研磨用冷凍ピンチャックの開発（第2報）*

— 試作冷凍ピンチャックの冷却特性と研磨への適用 —

吉 富 健 一 郎 ** 竹 鼻 亮 道 *** 宇 根 篤 暢 *** 餅 田 正 秋 **

Development of a Freezing Pin Chuck for Polishing (2nd Report)
- Cooling Characteristics of a Prototype Freezing Pin Chuck and Application to Polishing -
Kenichiro YOSHITOMI, Katsunori TAKEHANA, Atsunobu UNE and Masaaki MOCHIDA

It is difficult to fabricate a nonwarped substrate, because a thin wafer cannot be fixed without deformation occurring. To resolve this matter, a silicon-carbide-ceramics freezing pin chuck has been developed. This paper describes the structure and cooling characteristics of a prototype freezing pin chuck, the uniform application method of freezing liquid on pin tops, applicability of polishing and low-temperature polishing. The prototype freezing pin chuck has double spiral flow channels built inside. These structure enable to cool down a quartz glass surface less than 5°C where frozen liquid does not melt till the polishing temperature of 30°C. The newly devised application method can form uniform droplets with the height of about 160 μm on the whole chuck by blowing mist in the upper and oblique direction. When the quartz glass surface is cooled less than 5°C and the coolant fills spaces between pins, it becomes possible to polish a quartz glass for 60 min with cerium slurry under the pressure of 4.8 kPa and the revolution speed of 50 min⁻¹. In addition, it was shown that the low-temperature polishing less than 10°C with the cerium slurry has the performance of the same removal rate as that at the ordinary temperature. Accordingly, the matter of peeling of a wafer due to polishing heat was resolved without reducing the removal rate.

Key words: freezing pin chuck, freezing liquid, low-temperature polishing, mist application, quartz glass

1. 緒 言

液晶用マスクや光ステッパ用レチクルには、反りの無いきわめて高い平坦度が要求されている¹⁾。とくに液晶用マスクは大型化が進み、第10世代のフォトマスク基板では、1.62m×1.78m×t17mmの石英基板に反りを含めて10μm以下の平坦度が要求されている。このため基板を表裏反転して研磨しており、短時間で高い平坦度を得ることは難しい。このような非磁性基板を固定保持するために冷凍チャックが開発され実用に供せられている²⁾。このチャックは主として剛体とみなせる形状の工作物用であり、薄板用としてこれを応用した冷凍ピンチャックの開発を進めている^{3)~5)}。その第1報³⁾では冷凍ピンチャックの凝固保持原理を、第2報⁴⁾では冷凍液のピン上塗布法を、第3報⁵⁾では冷凍液のせん断強さと凝固時の薄板変形を明らかにした。続いて前報⁶⁾では、冷凍ピンチャックを用いた研磨特性を検証するために、通常のマスク基板より小サイズで曲げ剛性の低い直径300mm、厚さ1.2mmの石英基板を対象として研磨用冷凍ピンチャックを試作し、研磨熱により発生する凝固冷凍液内に生じる引張応力およびせん断応力を理論的に解明するとともに、通常の冷凍チャックと比較して凝固保持時の基板変形量を1/10以下に低減できることを明らかにした。

本論文では、ピン間に冷却水を供給する構造として基板裏面と凝固冷凍液に対する冷却能力を高めた試作冷凍ピンチャックの冷却特性と研磨時の基板保持特性を明らかにするとともに、チャック全面のピン上に冷凍液を塗布する方法、および室温より低い温度条件下での研磨速度について述べる。

2. 試作研磨用冷凍ピンチャック

2.1 構造と特徴

冷凍ピンチャックを使用した研磨時における基板はく離の要因は、基板と研磨パッド間の摩擦力および研磨熱によって生じる凝固冷凍液の融解と基板熱変形である。研磨用冷凍ピンチャックに要求される性能は、凝固冷凍液を基板保持に必要なはく離強さを発揮する低温に冷却可能であること、および研磨時にその温度を維持できることである。冷凍ピンチャックに使用する冷凍液(MW-1, エミネントサプライ社製)は17°Cで凝固し、低温になるほどせん断強度は向上する⁷⁾。前報⁶⁾において、凝固冷凍液を5°C以下に冷却することで基板表面が30°Cまで上昇しても基板はく離が生じないことを示した。そこで、基板保持時の基板表面が5°C以下になるようにチャック設計を行った。

図1に冷凍ピンチャックの基板保持原理を示す。ピン上に冷凍液を塗布し、石英基板載置後に冷凍ピンチャックを5°C以下に冷却して基板を凝固保持する。続いて、ピン間に5°C以下の冷却水を供給し、研磨熱による基板および凝固冷凍液の温度上昇を抑制する。

図2に試作した研磨用冷凍ピンチャックの構造を示す。チャ

Fig. 1 Chucking principle of a freezing pin chuck

* 原稿受付 平成 27 年 6 月 9 日

掲載決定 平成 27 年 9 月 4 日

** 正 会 員 防衛大学校 (神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 元防衛大学校

ック材料には、アルミナセラミックと比較して、線膨張係数が $4.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ と小さく、熱伝導率が $175 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ と大きい炭化ケイ素セラミックを用いた。直径 300mm の基板を保持するために、(a) 図に示すように直径 300mm 内にピッチ 2mm で格子状に配列した直径 0.5mm (頂上部)、高さ 0.8mm のピンをもつ。ピンはプラスト加工により形成するため円錐台状となる。(b) 図に示す 2 重渦巻き循環流路をチャック内部に設け、冷却水を流すことによってチャック全体を冷却する。チャック外周部には(c) 図に示す外周溝を設け、ピン上冷凍液による基板保持後に、この溝を冷凍液で満たして凝固させることで基板側面を拘束し、せん断方向の基板はく離強さを向上させる。その後、(d) 図に示すように、循環流路の冷却水の一部を冷却水調整弁によりピン間に流入させることで凝固冷凍液の融解を防ぐ。チャック中央の冷却水流入口からピン間へ供給される冷却水は外周側へと流れ、ピン領域の外周付近に設けた排出口からチャック内部の流路を通りチャック側面より外へ排出される。これにより、加工領域のスラリと冷却水が混ざること防ぐ。

2.2 冷却特性

研磨用冷凍ピンチャックの冷却に用いる冷却水は、冷却装置(UWRB-15, エミネントサプライ社製)で製造した。本装置は、 0.17 m^3 の水を 20°C から 3°C まで 50min で冷却する能力をもつ。この冷却装置から冷凍ピンチャックまでの配管距離が長いので、冷却水がチャック内部に到達するまでに約 5°C の温度上昇を生じる。このため、水道水に濃度 10wt% になるように不凍液(凍ランブル、古河薬品工業社製)を加えて約 -2°C に冷却した。このときの冷凍ピンチャック内部の冷却水温度は約 3°C になる。

温度分布の測定には、赤外線サーモグラフィ(E50, FLIR 社製)を使用し、冷却開始から 1min 毎に測定した。なお、赤外線サーモグラフィによる測定結果は、測定精度 0.1°C の接触式温度計(IT2100, アズワン社製)の値と比較し、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ の誤差範

囲にあることを確かめた。

前述のように、はく離強さの向上のために冷凍液は凝固後にさらに 5°C まで冷却する必要がある。そこで、後述する噴霧塗布方法で冷凍液を塗布したチャック上に石英基板を載置後、冷却開始から 30min 後までの石英基板表面の温度変化を測定した。図 3 に、石英基板の中心と外周(基板の縁から約 10mm 内側)の表面温度変化を示す。(a)図は、ピン間に冷却水を流入させない場合の温度変化である。30min 後の中心表面温度は 5.1°C 、外周表面温度は 5.6°C まで冷却される。(b)図は、ピン間へ冷却水を流入させた場合の温度変化である。冷却開始後、冷凍液が完全に凝固する 10min を経てから、ピン間へ $60 \text{ mL}/\text{min}$ で冷却水を流入させた。冷却水の流入により、中心表面温度は 13min 後、外周表面温度は 20min 後に 5°C になり、石英基板表面全体で 5°C 以下を達成できた。中心部から冷却水が供給されるため、(a)(b) 図のいずれの場合も中心が外周より約 0.5°C 低くなる。図 4 に、図 3(b)の 0, 9, 15, 30min に対応するチャック全体の温度分布を示す。15min 後では石英基板外周やチャック側面に 5°C より高い部分が見られるが、30min 後には解消している。

次に、ピン間に供給する冷却水の有無がせん断方向の基板はく離に及ぼす影響について評価した。 30°C の研磨に耐える 5°C での基板保持後に基板表面温度を変化させて、基板外周端に想定研磨力 42.5 N = 研磨圧力 $4.8 \text{ kPa} \times$ 工具面積 $177 \text{ cm}^2 \times$ 摩擦係数 0.5 より大きい水平方向 49 N の力を加えるはく離実験を行った。実験は、外周溝への冷凍液注入・凝固はせずに行い、図 5 に示すように凝固保持した直径 300mm、厚さ 1.2mm の石英基板上の槽内に、33, 38, 43, 48, 53, 58°C の温水(深さ 20mm)を満たし、石英基板表面温度を変化させた後、プッシュプルゲージにより外周端面を水平方向へ押すことではく離の有無を調べた。

Fig. 2 Structures of a freezing pin chuck

Fig. 3 Temperature changes in the center and periphery regions of a quartz glass surface fixed on a freezing pin chuck when coolant temperature is -2°C and the coolant flows into spiral channels or also between pins

Fig. 4 Temperature distribution of a freezing pin chuck and a fixed quartz wafer during cooling

Fig. 5 Peeling test when assumed that a quartz glass wafer is warmed due to polishing heat

ピン間へ冷却水を流入させない場合、38℃の温水のときに基板ははく離した。一方、ピン間へ冷却水を流入させた場合、58℃の温水のときにはく離した。はく離は凝固冷凍液の融解による基板保持能力の低下と基板の熱変形によるものと考えられる。以上より、ピン間への冷却水流入は凝固冷凍液の冷却効果を高め、基板保持能力の維持に大きな役割を果たしているといえる。

3. ピン上への冷凍液塗布法

前報⁹⁾でピンチャック上への冷凍液の塗布方法について、冷凍液を噴霧する鉛直方向下向きとチャック面との角度を 50°とする塗布法を示したが、チャックが装置に水平に設置されている研磨機では適用できない。このため図 6 に示すようにノズルをピンチャック中心から 175mm の距離に配置し、霧化した冷凍液がチャック面へ落下する角度が約 50°になるように風の流れを利用する方法を考案した。塗布条件を表 1 に示す。冷凍ピンチャックを回転させることでチャック全面の全てのピンに対して一定の液滴高さ以上の冷凍液を塗布でき、ピン高さは 0.8mm と十分に高いことからピン間において冷凍液がピン上面まで満たされることはない。図 7 にピン上に塗布した液滴を示す。ピン上に形成する液滴は高さ 200μm 程度まで成長すると表面張力で耐えることができずピン間へ流れ落ちるので、塗布時間を制御することが重要である。この塗布方法によって、全てのピン上に高さ 100μm～200μm の液滴形成が可能となった。液滴高さの均一性については、今後、塗布条件の最適化により精度向上を目指す。但し、冷凍ピンチャックによる基板保持の原理上、未塗布のピンがないことと最低液滴高さが高いことが重要である。今回の塗布条件では、約 100μm の反りをもつウエハの凝固保持が十分に可能であるといえる。

Fig. 6 Uniform application method of a misty freezing liquid

Table 1 Application conditions of a misty freezing liquid

Rotation speed of turbin for generating mist	9000 min ⁻¹
Pressure of air bearing	0.5 MPa
Air pressure of turbine	0.03 MPa
Air pressure for shaping of mist	0.035 MPa
Center-to-center distance	175 mm
Working distance	100 mm
Air flow speed	1.2 m/s
Rotation speed of chuck	3 min ⁻¹
Application time	35 s

Fig. 7 Droplet of freezing liquid formed on pins with a diameter of 0.5 mm

4. 研磨速度に及ぼす温度の影響

冷凍ピンチャックを使用するさいはチャックを 5℃以下に冷却する必要があるため、室温よりも低い温度条件下で研磨することになる。そこで、スラリ温度を広範囲に変えることによって研磨パッド面温度が研磨速度に及ぼす影響を検討した。研磨条件を表 2、研磨装置の概要を図 8 に示す。研磨装置には修正リング型研磨機（SPL15T、岡本工作機械製作所製）を使用し、スラリはスラリタンクを温度調整槽に入れて一定温度に保温した。パッド表面温度は、非接触温度計を用いて試料近傍のパッド表面で測定した。このパッド表面温度が室温約 20℃に対し低温と高温になるようにスラリ温度を調節した。研磨速度は加工前後の試料の質量差により算出した。図 9 にスラリ温度を変化させた場合の研磨圧力に対する研磨速度を示す。パッド表面温度 12℃から 40℃まで研磨速度はほぼ同一線上にあり、ほとんど温度の影響を受けていない。研磨圧力 10kPa 以上で研磨速度が飽和傾向になる原因は、スラリが基板とパッド間に浸入し難くなったためと考えられる。以上より、石英基板の研磨では 12℃の低温下においても室温

Table 2 Low-temperature polishing conditions

Workpiece	Material	Quartz glass wafer
	Size	ϕ 100 mm, t1 mm
Polishing machine		
SPL15T (Okamoto Machine Tool Works LTD)		
Temperature of pad surface		
12 - 40 °C		
Platen		
ϕ 320 mm		
Distance from platen center to workpiece center		
100 mm		
Revolution speed	Platen	60 min ⁻¹
	Workpiece	60 min ⁻¹
Pressure		
4.8 - 15.6 kPa		
Polishing time		
10 min		
Polishing pad		
Hard polyurethane (JHRHODES Co., LP66)		
Slurry	Abrasive	Cerium oxide (5wt%)
	Supply	100 mL/min

Fig. 8 Apparatus for low-temperature polishing

や 40°C の場合と同程度の研磨速度を有するので、凝固冷凍液の融解防止のために低温で研磨しても研磨速度が低下することはないといえる。

5. 研磨への適用可否の検討

高精度な研磨を行うには、研磨時に凝固冷凍液の変形や圧潰が生じてはならない。研磨前後で基板保持状態が変化しないことを確認するため、砥粒を含まない水のみ（水スラリー）をスラリーとした研磨実験を行った。本実験では、図 10 に示す冷凍ピンチャックに対応した揺動速度制御型研磨装置を使用した。揺動速度制御型研磨は、試料より小径の工具を用い、試料を載置する揺動テーブルの揺動速度分布を最適化することにより試料を高平坦化する技術である⁷⁾。今回は、一定の摩擦力を得るために揺動はさせず、揺動位置（工具と試料の中心間距離）を固定して実験を行った。

表 3 に研磨条件を示す。図 11 は冷凍ピンチャック外周に設けたピン間冷却水の排出口付近の拡大写真である。研磨時は、チャックの回転で生じる遠心力により排出口からの排出量が増加するため、8 個ある排出口の開口数を減らしてピン間が完全に冷却水で満たされるように調節する。表 3 の冷却水供給量 60mL/min、チャック回転数 50min⁻¹ においてピン間が冷却水で満たされる排出口の開口数は、2 つ以下であった。研磨前後の形状測定には、高精度一軸エアスライダに取り付けたレーザ変位センサ（SI-F1000, KEYENCE 社製）を用いた。研磨パッドには、スラリーをパッド面に均一に供給するためにピッチ 5mm、幅 1mm、深さ 1mm の格子溝を形成した。外周溝には冷凍液を満たして凝固させた。

Fig. 9 Removal rate of quartz glass for pressure at various temperatures of pad surface

Table 3 Polishing conditions

Polishing machine	PNX400 (Okamoto Machine Tool Works LTD)
Workpiece	12" quartz glass wafer, Thickness: 1.2 mm
Polishing pad	ϕ 150 mm Hard polyurethane (JHRHODES Co., LP66)
Revolution speed	Tool: 50 min ⁻¹ , Workpiece: 50 min ⁻¹
Oscillation position	65 mm
Pressure	4.8 kPa
Polishing time	60 min
Slurry supply	50 mL/min
Cooling water between pins	60 mL/min

Fig. 10 Schematic diagram of oscillation polishing

Fig. 11 Drains between pins and on the side of a chuck to exhaust coolant

図 12 に水スラリー使用時の研磨前後の石英基板形状を示す。排出口の開口数は 1 つとした。図より 60min の加工後も大きく形状が変化した部分はなく、その差は $\pm 0.5\mu\text{m}$ である。この差は離れが原因ではなく、使用した石英基板の形状が中心軸対称ではないため、測定方向の微小なずれが原因と考えられ、基板の保持形状に変化はない。したがって、ピン間を冷却水で常時満たした状態で研磨すれば、圧力 4.8kPa で基板は離れが生じず、十分な保持能力があるといえる。

次に、酸化セリウムスラリー（5wt%）を用いて研磨を行った。研磨条件は水スラリーの場合と同様とし、排出口の開口数は 1 つ、スラリーは 10°C 以下に冷却して供給した。試料である石英基板は、外周 5mm

を研削して5 μ mの段差を設けて形状比較の基準面とした。図13に研磨前後の基板形状を示す。研磨後は研磨前よりも凹形状となり、はく離せずに研磨されている。図14に加工中の温度分布を示す。工具、石英基板、およびチャックは低温に維持されており、石英基板の表面温度は4.5 $^{\circ}$ Cである。

図15にピン間冷却水の排出口の開口数を2つにして排出量を増やし、図13と同条件で研磨した結果を示す。この実験では基板外周の段差は設けていない。図より、研磨後の形状が研磨前より盛り上がっている。これは、外周溝の凝固冷凍液の拘束により基板はチャックから脱離しないが、ピン上の凝固冷凍液から基板がはく離していることを示す。排出口の開口数が2つの場合は、冷却水排出量が供給量を若干上回り冷却能力が低下したと推察され、基板はく離を防ぐには冷却水供給量を増やすことが考えられる。

以上より、冷凍ピンチャックは高精度研磨に適用可能であるといえ、今後は、回転数や研磨圧力をさらに上げた場合の特性について検討する。

6. 結 言

研磨により無反り基板を創成するために用いる冷凍ピンチャックの開発にあたり、高い冷却能力をもつ冷凍ピンチャックを試作した。その冷却特性を明らかにするとともに、研磨への適用性について検討し、研磨可能の見通しを得た。以下、結果を要約する。

- (1) 試作した研磨用SiC製冷凍ピンチャックは、チャック内部を冷却水が循環する渦巻き流路をもつ。この流路に5 $^{\circ}$ C以下の冷却水を供給するとともに、一部をピン間へ流入させて基板裏面を直接冷却することによって、石英基板表面温度を5 $^{\circ}$ C以下に冷却できる。
- (2) ピン間冷却水は凝固冷凍液の冷却効果を高め、研磨熱に対する基板保持能力の低下を防ぐ。
- (3) 霧化した冷凍液を上方斜め50 $^{\circ}$ の角度でピン上へ塗布する噴霧塗布法により0.5mm径のピン上に100 μ m以上の高さの液滴をチャック全面に形成できる。
- (4) 石英基板の酸化セリウムスラリーによる研磨では、12 $^{\circ}$ Cから40 $^{\circ}$ Cまで研磨速度はほぼ同程度であり、低温での使用が必要な冷凍ピンチャックを用いた研磨においても研磨速度の低下はないと考えられる。
- (5) 試作冷凍ピンチャックは、酸化セリウムスラリーを用いた研磨圧力4.8kPa、回転数50min $^{-1}$ の研磨条件で石英基板を60min間にはく離させずに加工可能な性能をもつ。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究資料をご提供頂いたコバレントマテリアル株式会社、エミネットサプライ株式会社の関係各位に深謝する。本研究はJSPS 科研費 若手研究 (B) 24760113の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) 社団法人 日本機械工業連合会, 日本オプトメカトロニクス協会: 平成20年度オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の超大型基板技術の進歩に関する加工処理とその周辺技術に関する調査研究報告書, 日機連20先端-5, (2009) 72.
- 2) エミネットサプライ: 「水に溶けない氷」でウェーハをがっちり固める, 日経マイクロデバイス, 224, (2004) 3.
- 3) 小川裕司, 宇根篤暢, 小笠原永久, 吉富健一郎, 餅田正秋: 無変形冷凍ピンチャックの開発(第1報)ー冷凍液特性に基づく冷凍ピンチャックの設計ー, 精密工学会誌, 77, 8, (2011) 771.
- 4) 小川裕司, 宇根篤暢, 小笠原永久, 吉富健一郎, 餅田正秋: 無変形冷凍ピンチャックの開発(第2報)ーピン上への冷凍液塗布方法と塗布特

Fig. 12 Profiles before and after polishing with water slurry

Fig. 13 Profiles before and after polishing with cerium slurry

Fig. 14 Temperature distribution during polishing

Fig. 15 Profiles before and after polishing with cerium slurry

性一, 精密工学会誌, 77, 10, (2011) 972.

- 5) 宇根篤暢, 小川裕司, 吉富健一郎, 餅田正秋: 無変形冷凍ピンチャックの開発(第3報)ー冷凍液のせん断剥離強度と凝固変形ー, 精密工学会誌, 78, 5, (2012) 410.
- 6) 吉富健一郎, 竹鼻亮道, 宇根篤暢, 小笠原永久, 餅田正秋: 研磨用冷凍ピンチャックの開発(第1報)ー研磨時の引張・せん断応力と大反りウェーハの凝固変形ー, 精密工学会誌, 80, 10, (2014) 950.
- 7) 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)ー高速・はみ出し加工時における形状ー, 精密工学会誌, 68, 3, (2002) 461.