

極細線用レーザ外径測定機

SLB DIA MEASURING SYSTEM for Ultra-fine Wire

UDC 531.715/.717.1 : 681.7.069.24

竹内 雄二
浜野 信治
加島 史夫
高橋 秀昭

Yuji Takeuchi

Shinji Hamano

Fumio Kashima

Hideaki Takahashi

産業機械事業部 第2開発部

技術本部 共通技術部

産業機械事業部 第2開発部

産業機械事業部 第2開発部

1 はじめに

電子機器に使用される各種コイルの巻線、ICやLSIなどのボンディングワイヤ、電球のフィラメントに使用されるタンゲステン線など、さまざまな部分で非常に細い線が使用されている。これら付加価値の高い極細線はその線径の管理が重要である。近年、特に携帯電話やパーソナルコンピュータなどの携帯用端末は小型、軽量化が進められており、これらに使用されている各種のコイルも小型化され、その巻線の管理が以前にもまして重要視されてきている。これらの極細線の外径を測定するためにアンリツでは以前から測定範囲が $5\ \mu\text{m}$ ~ 0.5mm の M550A、 $10\ \mu\text{m}$ ~ 2mm の KL506A といったレーザ外径測定機を揃えてきた。M550A は測定する線径に応じて数段階の設定変えが必要であり、また、検出部、表示部とも大きかった。KL506A では線径による設定変えを不要とし、検出部を小型化(体積比で M550A の 1/5)したものの、表示部は大きなままであり、小型化が望まれていた。また、より高密

度に測定できるように走査回数の向上も望まれていた。そこで今回、先に開発したレーザ外径測定機 KL1003AN/BN 検出部、KL3000A 表示部¹⁾のシリーズ化の一環として、測定範囲 $5\ \mu\text{m}$ ~ 0.5mm の KL1001A 検出部と、測定範囲 $10\ \mu\text{m}$ ~ 2mm の KL1002A 検出部を開発した。毎秒 3000 回(M550A、KL506A の 3 倍)の高速走査を実現すると共に、検出部、表示部の軽量・小型化(表示部は体積比で M550A、KL506A の 1/4)、デジタルスイッチを操作する形態にして使いやすくしたことなどを特長としたものである。これに設定変えなしで極細線を測定する機能を盛り込むことで、前述した要求を満たすことができた。図 1 に組み合わせて使用する KL3000A/ KL3000B 表示部とともに外観を示す。

2 測定原理

レーザ外径測定機は 1 本の細く絞ったレーザビームを平行に走査してその間にある被測定物の外径を測定する装置である。光学系の原理図を図 2 に示す。半導体レーザから放射されたレーザビームは音叉偏向器の先端のミラーにより反射される。音叉偏向器を振動させると反射されたレーザビームは偏向され、音叉偏向器の反射点から焦点距離だけ離れた位置に配置された投光レンズに入射し、平行走査となる。平行走査されたレーザビームは投光レンズと対向して配置された受光レンズにより受光素子上に集光され、光電変換された受光信号となる。このとき、投光レンズと受光レンズの間で平行走査しているレーザビームの走査内に被測定物が置かれると、レーザビームは被測定物で遮られるため、受光素子からは被測定物による陰影に対応した電気信号(この信号をオブジェクト信号と呼ぶ)が検出できる。また、音叉偏向器で偏向された



図1 レーザ外径測定機 KL1001A/KL1002A 検出部、KL3000A/KL3000B 表示部の外観
External view of SLB Dia Measuring System, KL1001A/KL1002A OPTICAL UNIT and KL3000A/KL3000B DISPLAY UNIT

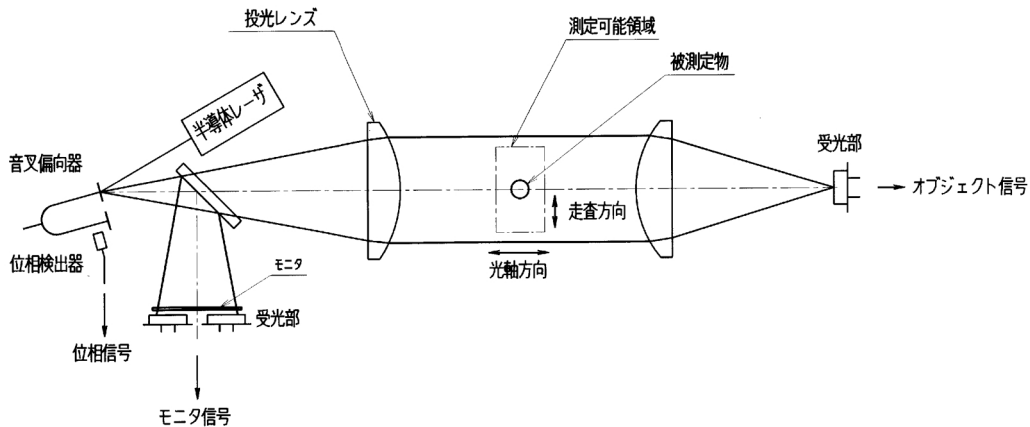


図2 光学系原理図
Operating principles of optical system

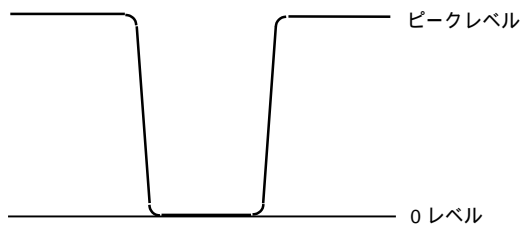


図3 被測定物が太い場合のオブジェクト信号
Object signal (object diameter > laser beam diameter)

レーザービームを分岐し、モニタ板を走査することにより得られる信号（この信号をモニタ信号と呼ぶ）で走査幅の変動を検出している。

被測定物の外径がレーザービームの径（以下ビーム径と呼ぶ）より太い場合、オブジェクト信号は図3に示すようにレーザービームが被測定物に完全に遮られ、0レベルが平らな信号となる。このとき、オブジェクト信号の波形整形レベル（以降スライスレベルと呼ぶ）をオブジェクト信号のピークレベルの

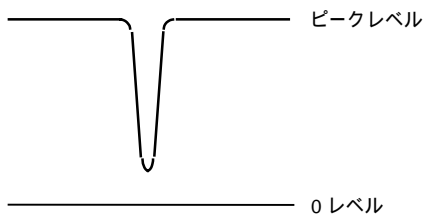


図4 被測定物がビーム径よりも細い場合のオブジェクト信号
Object signal (object diameter < laser beam diameter)

50%に設定して波形整形した信号の幅が被測定物の外径に対応する。オブジェクト信号のレベルが50%つまり光量が1/2になるレベルというのは、レーザービームの中心が被測定物のエッジを横切るときである。

これに対して、被測定物がビーム径よりも細くなるとレーザービームは完全には遮られないため、オブジェクト信号は0レベルまで下がらない図4のような信号となる。このような信号になる場合でも、レーザービームの中心が被測定物の片方のエッジを横切るときに、レーザービームの端がもう一方のエッジを越えていなければ、信号レベルが50%になる間隔が被測定物の径に対応する。しかし、レーザービームの中心が被測定物の片方のエッジを横切る前に、レーザービームの端が被測定物のもう一方のエッジを越えてしまうと信号レベルが50%になるのはレーザービームの中心が被測定物のエッジよりも内側に入ったときとなる。したがって、信号レベルが50%になる間隔を測定すると被測定物の外径よりも細く測定されてしまう。また、受光信号のレベルが50%まで下がらなければ測定ができなくなってしまう。

信号レベルがどこまで下がるか、つまり信号のボトムレベルが0レベルからどの程度浮いているか（以下浮き上がり率と呼ぶ）は、ビーム径と被測定物の外径の関係で決まる。ビーム径が一定ならば浮き上がり率を測定すれば被測定物の外径がわかる。しかし、ビーム径は測定可能領域中心で最も細く、投光部および受光部に向かってほしいに太くなっており、製造ラインで使用することを考えると被測定物は測定可能領域内で動くことが前提となるため、常にビーム径が一定であるとは言えない。したがって、浮き上がり率を測定する

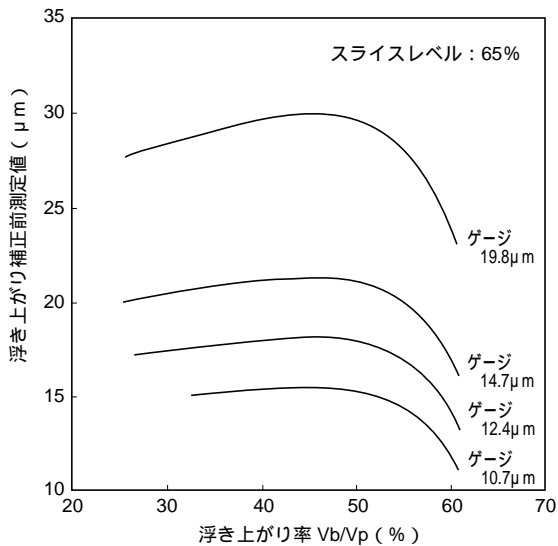


図5 スライスレベルを固定したときの測定値の変化
Change of measured value when slice level fixed

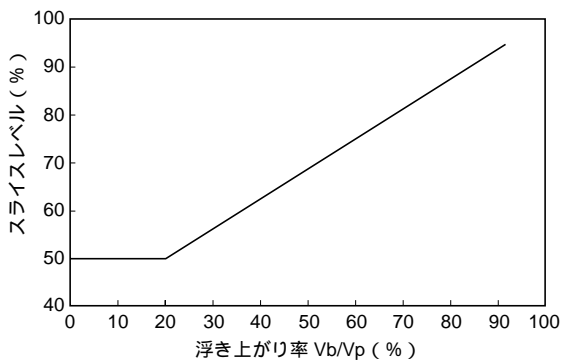


図6 浮き上がり率と最適スライスレベル
Relationship between Vb/Vp and slice level

だけでは被測定物の外径を求めることはできない。

本機では次の原理でビーム径よりも細い線の外径を測定している。

スライスレベルを適当なレベルに固定し、ビーム径を変化させてオブジェクト信号の浮き上がりレベルが異なる状態で測定を行うと、検出される値は図5に示されるように変化する。このときの値（以下浮き上がり補正前測定値と呼ぶ）の変化をみると、ある浮き上がり率のときに浮き上がり補正前測定値が最大になるところがある。つまり、この浮き上がり率付近では浮き上がり補正前測定値の変化が小さい。これは被測定物の外径によらずほぼ一定である。このときに設定していたスライスレベルを浮き上がり補正前測定値が最大にな

る浮き上がり率に対する最適スライスレベルと呼ぶ。浮き上がり率に対する最適スライスレベルの関係を示したものが図6である。次に、最適スライスレベルで測定した場合の浮き上がり補正前測定値をみると同じ浮き上がり率では $y = ad + b$ の関係が保たれている。

y : 浮き上がり補正前測定値

a : 浮き上がり率 (Vb/Vp) で決まる係数

b : 浮き上がり率 (Vb/Vp) で決まるオフセット

d : 被測定物の外径

したがって、被測定物の外径 (d) は $d = y/a - b/a$ で求めることができる。

ここで $k = 1/a$ として k を補正係数、 $h = b/a$ として h をオフセット補正量とすると、Vb/Vp と k、h の関係はそれぞれ図7、図8に示すようになる。つまり、浮き上がり率 Vb/Vp を検出し、そのときの最適スライスレベルで測定すると、浮き上がり補正前測定値を k、h で補正することにより被測定物の外径 d を求めることができる。

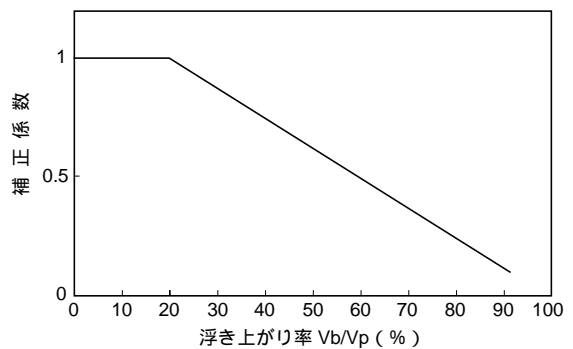


図7 浮き上がり率と補正係数
Relationship between Vb/Vp and correcting factor

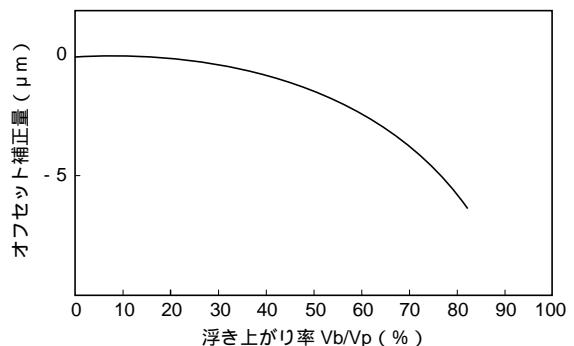


図8 浮き上がり率とオフセット補正量
Relationship between Vb/Vp and offset

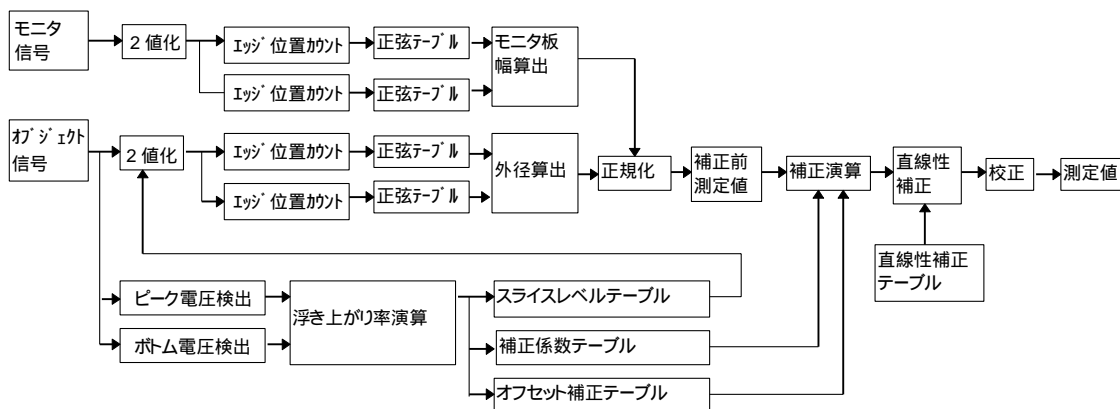


図9 信号処理ブロック図
Block diagram of processing circuit

図9に信号処理のブロック図を示す。

被測定物が測定可能領域に入ると、最初の走査で得られるオブジェクト信号からピークレベル検出回路により V_p を、ボトムレベル検出回路により V_b を検出する。得られた V_p と V_b から浮き上がり率演算回路により浮き上がり率 V_b/V_p を求める。 V_b/V_p を求めたら、図6の関係を格納した最適スライスレベルテーブルから最適スライスレベル V_s 、図7の関係を格納した補正係数テーブルから補正係数 k 、図8の関係を格納したオフセット補正テーブルからオフセット補正量 h をそれぞれ決定する。

次の走査では一回前の走査で決めたスライスレベルでオブジェクト信号を波形整形し2値化する。このとき次の走査で得られるオブジェクト信号に使うためにスライスレベルや補正係数 k 、オフセット補正量 h を更新しておく。以降これを繰り返す。2値化されたオブジェクト信号をもとにゲートアレイによる高速カウンタでエッジ位置に対応するカウント値を得る。レーザ光の走査は等速ではなく正弦的に変化しているため、そのカウント値は正弦テーブルとソフトウェアによりエッジ位置に変換される。これらのエッジ位置の差か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、モニター信号から同様にして得られるモニター板の幅の測定値で除算して走査振幅の変動の影響を除去している。これが浮き上がり補正前測定値となる。このようにして得られた浮き上がり補正前測定値を一回前の走査で決めた補正係数 k 、オフセット補正量 h で補正する。このとき、厳密に言えば被測定物の外径の変動や、位置ずれにより浮き上がり率はわずかに変化しているが、浮き上がり率の変化が5%程度までは測定に大きく影

響を与えることはない。本機のレーザ光の走査回数は1秒間に3,000回であり、1回目の走査と2回目の走査の間隔は0.3msである。この間に被測定物の外径変化や位置ずれにより浮き上がり率が5%以上変化するという事は0.3msの間に $5\mu\text{m}$ や $10\mu\text{m}$ の被測定物の外径が $1\mu\text{m}$ 以上変化するか、光軸方向に0.4mm以上移動する場合である。したがって、通常では一回前の走査で決めたスライスレベルや補正係数 k 、オフセット補正量 h を使用しても十分な精度で補正することができる。ただし、実際の機械では、この補正では光軸方向の位置ずれによる誤差は修正できるが、 $20\mu\text{m}$ 以下の径で細くなるほど真値からやや太く補正されてしまう。このため、本機ではこの後にさらに直線性補正を行い測定値としている。これは、測定範囲全体(KL1001Aの場合 $5\mu\text{m}$ から 0.5mm 、KL1001Aの場合 $10\mu\text{m}$ から 2mm)にわたる直線性を確保するためである。また、個々の機械でわずかながら機差があるため、基準となるゲージを光軸方向に移動させながら測定し、補正係数、オフセット補正量の二つのテーブルと直線性補正のデータを作成している。そして、これらの補正データはすべて検出部内に記録している。

3 製品概要

主要規格を表1に示す。

本機は先に開発したKL1003AN検出部のシリーズの一つであることは先に述べたとおりである。KL1002Aは明快な表示と簡単な操作、豊富な入出力が特長のKL3000A表示部と無調整で接続できる。KL1001AはKL1002Aの測定範囲を限定し、特別に調整したものであり、KL3000AにKL1001Aと接続する

表1 主要規格
Main specifications

検出部型名	KL1001A	KL1002A	
測定範囲	5 ~ 500 μ m	0.01 ~ 2mm	
測定可能領域	走査方向	1mm	4.2mm
	光軸方向	1mm	3mm
繰返し性 ^{1, 5} ()内は平均化周期と平均回数	被測定物が5 ~ 50 μ mのとき $\pm 0.05\mu$ m (11ms, AVG.32) 被測定物が50を超え ~ 500 μ mのとき $\pm 0.1\mu$ m (11ms, AVG.32)	$\pm 0.15\mu$ m (21ms, AVG.64) $\pm 0.05\mu$ m (1.364s, AVG.4096)	
直線性 ^{2, 5}	$\pm 0.5\mu$ m	$\pm 1\mu$ m	
再現性 ^{3, 5}	$\pm 0.3\mu$ m ³	$\pm 1\mu$ m (0.01 ~ 0.03) ^{3, 4} $\pm 0.5\mu$ m (0.03 ~ 2) ^{3, 4}	
安定度 ± 5 の温度変化に対して	被測定物が5 ~ 50 μ mのとき $\pm 0.2\mu$ m 被測定物が50を超え ~ 500 μ mのとき $\pm 0.3\mu$ m	0.6 μ m	
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		
	外部出力1mW以下		
レーザー製品のクラス	クラス3B		
使用温度範囲	0 ~ 45		
寸法	221(W)×90(H)×50(D)mm		
質量	2.1kg		
保護等級	IP64		

- 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0.1mm以下の場合には測定可能領域内の中心を基準とした走査方向 ± 1 mm光軸方向 ± 1 mmの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。
5 外径測定に関する規格です。

ためのソフトウェアを搭載したKL3000B表示部と接続する
(KL3000B表示部にはKL1002Aを接続することが可能)

本機の特長を以下に示す。

3.1 5 μ mの細線の外径測定が可能

KL1001Aは5 μ m、KL1002Aは10 μ mの細線の外径測定が可能である。また、それぞれ5 μ mから0.5mm、10 μ mから2mmの測定範囲全体で設定替えの必要もなく、特別な操作も必要としない。測定可能領域内を被測定物が通るように位置決めするだけである。これは前述した測定原理に基づき自動的に最適な状態で測定するようにしているからである。

3.2 毎秒3000回の高速往復走査

本機は前述した通り、KL1003ANと同様に毎秒3000回の高速走査である。KL1003AN用に開発した音叉偏向器を本機にも採用した。従来機の3倍の走査回数で、より高密度(たとえ

ば線速が毎分2,000mの場合で11mmごとの走査)に測定するので被測定物の品質管理の向上が期待できる。あるいは、今後線引き速度が早くなった場合でも従来と同等以上の密度で測定可能である。また、往復走査であるため、被測定物が振動していても高精度に測定できる。レーザー光の走査が被測定物の移動方向と同じときには大きく測定され、逆の場合は小さく測定される。したがって、片側からだけの走査では被測定物の振動の周期で測定値が変動するが、往復走査の場合、測定値を平均すれば被測定物の振動による測定誤差の大部分を打ち消すことができる。

3.3 長寿命、高信頼性

音叉偏向器は回転ミラーとは異なりモータの軸受けなどの摩耗する部分がないため、寿命は半永久的である。このため長期間使用しても偏向器の交換は不要で、安定した測定が可

能である。

3.4 測定可能領域の拡大

製造ラインで使用するということは被測定物が振動しているということである。KL1002Aは同等の測定範囲を持つ従来機のKL506Aよりも測定可能領域を拡大し、被測定物が振動しても測定可能領域から飛び出しにくいようにした。KL506Aでは光軸方向2mm、走査方向2mmであったが、KL1002Aではそれぞれ3mm、4mmである。

3.5 被測定物の位置モニタ

本機は測定可能領域内での被測定物の位置をモニタする機能を備えている。M550AやKL506Aと同様に走査方向だけでなく光軸方向の位置もモニタする。KL3000A、KL3000B表示部には測定可能領域内での被測定物の位置を表示するLEDマトリクスがある。KL3000A表示部はKL1003ANとの組み合わせでは走査方向のみ動作していたが、KL1002Aとの組み合わせでは光軸方向にも動作するようになった。この位置モニタ機能は測定中でも動作しており、被測定物の位置決め時だけでなく、測定中に被測定物の位置がずれていないか一目で確認できる。また、オプションで走査方向、光軸方向の位置出力（出力周期＝平均回数×0.33ms）を用意しており、最適な状態で測定するための位置制御などに利用できる。また、記録計に接続すれば被測定物の振動の様子を記録することもでき、製造ラインの状態を監視するような使い方も考えられる。

3.6 耐環境性の向上

インラインで使用する場合、工場内で粉塵などがある環境でも使用できる耐環境性が重要である。本機はKL1003ANと同様にIP60の防塵性を確保し、投受光窓のエアパーズが可能なカバーを設けた。また、投受光窓の汚れをモニタする自己診断機能も同様に搭載している。

3.7 検出部、表示部の互換性

検出部、表示部はそれぞれ互換性があり、組み合わせを問わない。これはKL1003ANと同様に光学系の歪を補正する再現性補正データを検出部内のEEPROMに記憶しているからである。このため、どの検出部と表示部を接続しても調整なしで使用することができる。したがって、万が一故障した場合でも検出部または表示部の故障している方だけを交換すればよく、製造ラインの修復に要する時間が短縮できる。また、検出部と表示部をペアで扱う必要もないため、管理も容易となる。

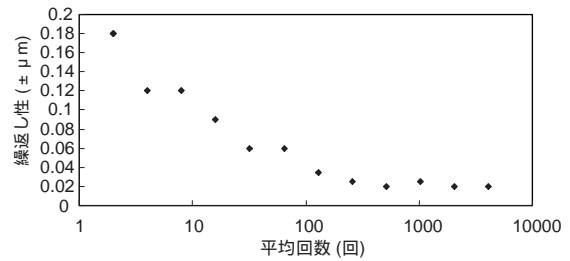


図10 繰返し性
Repeatability

4 性能

ここでは代表してKL1002Aの性能評価の結果を紹介する。

4.1 繰返し性

本機では同一の方法で同一の被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ばらつき（3σ）として規定している。したがって、被測定物を固定した状態で測定し、測定値の変動をみた。図10は平均回数が2～4,096回での測定値のばらつきを示したものである。測定値のばらつきは光電信号のゆらぎ、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、平均回数を大きくすることによって改善できる。ただし、平均回数を256以上にすると測定値のばらつきの大きさが、空気のゆらぎや、周囲温度のわずかな変化で数秒から数分周期で測定値がゆっくりと変動する量と同じかそれ以下になるため、平均化の効果が現れなくなる。図10では平均回数64回するとき±0.06μm、平均回数4,096回するとき±0.02μmでありそれぞれ規格値の±0.15μm、±0.05μmを満足している。

4.2 再現性

再現性は被測定物が測定可能領域中心からずれた場合、測定可能領域中心での測定値を基準とした測定値の変化の量と定義している。再現性の実測例を図11に示す。XYステージに2mmまたは10μmのゲージを取付け、光軸方向の中心、中心から投光部側へ1.5mm（10μmのゲージでは1mm）、受光部側へ1.5mm（10μmのゲージでは1mm）の3個所で走査方向に移動させた場合の測定値の変動を記録したものである。測定可能領域中心での測定値を基準にして10μmを測定したとき-0.04～+0.22μm、2mmを測定したとき-0.2～±0.28μmであり、それぞれ規格値の±1μmまたは±0.5μmを満足している。

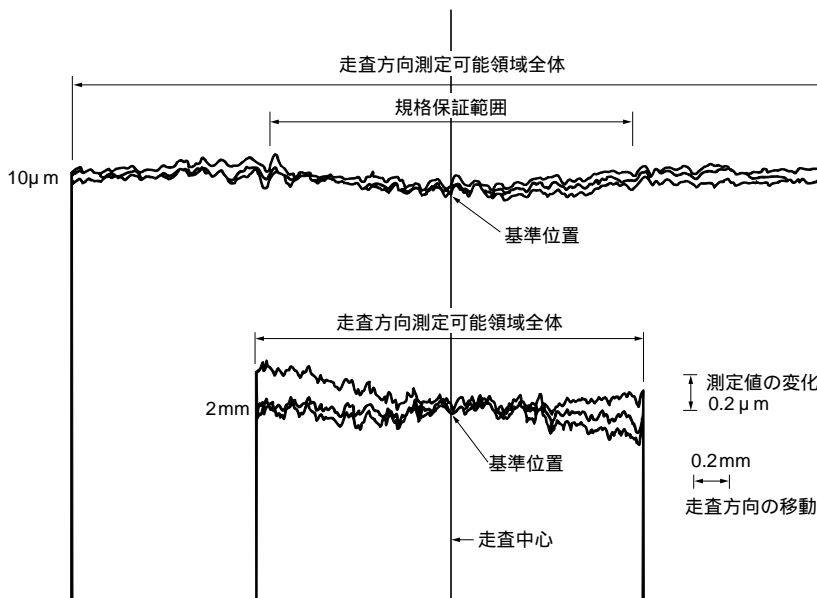


図11 KL1002Aの再現性
Reproducibility of KL1002A

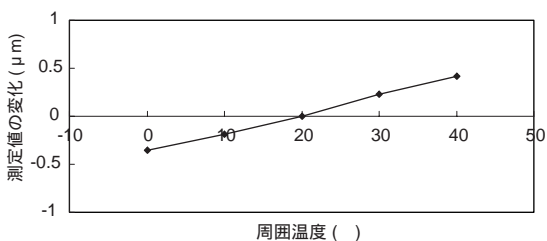


図12 KL1002Aの安定度
Stability of KL1002A

4.3 直線性

直線性は被測定物の真値と測定値との差で、本機ではオプションで供給している2本の校正ゲージ(0.1mmと 1.5mm)で2点校正し、測定可能領域中心にて表面が滑らかな金属(不透明体)の円形断面の被測定物を測定した場合と規定している。試験の結果、ゲージ径に対して測定値は - 0.8 ~ + 0.5 μm であり規格値 ± 1 μm を満足していた。被測定物の外径が決まっている場合、被測定物と同じサイズのゲージを用いて校正することにより、直線性の影響をあまり受けずに測定することができる。

4.4 安定度

安定度は温度変化に対してどの程度安定しているかであり、

本機では測定可能領域中心で被測定物の外径を測定したとき、温度変化 ± 5 当たりの測定値の変化として規定している。図12に安定度の一例を示す。これは 2mmのゲージを測定したときの結果である。20 のときの測定値を基準として0 から 40 の範囲で温度を変化させたときの測定値の変化を表している。この結果では10 で最大0.23 μm変化しているが、これを ± 5 当たりでみると ± 0.115 μm であり、規格値の ± 0.6 μm を満足している。図12では温度が高くなると測定値が大きくなっているが、逆に測定値が小さくなるものもある。また、周囲温度があまり変化しない場合は、温度が安定した時点で校正すれば安定度の影響を受けずに測定することができる。

5 まとめ

本機は従来機の M550A, KL506A の後継機として開発した。その結果、測定回数が毎秒3,000回と従来機の3倍の高速性を有しながら、従来機の測定精度を満足するものができ、KL1003AN/BN 検出部, KL3000A 表示部のシリーズとして品揃えすることができた。

参考文献

- 1) 竹内, 浜野ほか: 高速走査外径測定機, アンリツテクニカル, 76号