

CVTベルト用金属リングにおける周長精密測定と不確かさ

Precision Measurement Method of Circumferential Length and Uncertainty for Steel Ring
in CVT-pushing Belt

梅 津 健 太*
Kenta UMETSU

御子貝 浩 良*
Hiroyoshi MIKOGAI

要 旨

CVTベルト用の金属リング単体の周長精度は、耐久性確保のためにマイクロメータオーダで管理されている必要がある。金属リングの周長測定は、周長マスタリングと検査対象である金属リングの微小な長さの差を実測することを原理としている。よって周長マスタリングには、高精度な計測法と不確かさ評価が求められている。

紹介する測定手法では、周長マスタリングを二つのローラに掛け、ローラ中心間長さとリング巻きつき部のローラ半径を実測し、マスタリング周長値を定量化する。二つの測定は、高精度な三次元座標測定機を用いて高精度化を実現している。また、ローラ中心間長さとローラ半径における測定の不確かさは、それぞれブロックゲージとリングゲージの測定から定量化するものとした。

ブロックゲージとリングゲージは寸法の不確かさが保証された長さ標準器であるため、本測定手法にもとづいた周長マスタリングの測定結果は、高精度で長さのトレーサビリティが確保されることになる。

ABSTRACT

The accuracy of the circumferential length of the metal rings used in CVT-pushing belts need to be controlled on the micrometer level to help ensure the durability of the belts. The principle used in measuring the circumferential length of the metal rings is the measurement of infinitesimal differences in length between a master ring for circumferential length and the ring being examined. A highly accurate measurement method and a method of evaluating the uncertainty of these measurements are therefore necessary for the master ring for circumferential length.

In the measurement method discussed in this paper, the master ring for circumferential length is positioned between two rollers, the length between the centers of the rollers and the radii of the sections of the rollers around which the ring winds are measured, and the circumferential length of the ring is quantified. A high level of accuracy has been realized in the two sets of measurements through the use of a high-accuracy three-dimensional coordinate measuring machine (CMM). In addition, the uncertainty of the measurements of the length between the centers of the rollers and the radii of the rollers is quantified using gauge block and gauge ring measurements.

Because gauge blocks and gauge rings are instruments of a standard length with a specified level of dimensional uncertainty, the measured results for the master rings for circumferential length based on this measurement method are traceable with a high degree of accuracy.

1. はじめに

CVTベルトは複数の金属リングが積層されており、ベルトの耐久性確保のため、金属リングの周長は精密に管理されている必要がある。金属リングの周長測定は、周長マスタリング(Master Ring for Circumferential Length: MRC)と検査対象である金属リングの微小な長さの差を実測することを原理としている。

金属リング単体の周長精度はマイクロメータオーダであり、その精度はMRCの精度に大きく依存する。しかしMRC

の測定精度は、従来十分に議論されていなかった。二つのローラに掛けた MRC は、ローラ中心間長さとリング巻きつき部のローラ半径を測定し、周長とする手法において、以下の課題があるためである。

- (1) ローラ中心間長さ測定の高精度化
- (2) 測定における不確かさ評価の複雑さ

紹介する MRC 精密測定法は、ローラ中心間の長さとし、リング巻きつき部のローラ半径を高精度な三次元座標測定機(Coordinate Measurement Machine: CMM)により測定する。CMM 測定による不確かさ評価は、校正されたワーク

*四輪R&Dセンター

ピースを用いた比較測定による実用的な方法が ISO/TS 15530-3⁽¹⁾で提案されている。

本測定手法の不確かさ評価において、ISO/TS 15530-3 に従えば、ローラ中心間の長さとしリング巻きつき部のローラ半径の測定の不確かさは、それぞれブロックゲージとリングゲージの測定から定量化できる。ブロックゲージとリングゲージの不確かさは小さいことから、MRC の測定結果は、高精度で長さのトレーサビリティが確保されることになる。

近年、生産システムのグローバル化にともない、部品の流通における品質保証を効率的におこなう技術は重要性を増している。信頼性評価の方法は ISO を中心に不確かさ評価に統一され、広く普及され始めている。

本稿では不確かさ評価の方法と、その評価法適用の事例として MRC 測定の不確かさ評価について述べる。

2. 周長マスタリングの測定原理と不確かさ

2.1. 不確かさの定量手法と製品検査方法

不確かさは、測定結果からどの程度のばらつきの範囲内に真の値があるかを示すものである。不確かさは、確率的な定量表現に標準偏差 σ をもちいる。例えば測定結果 a の不確かさが 2σ であるとした場合、真の値は信頼水準 95.4% の確率で $a \pm 2\sigma$ の範囲内に存在することになる。ここで不確かさの定量手順を以下に簡単にまとめる。

- (1) 測定対象 Y の不確かさの複数因子 $x_1, x_2 \cdots x_n$ を列挙する。
- (2) 測定対象 Y を変数 $x_1, x_2 \cdots x_n$ により数学モデル化する。

$$Y = f(x_1, x_2 \cdots x_n)$$

- (3) 因子 x の不確かさ $u(x)$ を個々に定量化し、因子間に相関が無ければ、 Y の合成標準不確かさ $u(Y)$ を下記とする。

$$u(Y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 u^2(x_1) + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 u^2(x_n)}$$

測定の不確かさを含めた、製品の合否判定については、JIS B0641(製品の幾何特性仕様(GPS)-製品及び測定装置の測定による検査-第1部:仕様に対する合否判定基準)⁽²⁾にて規格化されている。

Fig. 1 に示すとおり、仕様の領域1に対して測定不確かさ U を内側に取って合否判定する。このため測定の不確かさが大きい場合には、適合の領域3は小さくなる。なお複数の製造現場で同一部品の合否判定をおこなうためには、不確かさの評価にトレーサビリティが考慮されている必要がある。

2.2. 周長マスタリングの測定

CVT ベルトの部品構成を Fig. 2 に示す。CVT ベルトは積層された複数の金属リングとエレメントから構成される。MRC は、金属リングから任意に選定するものとする。

MRC 測定装置の概略を Fig. 3 (a) に示す。直径約 110 mm のローラ 1, 2 に周長約 650 mm の MRC が巻きつけられている。スライダにはウエイト 20 kg が連結されており、ローラ 2 に配置されているスライダが、 Y 方向に並進移動する機構なため MRC には張力が与えられる。

またローラ 1 の回転量はロータリエンコーダにより測定される。本装置は CMM の定盤上に配置され、ローラ中心間長さが測定される。なお本稿で採用した CMM の測定精度 U は、 L_E をミリメートルオーダの評価長さとする、 $U = 0.4 + L_E / 1000 \mu\text{m}$ である。

ローラ 1, 2 に MRC を掛け、ウエイトによる張力を発生させた状態でローラを回転させると、Fig. 3 (b) のとおり MRC 内周表面とローラ円筒部の円弧形状によるセンタリング効果から、MRC 内周の円弧頂上部 S_1 がローラ 1 の円弧頂上部 H_1 と一致する。同様に MRC 内周の S_2 とローラ 2 の円弧頂上部 H_2 も一致する。

なおローラ 1, 2 において、お互いの円弧頂上部の位置 Z_1, Z_2 の差異は 0.1 mm 以下に調整されている。これによりローラ中心間長さのコサイン誤差は、 $0.03 \mu\text{m}$ と無視できる。

このときローラ 1, 2 の中心座標を測定することでローラ中心間長さ E を算出する。MRC がローラに巻きついた円弧頂上部の半径測定値をローラ 1, 2 においてそれぞれ R_1, R_2 とすれば、MRC の周長値 L は式(1)となる。また

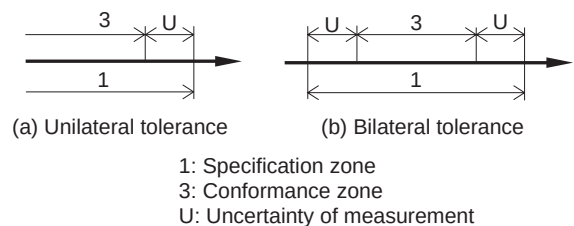


Fig. 1 Product inspection considering uncertainty of measurement

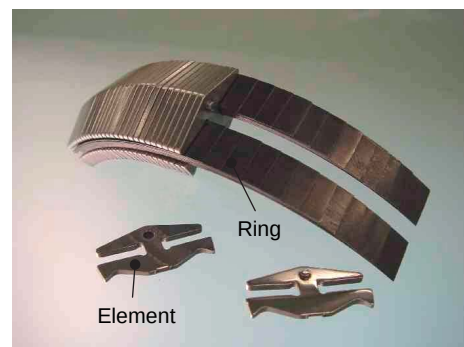


Fig. 2 Components of CVT-pushing belt

L の不確かさ $U(L)$ は、不確かさの伝播則に従い^{(3), (4)}, E , R_1 , R_2 に相関が無いものとして、包含係数を k とし式(2)となる。

$$L = 2E + \pi(R_1 + R_2) \quad (1)$$

$$U(L) = k \times \sqrt{4U^2(E) + \pi^2(U^2(R_1) + U^2(R_2))} \quad (2)$$

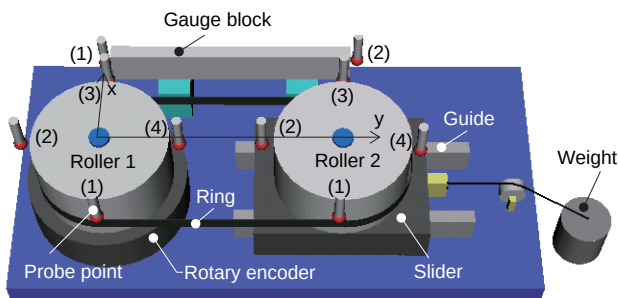
ローラ 1, 2 の中心座標の測定は Fig. 3 (a) のとおり一つのローラ円筒上に 4 点の測定点を均等に配置した円測定から算出するものとする。またローラ 1, 2 の偏心によるローラ中心間長さ E への影響を補正する目的で、ローラ 1, 2 を同期させて複数回、微小回転させるごとにローラ中心間長さを測定する。

得られた一組のデータは、ローラの回転角度に依存した偏心による系統的な変動を示し、中心間長さの数値的な補正が可能である。本測定では、15 deg 刻みでローラを 24 回送るごとにローラ中心間長さの測定をおこなった。

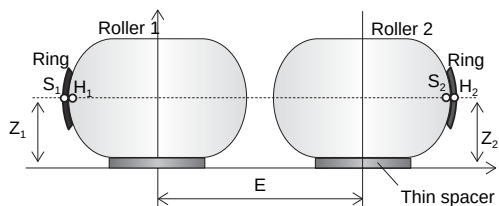
さらにローラ中心間長さの測定時に、CMM に内蔵されたスケールの、熱膨張補正の保証を目的として、ローラ中心間長さと同程度の 150 mm のブロックゲージの長さ測定をおこなう。ブロックゲージの片側の端部はローラ 1 の中心と位置合わせされ、かつローラと平行に配置された状態である。

ブロックゲージの長さ測定結果から、CMM による長さ測定の不確かさを把握できるため、ローラ中心間長さ測定の不確かさ評価がおこなえることになる。

本測定では、式(1)で表された周長 L の不確かさを定量化することを目的としている。本測定法において不確かさ



(a) Probe points position for measurement of length between two rollers using CMM



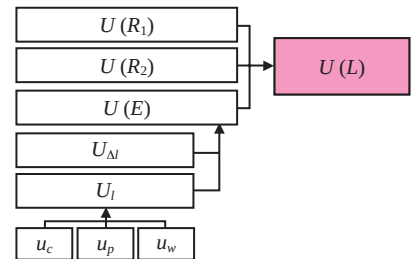
(b) Adjustment of roller's height for reducing cosine error

Fig. 3 Schematic diagram of instrument for CVT ring circumferential length measurement

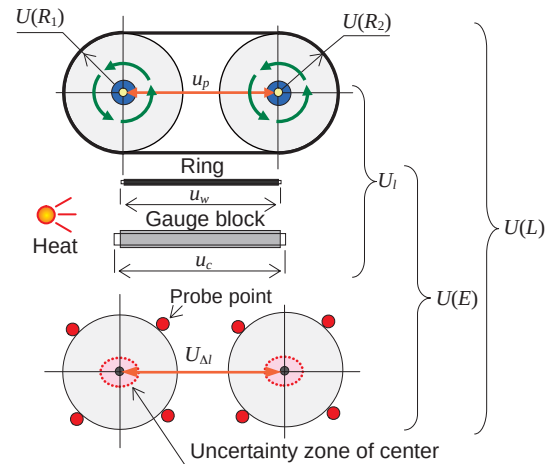
因子は、Fig. 4 (a) のとおりローラ 1 の半径 $U(R_1)$ 、ローラ 2 の半径 $U(R_2)$ 、ローラ中心間長さの $U(E)$ の三つに大別され、式(2)の $U(L)$ はそれらにより合成される。

また $U(L)$ の不確かさ因子の分類を Fig. 4 (b) に示す。 u_c はブロックゲージの校正值と、熱膨張補正の不確かさ、 u_p はローラの回転によってローラとリングの接触面が変化し生じる、ローラ中心間長さの不確かさ、 u_w は金属リングの熱膨張補正の不確かさを示す。 U_L は u_c , u_p , u_w による合成標準不確かさである。

さらに $U_{\Delta l}$ は CMM の円測定における測定点の配置位置や点数、被測定物の形状精度のみから決定する中心座標の不確かさに起因した、ローラ中心間長さの不確かさである。



(a) Combination of uncertainties for ring circumferential length measurement



(b) Classification of uncertainty sources

Fig. 4 Classification of uncertainty sources and combination for uncertainty of ring circumferential length measurement

3. 周長マスタリングの測定結果と不確かさ評価

ローラ中心間長さの測定結果とローラの偏心について数値補正した結果を Fig. 5 に示す。補正前と、1 次の偏心誤差が補正されたデータの平均値はともに 158.2306 mm であるが、標準偏差は補正前で 2.5 μm 、補正後は 0.4 μm まで減少している。

Table 1 Uncertainty budget for circumferential length of ring measurement

Source	Symbol	Nominal value	Standard uncertainty	Distribution
Gauge block				
Length of gauge block	g^0	150 mm	50 nm	Normal
Linear coefficient of expansion	α_G	$10.8 \times 10^{-6}/K$	$\pm 0.5 \times 10^{-6}/K$	Normal
Temperature of gauge block	t_G	-0.627 K	0.1 K	Rectangular
CVT metal ring				
Length between two rollers	E	158 mm	—	—
Linear coefficient of expansion	α_R	$11 \times 10^{-6}/K$	$\pm 0.8 \times 10^{-6}/K$	Normal
Temperature of ring	t_R	-0.682 K	0.06 K	Rectangular
u_p [μm]			0.40	
u_w [μm]			0.14	
u_c [μm]			0.16	
$U(E)$ [μm]			0.45	
$U(R)$ [μm]			$U(R_1) = 0.46, U(R_2) = 0.60$	
U_l [μm]			0.37	
$U_{\Delta l}$ [μm]			0.26	
$U(L)$ [μm] ($k=1$)			2.6	

同一の MRC を 24 時間後に、装置へ再配置し再測定をおこなったところ、1 回目と 2 回目のデータ平均値の差異は $0.1 \mu m$ であったことから、本測定法の再現性の高さが確認された。

MRC 測定の不確かさ評価は、ISO/TS 15530-3 に従い、ブロックゲージやリングゲージの校正値を参照する比較測定法を採用する。

Fig. 6 に ISO/TS 15530-3 の概念図を示す。測定の不確かさ U は、測定対象と同一形状・同等寸法の校正されたワーク (Calibrated Work piece : CW) を繰り返し測定することで算出する。

u_c は CW の校正値と熱膨張補正の不確かさを総合的に評

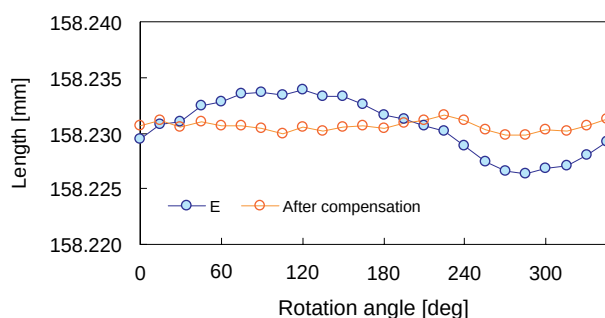


Fig. 5 Measurement of length between two rollers and compensation of perpendicular eccentricity of rollers

価した不確かさである。 u_p は繰り返し回数 20 以上の CW 測定の不確かさである。 u_w は測定対象の熱膨張補正とアライメントの不確かさを総合的に評価した不確かさである。このとき不確かさ U は独立に評価可能な u_c , u_p , u_w による平方二乗和で算出される。

Table 1 に MRC 測定に影響する因子とその不確かさを示す。また算出したローラ中心間長さ測定の不確かさ $U(E)$ 、ローラ測定による中心座標算出の不確かさ $U_{\Delta l}$ 、ローラ半径測定の不確かさ $U(R)$ を示す。 $U(E)$, $U(R)$ とともに約 $0.5 \mu m$ の不確かさであった。

$U_{\Delta l}$ には、円測定における、測定点の配置位置や点数に

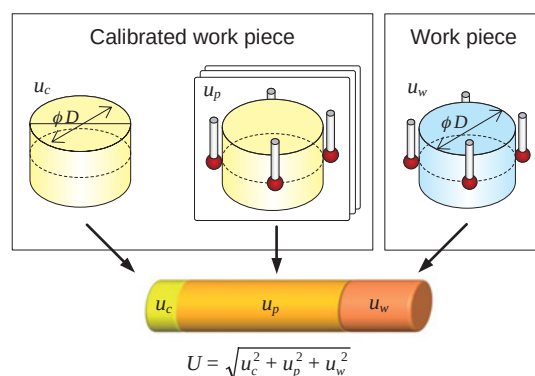


Fig. 6 Uncertainty estimation method based on ISO/TS 15530-3

よってのみ決定する中心座標の不確かさが影響する。例えば円形状に沿う均等な測定点配置で、測定点数を増大させると中心座標の不確かさは小さくなる傾向がある。本測定手法では、測定時間と精度の適正化をおこない、測定点数は4点とした。それにより $U_{\Delta i}$ は約 $0.3 \mu\text{m}$ となった。

なおブロックゲージ、リングゲージ、MRCの熱膨張補正に用いた温度計は 0.0025 K の不確かさであらかじめ校正されており、MRC 測定の不確かさ $U(L)$ は、 k を1としたとき $2.6 \mu\text{m}$ となった。

4. まとめ

本手法はMRCを直接測定する代わりに、高精度に加工、計測可能な直線と円形状を組み合わせて測定できる合理性の高い手段である。

製品の合否判定については、JIS B0641に代表されるように、測定の不確かさを定量化する必要性が高まっているのに対して、不確かさ算出過程を明示していくことは重要性を増すと考えられる。

高精度な測定と測定の不確かさ評価を要する自動車部品は多数あるが、重要性が高く、既存の測定方法が採用できない部品においては、不確かさ評価を考慮した測定原理の考案が求められる。

MRC精密測定と不確かさ評価について以下のとおりまとめる。

- (1) MRC を単純な幾何形状である直線と円の組みあわせで、高精度な CMM により測定した。
またその不確かさは $2.6 \mu\text{m}$ であり、2回の繰り返し測定の差異が $0.2 \mu\text{m}$ であり再現性が確認された。
- (2) CMM 測定における不確かさ評価規格 ISO/TS 15530-3 に準拠した方法により、長さのトレーサビリティが確保された MRC 測定の不確かさを定量化した。
- (3) 測定結果の不確かさが保証された MRC の提供が可能になったことで、量産現場での品質管理への貢献と事業所間トレーサビリティの確立が期待できる。

参考文献

- (1) ISO/TS 15530-3:2004, Geometrical Product Specifications (GPS)-Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement- Part3: Use of calibrated work pieces or standards
- (2) JIS B0641-1: 2001, 製品の幾何特性仕様(GPS)－製品及び測定装置の測定による検査－第1部：仕様に対する合否判定基準
- (3) 飯塚幸三：計測における不確かさの表現ガイド，日本規格協会，p.50(1996)

- (4) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML: Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO First edition(1993)

■ 著 者 ■



梅津 健太



御子貝 浩良