

# CVT ベルト用金属リングの 3 次元表面形状評価法

Method for Three-dimensional Evaluation of Surface Form of Metal Rings  
for CVT Metal Pushing V-belts

梅 津 健 太\*  
Kenta UMETSU

御子貝 浩 良\*  
Hiroyoshi MIKOGAI

## 要 旨

CVT金属ベルトに伝達されるトルクの増大に対し、リングは従来以上の高精度な形状成形が求められる。なかでもリング表面形状のさらなる高精度化が必要であり、リングの製法と製造履歴を定量的に評価可能な3次元表面形状の測定技術が求められる。従来リング幅方向の形状精度の評価方法は確立されている一方、周方向に連続な断面形状を評価する方法が確立されていなかった。本評価法では、汎用的なレーザセンサを用いて断面形状を連続的に取得する方法で、リング全周にわたる3次元表面形状を表現し、製法に依存する周期的な形状偏差を定量化した。

## ABSTRACT

In order to respond to the increased amounts of torque being transmitted by the metal pushing V-belts in CVTs, it was necessary to increase precision in the formation of the metal rings employed in the belts. This necessitated the achievement of a higher level of precision in the surface forms of the rings, a requirement that demanded the development of a three-dimensional surface form measurement technology enabling quantitative evaluation of the manufacturing processes and manufacturing history of the rings. While there is a standard method of evaluating the precision of the surface form of the rings in the direction of width, no integrated method of evaluating the continuous sectional form in the direction of the circumference has been available. The developed method uses general purpose laser sensors to gather continuous data on the sectional form of the rings, enabling reproduction of the three-dimensional surface form of the rings around the entire circumference. This has enabled quantification of the cyclic deviations in surface form that occur during the manufacturing process.

## 1. はじめに

発進クラッチ方式からトルクコンバータ方式への仕様変更により、発進やストール状態におけるトルク増幅により、金属ベルトに伝達されるトルクは増加する。トルク増幅領域のリング高張力時は、リングの挙動を安定化させるため、より形状精度の高いリングが必要となる。それはリングの挙動が増幅されるとFig. 1のエレメントとリングが干渉し、リング端部の摩耗を発生させる一因となるためである。そのため、リング周方向にわたる設計寸法と実形状の差である形状偏差を管理する必要がある。

従来、リング全周にわたる板幅方向の形状偏差は、非切断方式の測定手法<sup>(1)</sup>を装置化し管理してきた。またその装置を用いて、リング圧延工程のローラ精度に由来する周期的な高次の形状成分を評価し、リングの板幅方向における

形状精度の高度化を達成してきた<sup>(2)</sup>。しかし圧延ローラ精度はリング表面の形状精度にも寄与し、3次元的な表面形状を評価できる方法が合理的である。またリング製造工程のひとつである熱処理工程では、治具の干渉による熱処理

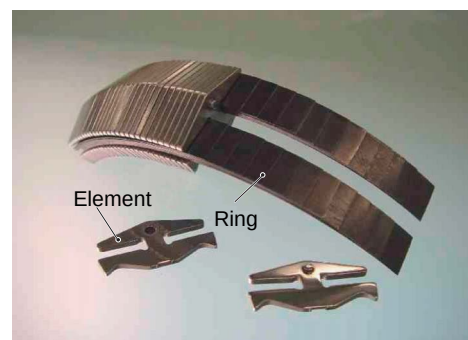


Fig. 1 Components of metal pushing belt

不良部分で表面形状に変形が生じるが、薄肉リング表面の計測と評価は難しく、測定手法が存在しなかった。開発した形状評価法は、汎用的なラインレーザセンサと簡単な位置決め機構を採用した装置構成でリング表面の3次元形状を測定する。また測定結果に対し、周波数解析を適用することで、複数の製造工程にわたる製造履歴を、形状偏差量として定量化できる。

この方法は、リング形状の高精度化の目的に対し、形状偏差の発生する製造工程の検証を効率的におこなえる点で利点がある。

## 2. リング形状偏差の発生メカニズム

リングの製造において、形状偏差が顕著に発生する工程に、圧延工程と熱処理工程がある。圧延工程の2次元的な模式図は Fig. 2 に示すとおりである。リングは圧延ローラと圧下受けローラ間クリアランス  $f$  で圧延成形される。X-Y座標系において、圧延ローラの回転軸  $o$  に対し、ローラを中心  $g$  への偏心量  $og$  を  $e$ 、偏心の初期角度を  $\phi_0$ 、圧延ローラの回転角度を  $\theta$  とする。なお X 軸を基準に Y 軸に向かう角度を正とする。また圧延ローラの理想的な半径値  $R$  に対し、半径方向の形状偏差を  $\Delta R$  とすると、クリアランス  $f$  の変動  $\Delta f$  は式(1)で表現される。

$$\Delta f(\theta) = \sqrt{(R + \Delta R)^2 - e^2 \cos^2(\theta + \phi_0)} + e \sin(\theta + \phi_0) - R$$

$$\approx \Delta R + e \sin(\theta + \phi_0) \quad (1)$$

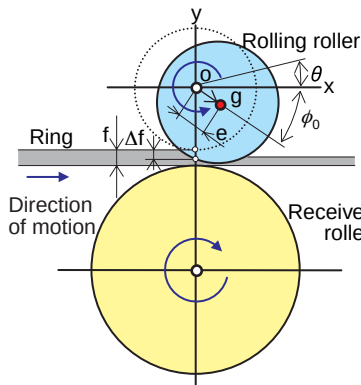
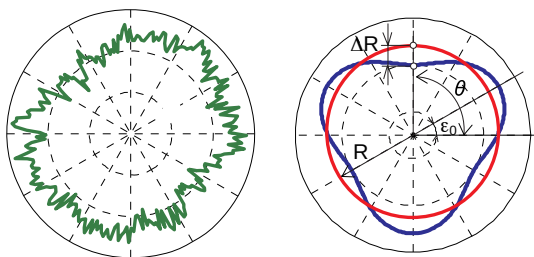


Fig. 2 Schematic diagram of rolling of steel ring



(a) Deviation of real form (b) Deviation of modeled form

Fig. 3 Deviation of real and modeled forms on rolling roller

圧延ローラの表面形状の実測値は Fig. 3(a) に示すような楕円状の2次の形状偏差を持つ。式(1)における圧延ローラの表面形状偏差  $\Delta R$  を、振幅を  $a$ 、次数を  $k$  として式(2)のとおりにモデル化する。 $\varepsilon_0$  は  $\theta$  に対する初期角度であり、 $k$  を3としたモデルは Fig. 3 (b) に示すとおりである。

$$\Delta R(\theta) = a \sin(k\theta + \varepsilon_0) \quad (2)$$

式(1), (2)より角度  $\theta$  において 360 deg を1周期とすると、圧延ローラ1回転による  $\Delta f$  の周期性は1次と  $k$  次となる。

これより、リングへの加圧は周期的に不均一となり、リング全周長の圧延に対して、圧延ローラに回転数  $m$  が必要な場合、リング表面には  $m$  次と  $m \times k$  次の周期性をもったうねり形状が成形されると予想される。

一方熱処理工程では、リングの治具への配置による物理的な干渉が原因の部分的な変形が発生する。

## 3. 測定原理

リング全周にわたる表面形状は、Fig. 4に示す装置構成により測定する。2個1組のプーリにリングを巻きつけ、ガイド機構上のプーリ B には、ローラを介した重り約 5 kg を連結し、リングに張力を与える。プーリ AB 間の midpoint 位置には、ラインレーザセンサ(キーエンス社製 LJ-G030)を配置し、リング幅方向の全域にわたる断面形状を Fig. 5 のとおり一括して取得する。1断面あたりの測定時間は約 4 ms で、測定点数は 10 mm の評価幅で約 300 点である。取得したデータは、リング端部の2点を基準に y 軸と平行となるよう回転変換し、円弧形状の最大高さ  $h$  を算出するものとする。

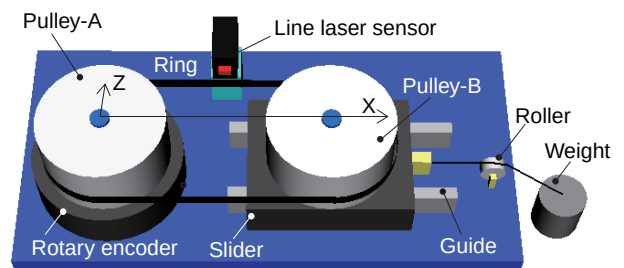


Fig. 4 Ring surface 3D measurement instrument

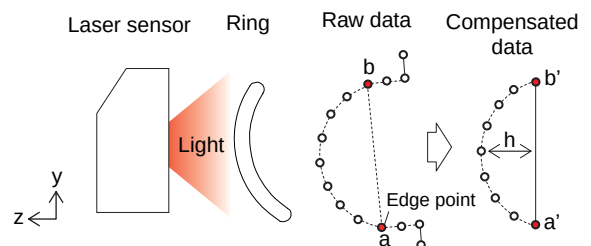


Fig. 5 Principle of data acquisition and compensation

一断面のデータ取得後は、プーリを逐次的に同一角度で回転させ、リング断面データを連続的に取得し、長さ換算した等間隔の送り量に対して断面形状を配列して3次元表面形状を創成する。そのためには個々の断面形状の測定精度を確保するために、レーザセンサの光学特性に依存したノイズの除去が必要となる。

### 3.1. リング断面形状評価法

レーザセンサにより取得した断面形状データに対し、リング表面の粗さやノイズを除去することを検討する。

Fig. 6 はレーザセンサにより取得した形状データの一例であるが、円弧形状の表面には、短波長成分の振幅が見受けられる。短波長成分にリング表面の粗さ成分とノイズが存在するため、Fig. 6のとおりに、断面形状データに低次の近似曲線  $P$  を求め、Fig. 7 のとおりに残差を表面形状  $Q$  とした分離をおこなう。また Fig. 8(a) のとおりに  $Q$  のパワースペクトルと、その累積度数を算出する。

同様に、同一リングの同一断面をスタイラス半径  $25\text{ }\mu\text{m}$  の接触式形状測定機(Mitutoyo製CV-500)により測定し、表面形状のパワースペクトルとその累積度数を Fig. 8(b) のとおりに算出する。Fig. 8(b) において、累積度数分布は10次程度まで対数的に増加し、約80%の形状成分を含んでいる。また10次までの形状成分は、波長  $0.9\text{ mm}$  以上のうねり領域であり、粗さの波長領域には合致しない。

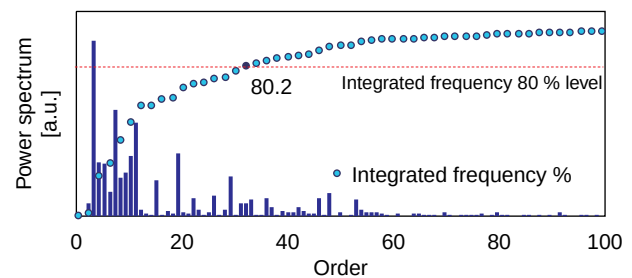
接触式形状測定機とレーザセンサによる表面形状測定で算出したパワースペクトルの累積度数は、それぞれ12次と32次で80%を超えている。これより、レーザセンサで取得した表面形状の12次以上の短波長成分がレーザセンサの光

学特性によるノイズと判断し、短波長成分を遮断するガウシアンフィルタ<sup>(3)</sup>を適用するものとする。なおカットオフ波長  $\lambda_c$  は  $0.8\text{ mm}$  と設定する。このフィルタによる効果は、10次、20次の形状成分でそれぞれ約50%、10%の振幅伝達率となる。

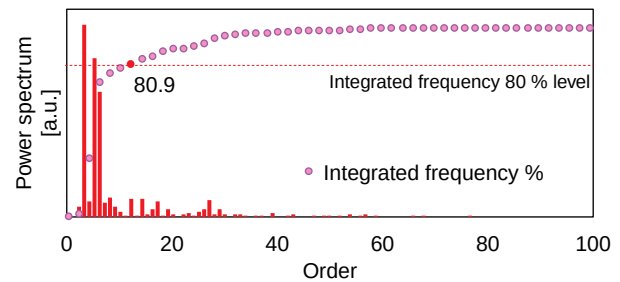
表面形状  $Q$  に対するフィルタ効果は、Fig. 7 に示すうねり  $W$  となる。なおリング断面形状は、抽出されたうねり  $W$  に  $P$  を加算した形状と定義する。この方法では、リング端部に発生しやすいノイズと表面形状の分離をおこなうことで、測定対象である円弧形状の高さ  $h$  の測定精度を安定化させている。

### 3.2. 非接触式測定の精度評価

任意に選択したリング1本上の10断面の円弧形状高さ  $h$  を本装置で測定し、接触式形状測定機による測定結果と比較した。Fig. 9 に示すとおりに、10断面の平均偏差は  $4.3\text{ }\mu\text{m}$ 、相関係数は  $0.99$  であった。接触式とレーザセンサによる10断面の  $h$  かたよりは、レーザ光のリング表面に対する照射角度の垂直度が主要因であり、幾何学的な校正が可能である。



(a) Line laser measurement



(b) Contact-type form measurement machine

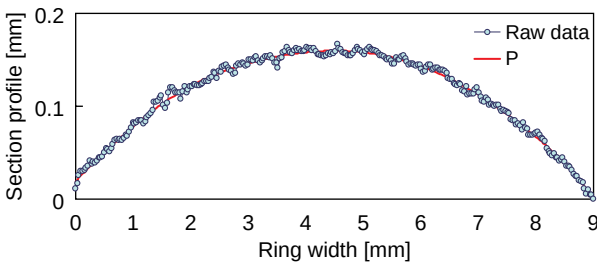


Fig. 6 Example of data acquisition by line laser sensor

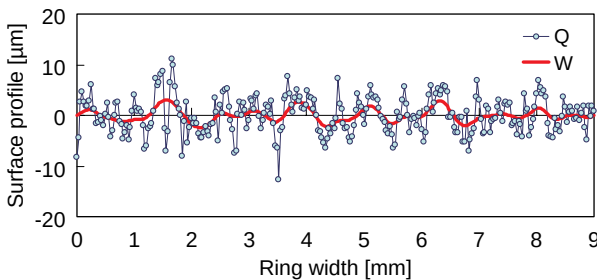


Fig. 7 Ring surface measured by line laser sensor and filtering

Fig. 8 Comparison of power spectrum on ring surface

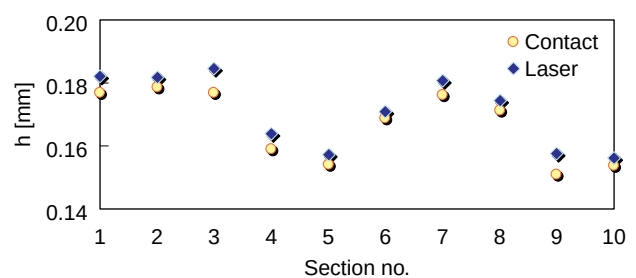


Fig. 9 Measurement accuracy based on laser sensor

Table 1 Raw data for evaluation of measurement repeatability

| h mm       | No. 1  | ... | No. 10 | Average |
|------------|--------|-----|--------|---------|
| Section 1  | 0.1796 | ... | 0.1855 | 0.1820  |
| ⋮          |        |     |        |         |
| Section 10 | 0.1525 | ... | 0.1543 | 0.1562  |
| Average    | 0.1659 | ... | 0.1720 | 0.1709  |

Table 2 Result of ANOV for measurement repeatability

| S <sub>i</sub> μm <sup>2</sup> |        | n <sub>i</sub> | M <sub>i</sub> =S <sub>i</sub> /n <sub>i</sub> μm <sup>2</sup> |                         | μm <sup>2</sup>                                             |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
| S <sub>1</sub>                 | 2.9204 | 1              | M <sub>1</sub>                                                 | 2.92038                 | –                                                           |
| S <sub>2</sub>                 | 0.0117 | 9              | M <sub>2</sub>                                                 | 0.001303                | σ <sub>M</sub> <sup>2</sup> +10 σ <sub>R</sub> <sup>2</sup> |
| S <sub>3</sub>                 | 0.0004 | 9              | M <sub>3</sub>                                                 | 4.05 × 10 <sup>-5</sup> | σ <sub>M</sub> <sup>2</sup> +10 σ <sub>E</sub> <sup>2</sup> |
| S <sub>4</sub>                 | 0.0017 | 81             | M <sub>4</sub>                                                 | 2.06 × 10 <sup>-5</sup> | σ <sub>M</sub> <sup>2</sup>                                 |

本装置の繰り返し性検証として、選定したリング 10 断面をそれぞれ繰り返し 10 回測定する方法で、分散分析をおこなった。なお 1 回の測定ごとに、リングを測定装置のローラに再セットすることで、下記項目を評価している。 $\sigma$  は標準偏差を表す。

- (a)  $\sigma_R$ : リング全域にわたる測定位置の円弧形状の高さ  $h$  のばらつき  
 (b)  $\sigma_E$ : 同一位置の繰り返し測定で得られる円弧形状の高さ  $h$  のばらつき  
 (c)  $\sigma_M$ : プーリの位置決めとリングの装置へのセッティングを含めた測定の繰り返し性

Table 1 に示すデータ形式に対し  $X_{ij}$  を  $j$  番目の断面における、 $i$  番目の繰り返し測定結果として式(3)の計算をおこない、分散分析表 Table 2 と式(4)より  $\sigma_R$ ,  $\sigma_E$ ,  $\sigma_M$  を算出した。Table 2 における  $n$  は自由度を示す。

$$\begin{aligned}\bar{X}_i &= \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} X_{ij}, \bar{X}_j = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} X_{ij}, \bar{X} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} X_{ij} \\ S_1 &= 100\bar{X}^2, S_2 = 10 \sum_{j=1}^{10} (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \\ S_3 &= 10 \sum_{i=1}^{10} (\bar{X}_i - \bar{X})^2, S_4 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{10} (X_{ij} - \bar{X}_i - \bar{X}_j + \bar{X})^2\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\sigma_R &= \sqrt{(M_2 - M_4)/10} = 11.3 \mu\text{m} \\ \sigma_E &= \sqrt{(M_3 - M_4)/10} = 1.4 \mu\text{m} \\ \sigma_M &= \sqrt{M_4} = 4.5 \mu\text{m}\end{aligned}\quad (4)$$

本装置による一断面あたりの円弧形状の測定精度  $\sigma_E$  は  $1.4 \mu\text{m}$ 、繰り返し性  $\sigma_M$  は  $4.5 \mu\text{m}$  である。既存の接触式測定に比べ高精度であるとは言いが、安価な汎用レーザ

センサと単純な位置決め機構を採用した測定原理であるため生産現場での展開が期待できる。

#### 4. 測定と解析結果

本装置を用いて、製造工程間の加工履歴を定量的に把握する目的で、(1)圧延工程後のリング(2)製品リング(3)製品リングの熱処理変形部の表面形状を評価する。(1)から(3)の評価結果はそれぞれ Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 に示す。

本評価においては装置のプーリ最小回転角度は  $3 \text{ deg}$  と設定し、リング全長に対して約 250 断面を取得した。なお取得する断面数は任意に設定できる。

取得した 3 次元リング表面形状に対し、リングの円筒形状と表面形状を分離するため、3 次元形状データ  $z$  を式(5)にて最小二乗近似する。近似円筒曲面  $z_p$  に対し、 $z$  と  $z_p$  の偏差を表面形状  $dz$  と定義する。

$$z_p(x, y) = ax^2 + by^2 + 2cxy + 2dx + 2ey + f \quad (5)$$

圧延工程後のリング表面形状  $dz$  を Fig. 10(a) に示す。ここで、表面形状  $dz$  の低次の形状成分を抽出するために、リング幅方向の形状へ効果を与えない式(6)のフィルタを適用する。 $\lambda_x, \lambda_y$  はそれぞれリング周方向  $x$ , 幅方向  $y$  の波長を示し、カットオフ波長  $\lambda_c$  は  $30 \text{ mm}$  と設定する。このフィルタにより 20 次、30 次の形状成分でそれぞれ約 50%, 24% の振幅伝達率となる。

$$H(\lambda_x, \lambda_y) = e^{-\pi \left( \frac{\lambda_c}{\lambda_x} \right)^2} \quad (6)$$

式(6)によるフィルタ効果は Fig. 10(b) に示すとおりである。周方向で等間隔に連なる 6 個の凹凸が確認される。またリング幅位置の正方向に向かい形状の振幅が増大する傾向が見受けられる。

リングの全長にわたる表面積を  $A$  とし、式(7)のとおり面領域内の算術平均高さを  $SW_a$  とし、Fig. 10(b) の表面形状の評価をおこなうと  $2.4 \mu\text{m}$  であった。

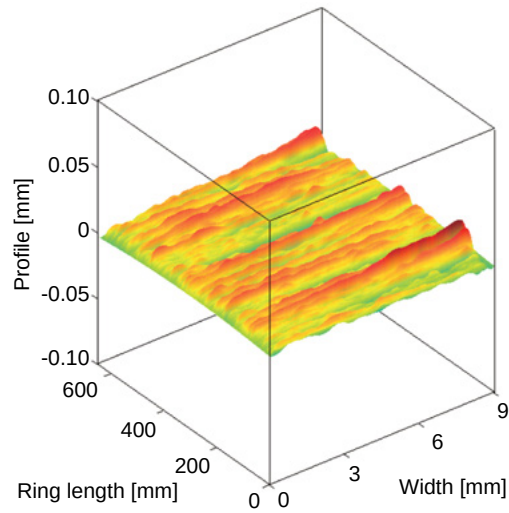
$$SW_a = \frac{1}{A} \iint_A |dz(x, y)| dx dy \quad (7)$$

式(8)の 2 次元のパワースペクトル  $S$  から、式(9)のとおり  $S$  のフーリエ逆変換 IFT から算出する  $C$  を正規化すると、自己相関関数  $A_c$  は式(10)のとおりとなる。

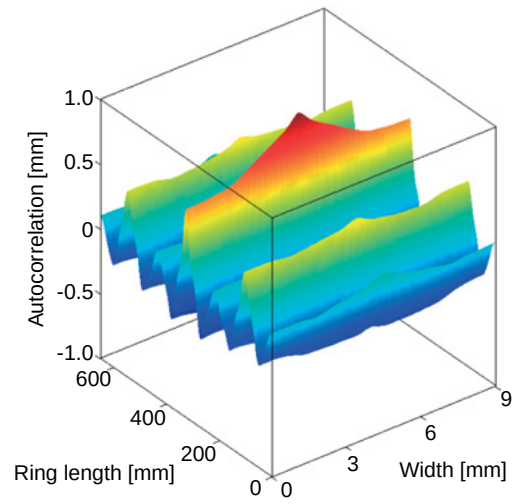
$$S(f_x, f_y) = |\text{FT}(dz(x, y))|^2 \quad (8)$$

$$C(x, y) = \text{IFT}(S(f_x, f_y)) \quad (9)$$

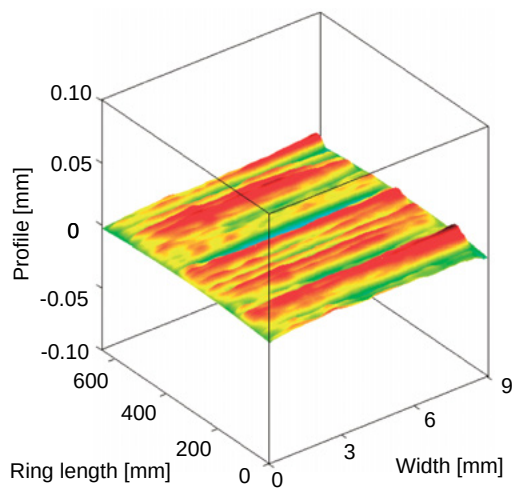
$$A_c(x, y) = \frac{C(x, y)}{C(x_0, y_0)} \quad (10)$$



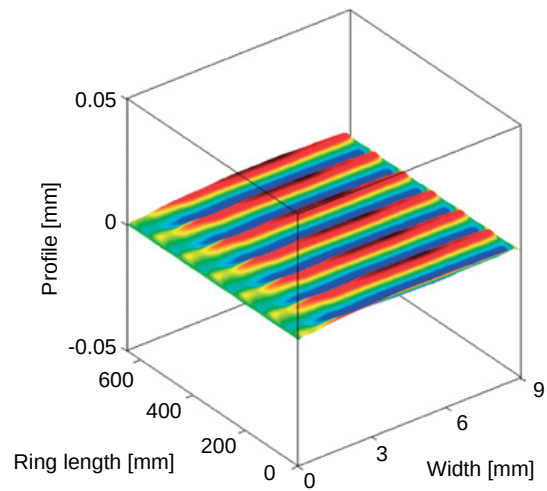
(a) Raw data of ring surface after rolling



(c) Autocorrelation of the surface in Fig. 10 (b)

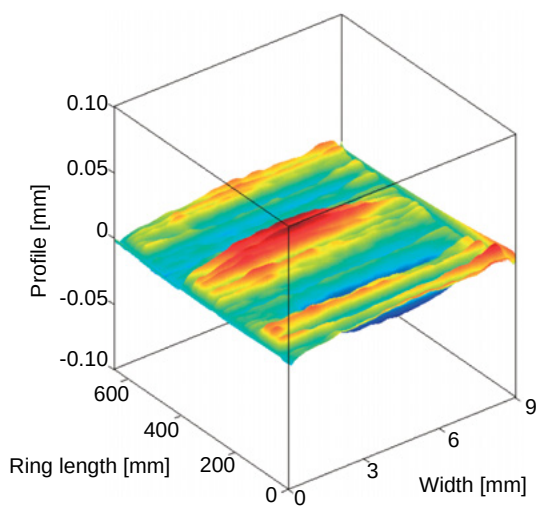


(b) After low pass filtering of the surface in Fig. 10 (a)

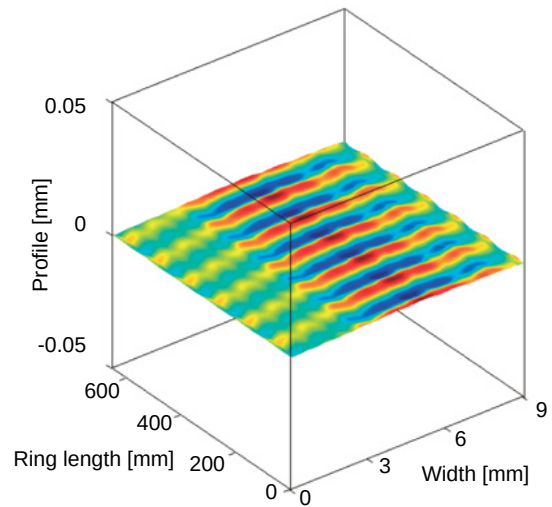


(d) Extraction of 6<sup>th</sup>-order form from Fig. 10 (b)

Fig. 10 Measurement results of ring surface after rolling



(a) After low pass filtering of raw surface data



(b) Extraction of 6<sup>th</sup>-order form from Fig. 11 (a)

Fig. 11 Measurement results of ring surface of product

自己相関関数は、主要成分の方向の判別や、方向による周期性の指標として加工面の評価に採用されている<sup>(4)</sup>。Fig. 10(c)は周長、板幅の中央( $x_0, y_0$ )を基準にした自己相関関数の計算結果となる。

周方向で $x_0$ からの距離に比例し、相関が減少する6次の相関が確認される。周方向の110 mm, 540 mmの位置で相関が上昇するのは、3次の成分の影響によるものである。Fig. 10(b)の表面形状から周方向に6次の形状成分のみを抽出したのが Fig. 10(d) となる。板幅の広域にわたり周期的な形状が連続しているのが確認でき、その振幅の最大値 $S_6$ は $3.5 \mu\text{m}$ であった。

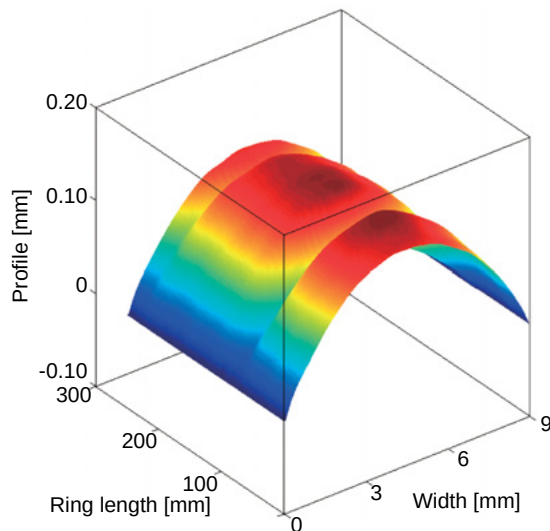


Fig. 12 Form deformation generated by heat treatment

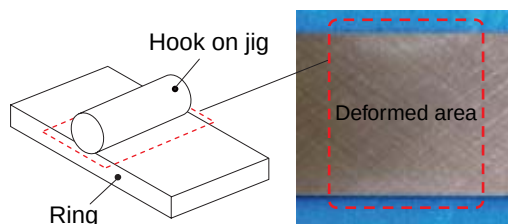


Fig. 13 Surface deformed area generated by heat treatment

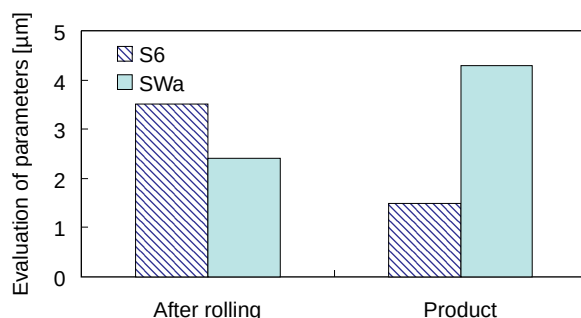


Fig. 14 Evaluation of surface height parameters

これは式(1)で示したとおり、圧延工程におけるローラの回転軸に対する偏心が原因で、リング全周長の圧延にローラの回転が6回必要であることを示している。

同様に製品リングの表面形状の測定結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a)は製品リングの表面データに式(6)のフィルタを適用した結果である。Fig. 11(a)における $SW_a$ は $4.3 \mu\text{m}$ であった。また Fig. 11(a) から6次の形状成分のみを抽出しているのが Fig. 11(b) であるが、その最大振幅 $S_6$ は $1.5 \mu\text{m}$ で圧延工程後と比較し、60%の低減が確認された。これは圧延工程後に、圧延ローラとは異なる径のローラでリングの長さを増大させる周長補正の影響と推測される。

Fig. 12に熱処理工程後のリング表面形状を示す。評価範囲 300 mm の範囲で2箇所、約 $40 \mu\text{m}$ の変形が測定されており、変形位置は Fig. 13 に示す白色部位置と対応している。なお変形位置は、リングを治具に掛けるときの物理的な干渉位置と一致している。

Fig. 14 に圧延工程後と製品における $S_6$ と $SW_a$ の変化をまとめる。 $S_6$ は圧延工程から製品までの後工程で減少するのに対し、 $SW_a$ が増大している。これは Fig. 12 に示した熱処理工程による変形を表面形状に含むことによる。 $SW_a$ の評価のみでは、製造工程に依存した、形状偏差の履歴を捉えることは困難であるが、例えば特定周期成分のみを評価した $S_6$ の評価を併用する場合、製法と形状偏差の因果関係を説明できる。

## 5. 結論

CVT用金属リングの形状精度高度化の目的に対し、開発したリング3次元形状評価技術の結論と利点を以下にまとめる。

- (1) リング周方向の断面形状を汎用なラインレーザセンサにより取得し、取得データを連続的に配列する方法で3次元リング形状測定を実現した。簡単な構成からなる本装置は安価で製造現場への展開が容易である。
- (2) 3次元表面形状データに対して周波数解析をおこなうことで、製造工程間の形状偏差を顕在化、定量化した。また表面形状の自己相関関数による表現で、加工による特性や履歴の視覚化を実現した。
- (3) 圧延工程のローラの偏心により、リング表面に成形された6周期の最大振幅値 $S_6$ は $3.5 \mu\text{m}$ であったが、周長補正工程を経た製品リングにおいて $S_6$ は $1.5 \mu\text{m}$ まで減少しているのが確認された。またリング表面の術平均高さ $SW_a$ は圧延工程後で $2.4 \mu\text{m}$ 、熱処理工程を経た製品リングにおいて $4.3 \mu\text{m}$ に増大した事例が確認された。

本測定解析技術により、製造工程における課題の早期発見や、試作効率の向上に寄与できることが期待される。

## 参考文献

- (1) 有川守, 瀧宏敏: CVT 金属ベルト用リングの形状評価技術, Honda R&D Technical Review, Vol. 14, No. 2, p. 57-62
- (2) 矢ヶ崎徹, 青山英明, 原田雅道, 春江憲治, 梅津健太: 1.5L クラス TC-CVT 用金属ベルト, Honda R&D Technical Review, Vol. 20, No. 1, p. 14-18
- (3) Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Metrological characteristics of phase correct filters, JIS B0632
- (4) Whitehouse, D. J.: Handbook of Surface and Nanometrology, Institute of Physics Publishing, p. 751-752(2003)

## ■ 著 者 ■



梅津 健太



御子貝 浩良