



Title	Newton's Ringsを標点とした変位測定器の精度について
Author(s)	池田, 郁雄; Ikeda, Ikuo
Citation	北海道大學工學部研究報告, 23, 111-126
Issue Date	1960-06-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40666
Type	departmental bulletin paper
File Information	23_111-126.pdf



Newton's Rings を標点とした変位 測定器の精度について

池田 郁雄

(昭和35年3月10日受理)

On the Precision of Displacement Measurement when the Marking Points of Newton's Rings are employed

Ikuo IKEDA

Abstract

The present method of measuring a small displacement is devised for long periodic and precise measurements. The apparatus is constructed from three separated parts, i.e. making points on the specimen, measure, and optical observation system. Two small convex lenses having large curvatures are used for the indication of making points. The measure is constructed from a pipe of fused silica and two plane plates of objective micrometers (Fig 1). The observation system does not include any special device. A reflecting microscope is used for the production of Newton's rings and for the reading of the pattern or for the purpose taking its picture.

The characteristics of this method are:

1) the center of Newton's rings can be detected most precisely than any other mechanical point. Then, a microscopic indication of the making point can be expected. The probable error of the value indicating the center of Newton's rings is smaller than 0.01μ .

2) Newton's rings appear on the face of the microscopic objective micrometer. Therefore, the difference of magnification of microscope can hardly be a reason of introducing errors.

3) since the measure has not any moving part, no backlash is included. The high precision of the measure can be maintained during the whole period of observation.

The precision of this apparatus was extremely high, when microfilm and photo-micro-comparator were applied for recording and analyzing the data, and the calculation was strictly performed by the method of least squares. The probable errors of the resultant values were within 0.2μ .

1. はしがき——変位の測定

長さの変分即ち変位を測るものには、通称歪み計と伸び計とがある。これは標点間隔の長さで区別されているが本質的なちがいはない。しかし歪みとか伸びとか云われるものは標点間隔 L に対する変位量 ΔL の比 $\delta = \Delta L/L$ で表わされるから、同じ歪み δ を有するものでは L の

大きい程 ΔL も大きくなり、従つて ΔL の読取りが容易となる。他方、標点間隔が長いことはその間の平均的な歪みのみを知ることになり不均質な材質の部分的な歪みを知ることにはできない。歪み計と伸び計とを区別する理由は、歪み計にあつては微小な変位を読み取る拡大機構が主要な問題であるが伸び計ではむしろ内蔵する標準尺度の熱的又は弾性的な変形による誤差を考慮することが必要であり、拡大機構には歪み計程の困難な問題がないところにある。

ここに述べる方法は、長期間の測定に於いて多数の試料の標点変位を精密に測るよう計画されたもので、試料の標点間隔は 5 cm 以上 1 m 以内を適當とする。従つて一般には伸び計に属する。

そこでこの目的に対して要求される測定器性能の問題点を列記してみる。

- 1) 内蔵する測定標準尺又は測定比較用尺の安定性
- 2) 測定器可動部分の遊びによるガタ及び摩耗の対策
- 3) 標点の正確な指示
- 4) 拡大機構等計器要素の安定性
- 5) 多数の試料を長期間平行して測定するための測定器性能

現用の各種の測定器、主に機械的測定器について以上の諸点を考察すると

1) については、例えば試料と同一温度係数の材質を用いて温度による影響を相殺する方法或いは温度係数の小さい材料で更に充分に固化したものをを用いる方法等、一般測定器に於ける対策と同じである。

2) 測定器内部で標点間隔の変位と対応する指示を得ようとする可動部分を避けることはできない。機械的方法では微少なりともガタ backlash を生じ、電気的方法では、ヒステリシス等となり、又クリープとなつて現われることもある。

3) 標点は試料表面にあけた切り込みやダイヤモンド刃による刻線を用いるが、標点又は標線には拡りがあるから標点を幾何学的点として扱うことはできない。従つて同一の標点でもそれを指示する読取値には大きな誤差の含まれる可能性がある。例えばメートル原器では、標線の巾が $6\sim 8\mu$ あり、しかもその不規則性から 0.1μ の精度以上を期待することはできないと云われている。いわんや、一般の計器に於ける標線位置の読み取り誤差の更に大なることは容易に知られることである。一般には測定器の精度をもつて、それを適用した場合の測定の精度となし得ない。そこで測定器を試料に固定することによつて、この標点読み取りの誤差を僅少に止め、或いは無視する方法が多く行なわれている。又最近では標点と測定器測定端に円形穴と球又は円錐頂の組合せを適用したものもあるが、この場合も測定誤差は測定器自身の精度に較べて尚大きいようである。

4) 拡大率は拡大機構の検定によつて保証されなければならないが、長期の測定では変動を生じ、測定のための接触圧のちがひ等もあり誤差の原因となり易い。又光学的測定法ではピントの合せ方のちがひ即ち映像面の結像の焦点深度よりのずれにより拡大率も変化し精度も低

下する。

5) 測定器を多数の試料に適用するためには測定器と試料との固定を許されない。従つて測定のために標点位置の指示が変り、又測定圧等の測定条件も異なるので測定器の固定できない場合は甚だしく精度を損う。機械的方法では測定器と試料の接触により、又光学的方法では測定器の視差により余り高い精度は期待できない。

本論文に於ける方法は、光学的方法であるが、光学装置としては通常の反射顕微鏡が用いられ、測定標準尺を内蔵する。測定は被測定標点に直接測定尺を重ねて標点と測定尺上の目盛とを対応させ、それを顕微鏡でよみると云う単純な方法で行なわれる。しかし試料上の標点として試料に貼付けた大曲率凸レンズによる Newton's rings が用いられていて、それによつて上記の機械的並びに光学的方法の欠点を同時に除き、確率誤差 0.2μ 以内と云う高い精度を得ている。

2. 装置及び実験方法

装置は試料に於ける一対の指標部と、測定標準尺と、試料標点間の長さを測定尺目盛上に対応させ且つ読みとらせるための光学系との3個のそれぞれ独立した部分からなつている。

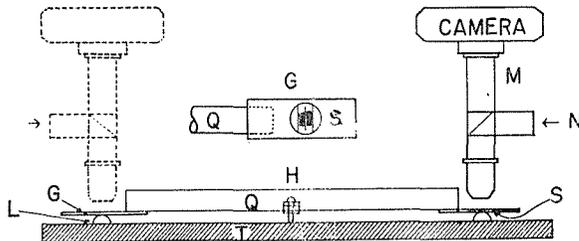


Fig. 1. Method of measurement

- G: Glass plane plate of microscopic objective micrometer
- M: reflecting microscope
- Q: pipe of fused silica with two micrometers at the both ends, (measure)
- S: objective micrometer
- N: light from natrium lamp
- H: support of the measure
- L: lens to produce Newton's rings
- T: specimen

指標部は曲率の大きな凸レンズを曲面を外にして試料に貼つたものであるが、貼付けには2個の標点用レンズの間隔が 0.1 mm 以内の精度で一定に保たれるように、Fig. 2 の如き装着棒が用いられた。使用したレンズは曲率半径が 2.1 mm 乃至 2.4 mm のものであつた。

測定標準尺は石英管 Q の両端に顕微鏡用対物マイクロメータ S (以下単にマイクロメータと呼ぶ) を次の方法で固定したものである。

1) 先ずよく磨かれた平面板実験台上にオプチカル・ベンチを置き、2)

この平面板上の一定間隔にマイクロメータを目盛面を下にして並べる。3) 次にオプチカル・ベンチ上でスライドする顕微鏡を覗き乍らマイクロメータ目盛線群がスライド方向と直角になるように且つ又、両端の目盛刻線群の中心を横切る直線がオプチカル・ベンチと平行になるように揃える。4) 石英管をオプチカル・ベンチと平行に、マイクロメータ硝子板上に静かに載せる。5) 接触部を強力且つ安定な接着剤 (実際には重合によつて固化する接着剤が

使われた)で固定する。実際に作られたもの
の一例は長さ 60.5 cm, 重さ 160 gr であり,
又長さ 102 cm のものの一例では 230 gr であ
つた。

使用に際して測定尺の重心部は支持器 H
で軽く支えられて, マイクロメータ目盛面を
下面にして測定点即ちレンズ上に静かに載せ

られた。これによつて, マイクロメータの目盛面上にレンズによる Newton's rings の生ず
る状態が作られ, 次に述べる光学系の適用によつて, Newton's rings とマイクロメータ目盛
刻線とが同時に同一視野内に見出されるのでこれを測定又は撮影するのである。

光学系は普通の反射顕微鏡 M とその写真撮影装置及び単色光源 N である。光源には反射
顕微鏡用 6 Volt 豆球と赤フィルターの組合せも用いられたが, 後に述べる理由によつてナト
リウム・ランプが最も効果的に用いられた。撮影は高精度の読取値を得るためにも, 又長期観
測の時期的, 環境的な誤差の変化を防ぐためにも望ましい。

撮影したフィルムの解読には, 光電測微計による読取値に最小二乗法を適用した場合と,
フィルムを更に引伸器によつて乾板に拡大して, それを光電測微計で解読した場合と, フィル
ムを幻灯機にかけて拡大し読取つた場合とあつたが, 又撮影によらずに, 直接顕微鏡視野内
で Newton's rings 数個より中心位置を平均的に求めた場合もあつた。Fig. 6 に示す例は変位の
原因量 (温度) の測定の精度が低いから, 最後の方法で標点位置を求めて十分であつた。

3. 測定器要素の精度

3.1) Newton's rings の精度

上記の如く, 本方法では標点として試料に固定した 2 個の大曲率凸レンズと測定尺両端の
平面硝子板とによつてできる Newton's rings を用いる。レンズ及び平面硝子板は工作技術上
極めて高精度に得られる製品であり, 従つてこの二つの面によつてできる Newton's rings は
極めて精緻である。平面硝子板をレンズ面に接触又は極めて接近させて, 硝子板のレンズと反
対の側から光を入射させると, 接触面に Newton's rings が現われるが, その中心は硝子平面
とレンズ面との切点であるから, これは又常にレンズの曲率中心からこの平面に下した垂線の
足を示す。そして若し二つのレンズ面と, その二つのレンズ面にまたがる一つの平面を用いる
ならば, この平面が二つのレンズに切しているときは, 平面の傾きには関係なく, 切点即ち
Newton's rings の中心の間の距離は常に一定となる。従つて Newton's rings の中心間距離を
もつて標点間距離とすることが可能となる。使用する凸レンズの曲率半径が等しいならば, こ
の標点間距離はレンズ曲率中心間距離と等しい。

標点指示の精度は, 硝子平面の平面度が完全であれば Newton's rings の読み (Fig. 3 の直



Fig. 2. Device for the setting of lenses

Q : pipe of fused silica

p : holes with the diameter of 2.25 mm

l_0 : standard distance between the two
marking point

B : brass plate

線 XX' と rings との交点の読み) から得られる rings の中心位置の精度と等しくなる。平面の状態の誤差については測定の精度の項でもふれるが、ここでは実験に基づいて説明する。

Table 1 に示される実験例は大曲率凸レンズに硝子平板を載せて、Fig. 1 と同じ光学系で撮影したものを、光電測微計で読みとつたものである (Fig. 3 参照)。但し硝子平面にマイクロメーター目盛線を使用して顕微鏡の倍率を同時に測定且つ計算し、更にこれら Newton's rings のマイクロメーター目盛による読取値と比較させた。ここでは光電測微計による読取りについて詳述する。

Table 1 (A) は 35 mm フィルムの視野中心部の rings 10 本のうち第一次の ring を除いたものの光電測微計による読取値であり、その最小読取値 0.01 mm は光電測微計最小目盛の 10 分の 1 を目測したものである。従つて最下位の桁には測定器の誤差を含むものと思われる。しかも尚 Newton's rings 中心の位置が精度高く求められているのは Newton's rings の精度が測定器の精度よりもよいことを示すのかも知れない。そこでこのフィルムを更に写真引伸器によつて拡大して読取りを行なつたものが (B) である。光学系倍率を甚だしく大にしてもフィルムの分解能や引伸器、顕微鏡の歪、更に光電測微計の誤差等により、精度は倍率の割には向上していないが Newton's rings 中心位置のバラツキは (A) より更に少なく、光電測微計の最小読取単位 0.02 mm 以内に収まり確率誤差は 0.01μ 以下であつた。Table 1 (C) は Fig. 3 より直接マイクロメーターによる読取値である。マイクロメーターは較正されておらず、又読取りも直線目盛線に対して孤状の干渉輪を読み取る困難さをもつが、確率誤差 0.08μ の結果が得られているのは、以上の実験と共に Newton's rings の中心位置が間接に得られるものであるに拘らず極めて良好な標点であることを示すものと云えよう。

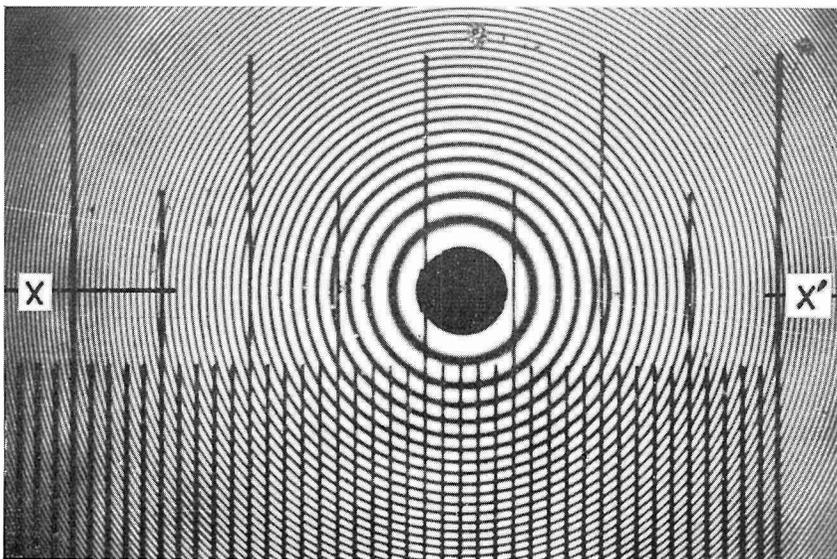
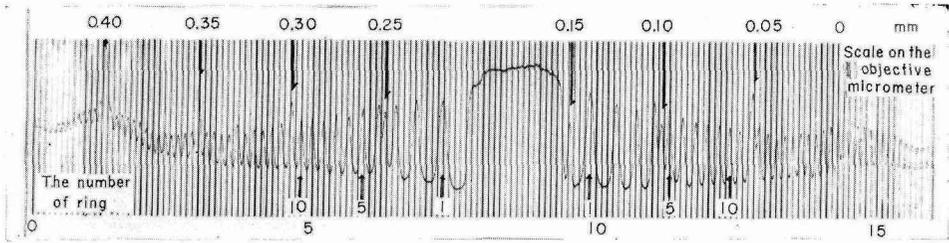
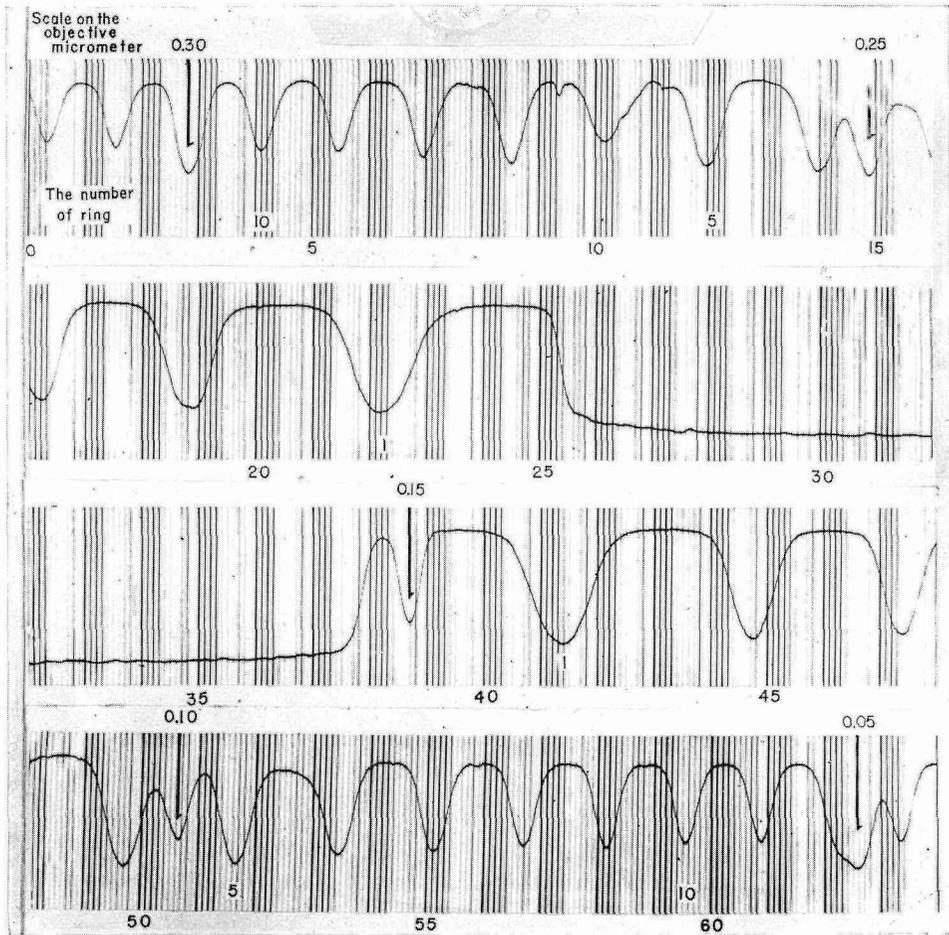


Fig. 3. Microscopic photograph of Newton's rings and micrometer scales



(A)



(B)

Fig. 4. Recorded papers enlarged from the film in Fig. 3 by the application of photomicrocomparator

- (A) the case of magnification of about 32.6
 (B) the case when the film in Fig. 3 was further enlarged
 The maximums of the curve in (A) correspond to the minimums of the curve in (B).

Table 1. Determination of the position and precision of the center of Newton's rings

(A) On the recorded paper of Fig. 4 (A)

The number of ring	Position of the intersection of the ring and straight line XX' in Fig. 3		Radius of the ring	Position of the center of rings
2	10.02	6.49	1.765	8.255
3	10.38	6.13	2.125	8.255
4	10.69	5.82	2.435	8.255
5	10.96	5.54	2.71	8.26
6	11.21	5.31	2.95	8.25
7	11.43	5.07	3.18	8.25
8	11.64	4.86	3.39	8.25
9	11.84	4.66	3.59	8.25
10	12.03	4.47	3.78	8.25

mean 8.2522

Probable error $r_z = 0.0008 = 0.025 \mu$

Magnification, $M = 32.663 \pm 0.014$

(B) From Fig. 4 (B)

The number of ring	Position of the intersection of the ring and straight line XX' in Fig. 3		Radius of the ring	Position of the center of rings
2	44.74	18.86	12.94	31.80
3	47.40	16.20	15.60	31.80
4	49.68	13.96	17.86	31.82
5	51.66	11.98	19.84	31.82
6	53.44	10.18	21.63	31.81
7	55.12	8.52	23.30	31.82
8	56.68	6.96	24.86	31.82
9	58.16	5.46	26.35	31.81
10	59.54	4.10	27.72	31.82

mean 31.813

$r_z = 0.00195 = 0.0082 \mu$

$M = 238.90 \pm 0.13$

(C) By a direct reading obtained from the circles of the rings on Fig. 3

The number of ring	Position of the intersection of the ring and straight line XX' in Fig. 3		Radius of the ring	Position of the center of rings
2	23.3×10^{-2} mm	12.3×10^{-2} mm	5.4×10^{-2} mm	17.9×10^{-2} mm
3	24.4	11.4	6.5	17.9
4	25.5	10.4	7.5	17.9
5	26.1	9.5	8.3	17.8
6	26.9	8.8	9.05	17.85
7	27.6	8.2	9.7	17.9
8	28.3	7.5	10.4	17.9
9	28.9	6.9	11.0	17.9
10	29.5	6.3	11.6	17.9

mean 17.88×10^{-2} mm

$r_z = 0.08 \mu$

Newton's rings の精度の高いことは簡単な考察でも理解できる。硝子平面に生じたこれらの干渉輪は見た所全く変形を感じない程完全な円形であり、その数は 100 に達するが、これらの輪の間隔は光の波長の半分以下である。そして更に一測定値の指示でなくて 10 個程度の輪からの推計値であるから 0.01μ の精度を持つことも首肯できよう。参考迄に Table 1 よりレンズの曲率半径 R を求めると rings の次数を n とし、rings の半径を r_n とすると $nR\lambda = r_n^2$ (但し λ は光の波長で 0.5893μ) であるから、

$$\text{Table 1 (A) より } R_0 = 2.309 \pm 0.027 \text{ mm}$$

$$\text{Table 1 (B) より } R_0 = 2.320 \pm 0.026 \text{ mm}$$

が得られる。 R_0 は最小二乗法による最確値である。

3.2) 対物マイクロメーターの精度

測定尺の精度を決定するためには、先ずマイクロメーターについて調べなければならないがこの絶対的な較正はなされていない。本研究で用いられた方法はすべて顕微鏡によつたものであるから焦点ボケや像の歪曲を伴ない、精度がマイクロメーター自体の精度より悪く得られることが想像される。しかし実際に測定は同じ顕微鏡で行なわれるのであるから、この視野内の測定によつた誤差は、総括的な測定誤差としてマイクロメーターそのものの誤差より重要であると思われる。

使用したマイクロメーターの目盛刻線間隔は、 0.01 mm の規格であり、刻線自体の中は、 1.0 乃至 1.2μ であつた。Table 2 A に示される例は顕微鏡に接眼マイクロメーターを附属させて約 36 倍に引伸した像面より読みとつたもので 101 本の全刻線を 10 回に分けて 1 回 16 本ずつ

Table 2. Precision of the objective micrometer by using microscope and photomicrocomparator

Observation equation	$x+ky=m_k \quad (k=1, 2, \dots, n)$	
Case	(A)	(B)
Number of scale lines used (n)	101	12
The most probable value of the distance between two adjacent scale lines on the recorded paper (x_0) (y_0)	0.35344 mm	-1.875 2.3960 mm
Maximum value of residual in actual length	0.56μ	0.17μ
Probable error of a single observation, (r) on the recorded paper in actual length	0.0074 mm 0.2μ	0.017 mm 0.07μ
Probable error of most probable value, (r_y) on the recorded paper in actual length	0.00008 mm 0.0023μ	0.0014 mm 0.0054μ

The most probable value was estimated for the actual length of 0.01 mm . Therefore, the magnifications of the optical enlargements were (A) 35.344 ± 0.008 , and (B) 239.60 ± 0.14 .

つ一部を重複させ乍ら読み取つたものからの計算結果である。(B)は部分的に最小感度 0.08μ になるように拡大した 12 本の相並んだ目盛刻線についての計算結果を示す一例である。観測式を $x+ky=m_k$ ($k=1, 2, \dots, n$) とおき, 最確値 x_0, y_0 並びに確率誤差 r (一測定値当り), r_y (y_0 について) が光電測微計の読みから求められる。 y_0 は目盛間隔 0.01 mm に相当するから y_0 を正確な 0.01 mm と仮定して他の値の実長や光学系の倍率が求められている。 x_0 はここでは何の意味も持たないが, 若しこのスケール上に一点をとるならばその点の校正した目盛による値を知るためには, x_0 は原点の位置を示す値であり, スケール上の一点の位置の光電測微計における位置 z_0 は $x_0+k_2y_0=z_0$ とおかれて k_2 がその校正したスケールによる z 点の読みとなる。実際に本実験にあつては z_0 として Newton's rings による指標点が表わされ常に k_2 なるスケールの校正目盛に換算されている。Fig. 4 に示した例を上記と同様に読取つた数表を Tables

Table 3. An example of adjustment of objective micrometer

(A) Calculation from Fig. 3 A

Observation equation: $x+ky=m_k$

Scale on the micrometer k (mm)	Reading of the recorded paper Fig. 3 m_k	Corrected reading scale m_{k_0}	Residual converted into actual length v (μ)
0.40	1.02	1.024	-0.12
0.35	2.66	2.657	+0.09
0.30	4.29	4.290	0.00
0.25	5.93	5.923	+0.21
0.20	—	7.556	—
0.15	9.19	9.190	0.00
0.10	10.81	10.823	-0.40
0.05	12.45	12.456	-0.18
0.00	14.10	14.089	+0.34

$$x_0=14.089 \pm 0.004 \quad y_0=-0.32663 \pm 0.00014 \quad r=0.17 \mu \text{ in actual length}$$

The minimum unit of the reading (0.01) corresponds to 0.3μ in actual length.

(B) Calculation from Fig. 3 B

k (mm)	m_k	m_{k_0}	v (μ)
0.30	2.82	2.859	-0.16
0.25	14.86	14.804	+0.23
0.20	—	26.749	—
0.15	38.68	38.694	-0.06
0.10	50.64	50.639	0.00
0.05	62.58	62.584	-0.02

$$x_0=74.529 \pm 0.025 \quad y_0=-2.38898 \pm 0.00131 \quad r=0.11 \mu \text{ in actual length}$$

The minimum unit of the reading (0.01) corresponds to 0.08μ in actual length.

3, 4 に示す。Table 4 は Tables 2, 3 を用いての標点位置の決定の精度を示す。

マイクロメーターの目盛刻線の不規則さは一測定値当りの確率誤差から想像されるが、実験ではどうしても拡大系の誤差を含んでしまう。そこで同一の測定フィルムから光電測微計の装着の方法及びフィルム面の走査線位置を少しずつ変化して読取りがなされた。この実験は実験の初期に行なわれたので標点用レンズが甚だしく疵の多いものであり、その結果から得られた r_x , r_y 及び倍率 y と標点位置の確率誤差 r_z , 換算された標点位置は Table 5 に示されているが極めて精度が良くない。 y_0 の違いは光電測微計の装着の仕方の違いによるものであるが、 r_x , r_y は光電測微計の誤差と共に目盛線自体の不規則さにもよっている。(文献1 参照)

Table 2 (B) によつて明らかな如く、マイクロメーターのばらつきは、光電測微計による誤差を含めて最大残差 0.2μ 以内、一測定当りの確率誤差 0.1μ 以内となつている。しかし、実際に Newton's rings を読取るために光電測微計を使用したときは、円輪群と目盛刻線とが重なつていところの読取りが困難であるので、採用刻線数を減らして円輪群中心を 0.05 mm 毎の

Table 4. Determination of the position of the marking point

Case A; calculation from Fig. 3

Case B; calculation from the enlarged negative plate of Fig. 3

Case C; calculation by direct readings obtained from the circles of the rings

	(A)	(B)	(C)
(1) Adjustment of the objective micrometer	$x + ky = m_k \quad (k=1, 2, \dots, n)$		
Number of scalelines used: (n)	8	5	
Most probable value and its probable error: (x_0) (y_0)	14.089 ± 0.04 -0.32664 ± 0.00014	74.529 ± 0.025 -2.38898 ± 0.00131	
Probable error of a single observation: (r)	0.17μ	0.11μ	
(2) The position of the center of Newton's rings	z_0		
Number of rings used:	9	9	9
Most probable value of the center of rings: (z_0)	8.2522	31.813	$17.88 \times 0.01 \text{ mm}$
Probable error of the most probable value: (r_{z_0})	0.0008 0.025μ	0.00195 0.0082μ	0.008 0.08μ
(3) Converted value of (2) to the adjusted scales (1):	$t_0 = \frac{z_0 - x_0}{y_0}$		
Position of the center of Newton's rings: (t_0)	178.69μ	178.80μ	178.8μ
Probable error of the observation (r_0)	0.13μ	0.14μ	

Since the position indicating the center of Newton's rings can be shown by

$$t_0 = \frac{z_0 - x_0}{y_0}, \text{ the resultant error must be } \left(\frac{r_0}{t_0}\right)^2 = \frac{r_{z_0}^2 + r_{x_0}^2}{(z_0 - x_0)^2} + \left(\frac{r_{y_0}}{y_0}\right)^2.$$

Table 5. The precision of reading from the same film

Film (A)					
y_0	M	r_x	r_y	r_z	t_0 (μ)
1.6292	32.58	0.0056=0.17 μ	0.0009=0.03 μ	0.0020=0.06 μ	237.5 \pm 0.3
1.6284	32.57	0.0064=0.20	0.0026=0.08	0.0022=0.08	237.6 \pm 0.5
1.6282	32.56	0.0082=0.25	0.0013=0.04	0.0024=0.07	237.8 \pm 0.4
1.6263	32.53	0.0062=0.19	0.0010=0.03	0.0023=0.07	237.6 \pm 0.6
1.6268	32.54	0.0164=0.20	0.0010=0.03	0.0023=0.07	237.7 \pm 0.6
1.6293	32.59	0.0024=0.38	0.0020=0.06	0.0016=0.05	237.8 \pm 0.6
1.6284	32.57	0.0096=0.29	0.0014=0.04	0.0015=0.05	237.4 \pm 0.4
1.6295	32.59	0.0096=0.29	0.0016=0.05	0.0016=0.05	237.7 \pm 0.4
1.6773	32.55	0.0117=0.36	0.0018=0.06	0.0015=0.05	237.8 \pm 0.5
1.6291	32.58	0.0055=0.17	0.0009=0.03	0.0018=0.06	237.6 \pm 0.3
1.6285	32.57	0.0148=0.45	0.0024=0.07	0.0016=0.05	237.6 \pm 0.7
Film (B)					
y_0	M	r_x	r_y	r_z	t_0 (μ)
1.6277	32.55	0.0055=0.17 μ	0.0009=0.03 μ	0.0026=0.08 μ	229.1 \pm 0.3
1.6277	32.55	0.0055=0.17	0.0009=0.03	0.0047=0.14	229.0 \pm 0.3
1.6277	32.55	0.0055=0.17	0.0009=0.03	0.0032=0.10	229.1 \pm 0.3
1.6282	32.56	0.0047=0.14	0.0007=0.02	0.0033=0.10	228.9 \pm 0.2

y_0 is assumed 0.05 mm in actual length. Then magnification M is given as mentioned above, and the probable errors r_x , r_y , r_z are converted into actual length.

刻線のみで計測するように Fig. 3 の如くずらした場合もある。従つて採用した目盛刻線数が少なく、且つ拡大倍率も (A) に近いので光学系誤差も大きく、結果したマイクロメーターの誤差は後期の実験に於いても殆んどすべて 0.1μ 以上 0.2μ 以内であつた。

3-3) 測定尺の精度

両端マイクロメーターを連結する石英管の温度による伸びが極めて小さく、常温ではその膨脹係数は 0.0042×10^{-1} 程度であるので長さの標準尺として最適である。しかし、測定尺の長さが 60.5 cm もあると 1°C の温度変化に対して 0.25μ の補正を要する。又両端のマイクロメーターの固定の状態では誤差を生ずるから検討を要する。

先づ石英管両端のマイクロメーターの中心を結ぶ線 (以下測定尺中心線と云う) に対する目盛刻線の傾きの $\frac{\pi}{2}$ よりりのずれを θ とすると、変位の読取りは中心線に直交して得られるべき値の $\sec \theta$ 倍の長さとなる。例えば $\theta=1^\circ$ とすると $\sec \theta=1/\cos 1^\circ=1.00010$ となり 1 mm の変位に対して $+0.1 \mu$ の誤差を生ずる。

次に目盛刻線の使用部分が中心線からずれた場合は、測定間隔が大きければ全く問題にならない。例えば顕微鏡視野内で実長 0.02 mm は拡大された目盛間隔二つに当る距離であ

るから、目盛刻線方向の標点位置の移動を 0.02 mm 以内にとどめることは容易であるが 20 cm の測定標点間隔に対して角変位は 0.0002 となり、これは全長を 0.01 μ 短かく見積る結果になるにすぎない。

二つのマイクロメーター平面の平行よりのずれは、目盛刻線群と測定尺中心線との直交性と同様の誤差を持つが、Newton's rings を標点とした場合は、更に測定の精度にも影響を与えるので後に詳説する。

3.4) 光学系により導入される誤差

既に述べたように、測定が光学系によつてなされている以上、その誤差に光学系の誤差が含まれるのは当然である。光学系の誤差として考えられるのは、顕微鏡による誤差と、それによつて撮影したフィルムの読取りに際しての誤差である。

先ず顕微鏡による誤差は、像の歪曲、焦点ボケ、視差等がある。顕微鏡による観測では通常対象が同一対象面に在存することがないから光軸上の点を除き視差を免れない。光軸よりはなれるに従つては像の歪曲と共に二つの対象面の映像面に於ける倍率が異なるから誤差は甚だしく大きくなる。更に焦点ボケの場合は両対象面からの像は同一のボケ方をしない。ボケた巾の中央値をとる以外ないが、中央値は必ずしも対象の中央を意味しないから、それによる誤差も大きい。

Newton's rings を用いる方法の最大の利点は、Newton's rings が物体でなくて現象であり、必ず接触硝子平面上に現われることにある。硝子平面にマイクロメーター目盛面を用いているから、Newton's rings はマイクロメーター目盛線と同一面に在存することになる。従つて視差による誤差は全く生じない。又ピント調節のたびに、微少な倍率変化のあることは実験からも得られているが、同一面にある異なつた対象は同様な影響を受けるから、同一面内のスケールを使う以上全く誤差の原因にならない。更にピンボケ、コマ収差等の影響も同様である。像の歪曲についても、この歪曲が左右均等であれば、像の中心を光軸に近く置くことで誤差を無視できる。Table 6 に示した例は Table 5(B) の状態を顕微鏡を移動して視野内中心部より明

Table 6. Example of the difference introduced by transition of microscopic field of vision

Film	y_0	M	r_x	r_y	r_z	t_0 (μ)
A	1.6277	32.55	0.0055 = 0.17 μ	0.0009 = 0.03 μ	0.0026 = 0.08 μ	229.1 \pm 0.3
	1.6282	32.56	0.0047 = 0.14	0.0007 = 0.02	0.0033 = 0.10	228.9 \pm 0.2
B	1.6280	32.56	0.0064 = 0.20	0.0011 = 0.03	0.0040 = 0.12	228.7 \pm 0.3
	1.6298	32.60	0.0059 = 0.18	0.0009 = 0.03	0.0008 = 0.02	228.6 \pm 0.3
C	1.6295	32.59	0.0061 = 0.19	0.0009 = 0.03	0.0031 = 0.10	228.9 \pm 0.3
	1.6289	32.58	0.0061 = 0.19	0.0009 = 0.03	0.0022 = 0.07	228.8 \pm 0.3

確にずらした場合の誤差であるが、測定系の全誤差の範囲にあり、これら顕微鏡による誤差の極めて少ないことを示すものである。

3.5) 光源による影響

干渉縞を利用するのであるから硝子平面に垂直に入射する平行光束を用いると極めてコントラストのよい像が得られる。そのためには点光源で平行光束のための光学系を用意しなければならない。所が、倍率の大きい顕微鏡対物鏡を使うから対物鏡を通して物体面に光を入射させると焦点距離が甚だ短かくて調節が極めて困難であるし、又対物鏡と物体面との間が極めて近いので反射小鏡乃至プリズムをそこにおくことは出来ない。しかし実験の結果から明らかなように、通常の反射顕微鏡とナトリウムランプの組合せで十分のコントラストと十分に多くの Newton's rings が得られている。一方点光源からの平行光束に傾きがあるとマイクロメーター刻線巾の両側を一樣に照らすことが出来ず、そのためにこの巾の中心の読み取りに誤差を生ずる。実験でこの誤差は容易に 0.2μ を越えた。従つて光源としては一樣な明るさの拡がりのあるものを用いた方が適當である。ナトリウム・ランプの単色光は Newton's rings を読みとるためには最適なる光源であり、光源の大きさも適當であり、且つ一樣な明るさであるから、以上述べた如くマイクロメーター刻線に対する照明むらを除くことができる。

3.6) 測定の精度

測定の精度は、上記 Newton's rings 標点の指示精度にも、又測定尺マイクロメーターの精度にもよるが、更に測定尺を標点レンズ上に装置する際に生ずる誤差にも影響される。試料上の二つのレンズの曲率半径のちがい及び、レンズの厚さのちがいはレンズ中心間距離と測定尺標点間距離とに差を生ずるが、標点間距離が 50 cm 以上なら殆んどの場合、この差は全く問題にならない。又 Newton's rings を生成する際に、レンズと硝子平面との間隔は数 μ 以内であるからこれ又考慮を要しない。

Fig. 5 に示されるように二つのマイクロメーター平面の平行よりのずれを θ とするとき、測定尺の置き方のちがいで、 θ は同じでも a , β の値は変化する。前述の如く注意して測定尺を作成するなら $\theta=1'$ 以内にする 것도出来よう。ここでは $\theta=10'$ とし、 a , β 共に $5'$ とし $r_a=2.00$ mm, $r_b=1.90$ mm とすると、式中第二項は無視して第一項の大きさは約 12μ となつて現われる。この誤差は完全平行の場合 (図中 A_0B_0) との差であるから定差である。標点間隔が一定で測定尺の置き方のちがいを考えると、マイクロメーターの長さを 5 mm として標点をマイクロメーターの端から端まで移動した場合、全長 50 cm あれば、 a , b に対する影響も又 a , β に及ぼす変化も極めて小さい。 $\theta=10'$ として a , b の 5 mm の変化に対する a , β の変化は 0.00003 radian 程度にすぎない。 $r_a \sin a$ と $r_b \sin \beta$ は一方が増せば一方が減るから全体として一方のみの変化約 0.06μ よりも小さい変化をうける。次ぎに標点間隔に変化のあつた場合として OO' が 5 mm 伸び又は縮んだ状態を考える。 A 点を余り動かさないようにすると B 点は O' の 5 mm の伸縮に応じて下がり又は上がりするから、それによつて a , β の比率が変化

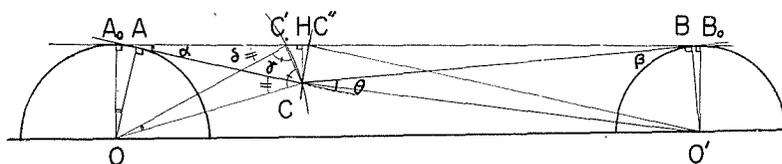


Fig. 5. Error due to the inclination between the micrometers of the both ends of the measure

When	$A_0O = r_a = AO$	$AC = a$	$\angle A_0OA = \alpha$
	$B_0O = r_b = BO$	$BC = b$	$\angle B_0O'B = \beta$
	$OC = R_a = OC'$	$CH \perp A_0B_0$	$\angle CC'O = r = \angle C'CO$
	$O'C = R_b = O'C'$	$CC' = d$	$\angle A_0C'O = \delta = \angle ACO$
		$C'H = x_a$	$2\pi - \angle ACB = \theta$
		$C''H = x_b$	

then, $\theta = \alpha + \beta$

$$A_0B_0 = A_0C' + B_0C'' + C'H + C''H = AC + BC + x_a + x_b$$

$$x_a = d \cos \{2\pi - (\delta + r)\}$$

$$r = \pi - \frac{\alpha}{2}, \quad \sin \delta = \frac{r_a}{R_a}, \quad \cos \delta = \frac{a}{R_a}$$

$$d = 2 R_a \sin \frac{\alpha}{2}$$

Therefore

$$\left. \begin{aligned} x_a &= r_a \sin \alpha - 2a \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \\ \text{In the same way,} \\ x_b &= r_b \sin \beta - 2b \sin^2 \frac{\beta}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

then,

$$\overline{A_0B_0} - \overset{\vee}{\angle} ACB = r_a \sin \alpha + r_b \sin \beta - 2 \left(a \sin^2 \frac{\alpha}{2} + b \sin^2 \frac{\beta}{2} \right) \quad (2)$$

する。全長 50 cm 程度ならば、 α, β の変化は極めて小さく無視される。しかし上記の θ が $30'$ もあると、測定尺の置き方による最大誤差も 0.2μ となり、標点間隔の変化に際して現われる測定尺の標点変位の誤差もこれに近い値となつて無視できない。

この事から測定尺の支持方法の重要性も指摘されよう。測定尺の支点位置によつて測定尺の弾性変形により両端のマイクロメーターに傾きの生ずることが考えられるからその対策を考慮しなければならない。

第一に Fig. 5 の式 (2) に於いて $a \doteq b$ ならば $\alpha \doteq \beta$ であり、 a と a との間に式 (2) を 0 にするような組合せをきめることができる。しかし標点間隔に変化のあるとき及び測定尺の置き方で生ずる上述の誤差が大きくなるから、この方法は誤差を完全になくすることはできない。

より完全な方法は、支点 H を二つ設けてそれを両端のマイクロメーターが平行になるような点にとり、支点を測定尺に固定して、試料上と支点との接触点を移動できるように、且つレンズとマイクロメーターの接触圧を一定にできるように支点脚を調整することである。一定の接触圧の検知は Newton's rings の 0 次即ち中心円の大きさを小さくほゞ一定にすることで得られる。

実際の実験では測定尺重心に支点を置き両端の接触円をやや大きくして三点支持の方法がとられた。接触圧のちがいによる同一状態の指示値のばらつきは 0.4μ に達したが、変位した状態に対しての誤差の増減は比較する他の測定器が用意されなかつたので計測されていない。

3.7) 測定範囲

測定尺の標準長さは石英硝子管の長さによつて実験目的に適合したものが作られる。レンズを標点位置に貼りつけるから標点位置はレンズを接着した面積の伸縮に対する平均中心である。従つてレンズ直径に較べて標点間距離の充分に大きいことが望ましい。10 cm 以上 100 cm 以内が適当と思われる。又、Newton's rings のマイクロメーター上の生成位置が刻線長さ方向に移動した場合の誤差も標点間隔の長い程無視される。

測定変位量の最大限度はマイクロメーターの長さによつて定まる。標点用レンズを試料面に貼りつける際のずれと読み取りに要する Newton's rings の拡がりから若干の余裕を見て、マイクロメーターの長さより 0.8 mm 程小さく見積るのが安全である。共に 1 mm の長さのマイクロメータを使用したので、測定可能な最大変位量は約 1.2 mm であつた。共に 5 mm のものを使用すれば約 9.2 mm 迄の変位を測定できよう。

3.8) 実験例

Fig. 6 に示す例は、有り合せの硝子管の長さの温度による変化を示すグラフである。硝子管は水中に浸けられ、標点用レンズのみ僅かに水上に露出された。

測定尺は水槽の上部室温空气中に置かれたので、膨脹係数の小さい測定尺の温度変化は無視された。温度指示の感度は 0.1°C であるので、変位の読取りも μ 以下の必要がない。従つて測定値には直接顕微鏡視野内で読みとられた 3 組の Newton's rings の平均中心を用いた。

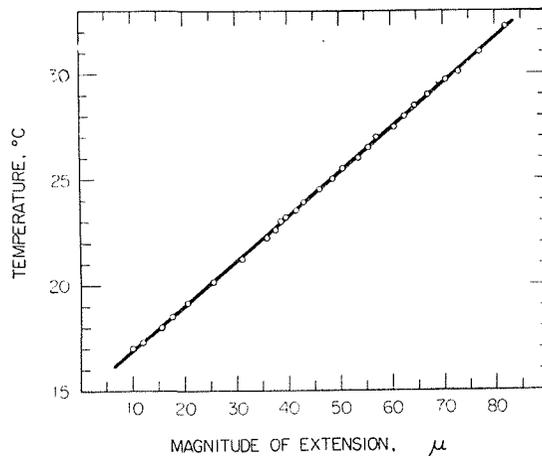


Fig. 6. Extention of a glass tube for temperature variation measured by the present method

In this case, the linear expansion coefficient of the glass tube became $0.078 \times 10^{-4} \pm 0.004 \times 10^{-4}$, as the observation range was from 17.0°C to 32.2°C , since the length of the measured was 60.5 cm .

む す び

以上の実験及び考察によつて、この測定器の精度がマイクロメーターの精度によつて殆んど定まることが明らかになつたが、 0.2μ 以上の高精度を要求されるときは、測定尺両端のマイクロメーター平面相互の平行性即ち測定尺の支持方法も検討すべき重要事であることも分かつた。

この方法の重要な特徴を以下に要約する。

1) 力学的又は光学的方法に於ける誤差の重大な原因となる標点位置の指示が常に極めて精確に示される。

2) 標点と測定尺目盛とが同一平面内にあることは、視差を除き、又その他の光学的拡大方法の誤差も極めて小さく無視することが出来る。

3) 測定器は、内蔵する基準尺が単一構造であり可動部分がなく且つ他の計器部分と独立しているため、長期に亘つて変化しない。

4) 光源及び拡大読取装置は特殊な工作を要さず、又測定する時の外は他の実験に使用して差支えない。

従つて長期間の実験に適用して精度を損わないので、この方法は操作上、計算上の不便さはあつても、精密な実験に充分に利用価値を有し、又線基準として優れた性能を提示するものと信ずる。

終りに本研究を遂行するに当つて、種々有益な御指導を頂いた福島久雄、横道英雄両教授に厚く感謝の意を表する。

文 献

- 1) I. Ikeda: *Memoirs of Fac. of Engineering, Hokkaido Univ.* Vol. X, No. 4, 491 (1958).
- 2) 北海道 P.S. コンクリート会社研究報告. 昭和 34 年 3 月, p 81.