

可搬式長尺測長器の誤差低減に関する考察 (プロービング誤差と誤差マップピッチ間隔) *

和合健 **

可搬式長尺測長器は、自重による撓みによる測定誤差が課題となっている。この課題を解決できればゲージの線膨張係数の測定が行える。そこで本研究では、可搬式長尺測長器の測長誤差低減の方策としてプロービング誤差と誤差マップのピッチ間隔の対策に取り組んだ。その結果、ブロックゲージ 500 mm の測定で、測定数 $n = 18$ の平均値で標準値との差は -0.0085 mm、ばらつきは $\sigma 0.0033$ mm となり当初の問題点が改善され誤差が低減した。

キーワード：姿勢誤差、オフライン補正、プロービング誤差、誤差マップピッチ間隔、線膨張係数

Study on Reducing Deviation of Transportable type Long size Gauge Measuring Instrument

WAGO Takeshi

Key words: orientation error, offline compensation, probing deviation, pitch size of deviation map, CTE

1 緒言

半導体製造装置は大型化の傾向があり、その製造工程における部品段階の寸法検査では、長尺部品の測定に苦慮している。この場合の製品の寸法測定では、各メーカーから市販されているトラック式寸法測定器等を使用すれば良い。我々が開発している長尺測長器（以下、本器）は図1に示す一軸のみの測長器（測定範囲 3800 mm）で、図2のとおり筐体は鉄製アングル材と平板筋交で剛性を高め、図3のとおり目盛にレーザー干渉（レニショー、XL-80）を使用しているため温度補正により環境影響に頑健性が高い特長を有している。また可搬性を持たせるために軽量化に特化し、総重量は 110.4 kg であるが、筐体 (71.4 kg) と光学ベンチ等 (39.0 kg) に分解できる。本器の用途は、長尺標準器の寸法標準値と線膨張係数（以下、Coefficient of thermal expansion: CTE）の値付けである。長尺標準器の多くが軽量化のため筐体に CFRP、測定部は鋼材を使用するなど複数要素で構成されている。そのためこれらの標準器に

CTE を値付けするには、自ら実験により求める A タイプ¹⁾で直接個体を測定する必要があり、本器の高精度化を進めて来た²⁾⁻⁵⁾。本器で値付けした標準器を使用し、市販測定器での測定値に対して各種ドリフト誤差をユーザ補正で取り除くことで測定値の正確性が向上する。

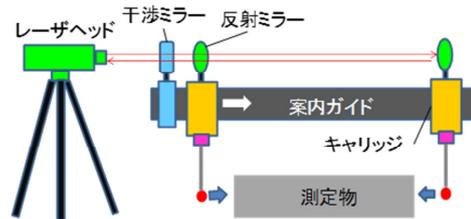


図1 装置構成



図2 筐体

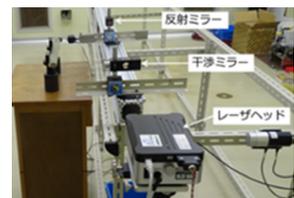


図3 レーザ干渉計の配置

* 令和5年度技術シーズ創生・発展研究事業（可能性調査研究）

** 素形材プロセス技術部（現・電子情報システム部）

これまで終了時点での長さ測定誤差として、CFRP 製端度標準器 (CB850, L=850 mm)³⁾ を測定した時の標準値との差が平均値 0.060 mm (n=5)、ばらつきは σ 0.027 mm (n=5) であった。本器は軽量化が必要であるため、通常の測長器とは異なる機構設計となったことに起因する問題点が発生している。以下に問題点と解決案を示す。主な問題点は、①キャリジ走行時の振動、②プロービング誤差、③誤差マップのピッチ間隔の3つである。①の対策として、すべり摩擦軸受による振動と長さ測定誤差の関係把握と転がり軸受への変更を実施し、案内方式に起因する誤差を取り除くことができた⁵⁾。本研究では、②と③について取り組んだ結果を報告する。

2 プロービング誤差 (問題点②)

キャリジが案内軸を移動するときの姿勢誤差補正は必須であり、補正することで誤差が低減できることを示した⁴⁾。姿勢誤差補正をレーザ干渉計制御プログラムに内挿するには制御プログラムのプログラムソースが公開されている必要があり、メーカーから提供された Renishaw SDK (Visual Basic6.0) と CARTO の二つの選択肢から、プログラムソースが公開されていた Renishaw SDK を選択して使用した。メーカーに確認した結果、Renishaw SDK のサン

プリング周期は 20 Hz (50 ms) でありプロービング速度に追従しない。一方で CARTO のサンプリング周期は 50 kHz (20 μ s) であり、十分にプロービング速度を上回ることが判明した。このことで、電気式トリガプローブ (TP1) から通電式タッチセンサ (PMC-20) に交換したことで測定誤差が大幅に低減した理由を明確にすることができた⁵⁾。つまり、図 4 のとおり方式 1 ではプロービングを微動ねじで測定部に接触させ、静止後にトリガスイッチを押す方式であるため、Renishaw SDK のサンプリング周期 20 Hz (50 ms) が排除されたが、測定誤差が作業者の技能に依存する問題点が残った。一方で方式 2 は単に測定物に当てるだけのプロービングであるため作業者の技能が測定誤差に関係しない。その結果、CARTO と電気式トリガプローブを組み合わせることでプロービング誤差が低減できることが分かった。

オフライン補正の模式図を図 5 に示す。プログラムソースが公開されていない CARTO を利用して姿勢誤差補正を行う方法は、CARTO での測定後に MS-Excel に測定値を入力して、VBA マクロにより姿勢誤差とワーク温度膨張を補正して最終結果を表示する方式とした。つまり、CARTO で測定を行い、次に手動で MS-Excel の Sheet1 に数値を入力する 2 工程での測定手順を要するが、測長器の必須制御である姿勢誤差補正とワーク温度膨張補正を与えることができた。



図 4 制御ソフトウェアとプローブ

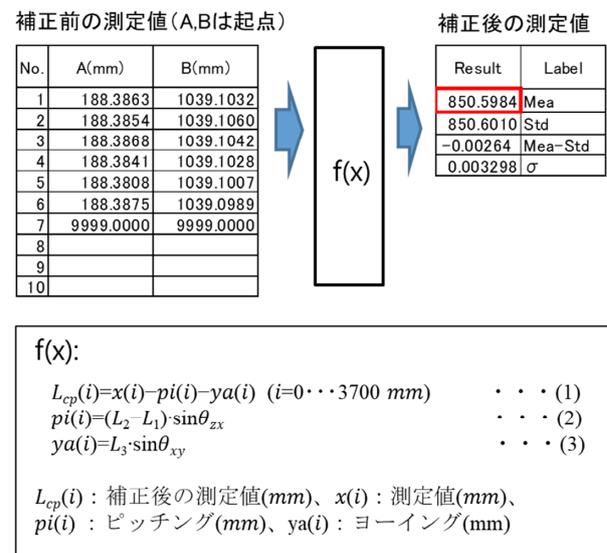


図 5 オフライン補正の模式図

3 誤差マップのピッチ間隔（問題点③）

最初に姿勢誤差補正の X 軸ピッチ間隔は 100 mm とし、測定範囲 0-3700 mm では測定点 37 点となった。100 mm 間隔で空白範囲が生じるが、その範囲は傾き一定の直線補間として計算した。しかしながらその空白範囲は推測域であるため、ピッチ間隔の影響を調べるためにピッチ 50 mm（測定点 74 点）とピッチ 10 mm（測定点 370 点）で誤差マップを作成して長さ測定誤差を比較した。

表 1 のとおり 3 水準のピッチ間隔で作成した誤差マップを利用して姿勢誤差補正を行い、標準器 CB850 を利用して長さ測定誤差（標準値との差）

表 1 ピッチの水準

	水準		
	1	2	3
ピッチ(mm)	100	50	10

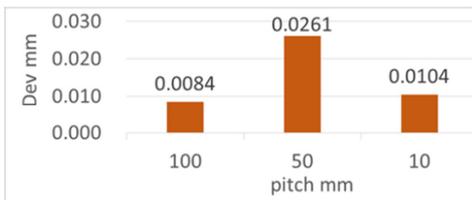


図 6 長さ測定誤差の平均値

を求めた。3 水準のピッチ間隔は水準 1 が 100 mm（測定点 37 点）、水準 2 が 50 mm（測定点 74 点）、水準 3 が 10 mm（測定点 370 点）である。その結果、長さ測定誤差の平均値は図 6 に示すとおり水準 1 の 100 mm で 0.0084 mm、水準 2 の 50 mm で 0.0261 mm、水準 3 の 10 mm で 0.0104 mm となった。ピッチ 100 mm とピッチ 10 mm でほぼ同等になり、ピッチ 50 mm で誤差が大きい。図 7 のとおりピッチ 50 mm で誤差が大きく、測定位置 1324-2175 mm で誤差が突出して大きい傾向が見られ、これはレールの繋ぎ目 2 か所がピッチ 50 mm の計測位置に丁度合致し、ガタの影響で正確な測定が行われなかったためと思われる。図 8 に 3 水準を重ねた誤差マップを示す。3 水準はほぼ同等に重なり推移しているが、急峻なグラフ形状箇所が目細かいピッチ 50 mm と 10 mm の集団に対して目の粗いピッチ 100 mm で差があるのが分かる。しかしながらキャリジの縦方向の転がり軸受間隔が 180 mm と十分に長く、急峻部のピッチ間隔の効果が消されていると思われる。つまり本器の設計においてピッチ間隔は 100 mm で十分であり、それより細かく設定しても効果が表れないと推測された。

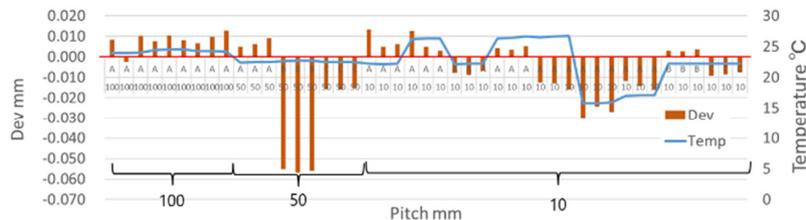


図 7 誤差マップピッチ毎の長さ測定誤差

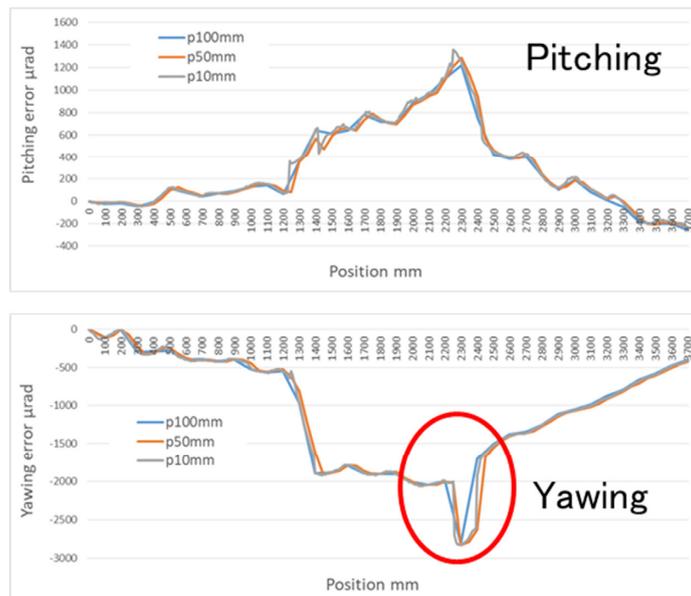


図 8 誤差マップ

4 改良後の確認実験

4-1 長さ測定誤差

表 2 と図 9 に改良後の長さ測定誤差を示す。測定物はブロックゲージ 500 mm (中央寸法差: -0.15 μm) で、Mea-Std が標準値との差 (誤差) で σ がばらつきを表す。測定数は n=18 として平均値を算出した結果、誤差の最大値は範囲 2666-3700 mm 時の -0.0085 mm、ばらつきの最大値は 0-1333 mm 時の 0.0033 mm となった。従来値は CB850 測定時で標準値との差は平均値 0.060 mm (n=5)、ばらつきは σ 0.027 mm (n=5) であり当初の問題点が改善され誤差が低減した。

$$CTE = \frac{\Delta L}{L \cdot (T - 20)} \quad \dots (4)$$

4-2 CTE の測定 (GB500 の場合)

図 10 に示す配置で長尺ブロックゲージ 500 mm の CTE を測定して、本器での CET 値付けの測定性能を検証した。測定条件は温度変動幅を 16.0 ~

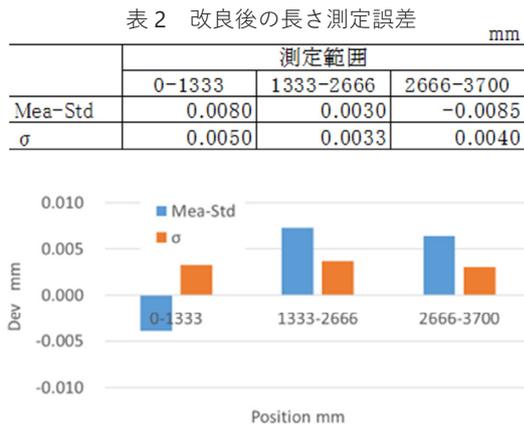


図 9 改良後の長さ測定誤差

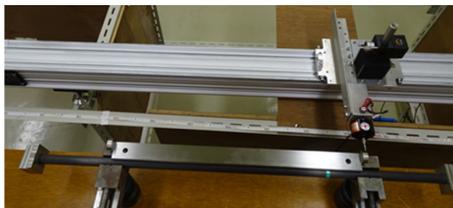


図 10 GB500 の配置

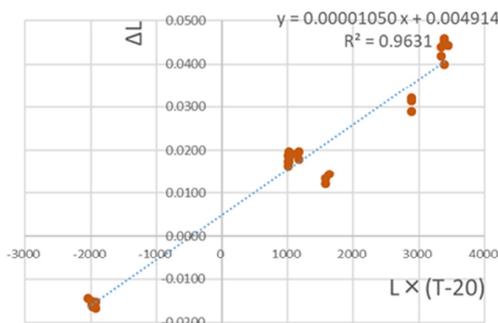


図 11 GB500 での CTE 測定

26.8°C、測定数は n=27、測定方向は一方向測定とし、CTE は式 (4) から求めた。Cos θ 誤差を考慮し Y 軸出入りは 0.05 mm 以下とした。その結果、図 11 のとおり CTE は 10.50×10^{-6} (/K)、相関係数 R=0.98 となり、メーカーの公称値 10.8×10^{-6} (/K) との差は -0.3×10^{-6} (/K) となり本測長器の信頼性が確認できた。

4-3 CTE の測定 (CB850 の場合)

図 12 に示す配置で GB500 と同様の手順で、複数要素で構成された標準器 Cb850 の CTE を測定した。温度変動幅は 17.0 ~ 26.2°C、測定数は n=15、測定方向は一方向測定とした。その結果、図 13 のとおり CTE は 3.15×10^{-6} (/K) と測定され、相関係数は R=0.95 となった。過去の文献値等を用いる B タイプ¹⁾による構成要素別の CTE は、CFRP がカーボン繊維の縫製方向で異なり、軸方向 0.2×10^{-6} (/K) となり径方向では 5.7×10^{-6} (/K)、SUS303 が 18.7×10^{-6} (/K) であり、この数値から測定された CTE を算出することは難しいと思われた。そこで CB850 の全長対端度測定部 (SUS303) 及び全長対筐体部 (CFRP) の長さ比率の複合則で CTE を B タイプで算出した。その結果、B タイプでの CTE は 1.51×10^{-6} (/K) となり、A タイプの結果との差は -1.64×10^{-6} (/K) となり一致しなかった。このことから複数要素で構成される標準器は、B タイプでの机上算出は困難であり、複合材の標準器は A タイプで CTE の値付けを行う必要があることが確認でき、本研究は当初の全目的を達成し問題点が収束した。



図 12 CB850 の配置

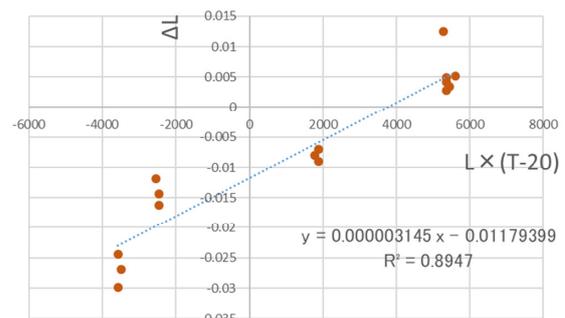


図 13 CB850 での CTE 測定

5 結 言

- (1) 可搬式長尺測長器の開発を進め、問題点となっているプロービング誤差、及び誤差マップのピッチ間隔の改善に取り組んだ。その結果、CB850での長さ測定誤差は最大値で -0.0085 mm（位置 2666-3700 mm）、 σ は 0.0050 mm（位置 0-1333 mm）となり、従来値の標準値との差 0.060 mm（平均値、 $n=5$ ）、ばらつき σ 0.027 mm（ $n=5$ ）と比較して改善が確認された。
- (2) 複合材で構成された標準器 CB850 の CTE を測定したところ、一方向測定での CTE は 3.15×10^{-6} (/K) となった。また B タイプで算出した CTE は 1.51×10^{-6} (/K) となり一致しなかった。複数要素で構成された標準器の CTE 算出において、単体材種の CTE 毎に B タイプで標準器全体の CTE を算出するのは困難であることから、複合材の標準器は A タイプで CTE の値付けを行う必要がある。

文 献

- 1) 飯塚幸三 監修：計測における不確かさの表現のガイド，日本規格協会 (1996)
- 2) 和合健，竹原英樹，辺見誠雄：レーザ干渉計を利用した大型構造体の高精度寸法計測技術の構築，岩手県工業技術センター研究報告，23，p.35-40 (2021)
- 3) 和合健，生内智，磯部和夫：可搬式長大寸法測定器用長さ標準器の開発，岩手県工業技術センター研究報告，24，p.18-21 (2022)
- 4) 和合健：長尺測長器の幾何学誤差補正方法の確立，岩手県工業技術センター研究報告，25，p.21-25 (2023)
- 5) 和合健：長尺測長期のばらつき低減に関する考察，岩手県工業技術センター研究報告，26，p.35-39 (2023)