

長尺測長器のばらつき低減に関する考察*

和合 健**

長尺測長器のばらつきを低減するために、摺動方式とプロービング方式の改良に取り組んだ。摺動方式は、従来のすべり摩擦式から転がり軸受に変更して、スティックスリップが低減されたことを確認した。プロービング方式は、静的プロービングを採用して、位置取得のサンプリング周期により生じていたばらつき誤差の低減を図った。その結果、測定長さ 850 mm 時の最終的なばらつきは $\sigma 0.0014$ mm ($n=15$)、誤差は -0.0013 mm (標準値との差) となった。

キーワード：軸受方式、スティックスリップ現象、プロービング誤差、長尺寸法

Study of Reducing Variation of Long Size Gauge Measuring Instrument

WAGO Takeshi

Key words : bearing method, stick-slip phenomenon, probing deviation, Long size measuring

1 はじめに

半導体製造装置は大型化の傾向があり、その製造工程では部品段階で寸法検査をする必要があるが、長尺のため測定方法に苦慮している。我々はこの問題解決のために JKA 補助事業で長尺寸法測定器を試作し、長尺物寸法測定の高精度化に取り組んできた^{1)~3)}。その結果、幾何学誤差補正による偏り誤差の低減に成功したが、装置本体の測定方式に起因する何らかのばらつき誤差の低減が課題として残った。この長尺測長器は長尺標準器の寸法標準値の値付けと線膨張係数(以下、CTE)の測定で使用される。長尺標準器の多くが軽量化のため CFRP 等を利用した複合材で構成されているため、その複合材の CTE を A タイプで値付けすることが必要と考えており、この目的達成のためには長尺測長器の高精度化は必須要件となっている。

ここでは案内原理をすべり軸受式としたことで不安定摺動の原因と予想されるスティックスリップ現象の発生に起因するばらつき誤差を低減する。スティックスリップ現象はキャリジ走行時のびびりによるレーザ干渉計⁴⁾との目盛カウントのずれやプロービング時の滑らかなキャリジ走行を阻害してトリガ時の位置決め誤差の原因になっていると推測した。

2 摺動抵抗の改善

2-1 スティックスリップの原理

スティックスリップ回避のための設計指針⁵⁾によると、図1に示すクーロン摩擦を伴う1自由度振動系の解析モデルでスティックスリップの発生を抑制するには、式(1)で示すスティックスリップの非発生不等式を満足すれば良く、無次元パラメータ λ , ζ は式(2)、(3)で示される。つまり $\Delta\mu$, W を小さくすることでスティックスリップが

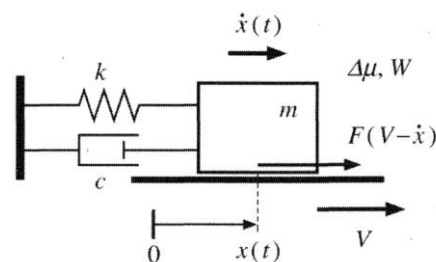


図1 クーロン摩擦を伴う1自由度振動系の解析モデル⁵⁾

$$(1 - \zeta)^5 \cdot \zeta^{-1} \cdot \lambda^2 < 4\pi \quad \dots \dots (1)$$

$$\lambda = \Delta\mu \cdot W / (\sqrt{mk} \cdot V) \quad \dots \dots (2)$$

$$\zeta = c / (2\sqrt{mk}) \quad \dots \dots (3)$$

抑制できる。ここで、 $\Delta\mu$ は: 静止摩擦係数と動摩擦係数の差、 W は mg で表される荷重、 m は質量、 k は剛性、 V は通常状態時の移動速度、 \dot{x} はスティックスリップ時の移動速度、 c は減衰係数、 x は位置である。

2-2 キャリジの改良

表1に転がり軸受の仕様、図2に底面が従来のすべり軸受式のキャリジ、図3に底面を転がり軸受式に変更したキャリジを示す。スティックスリップを低減させるために2つの改良をキャリジに行った。一つ目は底面をすべり軸受から転がり軸受に変更することで $\Delta\mu$ を低減する。そこで用いた転がり軸受けは軌道輪形状が玉で、精度(JIS)は等級0の高精度型を用いた。二つ目は側面の加力機構¹⁾をおもりからばね式へ変更しておもりの質量を取り除くことで W を低減した。ここで加力機構とは、光学レールのデータ面とキャリジのデータ面を常に接触させるために加力する機構である。図4に改良後のキャリジの全景を示す。キャリジ本体の材質はアルミニウム合金(A5052)、軸受方式は底面に転がり軸受で、加力

* 令和4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

機構の側面部は、フッ素樹脂 (PTFE) と転がり軸受の2方式で切り替えられるようにした。その結果、反射鏡等を含む装置重量は4320 gから3580 gへ740 gの軽量化が

表1 転がり軸受の仕様

型式	SB695ZZ	SB693ZZ
メーカー	ミスミ	ミスミ
軌道輪形状	玉	玉
精度 (JIS)	等級0	等級0
外径 (mm)	φ13	φ8
内径 (mm)	φ5	φ3
幅 (mm)	4	4
外輪タイプ	フラット	フラット
基本定格荷重 (動) (N)	915	474
基本定格荷重 (静) (N)	344	144
転動体材質	SUS440C相当	SUS440C相当
許容回転数 (rpm)	43000	60000
荷重方向	ラジアル	ラジアル
軌道輪列数	単列	単列
本キャリジ使用箇所	底面	データム面

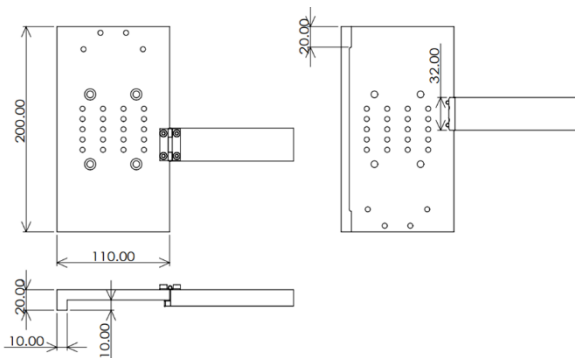


図2 すべり軸受式キャリジ (改良前)

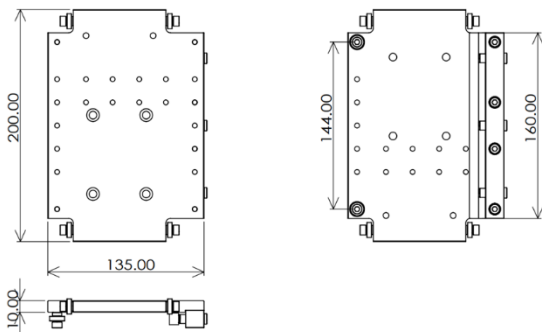


図3 転がり軸受式キャリジ (改良後)

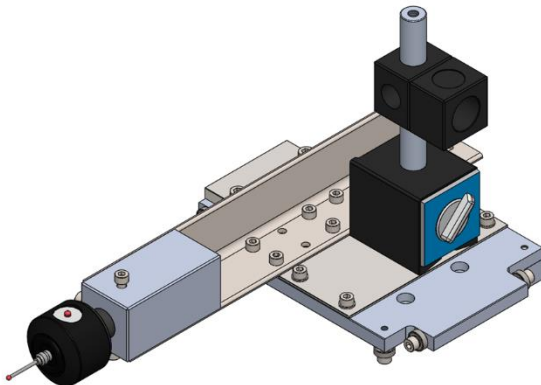


図4 キャリジの全景

図られた。

2-3 摺動抵抗の測定方法

図5に摺動抵抗測定実験の模式図、図6に牽引部の構成を示す。サーボモータに直付けしたボビンでワイヤ巻き取ることでキャリジを牽引する。キャリジには定格19.6 Nのロードセル (LTS-2KA、共和電業製) を固定してワイヤに繋ぎ、牽引力を測定する。牽引部をサーボモータとしたことで等速での牽引が行え、スティックスリップの発生は時間軸に対して牽引力の変化を観察することで確認できる。牽引時のモータ回転数は8 rpmとし、この時の牽引速度は37.6 mm/sである。摺動部の潤滑方法はすべり軸受式では工作機械用摺動油トナオイル S32 (昭和シェル、動粘度 32 mm²/s (40°C時)) を案内面に塗布し、転がり軸受式では潤滑はしなかった。

2-4 摺動抵抗の結果及び考察

図7に時間軸に対する牽引力の変動の一例を、表2に牽引力の最大値と平均値を示す。すべり軸受式では、牽引時の摺動抵抗の最大値は約14.1 Nであり、牽引開始時牽引初期と牽引中盤で牽引力が大きく変動している。計測開始から1 s~100 sまでの牽引力の平均値は11.2 Nとなっていた。これに対して、転がり軸受式 (側面: PTFE 軸受) では、牽引時の摺動抵抗の最大値は約5.6 N、1 s~100 sまでの牽引力の平均値は3.1 Nであった。転がり軸受で、PTFEの固体潤滑剤を採用することで摺動抵抗はすべり軸受式と比較して1/3程度に減少した。牽引初期と光学レールの継ぎ目においてすべり軸受と同様に摺動抵抗の変動が大きくなっているが、すべり軸受式より振幅は小さく、減衰も速い。転がり軸は約1.9 N、1 s~100 sまでの牽引力の平均値は0.3 Nであった。転がり軸受式 (側面: PTFE 軸受) の摺動抵抗の平均値と比較しても1/10程度まで減少しており、側面の加力機構部分の軸受を転がり軸受に変更することで大幅に摺動状況が改善することが確認された。この牽引力の変動がスティッ

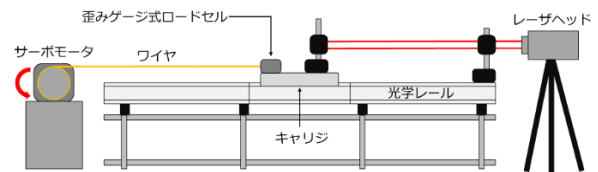


図5 摺動抵抗測定実験の模式図

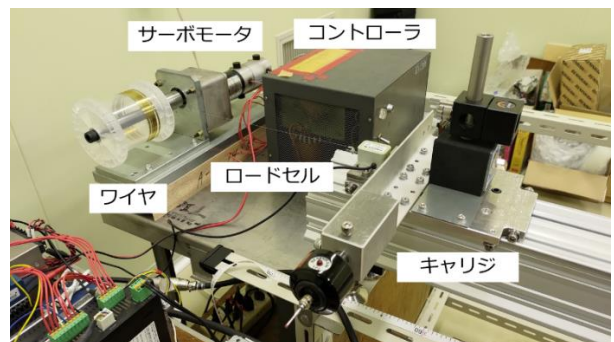


図6 牽引部の構成

表2 牽引力の結果

	最大値[N]	平均値[N]
すべり軸受	14.1	11.2
PTFE	5.6	3.1
転がり軸受	1.9	0.3

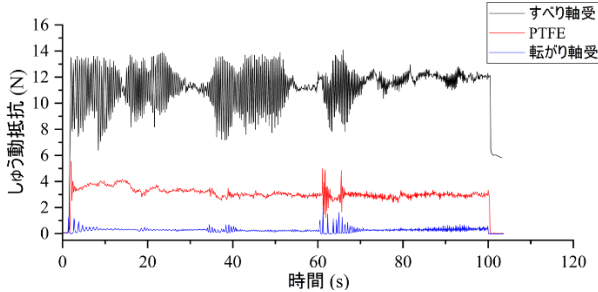


図7 時間軸に対する牽引力の変動

クスリップの原因であれば転がり軸受ではほぼ発生しない。

3 測定誤差の評価

3-1 同一端面の繰り返し測定精度の評価

4水準のキャリジ設定で同一端面の繰り返し測定を行い、測定精度の評価を行った。4水準の設定は、①すべり軸受式、②すべり軸受式+微動機構¹⁾、③転がり軸受式(側面:PTFE軸受)、④転がり軸受式(側面:転がり軸受)である。ここで微動機構とは、プロービングを低速で行うために付加した手動式ネジ機構である。測定条件は図8のVisual Basic6.0制御プログラム(以下、VB6制御プログラム)により、図9の電気式トリガプローブ(TP1、RENISHAW、精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ (2σ))を用いて、測定の繰り返し3回で行った。表3及び図10に測定値のばらつき(平均値、 $n=3$)を示す。すべり軸受式+微動機構のばらつきの平均値 $\sigma 0.0210 \text{ mm}$ が最良値で、他は $\sigma 0.0996 \text{ mm} \sim \sigma 0.0933 \text{ mm}$ 程度となった。この原因を調べたところVB6制御プログラム時のレーザ干渉計位置取得のサンプリング周期20 Hz (50 msec)が影響していることが判明した。このためばらつきの原因は、電気式トリガプローブでの動的プロービングにレーザ干渉計位置取得のサンプリング周期が追従しないことで生じていた。そのため、正しい測定結果となっていないことがわかった。

VB6制御プログラムは、姿勢誤差補正、CTE入力による温度膨張補正及び2点間距離測定機能を付与しており、メーカーが提供する制御プログラムCARTO(以下、CARTO)では、これらの補正を利用できないためここではCARTOは用いないこととした。解決策は、VB6制御プログラムに併用してキャリジが静止後に静的プロービングが行えるプローブを使用することとし、図11の通電式タッチプローブ(PMC-20、大昭和精機、測定精度 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ (2σ))

を採用した。このプローブはスイッチが閉じた時にLEDランプが点灯する仕組みで、トリガはスタイラスチップと測定物端面が接触してLEDランプ点灯後に数秒間の待機時間をはさみ、別装置の手動スイッチでトリガを与える手順とした。3水準のキャリジ設定で同一端面の繰り返し測定を行った。3水準の設定は、①すべり軸受式、②転がり軸受式(側面:PTFE軸受)、③転がり軸受式(側面:転がり軸受)で、測定の繰り返し3回とした。表4及び図12に測定値のばらつき(平均値、 $n=3$)を示す。

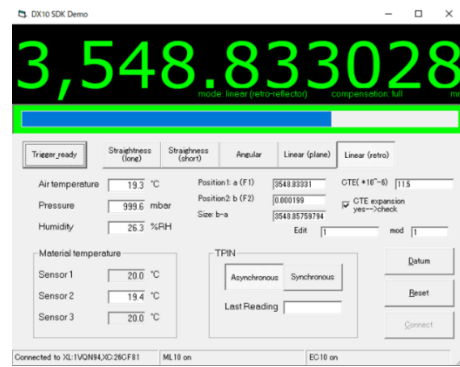


図8 VB6制御プログラム



図9 電気式トリガプローブ

表3 測定値のばらつき(平均値、 $n=3$)

	$\sigma[\text{mm}]$
すべり軸受式	0.0933
すべり軸受式+微動機構	0.0210
転がり軸受式(側面PTFE軸受)	0.0975
転がり軸受式(側面転がり軸受)	0.0996

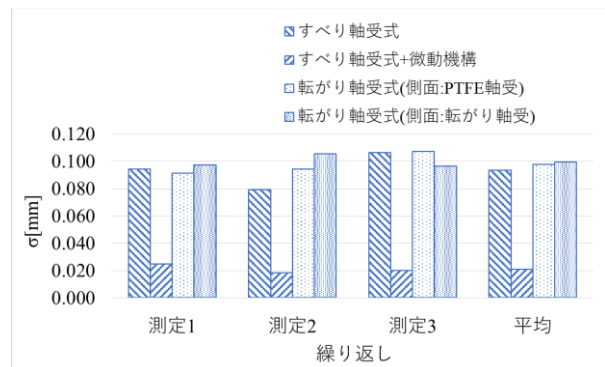


図10 測定値のばらつき(平均値、 $n=3$)



図11 通電式タッチプローブ

表4 測定値のばらつき (平均値、n=3)

	σ [mm]
すべり軸受式	0.0015
転がり軸受式 (側面PTFE軸受)	0.0013
転がり軸受式 (側面転がり軸受)	0.0008

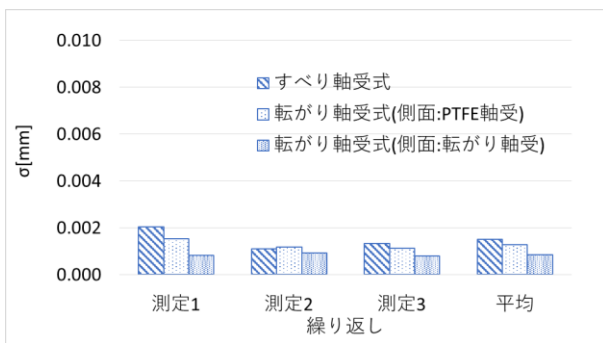


図12 測定値のばらつき (平均値、n=3)

この結果、ばらつきの最大値はすべり軸受式の σ 0.0015 mm となり、通電式タッチプローブ (静的プロービング方式) にプローブを変更したことでばらつき誤差の低減を図ることができた。

3-2 長尺標準器による正確さとばらつきの評価

VB6 制御プログラムと電気式トリガプローブの組み合わせでは、VB6 制御プログラムのサンプリング速度が 20 Hz (50 msec) と遅いため電気式トリガプローブのトリガ ON 時からキャリジが移動し、次にサンプリング周期が巡って来た時の位置座標が行き過ぎた地点で位置座標を取得していたため、この位置ずれが原因で正確さやばらつきが大きくなっていた。この改善策として今回、VB 制御プログラムと通電式タッチプローブによる静止してからトリガを与える仕組みに変更したことで正確さとばらつきが低減した。その確認を行うために、図13の長尺標準器 (CB850、標準値 850.605 mm) を利用して測長精度の確認実験を行った。確認実験は、2水準のキャリジ設定ですべり軸受と転がり軸受 (側面: 転がり軸受)、要点となる制御プログラムとプローブ方式の組み合わせは、VB6 制御プログラムと通電式タッチプローブとした。測定方法は連続5回の測長を3セット行い、姿勢誤差補正の起点は1セット毎に再設定する手順とし計15個の測長を行った。表5及び図14に姿勢誤差補正³⁾の有無での誤差 (標準値からの差、平均値、n=15) を示す。ここで姿勢

誤差補正とは光学レール上をキャリジが走行する時のピッチングとヨーイングの姿勢誤差 (degree) の補正を指す。その結果正確さ (標準値からの差) は、姿勢誤差補正無しでは双方の軸受とも 0.39 mm 程度の誤差であったが、姿勢誤差補正有りで誤差の最大値が-0.0013 mm となった。姿勢誤差補正を行うことで誤差 0.002 mm 以下になることを確認した。

正確さと同様の条件でばらつきを評価し、その個数は軸受方式毎に 850 mm 程度の測長値で 15 個とした。表6と図15に姿勢誤差補正の有無のばらつき (平均値、n=15) を示す。その結果、4水準でのばらつきの分布範囲は 0.0018 mm~0.0014 mm となり姿勢誤差補正の有無でばらつきに差異は見られなかった。つまり、姿勢誤差補正は、ばらつきには関与していないこと、また、本測定方法でばらつきが 0.002 mm 以下となることを確認した。しかしながら、通電式タッチプローブを利用した測定方法は、プロービング時に手でねじを回して行う繊細なプロービング技能が必要であり、作業者の感覚に依存する。作業者の技能に依存する測定では信頼性が低いことから、その解決策が課題として残った。



図13 長尺標準器 (CB850) による測長精度の評価

表5 姿勢誤差補正有無での誤差 (平均値、n=15)

補正無	誤差[mm]	補正有	誤差[mm]
すべり軸受	0.3993	すべり軸受	0.0003
転がり軸受	0.3965	転がり軸受	-0.0013

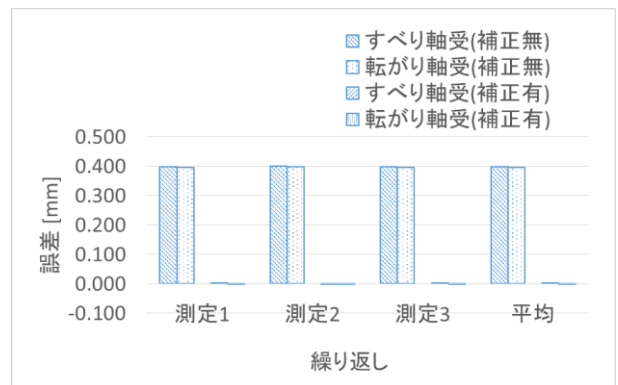


図14 姿勢誤差補正有無での誤差 (平均値、n=15)

表 6 姿勢誤差補正有無のばらつき (平均値、n=15)

補正無		補正有	
	σ [mm]		σ [mm]
すべり軸受	0.0016	すべり軸受	0.0018
転がり軸受	0.0014	転がり軸受	0.0014

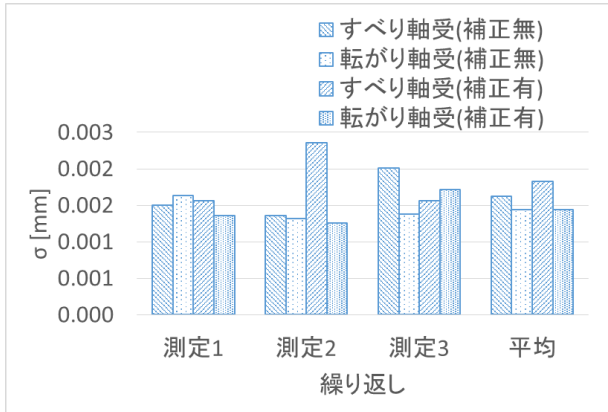


図 15 姿勢誤差補正有無のばらつき (平均値、n=15)

4 結 言

キャリジが案内上を走行する際に発生する不安定な摺動現象の解明と測定精度の改善を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 転がり軸受式キャリジを用いることで摺動抵抗が減少し、スティックスリップの発生を抑制することが確認できた。しかしながら、最終的にスティックスリップは測定誤差の発生原因では無いことが判明し、測定誤差は動的プロービングに位置取得のサンプリング周期が追従しないことで生じていた。
- (2) プロービング方式を電気式トリガプローブによる動的プロービングから、通電式タッチプローブによる静

的プロービングに変更することで測定誤差 (正確さとばらつき) が低減した。

(3) 転がり軸受式キャリジにおいて姿勢誤差補正の有効動作を確認し、最終的なばらつきは σ 0.0014 mm (n=15)、誤差は -0.0013 mm (標準値との差) となった。しかしながら、現状では静的プロービングにより精度向上を図ったため作業員個々のプロービング技能の優劣で測定結果が異なることが予想され、その改善策が課題として残った。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、長期インターンシップで実験に加わった岩手大学大学院の盛田雄斗君にはキャリジ改良や精度評価実験でご協力頂いた。ここで感謝の意を表す。

文 献

- 1) 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第 23 号 (2021)
- 2) 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第 24 号 (2022)
- 3) 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第 25 号 (2022)
- 4) RENISHAW カタログ: パンフレット XL-80 レーザーシステム
- 5) 中野健: スティックスリップ回避のための設計指針, 日本ゴム協会誌, 第 80 巻, 第 4 号 (2007)