

寸法測定精度の限界

大阪大学工学部教授 築 添 正

はじめに

精密加工において、精度ならびに性能に対する要求がきびくなるとともに、寸法測定技術はますます高精度化の傾向にあるということが出来る。特に最近、精密測定へのエレクトロニックスの導入は、電子部品の開発、変換器の改良、ノイズ処理による電氣的増幅の高感度化などとあいまって精密測定の精度、性能にいちじるしい向上をもたらした。現在、寸法測定精度の限界がおおよそその線まで行っているかを、実際の測定機器について考えてみたい。

1. 読取り精度の限界

1.1 眼の分解能

測定機器の目盛読取り方式、特に測微接眼レンズの視野内や投影式スクリーン上での目盛読取り方式と分解能の関係を図1に示す。これらは人間の眼の網膜の視細胞の大きさ(約0.04mm)から決まってくることであって、たとえば(a)図のように一つの線上に他の線が重ねて置かれたとき、重なっているか離れているかの判別には、少なくとも刺激されない1列の視細胞を間にはさんで結像される必要がある(図2(a)参

照)。したがって明視距離250mmにおいて約0.06mm(視角にして50′)が分解能となるが、実際には線の鮮明さや照明の条件によって図のように眼の分解能は約0.1mm(80′)程度であるということになる。

以上は二つの点または線の場合であるが、図1(b)のように1本の線が連続であるか不連続であるかの判定、いいかえると2直線のずれを初めて認知するためには、刺激されない1個の視細胞が間にはいる必要がない(図2(b)参照)。したがってこの場合の分解能は0.02mm(15′)最良状態で0.01mm(8′)となる。たとえばノギスのバーニヤにより1/50mmの読取りが可能となるのはこのためである。

1.2 光学器械の分解能

上述のように眼の分解能には限度があるのでそれ以上の分解能を必要とするときはルーペ、顕微鏡などが用いられる。たとえば図1(a)の単純重ね合わせ方式(simple superposition)において5倍のルーペを用いれば分解能は0.02mmとなり、(d)の対称線はさみ方式(symmetrical straddling)において35倍の顕微鏡を用いれば0.2μの分解能が期待できる。

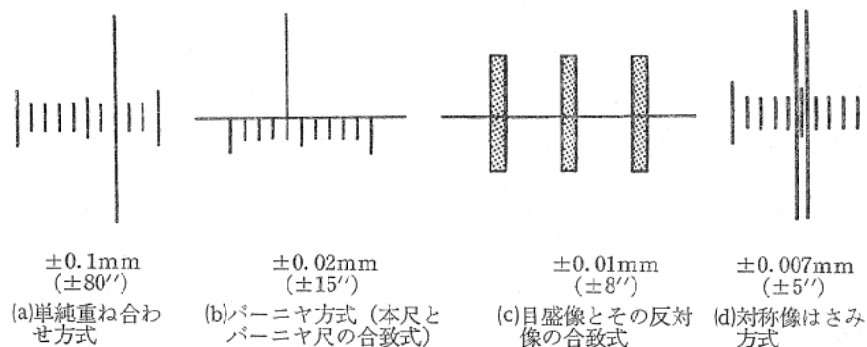
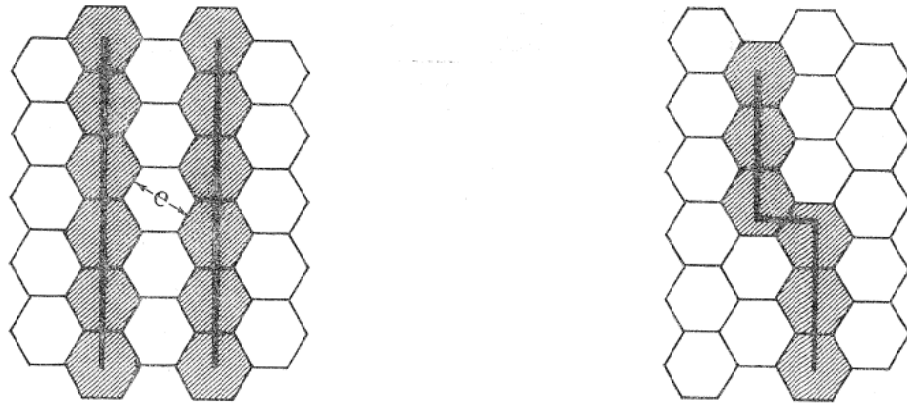


図1 目盛読取り方式と分解能



$$e \doteq 0.04\text{mm}$$

(a) 2点または2直線の分解

(b) 2直線のずれの認知

図2 視細胞と分解能

しかし光学顕微鏡の分解能にも、光の波動性による回折現象のため限界がある。Fraunhofer回折より誘導した顕微鏡の分解能は次式で与えられる。

$$a = 0.61 \frac{\lambda}{\text{N.A.}} \quad (1)$$

ただし a : 分解能

λ : 照明光の波長

N.A. : 対物レンズの開口数

上式は照明光が非可干渉 (incoherent) の場合であるが、可干渉 (coherent) のときは2倍となる。実際の顕微鏡の照明光はこの両者の中間であると考えられるから次式のようなになる。

$$a \doteq (0.5 \sim 0.8) \frac{\lambda}{\text{N.A.}} \quad (2)$$

油浸式対物レンズで N.A. = 1.3 程度のとき青色 ($\lambda = 0.4\mu$) に対し上式より分解能は $0.15 \sim 0.25\mu$ 程度となる。

眼の分解能が前述のように約 0.1mm であることから考えて、光学顕微鏡の倍率が1000倍程度までであることはこのためである。この壁を破ったものが電子顕微鏡であるが、両顕微鏡にはそれぞれ活躍の場の領域があって、両者ともその各領域において引続き性能向上のため発展が続いている。

1.3 読取り精度の限界

眼あるいは顕微鏡の分解能から考えた読取り精度の限界は前述のとおりであるが、寸法測定

の場合に種々の拡大機構を用いて、上記の限界の壁を破る種々の方法がある。これらを利用した現用の精密機器の精度限界にふれる前に、寸法測定精度の基礎である長さ基準 (メートルの定義) の精度限界、ならびに標準ゲージ (ブロックゲージ) の精度限界について述べることにする。

2. 長さ基準の精度限界

長さ基準としてのメートルの定義の再現性の精度について考えてみる。最近までメートルの定義の役目を果たしてきた国際メートル原器はいわゆる線基準であって、このとき目盛線の太さ ($6 \sim 8\mu$) ならびにその幾何学的正確さその他の点から、その精度の限界は 2×10^{-7} (1mにつき 0.2μ) 程度であった。これに対し1960年以降のメートルの新しい定義である光波基準によるとき、すなわち Kr^{86} 橙色線の波長を用いるときの精度は $\pm 1 \times 10^{-8}$ (1mにつき $\pm 0.01\mu$) まであげることができる。これは Kr^{86} の橙色線の波長は $0.605\,780\,21\mu$ と定義されているが、指定されたふん囲気ならびに測定条件のもとで再現するとき $\pm 1 \times 10^{-9}\mu$ のばらつき内におさえることのできることを意味している。

さらにこの Kr^{86} の波長測定精度の向上の試みは続いており、現状でのその精度限界は $\pm 1 \times 10^{-8}$ と $\pm 1 \times 10^{-9}$ との間にあるといわれている。

次にガスレーザ波長による光波基準の可能性について考えてみるのに、典型的な $0.6328\ \mu$ の $\text{He}^3\text{-Ne}^{20}$ レーザでは十分安定化が図られしかも真空中の波長 $0.6329914\ \mu$ の精度は $\pm 1 \times 10^{-7}$ 程度である。最近、計量研究所の発表¹⁾によれば $\text{He}^3\text{-Ne}^{22}$ レーザの赤外線 $3.39\ \mu$ の波長の安定化を図り $8 \times 10^{-11}/\text{h}$ の周波数相対安定度を得ている。

3. 標準ゲージの精度限界

寸法測定の際の標準として一般に用いられるものはブロックゲージである。すなわちコンパレータの零点調整、測定機器の校正用として、さらにはこれらの目的に用いられるブロックゲージ校正用のマスタブロックゲージなどが考えられる。前述の光波基準を指定されたふん囲気ならびに測定条件のもとで再現することの煩雑さを避けるために、その代用として製作された端面基準の長さ標準である。この端面基準であるブロックゲージの精度は、 $0\sim 25\text{mm}$ の AA 級のもので、JIS, Johansson 社規格とも $0.05\ \mu$ となっている。この値は国家規格あるいは会社規格として決められている値であって、もし労力と費用を惜しまないならばさらに高精度のブロックゲージを整備することも不可能ではない。Kr⁸⁶ の光波基準で厳密な絶対測定を行なえば、前述の $\pm 1 \times 10^{-8}$ の精度から考えて $0\sim 25\text{mm}$ のブロックゲージを $\pm 0.00025\ \mu$ までの高精度検定ができるはずである。一般にブロックゲージメーカーはこのような高精度の検定をした社内用のマスタブロックゲージによって、A 級以下のブロックゲージ製品をゲージコンパレータによって検査しているのが現状である。

ただし上述のように $0\sim 25\text{mm}$ のブロックゲージを $\pm 0.00025\ \mu$ までの高精度で、Kr⁸⁶ の光波基準により絶対測定することはきわめて困難な作業である（後述の 5. 寸法測定精度の限界に影響を及ぼす諸要因の項参照）。たとえば測定時の温度は、ブロックゲージの熱膨張係数を $11.5 \times 10^{-6}/\text{deg}$ とすると約 0.002°C まで知られていなければならない。また光波干渉計でブロックゲージを絶対測定するとき、たとえば水晶定盤上にリングングさせて行なえばいわゆる位

相差補正が必要となる。この補正值は実験的に求めねばならないがその大きさは $0.04\sim 0.08\ \mu$ 程度で、上記のように $\pm 0.00025\ \mu$ の高精度に対して測定時の温度とともに大きい障害となる。

これらのことから、現在のブロックゲージの精度限界は、短いもの (20mm 程度) で $\pm 0.01\ \mu$ (10^{-6} 、長いもの (200mm まで) で $\pm 0.02\ \mu$ 以下 (10^{-7} 以下)、さらに長いものは 10^{-7} であるといわれている。

4. 現用の精密機器の精度限界

精密機器の精度限界を論ずるには、その機器が採用している拡大機構の達しうる精度限界を推定すべきである。しかしここでは、現用の種々の精密機器のうちから精度が $0.01\ \mu$ 程度またはそれより高いものの実例を表 1 にあげて、精度がどの程度の限界まで達しているかを紹介するにとどめる。

いずれにしても、これら $0.01\ \mu$ 程度またはそれ以上の精度を問題にするときは、光波干渉計式あるいは電気マイクロメータ式のものが有利であることが表 1 から推察される。今後きわめて高い精度を望むとき、この方面に開発の余地があるものと思われる。

5. 寸法測定精度の限界に影響を及ぼす諸要因

前述のように測定精度がきわめて高くなるときには、一般の測定するとき特に考慮をばらう必要のない要因でもそれが精度に微妙に響いてくるものである。たとえば表 1 中の Talystep I では、蒸着膜などの厚さを対象とすることが多いので表面あらさはきわめて小さいものであるが、それでもフィルタ回路により高周波成分（表面あらさ）を除いて平均値を出すようにしている。

寸法測定精度の限界を考えると、それに影響を及ぼす諸要因として ASTM のハンドブックでは次のものをあげている。²⁾

1. 標準ゲージ関係の要因
 - (a) 精度検査の難易
 - (b) 形状の適合性

表1 現用の高精度精密機器

	製造会社	機器名	倍率	最小目盛	精度	備考
電気マイクロメータ	Pratt & Whitney 三 豊	New Twin Head Millionth Comparator ウルトラコンパレータ	×110,000	0.025μ 0.01μ		再現性0.006μ
空気マイクロメータ	Sheffield	Precisionaire with Pneumatic Amplifier	×100,000	0.05μ		
マイクロメータ	Johansson	Mikrokator S 10-11形		0.02μ	±2.5 %	
オプチメータ	Zeiss Jena	プロジェクション オプチメータ0.2 μ		0.2μ	±0.05μ	
ゲージ コンパレータ	Federal 社 測定室設置 Conventry	ゲージ コンパレータ レベル ゲージ コンパレータ		0.005μ	0.025μ	機械-光学的 拡大機構 高感度の水準器 を利用
光波干渉計	Zeiss Jena Zeiss (西独) オリンパス・黒田 Culter-Hammer	Interference Comparator Block Gauge Interferometer 干渉測微機 A I L レーザ干渉計		0.1μ (0.05μ) 0.05μ	±0.02μ 0.02μ 0.02μ ±0.08μ	デジタル測長 機
	Johansson オリンパス Taylor-Hobson	Multimi Interference Microscope MB I 繰返し反射干渉計 Talystep I	×1000,000		±0.001μ	分解能0.0005μ 分解能0.0005μ (電気マイクロ メータ式)

- (c) 熱膨張係数
 - (d) 定期検査の間隔
 - (e) 経年変化
 - (f) 弾性的性質 (弾性係数など)
 - (g) 支持方法 (Airy 点)
2. 被測定物関係の要因
- (a) 形状精度
 - (b) 表面のあらさ, うねり, 表面きずなど
 - (c) 弾性的性質 (弾性係数など)
 - (d) 清浄度
 - (e) 表面特性 (残留応力層, 加工硬化層など)
 - (f) 温度の均等性
 - (g) 自重による変形
 - (h) 支持方法
 - (i) 被測定量の明確化
 - (j) その他被測定物に関する種々のデータ
3. 測定器関係の要因
- (a) 所要精度に見合う拡大倍率
 - (b) 使用状態での拡大倍率の検定
 - (c) 摩擦抵抗, バックラッシュ, ヒステレシス, 零点調整など
 - (d) 測定範囲に見合う拡大機構への入力
- (電氣的, 空氣的, 光学的入力)
- (e) 被測定物, 標準ゲージそれぞれの場合の接触の正確さ
 - (f) 測定範囲内での測定力の均一性
 - (g) 測定面に摩耗その他の損傷があるときの接触の正確さ
 - (h) すべり面に摩耗その他の損傷があるときの運動の正確さ
 - (i) 被測定物重量による測定器の変形
 - (j) 補助具の精度 (ワイヤ, ローラ, アングルプレートなど)
 - (k) 接触部分の精度による誤差の拡大
 - (l) 所要精度に見合う再現性ならびに読取りやすさ
4. 観測者関係の要因
- (a) 練習
 - (b) 熟練
 - (c) 精度認識の素質
 - (d) 個人誤差に対する過信
 - (e) 個人誤差に対する謙虚さ
 - (f) 所要精度に見合う最小コストを考える能力
 - (g) 精度評価の知識
 - (h) 所要精度に見合う測定器と標準ゲージの選択能力

表2 形状精度, 表面あらさおよび測定力

	単位 μ				
要求される寸法測定精度	0.250	0.125	0.075	0.050	0.025
真円度と円筒度	0.125	0.075	0.050	0.025	0
うねり	0.125	0.050	0.025	0.025	0
表面あらさ R_a	0.063	0.030	0.020	0.010	0.005
条こんの深さ(R_{pv})の平均値	0.300	0.150	0.100	0.050	0.025
測定力(g)	230	85	40	15	5

- (i) 測定に要するコストの認識
5. 環境関係の要因
- (a) 標準温度20°C (68°F)
- (b) 標準ゲージ, 被測定物, 測定器3者の温度の均等性
- (c) 光源, 暖房器, 日光, 人間などからの放射エネルギー
- (d) 恒温装置のヒステレシス
- (e) 循環空気が直接あたるときの影響
- (f) 被測定物を手でつかむときの体温の影響
- (g) じんあい, 振動
- (h) 採光, 照明の方法
- (i) オートコリメータなどを用いるときの光線のゆれ
- (j) 測定室内の温度分布

上の分類方法は次の5項目からなっていて, SWIPE なる呼び方を行なっている.

標準ゲージ	S = standard
被測定物	W = workpiece
測定器	I = instrument
観測者	P = person
環境	E = environment

これらの中で, 寸法測定精度の限界を考えると特記すべきものを次にあげる.

(1) 2(a), (b)項で述べている被測定物の形状精度, 表面あらさなどについて, 内径測定に対し NBS の推奨値を表2に示す. なお寸法測定精度に及ぼす表面あらさの影響については筆者の発表がある.^{3), 4), 5)}

(2) 5(a)~(f)項で述べている温度の影響は, 前にもふれたようにきわめて重要である. これより精密測定室の温度制御が必要となるが, どの

表3 精密測定室の実例

会社名	所在地	測定室の温度
Federal	Povidence(Rhode I.)	20±0.05°C
Moore	Bridgeport (Conn.)	20±0.05°C
Sheffield	Dayton (Ohio)	20±0.03°C

測定室の湿度はいずれも40~50%

の程度までの恒温室が実用されているかを表3に示す.

(3) 5(g)項で述べているじんあいと振動に関しては高精度測定になるほどゆるがせにできない問題である. 倍率が高くなればきわめて小さい振幅の振動でも測定精度に影響することは, たとえば光波干渉じまの観測などにおいて経験することである. また測定子端面が被測定物表面からじんあいその他の凝着物を拾い, その後の測定精度が急に悪くなることもある.

(4) 上の SWIPE には特にとりあげられていないが, 空気の温度, 気圧, 湿度, CO₂%などは, 光波干渉計によるブロックゲージの絶対測定の際には測定状態を標準状態(20°C, 760 mm Hg, 水蒸気圧 10 mmHg, CO₂ 0.03%)に補正する必要がある. これらをそれぞれ測定して波長を求めるときの補正誤差は $\pm(1\sim2) \times 10^{-7}$ 程度といわれている⁶⁾. Kr⁸⁶ の光波基準は真空中という条件のもとに $\pm 1 \times 10^{-8}$ の精度を得ている.

おわりに

以上述べてきたものはおもに, 寸法測定精度に及ぼす幾何学的輪郭の影響に関するものであった. しかしながら精密加工物表面の性状としてこれら幾何学的輪郭のほか, 物理的・化学

的・金属学的性質の考慮が寸法測定に2次的要因となることは、精度向上に伴い忘れてはならない。

また精密加工においてそれが部品として絶対測定値を必要とする場合（たとえばブロックゲージ）と、部品が組立てられた状態で加工物精度を必要とする場合（たとえば真円度測定機の回転軸と軸受）とで、おのずから寸法測定精度の考え方が異なってくる。すなわち後者の場合、たとえば軸と穴が組立てられた状態で精密加工物として要求されるきびしい精度を現物合わせにより出しうるものが考えられる。

参 考 文 献

- 1) 田幸, 大井ほか: 6th IQEC (1970) にて報告, Jap. J. Appl. Phys. に発表予定.
- 2) American Society of Tool and Manufacturing Engineers: Hand book of Industrial, Metrology A.S.T.M.E., New Jersey(1967)17.
- 3) 築添: 43年度精機学会春季大会前刷 (1968) 255.
- 4) 築添: 44年度精機学会春季大会前刷 (1969) 93
- 5) 築添: 45年度精機学会春季大会前刷 (1970) 7.
- 6) 蟻馬: 寸法精度の制御——ブロックゲージを中心に, 44年度精機学会春季大会シンポジウム資料 (1969) 46.

