

多機能と使いやすさを追求した電子マイクロメータ - KG3001A 指示器 -

KG3001A - Multifunctional Electronic Micrometer Indicator

UDC 531.716/717

梅 一夫

Kazuo Ume

産業機械事業部 第2開発部

二神直樹

Naoki Futagami

産業機械事業部 システム技術部

1 まえがき

当社では差動トランス方式の「電子マイクロメータ」を、1962年から発売してきている。電子マイクロメータは、微小な変位量を接触式測定子を用いて電気量に変換する検出器と変位量を電氣的に増幅して表示する指示計とから構成されている。

この比較測定器である電子マイクロメータは、1967年10月、JIS B 7536電気マイクロメータに制定された。その後、JISは電気マイクロメータの性能向上と、用途の拡大に伴い、1982年12月に改正されている。

電子マイクロメータの検出器には、差動トランス形、静電容量形、抵抗線ひずみ形、インダクタンス形、その他種々あり、それぞれに特長をもっているが、電子マイクロメータの検出器としては差動トランス形が最も普及している。

特長としては、高感度(0.1～0.01 μm)・高出力(0.1～1V/1mm)で直線性範囲が広い、検出器は小形で構造が単純であり耐久性・耐環境性に優れる、コイルとコアは非接触なので、測定力は任意に選べるなどが挙げられる。

電子マイクロメータは、測定対象の高さ・段差・厚みなどの寸法測定に使用されているほか、回転体の偏心測定、振動体や回転振れなどの振動測定、走行する薄物の厚みの連続測定などに使用されている。さらに、機械的な変位に置換される物理量、たとえば重量の測定などにも応用されている。このように、電子マイクロメータは、寸法測定器として、検査室、研究室で数多く使用されているだけでなく、オンラインの自動計測機、自動選別機、多点の自動計測、自動制御のセンサーとして、より多く用いられている。電子マイクロメータの品揃えは、測定項目別に絞った単機能機種が多く用意されている。

最近の計測の自動化の進展は、パソコンやシーケンサを用いた制御が多くなってきた。それらと接続するためのシリアル、パラレル入出力インタフェースが必要である。また、品物の形状・特性にしたがって、それぞれ測定機構の構造や寸法が異なるのみならず、測定項目にしたがい電子マイクロメータにもそれぞれに適した多くの機能を持たせる必要が生じてきた。従来のように、単機能の電子マイクロメータや付属装置の組み合わせでは、満足な機能をもたせることが困難になった。また、その都度別の単機能の電子マイクロメータを作っていたのでは、コスト高になるとともに、メンテナンス上でも問題があることから、多機能であること、使い勝手が良いこと、パソコンなどとの接続が容易であるシリアル、パラレル入出力インタフェースの標準装備などの要求が強い。

今回、このような要求に応えるため、8機種の旧型指示器の機能を統合し、新たに多機能化、入出力インタフェースの強化、使いやすさをねらいとしたKG3001A指示器を開発した。



図1 KG3001A 指示器の外観
External view of KG3001A Indicator

表示部には、タッチパネル付き液晶ディスプレイを採用し、操作性の向上を実現した。図1に指示器の外観を示す。

2 構成・原理

2.1 構成

電子マイクロメータは、KG3001A 指示器と検出器とで構成される。指示器と検出器は、信号ケーブルで接続され、ケーブル長は30mまで延長可能である。指示器と検出器を組み合わせたあと、ブロックゲージを使用して感度校正をする。指



図2 検出器の外観
External view of detector

示器には、ブロックゲージを使用して感度校正をすれば、どの検出器でも接続ができる。図2に検出器の外観を示す。

2.2 原理

図3に電子マイクロメータの原理図、図4に差動トランスの変位出力を示す。1次コイルに数kHzの交流電圧を加えると、おのおのの2次コイルにE1、E2の電圧が誘起される。コアの位置により2次コイルのE1、E2の電圧が増減するのでE1、E2の差を求めれば変位量を検出できる。

図5にKG3001A 指示器のブロック図を示す。検出器は、2本使用することができ、 $\pm A \pm B$ の演算が行える。検出器からの信号は、アナログ処理部にて処理し、16bit A/D変換器によりデジタル信号に変換し、マイクロプロセッサを使い演算処理やI/O制御を行っている。

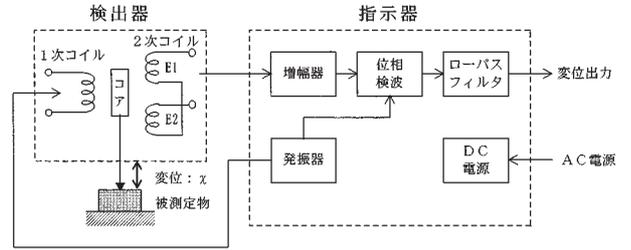


図3 電子マイクロメータ原理図
Block diagram of electronic micrometer

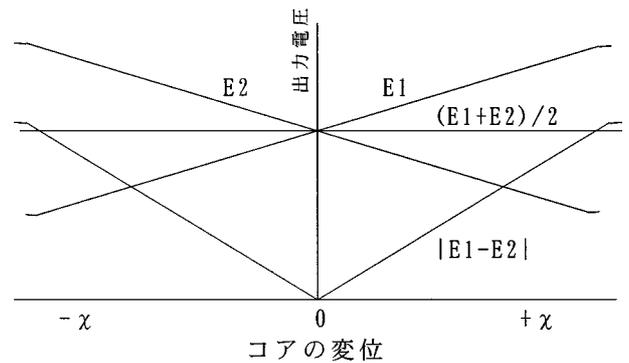


図4 差動トランスの変位出力
Displacement output of differential transformer

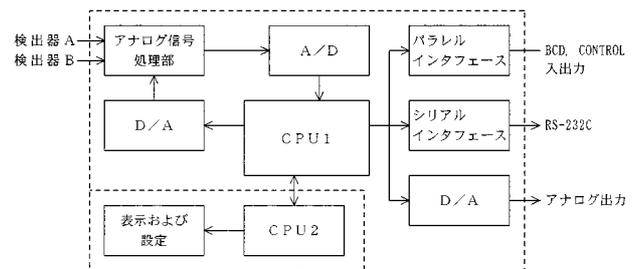


図5 KG3001A 指示器 ブロック図
Schematic diagram of KG3001A Indicator

3 開発のポイント

3.1 多機能化

3.1.1 機種統合

8機種の電子マイクロメータの指示器の機能を包括させ、上位互換性を維持できるように統合した。表1に旧型指示器とKG3001A 指示器との測定機能比較、表2に測定機能一覧を示す。

これらの測定機能のうちPeak-Peak測定と統計測定はどちらかの選択とし、それ以外は、自由に組み合わせて使用できる。

表1 旧型指示器とKG3001A 指示器との機能比較
Comparison with old model performance

| 機種 | K302C | K304C | K306C | K308C | K309C | K351C | K352C | KG353A | KG3001A |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
| 測定機能 | | | | | | | | | |
| 和差動測定 | | | | | | | | | |
| 広範囲測定 | | | | | | | | | |
| P-P 測定 | | | | | | | | | |
| 合否判定測定 | | | | | | | | | |
| デジタル測定 | | | | | | | | | |
| アナログメータ表示 | | | | | | | | | |
| 統計測定 | | | | | | | | | |

の機能が装備されている

表2 測定機能一覧
Function table of measurement

| 測定機能 | 説明 |
|--------|--|
| 和差動測定 | 2本の検出器を用いて、各測定値の和または差の演算測定をする。 |
| 広範囲測定 | 0 ~ 1000 μmの基準値設定ができるので、基準ゲージ等を使わずに0 ~ 1000 μmの広範囲を高感度で測定する。 |
| P-P 測定 | メモリー (MIN, MAX) 機能を内蔵して最大、最小、振幅等をメータで直読できる。 |
| 合否判定測定 | 上下限のリミット設定機能をもち、測定結果による合否判定を表示・出力する。 |
| デジタル測定 | A/D変換を内蔵し、デジタル表示・出力する。 |
| 統計設定 | 測定値に対して統計演算をする。 |

3.1.2 新たに加えた機能

(1) 調整ツマミを使用しないワンタッチ操作のゼロセット、校正

寸法測定では、基準試料に対する比較測定により寸法を求めることがよく行なわれる。この場合には、基準試料の測定面に対して検出器の取付位置を調整して、測定面が検出器のゼロ点付近になるように合わせる。ゼロセットキースイッチのワンタッチ操作により、ゼロ点のずれ量を本機が記憶して現在の表示値や出力値をゼロにする。以後、ここでゼロと設定した基準値からのずれ量を測定する。

指示器と検出器の組み合わせは、ブロックゲージを使用して感度校正をする。感度校正キースイッチのワンタッチ操作により校正を行うことができる。

(2) 測定値の平均化

測定対象物の表面の凹凸に起因する測定値の乱れを除去したり、信号処理系の雑音を平均化して抑圧することが必要となることがある。このために間欠測定 (平均化無し・平均化有り)、単純平均測定、移動平均測定の平均測定機能を設けた。出力周期と平均区間の設定にて平均測定機能を選択できる。

表3 平均の設定
Setting of average mode

| 平均測定種別 | 平均区間・出力周期の設定 | 平均化後の測定値 |
|--------|----------------------------|--------------------------|
| 間欠測定 | 平均化無し (1 = 平均区間) 出力周期 | 出力周期ごとの1個の測定値 |
| | 平均化有り (1 < 平均区間) < 出力周期 | 出力周期ごとのN個の測定値の平均値 |
| 単純平均 | 平均区間 = 出力周期 | 出力周期ごとの出力周期間のすべての測定値の平均値 |
| 移動平均 | 平均区間 > 出力周期 | 出力周期ごとの平均区間のすべての測定値の平均値 |

表3に平均化の設定方法を示す。単純平均は、ある一定時間の平均値を求めるときに有効である。一方、測定面の表面粗さの影響を除去し、測定対象の変位を測定したいときなどのように、局所的な粗さを平滑化して長い周期の変動を検出したいときには、出力周期を小さくしたまま平均区間を長くすることができる移動平均が有効である。

(3) 測定値のスケーリング

測定レバーを使用したときのように、検出器の変位出力が実際の測定対象の変位と等しくない場合がある。このような場合、検出器の変位出力にスケーリング係数 a/b (a, b : 定数) を演算することにより、測定対象の変位を正しく求めることができる。

また、基準ゲージを使用するときに必要な、ゲージの公称値と仕上り値との差を補正するゲージ補正は、検出器の変位出力にスケーリング係数 c (c : 定数) を加減算することで行える。

演算式は以下の通りである。

$$\text{実際の測定対象変位} = \text{検出器の変位出力} \times a/b + c$$

$$(a = b = 1 \sim 10, c = \pm \text{指示範囲フルスケール値})$$

スケーリング機能は、機械的な変位に変換できる物理量を計測する場合にも利用できる。

(4) 統計処理

測定値の統計演算機能で、最大値、最小値、範囲、平均値、標準偏差などを求めることができる。測定値の個数の設定ができ、統計スタートからの測定値の個数が指定個数に達すると統計終了できる。個数指定をあらかじめ行わず統計スタートからストップの間のすべての測定値を取り込んで統計演算をすることもできる。

3.2 入出力インタフェースの強化

(1) アナログ出力レシオ係数の設定機能

アナログレコーダ用に、測定値をD/A変換した直流電圧を最大 ± 10V まで出力できる。指示範囲 ± フルスケールのとき

最大±10Vで出力される変位に対する出力電圧は、出力レシオ係数にて0.01倍から99.99倍に調整できる。これにより旧型の指示器との出力互換性がとれるようにできる。

(2) シリアルインタフェースの追加

外部のパソコンや制御装置から、測定値を読み出したり、指示範囲やプリセット値、上下限值などを設定したり読み出したり、ゼロセットや測定、統計、校正などの測定制御が行なえる。

(3) 測定値パラレル出力の高速化

測定値を5桁BCDコード形式・TTLレベルにて、シリアル出力よりも高速に出力できる。読み出しのタイミングを決めるためのタイミングパルス出力が用意されている。出力周期は、旧型指示器の150msから1msに高速化した。旧型指示器の4桁BCDコード出力との互換性を維持するため、4桁出力を選択することもできる。

(4) フォトカプラ採用の測定制御入出力

リモート切換、ゼロセット、測定開始・停止、Peak-Peak測定または統計のスタート・ストップなどの制御入力やPeak-Peak測定中または統計中、BUSY、電源ONなどの状態出力がある。フォトカプラ絶縁入出力である。

3.3 使いやすさ

(1) 検出器の診断

指示器には、測定用途に応じて2本までの検出器を接続でき、接続の本数は、あらかじめ設定する。設定終了時または電源投入時に設定どおり検出器が接続されているか、検出器、ケーブルの断線はないかを診断している。異常を検出するとエラーメッセージ表示と警報出力を行うので検出器異常による測定トラブルを速やかに発見できる。

(2) ワンタッチ操作のゼロセット、校正

ゼロ点調整やブロックゲージを使用する感度校正は、調整ツマミによる調整を必要としない、タッチパネルによるワンタッチ操作で行える。従来指示器の調整ツマミによる調整は、調整者の熟練度による調整誤差の発生や指示器に密着して調整作業を行わなくてはならない。ワンタッチ操作にすることで、熟練度によらない作業が可能となり調整誤差の発生が防止でき、また外部測定制御信号による遠隔操作も実現できる。

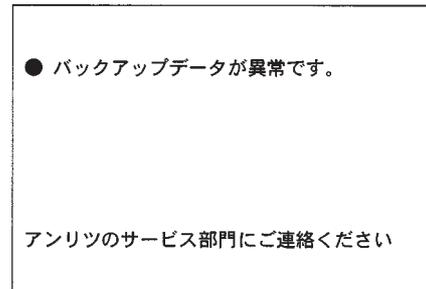
(3) 有効なメッセージ

図6にメッセージ画面の一例を示す。

自己診断、設定エラー、操作エラー、エラー発生時の処置方法、注意事項などのメッセージを23種類用意した。誤操作、



(a)



(b)

図6 エラーメッセージ画面
Display of error message

誤設定の防止、エラー、故障時の原因、処置方法を画面に表示するので容易に動作確認や保守を行うことができるようになった。

(4) 操作性の向上

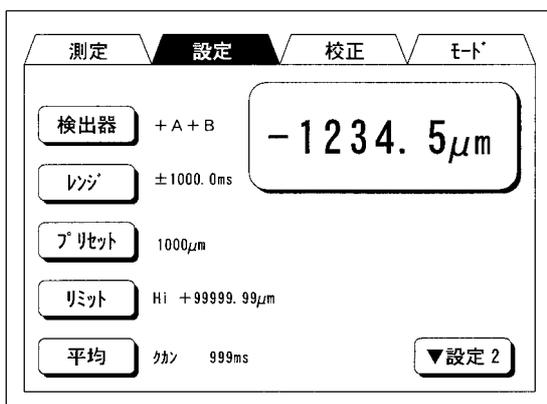
タッチパネル付き液晶ディスプレイを採用して操作性の向上を図った指示器のデザインは、机上のテーブル面で使用するときのディスプレイの視認性とタッチパネルの操作性を合わせて考えた。ディスプレイ面の傾斜角度が65°以下になると上からの室内照明が反射し見づらくなり垂直の場合も視認性が悪いので、傾斜角度は旧型指示器と同じく75°にし、従来とのイメージの整合を図った。タッチパネル上のスイッチを手動操作するため、テーブル面より手の高さ40mmのスペースをとった位置にタッチパネルを配置し、その中に操作パネル画面の操作キーを配置した。

図7に操作パネルの画面を示す。図7(a)は測定画面、図7(b)は変位に関する設定画面であり、図7(c)はワンタッチ操作の校正画面である。画面は、測定、設定、校正、モードの4画面に大分類される。これらは画面表示上部のインデックスに指をふれることによりワンタッチで画面選択できる。

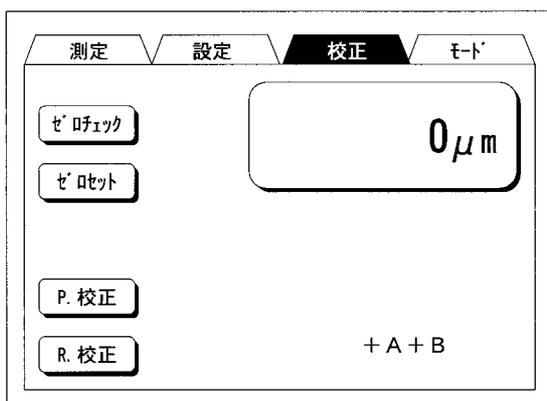
測定画面には、測定中に用いるボタンを配置した。測定値の表示は、専用の表示枠を設けてそこに表示した。その表示枠は、操作キーも兼ねており、押すことによりアナログメー



(a) 測定画面



(b) 設定画面



(c) 校正画面

図7 操作パネルの画面
Display of operating panel

アナログ表示とデジタル数字表示をワンタッチで切換えることができる。メータでピーク値や振れを見たり、デジタル表示値で高精度な読み取りができる。

設定画面には、測定値に係わる設定値のみならず測定値表

示を同一の画面に入れているため、設定結果を速やかに参照しながら設定できる。

校正画面では、ワンタッチでゼロセット、感度校正を行える。

モード画面では、測定機能選択、シリアル通信仕様、プザー、プリンタ、画面コントラストなどの選択ができる。

4 製品概要

主要規格を表4に示す。

KG3001A 指示器は次のような特長をもつ。

(1) アナログメータ表示とデジタル数字表示のワンタッチ切換え

(2) 検出器を2本まで接続可能

(3) さまざまな入出力を標準装備

(4) Peak-Peak 測定

測定対象物の振動、回転などの運動によって測定値が変動しているとき、その測定値の最大値、最小値それらの差と平均を求める測定である。振幅や回転体の偏心量、真円度などを表示部で直読できる。

(5) 統計演算機能

統計演算できる測定値の個数は、1から29999個である。統計の結果は、最大値、最小値、平均値、範囲、標準偏差が画面に表示される。プリンタを接続すれば測定値、統計結果、設定データを印字記録することもできる。図8に統計結果印字例を示す。



図8 統計結果の印字例
Sample printing of statistical result

表4 主要規格
Main specifications

| 形名 | | KG3001A |
|----------------|--------------|---|
| 項目 | | |
| 表示方式・測定値表示 | | LCD・デジタルおよびアナログ表示 |
| 指示範囲 | | デジタル表示 ±100.00 μm/±1000.0 μm/±10000 μmのFSの3レンジより選択可能 アナログ表示 上記レンジ×M M:0.01~1.00から選択可能 |
| 指示誤差(*) | 直線性(繰返し性を含む) | FS/3以内: ±(0.1 μm + FSの0.15% + 1ディジット) FS/3~FS: ±(0.1 μm + FSの0.4% + 1ディジット) 0.1 μmは繰返し性(*) |
| | プリセット誤差 | プリセットが200 μm以内のとき: 0.5 μm, 201 μm以上のとき: プリセット値の±0.3% |
| | 和差動特性 | 和差動測定範囲が0~±200 μm以内のとき: ±0.6 μm, ±200~±500 μmのとき: ±1.5 μm |
| プリセット範囲 | | 0~1000 μm |
| ゼロ調整範囲 | | ±50 μm |
| プリセット値感度校正範囲 | | ±5% |
| 指示範囲感度校正範囲 | | ±20% |
| 演算機能 | | ±A, ±B, ±A±B(同一形名の検出器2本まで接続可能) |
| 応答性 | | 100Hz(-3dB), 5ms(90%ステップ応答) |
| 平均化 | 機能 | 平均区間, 出力周期の設定にて間欠, 単純, 移動の各平均化から選択可能 |
| | サンプルレート | 1ms~99min(平均区間, 出力周期共に) |
| スケーリング | | 測定値×A/B+Cのスケーリングが可能。A, B: 1~10 C: 0~±FS |
| Peak-Peak測定機能 | | MAX, MIN, DIF(=MAX-MIN), AVE(=(MAX+MIN)/2) |
| 統計処理 | | MAX, MIN, AVE, R, s |
| リミット設定 | | 通常測定 3~30ランクのリミット値が設定可能。(- FS リミット FS) 3~5ランク: Lo L1 L2 Hiを設定 6~30ランク: ランク数, Lo, Hiを設定 (Lo, Hi間はランク数 - 2で等分され, OK出力はバイナリ出力です) Peak-Peak測定 MAX, MIN, DIFに対し, それぞれのリミット値が設定可能。 (- FS MINリミット < MAXリミット FS, 0 DIFリミット FS) |
| リミット判定表示・出力 | | 通常測定 表示: - NG (測定値 Lo) のとき を表示 OK (OK1: Lo < 測定値 L1, OK2: L1 < 測定値 L2...) のとき 1~28 を表示 + NG (Hi < 測定値) のとき を表示 出力: - NG, OK1~28で5点(6~30ランクのときはバイナリ), + NG 7点フォトカブラ出力DC24V, 50mA以下 Peak-Peak測定 表示: MAX NG (MAXリミット < MAX) のとき を表示 MIN NG (MIN MINリミット) のとき を表示 DIF NG (DIFリミット < DIF) のとき を表示 出力: MAX NG, OK, MIN NGおよびDIF OK, DIF NG 5点フォトカブラ出力DC24V, 50mA以下 |
| アナログ出力 | | ±10V × (出力レシオ係数) / ±FS (但し最大出力は±10V, 最小分解能は1mV) 出力レシオ係数: 0.01~99.99 出力インピーダンス: 470 Ω, 最大出力電流2mA |
| デジタル出力 | シリアルI/O | RS-232Cインタフェース 通信速度2,400~19,200bps |
| | BCD | 測定値 5桁/4桁 1-2-4-8BCDコード, 極性, オーバーフロー, 小数点位置, リミット判定(正/負論理選択可)および測定完了パルス5~100ms(正論理)のTTLレベル出力 |
| コントロール入出力 | 警報出力 | ゼロ補正異常, プリセット値感度校正異常, 指示範囲感度校正異常, 総合アラーム(全異常の論理和) フォトカブラ出力DC24V, 50mA以下 |
| | 外部出力 | Peak-Peak測定中または統計中, BUSY, 電源ON フォトカブラ出力DC24V, 50mA以下 |
| | 外部信号入力 | リモート/ローカル切換, 測定ON, ゼロセットON, Peak-Peak測定または統計スタート/ストップ, 印字ON オープンコレクタ, 無電圧接点入力DC12~24V, 5mA |
| 安定度(*) [4時間以内] | | ゼロ点, 感度ともに ±(0.1 μm + FSの0.1% + プリセット値の0.1%) 以内 |
| 使用温度・湿度 | | 0~40 °C, 30~85% RH (結露なきこと) |
| 電源 | | AC100~240V ±10%, 50/60Hz, 25VA |
| 外形寸法・質量 | | 140(H) × 168(W) × 175(D) mm, 2.5kg |

* K107C検出器との組合せ規格を示す(温度20 ± 1 °Cにおいて)
FSは, 指示範囲フルスケール(スケーリングで変化します)を示します。

5 性能

表4に主要な規格を示す。性能に係わる規格は、検出器との組合せ規格である。

5.1 繰返し性

同一の方法で同一の測定対象を、同じ条件で比較的短い時間に繰返し測定した場合、個々の測定値が一致する性質または度合いである。

本機では、指示器の最高感度レンジにて、検出器の測定子を測定上面に当て、測定子を10回ゆっくり上下させた時の指示値の最大値と最小値の差として判定している。検出器の機械的な軸受部の構造・ガタなどによる指示値のバラツキが主な要因である。平行板バネ構造のK103A検出器にて0.01 μm 、リニアボールベアリング構造のK107C検出器では0.1 μm の規格となっている。

5.2 直線性

電子マイクロメータのゼロ点及び感度を校正した後、任意の指示値に相当するブロックゲージにより指示した値と、指示すべき値との差を直線性として判定している。高精度差動トランスアンプ、高精度16ビットA/D変換器の採用により、従来規格0.5%を0.4%に改善できた。図9は、直線性誤差を示す。K107C検出器を接続し、1000 μm で感度調整したときの、指示範囲 $\pm 100.00 \mu\text{m}$ 、 $\pm 1000.0 \mu\text{m}$ の直線性の誤差である。最大誤差は指示範囲1/3フルスケール比で0.12%、フルスケール比で0.22%となっており規格を満たしている。

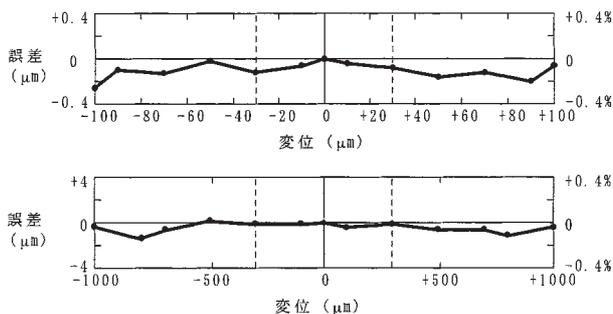


図9 直線性誤差
Linearity error

5.3 プリセット誤差

プリセット値の感度を校正した後、プリセット値に相当するブロックゲージにより指示した値と、プリセット値との差をプリセット誤差として判定している。プリセット値に比例

する基準電圧の発生回路を、巻線の一部から一定巻数ごとにタップを設けた分圧トランス方式から、D/A変換器方式に変えることで、小形・低価格を実現しながら従来規格を満足した。図10は、プリセット誤差を示す。K107C検出器を接続し、1,000 μm で感度調整したときのプリセット誤差である。最大誤差は、プリセット値が200 μm まで0.1 μm 、1000 μm までプリセット値の0.04%となっており規格を満足している。

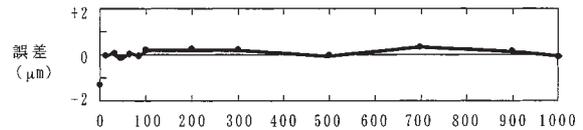


図10 プリセット誤差
Preset error

5.4 和差動特性

2本の検出器A、Bを接続して和動(A+B)、差動(A-B)演算を行なうとき、測定対象物が測定範囲内で平行移動したとき指示値の変動量を和差動特性誤差として判定している。2本の検出器の直線性の差が誤差となる。図11は、和差動特性誤差を示す。K107C検出器2本を接続し、2本の検出器の測定子をブロックゲージを使用して平行移動したときの和差動特性誤差である。最大誤差は、平行移動量が $\pm 200 \mu\text{m}$ まで0.2 μm 、 $\pm 500 \mu\text{m}$ まで0.8 μm となっており規格を満足している。

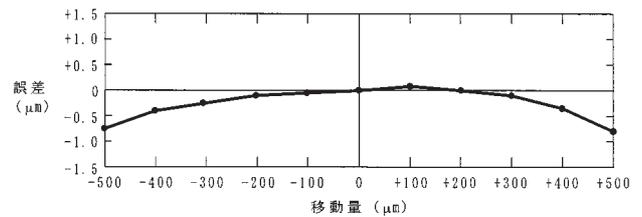
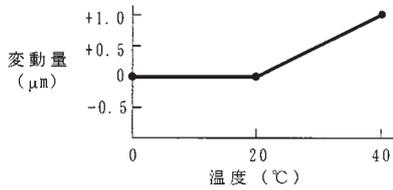


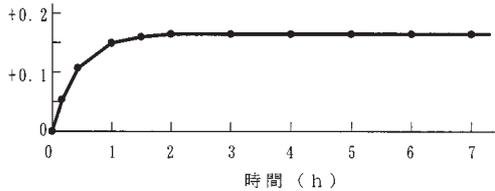
図11 和差動特性誤差
Differential measurement error

5.5 安定度

温度変化あるいは時間経過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 20 ± 1 の環境下で4時間連続測定した場合の測定値変動として判定している。図12に安定度を示す。図12(a)は、K107C検出器とK402Bスタンドを20の恒温室に設置し、KG3001A指示器のみ使用環境温度範囲である0から40の温度変化を与えたときの指示値の変化を示している。図12(b)は、K107C検出器とK402Bスタンド、KG3001A指示器を20の恒温室に設置し、電源オンから



(a) 温度変化による測定値 (800 μm) の変動



(b) 時間経過による測定値 (800 μm) の変動

図12 安定度
Stability

の時間経過に対する測定値の変化を示している。指示範囲 $\pm 1000.0 \mu\text{m}$ 、温度変化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、4時間での最大変化は、 $+0.16 \mu\text{m}$ となっており、プリセットを使用しないときの最小規格 $\pm 1.1 \mu\text{m}$ 以内である。

6 応用製品

図13は、電子マイクロメータを搭載したKG601Bフィルムシクネススタの外観である。これは、フィルムやテープ等の厚さを連続測定する装置である。フィルムシートの幅方向に切り取った測定用フィルムを連続測定し、オンラインで製造中のフィルムの幅方向の厚みが一定となるように製造機械にフィードバック調整する。連続測定結果は、従来のアナログレコーダによる厚み分布の記録に加え、新たにオプションのプリンタを接続して統計結果印字記録が行える。厚み分布、測定波形の部分拡大、ファイルセーブ、平均化、指定区

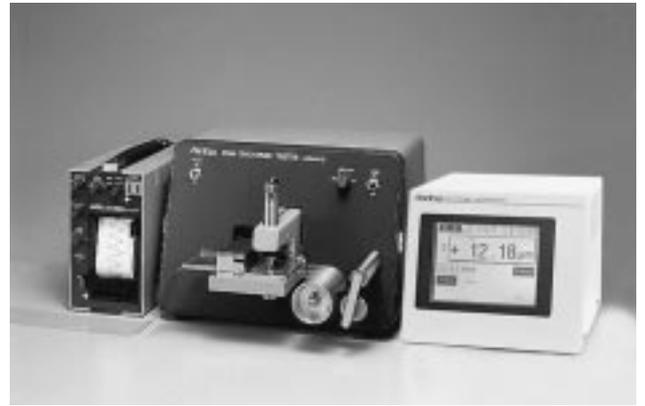


図13 KG601Bフィルムシクネススタの外観
External view of KG601B Film thickness tester

間毎の演算、測定データ表などの処理を行うパソコン用のデータ収録ソフトも用意している。

7 むすび

開発のねらいである指示器の多機能化、入出力インタフェースの強化、使いやすさは、測定機能の充実、測定値演算の充実、さまざまな入出力、ワンタッチ操作の校正、タッチパネル付液晶ディスプレイを採用した表示部などにより達成できた。

多様化する市場要求に対応すべく機能・入出力インタフェース・使いやすさが向上されたKG3001A指示器を、より多くのユーザに大いに利用していただき、電子マイクロメータの用途を拡大してゆきたい。

参考文献

- 1) 日本工業標準調査会：電気マイクロメータ JIS B 7536-1982
- 2) 釜田：最近の電気マイクロメータ，機械の研究第36巻第4号（1984）