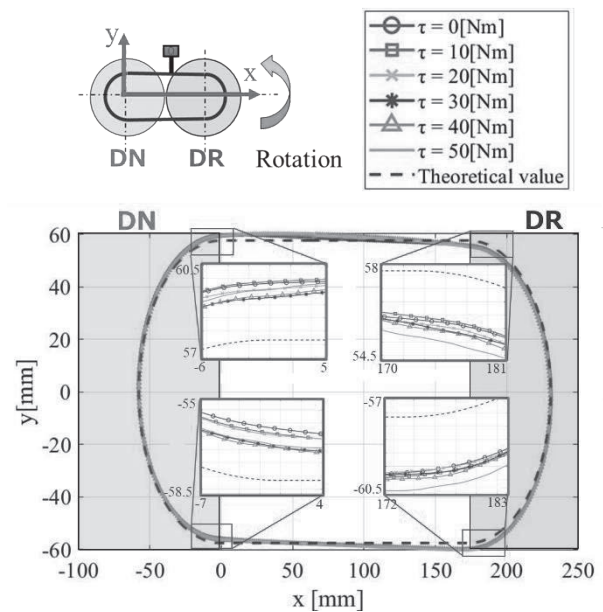


Fig. 8. Orbital change of belt with respect to transmitting torque.

また、駆動プーリ出口から従動プーリ入口までの弦部(Fig. 8 の上弦部)では、伝達トルクの増加に伴いベルトは内側に移動する傾向が見られた。一方で、従動プーリ出口から駆動プーリ入口までの弦部(Fig. 8 の下弦部)では、伝達トルクの増加に伴いベルトが真円軌跡に対し外側に移動する傾向が見られた。無負荷条件下において、駆動プーリ出口から従動プーリ入口までの弦部では張り側となり、従動プーリ出口

から駆動プーリ入口までの弦部では緩み側となる一方で、伝達トルクが増加すると、駆動プーリ出口から従動プーリ入口までの弦部が緩み側に、従動プーリ出口から駆動プーリ入口までの弦部で張り側に切り替わることが分かった。

### 3.2 エレメントのピッチ角の局所の変化

試験機から見た全体座標でのエレメントのピッチ角  $\theta_{pG}$  からベルト巻き付き位置角を引くことにより、以下の式(11)を用いてエレメントから見た局所座標でのエレメントのピッチ角  $\theta_{pL}$  を算出した。

$$\theta_{pL} = \theta_{pG} - \theta \quad (11)$$

ここで、 $\theta$  はエレメントの巻き付け位置角を表す。また、局所座標でのエレメントのピッチ角  $\theta_{pL}$  の正方向はエレメントが進行方向に倒れこむ方向を表す。従動および駆動プーリ溝中でのエレメントの巻き付け位置角  $\theta$  の算出の際には、それぞれ式(12)および式(13)を用いた。

$$\theta = \frac{t}{T_c} \theta_c \quad (\text{Driven pulley}) \quad (12)$$

$$\theta = \frac{t}{T_c} \theta_c + 180 \quad (\text{Driving pulley}) \quad (13)$$

ここで、 $t$ 、 $\theta_c$  および  $T_c$  はそれぞれエレメントがプーリに巻き付き始めてからの経過時間、エレメントとプーリの接触角およびエレメントとプーリの接触時間を表す。

Fig. 9 にエレメントから見た局所座標でのエレメントのピッチ角  $\theta_{pL}$  の算出結果を示す。ここで、図中の DR の記号は駆動プーリの溝内、DN の記号は従動プーリの溝内を表す。また、DR 及び DN の範囲以外の位置はベルトの弦部に相当する。Fig. 9 が示すように、エレメントは駆動および従動の両プーリ溝中にて、いわゆる後方に倒れ込んだ状態でプーリに巻き付くことが分かった。また、エレメントは

プーリ出口付近で後方に倒れ込んだ状態で脱出し、弦部で前方に倒れ込む方向にピッチ回転しながら移動し、プーリ入口付近で前方に倒れ込みながら進入するような特徴的挙動を示すことが分かった。

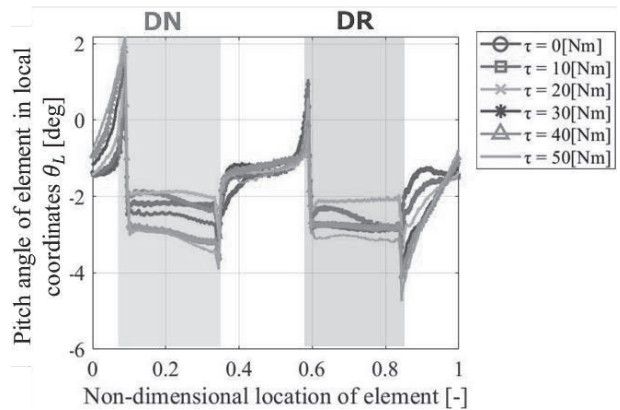


Fig. 9. Change of pitch angle of element in local coordinates.

## 4. 結言

本研究では、ベルト上に加速度センサを金属 V ベルトに組み込み走行試験を実施し、測定された加速度からベルト軌跡を類推することにより伝達トルクの増加に伴うベルト軌跡の変化を調べた。その結果、得られた結論を以下に示す。

- (1) ベルト周回中の巨視的なピッチ角の変化は概ね幾何学的な変化に従うが、プーリの入口および出口付近での局所的なピッチ角の変化は幾何学的な姿勢角では説明できない。
- (2) 伝達トルクの増加に伴い、ベルトの緩み側ではエレメントが真円軌跡に対し外側に移動する一方でベルトの張り側ではエレメントが真円軌跡に対し内側に移動する。
- (3) エレメントは駆動および従動の両プーリ溝中では後方に倒れ込んだ状態でプーリに巻き付く。
- (4) エレメントはプーリ出口付近で後方に倒れ込んだ状態で脱出し、弦部で前方に倒れ込む方向にピッチ回転しながら移動し、プーリ入口付近で前方に倒れ込みながら進入する。

本研究は、自動車用動力伝達技術研究組合 (TRAMI) より「次世代自動車等の開発加速化に係るシミュレーション基盤構築事業」に基づき研究助成を受けて実施された。記して謝意を示す。

### 参考文献

- 1) 藤井透, 大窪和也, “金属Vベルトを用いた CVT の動力損失低減”, 自動車技術, 62[3], 58-65 (2008).
- 2) 吉岡禎, “動力伝達装置”, 自動車技術, 66[8], 110-113 (2012).
- 3) 神田知幸, 戸塚博彦, 大沼正志, 首藤憲正, 平田智宏, 小形卯京, “グローバル小型車用新 CVT の開発”, Honda R&D Technical Review, 26[1], 40-45 (2014).
- 4) 川邊武俊: “自動車制御展望”, 計測と制御, 45[3], 161-166 (2006).
- 5) M. V. Drogen, and M. V. D. Laan, “Determination of Variator Robustness under Macro Slip Conditions for a Push Belt CVT”, *SAE Technical Paper*, 2004-01-0480 (2004).
- 6) A. Yildiz, F. Bottiglione, A. Piccininni, O. Kopmaz, and G. Carbone, “Experimental Validation of the Carbone – Mangialardi - Mantriota Model of Continuously Variable Transmissions”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232[6], 828-837 (2018).
- 7) 井手徹, “CVT ベルトに関して”, 自動車技術会論文集, 54[4], 4-9 (2000).
- 8) 浅山弘樹, 河合潤仁, 殿畑厚, 足立正晴: “金属ベルトの駆動メカニズム”, 自動車技術会論文集, 26[2], 78-81 (1995).
- 9) 藤井透, 金原茂, “金属ベルト式 CVT の伝動メカニズムと今後の展望”, トライボロジスト, 45[6], 441-448 (2000).
- 10) 藤井透, “V ベルト式 CVT の伝動効率について“, BANDO TECHNICAL REPORT, 10, 2-12 (2006).
- 11) 磯崎悠介, 大窪和也, 藤井透, 坂上恭平, 矢ヶ崎徹, “金属 V ベルトを用いた CVT のトルク変動下での動力伝達”, 自動車技術会論文集, 49[6], 1230-1236 (2018).
- 12) 神名孝紀, 大窪和也, 藤井透, 吉田秀昭, 矢ヶ崎徹, “定常伝動状態における金属Vベルトタイプ CVT のエレメントの滑り要因”, 自動車技術会論文集, 40[4], 1029-1034 (2009).
- 13) H. Tani, H. Yamaguchi, H. Hattori, M. Shimizu, K. Arakawa, and Y. Hattori, “Measurement of the Behavior of a Metal V-belt for CVTs”, *R&D Review of Toyota CRDL*, 45[3], 23-30 (2014).
- 14) R. Okuda, K. Okubo, T. Fujii, K. Sakagami, and T. Yagasaki, “Slip Behavior in Pulley Groove up to Sliding Slip at Steady State and Power Transmitting Efficiency on Metal V-belt Type CVT”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 11[6], 1-10 (2017).
- 15) 三谷政昭, “FIR フィルタの設計(その 1)”, 日本音響学会誌, 44[8], 603-609(1988).
- 16) 城戸健一, “デジタルフィルタの原理(その 3)”, 日本音響学会誌, 43[6], 448-452(1987).