矩形ガラス材の高平坦化研磨加工（第2報）*

— 研削による中心軸対称形状創成と研磨シミュレーションにおける工具傾斜補正 —

宇根 篤暢** 吉 富 健 一 郎** 餅 田 正 秋**

High Flatness Polishing of Rectangular Glass Materials (2nd Report)

- Generation of a Center-axisymmetric Shape by Grinding and Compensation Method of Tool Inclination for Polishing Simulation -

Atsunobu UNE, Kenichiro YOSHITOMI and Masaaki MOCHIDA

High flatness and smoothness are required for an extremely large rectangular glass mask of about 1 m used for pattern transfer of liquid-crystal panels. However, it is difficult to polish rectangular plates with a rotary polishing machine. Therefore, a new simulation program for a rectangular workpiece has been developed. This paper describes the shapes that were non-symmetrical about the central axis generated by grinding, the method to change to a center-axisymmetric shape, the compensation method of tool inclination for simulating polishing, and a comparison between experimental and simulated results for a rectangular workpiece. It was shown that a center-axisymmetric shape can be obtained by grinding at an infeed rate of less than 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ after dressing to decrease the grinding force, and that the relationships between removal rate and both relative velocity and pressure are proportional for quartz materials. The simulation results agreed with the experimental results under various conditions of tool positions, oscillation ranges and tool diameters by using the new compensation method of tool inclination.

Key words: surface generation process, polishing simulation, center-axisymmetric shape, tool inclination compensation, rectangular glass material, high flatness polishing

1. はじめに

液晶を用いるテレビ画面は急速に大型化が進み、現在、量産には第8世代2160×2440mmのマザー・ガラスが使用され始め、その面積は畳3畳分に匹敵する¹⁾。これらのガラス板上に微細パターンを転写するマスクも850×1200mmと大型化し、その表面には20 μm 以下の高い平面度が必要とされている。ガラス板はいずれも矩形であるため、従来の回転系の研磨機では高平坦に研磨することが難しく、とくに矩形のコナ部の平坦度を向上させることはきわめて困難である。一方、円形のシリコンウエハでは、揺動速度制御型連続研削・研磨装置²⁾を用いて、12インチウエハに対し $\pm 0.1\mu\text{m}$ の平坦化が達成されている³⁾。また、この平坦化のための揺動速度最適化プログラムがすでに開発され⁴⁾、実験とシミュレーションを一致させるために、種々の補正法が明らかにされている⁵⁾⁶⁾。

本研究では、矩形研磨理論に基づいて、形状生成過程と高平坦化研磨加工のために最適揺動速度を計算するシミュレーションプログラムを開発する。また、回転系研磨機を用いて矩形試料の高平坦化研磨を実現する。第1報では、矩形研磨理論を導出し、正方形試料の平坦化の限界について明らかにした⁷⁾。

本報では、研磨シミュレーションのために、矩形試料に対し、中心軸対称形状を研削によって得る方法を示すとともに、石英材料に対する基本研磨特性、および矩形試料に対する新しい工具傾斜補正法を明らかにし、それを用いてシミュレートした結果と実験結果を比較する。

2. 研削による中心軸対称形状の創成

直線揺動により試料を平坦化するためには、試料の初期形状

が中心軸対称であることが要求される⁷⁾。図1に示すようにインフィード研削により円形試料では中心軸対称形状を簡単に得ることができるが、矩形試料では難しい。表1に研削条件を示す。試料には円形、正方形、長方形の石英と長方形のパイレックスガラスを使用した。形状は方向を変えて45°毎に4回測定したが、ここでは代表的な0°と45°方向のみを示した。これら形状を中心部で重ね、中心部の最低値を零点とした。

図1(a)に示すように円形試料では、いずれの方向の形状にもほとんど変化が見られない。一方、(b)図に示す正方形試料では、辺方向(0°)に対し、対角線方向(45°)では形状が大きく変化し、後者は前者に対し外周側の研削量が減少し、中心部に深い穴が形成される。(c)図は対角線方向(30°)から短辺方向(90°)まで10°毎に測定した長方形試料形状のいくつかを示す。対角線方向(30°)から短辺方向(90°)へと、試料中心から試料端までの距離が短くなるとともに形状は大きく変化し、外周側の研削量が増加し、中心部の穴の深さは浅くなる。この原因は、以前の研究³⁾から明らかのように、試料と砥石の接触長さの増加に伴い垂直研削抵

Table 1 Grinding conditions

Grinding machine		PNX400 (Okamoto Tool Machine Works LTD)	
Workpiece	Material	Quartz	Pyrex glass
	Size	ϕ 300 mm, $\square$ 200 mm, 150×260 mm	180×225 mm
Wheel	Type	SD100, metal bond	
	Size	ϕ 450 mm, t5 mm	
Revolution speed	Wheel	700 rpm	
	Worktable	120 rpm	
Infeed rate		6 $\mu\text{m}/\text{min}$	6, 3, 1 $\mu\text{m}/\text{min}$
Total depth of a cut		20 μm	8 μm
Spark out		10 s	0 s

* 原稿受付 平成19年5月14日

** 正 会 員 防衛大学校 (横須賀市走水1-10-20)

抗が増加し、剛性の小さい片持ちヘッドの傾斜が変化することにより起る。すなわち、接触長さのもっとも小さい短辺方向では切り込みが大きくなって研削量が増加し、接触長さの大きい対角線方向では、ヘッドが持ち上げられることによって傾き、外周側の研削量が減少する。

したがって、中心軸対称形状を得るためには垂直研削抵抗を減じることが必要となる。図2に送り速度を6, 3, 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ と変化させて、長方形のパイレックスガラスを研削した形状を示す。6 $\mu\text{m}/\text{min}$ の場合、短辺方向と対角線方向の形状は大きく異なるが、その差は送り速度が小さくなると減少し、1 $\mu\text{m}/\text{min}$ ではほぼ一致する。ただし、砥石が摩耗すると、図3(a)に示すように表面粗さは小さくなるが、送り速度を1 $\mu\text{m}/\text{min}$ にしても垂直方向の研削抵抗が増して、短辺方向と対角線方向でヘッドの傾斜の違いを生じるため形状は一致しない。この砥石を鋳鉄皿とGC#240砥粒を用いてドレスすると、垂直研削抵抗が小さくなり、図3(b)に示すように形状は一致する。以後、中心軸対称形状を得るために Dressing 後、1 $\mu\text{m}/\text{min}$ の送り速度で矩形試料を研削した。

3. 研磨シミュレーションに必要な基本研磨特性

第1報⁷⁾で述べたシミュレーションプログラムを用いて、研磨による矩形試料の形状生成過程を計算するためには、研磨の基本式である Preston の式が成立しなければならない。図4に直径300mmの円形石英試料と工具の回転中心を一致させ、同一方向と逆方向に回転させたさいの研磨速度を測定した結果を示す。

Fig. 1 Grinding profiles of workpieces with various shapes

中心を一致させたことにより、工具と試料間の相対速度は試料半径に比例するので、研磨速度も比例関係になることが予想される。使用した装置、ポリシャ、スラリは後述する表2と同一条件とし、研磨時間は5分とした。▲と△で示す回転方向が逆で相対速度が同じ場合の研磨速度の間に大きな差はない。いずれの場合も相対速度が0.09km/minまでは相対速度と研磨速度は直線関係にあるが、それより相対速度が大きくなると飽和し、減少

Fig. 2 Grinding profiles for various infeed rates

Fig. 3 Grinding profiles before and after dressing

する傾向を示す。この原因は、工具外周におけるスラリの飛散などによるものと考えられる。図5に圧力と研磨速度の関係を示す。回転速度は工具100rpm、試料-25rpmとした。使用した装置、ポリシャ、スラリは後述する表2と同一条件とし、5分間研磨した。24.3kPaまでは両者は比例関係にあるといえる。

以上のことから、以下の計算ではPrestonの式が成立するとしてシミュレーションを行った。

4. 研磨シミュレーション

4.1 揺動停止時における研磨形状

図6に、試料中心を原点とする座標系において、工具の位置が50, 70, 90mmとなる位置(以後、工具位置と呼ぶ)で揺動を停止

Fig. 4 Relationship between removal rate and relative velocity

Fig. 5 Relationship between removal rate and pressure

Table 2 Polishing and simulation conditions

Condition		Non-oscillation	Uniform oscillation
Polishing machine		PNX400 (Okamoto Tool Machine Works LTD)	
Workpiece		Quartz plate of □210 mm and t1.2 mm	
Tool	Diameter	200 mm	200, 150 mm
	Polisher	Hard polyurethane (JHRHODES Co., LP66)	
Revolution speed	Workpiece	-50 rpm	-50, -20 rpm
	Tool	200 rpm	200, 300 rpm
Tool position or Oscillation range		50, 70, 90 mm	30 - 80, 10 - 78 mm
Oscillation speed		-	10 mm/min
Polishing pressure		12.3 kPa	
Polishing time		5 min	20, 6.8 min
Polishing slurry		Cerium oxide (Mitsui Mining & Smelting Co., Mirek S0-S), 25 wt%, 200 ml/min	
Relative elastic coefficient		1.372 kPa/μm	
Polisher wear rate		0 μm/(km·kPa)	
Stock removal rate		0.37, 0.44 μm/(km·kPa)	0.44, 0.46 μm/(km·kPa)
Modification coefficient of moment	k	37.6	
	m	450	

し、工具回転速度200rpm、試料回転速度-50rpm、圧力12.3kPaの条件で正方形試料を研磨したさいの実験結果を示す。前報⁷⁾で明らかにした方法で計算したシミュレーション結果も併せて示す。この図を含めて以後の形状は対角線方向(45°)のみについて示した。●, △はそれぞれ加工前後の形状、実線はシミュレーション結果を示す。シミュレーションプログラムに入力する初期形状は、研削形状を中心に対して平均化し、中心軸対称形状とした。表2に研磨条件と計算条件を示す。工具は直径200mmで、2mm厚のポリウレタンパッドを貼り付けて使用し、図7に示すように±5μm以下の平坦度に研削した。また、スラリを工具全面に一樣に供給するために、図8に示すようにパッド表面に幅1mm、深さ1mmの矩形断面をもつピッチ5mmの格子溝を設けた。試料は、直径300mmウエハ用真空ピンチャックで吸着するために、図9に示すように直径300mm、厚さ1.2mmの石英基板上に、□210mmの正方形を、500μmの高さで浮き彫りにしたものを用いた。比研磨量・圧力比 η は実験に合致するように、0.37, 0.44 μm/(km·kPa)とした。比減耗量・圧力比は研磨時間が5分と短く、ポリシャはほとんど摩耗しないので、0μm/(km·kPa)とした。ま

Fig. 6 Polishing profiles for various tool positions at non-oscillation

た、ポリシャの相対弾性定数は粘弾性測定装置⁸⁾により測定し、 $1.372\text{kPa}/\mu\text{m}$ とした。図6から明らかなように、いずれの工具位置においても実験結果とシミュレーション結果は一致しない。このずれを補正するために新たな工具傾斜補正法を導入した。

4.2 工具傾斜補正法

図10の左に円形試料の工具傾斜補正法を、右に新しい矩形試料の工具傾斜補正法を示す。円形試料に適用してきた方法は、式(1)に示すように試料が工具からはみ出す量 d と、斜線で示すはみ出し部によって生じるモーメント M' から、補正モーメント M_c を求めるものである⁹⁾。

$$M_c = M' \cdot k \{1 - e^{-m(d-q)}\} \quad (d > q) \quad (1)$$

$$M_c = M_0 \cdot k \{1 - e^{-mP_s}\} \quad (2)$$

ここで、 k 、 m 、 q は定数である。円形試料では、はみ出し量は試料と工具の中心線上の量として一義的に決まるが、矩形試料の場合、図に示すように試料座標系 XY と工具座標系 $X'Y'$ の間の角 α に応じてはみ出し量に変化し、また、試料と工具の中心を結ぶ線に対してはみ出し量の対称性も崩れる。このため補正前に工具の最大傾斜方向の傾斜量 $S(\mu\text{m}/\text{mm})$ を算出し、この傾斜量に表2に示した相対弾性定数($\text{kPa}/\mu\text{m}$)を乗算し、下図に示す圧力勾配 $P_s(\text{kPa}/\text{mm})$ を求める。この圧力勾配をもとに、式(2)から補正モーメント M_c を計算し、工具傾斜を θ から θ' に補正する。この補正法を用いれば試料形状に関係なく補正モーメントを算出できる。モーメントの基準は斜線で示す半円工具がもつモーメント M_0 とする。

4.3 工具傾斜補正後の揺動停止時における研磨形状

図11に新しい工具傾斜補正法を導入したシミュレーションプログラムにより揺動停止時の矩形形状を再計算した結果を示す。図6と比較し、いずれの工具位置においても実験結果とシミュレーション結果は一致する。

4.4 揺動研磨時における矩形形状

図12に揺動範囲 $30 \sim 80\text{mm}$ において、 $10\text{mm}/\text{min}$ の等速揺動速度で2往復の研磨を行ったさいの矩形試料の研磨形状を示す。表2に研磨条件と計算条件を示す。工具回転速度は 200rpm 、試料回転速度は -50rpm 、圧力は 12.3kPa とした。工具傾斜補正前のシミュレーション結果を破線で、補正後の結果を実線で示す。工具傾斜補正前は実験結果と一致しないが、補正後はほぼ一致する。

図13に工具径を 200mm から 150mm に換えて、他研磨条件は

Fig. 7 Tool profiles in the directions of 0° and 90° after grinding

同じにして研磨した結果を、シミュレーション結果と併せて示す。実験とシミュレーション結果はほぼ一致する。

さらに、図14に揺動範囲を $10 \sim 78\text{mm}$ に、工具の回転速度を 300rpm 、試料回転速度を -20rpm に変更し、加工時間を 6.8 分、片道の等速揺動で研磨した結果を示す。揺動範囲や回転速度の異なる条件においても、実験とシミュレーション結果はほぼ一致する。工具傾斜補正前と比べて補正後は、工具中心付近の形状の一致度が向上する。

以上のことから、新しい工具傾斜補正法を導入した本シミュレーションプログラムを用いることにより、矩形試料の形状生成過程を正確に計算できるといえる。

Fig. 8 A polishing tool put a polyurethane pad with lattice grooves of 5-mm pitch and 1-mm depth

Fig. 9 A workpiece made of quartz and ground to a square shape of 210 mm with low relief

Fig. 10 Compensation methods of tool inclination for circular and rectangular workpieces

4. 結 言

片持ちヘッドで矩形試料を研削したさいに生じる非中心軸対称形状を対称に研削する方法について明らかにするとともに、石英基板に対し基本研磨特性を測定し、圧力勾配を基にした新しい工具傾斜補正法を考案して、正方形試料のシミュレーションを行い、実験結果と比較した。以下、結果を要約する。

- (1) 矩形試料を中心軸対称に研削するには、垂直研削抵抗が小さくなるように、ドレッシングを施した砥石を用い、且つ、送り速度を $1\mu\text{m}/\text{min}$ 以下にして研削することが重要である。
- (2) 揺動停止時の正方形試料の研磨形状は、工具位置にかかわらずシミュレーション結果と大きなずれを生じるが、工具傾斜補正を導入するとほぼ一致する。また、補正後の等速揺動時の研磨形状は、工具径や揺動範囲に関わらずシミュレーション結果に一致する。
- (3) 新しい工具傾斜補正法を導入したシミュレーションプログラムを用いると矩形試料の形状生成過程を正確に計算できる。

参 考 文 献

- 1) 井原浩史：液晶用大型フォトマスクの市場及び技術動向，2005年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2005)309。

Fig. 11 Polishing profiles for various tool positions at non-oscillation after inclination compensation of tool

- 2) 宇根篤暢，他2名：揺動速度制御型連続研削・研磨装置の開発(第1報)－装置構造と基本研磨特性－，63, 3(2002)461。
- 3) 宇根篤暢，他3名：揺動速度制御型連続研削・研磨装置の開発(第2報)－研削による軸対称形状創成と揺動速度制御研磨による形状修正－，精密工学会誌，70, 8(2004)1096。
- 4) 宇根篤暢，他1名：小型工具による揺動速度制御研磨加工(第1報)－直線揺動法による形状生成過程の理論解析－，63, 2(2002)201。
- 5) 宇根篤暢，餅田正秋：小型工具による揺動速度制御研磨加工(第2報)－高速・はみ出し加工時における形状－，精密工学会誌，68, 10(2002)1342。
- 6) 宇根篤暢，他2名：小型工具による揺動速度制御研磨加工(第3報)－はみ出し加工時における圧力分布と形状－，精密工学会誌，70, 9(2003)1201。
- 7) 宇根篤暢，他2名：矩形ガラス材の高平坦化研磨加工(第1報)－直線揺動法による矩形平面の創成シミュレーション－，精密工学会誌，74, 12(2007)。
- 8) 宇根篤暢，餅田正秋：粘弾性ポリシヤによるポリシング過程のシミュレーション(第1報)－ポリシヤの時間的特性変化に伴う平面度への影響－，1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1998)192。

Fig. 12 Polishing profiles at uniform oscillation

Fig. 13 Polishing profiles at uniform oscillation with a tool 150 mm in diameter

Fig. 14 Polishing profiles at a uniform oscillation from 10 to 78 mm with a tool 150 mm in diameter