

高速走査外径測定機

High Speed SLB (Scanning Laser Beam) Dia Measuring System

UDC 531.715/.717.1 : 681.7.069.24

竹内 雄二
濱野 信治
加島 史夫
高山 真一
高橋 秀昭

Yuji Takeuchi

Shinji Hamano

Fumio Kashima

Shinichi Takayama

Hideaki Takahashi

産業機械事業部 マーケティング部

産業機械事業部 第2開発部

産業機械事業部 第2開発部

産業機械事業部 システム技術部

産業機械事業部 第2開発部

1 初めに

レーザ外径測定機は細く絞ったレーザビームを平行に走査して、光ファイバや電線などの線材、パイプ、コネクタなどの精密加工部品の外径寸法を非接触で高速、高精度に測定する。当社では1974年以来、音叉偏向器を用いたレーザ外径測定機を販売してきた。近年、生産性の向上のため線引き速度がより高速になるにともない測定回数の向上が求められている。また、被覆線などの製造ラインでは耐環境性が高く、メンテナンスが容易で故障時には不具合部分のみを交換できる互換性が求められている。そこで、今回被覆電線など連続線引き生産ラインでのオンライン測定で使われることをねらった、毎秒3,000回（当社従来機比3倍）の高速走査、使いやすさなどを特徴としたレーザ外径測定機検出部KL1003AN/BNと表示部KL3000Aを開発した。図1に外観を示す。



図1 KL1003AN, KL3000A レーザ外径測定機の外観
External view of SLB Dia Measuring System KL1003AN, KL3000A

2 測定原理

レーザ外径測定機の測定原理を図2に、信号処理ブロック図を図3に示す。

半導体レーザから放射したレーザビームを、1.5kHzで振動している音叉の先端に取り付けたミラーで正弦的に偏向したあと、焦点距離だけ離して配置された投光レンズを通し平行走査ビームにする。その平行ビームを、被測定物を挟んで対向させて配置した受光部の受光レンズで受光素子上に集光し、光電変換する。この時、平行ビーム内の被測定物は、その陰影に対応した電気信号として受光素子で検出される。また、ビーム走査幅の変動を検出するため、走査ビームの一部を分岐し、検出部内に設けたモニタ板を同様に走査してその陰影に対応した電気信号も得ている。

ゲートアレイで実現した高速カウンタでこれらの電気信号から陰影のエッジ位置に対応するカウント値が得られる。走査速度が正弦的に変化しているため、正弦テーブルとソフトウェアによってそのカウント値を被測定物のエッジ位置とモニタ板のエッジ位置に変換する。これらのエッジ位置の差が

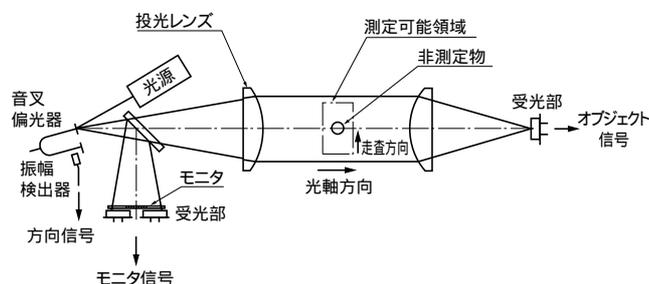


図2 光学系原理図
Operating principle of optical system

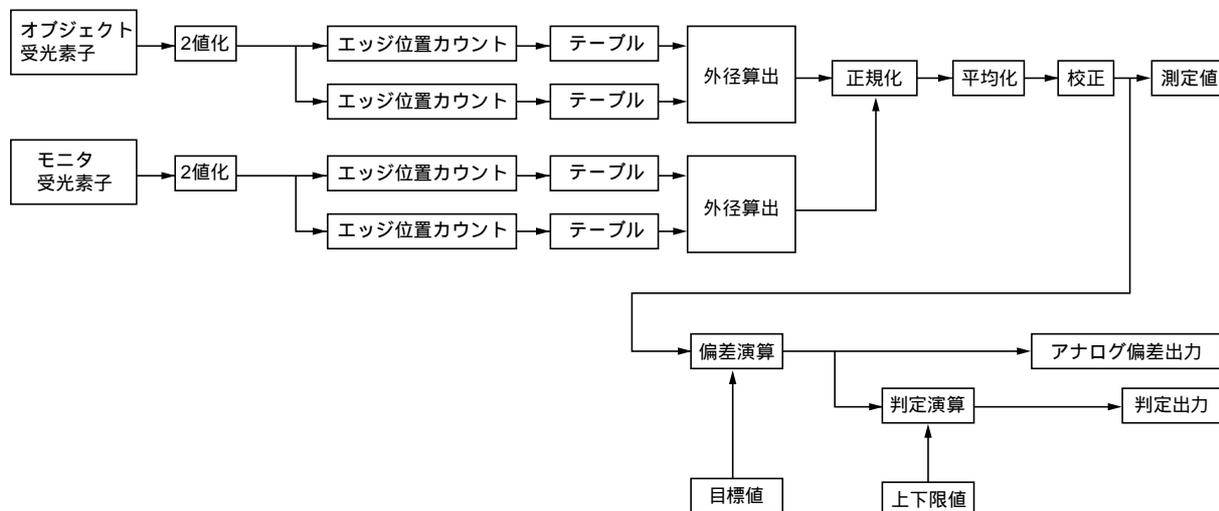


図3 信号処理ブロック図
Block diagram of processing circuit

ら外径値を求めるが、この値は走査振幅に依存して変化するため、外径と同様に測定したモニタ板の幅で除算し、走査振幅の変動の影響を除去している。

3 開発のポイント

3.1 高速測定

レーザービームを高速に走査するため従来の3倍の共振周波数をもつ1.5kHzの音叉を用いて偏向器を構成した。これにより毎秒3,000回の走査回数を実現した。次に音叉の振動を先端に重り（反射鏡面）の付いた片持はりと考えた場合（図4）の曲げ剛さEIと共振周波数fとの関係式¹⁾を示す。

$$EI = \frac{(2f)^3 \cdot l^3 \cdot (W_G + 0.23W_S)}{3}$$

- l : はりの長さ
- W_G : ミラーの質量
- W_S : はりの質量

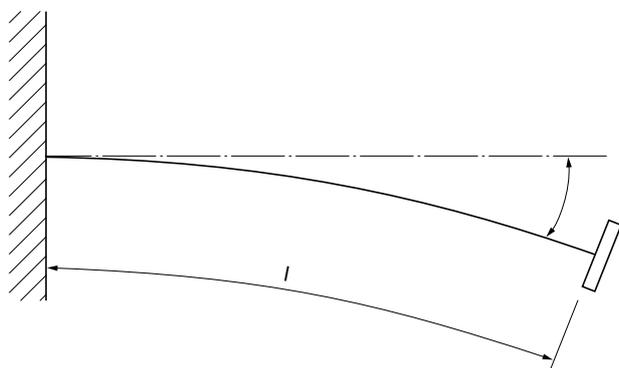


図4 片持はりのたわみ
Deflection of cantilever

この式からわかるように曲げ剛さは共振周波数の2乗に比例するため、反射鏡を従来より1/2に軽量化したが、従来と同等の偏向角を得るためには4倍の駆動力が必要になった。このため、音叉の駆動に使用している電磁石をより強力にするために、透磁率の高い磁性材料の磁心を用い、また、スイッチング方式の駆動回路の採用などにより音叉駆動の効率向上を図った。

このようにして、音叉偏向器の走査回数を向上したことにより走査速度は走査中心で 1.9×10^2 m/sとなった。このとき、レーザービームを走査して得られる明暗信号からエッジ位置をカウンタにより要求仕様の1 μmの分解能で得るためには、 $1 \mu\text{m} / 1.9 \times 10^2 \text{ m/s} = 5\text{ns}$ の時間分解能を持つカウンタが必要になる。この場合、カウンタの基準クロックは200MHz以上の周波数とする必要があり、ECLのゲートアレイならば実現できるが、コスト、消費電力の制約がありCMOSのゲートアレイを採用せざるを得ない。ゲート遅延0.3nsの高速なCMOSゲートアレイでもこの周波数のクロックを直接入力することは困難であり、基準クロック100MHz以上で動作させることも困難である。このため、クロックを4相とし周波数80MHzで相間の位相が3nsずつの遅延とした信号を入力するようにした。これにより時間分解能3nsの高速カウンタを実現できた。

また、測定周期は0.33msと従来の1/3になるため、信号処理もより高速化する必要がある。そこで、従来機で採用しているCPUより10倍高速のRISCタイプのワンチップCPUを採用した。このCPUは16MIPSの性能を持ち、毎秒3,000回の走査にตอบสนองして信号処理ができる。

3.2 使いやすさ

3.2.1 耐環境性の向上

本機は粉塵やオイルミストなどがある環境で使用される場合があるため、高い耐環境性が要求される。検出部光学系を外部から封じているフタをシール材接着にしてIP60の防塵性を確保し、測定に悪影響がある粉塵、ミストなどに対しては管用テーパめねじ（呼びRc1/8）を投受光窓部に用意し、クリーンなエアを注入することでエアパージを構成することができる。

3.2.2 自己診断機能の強化

投受光窓の汚れに対しては、従来からある受光信号のピークレベルをモニタする機能のほかに、従来はできなかった微小な埃の付着などの検出ができる汚れモニタ機能を装備している。これは図5に示すように外径測定用に明暗信号を2値化するほかに、粉塵でわずかに信号レベルが低下した箇所を検出できるよう、より高いしきい値で2値化する回路を設けた。この回路の出力と外径測定用に2値化した信号とを比較することにより、粉塵等による受光信号の乱れが検出できる。

3.2.3 互換性

検出部の光学部品などのバラツキを補正するデータを検出部内のEEPROMに記憶することにより、どの検出部とも調整なしで接続できるようにした。こうすることによって、故障時には検出部または表示部の故障している部分のみを修理交換することで短時間の修復が可能になる。

3.2.4 小型化

設置スペースを確保しやすいように検出部、表示部とも小型化した。

従来の検出部においては、回転ミラー式レーザ外径測定機に比べ音叉偏向器は偏向角が大きく取れないため光路長が長くなり、検出部を小さくできなかった。しかし、本機では光学系を表面から裏面に折返す構造にし、電気系を光学系のすき間に分散して配置することにより小型化した。さらに、光学系を折返したことにより、従来外付けだったエアパージ用のフードもbuilt-in（組込み）にできた（図6）。また、フタ部の防塵をシール材による接着にし、フタの厚さを薄くするなど工夫も行い、従来機比で質量約7/10 体積約7/10となった。

一方、表示部においては、SMT部品の微小化、ICチップの集積度の向上などにより、プリント板の面積の縮小が図られ、冷却ファンの削除、低容量電源ユニットの採用等により、質量約1/2体積約3/5となった。

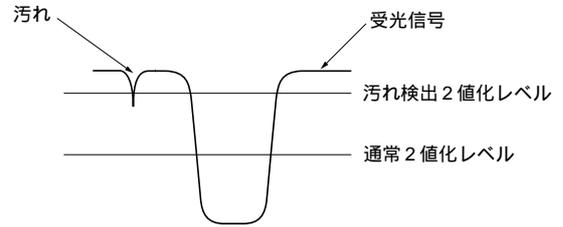
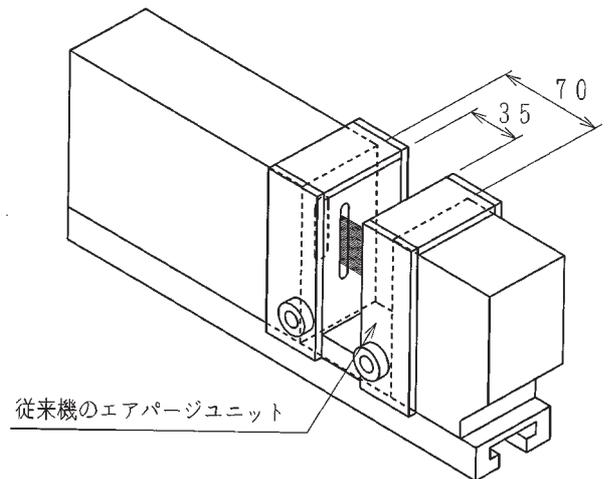
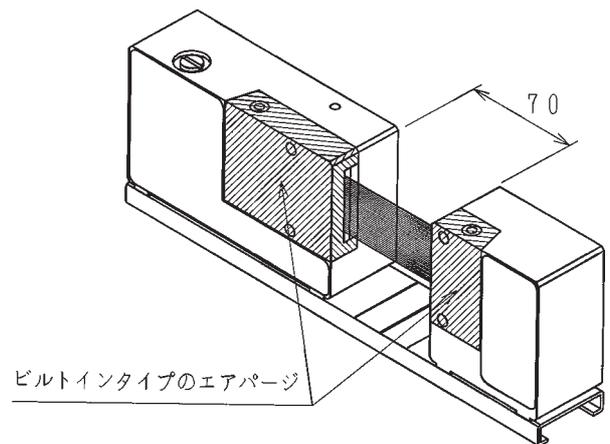


図5 汚れ検出原理
Principle of dirt detection



KL153ANの場合



KL1003ANの場合

図6 従来機とのエアパージ比較
Comparison between air purge unit of KL153AN and built-in air purge

3.2.5 操作性の向上

表示部は、測定中に目標値設定値、上下限設定値が確認できるように常時表示するようにし、パネル操作はデジタルスイッチに似た操作性となるようにパネル面のデザインを工

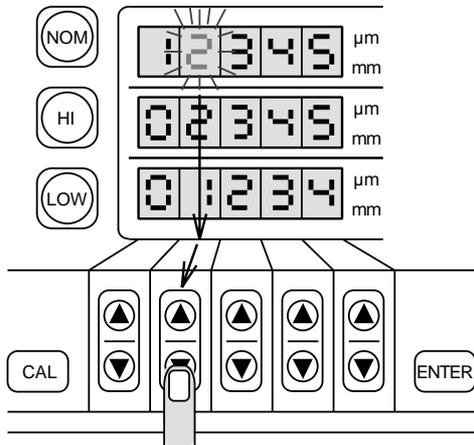


図7 操作性を考えた表示部デザイン
Operation key and display arrangement for easy operation

夫した(図7)。また、シートスイッチを採用することにより、パネル面の汚れや油等の侵入を防止できるため、デジタルスイッチに比べ信頼性を向上させることができた。さらに、取扱説明書を取さなくてもスイッチの設定変更が可能のように、設定一覧表をシールにして添付し、表示部上面に貼って使えるようにしている。

3.2.6 省電力化

表示部はメモリ、周辺LSIを内蔵したワンチップCPUを採用することにより、従来の個別部品を組合せた場合に比べ大幅に部品点数を削減できた。その結果プリント板の面積を縮小でき消費電力も削減でき、低容量の電源ユニットの使用も可能になったため、冷却用ファンが不要となった。以上により、従来機比でプリント板サイズ1/3、消費電力1/2を達成した。

4 製品概要

主要規格を表1に示す。

KL1003AN/BNは次のような特徴をもつ。

4.1 ワークの振動の影響を受けない毎秒3,000回の高速度測定が可能

音叉偏向器を用いると、オンラインの測定では避けられない線振れなど被測定物の振動の影響による誤差を小さくできる。

これは音叉偏向器による走査は往復走査のため、被測定物の移動方向と走査の方向が一致しているときは見かけの測定値は大きくなり、逆の場合は小さくなる。したがって、測定値を往復で平均すれば被測定物の移動や振動による測定誤差の大部分を打ち消すことができる。さらに、毎秒3,000回で走

査しているため毎分2,000mの製造速度のラインでは走行するワークを11mmピッチで測定できる。

4.2 埃や煙に強い検出部

検出部はIP60の防塵性があり、粉塵を吹き飛ばすエアパージ用のフードを標準で組込んだ。

4.3 シンプルな表示、簡単な操作

目標値、上下限設定値を常時確認できるように、それぞれ独立の表示器を設けた。また、デジスイッチに似た容易な操作性のキー配置とした。さらに、統計機能、測定制御など連続線引きラインでは使用頻度が低い機能は省略することにより、機能を整理して操作を単純化した。

4.4 互換性

どの検出部とも調整なしで接続できるため、故障時の交換などメンテナンスが容易である。また、製造装置の一部として使用するとき、検出部と表示部を一对として扱わずに良いため予備機の準備コストが低減できる。

4.5 長寿命、高信頼性

音叉偏向器は回転ミラー偏向器と異なり、モータの軸受けなど摩耗する部分がなく、寿命は半永久的である。

4.6 豊富な入出力

連続線引きラインで必要とされるアナログ偏差出力、フォトカプラ形式あるいはリレー接点形式の上下限判別出力、シリアルインターフェースを標準で装備した。オプションとしてパラレル測定値出力、被測定物の位置出力を行う多機能出力ユニットと、離れたところで測定値をモニタするための外部表示器を用意している。

4.7 用途に応じた光源

耐環境性が高く、長寿命の不可視光源タイプと、レーザの安全性がより高く視認性にすぐれた可視光源タイプの2機種を用意した。

5 機能

5.1 目標値設定機能

目標値は製造目標値で、測定値からこの目標値を引いた偏差をアナログ信号として出力している。

5.2 上下限判別機能

目標値からの偏差に対して上限値と下限値を設定して、測定値がこの値を越えたりリミットオーバー表示をし、フォトカプラ形式とリレー接点形式の判別出力も行う。

表1 主要規格
Main specification

型 名		KL1003AN	KL1003BN
測定範囲		0.21 ~ 31mm	
測定可能領域		走査方向32mm 光軸方向20mm	
繰返し性 ^{1, 4}		± 0.6 μ m (0.34s, AVG1024)	
()内は平均化周期と平均回数		± 0.3 μ m (1.364s, AVG4096)	
直線性 ^{2, 4}		± 2 μ m	
再現性 ^{3, 4}		± 2 μ m ^{*5}	
安定度		± 2 μ m ± 5 の温度変化に対して	
測定回数		毎秒3,000回	
最小出力周期		0.67ms (AVG.2)	
光源		不可視半導体レーザー 波長：780nm	可視半導体レーザー 波長：670nm
レーザー製品のクラス		クラス3B	クラス2
使用温度範囲		0 ~ 45	0 ~ 40
寸法, 質量		300(W)× 110(H)× 47(D)mm (投受光間距離70mm) 2.1kg	
保護等級		IP60	
		KL3000A 表示部	
機能	測定値の平均	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1,024, 2,048, 4,096回	
	管理値の設定	目標値, 上限値, 下限値	
	測定制御	測定/停止外部制御	
表示	数値表示	測定値, 目標値, 上限管理値, 下限管理値	
	被測定物位置	走査方向5段階表示	
	モニタランプ	上下限判定, 受光量, レーザ放射の有無, 測定ホールド ^{*6} , 機器異常事前警報	
入出力	アナログ偏差出力	12bit 分解能, ± 10V/ ± 100mm・出力レシオ: × 1, 10, 100, 1000 ^{*5}	
	フォトカブラ出力	上下限判定, ワーク位置不良, 事前警報, 測定不可, ストロープ	
	リレー出力	上下限判定, 事前警報, 測定不可の4点のA, B接点	
	シリアルI/O	RS232C, 1,200 ~ 9,600bps 外部制御 or 外部表示器 (KL350A-31)	
	パラレル出力 (オプション)	BCD 6桁/バイナリ 20bit, フォトカブラ ・測定不可時の出力状態: ・出力論理: ^{*5}	
	アナログ位置出力	12bit 分解能 ± 10V/ ± 15mm	
		位置出力/アナログ絶対値出力 (オプション)	
	・出力選択:	位置出力	絶対値出力 ^{*5}
		位置 ± 10V/ ± 15mm,	絶対値: + 10V/30mm,
		出力周期: 平均周期, 精度 30 μ m, 分解能 15 μ m	出力周期 0.67ms, 精度 0.3mm, 分解能 7.5 μ m
測定不可時出力:	ホールド		
電源投入時:	0V		
電源		90 ~ 264V, 30VA	
寸法, 質量		210(W)× 110(H)× 230 (D) mm, 2.4kg	
使用温度範囲		0 ~ 45	

- 注) 1 同一方法で同一の被測定物を, 同じ条件で比較的短い時間に繰り返し測定した場合における測定値のバラツキ (3) です。
 2 オプションの標準ゲージセットで校正し, 測定可能領域の中心位置にて, 表面が光沢仕上げされた金属製の被測定物を測定した場合です。
 3 測定可能領域の中心を基準とした測定可能領域内での被測定物の位置による出力変動です。
 4 外径測定に関する規格です。
 5 測定可能領域 10 × 20mm において 10mm の丸棒を測定した場合

5.3 セグメント機能

外径や隙間測定などのパターンを選択する機能で、6種のパターンから選択できる。被測定物がガラスなどの透明な材料の場合でも、影響を受けない透明体外径測定のためのパターンも用意している。

5.4 HOLD機能

測定を一時停止する機能で、例えば上下限判別出力と組み合わせることにより、測定値が上下限値を越えた時に測定を停止し、そのときの測定値を保持する場合などに使用することができる。

5.5 シリアルインターフェース

測定値読み出しのほか、目標値設定、上下限設定などが行なえる。通信コマンドは従来機との互換性を維持している。

5.6 校正

本機は2点校正と1点校正ができる。

1点校正は測定しようとする寸法が狭い範囲に限られている場合に用いる方法で、一本のゲージを使用する。2点校正は測定しようとする寸法の範囲が比較的に広い場合に用いる方法で、寸法が違った2本のゲージを使用する。校正ではゲージを測定して、測定値とゲージの公称値との差を本機が記憶して、以後この差を使って自動的に測定を補正する。

6 性能

6.1 繰返し性

本機では繰返し性を同一の方法で同一の測定物を同じ条件で比較的短い時間(5分程度)に繰返し測定した場合の測定値のパラッキ(3)と規定している。

性能評価では25mmのゲージを固定して測定値の変動を見た。

図8の実測データは、平均回数16回による測定値のパラッキをヒストグラムで表している。このときの標準偏差()は

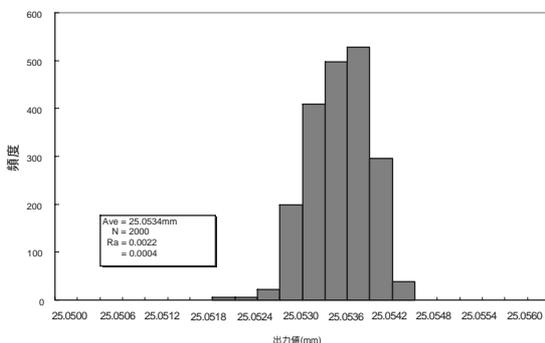


図8 出力値のパラッキ分布(平均回数16回)
Histogram of output(avg.16) distribution measurements

$\pm 0.4 \mu\text{m}$ であり、3 値で $\pm 1.2 \mu\text{m}$ である。

この値を平均回数1,024回の場合に換算すると、 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ となり、十分規格($\pm 0.6 \mu\text{m}$)内に入っている。また、図9は43台の検出部での測定値のパラッキの分布である。この分布から最も大きい値では $\pm 0.3 \mu\text{m}$ となっており、規格に対して十分余裕がある。

また、図10には平均回数が2~4,096回での測定値の変動を示した。測定値の変動は、光学的な短時間の空気のゆらぎ、電気的なノイズ、カウンタの量子化誤差などに起因するもので、平均回数の平方根に反比例する関係にあり、平均回数を大きくすることで改善できる。しかし、平均回数512回以上では、平均回数を上げて平均効果が現れていない。これはワーク付近のゆっくりとした空気のゆらぎの影響によるもので、1秒程度の平均化周期では、ゆっくりとした空気のゆらぎは平均化できないためである。

6.2 再現性

本機では再現性を被測定物の置かれる位置を変えたときに測定可能領域の中心位置における測定値を基準とした変動量と規定している。図11はXYステージにゲージを取り付けて光軸方向中心、 $\pm 10\text{mm}$ の3個所で走査方向に移動させた場合の出力変動である。この場合の変動幅は $\pm 1.8 \mu\text{m}$ となって、

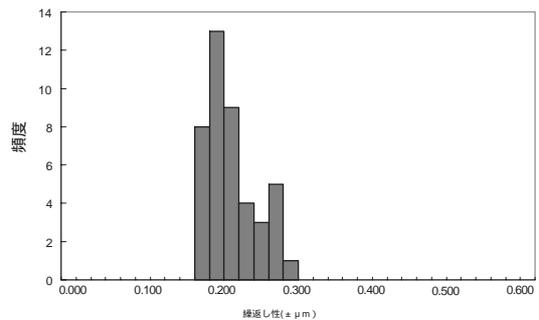


図9 繰返し性の機差(平均回数1024回)
Unevenness of Repeatability(avg.1024)

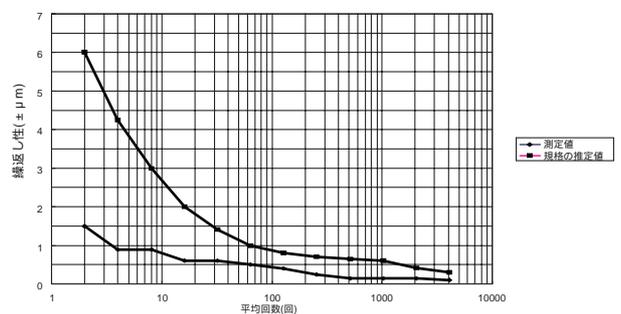


図10 KL1003ANの繰返し性
Repeatability of KL1003AN for each average

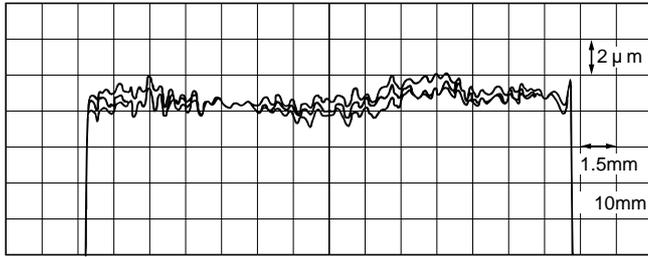


図11 KL1003ANの再現性
Reproducibility of KL1003AN

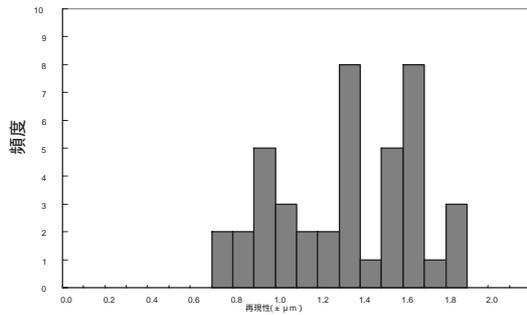


図12 再現性の機差
Unevenness of Reproducibility

規格 ($\pm 2 \mu\text{m}$) を満たしている。また、図12は44台の検出部での再現性の分布である。この分布から最も大きい値では $\pm 1.8 \mu\text{m}$ となっており規格を満たしている。

6.3 直線性

測定対象の外径を測定範囲内で変化させたとき、測定値と真値との差を直線性と定義している。本機ではオプションで提供している2本の校正ゲージで2点校正した後、測定範囲のほぼ全範囲にわたるゲージを測定可能領域中心で測定し、測定値とゲージの公称値との差が規格値以内となるようにしている。

図13は44台の検出部での直線性の分布である。この分布から最も大きい値では $\pm 1.7 \mu\text{m}$ となっており規格を満たしている。

6.4 安定度

時間経過あるいは温度変化に対する安定性を数値をもって規定したもので、温度変化が $\pm 5^\circ\text{C}$ の環境下で連続測定した場合の測定値変動と規定している。図14は5台の検出部での使用環境温度範囲である 0°C から 45°C の温度変化に対する測定値の変化を示している。これによると、 $\pm 5^\circ\text{C}$ 当りの最大変化は $\pm 1.2 \mu\text{m}$ となっている。規格は $\pm 5^\circ\text{C}$ 当りの最大変化で $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内である。

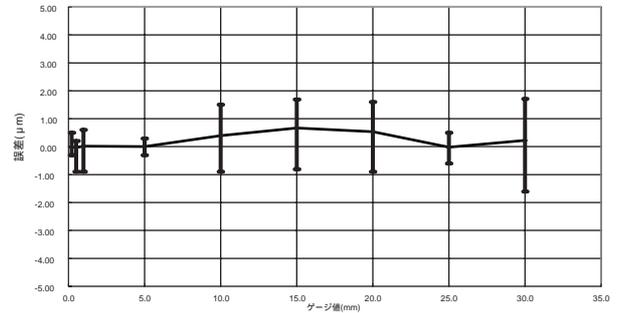


図13 直線性誤差幅
Evenness of Linearity

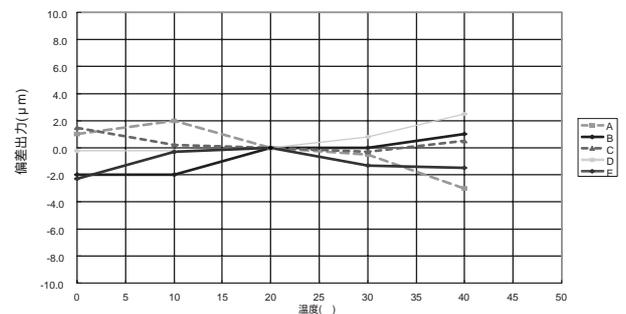


図14 KL1003ANの安定度 (25mm測定時)
Stability of KL1003AN

6.5 ワーク振動の影響

ワーク振動の影響を従来機のKL153AN (毎秒1,000回測定、有効走査幅32mmでKL1003ANと同一) と比較した。

ワークの加振器としてスピーカーを用いた。スピーカーのコーン部分に枠を取付け、その先端に2のピンゲージを固定し振動させた。振動周波数は50, 100, 150Hz、振動量は1mm (P-P) で、レーザ外径測定機の平均回数設定はKL153AN、KL1003ANともに2回とした。

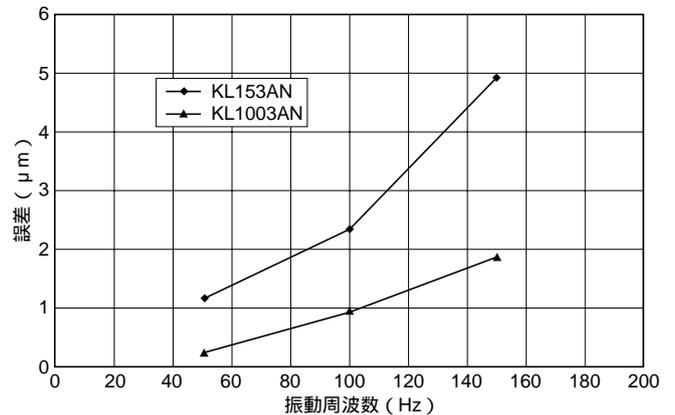


図15 レーザ外径測定機の周波数特性
Characteristics of fluctuation against vibrating frequency of object

図15から走査速度が3倍速い分、KL1003ANはKL153ANよりワーク振動の影響が1/3になっていることが分かる。

7 まとめ

開発のねらいである高速走査、使いやすさにおいて、走査回数毎秒3,000回、検出部体積比約7/10、表示部体積比約3/5、機能を絞って操作性を向上させた表示部設計などにより目標を達成した。

今後の課題としては、今回開発した検出部の測定範囲：0.21mm～31mmに対し、0.21mmより細かい領域や31mmより太い領域で測定できる機種へのシリーズ化がある。これらに応えるべく測定範囲の異なる検出部の開発などラインアップの充実を図って行きたい。

参考文献

- 1) 機械設計便覧編集委員会：新版機械設計便覧，pp.868，丸善株式会社，（1973）