表 2 各部品の不釣合

部 品	送り	実験より		計算より	
		大きさ gr-cm	位相	大きさ gr-cm	位相
天 ビ ン	0	9	— 3°	7	0°
	5 mm	5	— 2°		
針 棒	0	2	—122°	2.3	—102°
	5 mm	4	— 40°		
針棒クランク 針棒クランクロッド 釣 合 錘	0	43	168°	56	174°
	5 mm	46	169°		
上下送りロット	0	7	— 24°	6.5	— 24°
	5 mm	9	— 48°		
送 り 台	0	3	55°	0	—
	5 mm	15	155°	14	170°
水平送り二又ロット	0	30	170°	40	170°
	5 mm	28	169°	35	170°
送り偏心カム 二又ガイド	関係 なし	53	—173°	44	—178°

り、これを打消す為に回転部に不釣合を附加すると水平方向に新たな慣性力が現われる。上下動或は水平動の何れ

か一方のみの慣性力を完全に消す事は原理的には可能であるが、この時は他方向の慣性力が最大になる。従って現実には両方共或程度づつを残すと云う方法がとられている。送り関係部品にも上下方向だけ、或は水平方向だけに大きな運動をするものがあるので同じ事が言える。ここで取上げた国産 DDW 型の工業用ミシンではこのような考慮の結果最終的に残った不釣合は上下方向 25~50 gr-cm, 水平方向 130gr-cm になっている。水平方向の不釣合を多少残しても、上下方向のものをなるべくくしょうと云う配慮が見られる。この結果を導く途中の所論から分るように、附加不釣合の大きさや位相を加減する事により残存不釣合をこれより多少は小さくする事は望めるが、現在の状態はこの構造としてはかなりよい状態であると考えられる。このミシンが天ビンとカムに全回転式の構造を採用しているため、これから生ずる不釣合が殆んどない事は全体の不釣合を小さくする上に極めて大きな貢献をしている。

最後に本研究を行うにあたって 御協力を賜った東大工学部鈴木正治氏並に 当時の精密工学科 4 年生広松良男、中島隆の両君に御礼申し上げると共に、資料の提供その他のいろいろの援助を賜った 東京重機工業株式会社に厚く感謝する次第である。(1959, 3月19日 受付)

微小平面の法線方向の測定

山 本 健 太 郎*

About the accurate determination of the direction of normal of a small flat surface.

Kentaro YAMAMOTO

The direction of a normal of a small plane surface, such as the ones of Vickers Diamond Pyramid, cannot be determined accurately by autocollimation, for the diffraction effect appears because of the apparent minuteness of the diameter of the collimator lens. Hence a new apparatus was designed.

The apparatus is shown diagrammatically in Fig.1 and 2. The microscope is constructed by an objective Ob and an ocular Oc, and it also has a half silvered mirror H and a cross line graticule X. When the cross line is illuminated, its primary image is formed at Y. When a mirror is placed at the middle point between Y and the work point B of the microscope, its normal is parallel to the optical axis of the microscope, the secondary image of the cross line is formed at B, and then, the cross line is visible at the centre of the view field.

When the small mirror is tilted around S (Fig.1) by an angle of θ , the cross line is displaced by the amount $(y-b)m\theta$ at the field stop A, and the displacement can be measured by a micrometer ocular.

The performance of the apparatus is studied by introducing the parameters of m (magnification of the objective) and $n=x/y$. And the following results are obtained;

1) The sensitivity of the measurement is calculated by eqs. 9 and 10, and the results of numerical calculation are shown in Fig. 3.

2) The lower limit of the area of the small plane surface to be measured can be obtained by eq. 13, and the numerical results are shown in Table. 3.

3) The maximum angle of θ is calculated by eqs. 18, 19 and 20 and the numerical results are shown by full lines in Fig. 5, 6 and 7.

1. 緒言

微小平面の法線方向の検出にオートコリメータは使用できない。何故ならばコリメータレンズの有効口径が小さくなるのでその分解能がわるくなるからである。特に微小平面の形状が円形でない場合には回折の影響が現われてさらに像がわるくなる。そこで顕微鏡光学系を用いた法線方向の検出方法を考案した。この方法の応用分野はピッカースダイヤモンド圧子の形状測定、ナイフエッジの刃先角度、ダイヤモンドバイトの刃先の形状などが考えられる。この報告では測定方法の一般的な取扱いを行い、ピッカースダイヤモンド圧子の測定については次報にゆづることとする。

2. 測定法の原理

図1において、光源Lから出た光で十字線Xを照明する。Xを出た光は半透明鏡Hで下方に直角にまげられて対物レンズObを通りXの像をYに結ぶ。一方この対物

図 1

レンズObと接眼レンズOcからなる正規の顕微鏡の物点をB、Ocの視野絞りの位置をAとする。今YBの中点に光軸に直角な反射鏡SをおくとXの像Yはこの反射鏡で反射されてB点にYの実像を結ぶ。Bは顕微鏡の物点であるから顕微鏡の視野内に十字線の像があらわれることになる。もしこの反射鏡がS点を中心にして微小角度傾けばYの像は光軸より外れた所にできる。この外れた量を対物レンズで拡大して測微接眼レンズで測定すれば鏡Sの傾角を測定することができる。

3. 測定法の解析

図1(b)は図1(a)の光学系を光軸上に並べたものである。各々の符号は図1(a)と同じである。 x, y, a, b を図のように定め対物レンズObの焦点距離を f とすれば次の式が成立する。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

ここで対物レンズの単独倍率を m 、十字線とその像の間の倍率を n として m と n を次の式で定義する。

$$a = bm \quad (3)$$

$$x = yn \quad (4)$$

ここで $m > 1$ であり、また十字線の像がBより下方にできる必要があるので、 $m > n$ となる。

普通の顕微鏡では a の値は m にかかわらず大体一定である。表1は国産の代表的な顕微鏡について a の値を

表 1

m	4	10	20	40	90	100
f	30	16	8.2	4.3	2.0	1.8
$(m+1)f$	150	176	172	176	182	182

求めたものである。この報告では計算を簡単にするために a の値を表1の平均値175mmとおいた。すなわち

$$a = (m+1)f \approx 175 \quad (5)$$

この式において、市販の乾燥系の対物レンズの m の値4, 10, 20, 40の四種についてそれぞれの焦点距離 f から a を計算した。

図2において反射鏡が微小角度 θ だけ傾いた時 Y の反射像が B 点から B' 点まで移動するものとしこの量を δ で表わし、 δ が対物レンズで m 倍だけ拡大されて A の位置(図1)で Δ だけ移動するものとすればこれ等の値は次の式で与えられる。

$$\delta = 2BS \times \theta = (y-b)\theta \quad (6)$$

$$\Delta = m(y-b)\theta \quad (7)$$

ここで、 $a=175$ として式(1)~(4)から $(y-b)$ を求めて Δ を m, n, θ で表わせば次の式が得られる。

$$y-b = \frac{175(m-n)}{mn(m+1)} \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{175(m-n)}{n(m+1)} \theta \quad (9)$$

4. 測定の感度

Δ の測定は測微接眼レンズで行う。国産の測微接眼レンズは倍率 $\times 10$ 、1目盛の値は図1の A 点で0.01mmのものが多く、 Δ のよみの1目盛を0.01mmと考える。鏡の傾き θ は普通の工業上の角度測定の単位として $1'$ と考える。そこで $\theta=1'$ の場合の Δ の値を $\Delta(\theta=1')$ で表わしこれを測定の感度とよぶことにする。 $\Delta(\theta=1')$ は次の式で与えられる。

$$\Delta(\theta=1') = 5.07 \times \frac{(m-n)}{n(m+1)} \times 10^{-2} \quad (10)$$

この関係を計算して図示したものが図3である。この

図 2

図から m が大きくなるにつれて $\Delta(\theta=1')$ は大きくなり測定の感度はよくなるが m が10をこえると感度の上昇は非常にゆるやかとなる。すなわち感度の点のみからすれば対物レンズの倍率をあまり大きくしても効果がなことになる。また n の値が小さくなると感度は急激に上昇する。

5. 微小平面の広さ

図1において傾角測定に關係する鏡面は対物レンズObを底面としYを頂点とする円錐形(頂角 $2u'$ とする)を S で切つた断面の広さとなる。この円の半径を r とする。

この報告では顕微鏡の対物レンズを薄肉の単レンズにおきかえて考えている。この場合単レンズの半径 R は対物レンズの焦点距離 f とその開口角 u から計算できる。すなわち図1より次の式が求められる。

$$R = b \tan u = \frac{(m-1)f}{m} \tan u = \frac{175}{m} \tan u \quad (11)$$

Y を頂点としObを底面とする円錐の頂角 $2u'$ は

$$\tan u' = \frac{R}{y} = \frac{(m+1)n}{m(n+1)} \tan u \quad (12)$$

から求められる。そこで円形微小平面の半径は次の式で求められる r の値以上あればよいことになる。

$$\begin{aligned} r &= Y S \tan u' = \frac{175(m-n)}{2mn(m+1)} \tan u' \\ &= \frac{175(m-n)}{2m^2(n+1)} \tan u \quad (13) \end{aligned}$$

ここで u の値は対物レンズの開口数から簡単に求めることができる。すなわち対物レンズに記入してある開口数を A とすれば $A = \sin u$ となる。市販の乾燥系の対物レンズの $A(=\sin u), u, \tan u$ を示したものが表2である。

表 2

m	4	6	10	20	40
$\sin u$	0.1	0.12	0.3	0.4	0.65
u	$5^\circ 44'$	$6^\circ 54'$	$17^\circ 27'$	$23^\circ 35'$	$40^\circ 32'$
$\tan u$	0.100	0.121	0.314	0.437	0.855

色々な m と n の組み合わせについての $2r$ の値を示したものが表3である。同じ m の値については n が小さくなるにつれて $2r$ の値は大きくなっている。

6. 見掛けの開口角

見掛けの開口角は十字線の像を観測する場合にその像

図 3

表 3 $2r$ (mm)

$m \backslash n$	4	10	20	40
$1/3$	3.02	3.99	2.81	2.78
$1/2$	2.56	3.48	2.48	2.46
$1/1.5$	2.20	3.08	2.21	22.1
1	1.65	2.48	1.82	1.82
2	0.73	1.46	1.15	1.12
3	0.27	0.96	0.81	0.87
4	—	0.66	0.61	0.67
5	—	0.46	0.48	0.55

の良否を判定する目安となる。この見掛けの開口角は前項で計算した u' が有効な最大値となる。何故ならば微小平面が前項で計算した r の半径の円より小さい場合には見掛けの開口角は u' よりさらに小さくなり、また θ が大きくなって反射光が対物レンズでけられる場合にも見掛けの開口角は小さくなるからである。見掛けの開口角の最大値を計算しこれを見掛けの開口数 $\sin u'$ と書改めたものが図 4 である。見掛けの開口数は m が大きくなる程、また u が大きくなる程大きくなっている。

図 4

6. 顕微鏡の倍率

顕微鏡の総合倍率を N とすれば N が対物レンズの開口数の 500~1000 倍をこえるといわれる馬鹿拡大となり視野内の像はわるくなる。この装置は $\times 10$ 測微接眼レンズを使用するので総合倍率 N は $10m$ となる。そこでこの装置の見掛けの開口角を u' とすれば

$$10m \leq (500 \sim 1000) \sin u' \quad (14)$$

$$\therefore \sin u' \geq (1/50 \sim 1/100) m \quad (15)$$

m に対する開口数の最小値を計算した結果は表 4 に示す通りである。表 5 はこの結果から計算した n の範囲

表 4 $\sin u'$

$m \backslash \omega$	4	10	20	40
$4'$	0.040	0.10	0.20	0.40
$3'$	0.053	0.13	0.27	0.53
$2'$	0.080	0.20	0.40	0.80

表 5 馬鹿拡大にならない n の範囲

$m \backslash \omega$	4	6	10	20	40
$2'$	$n \geq 1.82$	—	$n \geq 1.44$	—	—
$3'$	$n \geq 0.73$	$n \geq 1.32$	$n \geq 0.61$	$n \geq 1.58$	$n \geq 2.49$
$4'$	$n \geq 0.47$	$n \geq 0.73$	$n \geq 0.41$	$n \geq 0.80$	$n \geq 0.99$

である。式(15)で $m/50$, $m/75$ および $m/100$ は肉眼の分解可能な最小角度 ω をそれぞれ $2'$, $4'$ と考えた値である。接眼レンズ $\times 10$ とした時 $\omega = 4'$ の場合をとつて式(15)の条件をみたす範囲を示したものが図 4 の実線の部分である。

7. 明視の深さによる誤差

この装置で S を YB (図 1) の中心に持つてくるのは顕微鏡の微動装置によつて十字線にピント合わせをすることによつて行う。この場合明視の深さによつて $(y-b)/2$ の値に誤差を生ずる。明視の深さについては色々な式があるが意識的にピント合わせを行う場合には式(16)が成立する¹⁾。ここで T は明視の深さ、 ω は肉眼の最小分解角、 N は顕微鏡の総合倍率である。

$$T = \frac{250 \omega}{N \sin \mu'} \quad (16)$$

ω は普通 $2' \sim 4'$ をとるのでその大きい方の $4'$ をとり、 T は明視の深さであるから $(y-b)/2$ の誤差を考える場合は正規のピントの位置からのズレ $T/2$ を考える。 Δ の相対誤差 $T/(y-b)$ は式(17)で与えられる。

$$\frac{T}{y-b} = 1.66 \times \frac{n(m+1)}{(m-n) \sin u'} \times 10^{-4}$$

この値を数値計算した結果は $4 \leq m \leq 40$, $0.33 \leq n \leq 5$ の範囲で $T/(y-b)$ は 0.8% 以下であることがたしかめられた。

8. 測定できる最大偏角

この方法で微小平面の正規の角度からの偏角を測定す

1) 山本健太郎：球面の曲率半径の測定，第 1 報，精密機械，Vol. 24, No. 4, 1958. 169

る場合測定できる 偏角の最大値を $\theta_{\max}$ とする。 θ は図3に示すように光軸と被測定面の法線のなす角である。 $\theta_{\max}$ を定める条件は三種類に大別できる。この三者の中の最小のものが測定可能な角度範囲を与える。その条件は

- 1) 実視野の広さによる制限条件: θ_1
- 2) 見掛けの開口角による制限条件: θ_2, θ_2'
- 3) 十字線の像のボケによる制限条件: θ_3

実視野の広さによる θ の最大値を θ_1 とする。 $\times 10$ の測微接眼レンズを使用する場合はこの視野径の直径は約10mm である。そこで θ_1 は次の式で与えられる。

$$\theta_1 = \frac{5}{d(\theta=1')} \quad (17)$$

この値を計算したのが図5 ○印の曲線群である。

図 5

見掛けの開口角による制限は 反射面が傾いた時光軸と一致する入射光線が反射されて 対物レンズの周辺部を通過する時の 2θ の値を u'' とおく (図2)。この時反射鏡の傾角は $u''/2$ となる。この時は反射光束の約半分は対物レンズの線でけられることになるが、残りの約半分の光束は対物レンズに入射する。この条件で $\theta_{\max}$ が制限されると考えた場合の $\theta_{\max}$ を θ_2 とおく。最も厳密な条件をつければ対物レンズで 反対光束がけられてはならない。この場合の $\theta_{\max}$ を θ_2' とおく。 θ_2, θ_2' は次の式から計算できる。

$$\tan u'' = \frac{2R}{y-b} \tan u = \frac{2(m+1)n}{2mn+m+n} \tan u \quad (18)$$

$\theta_2 = u''/2$ であるからこの値は式(18)より求められる。その結果は図5の×符号のついている曲線群となる。

この図で実線の部分は θ_1 と θ_2 から定められる $\theta_{\max}$ の値を示している。

θ_2' は対物レンズで反射光束がけられない条件から定まる。すなわち

$$\theta_2' = \frac{(u'' - u')}{2} \quad (19)$$

を以て与えられる。この値は (12)と(18)から計算できる。この関係を図示したのが図6である。この図では

図 6

θ_1 と θ_2' によって制限される $\theta_{\max}$ の値を実線で示してある。

図2において被測定面がSを中心にして回転する時反射像は円弧運動をする。このため像点は鏡の回転につれて対物レンズから遠ざかる。この量が明視の深さの半分をこえると像にボケが現れる。この条件による θ の限界が θ_3 である。この値は次の式で与えられる。

$$\frac{(y-b)}{2} (1 - \cos 2\theta_3) \leq \frac{250 \omega}{2N \sin u'} \quad (20)$$

$\omega = 4'$ において計算した θ_3 の値は図7に示す通りである。

図 7

被測定面をSを中心にして回転できない場合は、この誤差はさらに大きくなる。このために顕微鏡の微動装置

を用いてピント合わせを行うことが必要になる。このような装置を持つことはこの測定機としては必要条件となる場合が多いので実際上は θ_3 による制限は考えなくてもよからう。ただ顕微鏡のピント合わせの微動装置の送りの真直度は測定精度に等しいかこれより小さい値にとつておかなければならない。

9. オートコリメータとの比較

普通の $1'$ よみのオートコリメータの対物レンズの焦点距離は約 300mm, 接眼レンズの倍率は $\times 10$, 程度のものが多い。このようなオートコリメータで直径 1mm の小面積の平面を観測する場合コリメータレンズの有効直径は 1mm となる。この場合点光源から出た光の回折縞の第 1 次の暗環の半径は明視の距離において $1.22 \times 6 \times 10^{-4} \times 300 \times 10 = 2.2\text{mm}$ となる。またこの場合 $1'$ の目盛は明視の距離において $2 \times 2.9 \times 10^{-4} \times 300 \times 10 = 1.7\text{mm}$ である。この状態では $1'$ の精度で角度の定測を行うには問題がある。

一方顕微鏡系を用いた方法では $m=10$, $n=3$ とすれば, $\Delta(\theta=1')=0.011\text{mm}$, 分解能を E として $10mE=0.12\text{mm}$ となる。この値は明視の距離におけるものであり, 肉眼の最小分解角 $\omega=2'$ より小さくなる。すなわち像のボケは肉眼ではみとめられない。

以上の計算から微小平面の角度測定においては普通のオートコリメータでは本文にのべた方法より精度がおちることになる。

10. 結 言

顕微鏡光学系を用いて微小平面の法線方向の検出を行い, あるいは微小な角度の偏差測定を行う方法を考案しこれによる測定の種々の制限条件について考えた。この結果微小平面を $1'$ 程度の精度で角度測定を行う場合には相当好結果が得られることが明らかとなつた。この方法はビッカースダイヤモンド圧子の形状測定に用いるつもりで行つたものである。実際の応用については次報にゆづることとする。(1959, 3月24日 受付)

ミニチュア球軸受について

—— 鋼球ラッピングにおける切削抵抗 (2)* ——

井 戸 守** 羽 地 務**

On the Miniature Ball Bearing

—— On Cutting Resistance in Lapping Steel Balls (Part 2) ——

Mamoru Ido & Tutomu HAZI

In this paper continued from part 1, we made an experiment on the effect of lapping pressure, lapped quantity, sphericity of balls used and supplying interval of lapping compound upon cutting resistance when the radius of steel balls was about 1 mm.

Then we found following results,

- (1) in the case of cast iron lap, there were limits in suitable lapping pressure according to the ball size, and the supplying interval of lapping compound had no influence on them,
- (2) in the case of suitable lapping condition, the cutting resistance was proportional to lapping pressure or the lapped quantity, and its proportional constant was different according to lap materials,
- (3) in the case of nylon lap, lapped quantity was not much connected with lapping pressure, but sphericity was proportional to lapping pressure,
- (4) in the case of cast iron and nylon lap, variation of the cutting resistance was comparatively small, and the sphericity increased when cutting resistance decreased gradually.