

知 識 編

1. はじめに

21世紀に向かって技術革新が一段と進められている。特にリソグラフィ技術、超精密金属加工技術の著しい発展は、精密機器、電子計測機器、光計測機器の進歩を促し、今日に至っている。これらの分野の様々な計測技術は、サブミクロンからナノメートルの領域へ突入している。

測定対象物の大小を問わず、表面粗さや微細形状の寸法計測は必然的に小さな値の方へ移り、これに対処するために超精密計測技術が進展している。そして、いままで測れなかったような微小領域を計測することこそ超精密計測技術であると解釈される傾向に至っている。しかしながら、これは一側面である。

真に超精密計測を発展させるためには様々な障害を克服しなければならない。すなわち超精密計測というハードルを確実にクリアするには、その言葉の意味が単に値が小さいということであったり、一時的なトップデータをもって代表するときを使うものであってはならない。時間の経過と客観的な人々の審判を受け、それに耐え得る「高品位な計測」(high quality metrology) を実行してこそ、あるいは信頼性の高い計測値を得るための様々な技術を達成してこそ、超精密計測といえよう。

2. 超精密測定における一般的注意事項

超精密測定における、誤差の発生をさけるための注意事項は、一般の精密測定におけるものと同じであるが、より厳密さが必要である。機械的な計測として特に注意する必要がある事項は、温度、弾性変形及び品物と基準尺の幾何学的位置関係の三つにまとめられる。

(1) 長さ測定における注意点

① 温度の影響

機械の設計図面に記入されている寸法は、一般に工業上の標準温度20℃における値が書かれる。しかし、加工した品物を実際に測定するときには、必ずしも20℃の温度下で測定するとは限らない。一般に熱膨張係数 α の品物の長さ l は、温度が Δt 変化すると、 $\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta t$ だけ変化する。いま、測定の際の基準尺及び品物の温度をそれぞれ t_s 、 t_w とし、また熱膨張係数をそれぞれ α_s 、 α_w とする。このとき品物の寸法が l であったとした場合、20℃における品物の寸法 l_{20} は次式で表される。

$$\begin{aligned} l_{20} &= \{1 + \alpha_s(t_s - 20)\} \{1 - \alpha_w(t_w - 20)\} l \\ &\doteq \{1 + \alpha_s(t_s - 20) - \alpha_w(t_w - 20)\} l \end{aligned}$$

上式で、 $t_s = t_w = t$ 、つまり基準尺と品物の温度が等しいならば、

$$\doteq l_{20} \{1 + (\alpha_s - \alpha_w)(t - 20)\} l$$

となり、更に $\alpha_s = \alpha_w = \alpha$ であれば $l_{20} = l$ となる。このことは極めて重要な意味を含んでいる。すなわち、温度 t が工業標準温度20℃から違っていても、基準尺と品物の熱膨張係数が等しければ測定した値 l そのものが20℃における品物の寸法 l_{20} を表している、ということである。

基準尺の α_s が $\alpha_s = 0$ であれば良いと一般に考えられがちであるが、実際の測定では $\alpha_s = \alpha_w$ の方が実用的である。つまり品物が鋼であれば、鋼製の基準尺を使用すると機械的な耐久性の点ばかりで

表1 主な材料の熱膨張計数 α 単位 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

材 料	α	材 料	α	材 料	α
エボナイト	50~80	洋銀	18.0	クラム銅	10.0
ベークライト	21~33	砲金	17.5	白金	9.0
鉛	29.2	りん青銅	17.0	花こう岩	8.3
垂鉛	26.7	ステンレス鋼	16.4	ガラス	8.1
マグネシウム	26.1	コンスタンタン	15.0	クロム	7.0
アルミニウム	23.8	金	14.2	ウィディア	5.3
すず	23.0	ニッケル	13.0	パイレックスガラス	3.3
ジュラルミン	22.6	鉄	12.2	陶器	3.0
銀	19.5	鋼 (Ni:58%)	11.5	アンバー (Ni:36%)	0.9
銅	18.5	炭素鋼	11.0	石英ガラス	0.5
黄銅	18.5	尺度用ガラス	10.2	超アンバー (Ni:31~33%)	0.1

なく、工業標準温度からずれているための測定の誤差を考慮する必要がなくなる。鋼製の基準尺でアルミニウムなどの材料の品物を測定する場合には、十分な注意を払う必要がある。表1は主な材料の熱膨張係数である。ただし、材料の組成によって若干の差違がある。

② 測定力による弾性変形量

一般に寸法の測定をする際には一定の測定力を加え、いろいろな形状をした測定子の機械的な接触で行う場合が多い。この測定力のため、力の加わる方向に測定される品物や測定器は部分的あるいは全体的に弾性変形を起こす。測定力はたかだか5 N (0.51kgf)程度であるが、精密測定においては影響の大きい力である。

測定力によって品物の表面は圧縮される。その縮む量はフック (Hooke) の法則によって、次式の δL で与えられる。

$$\delta L = \frac{L}{E} \cdot \frac{P}{A}$$

ここに、L：品物の端面間の長さ (mm) P：測定力 (N)

E：縦弾性係数 (ヤング係数、N/mm²)

A：接触断面積 (mm²)

例えば、L=100mm、A=20mm² (直径約5mm) の鋼の場合、E=2×10⁶N/mm²でP=5Nとすれば品物は $\delta L=0.13\mu\text{m}$ だけ縮む。

表面が平らな品物を球面状の測定子で測定したり、円筒の直径を平面状の測定子で測定すると、測定力によって接触面が局部的に弾性変形を起こし、ある面積で接するようになる。したがって、点や線で接触すると考えるよりもある量だけ接近する。この弾性変形による接近量はヘルツ (H. Hertz) によって導かれた式から求められるので、ヘルツの接近量と一般に呼ばれている。

品物と測定子の形状、材料の縦弾性係数によっていろいろな組合せのヘルツの接近量が式で与えられる。表2は測定でよく問題になる場合について、材料を鋼として実験により補正を加えて求めた式である。

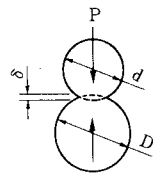
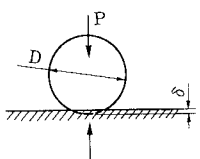
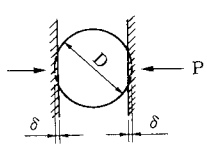
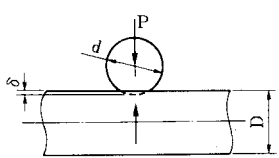
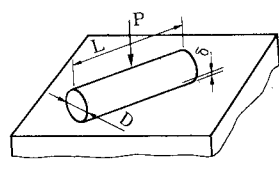
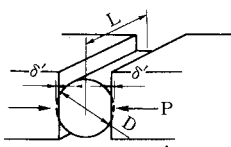
また、ダイヤルゲージや電気マイクロメータをスタンドに取り付けて品物を測定するような場合

表2 弾性変形による接近量（ヘルツの法則による接近量）

材料はすべて鋼の場合で、用いる記号の単位は次の通りとする。

δ ：弾性変形による接近量（ μm ） d, D ：球又は円筒の直径（ mm ）

P ：測定力（ N ） L ：円筒の母線の接触長さ（ mm ）

分類	接触対象	接 触 状 態	接 近 量 δ (μm)
(a)	球と球		$\delta = 0.413 \sqrt[3]{P^2 \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)}$
(b)	球と平面		$\delta = 0.413 \sqrt[3]{\frac{P^2}{D}}$
(c)	球と二平面		$\delta = 2\delta' = 0.823 \sqrt[3]{\frac{P^2}{D}}$
(d)	直交する円筒と円筒		$\delta = 0.46 \frac{\sqrt[3]{P^2}}{\sqrt{d \cdot D \cdot (d + D)^2}}$
(e)	円筒と平面		$\delta = 0.55 \frac{P}{L} \sqrt[3]{\frac{1}{D}}$
(f)	円筒と二平面		$\delta = 2\delta' = 0.094 \frac{P}{L} \sqrt[3]{\frac{1}{D}}$

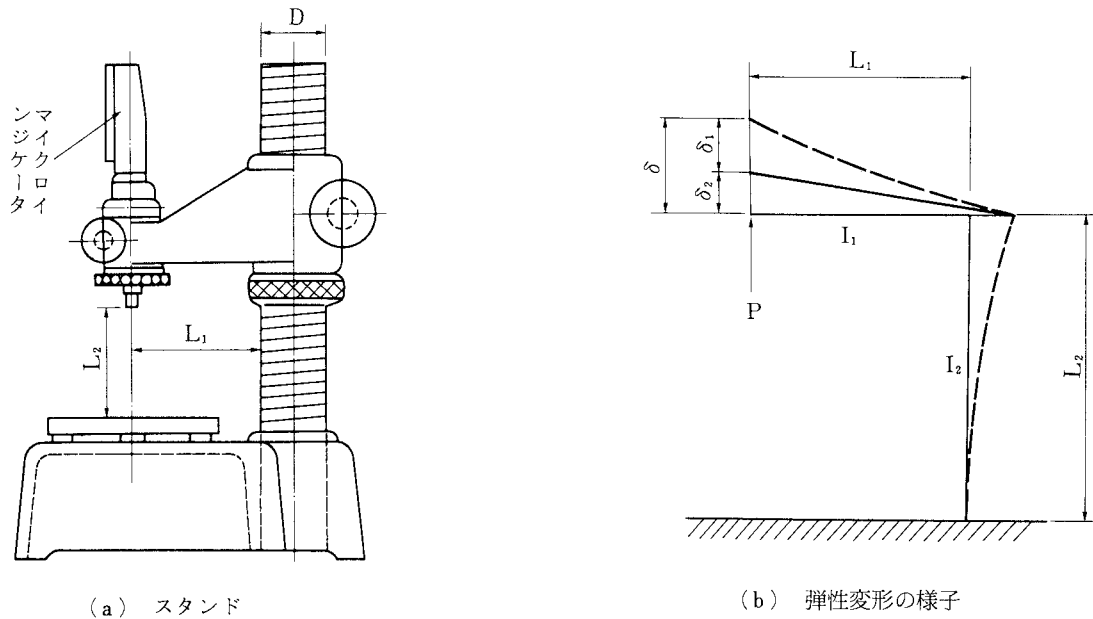


図1 測定力によるスタンドの弾性変形

に、測定力によりスタンドの支柱や腕の部分がたわむので注意する必要がある。図1は断面二次モーメントが長さ L_1 の腕の部分で I_1 、長さ L_2 の支柱部分で I_2 、また縦弾性係数がそれぞれ E_1 、 E_2 であるスタンドについて、測定力 P によってたわむ様子を示している。たわみ量 δ は、次式で与えられる。

$$\delta = (\text{腕の部分の片持りのたわみ量}\delta_1) + (\text{支柱の傾きによる量}\delta_2)$$

$$= \frac{PL_1^3}{3E_1I_1} + \frac{PL_1^2L_2}{E_2I_2}$$

数値例として、 $L_1=L_2=200\text{mm}$ 、支柱と腕が直径 10mm の鋼棒 [$E=2\times 10^3\text{ (N/mm}^2\text{)}$] とするとき、測定力 $P=1\text{ N}$ としても $\delta=0.109\text{mm}$ となり、大きな弾性変形量になる。支柱や腕の直径を2倍にすれば、たわみ量は $1/16$ と小さくすることができる。

③ 基準尺の自重による弾性変形の影響

定盤の上などに棒状の長い基準尺などを直接置くと、自重や荷重によるたわみがなくて具合がよさそうであるが、接触する面の平面度に誤差があるため、どの位置で基準尺などが支持されているか全くわからない。そこで、長い基準尺などは長さ方向に直角の二つの支点で対称な位置に支持すれば、支持点が明らかであるから、測定結果をあとで補正することもできる。

実用的な長さ標準は大別して二つの種類に分けられる。線と線の間隔で長さを表すものを線度器という。線度器の場合、中立面に目盛線が刻まれた精度の高いものを特に標準尺といい、自重で弾性変形が生じても両端にある標線間の距離の変化が最小となるような図2(a)の位置で支える。この位置をベッセル点 (Bessel point) という。また、ブロックゲージや棒ゲージのような両端面の間隔

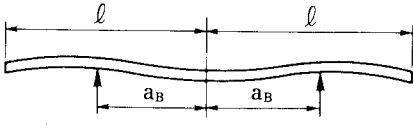
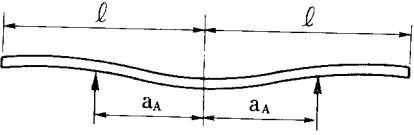
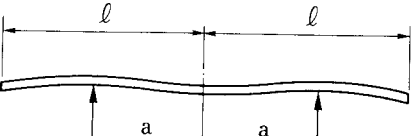
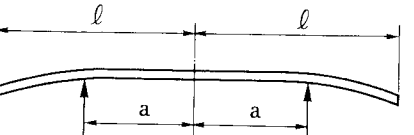
適用	支 点 の 位 置	
(a) 線度器		たわみによる全長の短縮量が最小なる支 点位置 $\frac{a_B}{l} = 0.5594$
(b) 端度器		両端面が鉛直に平行となる支点位置 $\frac{a_A}{l} = 0.5773$
(c) 直定規		全長にわたってのたわみが最小となる支 点位置（両端と中央のたわみが等しい） $\frac{a}{l} = 0.5536$
		中央でのたわみがない支点位置 $\frac{a}{l} = 0.5228$

図2 線度器、端度器及び直定規を2点で支える場合の位置

が寸法の基準に使われるものを端度器という。端度器では両端面が常に鉛直で互いに平行になる図2(b)の位置で支える。この位置をエアリー点 (Airy point) という。

実際に線度器を使う場合、目盛線を測微顕微鏡などで読み取る。顕微鏡の対物レンズの焦点深度は普通 $10\mu\text{m}$ 以下と短いため、支点を離れるに従って、たわみにより焦点が合わなくなり目盛線の像がぼけて読み取りにくくなる。この影響を軽減するため、正しくベッセル点の位置ではなく、多少左右に調整しなければならない場合もある。また、直線の基準として用いる直定規を2点で支える場合、図2(c)のように直定規の全長を使用するか、あるいは支点間だけを使用するかで二通りの支え方がある。

④ 品物と基準尺の位置関係の影響

測長器は品物とのわずかな寸法差を基準尺の目盛と比較して読み取るようにした測定器である。その代表的な構造が図3の(a)と(b)である。品物と基準尺との位置関係が互いに平行になっている(a)の構造のものは、大きなノギスと同じ構造であることからノギス形と呼ばれ、品物と基準尺とが互いに一直線をなしているものはマイクロメータ形と呼ばれる。(a)の構造では測長の際に品物の長さだけ測微顕微鏡が移動する。このときベッドの案内面が正しく真直に作られていないため、滑り台の移動により測微顕微鏡は図4(a)のように $\Delta\theta$ 傾く。したがって、正しい品物の長さ l ではなく、 l' を読み取ることになり、

$$\delta l = h \cdot \Delta\theta$$

の測定の誤差*が生じる。一方、図4(b)のマイクロメータ形の構造では基準尺が品物の長さだけ移動す

* この誤差をアップの誤差と呼ぶこともある。

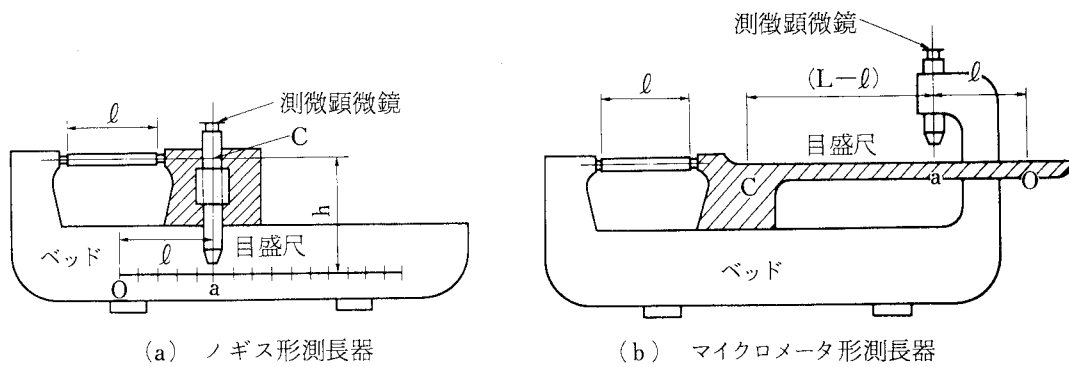


図3 測長器の基本的構造

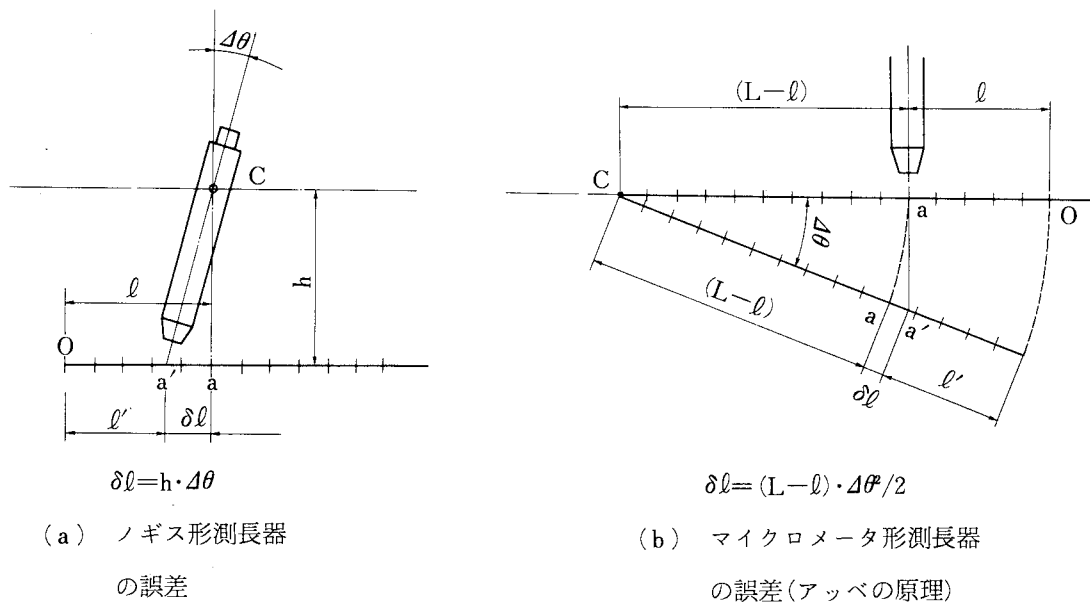


図4 品物と基準尺（図中の目盛尺）の位置関係で生じる誤差

る。 l だけ移動したことにより基準尺が $\Delta\theta$ 傾いたとすると、測微顕微鏡は a 点でなく a' 点を読み取るので、この場合の測定の誤差は、

$$\delta l = (L-l)(1/\cos\Delta\theta - 1) = (L-l) \cdot \Delta\theta^2/2$$

となる。このように同じ $\Delta\theta$ の傾きがあっても、マイクロメータ形の構造の測長器の方が測定の誤差は傾き $\Delta\theta$ に関して二次の微小量となり、極めて小さい。

このことを文章で表現すると、測定の誤差を小さくするには、“測定すべき長さを物差しとして用いられる目盛の延長上におく”、又は一般的な表現として“品物と基準尺とは測定方向において一直線上に配置しなければならない”となる。これをアッペ*の原理といい、精密測定において留意しなければならない重要な事項である。

アッペの原理を用いて測長器を作ると、品物と基準尺を一直線上に配列しなければならないので、測長器は品物の2倍以上の空間における長さを必要とする。そのため光学系を工夫し、図5のように品物と基準尺を1直線上に配列しなくてもベッドの真直度の誤差による影響を無視できるように

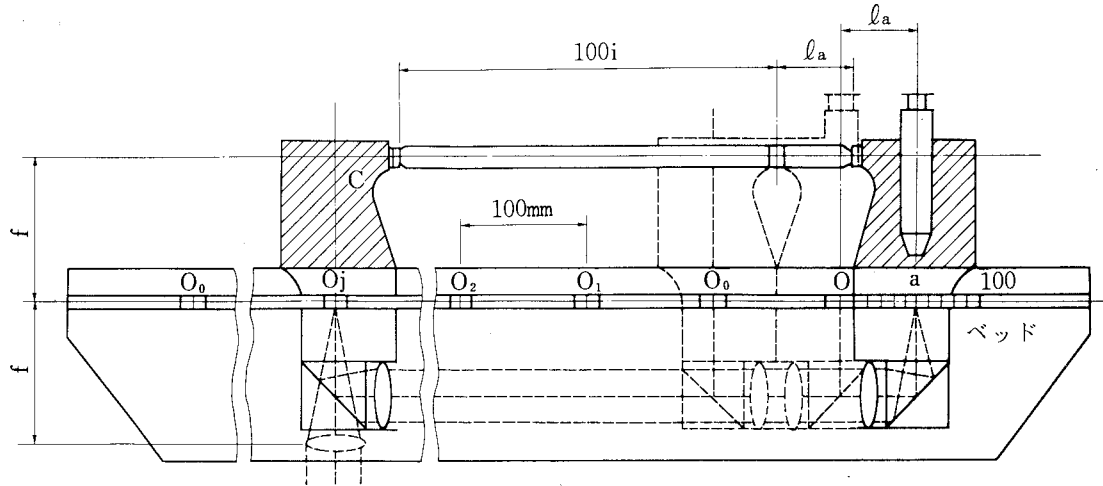


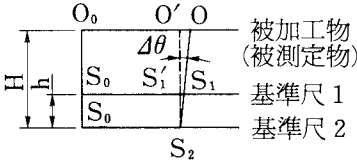
図5 ツァイス (Zeiss) 測長器の構造
(エッペンシュタインの原理)

表3 品物 (被測定物) と基準尺の位置関係で生じる誤差を消去又は補正する方法とその応用例
(アッペの原理を使わない方法)

タイプ	a	b
被測定物と基準尺の位置関係	<p>誤差は相殺 $S_1S_1' + S_2S_2' = 0$</p>	<p>被測定物と基準尺 (同一場所又はそれに等価な配置)</p>
応用例	<p>レーザ干渉式の標準尺自動測定器 (NPL、イギリス) Strong型ルーリングエンジン (東北大、科研) 高精度の親ねじ2本による。</p>	<p>被測定物と基準尺の置換による方法 テーブルの送りを基準尺でチェックした後、被測定物を同一場所で測定する。 レーザ干渉ねじリード測定器 (東工大、精研) キューブコーナの性質を利用する。</p>

* E. Abbe. Zeissの創立者、1890年

** Eppenstein

タイプ	c	d
被測定物と基準尺の位置関係	 <p style="text-align: center;"> $\overline{S_1 S_1'} = \Delta S \frac{H}{h} \cdot \Delta S$ (補正值) </p>	被測定物と基準尺の位置関係には特に制限がない。
応用例	<p>レーザ干渉計による自動補正式ねじ研削盤 (Reishauer社、スイス) 補正値を被加工物の位置にフィードバックしながら加工を行う</p> <p>レーザ干渉計による真直度測定 (Hewlett Packard社) ΔSを測定し、$\Delta \theta$を求め、真直度を測定する。</p>	レーザ干渉測長器LLM (オリンパス光学) テーブルの傾き $\Delta \theta$ を時々刻々オートコリメータで検出し、アッペの誤差 $h \cdot \Delta \theta$ を読み取り値に加え、修正する。

した測長器がある。この測長器に使われている光学系の方法はエッペンシュタイン**の原理と呼ばれ、傾き $\Delta \theta$ に関し三次の微小量となり、更に一段と測定の誤差が小さくなる、というものである。そのほかにもアッペの原理を用いなくて品物と基準尺の位置関係が表3のように種々工夫され、測定の誤差を除去又は軽減する方法が考えられている。

⑤ 視差の影響

目盛の読み取りにおいて注意しなければならないことは視差 (parallax) である。目盛の刻まれた面が同一面上にないとき、図6のように見る方向によって目盛線の位置がわずかず違って見え、読み取り誤差となる。ノギスの本尺目盛とバーニア目盛の読み取り、マイクロメータのスリーブ目盛とシンプル目盛の読み取り、ダイヤルゲージ、指針測微器や電気マイクロメータなどの指針による目盛の読み取りなどにおいて起こる。

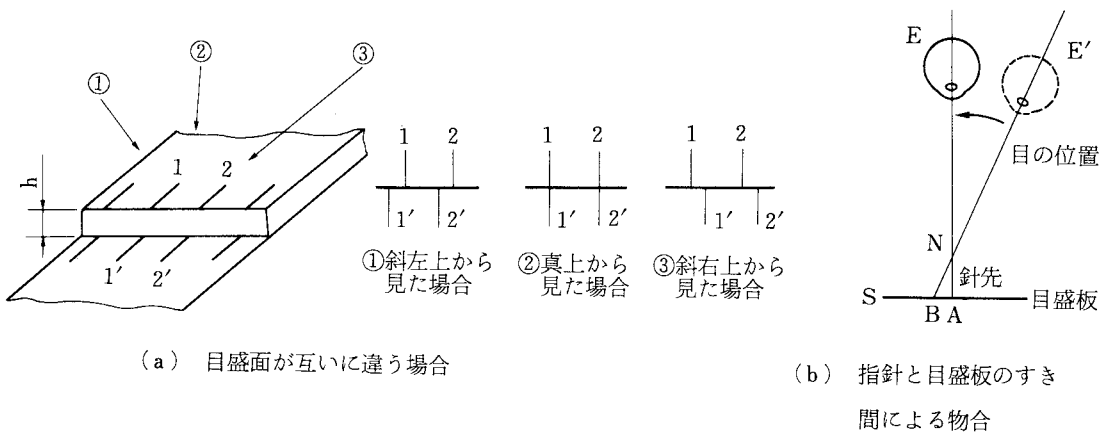


図6 視差の影響

視差を防ぐには常に一定の方向——普通は目盛板に垂直な方向——から目盛を読み取るようにしなければならない。また、目盛板と同一面内に鏡をはりつけ、指針とその鏡像が常に合致する方向から読み取るように工夫したメーターもある。

⑥ 品物と測定子の接触状態の影響

測定される面と測定子先端が平面であるか、わん曲した面であるかにより、互いの組合せの接触状態が変わり、測定の誤差が生じる。

図7(a)は測定子先端の平面度が悪く、わん曲している場合にブロックゲージを基準として球の直径を測ろうとすると生じる誤差を示す。同図(b)、(c)は測定子端面の平行度、測定方向の軸に対する直角度不良により生じる誤差の状態である。(b)では誤差が $\Delta D = D - \ell \approx -d \cdot \theta / 2$ となり、実際の寸法Dに比べて $d \cdot \theta / 2$ だけ短く測ることになる。(c)は端面が互いに θ 傾いて平行な場合で、誤差は $\Delta D = \ell - D \approx D \cdot \theta^2 / 2$ となり、それだけ長く直径を測っていることになる。

次に、測ろうとする寸法線の位置と測定子の測定方向の軸線がずれていたり、傾いている場合の例として図8の状態が考えられる。図8(a)は測定子先端の半径rの球面を用いて半径Rの円筒を測

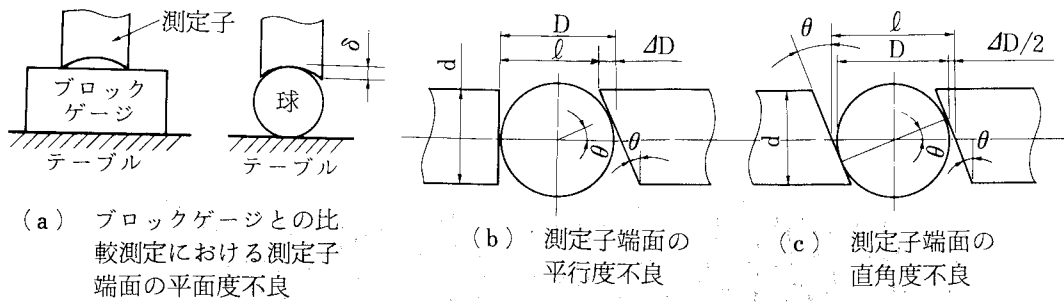


図7 測定子端面の形状不良による誤差

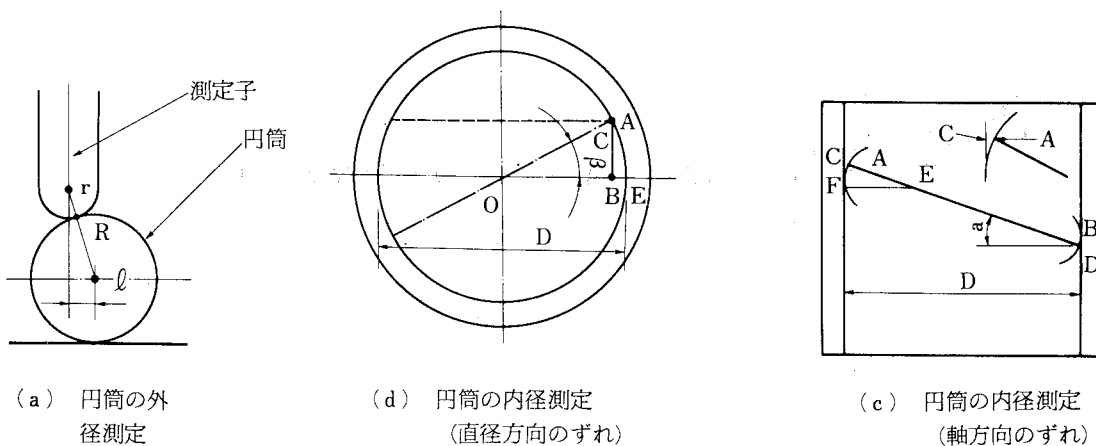


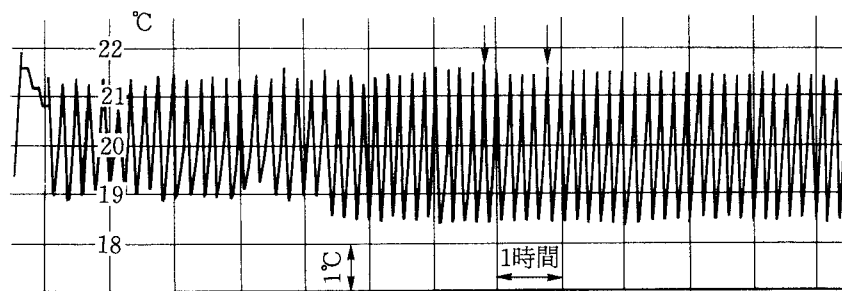
図8 測定子の接触点と測定線がずれている場合の誤差

る場合で、 $l^2 / \{2(r+R)\}$ の誤差が生じる。同図(b)は円筒の内径を測る場合で、内径の一番大きな所に測定子が接触しておらずCだけずれた位置A点で接触しているとすると、 $2C^2/D$ だけ短く測ることになる。また、同図(c)のように円筒軸を含む平面内に接触点があっても、 α だけ傾いている場合、 $D \cdot \alpha^2 / 2$ だけ長く測ることになる。この場合、接触点の位置が測定方向 (\overline{CD}) からわずかにずれるが、測定子先端の球の半径が小さいときは影響が少ない。

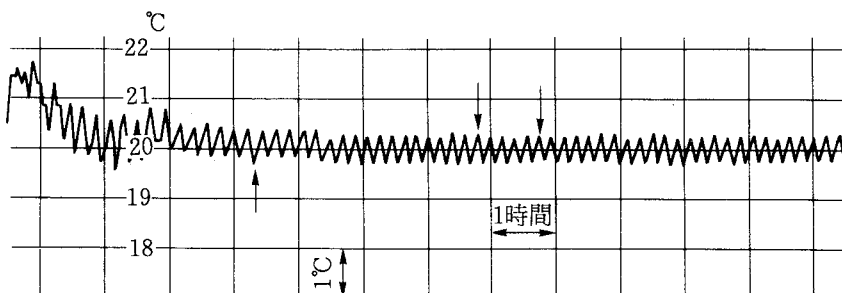
(2) 測定中の外乱の影響

①. 測定における振動の影響

測定中に外部から測定器に入り込む振動の影響は極力避けねばならない。機械的振動で最も多い振動の周波数帯域は60Hz程度以下である。防振を目的に開発されている各種の防振台がある。防振にはゴム、コイルばね、空気ばねなどが用いられる。そのうち、圧縮空気装置で装置全体を浮かせる防振方法が最も効果が高いようである。しかし、5 Hz程度以下の低周波の防振はいずれの場合も困難なようである。振動の影響は測定器の構造によって違ってくるので、防振を目的とした特別な工夫が必要である。一般に感度の高い測定装置であればあるほど、振動の影響に特に注意を払う必要が



(a) 恒温室の温度変化



(b) 恒温室に設置したビニールシートカバー内の温度変化

図9 ビニールシートカバーによる室温変化の振幅を抑える効果

ある。

②. 測定室の室温変化の影響

測定室の温度は、時間経過によらず、一定であることが望ましい。しかし、工場現場では必ずしも工業標準温度 20°C に保たれた測定室で測られるとは限らない。むしろ品物の温度を測り、材料の熱膨張係数を知って補正値を求め、 20°C での寸法に直す。

恒温室は 20°C に対し、約10～15分の周期で $\pm 0.5\sim\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲の周期的な変化をしながら恒温状態に保たれる。測定の種類によっては、室温の周期的変化があってはならない場合がある。その場合、恒温室内にあっても、装置全体を断熱材で囲えば、内部はほとんど周期的変化のない雰囲気を作ることができる。図9は断熱材の代わりに厚さ1mm程度のビニールシートで測定器のまわり全体を囲むだけで室温の周期的変化 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ の振幅を $1/5\sim 1/7$ 程度に減少させることができることを示した一例である。

室温が徐々に変化する測定室の場合、測定器自身の熱容量の関係で時間遅れがある。しかし、徐々に変化するので測定中の装置及び品物の温度を常に監視し、測定値の補正が必要な場合のデータとして使うようにしなければならない

3. 光による変位検出センサ

光による変位検出センサとしてモアレ縞、光波干渉の二つについて述べる。

(1) モアレ縞

① 性質

ガラス板上に1mmあたり数百本もの細線を規則正しく刻んだ格子を、わずかな角度をつけて2枚重ね合せると、図10のような明暗の縞ができる。これをモアレ縞 (Moiré fringe) と呼んでいる。モアレ縞にはつぎのような基本的な性質がある。i) 微小な格子間隔を拡大する性質、ii) 格子間の誤差を平均化し、高精度の位置検出を可能にする性質、図10において、格子の G_1 または G_2 の一方を左または右へ格子間隔 ω だけ移動すると、モアレ縞も上または下へ W だけ移動する。傾けた角 θ が小さいとき近似的に $W = \omega / \theta$ の関係がある。 $\omega = 4 \mu\text{m}$ 、 $\theta = 1'$ とすると、 $W = 13.3\text{mm}$ になり、 $4 \mu\text{m}$ の移動量が3,300倍にも拡大された移動量として検出できる。実際のモアレ縞は図10のようにきわめてコントラストのよい1本の縞模様になる。モアレ縞は数百本から千本にも及ぶ範囲の格子で一度に形成されるので、格子の1ピッチごとの間隔が部分的に不揃いであってもできたモアレ縞の位置は精度が高い。これはモアレ縞に格子間の誤差を平均化する働きがあることを示す。

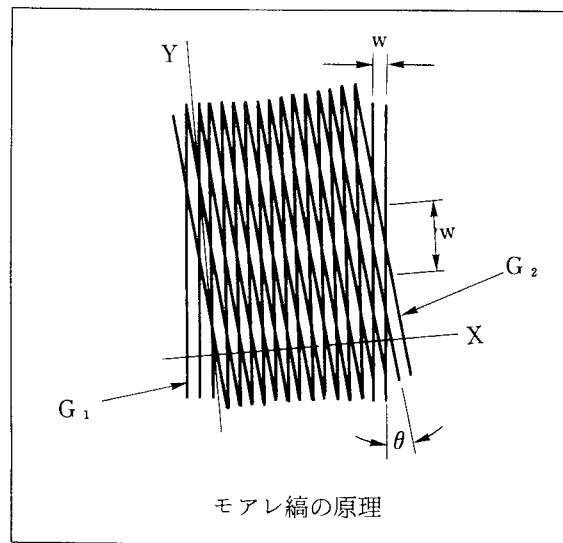


図10 モアレ縞の原理

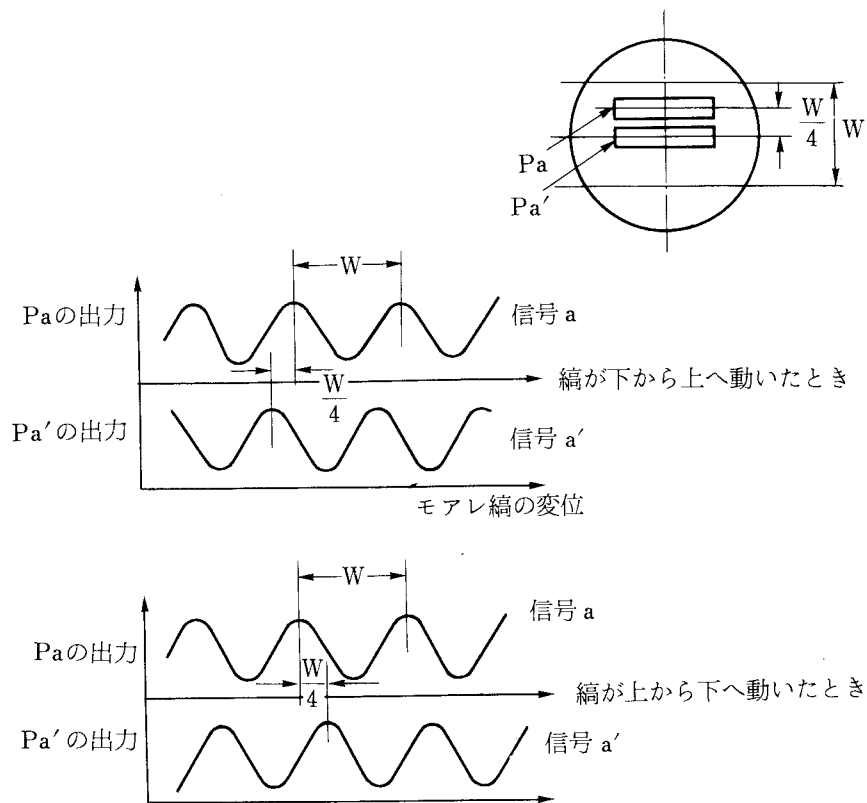


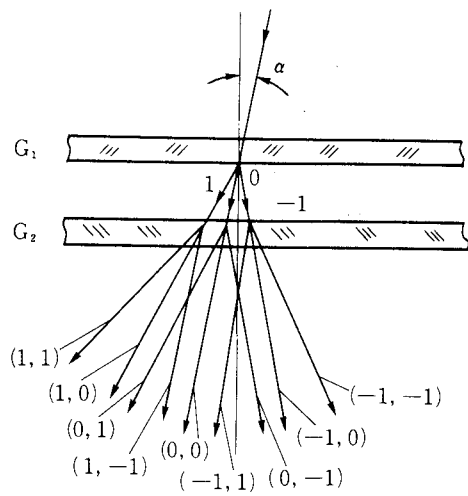
図11 モアレ縞の方向判別

② 長さ測定への応用

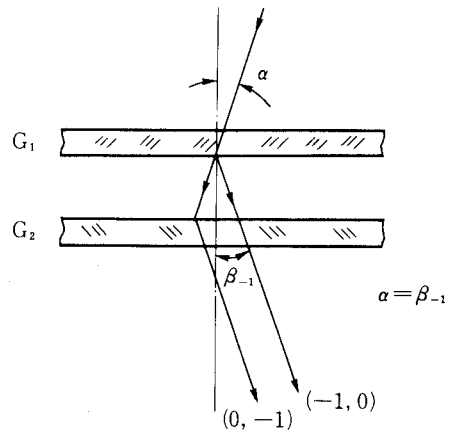
格子の移動方向とモアレ縞の移動方向は対応しているが、その方向を判別しなければならない。方向判別には図11のようにモアレ縞のピッチ W に対し、 $W/4$ の間隔で二つの矩形窓を置き、それぞれ光电変換素子 Pa 、 Pa' で信号を検出する方法が一般的である。 Pa と Pa' の出力信号は互いに $1/4$ 周期だけ位相がずれており、一方に対して他方の位相が進んでいるか、遅れているかによって方向が判別できる。

長さの測定では、図10で示した G_1 を長く作り測長用スケールとし、 G_2 は短く固定して使用する。 G_1 や G_2 に入射する光は回折を起すことから、一般に、回折格子 (diffraction grating) と呼んでいる。モアレ縞の読取りにおいても G_1 と G_2 でそれぞれ回折が起る。図12(a)のように G_1 で分かれた -1 次、 0 次、 1 次の光は、さらに G_2 で分かれるため、合計9本もの回折光が出てくる。しかしモアレ縞のコントラストがよく、明るく、また回折角の小さいものを得るには、総合次数が等しく、低次数になる特定の方向だけを選び出す必要がある。総合次数が -1 次の組合せだけを選べば図12(b)のようになる。

図13は実際のモアレ縞検出の光学系で、(a)と(b)の場合がある。(a)では光源 Q の光をレンズ L_1 で平行光線とし、回折格子 G_1 を背面から照明する。 G_1 と G_2 で作られたモアレ縞はレンズ L_2 で -1 次の回折光を拾い出し、光电変換素子 P で検出する。絞り S は L_2 の焦点の位置にあって -1 次の回折光だけを確実に通す役目をする。この光学系では G_1 と G_2 が互いに接近しているので、接触し、格子面を



(a) 2枚の回折格子による
回折光



(b) コントラストのよいモ
アレ縞を得る条件

図12 回折光とモアレ縞

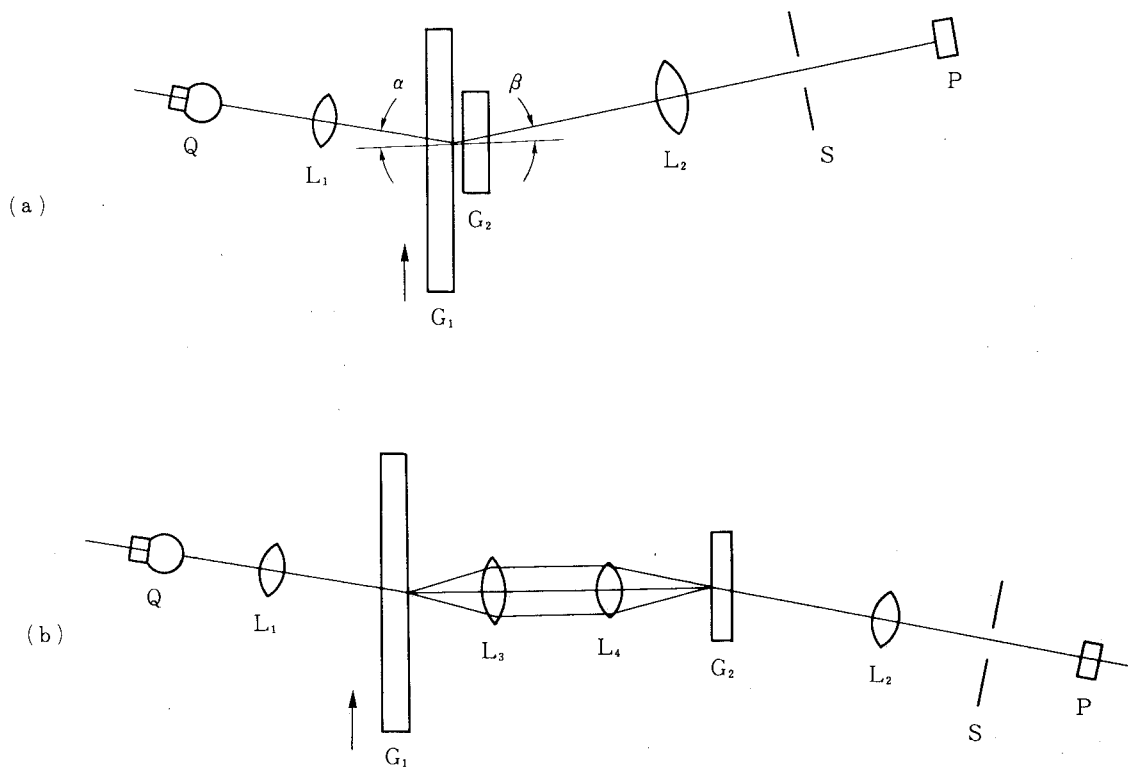


図13 モアレ縞検出の光学系

傷つける恐れがある。そこで(b)のように G_1 と G_2 の間に等倍率の投影レンズ系 L_3 と L_4 を入れ、 G_1 の像を G_2 の前に結像させモアレ縞を作るという光学系の工夫もある。実用のモアレ縞による測長用ユニットは、スケール格子200mm、格子間隔 $4\mu\text{m}$ で、 $1\mu\text{m}$ 移動するごとに1パルスをカウントする感度がある。格子1,000本分を一緒に読み取る範囲のモアレ縞の明暗が検出される。

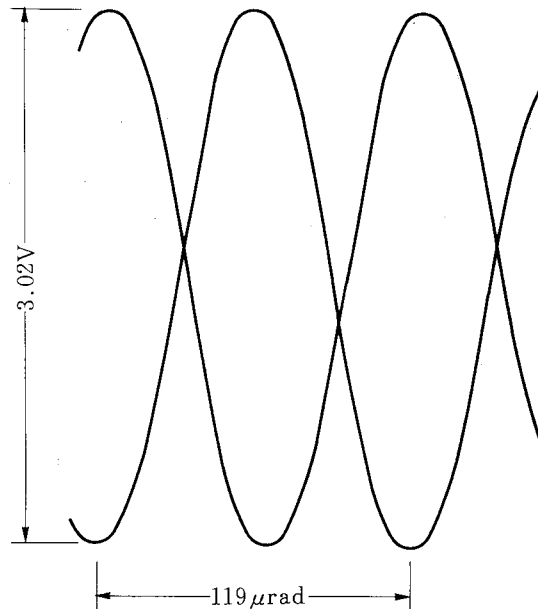


図13 微小な角度変化によるモアレ縞の明暗信号

(2) 光波干渉計

① 光の干渉に必要な条件

光の物理的性質の中でよく使われるのが光の干渉現象である。光を干渉させ干渉縞を作り出すためには、i) 同一光源から出た光をなんらかの方法で分割し、別々の径路を通して再び重ね合わせる事、および、ii) 用いる光の可干渉距離 (coherent length) を考慮し、分割した光の互いの光路差がこの可干渉距離内にあるようにすること、の二つが必要条件として集約できる。

普通の光の波長は可視域で $0.4\mu\text{m}$ (極端な紫) から $0.77\mu\text{m}$ (極端な赤) までいろいろある。一連の光が位相をそろえて進む時間は短く、距離にして20~50cm程度である。これを“可干渉距離”とっている。カドミウムランプ (Cd 114) や水銀ランプ (Hg 198) などは単色光に近く、この可干渉距離が50~70cmである。一方、He-Neレーザーなどは一般に単色光であり、可干渉距離が数m~数百kmにも及ぶという。したがって、干渉計を組むとき光路差を長くとることが調整しやすい。レーザーを干渉計の光源として盛んに利用する理由である。

② マイケルソン干渉計

図14はA. A. マイケルソン (アメリカ、1880年) によって考案された光波干渉計である。最も代表的な干渉計で一般にマイケルソン干渉計と呼ばれている。⁵⁾ 光はAで分割され、鏡CとDで反射したのち、再びAで重なりEに干渉縞を作る。厳密に両方の光路長を等しくする目的から位相補正板

Bが入れてある。補正板Bはレーザーなどの単色光では必要ないが、普通の光源を用いて正しい黒色の干渉縞の位置を対称な色合いで一縞だけ出すときには必要となる。

図15はマイケルソン干渉計により、テーブルの移動量や姿勢変化を測定するときの光学系で、この三つのタイプにまとめられる。(a)は一般的な長さ測定のためのマイケルソン干渉計である。(b)は固定台にあった鏡①もテーブルにのせたタイプである。このタイプではテーブルのわずかな傾きが①と②の光路差の変化となって現れ、 $2(x_1 - x_2)/\lambda$ の干渉縞が計数される。テーブルのピッチングやヨーイングが測定できる。(c)は鏡①と②を逆向きにテーブルにのせたタイプである。xの移動に対し、移動量が差動で検出され、 $4x/\lambda$ の干渉縞が計数され、(a)のタイプに比べ感度が2倍高くなる。

マイケルソン干渉計の光路では反射して戻った光の一部が光源へ逆もどりし、いわゆる“バックトーク (back talk)”の現象を引き起す。これは、レーザーを光源に用いる場合、干渉縞の計数の際に不安定な原因の一つとなるので避けねばならない。同じマイケルソン干渉計でも図16のように光が同じ径路を通らない複光路 (double beam) の干渉計を利用すれば避けられる。

実際に基板上で干渉計を組む場合、つぎの点に注意する必要がある。i) 台の防振対策。ii) 空気の温度を均一とし局部的な温度変化を避けること。iii) 2分割した光の光路差を測長範囲も考慮し可干渉距離内とする。iv) ビームスプリッタから移動鏡までの光路長は必要最短の長さとし、デッドパス (dead path) の少ない光学系とする。v) 鏡やプリズムの固定の際に応力がかからないこと。vi) 光学系全体を低く抑えること、などがあげられる。

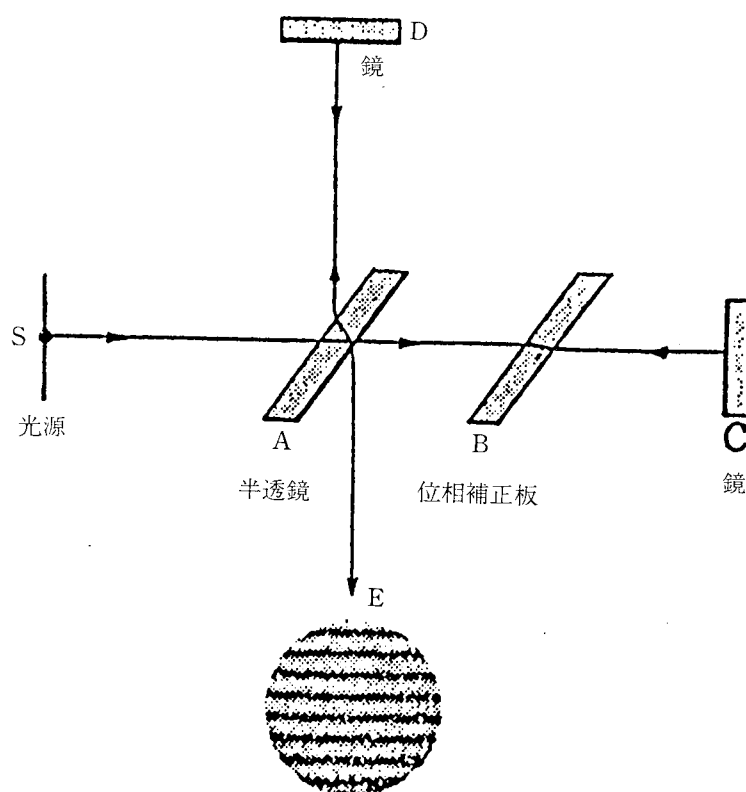


図14 マイケルソン干渉計

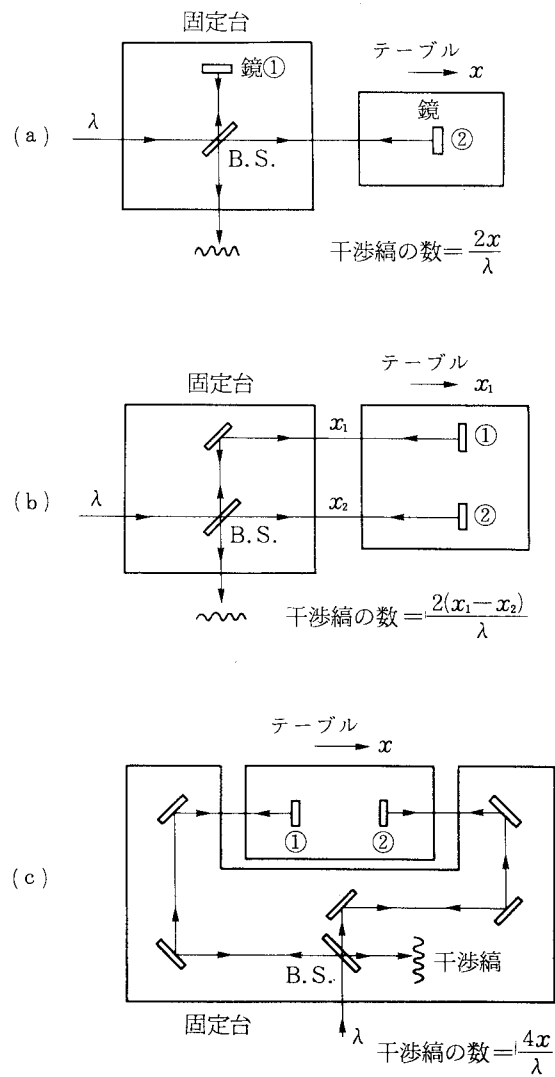


図15 マイケルソン干渉計とその変形光学系

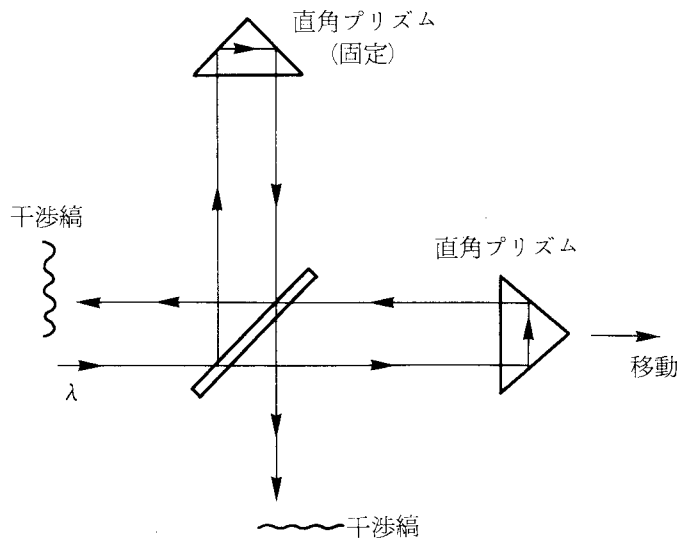


図16 複光路の干渉計

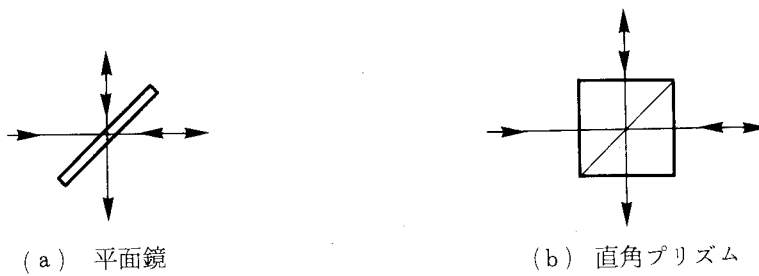


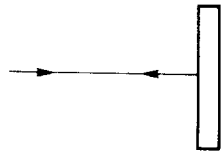
図17 ビームスプリッタ

a. ビームスプリッタと反射体

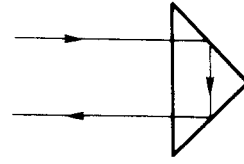
同一光源から出た光を分割しなければ干渉現象が見られないことから、ビームスプリッタの工夫は重要である。図17の(a)や(b)には偏光特性をもたせたものもあり、S成分とP成分に分ける。(d)は一般にケスターのプリズム (Kösters'-prism) と呼ばれている⁸⁾。また(f)は偏光を利用した干渉計において、ウォラストンプリズム (Wollaston-prism) で偏光成分を分離する方法である⁹⁾。反射体も必要に応じ図18のようなものが用いられている。(c)はキャッツアイ (Cat's eye) と呼ばれている。(d)は三面が互いに直角になったプリズムで、キューブコーナプリズム (Cube corner prism) と呼ばれ、内部で3回反射して戻る性質がある。

反射体として用いるキャッツアイやキューブコーナプリズムにはいくつかの興味深い特殊な性質がある。

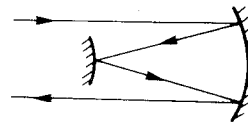
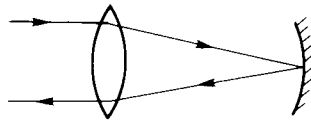
- i) 入射光が、いかなる方向から入射しても、反射光が入射光の方向へ必ず平行に戻るという



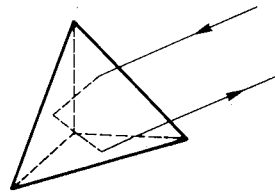
(a) 平面鏡



(b) 直角プリズム



(c) キャッツアイ (Cat's eye)



(d) キューブコーナプリズム
(Cube corner prism)

図18 反射体

性質。ii) キャッツアイの凸レンズの焦点またはキューブコーナプリズムのコーナポイントで点反射しているのと等価な光路を通るという性質⁺。特に同様の性質をもつ直角三面鏡では、図19に示すように P_0 から P_4 までの光路長が X 軸上の O_0O_1 の往復光路長に等しい。iii) 入射光の位置と反射光の位置が必ず点対称の関係にあるという性質。iv) キューブコーナプリズムにはコーナポイント O_0 を中心として、光の通過を妨げずにある大きさの直径で円筒状の空間が存在するという性質、などである。

b. キューブコーナプリズムの応用例

aで述べたi) およびii) の性質はきわめて重要であり、干渉計の反射体としてよく使われる理由である。すなわち、平面鏡や直角プリズムではテーブルの姿勢変化による測定誤差は避けられないが、キューブコーナプリズムではテーブルに多少の姿勢変化が生じてもその影響は入らない。コーナポイントの移動した長さとして厳密に測定できるからである。

⁺プリズムの場合、厳密には屈折率による修正が必要である。

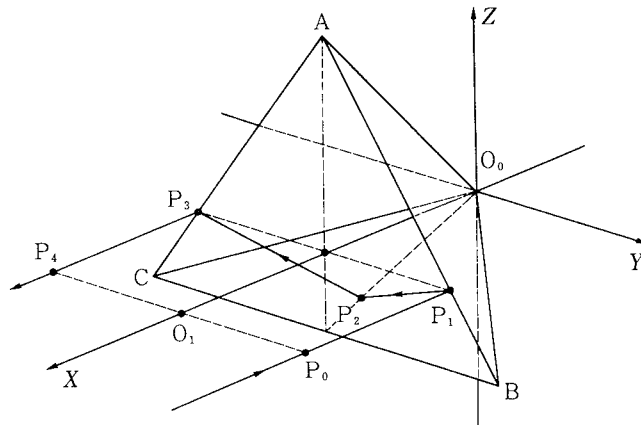


図19 直角三面鏡の幾何学的光路

またiii)の性質を利用すれば、干渉計の感度を光学的に高める目的の光路差増倍が大小一對のキューブコーナプリズムを用いて実現できる。図20のような方法も考えられるが、ビームの往復回数が増すにつれ非常に大きなプリズムが必要となり、実用上、不都合な場合がある。ビームの配列方法を工夫し、図21のようにすればプリズムの辺の長さ、または直径を少なくとも1/2にできる。もちろん、このような光路差増倍を行うには、(I)レーザーを光源に用いること、(II)プリズムの入射面に反射防止膜をコーティングすること、(III)プリズムの直角三面の三つの稜線は可能な限りシャープに仕上ること、などの配慮が必要である。

さらにii)およびiv)の性質を利用した図22のような構造のねじリード測定器が実用化され、ボールねじのリード測定などに使われている。キューブコーナプリズムの代りにこれと同様の性質の直角三面鏡を使っている。レーザービームはねじの軸線の高さにある。光の径路はレーザーがねじの軸心を通り、コーナポイントDで点反射しているのと等価になっている。アッペの原理を守らない光学系でありながら、テーブルの姿勢変化の影響を受けない。

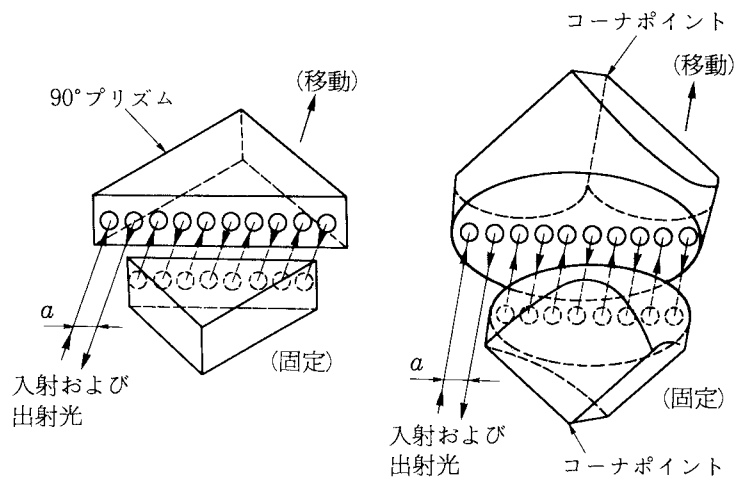


図20 プリズムによる光路差増倍

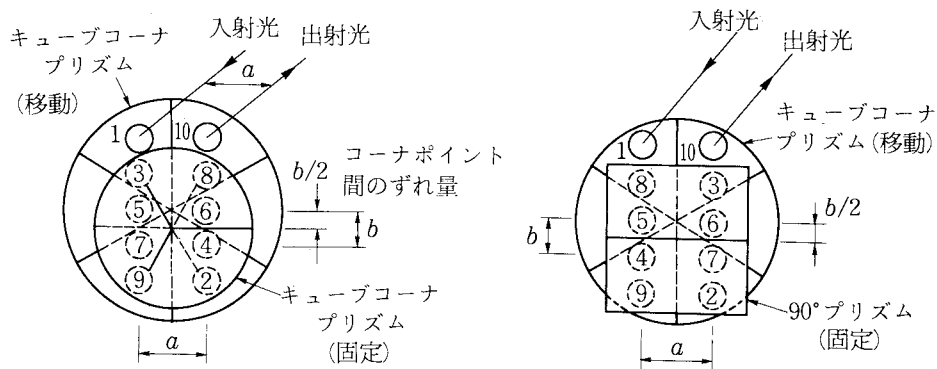


図21 光路差増倍の他の方式

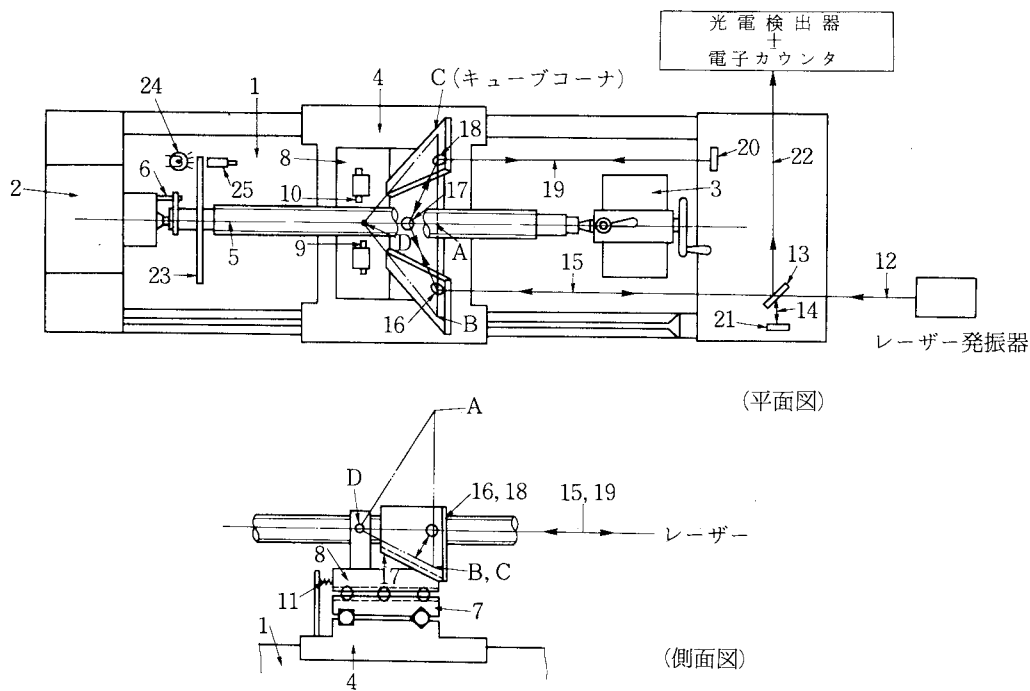


図22 直角三面鏡を利用したねじリード測定器

③ レーザー干渉計の誤差要因

a. 空気の屈折率

光の波長を単位として物の長さを測定することは、いいかえると、波長単位の目盛りをもった“物さし”をプリズムや鏡で自由自在に反射させ空間に設置するということである。ところが、この波長単位の目盛りは温度や気圧などの環境変化で変わる。測長範囲が長ければ、わずかな波長の変化も無視できなくなり、正しい長さが測れない。空気中の光の波長は真空中を λ_0 、空気の屈折率を n として、

$$\lambda = \lambda_0 / n \quad (3.1)$$

で与えられる。温度や気圧の変化は空気の屈折率と次式の関係にある。いま空気の20℃付近での任意の状態の屈折率 n は、工業標準状態⁺を基準とした場合、

$$(n-1) \times 10^6 \doteq 272.09 + 1.596 (\sigma^2 - 3) - 0.931 (\theta - 20) + 0.359 (p - 760) - 0.050 (f - 10) + 0.015 (k - 3) \quad (3.2)$$

で与えられる。ただし、 σ ：1 μm 中の波数、 θ ：気温(℃)、 p ：気圧(mmHg)、 f ：水蒸気圧(mmHg)、 k ：CO₂ガスの含有率(×0.01%単位)、1mmHg=133.3Paである。

たとえば、He-Neレーザーの真空中での波長は $\lambda_0 = 0.63299141\mu\text{m}$ (Lambdip) であるから、工業標準状態での屈折率は(3.2)式より、 $n = 1.00027129$ 、波長は(3.1)式より、 $\lambda = 0.63281973\mu\text{m}$ (精度 1×10^{-7})と求められる。工業標準状態にない場合の波長はそのつど上記の各式によって計算しなければならない。

b. 弾性変形

実際の測定では空気の屈折率変化の影響ばかりではない。たとえば、図23のように物の長さを測るときは必ずテーブル(移動台)をベッドの上で移動させなければならない。このときテーブルの自重によりベッドは弾性変形を起し、二つの固定台の間隔が変わる。そのような場合は図23のように移動距離 x に対し2次曲線で変化する。変化の最大値はベッドの中立面からレーザービームまでの高さにより任意に変わる。逆に図24のような結果からベッドの中立面の位置がわかる。

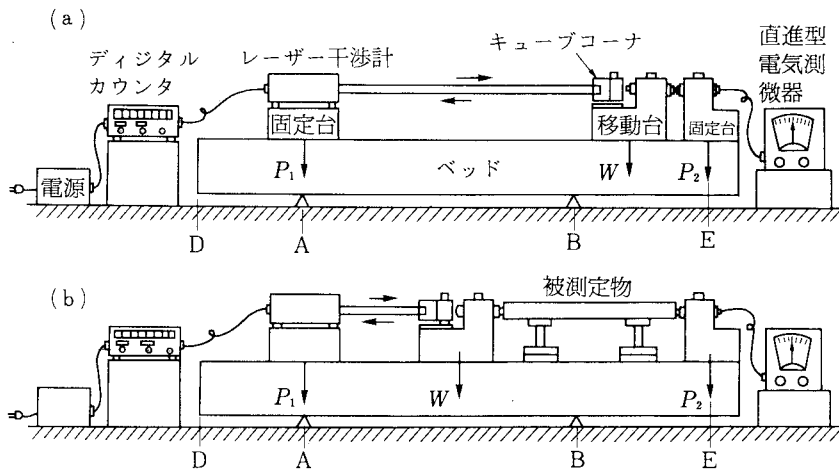


図23 レーザー干渉計で測長する場合の一例

⁺温度20℃、気圧760mmHg、水蒸気分圧10mmHg(相対湿度60%)、CO₂含有率0.03%の状態をいう。

C. 熱膨脹

温度、気圧、ベッドの熱膨脹などの影響を受ければ干渉計とキューブコーナプリズムとの間隔がやはり時間の経過とともに変わる。図25(a)はそれらの影響を調べるための実験装置、(b)はカウンタ表示値の変化、(c)はそのときの室温変化の結果である。室温が上昇すれば表示値は小さくなっている。つまり、レーザーの波長が長くなって2点間の距離がみかけ上、短くなる。

図26は室温の変化に周期性がない場合で、室温変化、気圧変化、ベッドの3カ所の温度変化の記録から計算で空気の屈折率変化による影響と、ベッドの熱膨脹による影響を分離した結果である。これによって、カウンタ表示値の変化のほとんどが空気の屈折率変化とベッドの熱膨脹によ

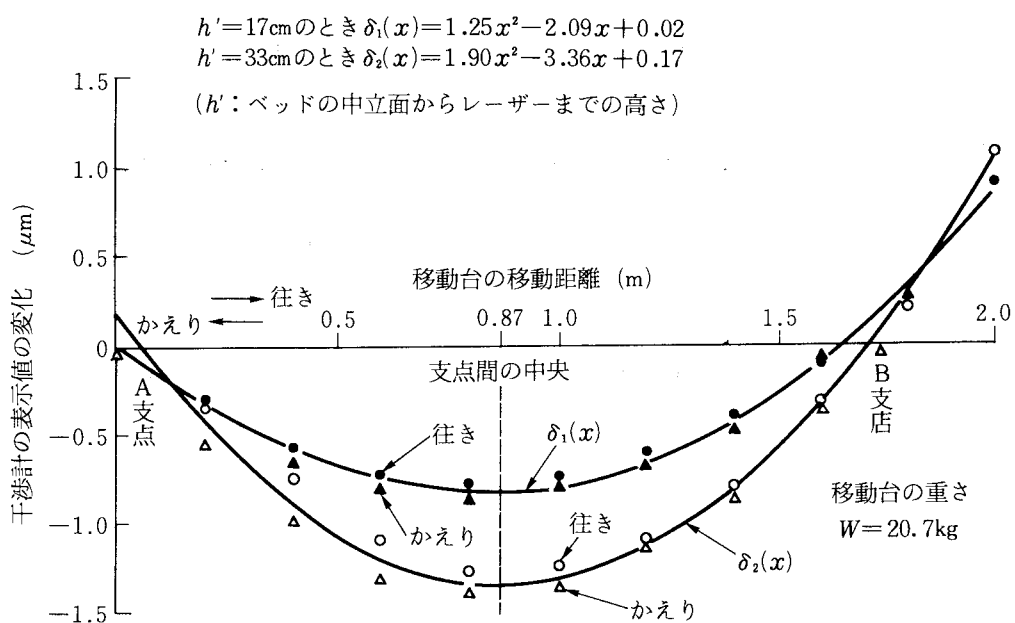
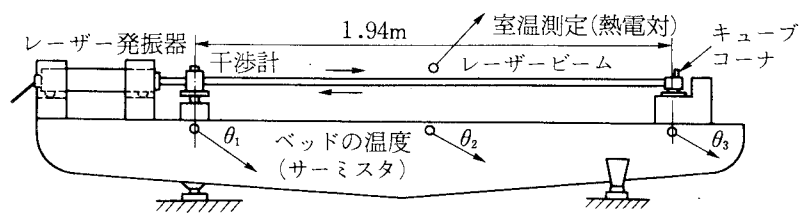
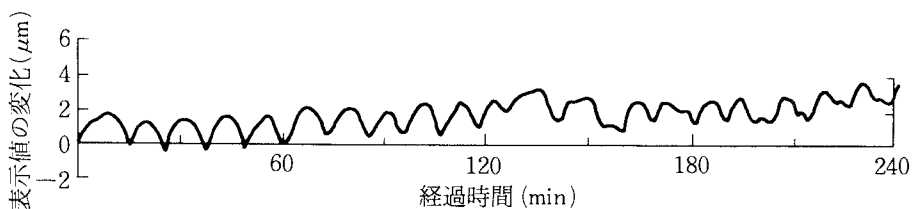


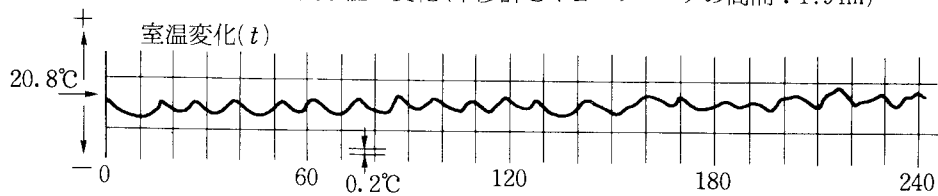
図24 ベッドのたわみによる表示値の変化



(a) 装置の配置図



(b) カウンタ表示値の変化(干渉計とキューブコーナの間隔:1.94m)



(c) 室温変化の記録

図25 空気の屈折率変化(温度、気圧)とベッドの熱膨脹の影響を調べる実験

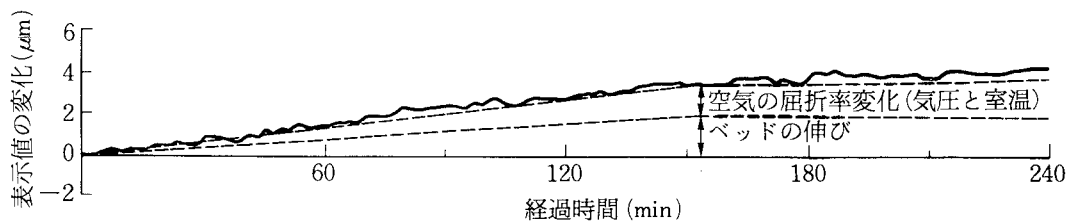
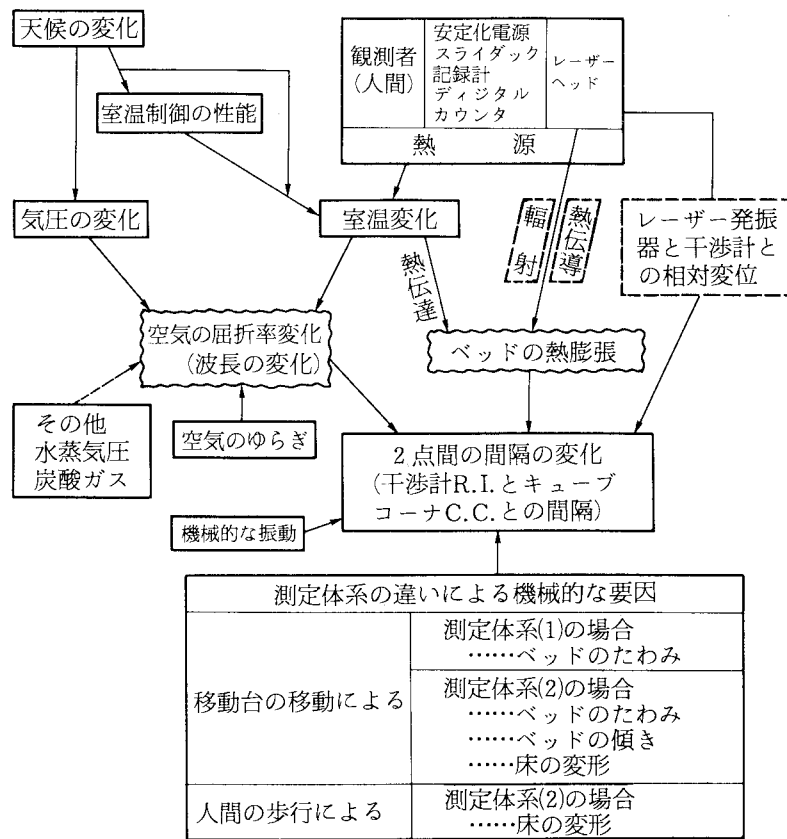


図26 表示値の変化に含まれている空気の屈折率変化とベッドの熱膨脹の影響



注) 測定体系(1): R.I.とC.C.が同一のベッド上に配置されているもの
 測定体系(2): C.C.がベッド上に、R.I.がベッドとは別の台に配置されているもの

図27 レーザー干渉測長における誤差要因とその関係

るといえる。図25(a)の装置で、熱源であるレーザー発振器だけを遠くへ離しても、限られた部屋では熱が蓄積され、表示値の変化は図26の結果とあまり変わらない。

d. 干渉計の位置

図25(a)の装置で、レーザー発振器および干渉計をベッドとは別の台の上に載せ、キューブコーナプリズムとの間隔を調べると、2点間の距離はつぎの原因により変わる。i) テーブルの移動に伴うベッドの傾き、ベッドのたわみ、および床の変形、ii) 人間が歩行するために起る床の変形。さらに空気の屈折率変化とベッドの熱膨張などの影響がこれらの誤差要因に加わってくる。機械的なベッドや床の弾性変形による誤差要因を少なくする目的から、必ず干渉計とキューブコーナプリズムは同一のベッドの上に配置しなければならない。もろもろの誤差要因の関係をまとめると図27のようになる。干渉現象を使う他の光学系でも図27に示す誤差要因の関係は共通している。

4. 微細形状のナノメートル計測

「産業の米」と呼ばれるようになった集積回路（IC）は、3年で4倍の割合で集積度が高くなると共に、その加工線幅も微細化の一途をたどっている。1MビットDRAMでは、 $1.2\mu\text{m}$ 程度の加工がなされる。また光ディスクのピットも μm からサブ μm の大きさで加工されている。そしてスキナ用ポリゴン鏡や磁気ディスクの場合には、切削加工のみで鏡面仕上げがなされている。このように、近年半導体や光・レーザー関連の産業における微細加工や超精密加工の発展にはめざましいものがある。これら μm オーダの微細形状やnmオーダの鏡面を実現するためには、加工機ばかりではなく、それらを評価するためのナノメートル計測技術も重要である。

微細形状の計測は、現在のところ自由な形状というよりも、超LSIパターンの線幅のような特定の形状を対象としている。したがって線幅測定は、 μm オーダの距離にある2つのパターンエッジの位置決めと、nmオーダのスケールによるXY平面での測定になる。また表面形状の測定は、高さ方向をnmオーダのスケール、横方向をサブ μm オーダのスケールによるXZ平面または3次元での測定になる。これらを計測するツールとしての触針は、試料表面に直接触れる確かさがあるが、試料損傷や微細形状を正確にはトレースできない欠点がある。ここでは、光や電子線を用いた線幅測定器や表面形状測定器の概略について述べる。

(1) 光学的方法による微細形状測定

光学的線幅測定としては、パターンエッジの検出方法によりいくつかの方式に分類され、ビデオの走査方式、スリット走査方式、光プローブ走査方式、画像分割方式などがある。

① ビデオ走査方式

この方式は、1000倍ぐらいの高倍率光学顕微鏡の観察部にビデオカメラを取りつけて、パターンのイメージを光電変換することによりエッジ検出を行う。この方式の例を図28に示す。ビデオカメラにビジコンを用いる場合には、ビデオ信号と水平走査信号をA/D変換する。CCDカメラを用いる場合には、水平走査信号のクロックと同期してビデオ信号をA/D変換する。ビデオ信号によりエッ

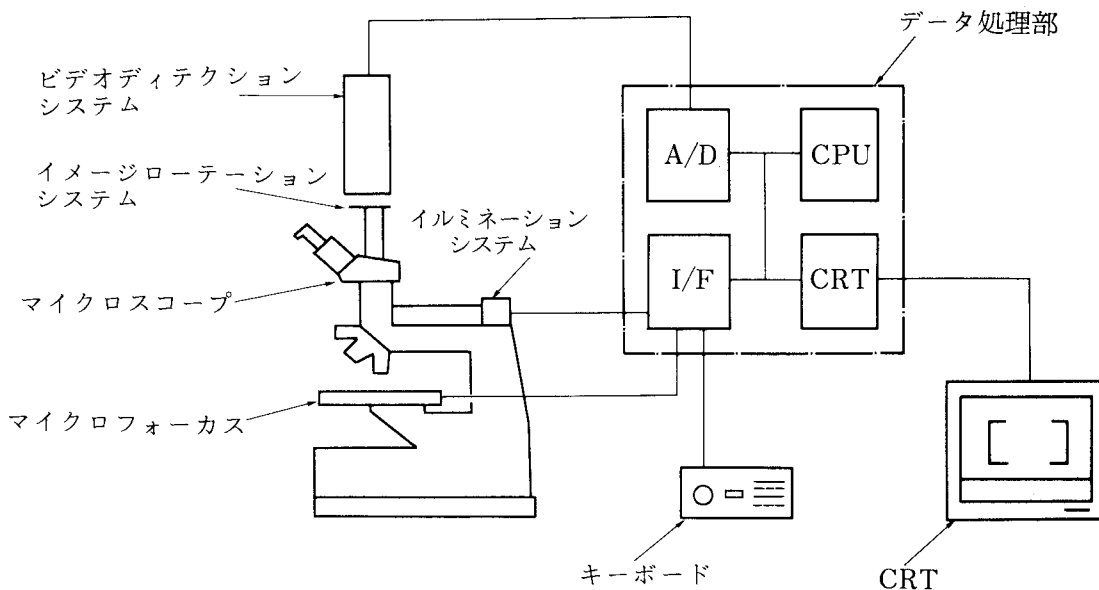


図28 ビデオ走査法

ジ位置を決め、それに対応する走査信号の時間を測定する。走査信号の時間間隔と基準長さとの関係は、値付けされている標準パターンをあらかじめ測定して求めておく。したがって、線幅の測定は、時間間隔の比較により行うので、表示値としては、1 nmまで可能である。しかし実際には、顕微鏡の倍率が低い場合には、視野の範囲が広くなり分解能も低下する。また照明強度が変化すると、光の波長特性が変わり、それによりビデオカメラより得られる信号が変化する。

② スリット走査方式

この方式は、光学顕微鏡で拡大した像をスリットで走査し、そのときの光電子増倍管の出力変化によりエッジ位置の検出を行う。実効スリット幅は、対物レンズの倍率により変えられ、最小0.1 μ m

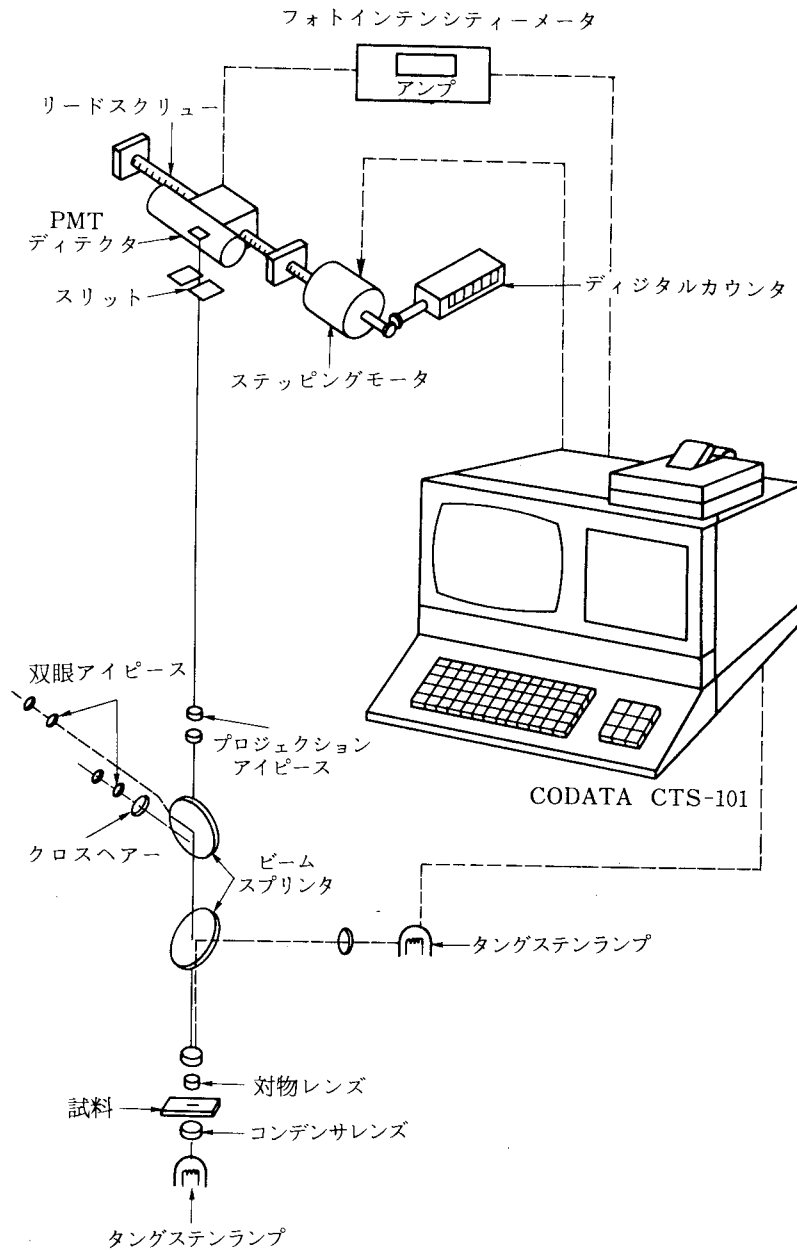


図29 スリット走査法

程度まで細くできる。線幅の測定は、エッジ位置間のスリットの走査量を測定して行う。走査量の測定は、パルスモータのパルス数やエンコーダにより行う。この方式の例を図29に示す。また同じスリット方式であるが、スリットは固定したまま試料を移動し、電気マイクロメータでその移動量を測定する方式もある。この方式は、光学系の収差の影響を無視できる。スリット方式は、エッジの検出に光電子増倍管を用いるので、検出感度が高く光学像のコントラストの悪い試料に対して有利といえる。

③ 光プローブ走査方式

この方式は、レーザー光を細く絞って試料上に照射するとパターンエッジの位置でより多くの散乱回折光が得られることを利用して位置決めを行う。図30にその原理を示す。光プローブは、 $1 \times$

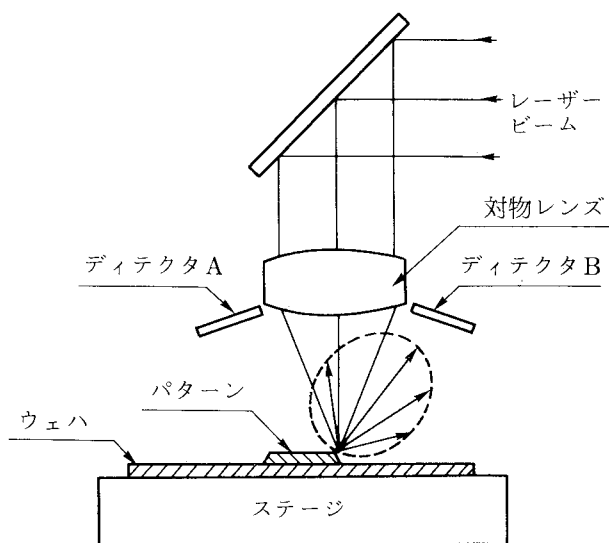


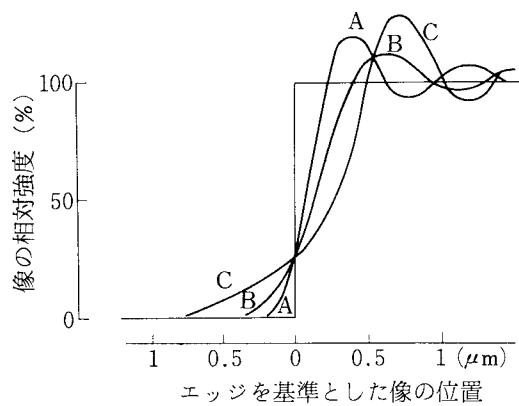
図30 光プローブ走査法

$5 \mu\text{m}$ のスリット状長方形であるので、線幅を $5 \mu\text{m}$ にわたって平均化していることになる。光プローブの走査量は、レーザー干渉計で測定して線幅を決定する。またレーザー光の散乱光を検出するので光学像のコントラストに影響されない。

④ 測定上の問題点

光学的線幅測定の精度は、主に光学系の収差、焦点ずれ、照明系のコヒーレンス性に依存する。Welfordは、理想的なマスクの場合について理論的検討を加えた。図31は、コヒーレンス照明、無収差対物レンズを仮定したときの焦点ずれの影響を示す。これによると、相対強度25%の位置では焦点ずれの影響を受けないが、コントラストの低下によるエッジ信号のS/Nの低下を避けるため正確な焦点合せが必要なことはいうまでもない。

視野内の位置によるスケールの精度は、顕微鏡による光学像の歪に依存する。もちろんビデオ走査方式やスリット走査方式の場合には、標準パターンの精度にも依存する。エンコーダを用いる場合には、目盛の内挿の精度も影響する。図32は、 $10 \mu\text{m}$ ピッチのスケールを電氣的に100分割したエンコーダの内挿誤差の例である。しかしこのようなスケールの精度は、レーザー干渉計による校正により一定の対策が可能であるので、線幅測定のキーポイントはむしろエッジ位置の決定といえる。しかし実際の線幅測定器では、エッジ信号と真のエッジ位置の関係を明確にできないので、エッジ



(A) $f \pm 0.0 \mu\text{m}$, (B) $f \pm 1.2 \mu\text{m}$, (C) $f \pm 2.4 \mu\text{m}$
(f : 焦点距離)

図31 焦点ずれの影響

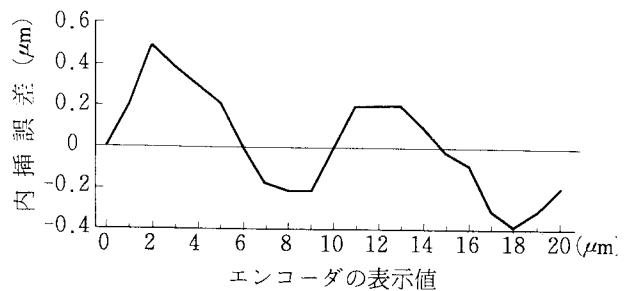


図32 エンコーダの内挿誤差

位置の特定は、しきい値やオフセット量の操作による測定者の裁量にまかされる。これは、個々の測定器が高精度であっても検出方式によるエッジ位置の特定が異なるばかりではなく、同じ方式の測定器相互の間でも測定値を一致させるためには細かな注意が必要であることを意味する。

光学顕微鏡の分解能は、 $0.61\lambda/N.A.$ (λ : 光の波長、 $N.A.$: 対物レンズの開口数) で表わされるので、形状が光の波長に近いサブ μm に近づくとき光による位置決めが難しくなる。たとえば μm オーダの線幅基準スケールを作っている米国RKS社のLWS-1型では、1~10 μm の全範囲にわたり光学測定器により校正して $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の精度保証をしていたが、新しいLWS-1-XP型では、3 μm 以上の範囲についてのみ $\pm 0.075 \mu\text{m}$ の精度保証をするようになった。このことは、実際の光学測定器の限界という点から興味深い。光学測定器の分解能を高めるためには、サブ μm 対応のステップでとられたような光の短波長化と $N.A.$ の増大で対処することになろう。しかしこのような高分解能化への対応は、焦点深度を浅くすることとなり、高低の大きい試料ではS/Nのよいエッジ信号を得ることが難しくなる。

(2) 電子線による微細形状測定

電子線の波長は、加速電圧1kVで39pmと非常に短いので、サブ μm 領域の微細形状にも対応することができる。走査型電子顕微鏡 (SEM) は、細く絞った電子線 (電子プローブ) で試料上を走査して、発生する2次電子信号により像形成を行うものであるが、その分解能はnmオーダに達する。焦点深度は、光学顕微鏡に比べて2~3ケタ深く、倍率1000倍で約30 μm あるので、高低のある試料に対しても適用できる。そして従来のSEMでは、電子ビームによる試料損傷や帯電の問題があったが、ここ数年の電子銃や排気装置の進歩により半導体への応用が広がっている。すなわちWフィラメントの熱電子銃に代わり、LaB₆フィラメントや電界放射型銃の使用により、試料損傷や帯電が少ない1kV付近の低加速電圧においても高分解能を実現した。特に電界放射型銃は真空度に対する要求が厳しいが、輝度、点電子源、エネルギー幅、寿命などの点でほかの電子銃に比べて格段に優れていて今後の半導体観察に欠かせないものといえよう。

電子線方式には、電子プローブ走査 (SEM) 方式と試料を移動する電子プローブ固定方式がある。

① 電子プローブ走査方式

この方式は、SEMに測長機能を加えたもので、電子ビーム (EB) 測長器とも呼ばれ、ビデオ走査方式の電子線版といえる。2次電子強度が、主にエッジ効果、傾斜効果、2次電子放出効率などに依存することを利用して、エッジの位置を求め、あらかじめ測定した標準パターンの寸法と比較して線幅を測定する。

EB測長器は、通常のSEMに比べて計測のための種々の配慮がなされている。たとえば、低加速電圧用に最適化した電子光学系により1kVで15nmの高分解能、酸化シリコンや窒化シリコンのような絶縁物の帯電を防ぐための最適加速電圧の選択を可能にする小幅なステップ電圧、低歪画像のためのデジタル走査、電子ビーム調整の自動化、コンタミネーションの低減を図るためのドライ真空システムなど通常のSEMを上回る装備がなされている。

この方式の精度は、主に電子光学系による像歪に依存する。通常のSEMでは、像歪が5%ぐらいであるが、走査系の信号源をデジタル化して直線性やタイミングを改善している。しかし走査コイルのリアクタンスやレンズの収差により1~2%の収差が残っている。

② 電子ビーム固定方式

この方式では、電子ビームの照射位置を固定したまま、試料を移動したとき発生する2次電子信号から求めたエッジ位置と、その移動量から線幅を測定する。電子光学系による像歪を無視できることや、走査量の測定にレーザー干渉計を用いることができるので、測定の忠実性からは最良の方式と思われる。図33に原理を示す。筆者らは、SEMの試料室内にレーザー干渉計、位置決め用XYθテーブル、走査テーブルなどを組込んだ装置を開発した。干渉計には、光路長変化増倍・差動方式の特別な光学系を用いて、1.6nmの分解能を実現した。

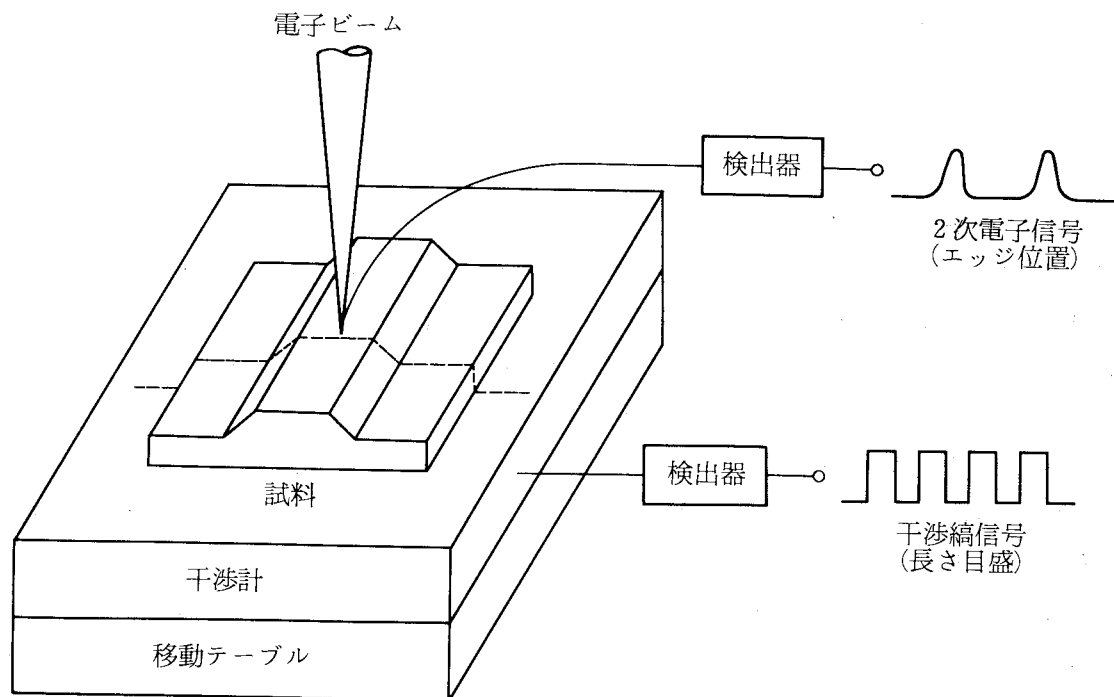


図33 電子ビーム固定方式

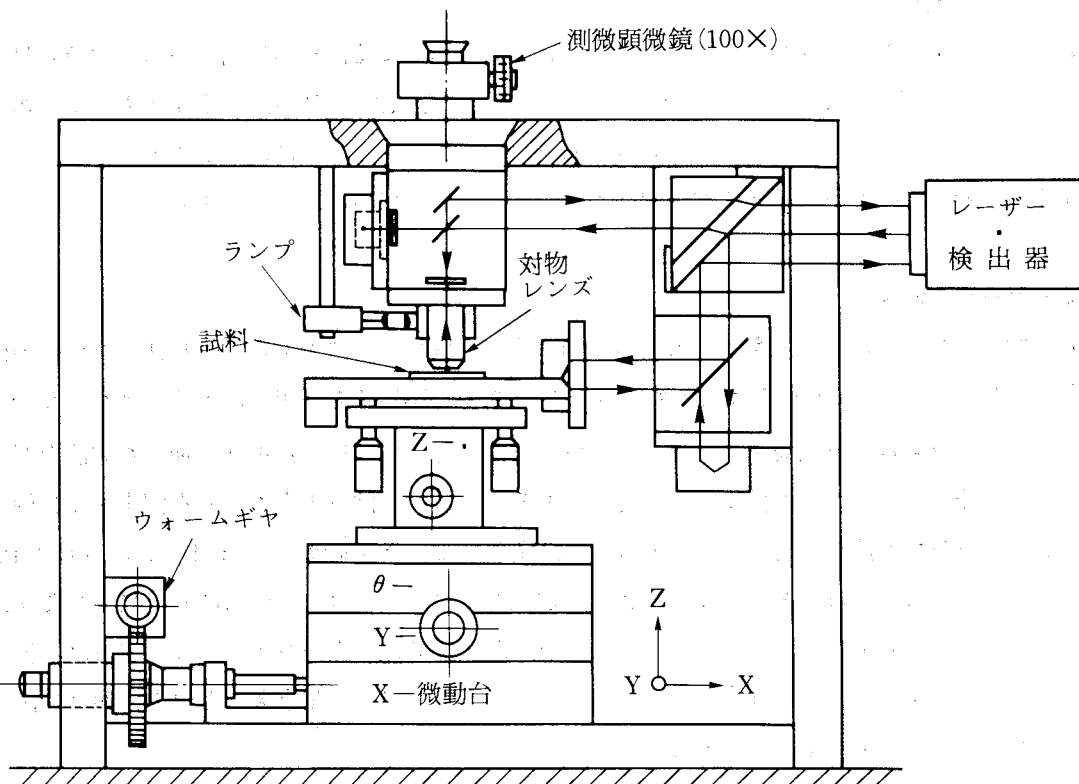


図34 顕微干涉型表面形状測定器

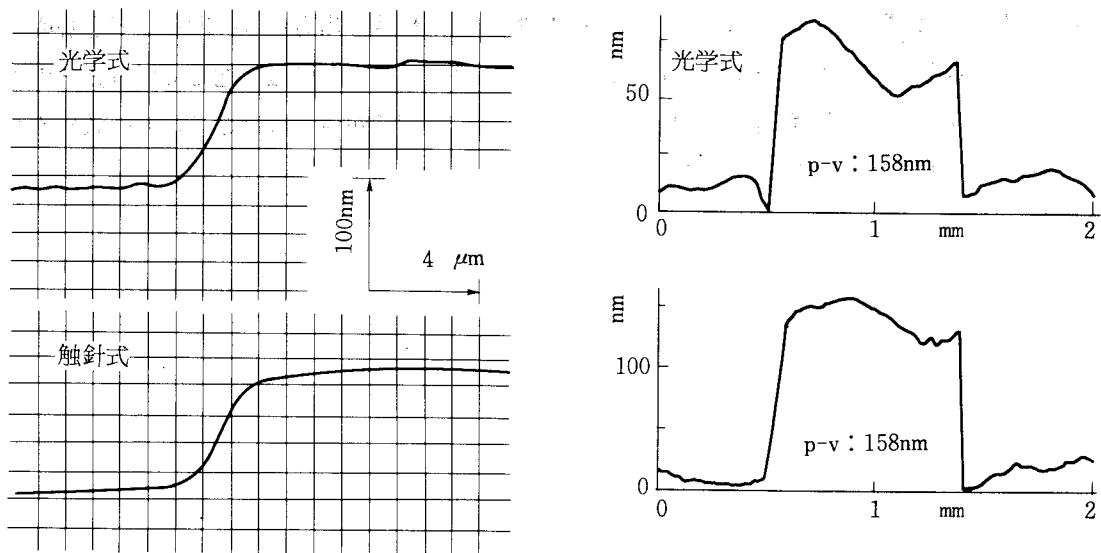


図35 触針式と光学式の比較例

③ 測定上の問題点

電子ビームを半導体に適用するときの問題点は、ビームによる試料の損傷である。戸所らは、1～2 kVの低加速電圧における損傷がきわめて少ないことを報告している⁷⁾。電子線方式でもエッジ位置の特定は、一般に2次電子信号にしきい値をかけて行われる。これは、実際のパターンエッジの詳細な形状と2次電子信号との対応関係が十分に把握されていないことによる。

(3) 微細表面形状の測定

超精密加工機などで切削したものの表面の微細形状の評価のために光や電子線を使った種々の研究が報告されている。光学式としては、顕微干涉法、プリズムの臨界角を利用した方法などがあり、SEM方式としては、反射電子検出器を4つ使った法線検出法、2次電子検出器を2つ使った方法などがある。図34は、筆者らの顕微干涉法による測定器である。装置は、試料の高さ方向を測定するZ軸顕微干涉計と、試料の移動量を測定するX軸干涉計で構成される。分解能は、Z軸が1.6nm、X軸が16nmである。図35は、この装置と触針式による比較測定例を示す。(a)の場合はほぼ同じ結果であるが、(b)では、かなり違った結果が得られた。このように非接触測定では、光や電子線により得られる情報が実際の形状を正しく反射しない場合もあるので、試料の組成・形状や測定条件と出力情報との関係を明らかにしたうえで測定することが不可欠である。

(4) 今後の課題

線幅測定器は、コンピュータの利用により大幅に自動化され高分解能測定が容易にできるようになった。そして今後は、単なる高分解能測定ではなく、トレーサビリティを確保した高精度高分解能測定が必要とされる。また、100～200 μ m角の測定範囲をマスクやウェハ全面に拡大する必要もある。そのためにはスケールとエッジ位置の検出について一層厳密に考えていかななくてはならない。すなわち1 nmや0.1nmまで表示しているスケールの正確さや、エッジ形状と出力信号の関係などを解明してゆかななくてはならない。表面の微細形状測定でも図35に指摘したような問題を抱えている。このようなナノメートル計測における測定値の信頼性を考えるとき、計測量が原子の大きさにも匹敵するため物理的側面からも現象を追求することが重要である。

5. 表面粗さの測定

表面粗さの測定方法には、触針式、光触針式、光切断法式、光干渉法式など各種ある。最も一般的に用いられているのは触針式である。ここでは接触式の触針式粗さ測定機、非接触式の光触針式と表面トポグラフィの計測について述べる。

(1) 触針式粗さ測定機

図36に触針式粗さ測定機の構成を示す。この方式には、スキッドレス式と、スキッド式がある。

スキッドレス式：駆動部内の精度の高い真直度基準面との比較し形状を測定。

平行出しなど操作が増えるが最近ではコンピュータにより平行出しの狂いを補正するため、一般的にスキッドレスが多く使用されている。

スキッド式：粗さに影響しない充分大きな半径のスキッドをガイドとして粗さを測定するため、駆動部は真直度精度を必要としない。また平行出しも不要で操作が簡単である。

図37に示す形状の触針をワーク表面にトレースさせ、その上・下動を検出器（差動変圧器）で検出、電気回路により、演算・記録し表面の粗さを測定する。表面粗さを示すパラメータとして、JISではRa（中心線平均粗さ）、Rmax（最大高さ）、Rz（十点平均粗さ）が定義し定められている。これら以外に多くのパラメータが使用されているが、以下に解説する。

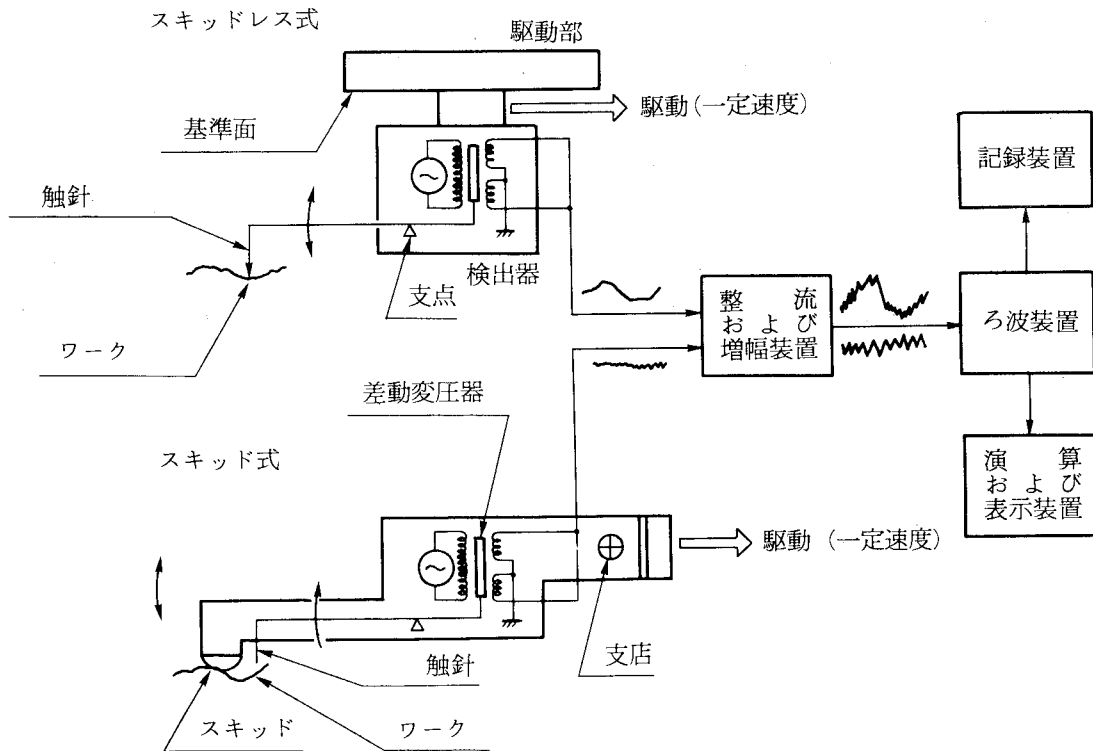


図36 触針式粗さ測定機の構成図

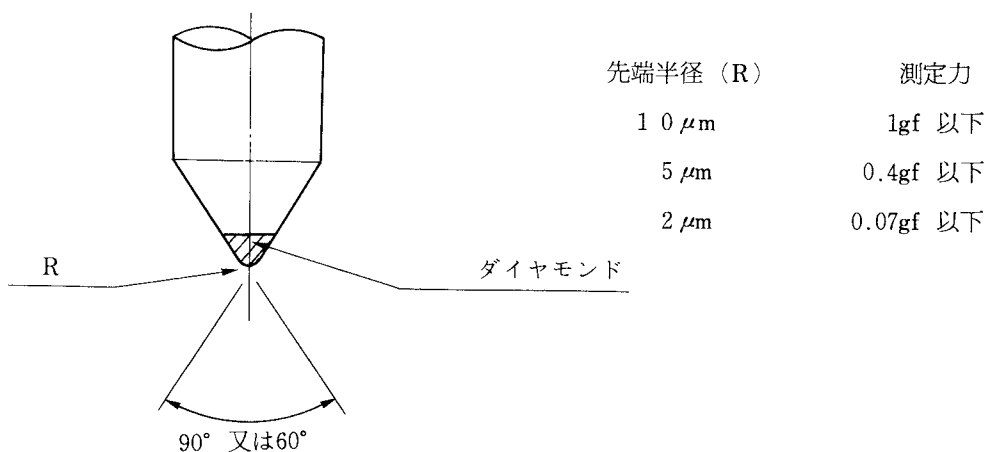


図37 触針先端半径と測定力

(2) 表面粗さの定義と表示

① 表面粗さとは

機械加工表面に限らず、工業製品の表面には色々な凸凹の成分が含まれている。この凸凹を周波数でいえば、低いほうから高いほうへ、形状偏差の成分、うねりの成分、粗さの成分に分類でき、図38のように示される。

図38において、どこからどこまでの周波数成分をうねりといい、粗さというかは一概に決められないのが普通である。

一つの測定対象面の粗さをうんぬんする場合、多数の測定値の母平均が効果的に推定できるように、その対象面で測定位置と個数を設定する必要がある。その理由は、一般に加工表面においては、場所によって粗さが相当に大きくばらついている、という事実による。ひどいときには同一の測定対象面であっても30~40%も違った値を示す、といわれる。

このようなことから、JIS B 0601では用語の意味の冒頭の備考で注釈を入れ説明しているわけである。しかし、一つの測定対象面だけで多数の測定をするには相当の手間がかかるので、測定目的によっては、対象面の1箇所求めた値で面全体の粗さを代表させることも許されるように説明が加えられている。

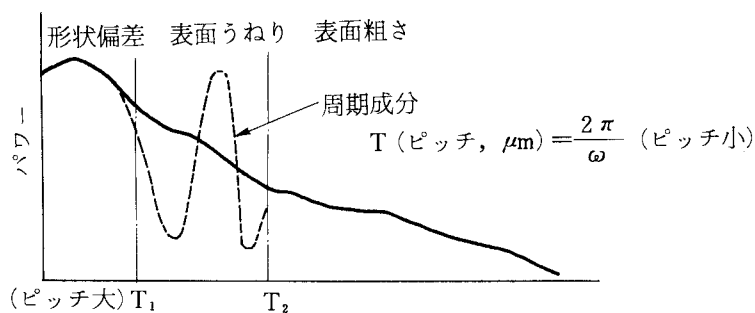


図38 形状偏差、表面うねりおよび表面粗さの対応波長領域

② 断面曲線と基準長さ、粗さ曲線と測定長さ

JIS B 0601の用語の中に“断面曲線”という言葉がある。これは被測定面を直角に平面で切断したとき、その切り口に現れる輪郭の凸凹曲線を指している。

しかし、実際には1～5μmの先端曲率半径をもったダイヤモンドの針で表面をなぞって得られた輪郭で代用する。忠実に断面曲線を得るには、針先の曲率半径が小さいほうがよいわけであるが、すぐ摩滅してしまうので実用的ではない。従って、断面曲線は、粗さと同時に、うねりや形状偏差の成分も含んだ触針でなぞって得られる包絡曲線、ということになる。

断面曲線から粗さを評価する目的で記録をとってみても、どれくらいの長さについて評価すればよいか、わからない。そこで、断面曲線から基準の長さを抜き取り、その部分の長さにわたって評価することになっている。この部分の長さを“基準長さ”と称して、最大高さ (R_{max}) や十点平均粗さ (R_z) を評価するときに使用する。JIS B 0601では、この基準長さを0.08、0.25、0.8、2.5、8、25mmと6種類定めている。

断面曲線から所定の波長より長いうねりの成分や形状偏差の成分を除去して得られる、いわば純粋に粗さ成分だけを取り出した曲線のことを“粗さ曲線”と称して区別している。うねりや形状偏差の成分を電気的フィルタなどを用いてカットオフした曲線であるから、本質的に断面曲線と異なる。

粗さ曲線から粗さを求める場合、やはり記録波形から所定の長さを抜き取って評価する。この抜き取り部分の長さを“測定長さ”と称する。測定長さは、うねりや形状偏差の成分を除去するのに用いたフィルタのカットオフ値によって指定される。原則としてカットオフ値の3倍以上に選ぶことになっている。

③ 中心線平均粗さ (R_a)、粗さ曲線とカットオフ値

JIS B 0601では R_{max} や R_z のパラメータと共に粗さ曲線から評価する中心線平均粗さ (R_a) のパラメータを規定している。 R_a を求めるため、波長の長いうねり成分を電気的なフィルタで除去するが、そのときの所定の波長をもつカットオフ値は、0.08、0.25、0.8、2.5、8、25mmの6種類である。JIS B 0601ではカットオフ値の標準値として、表4のように、 R_a の範囲に応じて2種類を定めている。

表4 中心線平均粗さを求めるときの
カットオフ値の標準値

中心線平均粗さの範囲		カットオフ値 mm
を超え	以下	
—	$12.5\mu m R_a$	0.8
$12.5\mu m R_a$	$100\mu m R_a$	2.5

R_a の定義は数式で、

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| \cdot dx$$

で与えられる。 l は測定長さ、 $f(x)$ は粗さ曲線に相当する。この定義からすると、 R_a の値を求めるには、算術的に求めた中心線をはさんで、その下側部分の粗さ曲線を折り返し、これを測定長さで平均すればよい。図39はその様子を模式的に書いたもので、図(a)の三角山の規則的な波形では、

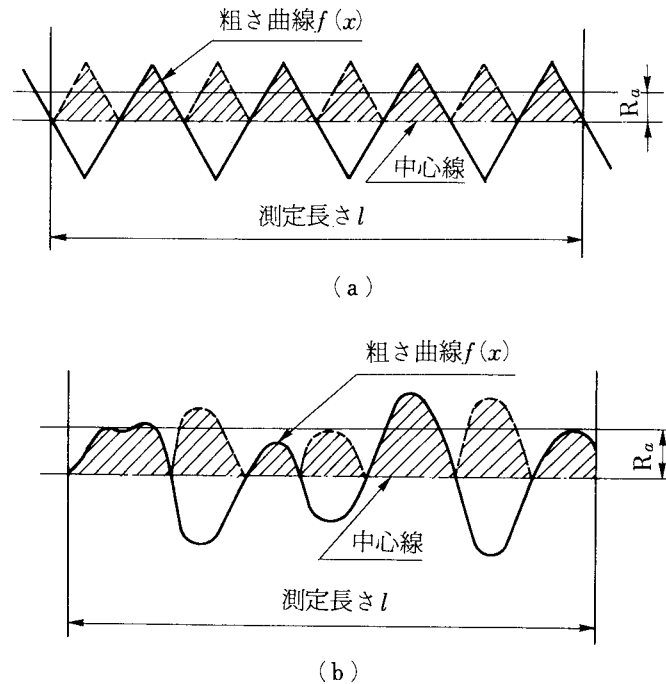


図39 中心線平均粗さ (R_a) の説明図

ちょうど $R_a = R_{max}/4$ の関係になる。これは特殊な場合であって、一般的にはこの関係は成立しない。何ら R_a と R_{max} との間には一義的に換算できる関係はない。図2(b)のように、ランダムな粗さ曲線において R_a と $R_{max}/4$ の値は違っている。とはいえ、色々な場面で表面粗さを評価する大まかな目安として、この関係を知っているほうが便利である。

一般に電氣的に R_a の値を直読する計器では、測定長さが短いうちでもこの値をメータに指示することができるが、安定な値を示さない。すなわち、粗さ曲線から求める R_a の値は測定長さにより変化してゆく。測定長さがある程度長くなると、ほとんど R_a の値は変化せず、落ち着いた値を示す。図40は実際の加工面についてこの関係を調べた実測例である。横軸に測定長さ、縦軸に R_a の値をとっている。測定長さをカットオフ値の3倍以上とらなければならない、という根拠も、このような多くの実験結果に基づくものである、といえる。

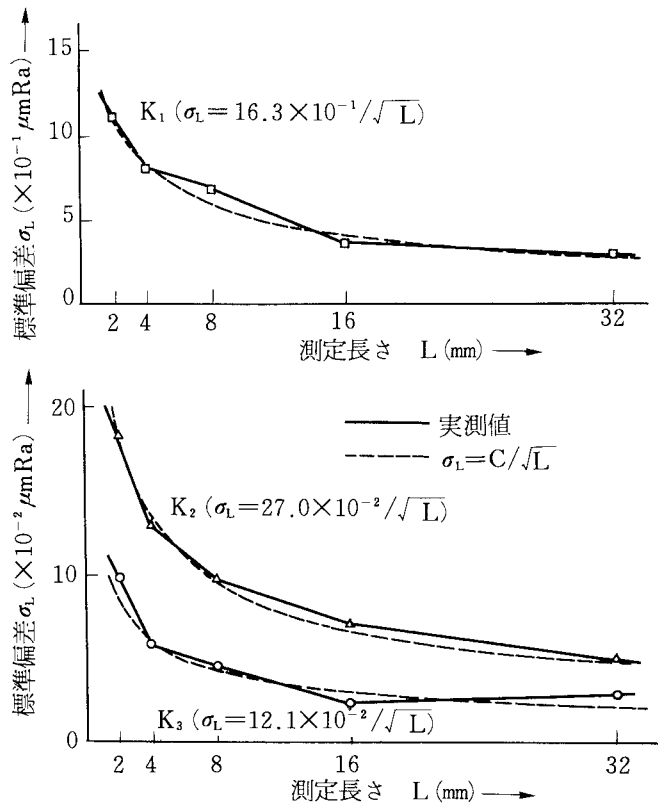


図40 平面研削面における R_a の測定値のばらつきと測定長さとの関係

④ 粗さの横方向のパラメータ (S_m , S , t_p)

以上に述べてきた粗さのパラメータはすべて、凸凹の振幅に関する縦方向のパラメータである。JIS B 0601ではまだ取り入れられていないが、ISO 468では、粗さの横方向に関するパラメータとして、断面曲線の平均間隔 (S_m)、断面曲線の局所的な山の平均間隔 (S)、断面曲線の負荷長さ比 (t_p) の三つを定めている。

横方向のパラメータは、今後、ますます使用されよう。実際に、図41のような凸凹の波形では、 R_a や R_{max} で評価すると値が等しくなり、区別はつかなくなる。振幅は等しいがピッチの異なる波形の場合に、 S_m や S のパラメータが必要となってくる。逆に図42のような場合、もはや横方向のパラメータで評価することは無意味である。一般に、縦と横のパラメータが互いに補完的な役割をもっている、といえる。

a. パラメータ S_m

断面曲線から基準長さ l を抜き取ったとき、図43に示すように、その平均線と断面曲線が交わる点間 (平均線の切取られる線分の長さ) を S_{mi} とするとき、

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}$$

で表されるパラメータである。すなわち、切取られる平均線の長さ S_{mi} の和の平均値である。

b. パラメータ S

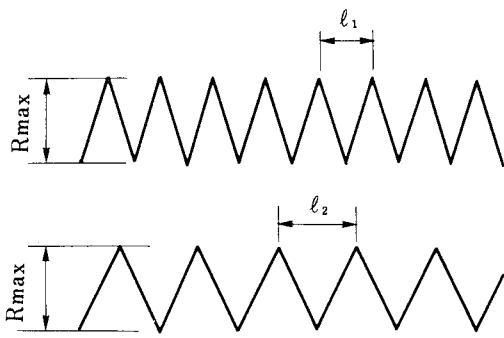


図41 振幅が等しく、ピッチの異なる波形

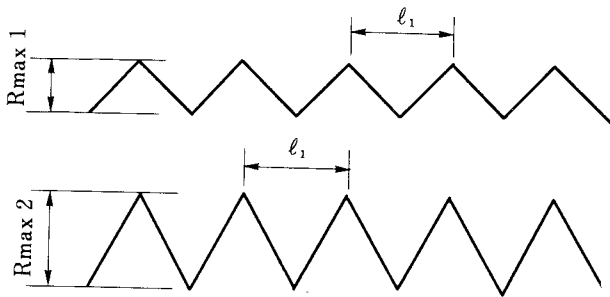


図42 ピッチが等しく振幅の異なる波形

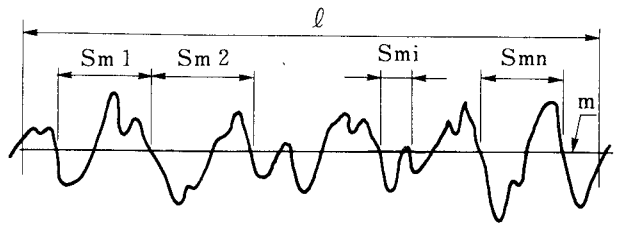


図43 パラメータ S_m のための説明図

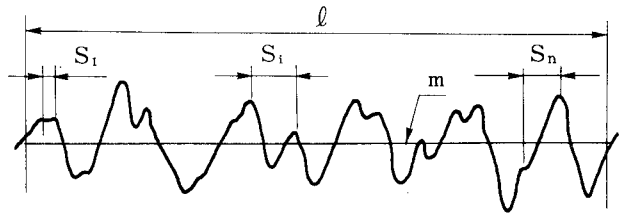


図44 パラメータ S のための説明図

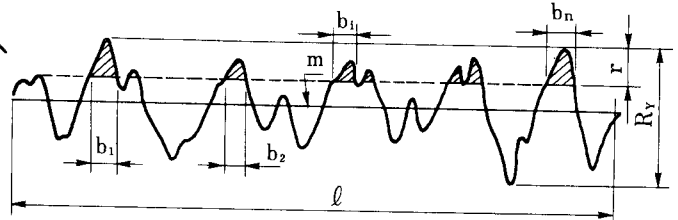


図45 $\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n$

パラメータ t_p のための説明図

断面曲線から基準長さ l を抜き取ったとき、図44に示すように、その局所的なピーク間の平均間隔を指す。任意の局所的なピーク間隔を S_i とするとき、

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

で表されるパラメータである。局所的なピークの解釈において、ISOの内容にあいまいな点があるので、実際に S を求める場合には問題点が残る。

c. パラメータ t_p

図45はパラメータ t_p を説明するための図である。断面曲線から基準長さだけ抜き取ったとき、平均線に平行な、あるレベル C の所の負荷長さを η_p とすると、 $\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n$ 、である。 η_p を基準長さ l で割った値、すなわち、

$$t_p = \frac{\eta_p}{l}$$

を、レベル C における負荷長さ比 t_p と称する。

レベル C の位置を上下に連続的に変えれば、 t_p の連続した一つの曲線が求められる。いわゆるアボットの負荷曲線として、多くの人たちに親しまれている。アボットの負荷曲線の様子から、表面の荷重に対する負荷能力が判定できる。

表5は、現在、世界各国で用いられている粗さのパラメータである。 Ra は世界各国で使用されていることは、その値が簡単にメータで直読でき、生産現場において手軽に利用できるからであ

ろう。

⑤ 粗さの最大値表示と区間表示

文章中に粗さの最大値を指示したり、区間の指示をする場合の規定がJIS B 0601の中に書かれている。

中心線平均粗さの“許せる最大値”を指示する場合、表6の標準数列から選んだ値の後にaをつけて表す。例えば6.3aと書けば、 $0\mu mRa \leq 6.3a \leq 6.3\mu mRa$ を意味する。ここでいう許せる最大値とは、被測定面からランダムに抜き取った数箇所のRaの算術平均値であって、個々の最大値ではない。また、最大値表示の場合のカットオフ値は原則として、最大値が $12.5\mu mRa$ 以下であれば、0.8mmを、 $12.5\mu mRa$ をこえ、 $100\mu mRa$ 以下であれば、2.5mmを用いるように決められている。これ以外の場合、カットオフ値を併記することになる。

中心線平均粗さの区間表示は(6.3~1.6)aと表示する。この場合、上限値も下限値も $12.5\mu mRa$ 以下であるのでカットオフ値は0.8mmを用いる。(2.5~6.5)aのときには上限値は2.5mm、下限値は0.8mmのカットオフ値を用いて測定することになる。

最大高さの場合には表7の標準数列から選んだ値の後にSをつけて表す。例えば、3.2Sは $0\mu mR_{max} \leq 3.2S \leq 3.2\mu mR_{max}$ を意味する。区間表示は(3.2~0.8)Sのように表示する。基準長さの標準値は最大高さの範囲ごとにJIS B 0601の表で区分されているので、それを使用する。

表5 各国の表面粗さの規格に採用されている表示法

表示	国名															
	アメリカ	イギリス	イタリア	インド	オーストラリア	オランダ	カナダ	スウェーデン	ソ連	ドイツ	フランス	フィンランド	ポーランド	日本	I*	
1 中心線平均粗さ	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	R _a	S O
2 最大高さ			R _{max} (R _{tm})	R _{max}				R _{max}	R _{max}	R _t (R _{max})	R _t (R _{max})	R _{max}	R _{max}	R _{max}	R _{max}	R _y
3 十点平均粗さ		R _z	R _z	R _z				R _z	R _z	R _z		R _z	R _z	R _z	R _z	
4 自乗平均平方根粗さ			RMS		R _d					R	R					
5 中心線の深さ										R _p	R _p					
6 相対負荷長さ			t					t _p	t _p	t _p	(T _R) _c		N _L		t _p	
7 局部的山頂の平均間隔			S _m					S	S	A _r	A _r					S
8 凸凹の平均間隔									S _m							S _m

*) ISO 46S-1982 Surface Roughnessによる。
ISO 468では、最大高さをR_yで示している。

表6 中心線平均粗さの標準数列

0.013	0.4	12.5
0.025	0.8	25
0.05	1.6	50
0.1	3.2	100
0.2	6.3	—

表7 最大高さ及び十点平均粗さのための標準数列

0.05	0.8	12.5	200
0.1	1.6	25	400
0.2	3.2	50	—
0.4	6.3	100	—

十点平均粗さの最大値及び区間表示は、それぞれ Z をつけて、 $6.3Z$ 、 $(6.3\sim 1.6)Z$ のように表す。この場合も最大高さと同様に、表7の標準数列にもとづいた値を選んで表す。基準長さの標準値は十点平均粗さの範囲ごとに表で区分されている。

(3) 光触針式粗さの測定機

光により非接触で測定物の表面の断面形状を求める方法はいくつか発表されているが、レンズにより測定表面に結像した光点の焦点位置からのずれを知ることにより断面形状を測定する方法が、測定精度、装置の小型化の可能性などの面から有力である。これは対物レンズと測定表面との微小な距離の変化として断面曲線を求めるもので、オーディオ用コンパクトディスクあるいは光ディスク装置の光学ヘッドのフォーカスエラー検出原理にその開発の端を発している。

フォーカスエラー検出方法について見てみると、図46に示すような4方式を挙げる事ができる。

a) 非点収差法

円筒レンズにより非点収差を与え、表面位置の移動量を像の変形に変換する。光センサとして4分割フォトダイオードを用い、これを合焦時に像が円形となる位置に置く。

(5-3) 光触針式

5-4) トポグラフィ-

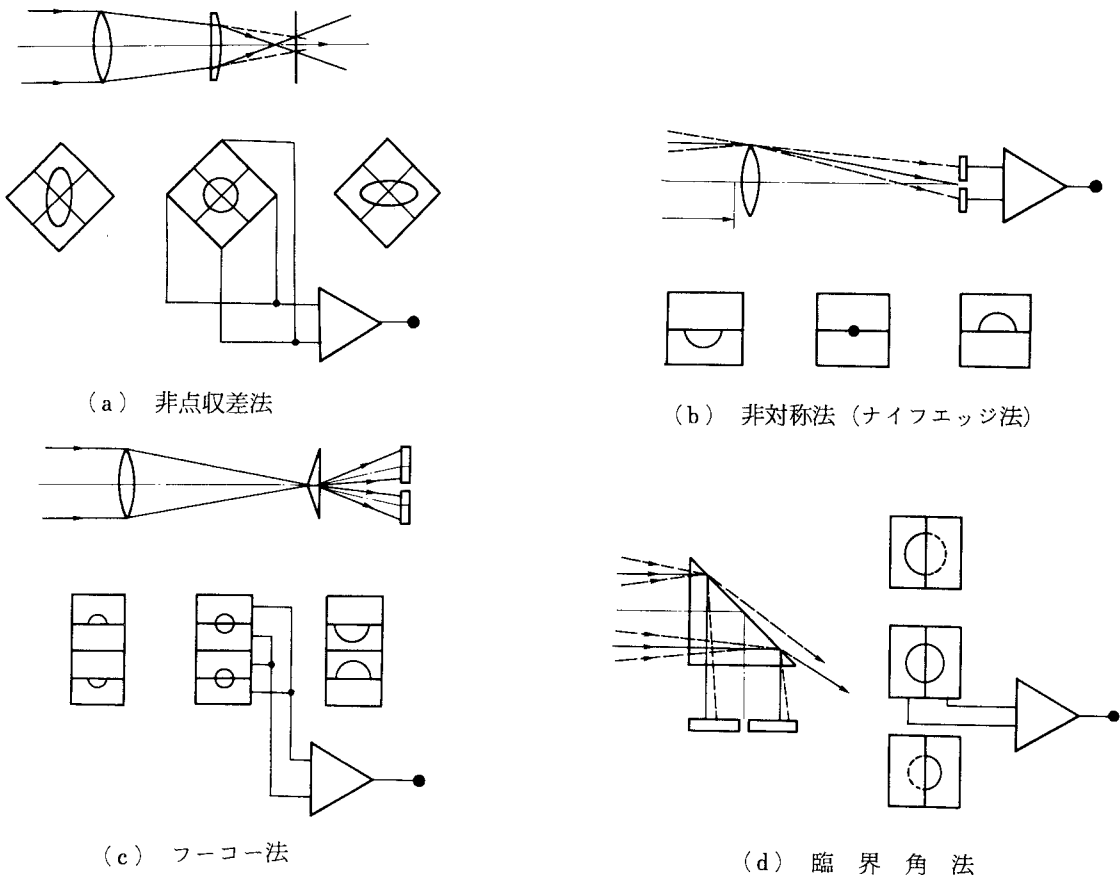


図46 フォーカスエラー検出方法

b) ナイフエッジ法

光束の一部を遮り、焦点ずれが生ずることにより像形状が非対象になることを利用する。光センサとして2分割のものをを用い、各セルへの入射光量に差が生ずることになる。

c) フーコー法

カメラのスプリットプリズムと同様な検出方式で、誤差信号は2個のディテクタの差として求められる。

d) 臨界角法

臨界角プリズムの臨界角近傍の反射率の急激な変化を利用する。合焦時には平行光であるために全反射し、2分割フォトダイオードの両素子に入射する光量は等しいが、表面が変位した場合光束の一方がプリズムから透過し光量分布に差が生ずる。

上に述べた4つの方式のうち a) 、 b) 及び d) が現在粗さ測定に应用されている。

① 非点収差法による粗さの測定

以下に、光触針による粗さ測定の一方法である非点収差法の原理、測定例、について述べる。

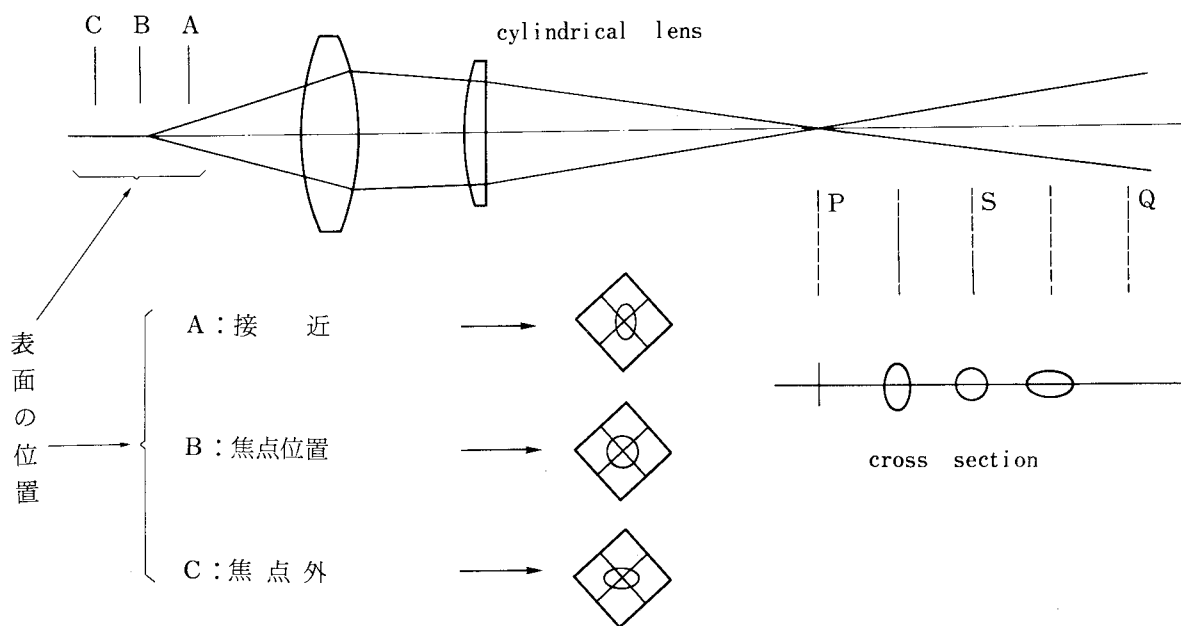


図47 非点収差法の原理

図47に示すように、対物レンズにより結像される表面の光点の像位置をQとする。非点収差を与えるために、対物レンズの後方に円筒レンズを置く。円筒レンズによる結像位置をPとすると、PQ間では、PからQに向かうにつれて、光線束の断面は長軸が鉛直な楕円から、長軸が水平な楕円へと変化する。この間Sでは断面形状は円となる。S点における断面形状は、表面の位置により変化するから、これを4分割フォトダイオードで光電変換し、演算することにより、表面位置に対応した出力信号を得ることができる。

図48はこの測定法の光学系の構成を示したものである。変位計として利用する場合、あるいは表面の微細部分の傾斜が小さい測定面に対する場合には、図47に示したように4分割フォトダイオ-

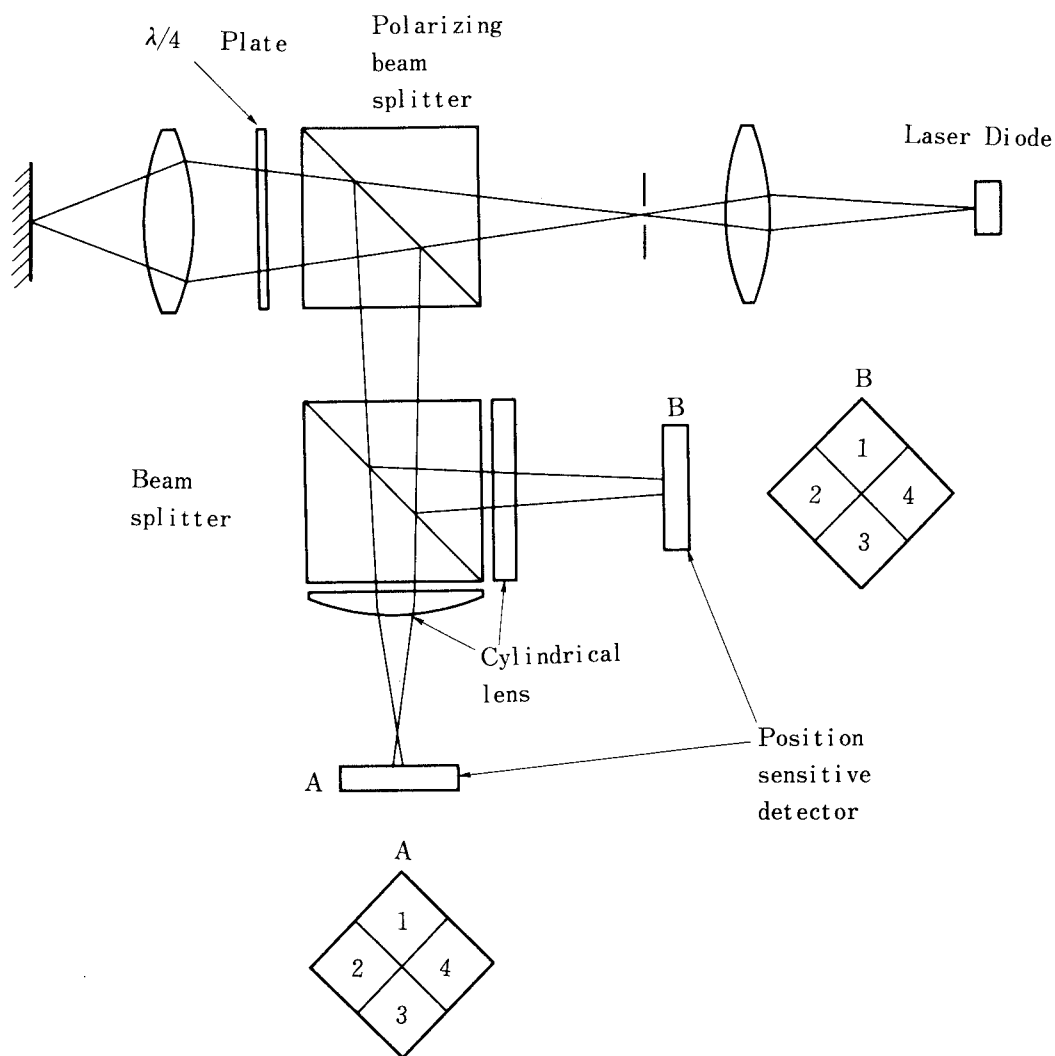


図48 非点収差法の光学系の構成

ド1個を用いて装置を構成することができる。しかし、旋削面などのように傾斜の比較的大きな断面曲線や、鋭い端部を持つ段差の測定時には、回折像の影響によりフォトダイオード上の特定の素子に非常に強度の大きい光が入射するため、断面曲線の振幅が実際より数倍大きく測定されることがあるので、ビームスプリッタで光路を2分割して2つのフォトダイオードに光をあて、その差動出力を求め回折光の影響を極力除去するようにした。なお、ビームスプリッタの後方に置かれた2枚の円筒レンズはその母線方向が互いに直交するように配置されている。

断面曲線に対応する信号は次の式により与えられる。

$$S = \frac{(A_1 + A_3) - (A_2 + A_4)}{\sum_{i=1}^4 A_i} - \frac{(B_1 + B_3) - (B_2 + B_4)}{\sum_{i=1}^4 B_i}$$

ここで、 A_i 、 B_i ($i = 1, 2, 3, 4$) は4分割フォトダイオードA、Bの各素子の出力信号を現わす。なお、レーザ光の出力、表面の反射率が変化しても、全光量で割り算する上式の演算操作

により、Sは一定値に保たれることになる。

非点収差法による測定では、対物レンズの開口数、再結像点Q及び4分割フォトダイオードの位置、シリンダリカルレンズの焦点距離を設計上の変数として選ぶことができるために、光学設計の自由度が大きく、感度と測定範囲に関し様々な特性を持つあらさ計を構成できるのが特色である。光源には出力2mW、発振波長790nmの半導体レーザを使用している。対物レンズにはN.A.（開口数）が0.8、倍率60倍の顕微鏡対物レンズを使用している。この場合の測定範囲はおよそ $1\mu\text{m}$ 、測定分解能は2nmである。開口数0.65、倍率40倍の対物レンズも使用可能で、この場合には測定範囲が $3\mu\text{m}$ 以上とれることを確認している。また本体内部には光検出器の出力信号の増幅用プリアンプを内蔵し、信号伝送中に重畳する雑音成分を低減するようにした。

開口数0.8の対物レンズの場合、測定範囲は $1\mu\text{m}$ であり必ずしも大きくはないが、測定感度は高く、より小さな粗さ波形の検出が可能となっている。測定分解能を知るにあたり、ナノメータ(nm)オーダの粗さ標準片を入手するのが困難であることから、ここでは圧電素子を用いて鏡を微小振幅で正弦振動させ、それを静電容量式変位計と本装置により測定分解能を求めることを試みた。

図49がその結果である。静電容量式変位計の出力から鏡の振動振幅はおよそ2nmであることがわかる。上段に示した本測定装置の信号は電気系の雑音成分とみられる3Hz前後の雑音成分を含んでいるが、下段と同じ周期の正弦波状振動をとらえており、少なくとも2nm程度の測定分解能を有することが理解できる。

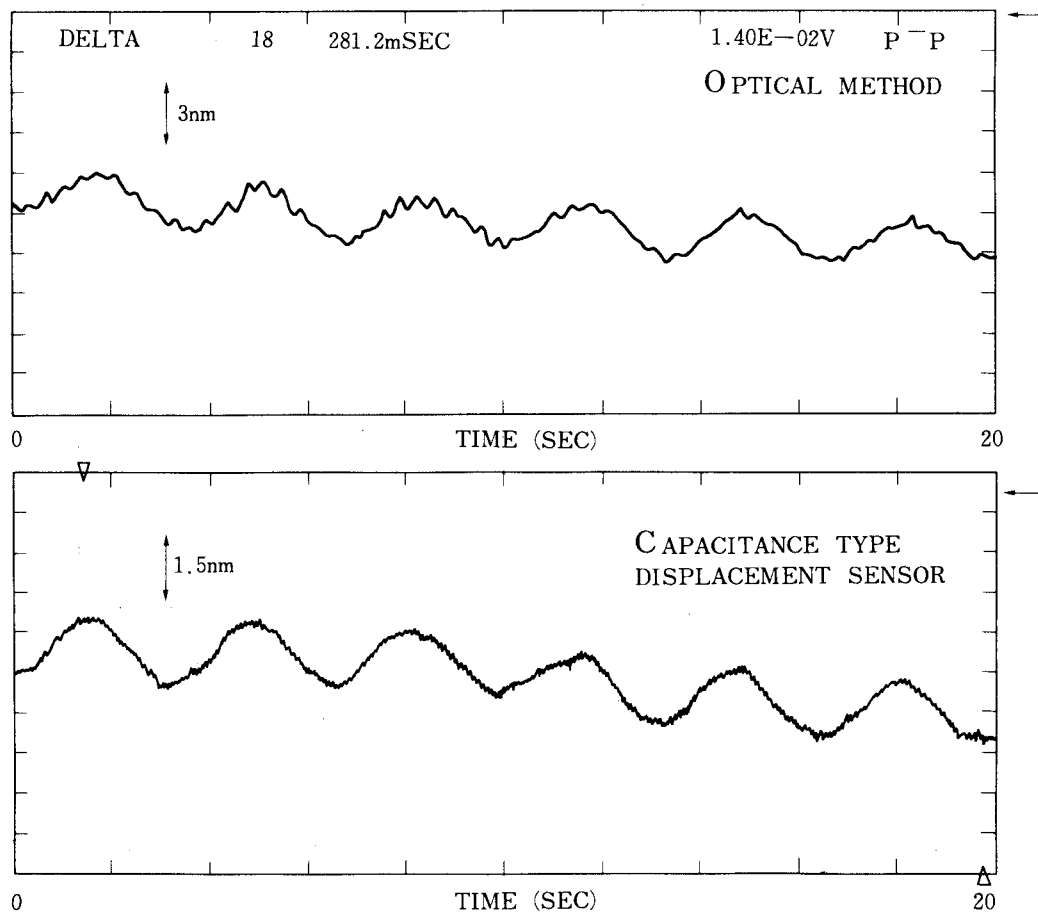


図49 分解能の測定

(4) 表面トポグラフィーの高空間分解能計測

表面の微細かつ微小なでこぼこを観察する手段として、各種の光学顕微鏡、触針式粗さ測定器、電子顕微鏡などがある。そのうち表面の縦方向（高さ方向）に高分解能を発揮する観察手段として光学顕微鏡と触針式粗さ測定器が位置づけられ、横方向に高分解能を発揮する観察手段として電子顕微鏡が位置づけられる。

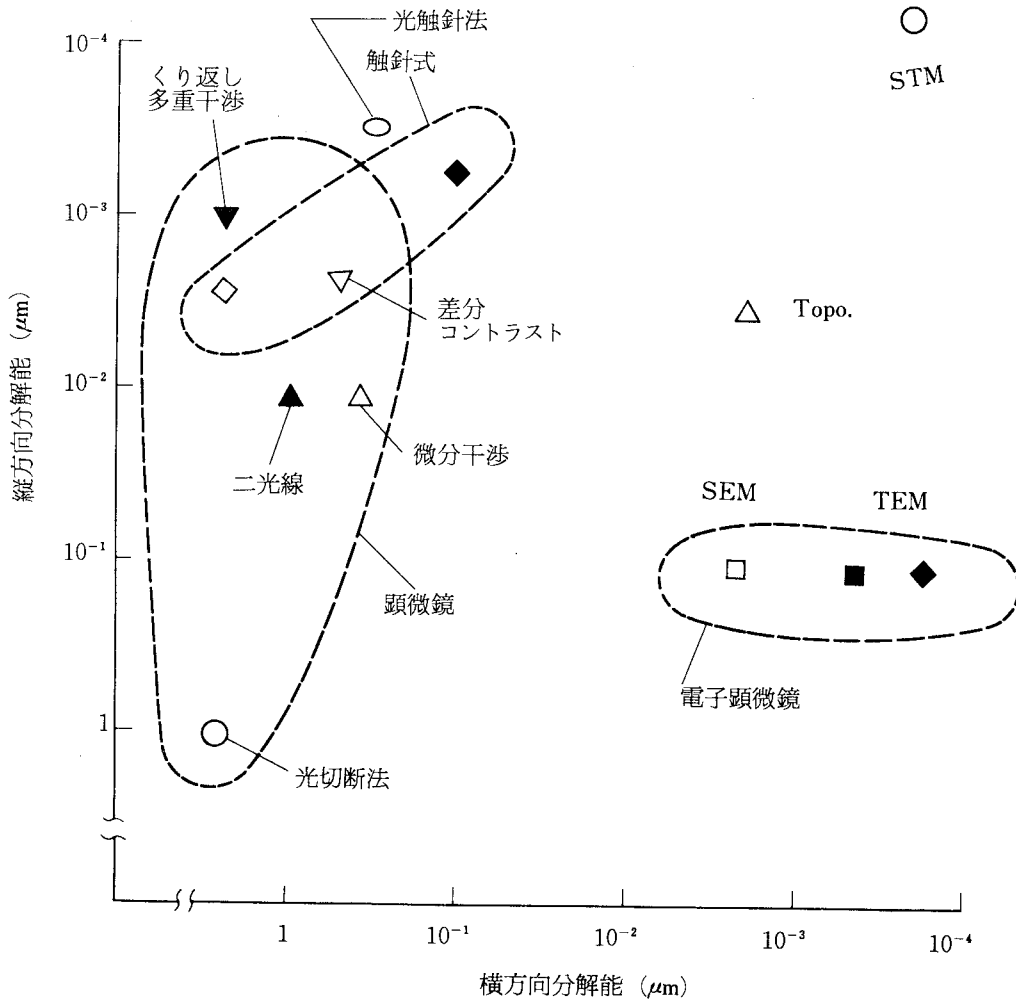


図50 各種微細形状測定器の分解能

図50は、現在市販されている各種の顕微鏡や触針式粗さ測定器について、それらの縦と横方向の空間分解能の位置づけを行ったものである。図からわかるように、一般に表面に沿った横方向に高分解能な手段は電子顕微鏡 (SEM、TEM) を除いて他にない。さらに縦と横に同時に高分解能な観察手段が見当たらない。わずかに13年前、アメリカのNBSより発表のあった極小の針先からの電子の電場放出現象を利用したトポグラフィナー、及び近年話題になっているスイスのIBM研究所より発表された電子のトンネリング現象を利用したトンネル（効果）顕微鏡 (STM) があるにすぎない。

このように、図50は我々が今後どのような表面トポグラフィーの観察手段を手に入れなければならないかを示唆しているもの、といえる。従って、以下に紹介する内容も、この観点からアプローチし、電子ビーム、電子の電場放出、電子のトンネリング現象、X線の利用などについて述べ、今後の課題として位置づける。

① 電子ビームの利用

電子顕微鏡は、現在横空間分解能が高く、比較的手に入れやすい唯一の表面観察手段である。従って、計測に使用する電子ビームの基本的性質と問題点を把握しておく。

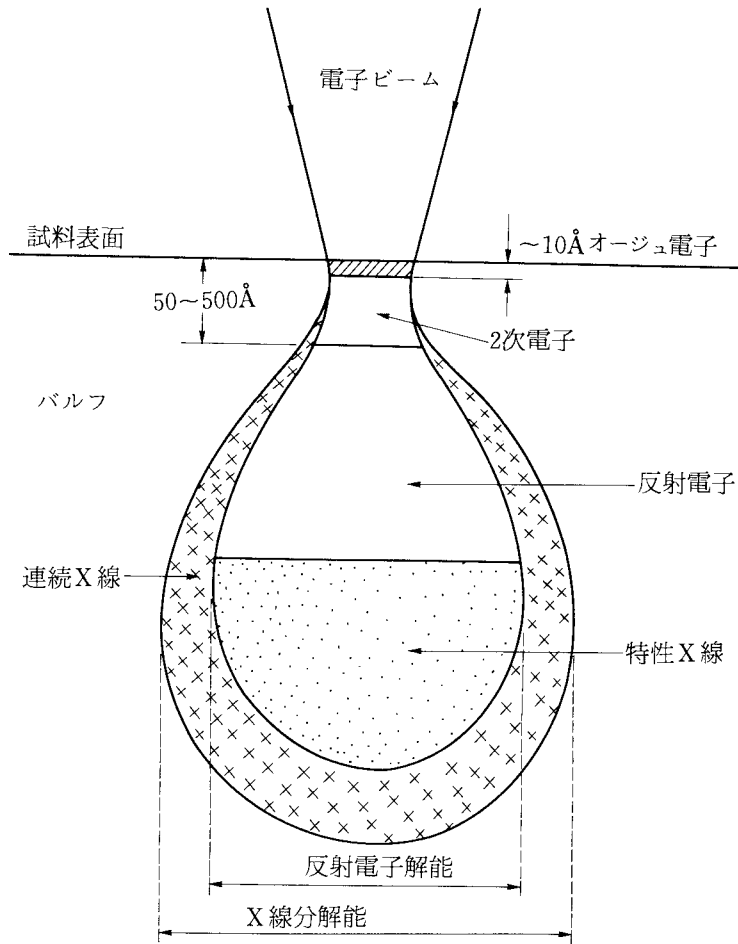


図51 励起粒子の脱出領域

真空中で加速された電子を試料表面に打込むと、その表面近傍が励起され、図51のような各種の電子やX線が発生する。これらの励起粒子の脱出領域は、打込む電子の加速電圧によって異なる。加速電圧が0.5KeV～2 KeVと低いとき、電子ビームは、表面を損傷することなく、観察手段として使われる。この場合、励起粒子の脱出領域は浅く、横に広がり、試料表面からは、オージェ電子、2次電子、反射電子、X線などが出る。これらを選択的に検出し、電気信号で濃淡像として観察すれば、いわゆる走査形電子顕微鏡となる。

しかし、ビーム径が加速電圧に依存しているので、低加速電圧になるにつれビーム径は大きくなる。これは横空間分解能の低下を意味し、観察手段としては都合が悪い。

電子顕微鏡で重要なのは電子線源である。電子線源を大別すると、タングステン (W) や六硼化ランタン (LaB₆) などを用いる熱電子源と、電子の電場放出 (Field Emission) を利用した冷陰極電子源とがある。これら2つの電子源から出る電子の性質は根本的に異なる。すなわち、図52のように、熱電子源の場合、電子のもつエネルギーは個々に異なるため、対物レンズで絞ったとき、いわゆる色収差による焦点面でのぼけ量が多い。従って、横空間分解能は2 KeVで10nm～20nm程度で

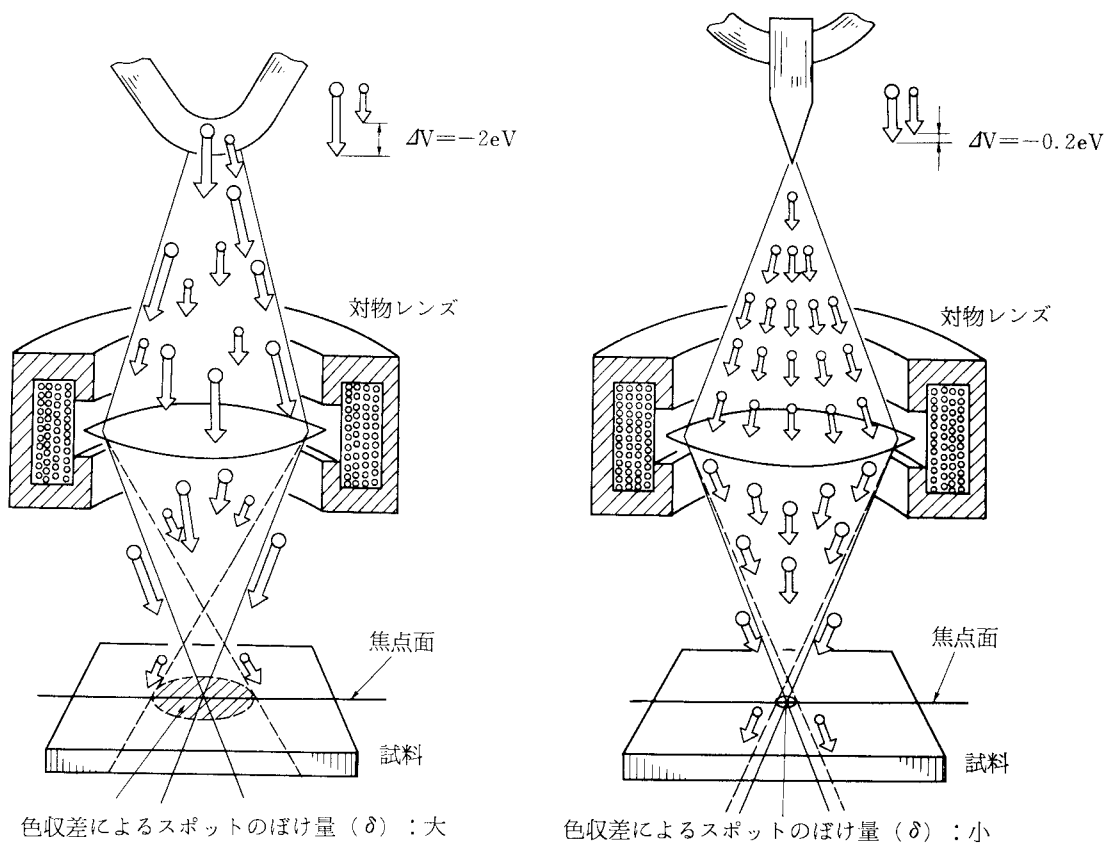


図52 電子線源の差異と色収差 (渡辺他)

ある。これに反して、冷陰極電子源の場合、電子のもつエネルギーがほぼ同じにそろっているので、対物レンズで絞ったときの色収差も少く、焦点面でのぼけ量は小さい。従って横空間分解能を2 KeVで5 nm以下とすることができる。

② 電子の電場放出の利用

1972年、NBSのR.D.ヤング博士らによって開発された「トポグラフィナー」と呼ばれる観察装置が、電子の電場放出を利用した代表的なものである。この装置の心臓部は図53のような構成になっている。 4×10^{-10} Torrの真空下において、試料表面(アノード側)とエミッターとの間隔を常に200 Åに保って表面を三次元的(トポグラフィック)に観察するものである。

エミッターは、直径0.1mmのタングステン線で、その先端はエッチングにより鋭い針先を有するよう加工されている。針先の先端半径によって横空間分解能は制約されるが、半径100 Åのとき、分解能は200 Åになるという。

図54はエミッターとアノード(試料表面に対応)との間に一定のエミッタ電圧をかけたときの電場と等電位線を示す図である。高真空下におかれているとき、エミッター表面からとび出した電子は電場ベクトル線に沿ってアノード側へ走る。エミッション電流一定のときのエミッタ電圧とエミッタ・アノード間距離の関係は、図55のようになる。ヤングらがトポグラフィナーで利用している関係は図55のFOWLER NORDHEIMと書かれた領域で、距離とエミッタ電圧は直線的比例関係にある。

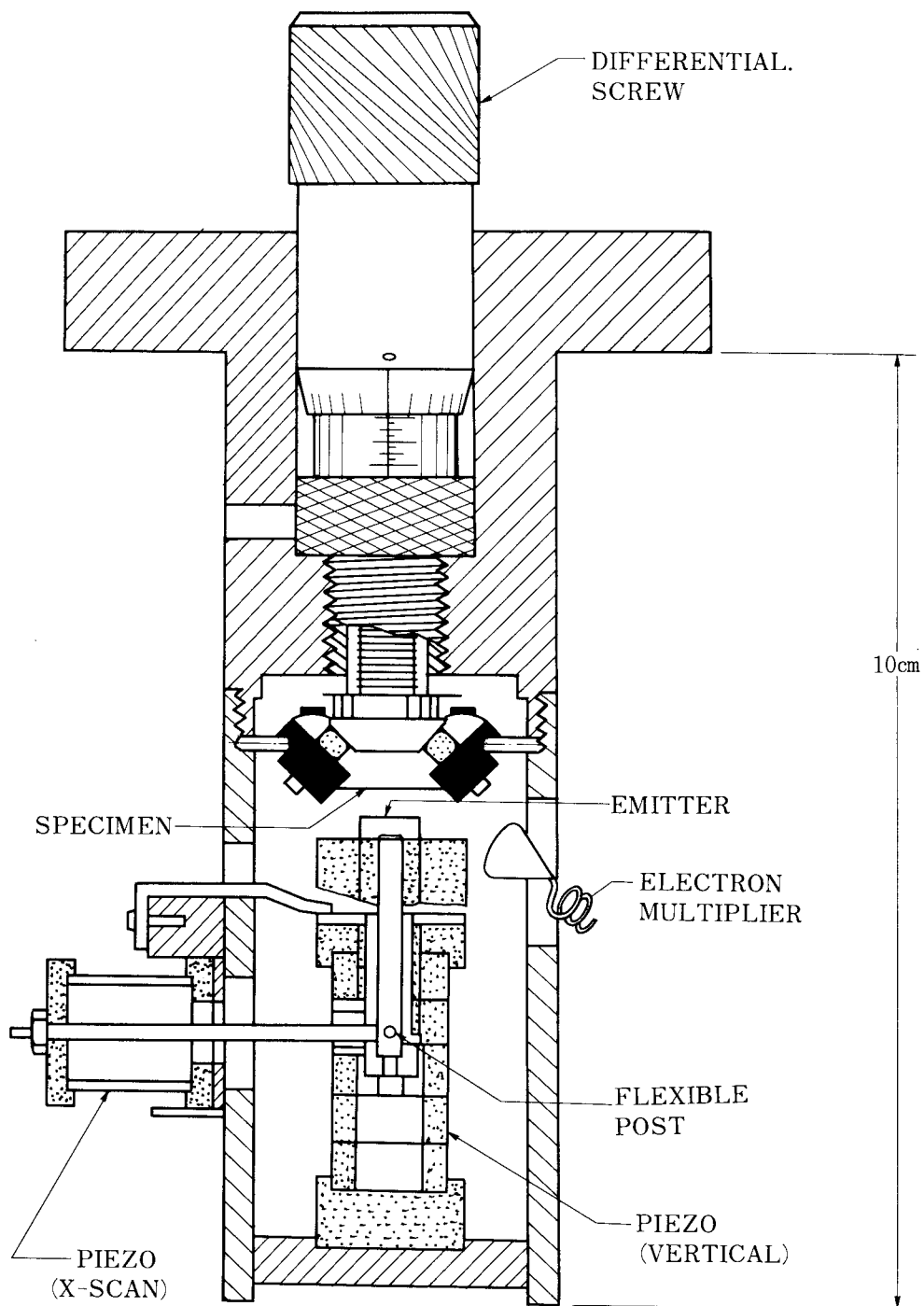


図52 トポグラフィナーの検出部

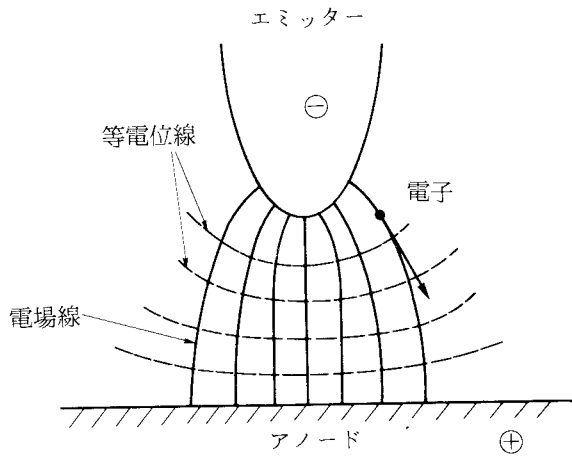


図54 電場と等電位線図

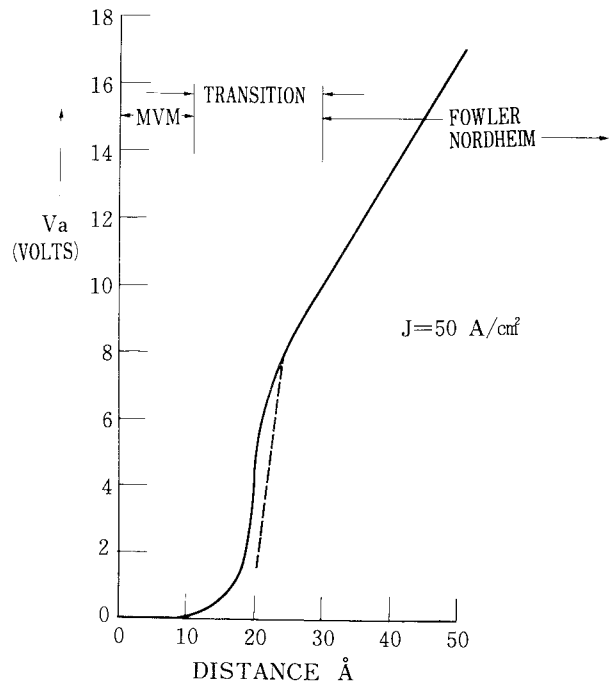
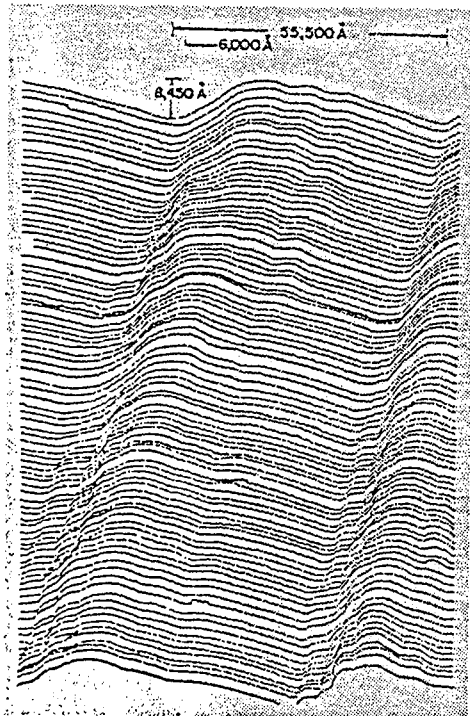
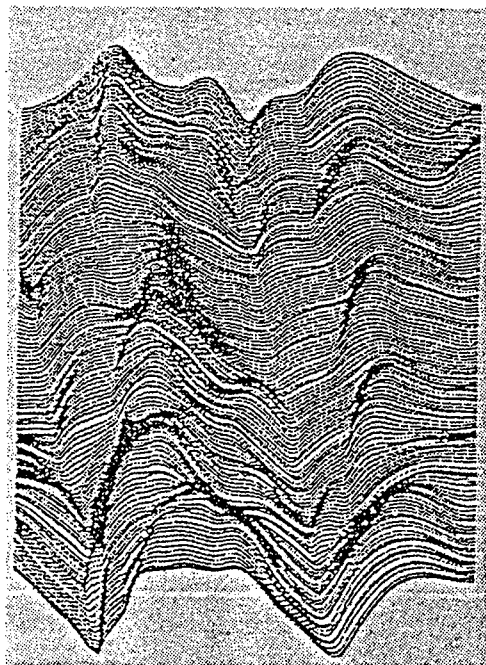


図55 エミッタ電圧と距離の関係
(電流一定) (ヤング他)



(a)



(b)

図56 トポグラフィナーによる測定例

図56はヤングらによるトポグラフィナーで観察した回折格子の形状を示す測定例である。図56(a)は格子が正しく加工されている部分の形状であり、同図(b)はその加工が乱れている部分をオシロスコープに表示し、記録した結果である。

プロトタイプとして作られたトポグラフィナーの空間分解能は縦方向で30 Å、横方向で4000 Åであるが、横の空間分解能を200 Åにまで向上できる、といわれている。

③ 電子のトンネリング現象の利用

トポグラフィナーの装置を発展させ、エミッターの針先をさらにアノード側（試料表面）に近づけ、互いの電極間を約20 Å以下にすると、電子のトンネリング現象が起こる。すなわち、先の図55において、距離が20 Å以下の領域での現象である。1982年、G.ビンニグとH.H.ローレンは、トンネル電流が距離変化に強く依存していることを利用して、走査トンネル（効果）顕微鏡（STM）を開発し、表面の原子配列をトポグラフィックに観察することに成功した。

トンネル電流と電極間距離との間の関係は、電子の加速電圧に比べ仕事関数が大きく、平行電極という条件のもとで、次のように表わされる。

$$J_T \propto \frac{V_T}{S} \cdot \exp(-A\phi^{1/2}S)$$

J_T : トンネル電流

V_T : 作用電圧

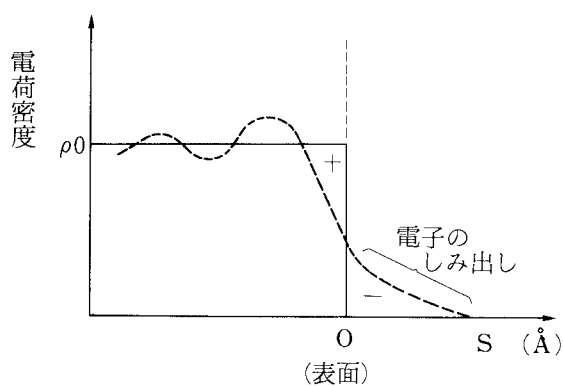
S : 電極間距離

A : $A \approx 1.025(\text{eV})^{-1/2} \cdot \text{\AA}^{-1}$

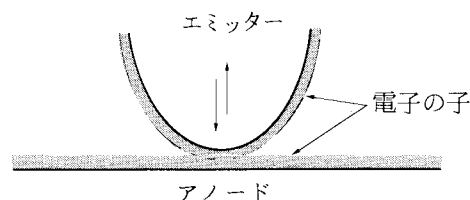
ϕ : 仕事関数 (electrode work function) の平均値

この式から、電極間距離 S が Å オーダで変化しても、 J_T の急激な変化が生じることが予測できる。

電子のトンネリング現象を図式的に表現すると、図57(a)、(b)のように説明できる。一般に、固体表面において図57(a)のような表面電気2重層と呼ばれる領域が構成されており、電子のしみ出しが生じている。このような固体表面には電子の雲の状態が存在し、図57(b)のように鋭い針先と試料表面を互いに接近させると、一部分で電子が自由にとび回ることができる状態となる。これを電子の



(a) 表面電気2重層



(b) 電子のトンネリング

図57 電子のトンネリング現象

トンネリング現象といい、弱い作用電圧をかけておけばトンネル電流が検出できる。トンネル電流は表面に極微小なでこぼこがあっても急激に変化する。

トンネル電流が一定になるように作用電圧を一定にして、Z軸方向（縦方向）に負帰還をかけ、そのZ軸方向の動きを観察すれば、表面のトポグラフィを表す微小なでこぼこを観察できる。ただし、距離変化とトンネル電流は直線的比例関係にはない。

STMの空間分解能は縦方向で最高0.5 Å、横方向で最高5 Å、感度は2 Å/Vと言われ、現在、世界で最高の横方向空間分解能を発揮するものである。

資料一 1 . 真円度測定における各種判定方法

1 最少外接円法 (Minimum Circumscribed Circle)

最少外接円法は、記録図形を囲む最少外接円を判定板で求めて基準とし、この外接円と同心で記録図形に内接する最大内接円との半径差で真円度を表示する。(アメリカ国家標準ANSI B89.3.1)

この判定方法は、穴と軸を区別して測定する場合、軸の真円度測定に用いられている。しかし、この方法では最少外接円が必ず一つであるとは限らず、複数の最少外接円がある場合それぞれの外接円に対する異なった真円度の値が読み取れる。このように上記の定義では一義的に値が決まらないときもある。

主に同軸度、直角度測定等のデータとして用いられる。

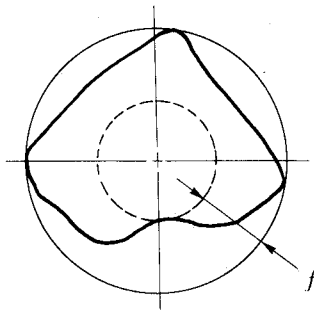


図-29

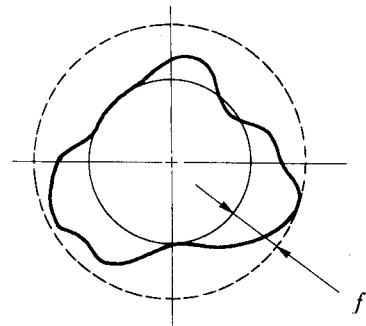


図-30

2 最大内接円法 (Maximum Inscribed Circle)

最大内接円法は、記録図形を含む最大内接円を基準とし、この内接円と同心で記録図形に外接する最少外接円との半径差で真円度を表示する。(ANSI B89.3.1)

この判定方法は穴と軸を区別して測定する場合、穴の真円度測定に用いられている。

この方法も最少外接円と同様の特徴がある。

3 最少領域中心法 (Minimum Zone Center)

最少領域中心法は、記録図形に外接及び内接する二つの同心円の半径差が最少となる中心を求め、

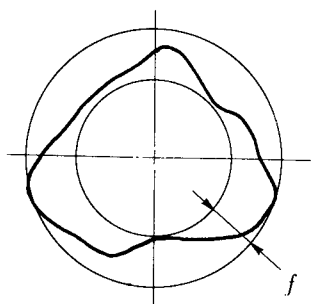


図-31

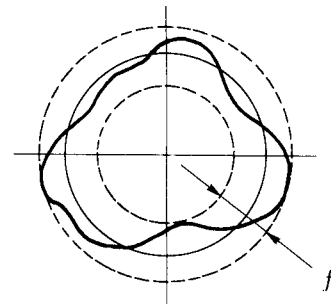


図-32

その半径差で真円度を表示する。(イギリス標準 BS3730)

JIS B-0621-1984「幾何偏差の定義及び表示」ではこの方式を採用している。

この方法は外接円中心法及び内接円中心法と異なり一義的に値が決まる性質を持っているが、中心を求める事は實際上非常に時間を要する。また偏心されて記録されている図形を読み取る場合には記録歪みによる誤差が出ることや、読み取り値の個人差が大きい測定物の傷の影響を受けやすい等、種々の問題点を持っている。

4 最少自乗中心法 (Least Squares Center)

最少自乗中心法は、記録図形内に中心を持ついろいろな半径の真円を考え、この円と記録図形との差、すなわち誤差の自乗の全周の総和が全ての円の中で最少となるものを基準円とする。この基準円と同心で記録図形に外接および内接する円の半径差で真円度を表示する。(BS 3730)

この判定方法は自動偏心補正演算により求められ、最少外接円法及び最大内接円法と異なり一義的に値が決まる性質を持っており、測定物の傷の影響を受けにくいいためデータムの決定法としても非常に有効である。

これらの種々の判定方法はそれぞれに特徴があり、どの判定法を用いるかは測定する部品の用途、目的また社内規格や、納品や受入等の関連会社間の条件等によって決められる。

JIS規格では最少領域法を規定しているのでその他の判定法によって値を求めた場合にはその判定方法を明記しなければならない。それは、それぞれの判定法によってわずかであるが真円度の値が異なるからである。

最少自乗中心法の場合は、自動偏心補正装置を用いて中心を記録中心と一致させる。

その他の判定法の場合でも自動偏心補正を用いて、まずは最少自乗中心法による形状図形を描かせ、その後に判定板でそれぞれの判定法による中心位置をずらし読み取る。これは偏心記録誤差を小さくするために行う。