

# 知 識 編

# 1. 光学素子の用途と特徴

## (1) 用途と必要とされる材料特性、形状精度、表面粗さの概要

古くから、カメラなど民生用機器に用いられていた可視光用光学素子に加えて、近年、炭酸ガスレーザー応用、半導体レーザー開発、エキシマレーザー研究、軟X線応用などに各々の波長特性に応じた光学素子が必要となっている。

ここでは、光学素子の用途例を赤外、可視、紫外、軟X線領域の光学系、使用材料の特性、必要な形状精度、表面粗さについて概説する。

表1は各波長が使われる用途と、一般的な光学素子とその素子性能についてまとめたものである。

表1 光学素子の主な用途

	波長範囲	主な用途	主な光学素子	素子性能 (目安)	
赤外光	約780nm ~ 1mm <sup>※1)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○炭酸ガスレーザー</li> <li>○放射温度計、赤外線ランプ</li> <li>○レーザー核融合</li> <li>○半導体レーザー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○共振器用ミラー</li> <li>○窓</li> <li>○ビームスプリッター</li> <li>○レンズ</li> <li>○反射・集光用ミラー</li> <li>○多面鏡 (ポリゴンミラー)</li> </ul>	○形状精度 1~0.03μm	表面粗さ 0.01~ 0.001μmRmax ○レーザー光の時厳しい
可視光	約400~700nm <sup>※1)</sup> (360 ~ 760) ~ (830) nm	<ul style="list-style-type: none"> <li>○カメラ</li> <li>○望遠鏡、顕微鏡</li> <li>○半導体焼付装置</li> <li>○エキシマレーザー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○レンズ、プリズム</li> <li>○反射、集光、半透ミラー</li> <li>○回折格子</li> </ul>	0.3~0.01μm	0.01~ 0.001μmRmax ○レーザー光の時厳しい
紫外光	約1 ~ (360 ~ 400) nm <sup>※1)</sup>		<ul style="list-style-type: none"> <li>○共振器用ミラー</li> <li>○窓</li> <li>○エタロン</li> <li>○レンズ</li> </ul>	0.03~0.001μm	0.01~ 0.001μmRmax
軟X線	約数十~0.数nm	<ul style="list-style-type: none"> <li>○分析機器</li> <li>○望遠鏡、顕微鏡</li> <li>○半導体焼付装置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○反射鏡</li> <li>○回折格子</li> </ul>	—	1 nm rms以下

注1) JIS工業用語大辞典第2版 (日本規格協会発行) より

以下、各光学系の用途事例と材料特性、光学素子の形状・品質について述べる。

### ① 赤外光学系

#### a. 大出力CO<sub>2</sub>レーザー加工システム

図1は大出力CO<sub>2</sub>レーザー加工システムの光学系の構成図を表わす。

光学素子として、共振器用、反射・伝送・集光用各ミラーが使わ

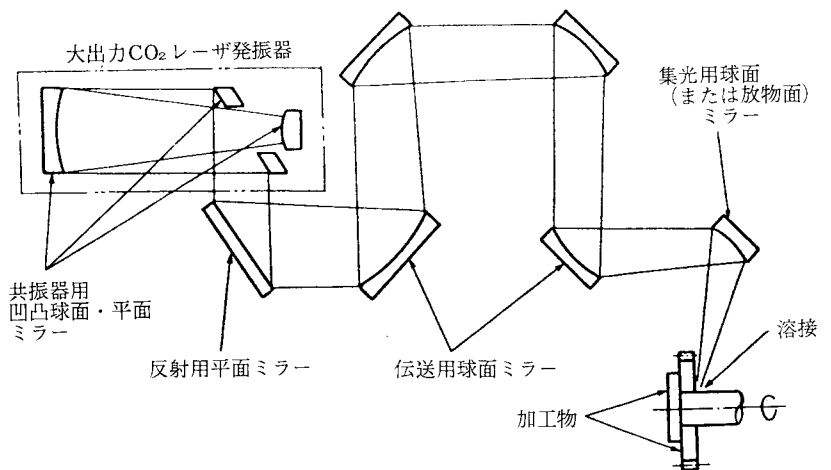


図1 大出力CO<sub>2</sub>レーザー加工システムの一例<sup>(1)</sup>

れている。図には表わされていないが、レーザ光が透過する取出し窓、レンズ、ビームスプリッターなどの透明光学素子も使われる。

b. 材料の種類と特性

大出力CO<sub>2</sub>レーザに使用される材料の条件としては、次のものがある。

- (i) 熱伝導度が高いこと
- (ii) 線膨脹率が小さいこと
- (iii) 10.6 $\mu$ mの波長に対し低吸収であること
- (iv) 変形しにくいこと
- (v) キズがつきにくいこと

表2は各種材料の種類と特性を表わす。表中(a)は反射鏡用、(b)は透過用材料である。透過用材料ではZnSeとKClが吸収特性、屈折率の温度依存性の面で多用されている。

表2 材料の種類と特性<sup>(2,3)</sup>(河田他、早水)

特性 材質	熱伝導度 $K$ (W/cm $\cdot$ K) (273~373K)	線膨脹係数 (10 <sup>-6</sup> /°C) 293K	F.M. $\equiv K/\alpha$	R(%) A(%) (at10.6 $\mu$ m)	ヤング率 $E$ 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup> (293K)	スープレキ (kg/mm <sup>2</sup> )	比 重 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Si	1.38	2.5	[2.32]	30 70	1.47	~1100	2.33 [0.26]
W	1.67	4.5	[1.56]	98.2 1.8	3.98	~540	19.3 [2.15]
Mo	1.34	5.0	[1.13]	98.4 1.6	3.28	~290	10.2 [1.14]
Cu	4.0	16.7	[1.0]	99.2 0.8	1.32	~80	8.96 [1.0]
Ni plated Cu	$K_{eff}$ 1.97	$\alpha_{eff}$ 16.7	[0.49]	90 10	$E_{eff}$ 1.32	~600	8.96 [1.0]

[ ] 内はCuを1として規格化した値を示す

F.M. : Figure of Merit (性能評価指数)

R : 反射率

A : 吸収率

(a)

定数 物質	吸収係数 $\beta_{10.6\mu m}$ (cm <sup>-1</sup> )	熱伝導度 $K$ (W/cm $\cdot$ K)	熱膨脹係数 $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /°C)	屈折率 $n$	ヤング率 $E$ (10 <sup>11</sup> dyn/cm <sup>2</sup> )	抗張力 $\sigma/c$ (10 <sup>4</sup> dyn/cm <sup>2</sup> )
Ge	$1.2 \times 10^{-2}$	0.59	5.7	4.02	10.3	9.31
GaAs	$5 \times 10^{-3}$	0.48	5.7	3.30	8.48	13.8
ZnSe	$1 \times 10^{-3}$	0.18	8.5	2.40	6.72	5.52
KCl	$7 \times 10^{-5}$	0.065	36	1.47	3.0	0.44 (4.4)*

\*加熱鍛造による

(b)

名 称	岩 塩	塩化カリ	臭化カリ	弗化リチウム	弗化マグネシウム
成 分	NaCl	KCl	KBr	LiF	MgF <sub>2</sub>
結 晶 系	立 方	立 方	立 方	立 方	立 方
光透過範囲 ( $\mu$ m)	0.21~26	0.21~30	0.25~40	0.11~9	0.11~7.5

名 称	弗化カルシウム	弗化バリウム	酸化マグネシウム	サファイア	水 晶
成 分	CaF <sub>2</sub>	BaF <sub>2</sub>	MgO	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
結 晶 系	立 方	立 方	立 方	六 方	六 方
光透過範囲 ( $\mu$ m)	0.13~12	0.15~15	0.25~8.5	0.17~6.5	0.147~4.5

c. 光学素子の品質

図2、図3は表面仕上げ工程、各種研磨面と反射率、レーザ損傷しきい値の関係を示す。損傷しきい値は反射率とほぼ同様の傾向を示している。

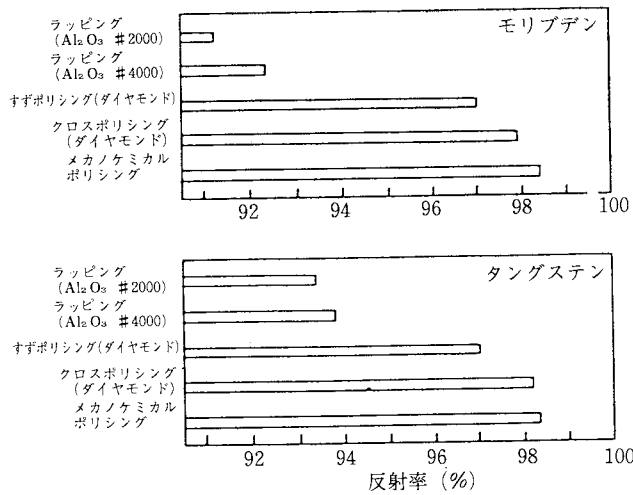


図2 各種研磨面と反射率<sup>(2)</sup>(河田他)

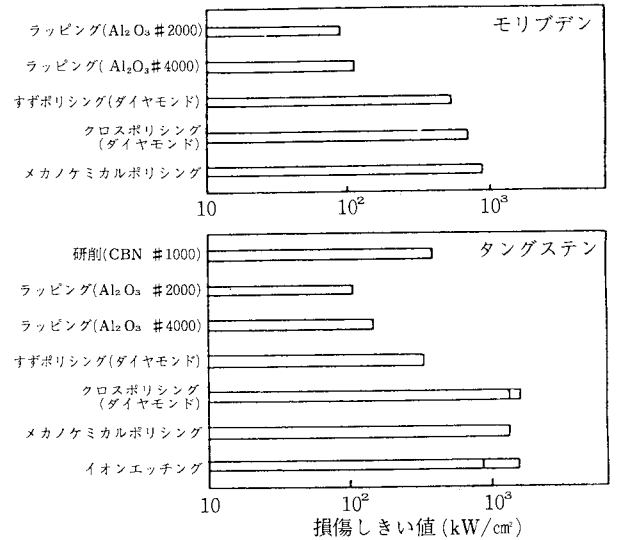


図3 各種研磨面と損傷しきい値<sup>(2)</sup>(河田他)

図4はZnSeの各種研磨面と吸収率の関係を示す。

表3は表面状態による部品性能への影響と発生要因をまとめたものである。

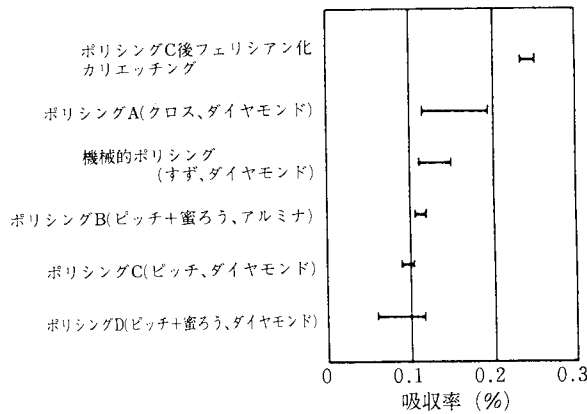


図4 ZnSe加工面と吸収率<sup>(2)</sup>(河田他)

表3 表面状態因子と性能<sup>(4)</sup>(今川)

状態因子	耐力	均一性	発生要因
スクラッチ	◎	○	砥粒、圧力
ディグ	◎	○	砥粒、圧力、欠陥
埋没物	◎		砥粒、圧力、汚染
付着物	○		研磨液、汚染
粗さ		◎	砥粒、パッド
うねり		◎	パッド、圧力、結晶方向性
加工ひずみ	◎	○	砥粒、圧力、加工速度

◎：影響大

② 可視光学系

a. カメラ用レンズ、プリズム

図5はカメラ用レンズの光学構成図を示す。一般的な球面レンズと一部非球面レンズで構成されている。その他に、カメラなどでは光を反射させる役割をもつミラー、プリズムが広く用いられている。

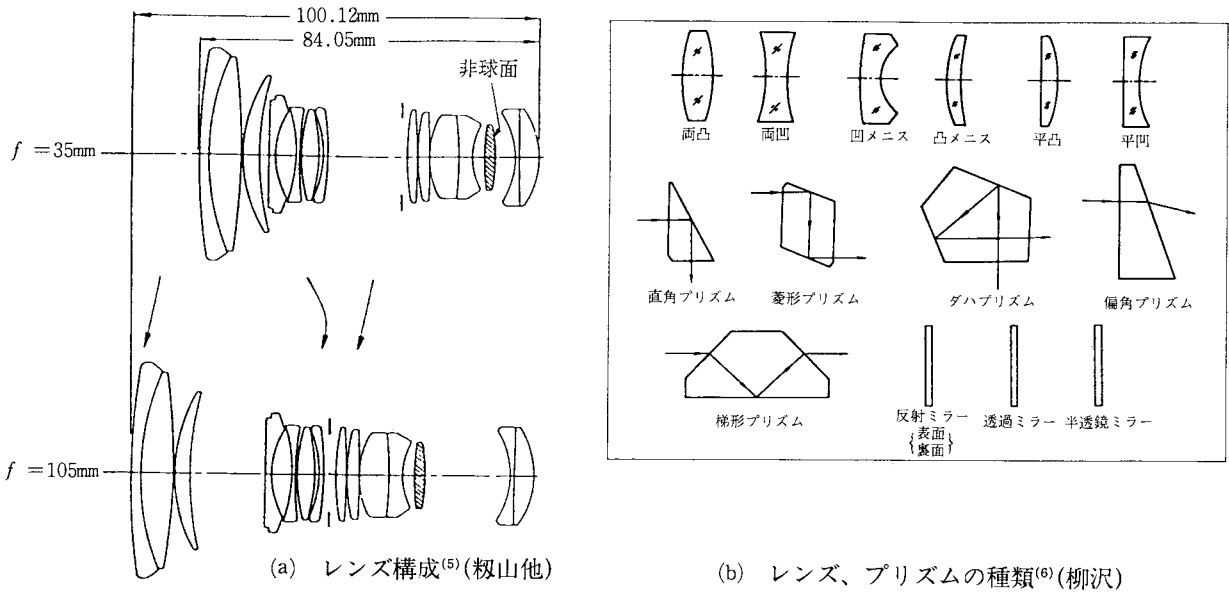


図5 可視光学系光学素子

b. 材料の種類と特性

図6は光学ガラスの種類とその光学特性を示す。縦軸は屈折率 ( $n_d$ として光源Heヘリウム、波長587.56nmの時の屈折率) を、横軸は分散、アッペ数  $\nu_d$  を表わす。 $\nu_d$ は次式によって求めたものである。

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

$n_d, n_F, n_C$ はそれぞれd線 (587.76nm)、F線 (486.13nm) C線 (656.27nm) の時の屈折率を表す。

図中  $n_d$  の数値が大きいと屈折率が大きい(高屈折率という)こと、 $\nu_d$  が大きいと波長による屈折率の差が小さい(これを低分散という)ことをそれぞれ表わしている。

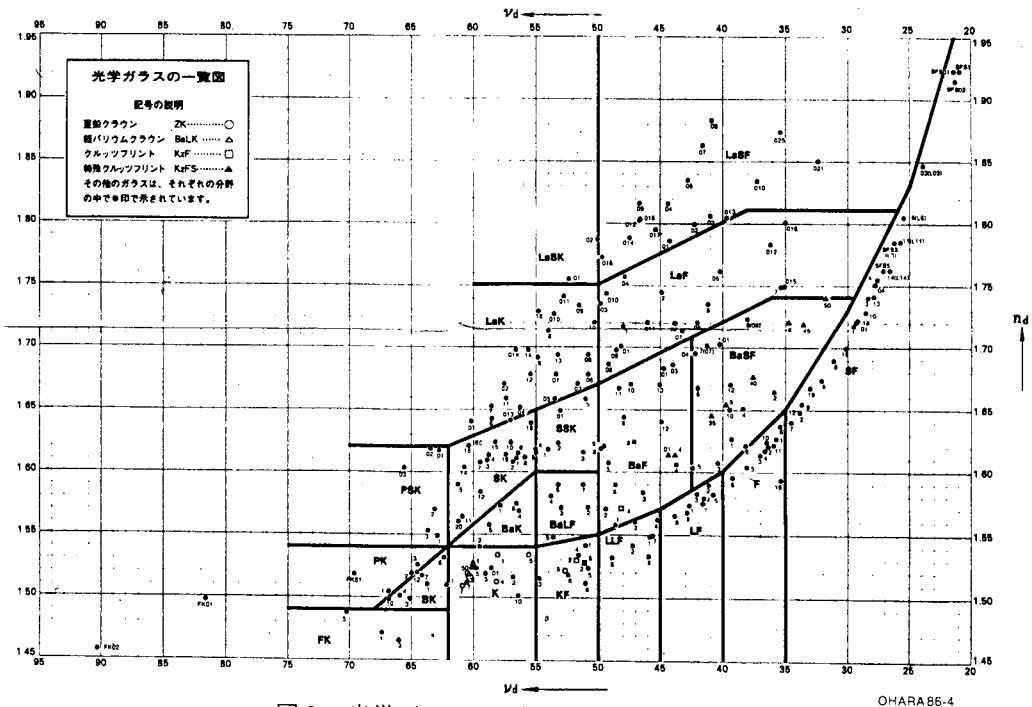


図6 光学ガラスの種類と特性<sup>(7)</sup>(OHARA)

表4は光学用プラスチックの種類と特性を示す。PMMAとPCがレンズ用として用いられている。

表4 光学用プラスチックの種類と特性<sup>(9)</sup>(永田)

	PMMA	PC	PST	CR39	TPX	ガラス
透過率 (%)	92	85~91	87~92	91	90	—
$n_D$	1.49	1.59	1.59	1.50	1.46	1.44~1.92
アッベ数	58	30	31	58	56	21~83
$dn/dt$ ( $10^{-5}/^{\circ}C$ )	-8	-9	-12	(-14)	—	-0.01~1
比重	1.19	1.20	1.06	1.32	0.835	2.3~6.3
引張強度 ( $D638kg/cm^2$ )	490~770	560~670	350~840	380~480	(250)	250~800
耐衝撃性 ( $D256I\ zodノッチkg\ cm/cm$ )	1.6~2.7	65.3~98.0	1.4~2.2	1~2	3	—
弾性率 ( $10^3kg/cm^2$ )	29~32	22~24	28~32	17~23	13	(430~1300)
鉛筆硬度	2H	B	—	4H	—	—
熱膨脹率 ( $10^{-5}/^{\circ}C$ )	6~9	7	6~8	10~12	12	0.5~1.5
$T_g$ ( $^{\circ}C$ )	105	147	87	—	30	>450
使用上限温度 ( $^{\circ}C$ )	65~100	120~135	65~75	60~70	(熱変形100)	>350
成形収縮率 (%)	0.1~0.4	0.5~0.7	0.1~0.6	(重合収縮14)	—	—
吸水率 (%)	0.1~0.4	0.15~0.18	0.03~0.1	0.2	0.01	—

PMMA：メタクリル樹脂 (ポリメチルメタクリレート)

PC：ポリカーボネート

PST：ポリスチレン

CR39：ジエチレングリコールビスアリルカーボネート

TPX：ポリメチルペンテン樹脂

c. 光学素子の品質

表5はレンズ、プリズムなどの要求品質と加工の難易度を示す。

表5 要求品質と加工難易度<sup>(9)</sup>(柳沢)

項目	等級		AA	A	B	C		
機能精度	肉厚	中心厚	±0.02	±0.04	±0.07	>±0.10		
		直径	外径	$\begin{matrix} 0 \\ -0.01 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -0.02 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -0.06 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -0.10 \end{matrix}$	
			内径	±0.03	±0.05	±0.10	±0.20	
	角	頂角	<10mm	3'	5'	20'	30'	
			35mm	1'	2'	5'	10'	
			50mm	30"	1'	3'	5'	
		ダハ角	<10mm	15"	30"	45"		
			35mm	5"	10"	30"	>40"	
			50mm	2~3"	6~7"	20"	>40"	
	平行度	<10mm	30"	1'	5'	10'		
		35mm	15"	30"	1'	5'		
		50mm	5"	15"	30"	1'		
度(二次)	心精度		10"	30"	1'	3'		
	球面精度	ニュートン本数	<0.5本	2本	3~5本	≥5本		
		アス	<0.1本	0.1~0.5本	0.5~1.0本	≥2本		
		クセ	<0.1本	0.1~0.5本	0.5~1.0本	≥2本		
	平面精度	ニュートン本数	$(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{4})\lambda$	$(\frac{1}{2} \sim 1)\lambda$	(1~2) $\lambda$	10~15本		
		アス	$(\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10})\lambda$	$(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{4})\lambda$	$(\frac{1}{2} \sim 1)\lambda$	3~5本		
		クセ	$(\frac{1}{20} \sim \frac{1}{10})\lambda$	$(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{4})\lambda$	$(\frac{1}{2} \sim 1)\lambda$	3~5本		
	外観精度(2次)	キズ	白キズ	認められない	認められない	<D/80	<D/40	
			キラキズ	認められない	D/2	D/2~D	D~2D	
		砂目	認められない	認められない	2~3点あり	~10点位		
	形状	薄もの	t/D	両凸	<0.03	0.05~0.10	0.10~0.15	>0.15
				両凹	<0.03	0.03~0.05	0.05~0.10	>0.10
凸メニス			<0.03	0.03~0.15	0.10~0.15	>0.15		
こぼ厚		<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~3.0			
外形		大きいもの	>100	100~70	70~30	30~20		
		小さいもの	<5	5~10	10~20	20~30		
Z値		<0.03	0.05~0.07	0.07~0.10	>0.15			
はりつけ数		1	3	6~7	>12			
1個みがきの深さD/R		>1.8	1.6~1.8	1.5~1.6	1.2~1.5			
被加工性		摩耗度(砂かけ)		<60	$\begin{matrix} 50 \sim 80 \\ >300 \end{matrix}$	80~150	150~200	
硝種	(一例)加工のしやすさしにくさ		BaSF014 FK01 PSK01 02	SFS03	BK7	LF1~8 SF4~8		

品質としては次のようにまとめられる。

- (i) 球面精度、平面精度
- (ii) 肉厚、直径
- (iii) 角度、平行度、心精度
- (iv) 外観精度

そして、各項目ごとに加工の難易度を等級として表わしてある。

### ③ 紫外光学系

#### a. エキシマレーザ・半導体焼付装置

図7は波長248nmのKrFエキシマレーザを用いた半導体焼付装置の光学系を表わす。投影光学系は、波長狭帯化用エタロン、ビームスキャン用走査レンズそして結像用対物レンズなどを用いている。

#### b. 材料の種類と特性

エキシマレーザに使用される材料の条件は次のものである。

- (i) 紫外波長での透過率が高いこと
- (ii) 屈折率の均質度が良いこと
- (iii) 耐光強度が高いこと
- (iv) 熱伝導率が高いこと
- (v) 線膨脹率が小さいこと

紫外光透過用材料としては、石英、CaF<sub>2</sub>（蛍石）、MgF<sub>2</sub>しかなく、さらに、高い均質度（ $1 \times 10^{-6}$ ）のCaF<sub>2</sub>がない、などの問題がある。

図8は石英と蛍石の紫外域における透過率を表わす。透過率は200nm以下で急激に減少することがわかる。

#### c. 光学素子の品質

現時点の品質レベルは次のものである。

- (i) 形状誤差 平面、球面で $\lambda/50$  ( $\lambda = 0.632\mu\text{m}$ ) 程度
  - (ii) 表面粗さ 10nm Rmax程度
- 形状精度はレーザ波長の数十分の1程度必要といわれる。

### ④ 軟X線光学系

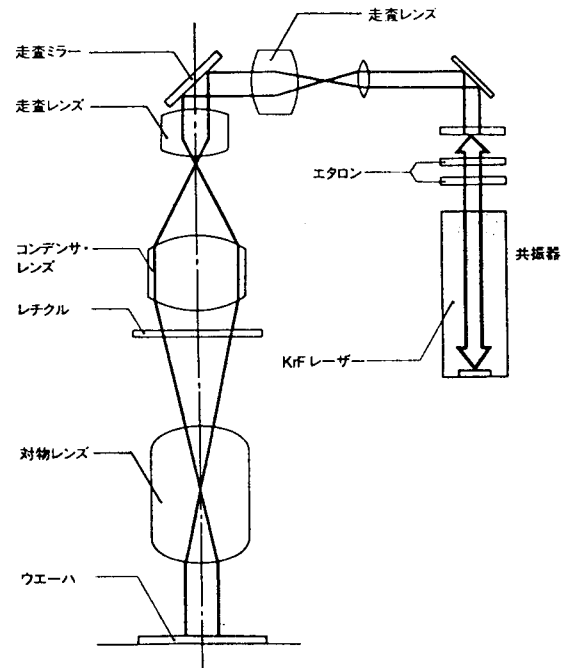


図7 エキシマレーザ・ステッパー光学系<sup>(10)</sup>

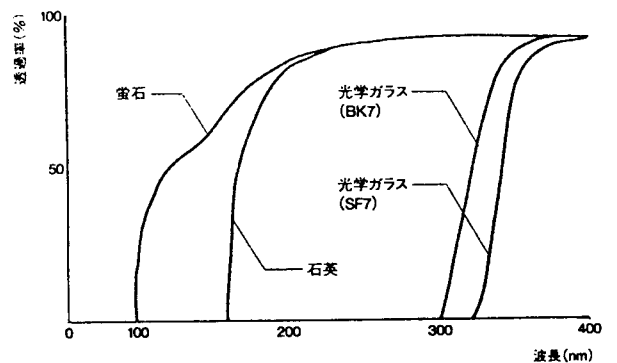


図8 紫外域における透過率<sup>(11)</sup>(代表的材料)



a. 軟X線用光学素子

軟X線領域では、結晶あるいは回析格子を除いて、反射光学系が用いられている。垂直入射の反射光学部品の研究が各国で盛んに行なわれおり、例えばタングステンとカーボンを $\lambda/4$ の膜厚で交互に多層に積層する方法がとられている。しかしながら、現時点では、X線の臨界角以下で反射面に入射する斜入射光学系が実用化されている。図9はX線ミラーの概念図を表わす。(a)はシリンジカル面、(b)は(a)を垂直に構成したものであり、(c)はトロイダル面、(d)は放物面、(e)はX線望遠鏡で放物面と双曲面の組合せ、(f)はX線顕微鏡で双曲面と楕円面の組合せで倍率が $M = \alpha/\beta$ で決まる。

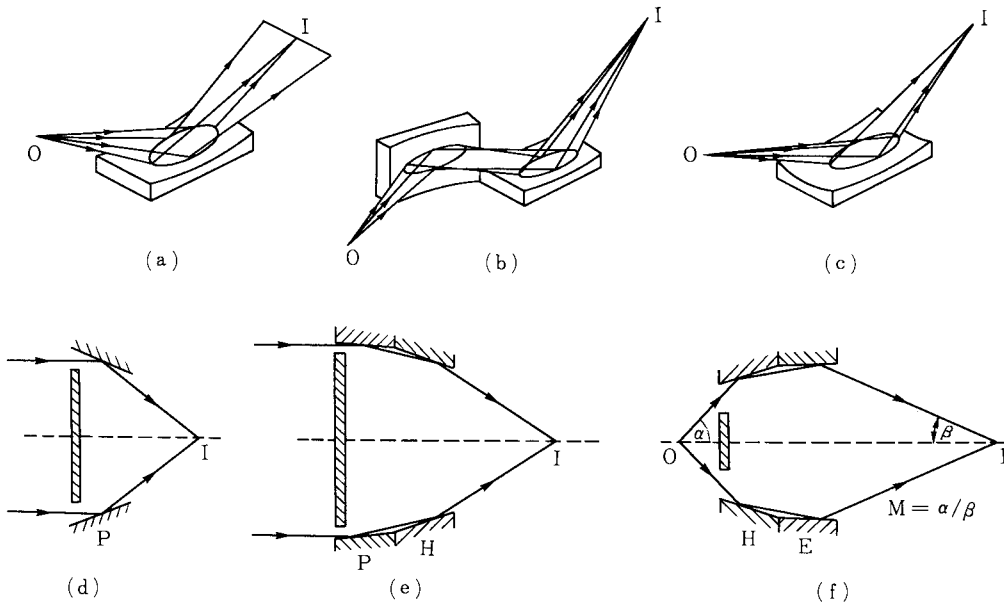


図9 X線ミラー<sup>(12)</sup>

b. 材料の種類と特性

加速器を用いた放射X線は高エネルギーであるため、この領域における材料について次に表わされる条件が必要である。

- (i) 被研磨性が良いこと
- (ii) 熱的安定性、エネルギー吸収による形状変形が少ないこと
- (iii) 照射X線との吸収反応性、高い損傷しきい値を有すること
- (iv) 超高真空中で使用可能なこと
- (v) ミラーの表面強度が高く、清浄・再使用が可能なこと

表6は現在検討されている材料と2 GeVの放射光照射による材料損傷テストの結果を表わす。金属、窒化けい素 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )、炭化けい素 ( $\text{SiC}$ ) などが放射エネルギーに対して損傷のないことが表わされている。表中のWCは高い熱伝導性を示し、照射時のミラー面内の温度分布がSiCより均質になり光学的により望ましいが、研磨法を含めて大寸法のミラーは現在までのところ製作されていない。

ミラーの局所的な温度上昇はミラーの熱変形を発生させミラーの形状変化を起こす。ミラーの

熱変形を予測する尺度として各種材料の性能指数

$$K/\alpha$$

K：熱伝導率

$\alpha$ ：線膨脹率

があり、

ダイヤモンド単結晶：40

CVD—SiC : 6.7

がすぐれ、Zerodur (3.2) 以下SiC (2.7)、Cu (2.5)、Au (2.2)、SiO<sub>2</sub> (0.25) 等材料特性を求めることができる。

現状ではSiCが熱変形しにくい点から最も関心がはらわれている。

表6 各種ミラー材と放射光照射損傷テスト結果<sup>(13)</sup>

材 料	平均電流 (mA)	SRS エネルギー (GeV)	最大熱電対温度 (°C)	露光時間 (h)	リ マ ー ク
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	150	2	247	12	わずかな褐色の痕跡以外明りょうな損傷無し
SiC (CVD) on graphite	150	2	313	8	痕跡認められない
WC	170	2	536	10	痕跡認められない
Fused silica	228	1.8	90	2	1.8GeVで光軸上に褐色の痕跡
		2	150	18	2 GeVでも褐色の痕跡認められない 表面が溶融
SiC hot pressed	100	1.8	175	3	痕跡認められない
Zerodur	90	1.8	122	9	表面破壊および光軸上に色中心出現
SiC hot pressed	100	2	213	2	痕跡認められない
SiC refel	100	2	235	4	痕跡認められない
SiC on refel	100	2	214	4	痕跡認められない。光軸上に緑色蛍光
Aluminium	100	2	213	2	痕跡認められない
Molybdenum	80	2	400	16.5	痕跡認められない
Copper OFHC	100	2	470	11	全面にリップル出現
Invar	110	2	300	11	痕跡認められない
Borosilicate glass	120	2	—	1 min	数片に破断 表面溶融、全面に色中心出現
SiC CVD on refel	200	1.8	371	48	痕跡認められない。光軸上に蛍光出現せず
Float glass	119	1.8	—	1 min	数片に破断 光軸上で表面損傷/溶融
Sapphire	150	1.8	—	3	数片に破断 表面溶融しない
Pyrex	200	1.8	—	27	数片に破断 光軸上で表面溶融

c. 光学素子の品質

素子の必要なスペックとして、次のものが求められる。

- (i) 形状はなだらかであるが複雑で寸法範囲が極めて広い。
- (ii) 形状精度が極めて高い。特にローカル（局所的）な傾斜に対する規制がある。
- (iii) 表面粗さが極めて高い（ $\sim 0.1$  nm rms）。
- (iv) SiCはじめ被加工物がガラス、セラミックス、結晶材料など短波長用新材料に対応できること。

図10は研磨工具に研磨用ピッチ、研磨砥粒にダイヤモンド砥粒（ $3\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ 粒径）を用い、SiCの平面ミラーを研磨加工した表面粗さを表わす。この方法によって $0.26\text{nm rms}$ を得ている。

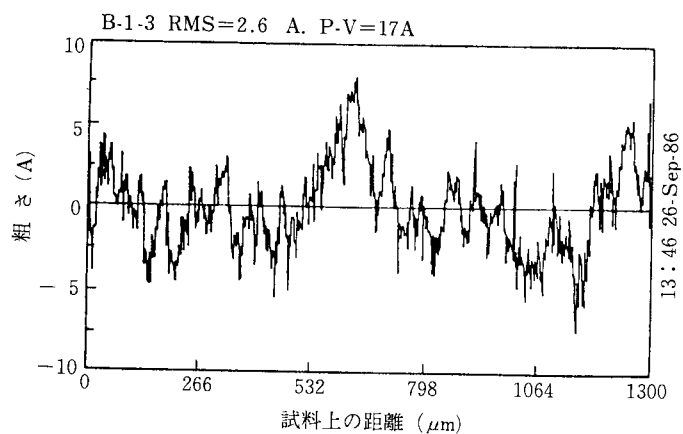


図10 CVD-SiCミラーの表面粗さ測定値<sup>(14)</sup>(飯島他)

## 2. 超精密ポリシング技術

### (1) ポリシング技術の現状と特徴

レンズ、プリズムなど光学素子として古くから使われているガラス、光学用プラスチック、光学用結晶材料、また半導体用結晶材料などの現在のポリシング技術について概要と、光学素子に用いるいくつかのポリシング技術について述べる。

ポリシング技術は古くは研磨工具、研磨砥粒を改良する形で発展してきた。工具を例にとると、研磨用ピッチから人工皮革・不織布へと変化もしており研磨除去速度の高速化をもたらした。一方では、従来工具の改善・研磨方式の開発により、加工精度（形状精度、表面粗さなど）の向上も図られ、光学素子の使用用途拡大をもたらしている。近年は、加工対象材料や使用用途の拡大により、新しい加工原理、方式によるポリシング技術が開発され、産業用として実用化さされつつある。

表7 新しい原理・方式の研磨法<sup>(15)</sup>(今中)

加工法	装置形式	砥粒	加工液・加工雰囲気
① 磁性流体利用の研磨（加工圧規制）	}	○	○
② 磁性流体利用の研磨（作用砥粒数規制）		○	磁性流体
③ 電気泳動現象利用のポリシング		○	○
④ ケモメカニカルポリシング		○	化学液
⑤ メカノケミカルポリシング		軟質粒子	—
⑥ PMC加工		○	化学液
⑦ ハイドレーション加工		—	過熱水蒸気
⑧ ノン・コンタミネーション加工		—	水
⑨ ハイドロプレーン加工		—	化学液
⑩ EEM	}	○	○
⑪ 非固体接触研磨		○	○
⑫ フロートポリシング		○	○
⑬ 磁性流体利用のFFF		○	磁性流体
⑭ 電気泳動現象利用のFFF		○	○
⑮ プラズマ利用のFFF		○	—
⑯ 磁気浮揚研磨		○	磁性流体
⑰ 磁性砥粒による磁気研磨		磁性砥粒	—

表7は新しい原理、方式の研磨法をまとめたものである。大きくは次の原理・方式の開発にまとめられる。

- i) 加工面への砥粒圧力の作用媒体を粘弾性から粘性流体に変える
- ii) 砥粒と加工物の化学反応を加工原理とする
- iii) 砥粒を使わず加工液・雰囲気と加工物の反応を原理とする
- iv) 工具と加工面の接触状態をコントロールする

ここでは、光学素子のポリシング技術として

- a) 1 $\mu$ mオーダー以下の寸法精度、形状精度を得る

b) nmオーダー以下の表面粗さ、無歪、加工変質層レスを得る

c) 材料固有の性質を利用する

加工方式・原理の代表的なものについて表わす（ただし、オスカー式横振り研磨方式は3項で詳述する）。

① 液中研磨（ボウル・フィード・ポリシング<sup>(16)</sup>）

写真1は液中研磨装置を表わす。

研磨工具をプラスチックボウルの中に入れ、研磨砥粒および水を加えて、工具表面より10～15mm程度に水を加え加工物も浸漬状態にして研磨を行なう。

加工液中で、大きい砥粒と小さい砥粒がすいひ効果によりボウル内の上方の液の浮遊した小さい砥粒により研磨が行なわれる。工具も加工物も装置の外部環境・温度変化の影響を受けにくいため温度変化による変形を生じにくい。

図11は加工した石英ガラス、BK-7の表面粗さを表わしたものであり、0.数nm程度の粗さが得られている。

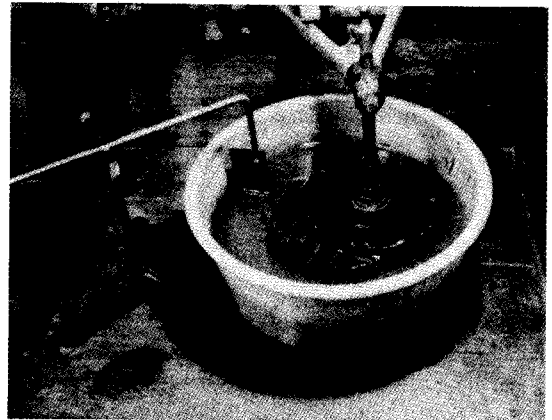


写真1 ボウル・フィード・ポリシング装置<sup>(17)</sup>  
(横田)

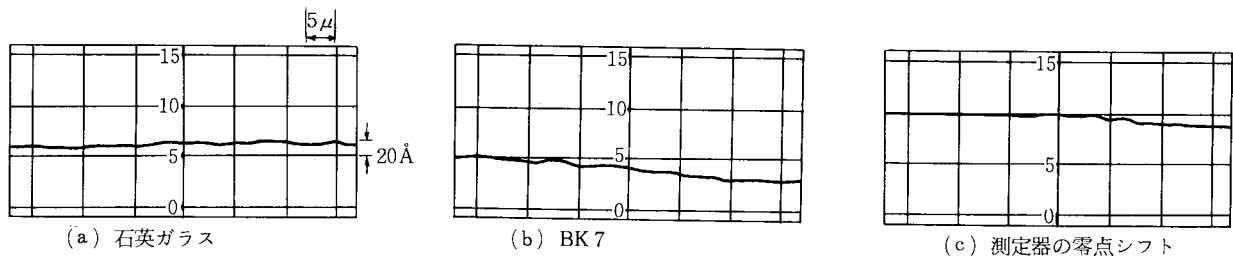


図11 加工面粗さ結果<sup>(17)</sup>(横田) (測定装置 Talystep)

② リングポリシャ<sup>(18)</sup>

図12は遊星回転方式の研磨機であるリングポリシャの原理を表わす。

被加工物の加工面の各点の研磨除去量を均一にするために次の運動を与える。

(i) リング状のラップ盤の回転角速度： $\Omega$

(ii) 被加工物の回転角速度： $\omega$

(iii)  $\Omega = \omega$  とすると

(iv) 被加工物のすべての点とラップ面との相対速度が等しくなる。

この方法によると直径400mm、材料BK7を平面度 $\lambda/10$  ( $\lambda = 0.632\mu\text{m}$ ) に仕上げることができる。また、表面粗さは0.7～1 nm rmsとなる<sup>(19)</sup>。

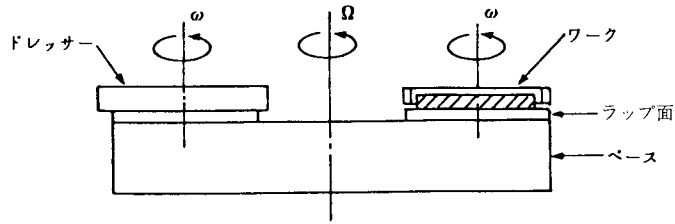


図12 リングポリシャの原理図<sup>(19)</sup>(吉田)

③ EEM

図13はEEM (Elastic Emission Machining) の加工原理を表わす。

1 μm以下の微細粉末粒子の懸濁液中でポリウレタンの球状工具を高速回転させると、動圧効果によって球状工具が浮上し、工作物と工具との隙間を粒子が移動する。粒子は弾性流体潤滑的な流れによって加速されて工作物表面に到達し、粒子と工作物界面で一種の化学結合によって粒子の付着・ころがりが生じる。その結果、工作物表面が原子オーダーで除去される加工法である。工具として球状工具を用いており、被加工物の形状により自由な対応能力を持つ加工法である。

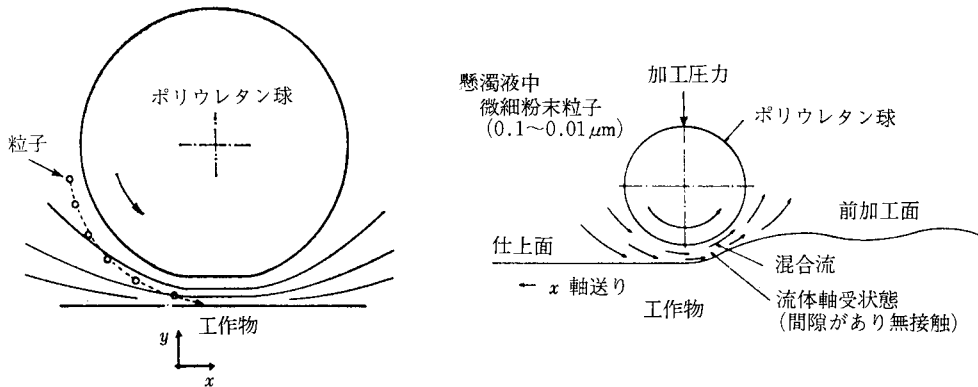


図13 EEM加工模式図<sup>(20)</sup>(森)

図14は粉末粒子に酸化ジルコニウム (ZrO<sub>2</sub>) を使用した時の各種材料に対する加工特性 (除去速度) の変化を表わす。加工特性は粒子と被加工物の物性的相性によると考えられている。

加工した面の評価を表わすものが図15と図16である。図15より加工面の表面粗さはTalystepの縦分解能 (0.5nm) 程度まで得られていることがわかる。

また、図16は表面欠陥密度の推定を行なうフォトルミネッセンス相対速度の測定結果を示すもので、EEM加工面は強度の低下が見られず、格子欠陥の生じない加工法といわれている。

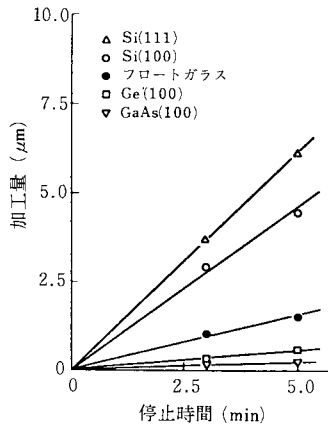


図14 工作物の違いによる加工特性<sup>(21)</sup>  
(森他)

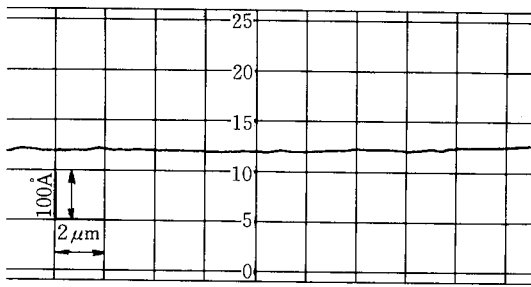


図15 Si単結晶の加工面粗さ<sup>(20)</sup>(森)

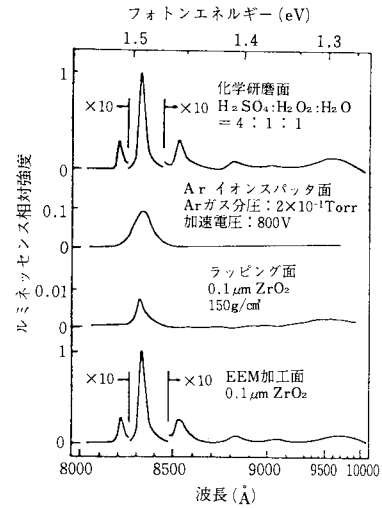


図16 GaAsの各種加工面のルミネッセンス  
スペクトル<sup>(20)</sup>(森)

#### ④ フロートポリシング

図17はフロートポリシングの加工装置を、図18は材料除去機構を表わす。

研磨工具の高精度回転を必要とするために軸受に静圧油軸受を用い、軸受に取りつけた錫盤上に

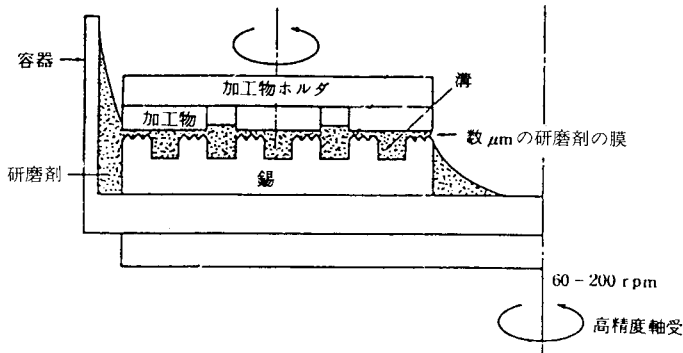


図17 フロートポリシング加工装置モデル<sup>(22)</sup>(難波)

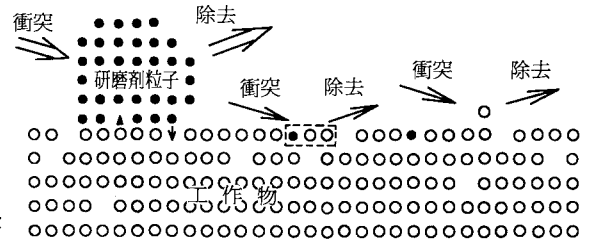


図18 フロートポリシングにおける工作物の最表面  
原子の除去過程<sup>(22)</sup>(難波)

渦状溝を有する平面形状をダイヤモンド切削により形成し、この平面を工具として使用する。研磨砥粒として公称径7nmのSiO<sub>2</sub>の微粒子を用い、工具と工作物を高速回転させることによって両者間に研磨液の動圧流体潤滑状態をつくる。その結果、両者は接触せず浮上状態で加工が進行する。

除去機構は砥粒と工作物の物理的・化学的な相互作用による。砥粒の衝突作用によって、原子オーダーで工作物表面が除去されると考えられている。

加工可能な形状は、平面であり、加工対象形状の自由度はない。

加工した面の評価を表わすものが図19と図20である。図19は加工面の表面粗さを示し、光学的表面形状測定装置で0.23nm rms、1.6nm P-V、平面度は直径100mmでλ/20以下(λ=0.632μm)が得られている。図20はSUS 304材をフロートポリシングにより加工変質層を除去したことによる鏡面反射率の向上結果を示す。

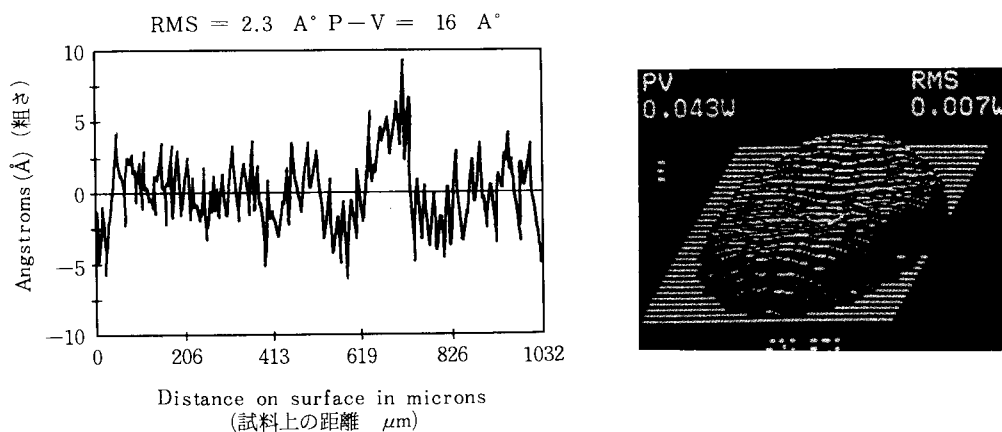


図19 加工面粗さおよび平面度<sup>(23)</sup>  
(難波他)

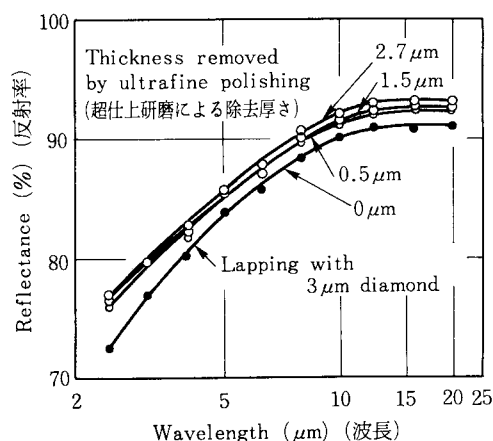


図20 鏡面反射率に及ぼす加工変質層深さの影響 (難波)

## (2) 加工工具

表8は、ポリシングに使われる加工工具の種類と用途および特徴を示す。超精密ポリシングに使われる加工工具の実用事例を以下に述べる。



表8 加工工具

種類	厚さ (シート状)	用途	特徴
ピッチ	—	光学研磨	精密～超精密(面)
ラシヤ	0.5～1	眼鏡類など	低面精度、耐高圧
フェルト	0.5～1	眼鏡類など	低面精度、耐高圧
フェルト+ピッチ 松やに	0.5～1	眼鏡類など	上記より面精度よい
ポリウレタン	0.5～1.25	高速研磨	高速高圧で精密研磨できる
ポリテックス (合成皮革)	1～2	シリコン、半導体 金属、ガラスなど	きずのない表面ができる

① 研磨ピッチ (以下ピッチ)

表9は、ピッチの種類とその製造方法および用途を示す。普通、ストレートアスファルト(石油系)、タールピッチ(石炭系)、ウッドピッチ(木タール系)の三種が用いられている。これらのピッチはそれぞれ使用方法が異なり、研磨面に及ぼす加工精度も異なる。したがって、研磨条件(室温、回転数、荷重、材質、曲率半径、面精度)に適合した種類および粘弾性(針入度)のピッチを選定し、使用することが重要である(写真2)。

a. ストレートアスファスト

表9 研磨ピッチとその用途

成分系	製法	用途
ストレートアスファルト(石油系)	真空蒸留	一般研磨用として代表的なピッチ
ブローンアスファルト(石油系)	真空吸込み蒸留	高荷重・短時間研磨用として特性をもつ
タールピッチ(石炭系)	乾留	原器などの高精度、特殊品研磨
ウッドピッチ(木タール系)	乾留	原器など高精度研磨用、手みがき用

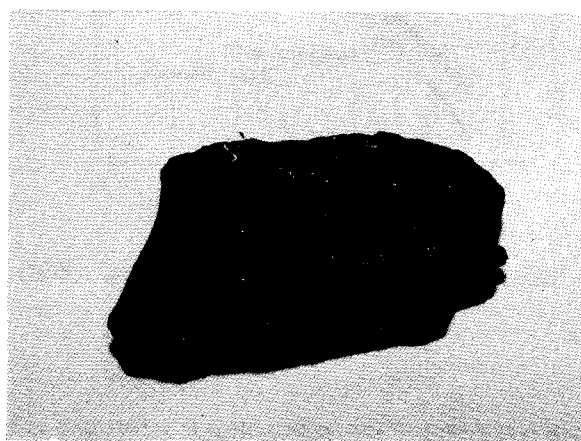


写真2 ストレートアスファルトピッチ

ベタ皿、網目皿に使用し、研磨熱によるピッチ面の変化はわずかである。欠点は、研磨皿の使いはじめにおいて加工面となじませる仕事に時間と技能を要することである。

b. タールピッチ

網目皿に使用し、面出し専用を用いる。研磨能率が低いのが欠点であるが、他のピッチより高精度の加工面が得られ、光学原器や超高精度 ( $\lambda/60\sim$ ) 素子に適する。

c. ウッドピッチ

少量のまつやに、みつろう (2~5%) をまぜて用いる。加工面とのなじみはよいが、温度変化によるピッチの硬さの変化が著しいという欠点がある。

加工面精度はストレートアスファルトよりも優れている。

② ポリウレタンポリシャ

硬質ポリウレタン樹脂発泡体に、フィラーとして酸化セリウム ( $\text{CeO}_2$ ) あるいは酸化ジルコニウム ( $\text{ZrO}_2$ ) などの研磨砥粒を含有させたものとノーフィラーのものがある。ポリシャの硬度、密度、厚さ、形状などにより、研磨速度、研磨面品質、耐摩耗性が異なる。

高速高圧研磨加工に広く使用されている (写真3)。

③ 研磨ペレット

研磨砥粒粒子 ( $\text{CeO}_2$  など) をあるバインダーにて固型化したもので、写真4に示すように金属工具に保持して使用する。小さい径 ( $\phi 4\text{mm}$ ) から大きい径 ( $\phi 30\text{mm}$ ) のものまであり、加工物の大きさ、金属工具の大きさなどに応じて使いわけられる。

固型化されて硬いために、工具自身を高い形状精度に加工することが可能であり、小さい径の光学素子を高精度に加工することができる。また、研磨砥粒粒子を固型化したものであるために水だけで加工を行なう。あるいは、他の工具に比較して、薄い濃度の研磨砥粒液で加工ができる。

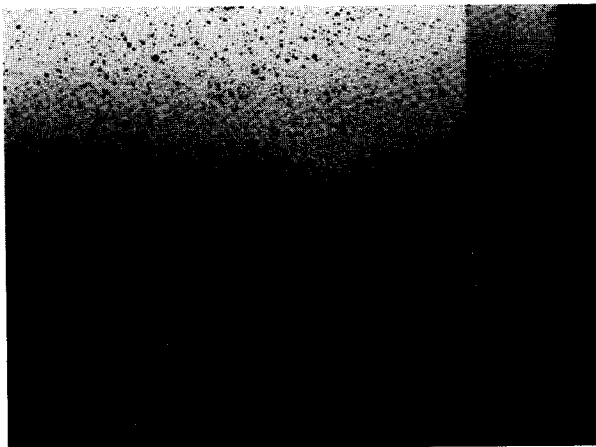


写真3 各種ポリウレタンシート

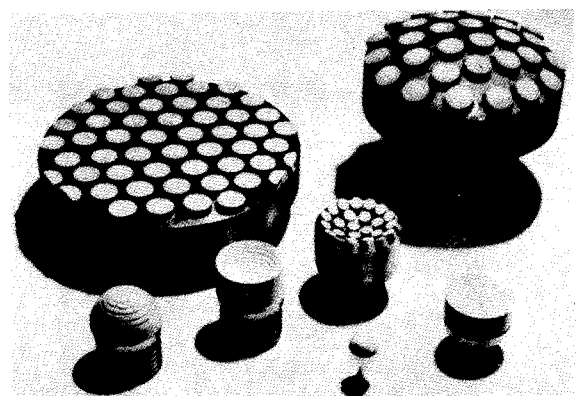


写真4 研磨ペレット (昭和電工製)

(3) 研磨用砥粒および研磨液

① 砥粒

表10は、研磨用砥粒として用いられている物質の諸性質を示す。砥粒として必要な性質は次のようである。

表10 研磨用砥粒の諸性質

名 称	化 学 式	モ ー ス 硬 さ		比 重	融点 (°C)
		旧	新		
酸化けい素	SiO <sub>2</sub>	6.5~7		2.65	~1477
酸化鉄	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5~6.5		5.1~5.2	1550
酸化セリウム	CeO <sub>2</sub>	6		7.1	1950
酸化クロム	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6~7.5		5.2	1990
酸化アルミニウム	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9		3.8~4.0	2015
酸化ジルコニウム	ZrO <sub>2</sub>	5.5~6.5	12	5.5~6.5	2700
ダイヤモンド	C	10	15	3.5	>3500

- (i) 加工物もしくは加工表面の生成物に比べて適当に硬いこと
- (ii) 加工物より融点の高いこと
- (iii) 大きさと形状の揃った細粒が得やすいこと
- (iv) 研磨液とよくまじること

光学素子の超精密研磨には研磨用砥粒として酸化セリウム、酸化ジルコニウム、ダイヤモンド、酸化けい素が広く使われている。

砥粒粒径は数nmから1μm程度のもを使用している。ただし、化学的に活性な酸化セリウム、酸化ジルコニウムは自然放置状態では、サブミクロン以下の粒径の砥粒が凝集して見かけの粒径が1μm以上になっている。

a. 酸化セリウム

研磨用として用いる酸化セリウムは、等軸晶系のもので六方晶系のものは研磨能力が乏しい。

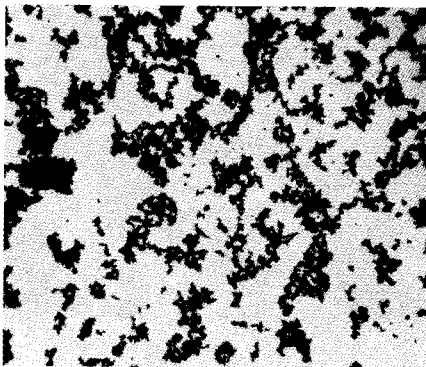


写真5 酸化セリウム粒子<sup>(24)</sup>(石田他)

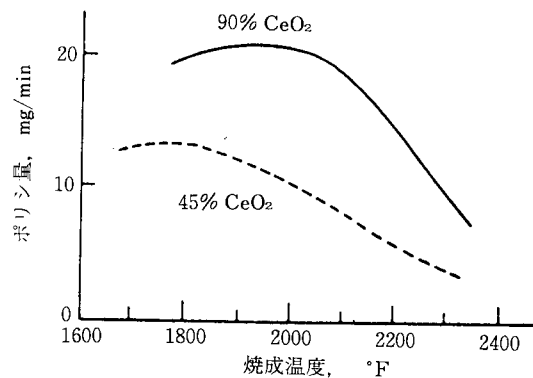


図21 焼成温度と研磨速度

純度として40%~99.9%のものがあり、超精密研磨には高純度のものが広く使われている。図21はポリシ量に及ぼす焼成温度の影響について示したもので、光学ガラスでは1,600~2,000°Fが最適である。

b. 酸化ジルコニウム

水酸化ジルコニウムまたはZr塩を熱して得られる白色の粉末である。図22は粒径による光学ガラスの研磨速度の影響を表わしたもので0.5~1.0 $\mu$ m (凝集) のとき速度が大きくなる。

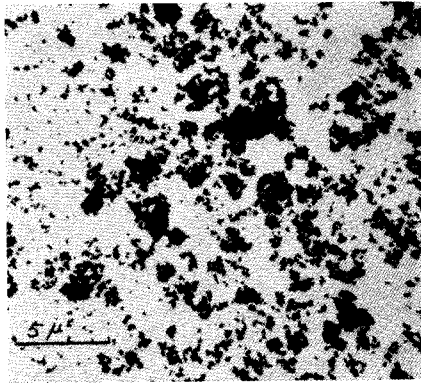
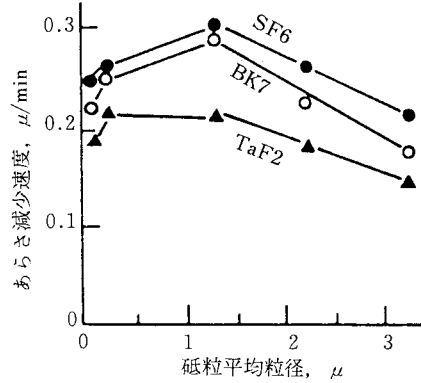


写真6 酸化ジルコニウム粒子<sup>(24)</sup>(石田他)



ポリシャ：ポリウレタン  
砥粒：ZrO<sub>2</sub> (等軸)  
ポリシ液pH：9.5  
ポリシ圧力：100g/cm<sup>2</sup>

図22 粒径と研磨速度

c. ダイヤモンド

砥粒として用いるダイヤモンドは天然より人造合成物が広く実用されている。人造合成物は、写真7に示すようにほとんどブロッキーな形 (ずんぐりした形) をしている。図23に砥粒の種類による研磨速度への影響の一例を示す。研磨速度は砥粒の硬さには依存せず、砥粒の化学的活性に影響を受けることを図は示している。

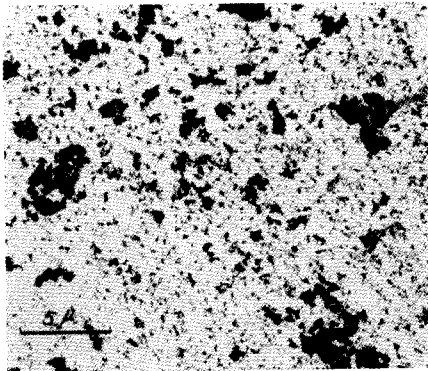


写真7 ダイヤモンド粒子<sup>(24)</sup>(石田他)

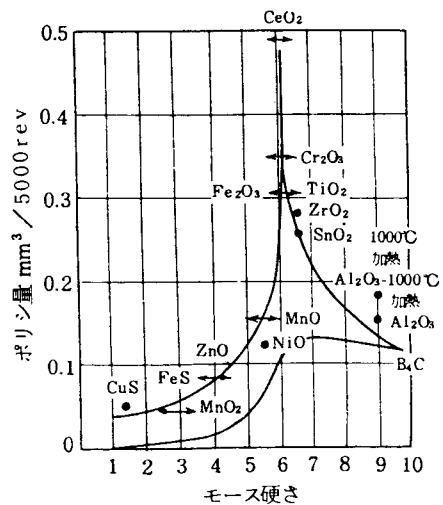


図23 各種砥粒によるガラスのポリシ量 (BourgenauxとPeyches, Kaller)

② 研磨液（ポリシ液）

研磨液としては水あるいは油が一般に使用されている。液の砥粒濃度、粘度、化学的性質により研磨速度が変化する。

a. 砥粒濃度と研磨速度

図24は濃度の影響を表わしたもので、能率的な加工を行うには適正な濃度（10%～20数%）があることを示している。

b. 液粘度と研磨速度

図25は粘度の影響を表わしたもので、粘度が高くなると速度は低下することを示している。これは液による荷重分担が考えられ砥粒に作用する荷重が小さくなるためと解釈される。

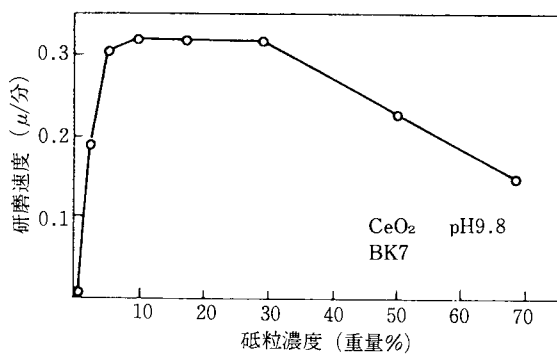
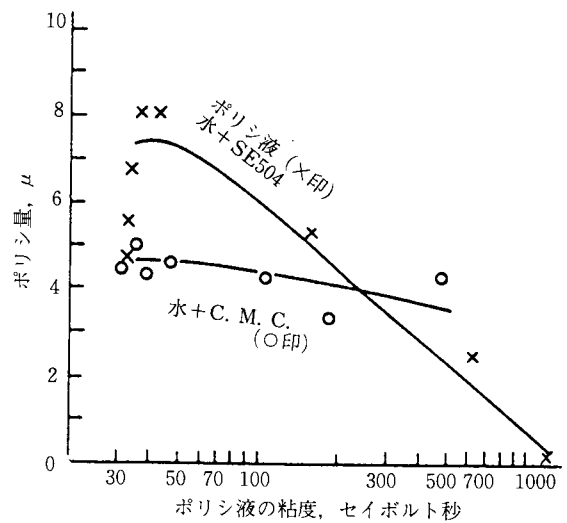


図24 砥粒濃度と研磨速度<sup>(25)</sup>(泉谷)



ガラス：BK7（砂かけ面） ポリシ圧力：460g/cm<sup>2</sup>  
 ポリシヤ：アクリル樹脂 ポリシ速度：410m/min  
 砥粒：CeO<sub>2</sub> ポリシ時間：1 min  
 ポリシ剤濃度：10%

図25 液粘度と研磨速度

c. 液の化学的性質

図26は化学的耐久性の異なるガラス材料と液のpHの関係を示す。酸、アルカリに強い石英ガラス、BK7はpHの影響をほとんど受けないが、その他は構成成分に合致した影響を受けている。

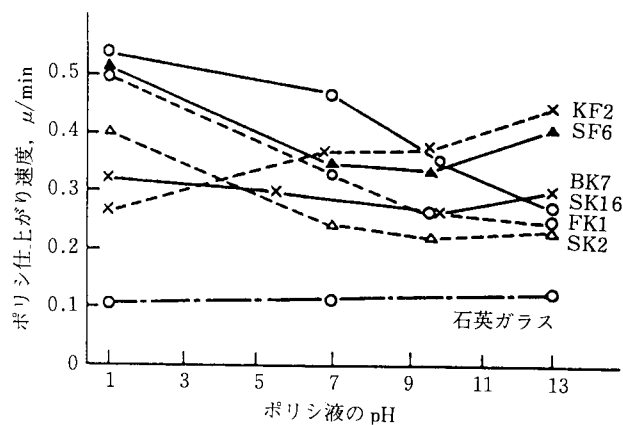


図26 液のPHと研磨速度

#### (4) 評価技術

光学素子の製造において、平面、球面、非球面などの形状計測技術、ポリシング加工した素子の表面粗さ計測、加工によって生じる加工変質層など品質評価すべき項目は多く、加工技術に先だって、少なくとも並列な計測技術の確立が必要である。

ここでは、形状計測法、表面粗さ計測法についてその概要を述べる。

##### ① 形状計測法

1  $\mu\text{m}$ あるいはサブ $\mu\text{m}$ オーダーの素子の形状計測法としては、主に次のものがある。

- (i) 光の干渉を用いる方法
- (ii) 光の反射を用いる方法
- (iii) 形状測定ヘッド（たとえば、スタイラス、光学ヘッドなど）の位置計測を用いる方法

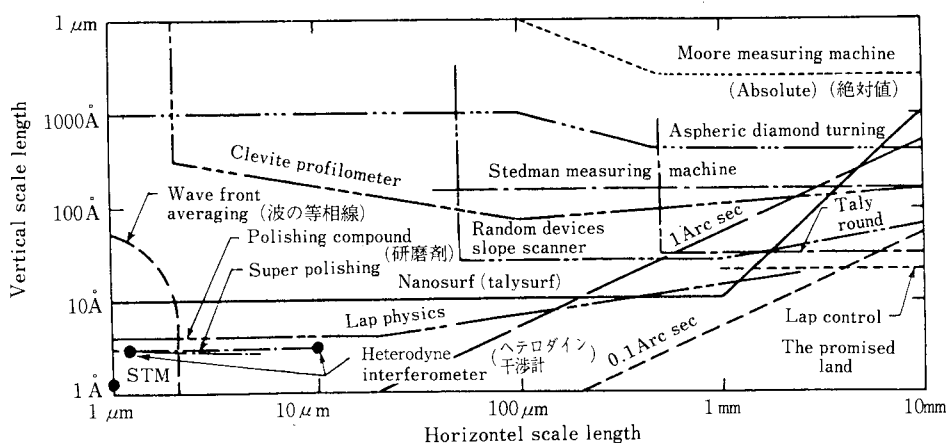


図27 光学素子、表面加工法、加工材料のスケール領域比較図<sup>(26)</sup>

図27は光学素子、各種の表面加工法、加工材料の縦横スケール領域をまとめたものである。縦軸に表面粗さを、横軸に測定領域をとり形状測定法、表面粗さなどを含めた比較が行なわれている。

形状計測法として広く実用化されているものに光の干渉現象を利用して計測を行なう干渉計がある。

写真8は波面の位相を直接測定する方法である位相測定法を用い、高い分解能をもつ干渉計を示す。この干渉計は、次の精度仕様を有している。

- (i) システム精度：P-V値 $\lambda/50$ 以上
- (ii) くり返し精度：P-V値 $\lambda/100$  ( $2\sigma$ )

$$(\lambda = 0.6328 \mu\text{m})$$

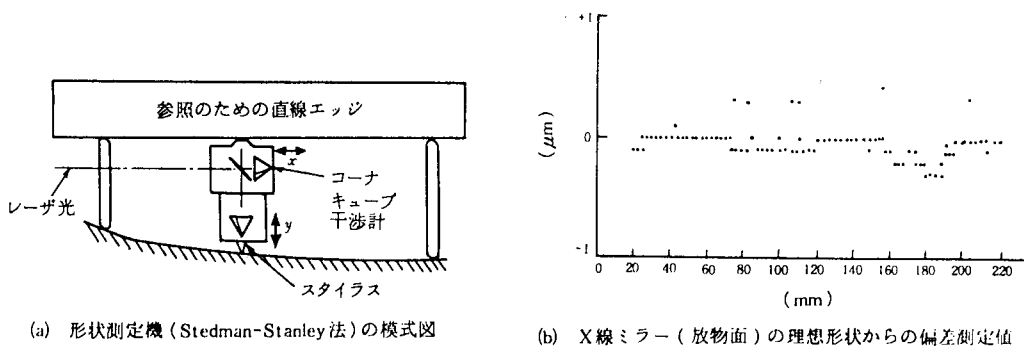
測定対象物としては平面、球面、2次元曲面（楕円など）の非球面が可能である。一般的な波面の2次元/3次元表示以外に、MTF (Modulation Transfer Function)、PSF (Point Spread Function)、Zernik多項式展開分析などもソフト処理により行なう。

図28は図27に示したStedman-Stanley法を表わすもので、測定器の模式図と放物面より成るX線用ミラーの理想形状からの偏差の測定例を示す。測定精度は2~300 Åを有していると思われる。



写真8 干渉計システム<sup>(27)</sup>

図29は光の直進性を利用し被測定面上の各点の法線を測定し、求めた面傾斜を積分して面形状を求める装置の法線を測定する光学系を示す。



(a) 形状測定機 (Stedman-Stanley法) の模式図

(b) X線ミラー (放物面) の理想形状からの偏差測定値

図28 スタイルラス形状計測機の模式図と測定例<sup>(28)</sup>

誤差伝播の解析から $0.01\mu\text{m}/100\text{mm}$ の精度で形状測定するために法線測定用光学系の位置誤差を $2\mu\text{m}$ 以内、角度誤差を $0.2$ 秒以内におさめている。そのために2軸ゴニオメーター、3軸移動テーブル (ダブルV型溝ガイド付) はピッチング、ヨーイング共、 $0.1$ 秒/ $80\text{mm}$ を保証している。同図(C)は曲率半径 $5,555\text{m}$ の凹面鏡の理想球面よりの偏差を求めた結果を示す。

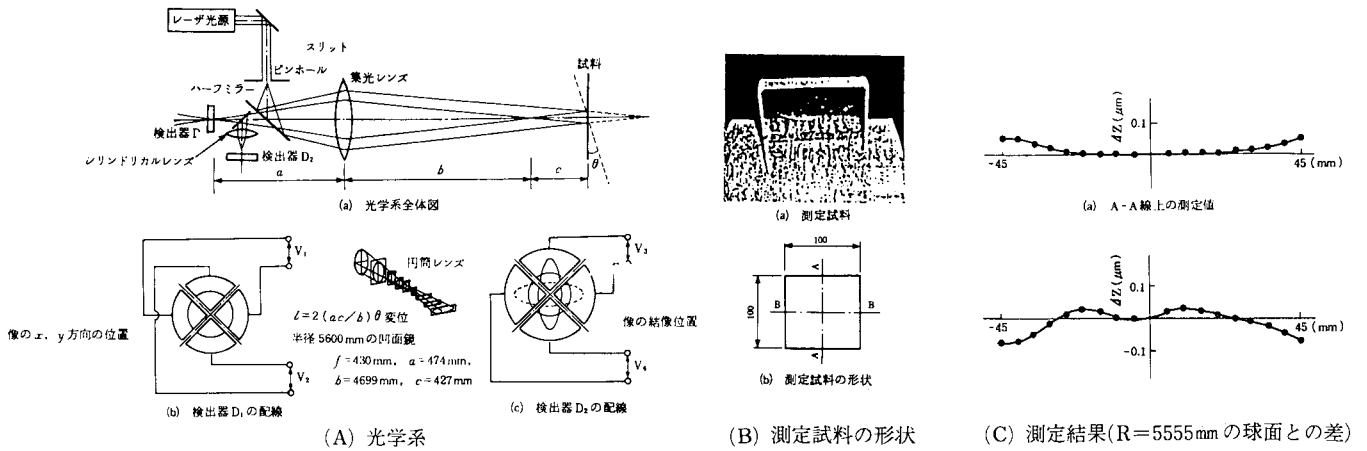


図29 法線測定装置の光学系と測定例<sup>(29)</sup>(本郷他)

図30は潜在的に~10nmの寸法精度で計測できる可能性と、面傾斜測定機能を有する非接触非球面形状計測装置のシステムと光学プローブの基本構成、面形状および面傾斜角の測定例を示す。現状で20nmの精度があるが、旋回軸(旋回範囲±90°、分解能1秒、8インチ空気静圧軸受で構成)の軸ブレ補正を測長計に組込むことによって10nmの計測精度が可能であるとの見通しを得ている。

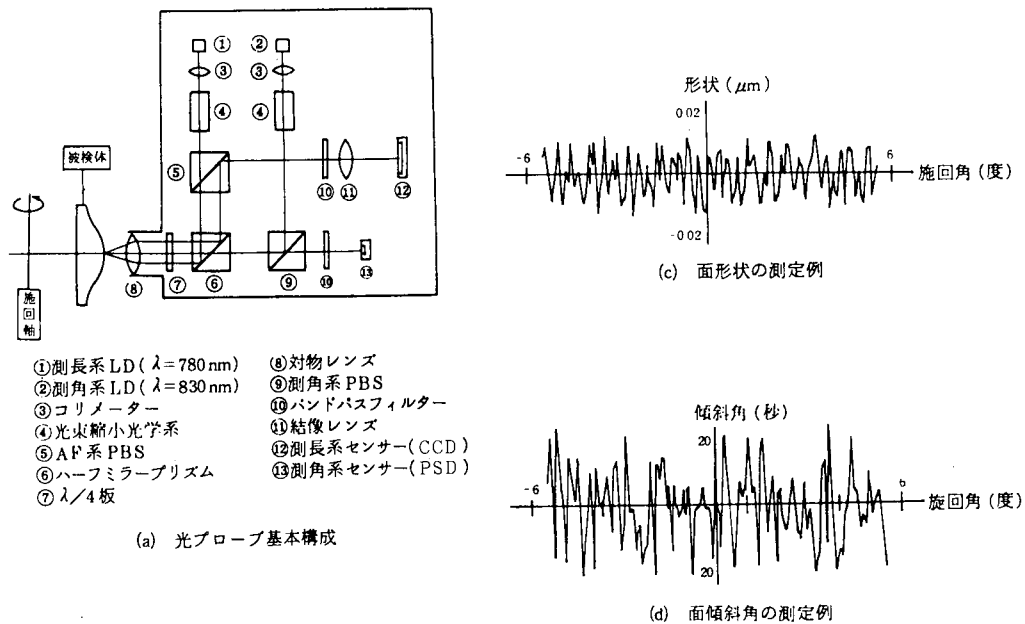


図30 非接触非球面形状計測装置および測定例<sup>(30)</sup>(丹羽他)



② 表面粗さ計測法

すでに図27で表わしているが、各種表面粗さ測定法について述べる。

図31はMichelson Laboratoryにてフロート研磨したφ14mmのサファイヤサンプルをTalystepにて測定した結果である。測定装置のノイズレベルとして0.04nm rmsあり、縦方向分解能限界とされている。

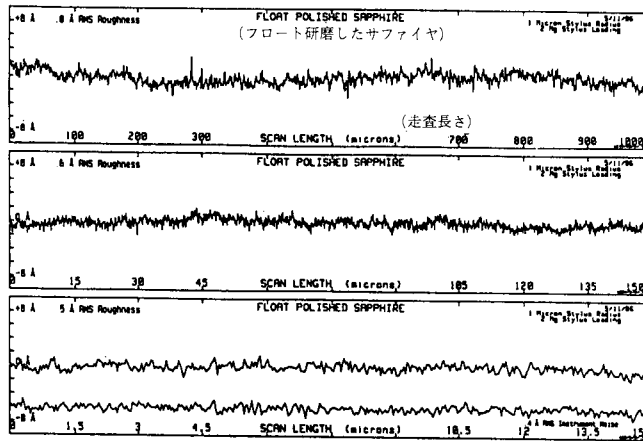


図31 Rank Taylor Hobson社Talystepの測定例<sup>(31)</sup>

写真9はTalystepの外観を示す。

TalystepあるいはNanosurfは触針式測定器であるが、特に横方向の分解能が優れており、0.1μmである<sup>(32)</sup>。

測長長さ : 2 mm  
対象形状 : 平面

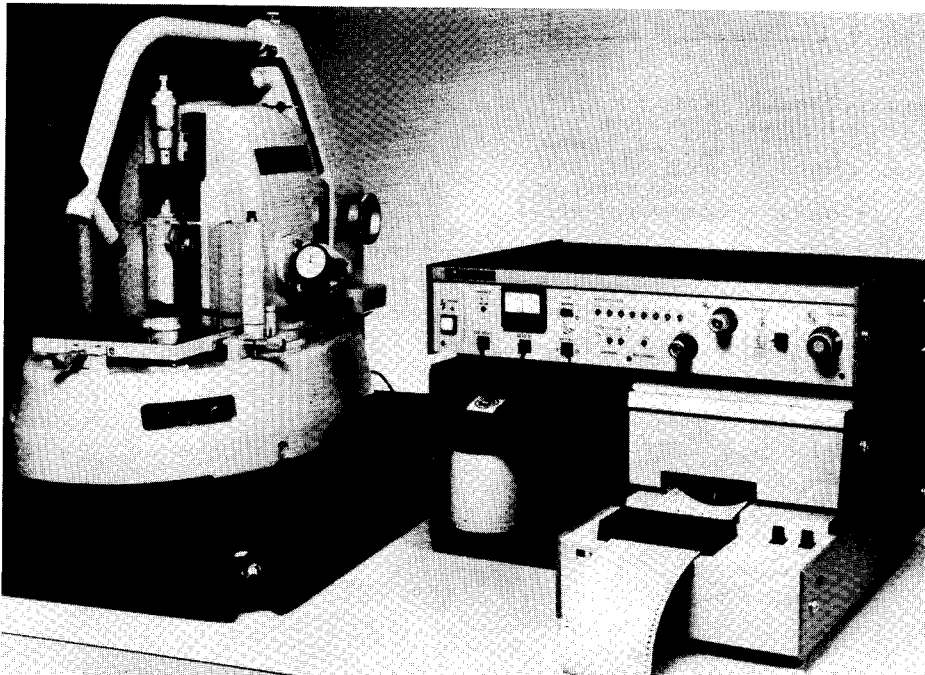


写真9 Talystep

一方、光を利用した表面粗さ計も広く使用され始めている。これには米国のWYKO社とZYGO社のものが良く知られており、共に非接触の光学式である。

図32、写真10はWYKO社のTOPO—2D装置の模式図と外観を示す。

この装置の特徴は、ミラウ干涉計と参照平面を対物レンズ内に組み込んであり、測定サンプル表面での反射光と参照面よりの反射光による干涉フリッジパターンをイメージセンサーにて検知収集することにある。

なお、その仕様は次のようになっている。

縦方向分解能： 0.1nm rms

測長長さ： 使用対物レンズにより異なるが、×20で0.665mm

対象形状： 平面、限界はあるが、球面と非球面も可能

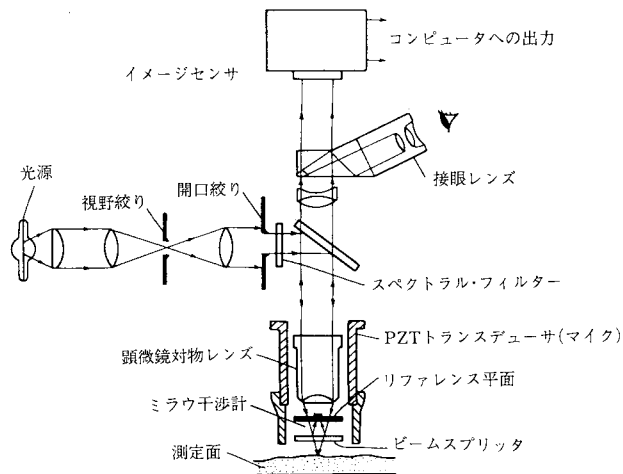


図32 WYKO社TOPO—2D測定模式図<sup>(33)</sup>

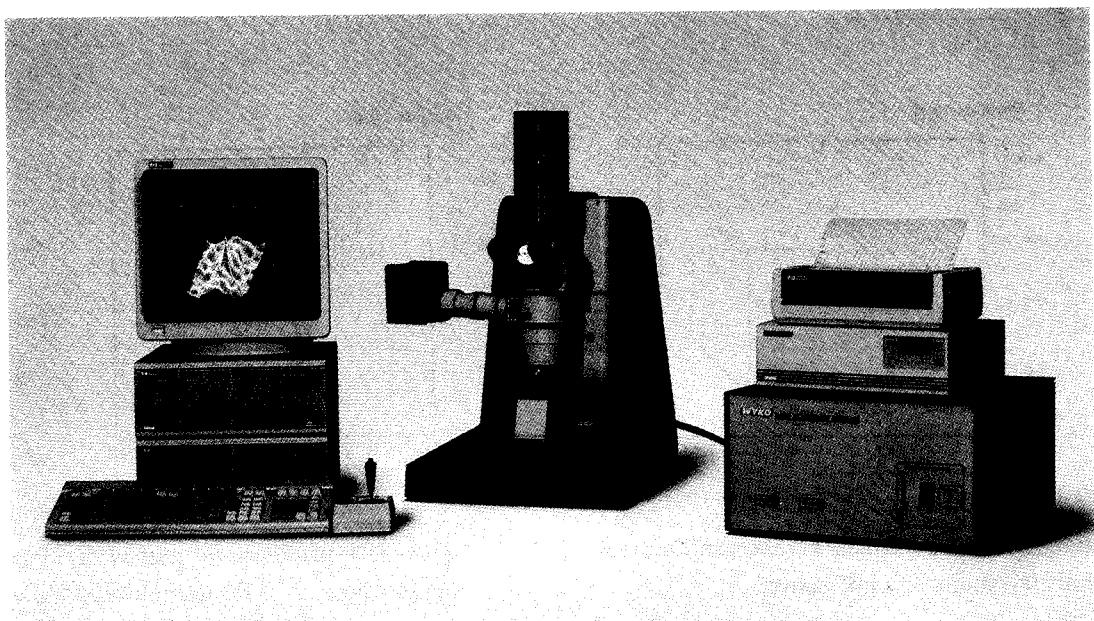


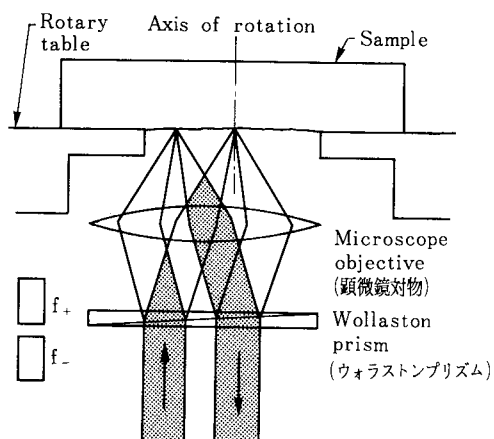
写真10 WYKO社TOPO—2D測定機

図33は、ZYGO社のHeterodyne Profiler Model 5500装置の模式図を示す。

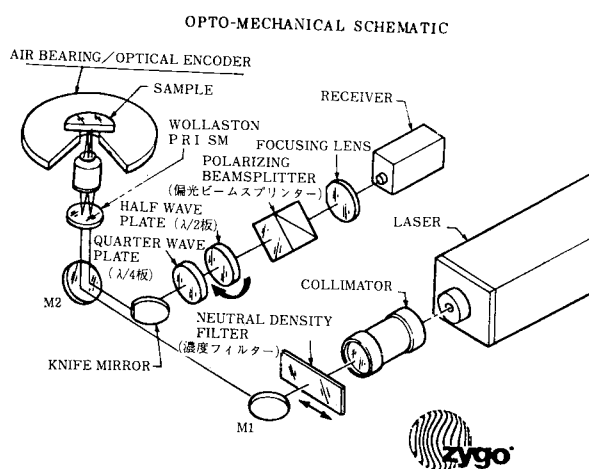
この装置の特長は、図(b)に示すように、測定サンプルの1点を参照面としており、アライメントが容易でありかつ外部振動に対して影響を受けにくいことである。

装置の仕様を次に示す。

- 縦方向分解能： 0.01nm P-V
- 縦方向再現性： 0.01nm rms
- 測長長さ： 1.0mm円周
- 対象形状： 平面、限界はあるが、球面と非球面も可能



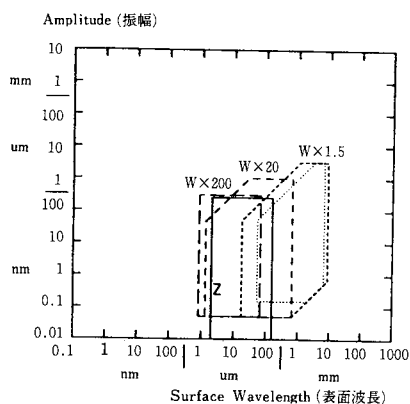
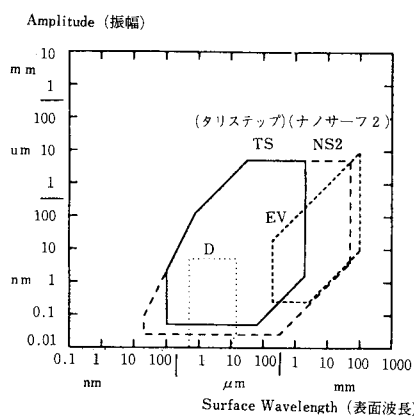
(a) 測定原理図<sup>(34)</sup>



(b) 光学系

図33 ZYGO社Heterodyne Profiler Model 5500測定機模式図

図34は、前述の触針式と非接触光学式の粗さ計の測定能力を、表面波長と振幅即ち、横と縦の分解能力でまとめたものである。(a)、(b)はそれぞれ触針式と非接触光学式のいくつかの粗さ計について示しており、横の測定分解能については、触針式の方が高い（即ち、小さい表面波長まで測定できる）ことがわかる。



- (a) Talystep, Nanosurf-2, Ennos-Virdee profilometer, and (b) Zygo 5500 profilometer and Wyko Topo-2D and Downs interferometer in  $AW$  space.

図34 粗さ計の振幅一波長図<sup>(35)</sup>

この他に最近では、より高い測定分解能を得るためにギャップ間のトンネル電流を測定することによって表面粗さを観察する走査トンネル顕微鏡 (STM) や触針の力を検出して変位計測を行なう原子間力顕微鏡 (AFM) による表面粗さ測定が検討されつつある。

### (5) 非球面加工技術

表11は、非球面加工において材料による制約条件を考慮し、どの加工工程で非球面を創成するかによって決まる加工プロセスをまとめたものである。高精度な非球面創成法は、表(b)、(c)に示す切削、研削工程で非球面を創成し、研磨工程では表面粗さを向上させ、形状をくずさないような均等研磨する工程が、実用化されている。

光学素子の用途が、従来の可視光領域から紫外、軟X線領域へと拡大するにともない、切削、研削加工機の母性原理に依存した形状創成だけでなく、表(a)に示す創成研磨法を用いる非球面加工技術が開発・実用化されつつある。

表11 非球面レンズの加工法と特徴<sup>(36)</sup>

加工方法	加工プロセス	特 徴 <sup>(注1)</sup>			主な用途
		生産ロット	価格	精度	
(a) 創成研磨法	球面研削 → 非球面研磨 → ↓ 修正研磨 → 測定 → (完成)	小	× 最も 高価	◎ ○	高価な設備が不要 加工時間が長く試行 錯誤的 大型光学部品 レーザ核融合 天体望遠鏡
(b) 研削・ 均等研磨法	非球面研削 → 均等研磨 → (完成)	中	△	○ ◎	品質の安定性が高い 加工機価格高い 写真撮影系 大口径レンズ 超広角レンズ
(c) 切削・ 均等研磨法	非球面切削 → 均等研磨 → (完成)	小～中	△	○ ◎	形状の自由度大 加工機価格が非常に 高い 赤外線光学部品 多面鏡 非球面ミラー
(d) プラスチック射出 成形法	熔融 → 射出成形 → 冷却 → (完成)	大	◎ 最も 安価	△	材質的制約が多い 軽量 カメラファインダ レンズ 中級カメラ撮影 レンズ 眼科用光学系
(e) 加圧成形法 { ガラス } <sup>(注2)</sup> { プレス }	軟化 → 圧縮成形 → 冷却 → (完成)	小～中	○	○	形状の自由度大 技術的に未確立部分 多い 高級・中級カメラ レンズ 異形光学部品 マイクロ光学部品

(注1) 種々見方があると思われるが一つの目安として掲載した。

(注2) 特に現在着目されているガラス・プレスを比較した。

創成研磨法は次の2つの方法に大別される。

- (i) 研磨工具のあたり面形状を工夫した全面皿を用いる方法
- (ii) 被研磨物寸法に比べて小形の研磨工具を用いて部分的に研磨する方法 (ローカルポリッシング法と呼称する)

図35はあたり面形状をくふうした全面皿の例を示す。形状創成が被研磨物全面にわたってなめらかになるなどの長所はあるが、曲率半径の小さい被研磨物あるいは非球面のディビエーションが大きい

被研磨物に対して工具面内のローカルな圧力分布の安定性が得にくい欠点がある。

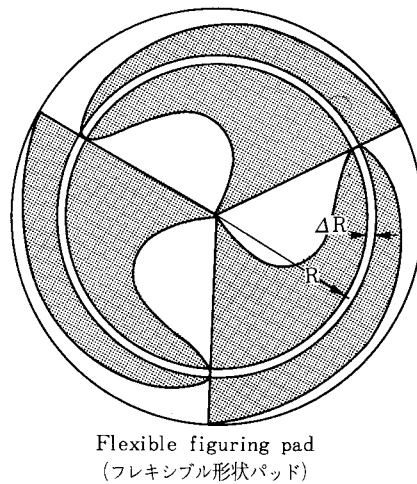


図35 あたり面形状をくふうした全面皿<sup>(37)</sup>

ここでは、ローカルポリッシング方法について、いくつかの例を説明する。ローカルポリッシングは、コンピュータを用いて被研磨物の形状誤差を計測し、ローカルに研磨条件を求め工具位置とその滞留時間を制御して研磨を行なう方法である。

図36は研磨工具に自転と、よりおそい公転を与え、回転するブランクの研磨除去量特性曲線を示す。点線が計算形状、実線が実測形状を表わす。図37は直径200mm、焦点距離600mmの放物面鏡の加工経緯を表わす。図中(b)は小形工具での加工結果で不規則な乱れが残る。(c)は径の大きい工具で平滑化を行なった結果である。

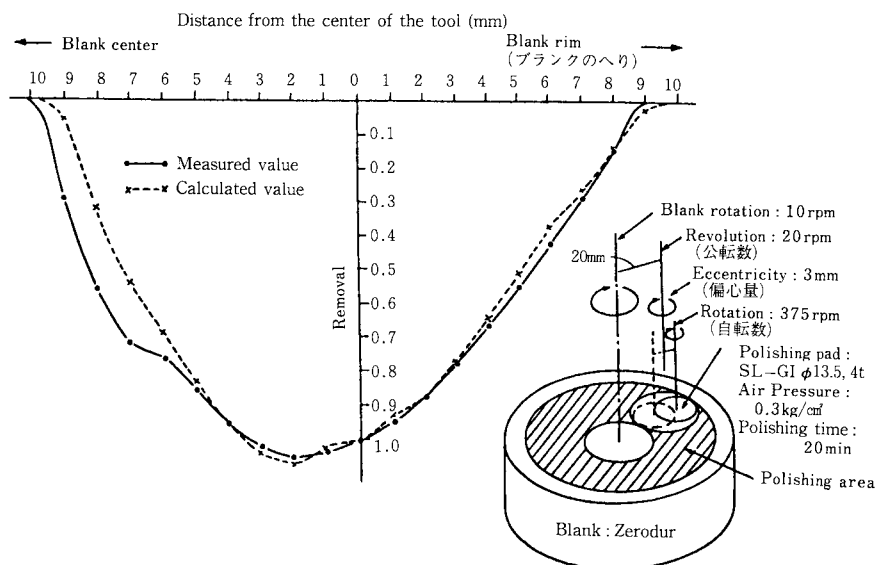


図36 輪帯研磨における研磨特性曲線<sup>(38)</sup>(大阪工業技術試験所)

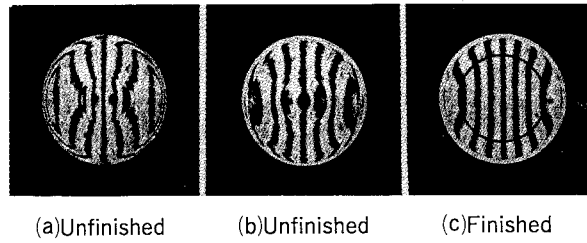


図37 研磨面性状の移り変わり<sup>(38)</sup>(大阪工業技術試験所)

図38は工具と被研磨物にそれぞれ回転を与え、工具軸を常に加工面の法線方向に一致させるように X、Z、 $\theta$ の相対位置決めを行なう加工装置を示す。直径16mmの超硬合金の放物面を表面粗さ $0.01\mu\text{m}$  Rmax以内で形状精度 $0.2\mu\text{m}$ 以内で加工している。

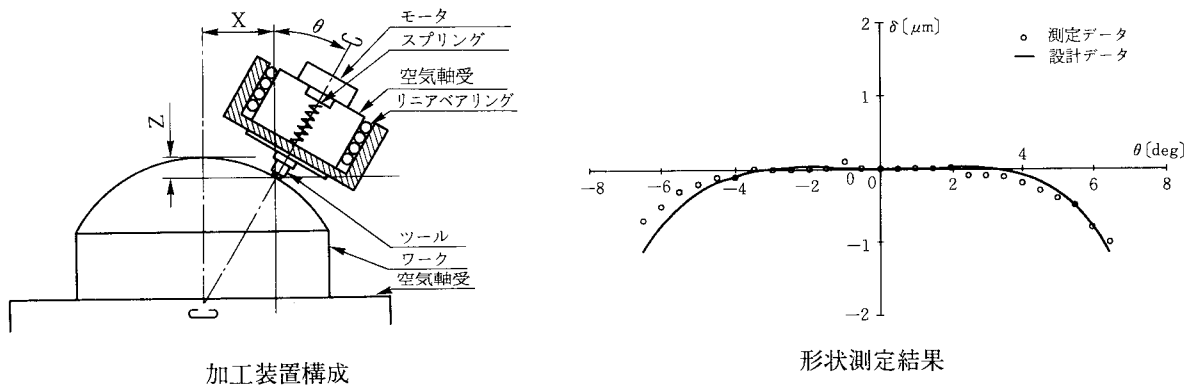


図38 ローカルポリシング方法<sup>(39)</sup>(正木他)

図39は菱形の工具を用いて工具の半径方向の移動と被研磨物の回転により工具の位置出しを行なう。研磨作用は工具を半径方向の移動に対して被研磨物回転方向に50倍のスピードで振動させることにより行なう創成法を表わすものである。

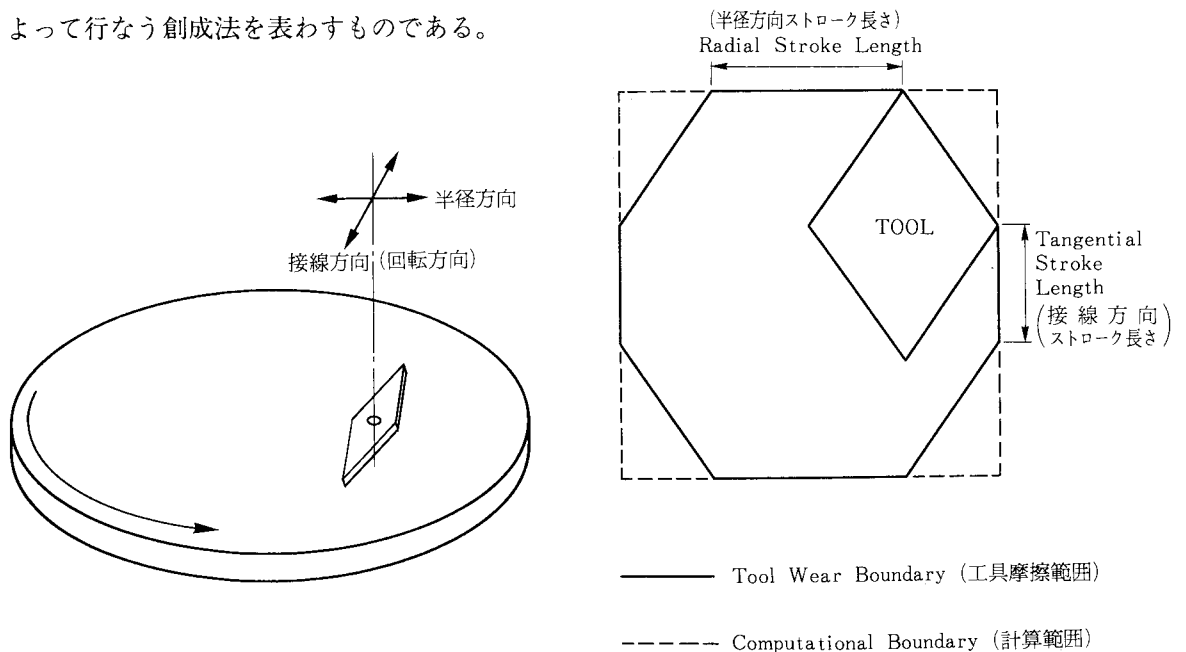


図39 ローカルポリシング方法<sup>(40)</sup>(Tinsley社)

図40は工具を比較的高速で遊星運動させる創成法を示す。

工具の移動時間を制御して形状を創成するCCP (Computer Controlled Polisher) と称する研磨加工機に用いる。図41は直径910mm、60°セグメント、曲率半径620mmの素子を形状精度 $0.008\mu\text{m rms}$ に仕上げた結果を示す。

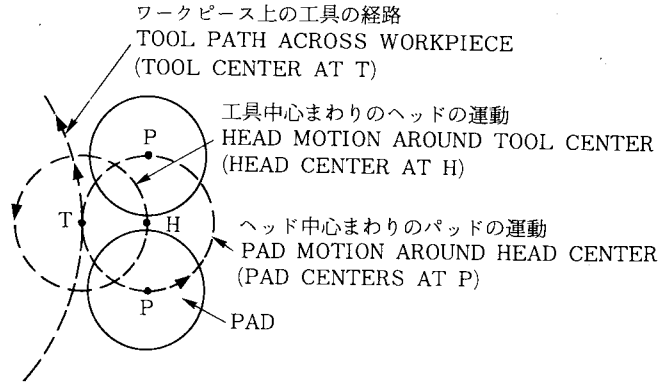


図40 ローカルポリシング方法<sup>(41)</sup>(Perkin-Elmer社)

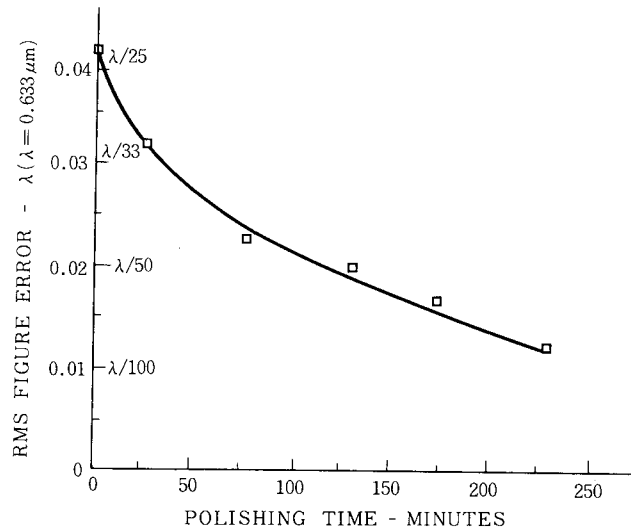


図41 形状創成精度<sup>(41)</sup>

### 3. 球面レンズポリシングに必要な基礎知識

レンズのポリシングには図42のような構造の研磨機を使用する。主軸（下軸）にレンズまたは研磨工具を取りつけ、上軸に研磨工具またはレンズを保持し、おもり、エアシリンダーなどにより加工圧力を付加する。加工は研磨工具とレンズ間の相対速度、付加圧力により進行する。

加工した球面レンズの代表的な品質を次に示す。

- (i) 球面精度〔曲率半径の正確さと曲率状態の一様性（真球度）〕
- (ii) 外径・肉厚精度
- (iii) 光学偏心〔外径に対する光軸のずれ量〕
- (iv) 外観

表12はレンズ類の製作公差を示す。

表12 レンズ類の製作公差<sup>(42)</sup>(塩見)

部品の区分	直 径(mm)	厚 さ(mm)	面 精 度	一般寸法(mm)
低 廉 品	±0.2	±0.5	ゲージ合せ	±0.5
普 通 品	±0.07 (直径の約1/100)	±0.2 (直径の約2/100)	縞5～10本	±0.25
精 密 品	±0.02	±0.1	縞2～3本	±0.1
極 精 密 品	±0.01	±0.05	要求値	要求値

以下、レンズ品質に大きな影響を及ぼす運動条件、工具条件、レンズ保持条件と、品質の評価方法について延べる。

#### (1) 運動条件

研磨機の運動調節箇所は、図43に示すように次の5箇所がある。

- (i) 揺動頭を左右に調節する
- (ii) クランクピンの偏心量を変える
- (iii) かんざしホルダーを出し入れする
- (iv) 主軸とクランク軸の回転比を変える
- (v) 主軸回転速度を変える

研磨機の運動調整によって上軸の中心が主軸平面にえがく軌跡の模様と範囲、輪帯による軌跡の密度がちがってくる。

##### ① 揺動頭の移動による軌跡の変化

揺動頭の移動による軌跡変化を把握する方法として、上軸の中心以外の点がえがく軌跡を表わしてみる。

実験方法：図44に示すように、下皿に紙を貼り上皿の任意点に孔をあけ鉛筆を取り付ける。任意の点（M）が下皿に軌跡をえがくようにして主軸を手で回転させる。

結果：図44—aは上皿が自転したときの軌跡、同bは上皿の回転を止めた軌跡である。二つの差は著しく、この差は相対速度の変化として表わされる。



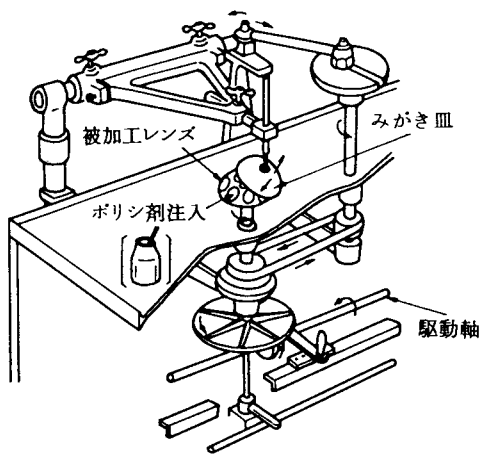


図42 レンズ研磨機の構造<sup>(42)</sup>(塩見)

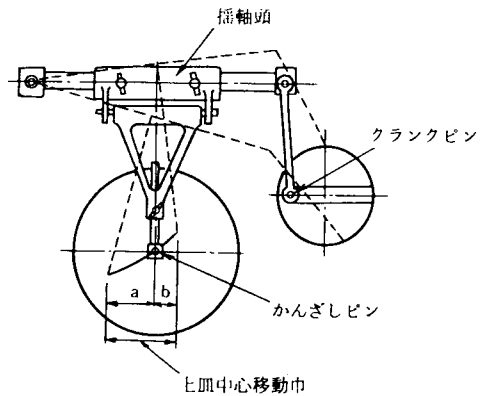


図43 研磨機の運動調節

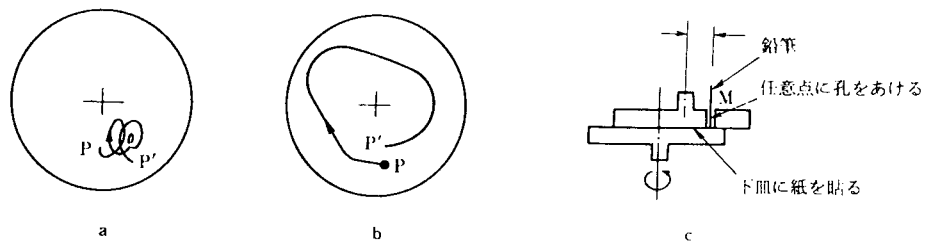


図44 運動軌跡の実験

② 揺動幅と面変化

図45は揺動幅の調整による加工面の形状変化の傾向を示す。揺動幅に適正な幅があると共に、揺動位置によっても形状変化が発生することを示している。

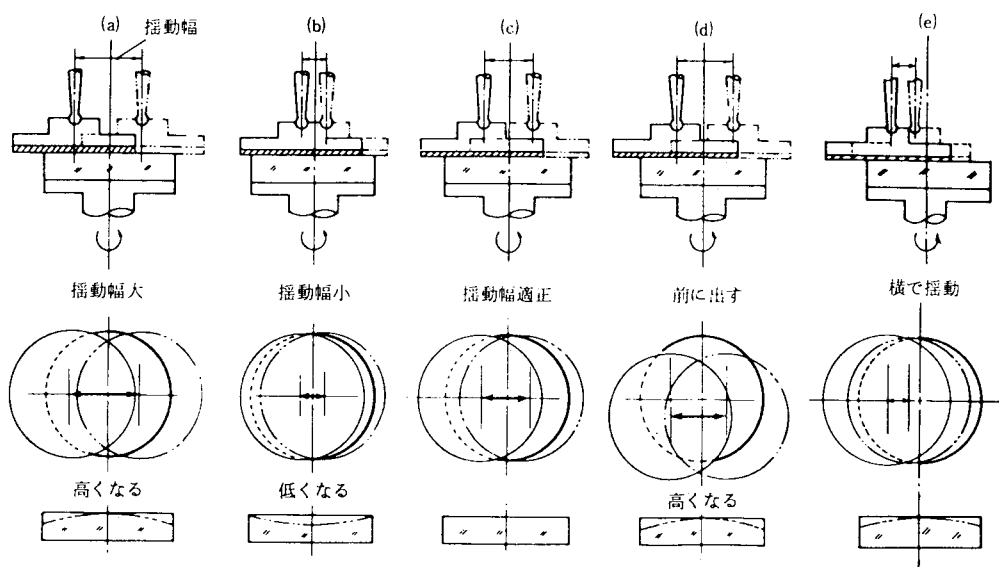
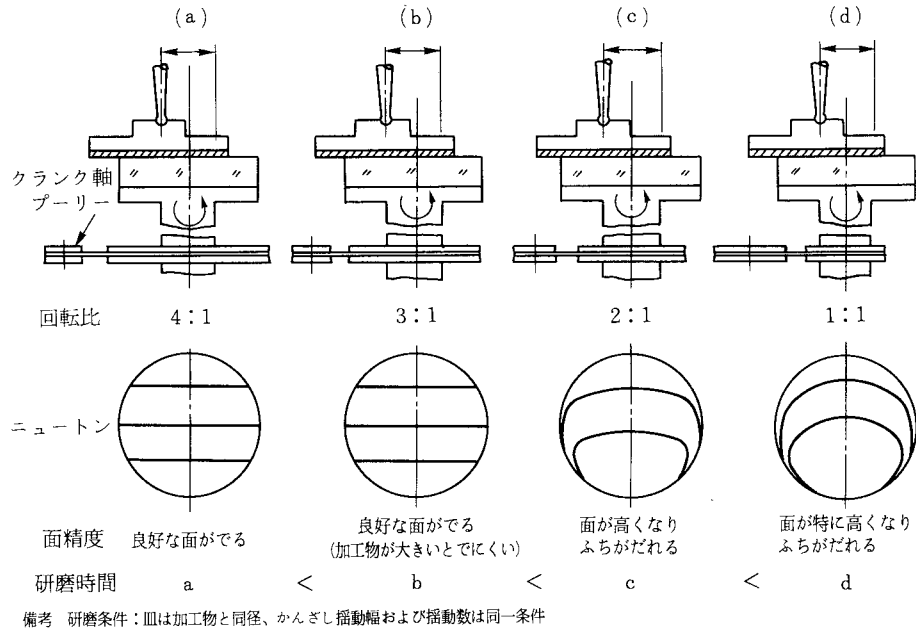


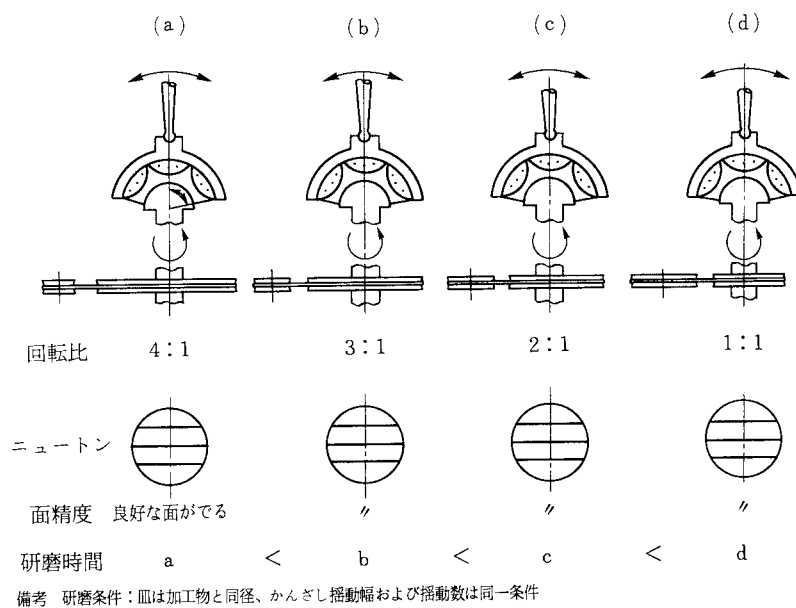
図45 揺動幅と加工面の形状変化

③ 主軸回転数とかんざし揺動数による加工性

図46は主軸回転数とかんざし揺動数の回転比による加工面精度と加工時間の傾向を浅い面（曲率半径が大きい）と深い面（曲率半径が小さい）について表わすものである。浅い面の場合には特に回転比に留意することが必要である。



(浅い面)



(深い面)

図46 主軸回転数とかんざし揺動数に対する面精度と加工時間

## (2) 加工物寸法に対する工具条件

加工物の大きさに対して研磨工具（皿）の大きさをどのようにして設定すべきかを球面精度の維持の観点で表わしてみる。

### ① 皿の大きさと面変化

図47は加工物に対する皿の大きさの影響の傾向を示す。図(a)、(b)において、それぞれ球面精度をだすためには、次の方法がある。

図(a)の場合は皿を小さくする

図(b)の場合は皿をより大きくする、振り位置を前に出し揺動を大きくする

### ② 皿の上下位置による面変化

図48は図47の皿と加工物の上下位置を変更した場合の球面精度を示す。

図47と図48より皿の標準の大きさは、次のように設定する。

(i) 加工物を下にして加工する場合；加工物と同径とする。小さい場合もあるが、大きくないこと

(ii) 加工物を上にして加工する場合；加工物より大きいこと

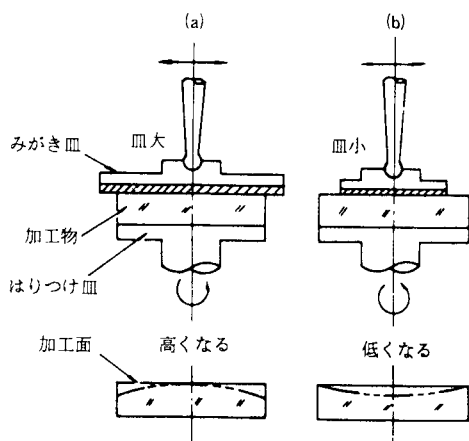


図47 皿の大きさと面変化（加工物が下）

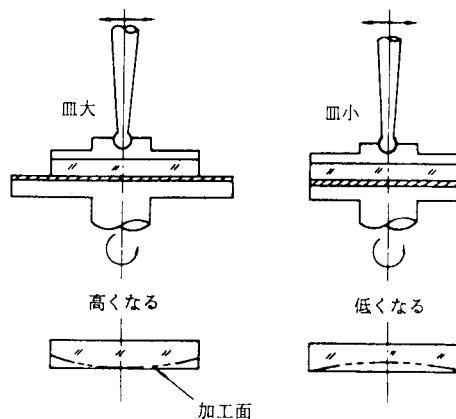


図48 皿の大きさと面変化（加工物が上）

## (3) 球面精度と工具条件

かんざしを用いる研磨機による研磨加工では、レンズの形状、寸法（曲率半径、外径、肉厚）に対して、レンズの保持工具または研磨工具（皿）のかんざし位置から、加工面までの加工高さを適正に設定することにより、安定した研磨ができ、高い球面精度が得られる。

図49は浅い面（ここでは平面）の加工物の姿勢を示すもので、加工物の大きさ（D）とかんざし作用点高さ（H）によって決められるかんざし作用点と皿の曲率半径の接線とのなす角（ $\theta$ ）による加工の安定度を経験により表わしている。高い加工面精度を得るための有効な手段として次のような方法がとられる。

(i) 加工高さを小さくするために、かんざし位置を低くする。図中(d)に示すように皿を上にする

(ii) 加工物を上にして加工する場合、加工物径が小さいときは図中(e)に示すように多数の加工物

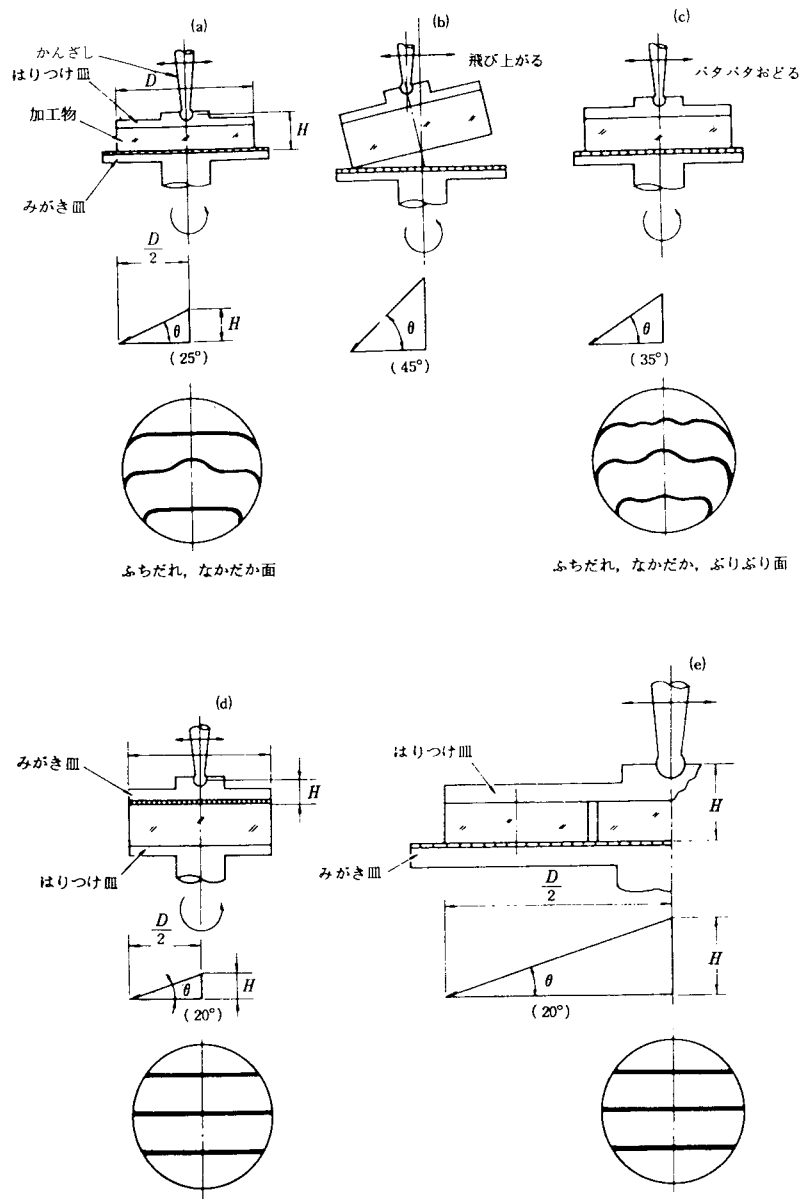


図49 加工高さと言精度

を保持して同時に加工する

① 凹面研磨の面精度

図50は凹面研磨加工時の加工高さと言皿の接線とのなす角の影響を示す。

図中(a)と(b)は加工高さの影響を示し、(b)と(c)は加工面曲線半径の大きさの影響を示している。

② 凸面研磨の面精度

図51は凸面研磨加工時の加工高さと言皿の接線とのなす角の影響を示す。

図中(a)と(b)は加工物と言皿の上下位置による加工の可否を示し、(b)と(c)はレンズの肉厚の大きさによる影響を示している。

(a)は加工可能であるが加工物径がある程度大きい方が加工しやすく面精度が得やすい。(b)は加工

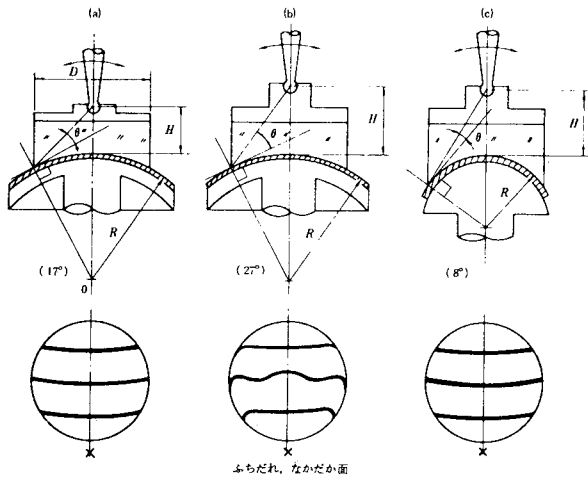


図50 凹面研磨の面精度

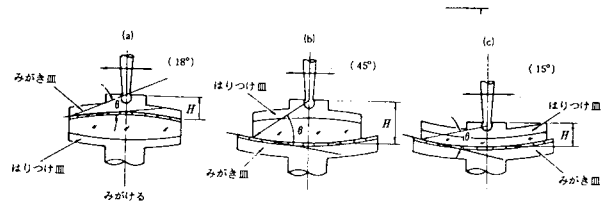


図51 凸面研磨の面精度

不可能であり、多数個を同時に保持して $\theta$ を小さくすることが必要である。(c)は(b)と曲率半径が同じであるが肉厚が小さいために加工可能である。

#### (4) 球面精度と加工条件

研磨加工環境の温度条件および研磨中に発生する局所熱により加工物の球面精度が得られない場合がある。特に、研磨中の局所熱の発生は、加工物の一時的な部分変形をおこし、変形した状態で研磨が行われる。加工終了と共に熱を受けなくなり熱による変形から解除され面の形状は変化する。

変化量は、加工物の材料・形状と大きさ、研磨圧力や研磨液の量などの加工条件によって異なる。さらに、研磨工具のピッチは特に熱によって敏感に変形する特性を有している。図52はラップ盤による熱変形実験の結果を示す。

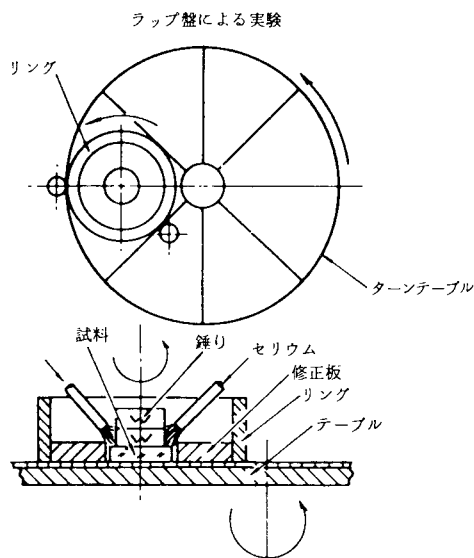


図52 ラップ盤による熱変形実験と結果

荷重	研磨液量	ニュートンリング(本)	試料材質・大きさ	発熱の影響
大	小	-2	青板・ $\phi 90 \times 8t$	特に大きい
大	多	-1	"・"	大きい
小	小	-1	"・"	大きい
小	多	-0.3	"・"	少ない
大	小	0	石英・"	なし

研磨中の熱発生と加工環境の温度変化を極力少なくする手段として次の方法がとられる。

- (i) 研磨圧を低くする
- (ii) 研磨運動速度を遅くする
- (iii) 研磨液の供給を多くする
- (iv) 研磨液を連続使用する場合は、液温制御を行う

(5) レンズ保持条件

研磨加工時のレンズを保持するに際し、得るべき球面精度が高い低いにより保持方式を決定すると共に、レンズの形状と曲率半径によっても方式を決定することが必要である。方式決定のためは、次のことによる。

- (i) 1個保持；球面精度が高い、曲率半径が小さい、外径が大きい。
- (ii) 2個以上保持；曲率半径が大きい、多数保持した方が球面精度が得やすい、外径が小さい。

1個保持ではホルダーはめ込み、やにばり、メカクランプ、バキュームチャック、多数保持ではリセスばり、やにばりなどが広く実用されている。

① はりつけ保持

図53は薄いレンズのやにばりによる球面精度の変形を、図54はやにばりの種類とその用途と特徴をそれぞれ示す。写真11はリセスばりに使用するリセス皿外観を、図55はリセスばりの状態を示す。

はりつけ用治具（リセス皿など）は、次に示す理由で一般的に鋳鉄材で製作される。

- (i) 研磨機への取付けおよび研磨時の加圧力に対する剛性が高い
- (ii) 材料の膨脹係数が小さい
- (iii) 形状加工のしやすさ

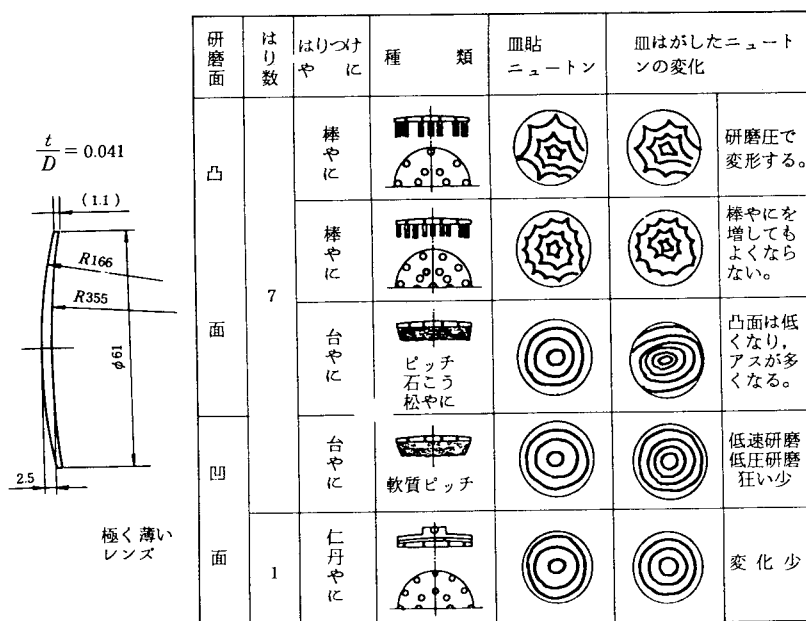


図53 はりつけによる球面精度変形

べたばり	<p>(a) 外径がごく小さい(例えば<math>\phi 15</math>以下)レンズの多数ばりに用いる。</p> <p>(b) 3個で台やにばりができないものに用いる。</p> <p>(c) はり数が多く、段取と後処理が長時間要する。</p>
台やにばり	<p>(a) 外径が小さい(例えば<math>\phi 15 \sim \phi 50</math>)一般レンズの多数ばりに用いる。</p> <p>(b) 外径が<math>\phi 50 \sim \phi 80</math>位のものには、石こう・松やなどに混入しないストレートの軟かいやにを用いる。</p>
棒やにばり	<p>(a) 外径が中くらい(例えば<math>\phi 50 \sim \phi 70</math>)の多数ばりに用いられる。</p> <p>(b) 台やには流し込みできるが、棒つけは手作業である。</p>
仁丹ばり	<p>(a) 大形レンズ或いは平面ものを1個みがきするときに用いる。</p> <p>(b) 面の高精度を要求される薄いレンズの1個みがきに用いる。</p> <p>(c) 軽くたたいてはがす。</p>
じかばり	<p>(a) はりつけやにを薄くぬってほる。</p> <p>(b) レンズの1個みがき、或は平面の多数ばりに用いる。</p> <p>(c) 冷凍はがしはできない。</p>

図54 やにばりの種類と用途および特徴

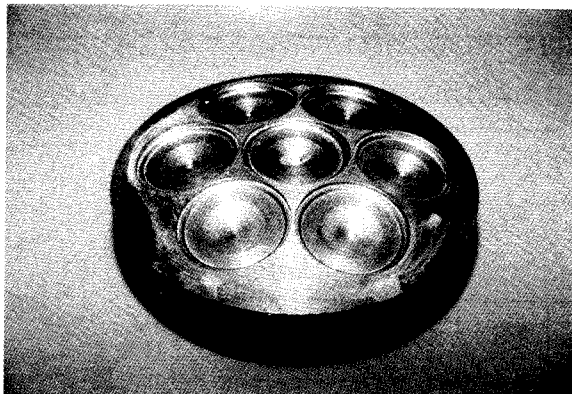


写真11 リセス皿

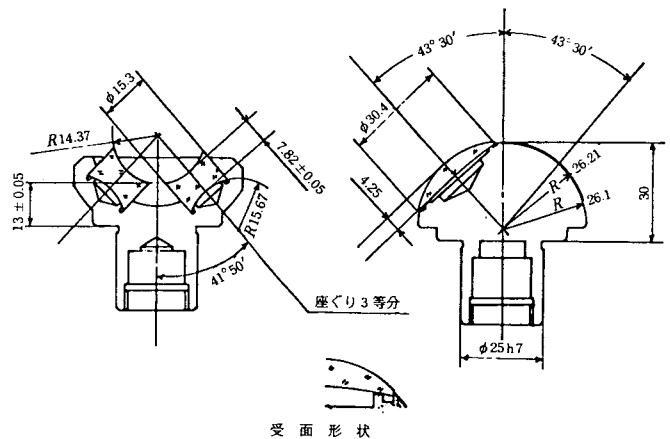


図55 リセスばり

(iv) 繰り返し使用が可能である

(v) 製作価格が安い

表13ははりつけ剤の種類を示す。

実用面では、表中の2種類以上を配合して使用することも多い。

はりつけ保持の問題点としては、次によるレンズの変形、長いはりつけ時間などがある。

(i) 加熱・冷却によるレンズ変形

(ii) 治具とレンズの膨張係数差による変形

(iii) はりつけ剤のはがし後の処理

(iv) 変形を発生させないための均一冷却

表13 はりつけ剤の種類

- |   |      |  |   |   |
|---|------|--|---|---|
| ① | ロウ   | <ul style="list-style-type: none"> <li>パラフィン</li> <li>白ロウ</li> <li>木ロウ</li> <li>密ロウ</li> </ul>   | ⑤ | ダンマルガム  |
| ② | まつやに | <ul style="list-style-type: none"> <li>AA</li> <li>FF</li> <li>WW</li> <li>ポリペリライムロジン</li> </ul> | ⑥ | シェラック   |
| ③ | ピッチ  | <ul style="list-style-type: none"> <li>アスファルト・ピッチ</li> <li>タール・ピッチ</li> <li>ウッド・ピッチ</li> </ul>   | ⑦ | セメダイン   |
| ④ | 焼石膏  |  | ⑧ | 両面接着テープ   |
|   |      |  | ⑨ | 低熔融合金   |
|   |      |  | ⑩ | 種々の貼付用シート (薄紙、フェルトに含浸)  |
|   |      |  | ⑪ | 高分子系新接着剤  |
|   |      |  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>エポキシ系 (アラルグイド)</li> <li>ポリビニール系</li> <li>シアノアクリレート接着剤</li> </ul> |
|   |      |  | ⑫ | 其の他   |
|   |      |  |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>バルサム</li> <li>ニュートン貼り</li> <li>光学的接着</li> </ul>                  |

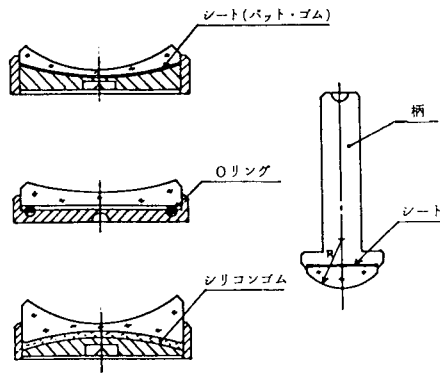


図56 レンズはめ込み保持

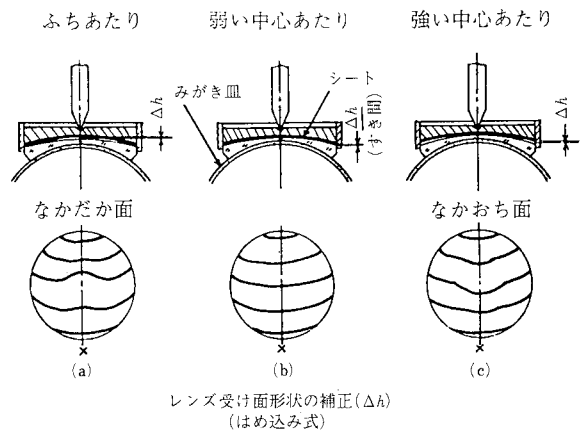


図57 受け面形状と球面精度の相関

② はめ込み保持

図56はレンズのはりつけをしないではめ込み保持を表わすものである。受面にはレンズの形状によりシート、Oリング、シリコンゴムなどを敷くとともに、レンズ加工面とかんざし位置を近づけて使用する。

図57は中心肉厚の薄いレンズのシートはりの受け面形状と加工したレンズの球面精度の関係を示す。受け面の曲率半径とシート厚さによるレンズのふち当たり、中心当たりの強弱の程度に研磨加工圧の条件が加わって、それぞれ変形による球面精度の劣化が生じる。対策としては、受け面曲率半径または逃げなどの補正が行われる。

(6) 評価法

研磨加工するレンズに必要な品質として球面精度、外径・肉厚精度、光学偏心、外観などがあるが、その評価手段について述べる。

① 球面精度測定



球面精度はレンズの球面の曲率半径の正確さと曲率状態の一様性（真球度）を表わすものであり、その評価法の代表的なものとして次に示すものがある。

- (i) ニュートンリング法
- (ii) リング式スフェロメータ法
- (iii) 直径法
- (iv) 干渉計法
- (v) フーコーナイフエッジ法

これらの中で、生産現場で常用しているニュートンリング法、リング式スフェロメータ法について述べる。

#### a. ニュートンリング法

ニュートンリングは別名干渉縞とも呼称し、ニュートンリング法は光の干渉を利用して計測を行なう方法である。写真12に示すようなあらかじめ曲率半径と真球度を高精度に仕上げたニュートンゲージ (JIS B7433-1988) を使用する。図58、図59はニュートンゲージによるニュートンリングの見方、読み方を示す。干渉縞の縞1本の隙間間隔は $\lambda/2$  ( $\lambda$ は測定光源波長) で表わされる。

測定用光源として次のものが実用されている。

- (i) 自然光
- (ii) 水銀灯
- (iii) ナトリウムランプ
- (iv) He-Neレーザ
- (v) 電灯光

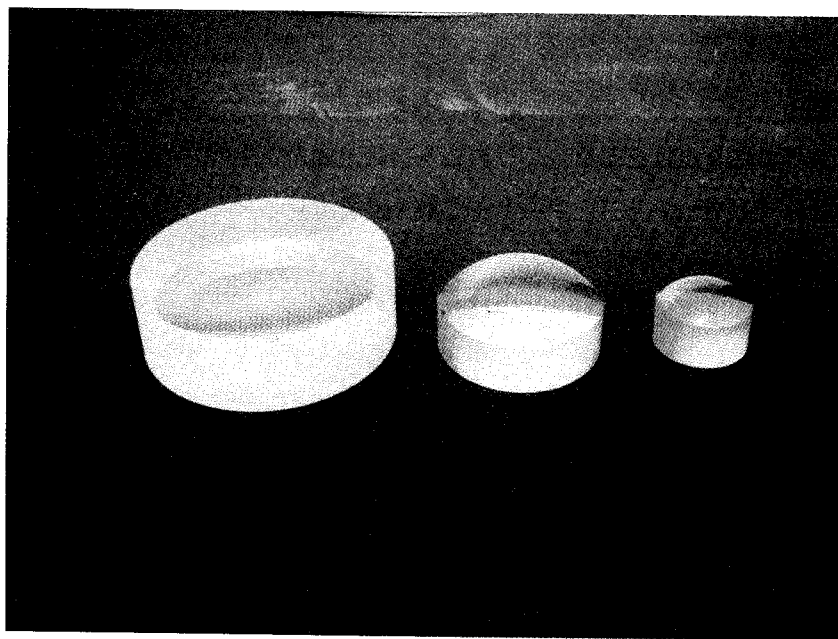


写真12 ニュートンゲージ外観

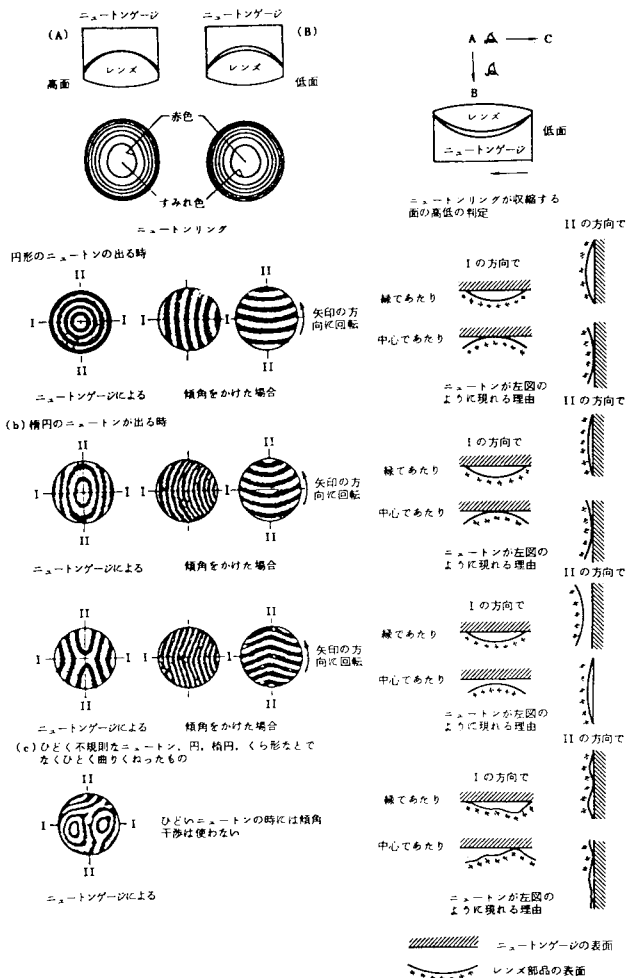


図58 ニュートンリングの見方<sup>(43)</sup>(鈴木)

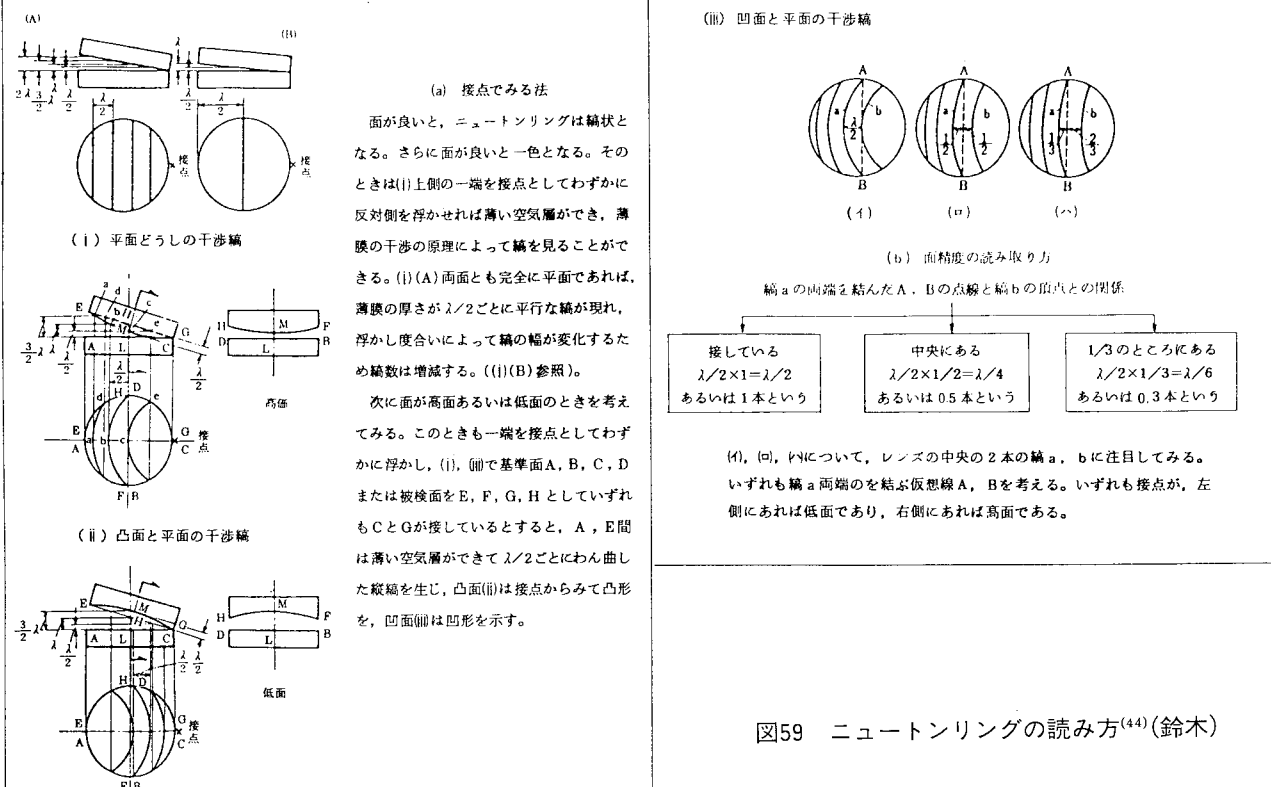


図59 ニュートンリングの読み方<sup>(44)</sup>(鈴木)

写真12はニュートンゲージの外観を示し、表14はニュートンゲージによる球面精度の評価を表わす用語の解説を示す。

表14 球面精度の評価用語の解説<sup>(44)</sup>

用語	解説
ニュートン 1本	ニュートンゲージと被検面の隙間が $\lambda/2$ ( $\lambda$ 使用光源波長)。
ニュートン 高い	被検面にゲージを当てた時、中心部が接触している状態の面を「高い」という。周辺部が接触している状態を「低い」という。
[低い]	
くせ (面のくせ)	ニュートン縞が不規則になっている状態。
アス	ニュートン縞が円形になっていない状態。 (レンズの真球度が非対称になっている)
なかおち	研磨面が指定された球面または平面などに対して中心部が低い場合「なかおち」、高い場合「なかだか」、周辺部が高い場合「ふち上がり」という。
なかだか	
ふち上がり	
だれ	研磨面の一部が指定された球面または平面などから極端に変化している状態。
ふちだれ	研磨面の周辺がだれること。

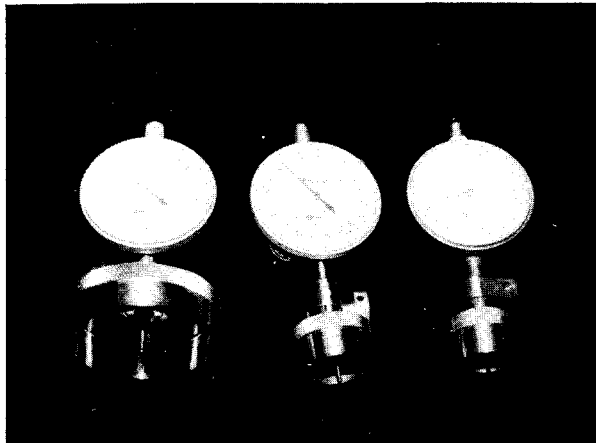


写真13 簡易球面計

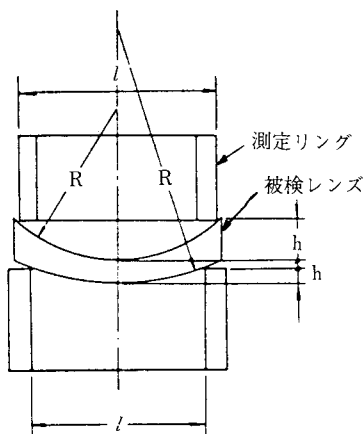
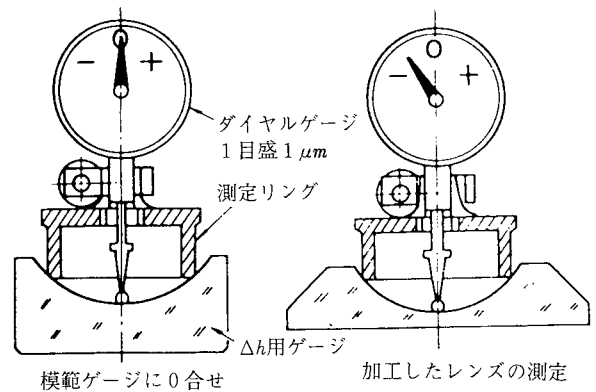
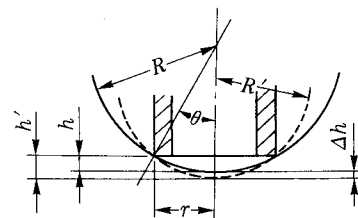


図61 測定リングと被研レンズ



$$\Delta h = h - h'$$

$$\Delta R = R - R'$$

$$\Delta h = \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} \times \Delta R$$

$$\Delta R = \frac{\Delta h}{\frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta}}$$

図60 リング式スフェロメータ測定法

b. リング式スフェロメータ法

主に、研磨加工の前加工面の製造時のマツト面の測定評価に使用する比較測定法である。

写真13は球面計を、図60は測定方法を示す。使用する球面計は1目盛0.001mmのダイヤルゲージが一般に実用されている。測定は模範ゲージに0（ゼロ）合わせを行った後、被検レンズの測定を行ない図中の $\Delta h$ （曲率半径の微小変化量）を読み取る。実際の曲率半径との差 $\Delta R$ は次式で表わされる。

$$\Delta R = \frac{\Delta h}{\frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta}}$$

次に、球面精度のニュートン本数をNとし、 $\Delta h$ との関係は次の計算により表わすことができる。図61は測定計のリングと被検レンズの関係を表わすものであり、レンズの曲率半径R、レンズと接触するリング径 $l$ 、高さhの関係は

$$h = R - \sqrt{R^2 - (l/2)^2}$$

となる。

$\Delta h$ との関係を求めると

$$\Delta h = \frac{1}{2} \left( \frac{\ell}{2R} \right)^2 \Delta R$$

一方、光波長 $\lambda$ 、ニュートン本数 $N$ のとき

$$\Delta R = \lambda \left( \frac{2R}{\ell} \right)^2 N$$

となる。これより

$$N = \frac{2 \Delta h}{\lambda} \quad \text{または} \quad \Delta h = \frac{\lambda}{2} N$$

と表わされる。

## ② 外径・肉厚精度測定

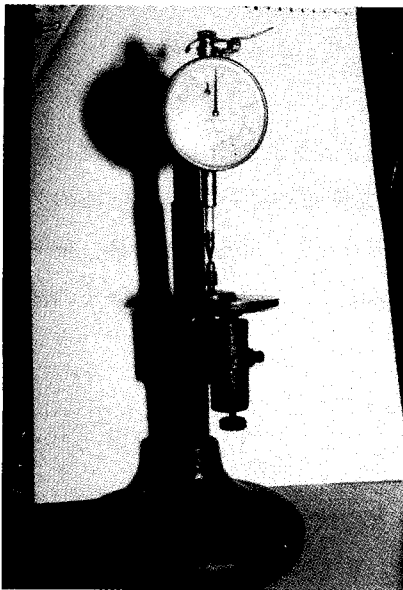
寸法精度の測定では主に外径と中心肉厚精度測定が中心となる。外径寸法の測定は1目盛0.01mmあるいは0.001mmのマイクロメータによって行う。また、中心肉厚精度の測定は次の方法による。

### a. 中心肉厚測定法

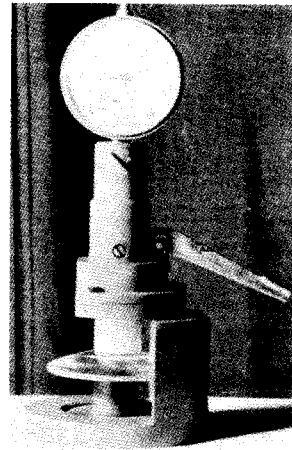
測定計は1目盛0.001mmあるいは0.01mmのダイヤルゲージを使用して行う。測定の方法はレンズ単体の場合と1個あるいは多数個はりつけ保持されている場合で多少異なる。写真14は、レンズ単体の測定方法を示す。(a)は肉厚を直接測定する方法であり、(b)はレンズをリングではさみ、測定し標準レンズと比較する方法である。

図62は、はりつけ保持したレンズの測定方法を示す。

図(a)は、はりつけやといの加工機への取付け平面部を基準にした高さ測定であり、図(b)はやといの球面部よりの高さ測定であり、いずれも比較測定である。



(a) 直接測定



(b) 比較測定<sup>(45)</sup>

写真14 レンズ単体測定

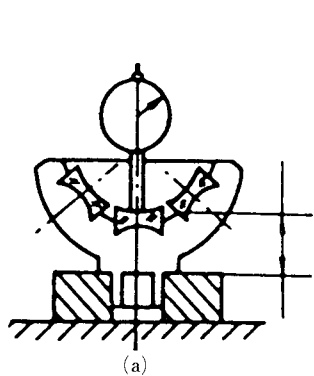


図62 はりつけレンズ測定<sup>(45)</sup>(鈴木)

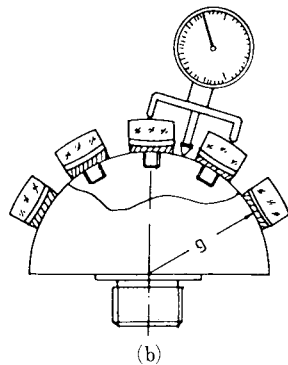


図63 測定端子形状

測定端子は、図63に示すように、被検レンズの形状により球面あるいは平面形状のものを使用する。

③ 光学偏心精度測定

単レンズの外径軸と光軸（球面レンズでは両面の曲率半径中心を結んだ軸）のずれを表わす偏心は、図64の幾何学的表示で表わされるように、一方の面に対する他方の面の傾き角度（面振れ角）として定義される。<sup>(46)</sup>

写真15は偏心測定用顕微鏡を示す。レンズを載物台上に設けたやといに入れて外周基準で回転させ、コリメータスケールの像のふれ量を接眼レンズで読む。

他の測定方法としては、レンズの光軸を測定装置の回転軸と一致させて固定し、回転によりレンズ外周のふれ量を測定する方法もある。

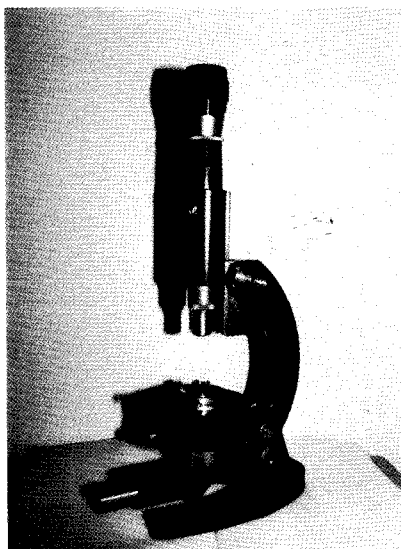
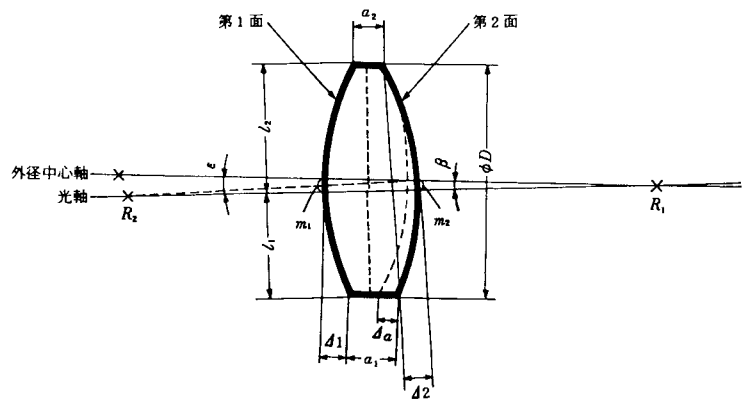


写真15 偏心測定用顕微鏡



〈偏心として扱えるデータ〉

- $a_1 - a_2 = da$ : 片肉量
- $\epsilon$ : 面振れ角
- $\beta$ : 光軸振れ角
- $\frac{m_1 + m_2}{2} = d$ : 心振れ量
- $l_2 - l_1 = \delta$ : 外径振れ量

〈諸量の関係〉

$$\epsilon = \frac{da}{D} \cdot \frac{R_1 - D/2}{R_2}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_2 - R_1 - \epsilon} \cdot \epsilon \div \frac{(n-1)}{R_1}$$

$$d = \frac{\beta}{2} \{ 2(R_1 - d/1) + l + d/1 - d/2 \} \div (n-1) f \cdot \epsilon$$

$$\delta = \beta \{ 2(R_1 - d/1) + l + d/1 - d/2 \} \div 2(n-1) f \cdot \epsilon$$

但し

$$d_1 = R_1 \{ 1 - \sqrt{1 - (D/2R_1)^2} \}$$

$$d_2 = R_2 \{ 1 - \sqrt{1 - (D/2R_2)^2} \}$$

図64 偏心の幾何学的表示<sup>(46)</sup>(田中)