大口径ウエハの高平坦化シミュレーション*

Simulation on Planarization of a Large Sized Wafer

吉富健一郎** 宇根篤暢***
Kenichiro YOSHITOMI and Atsunobu UNE

Key words silicon wafer, planarization, CMP, flatness, oscillation polishing, removal rate, polishing pad

1. はじめに

シリコンウエハ等の薄板試料を各種デバイスの基板として使用するにあたり、基板の大口径化は生産性向上のために必要不可欠である。これらの基板は nm オーダの表面粗さをもつきわめて高品質な表面に研磨加工する必要があると同時に、基板全面の高平坦化が要求されている。一般的に、研磨加工は前加工面の平坦度を悪化させるので、基板が大口径になればなるほど高平坦面にするのは難しくなる。その主な理由として、研磨加工が圧力制御であるために工具の運動軌跡をもとに工作物形状を予測できないこと、遊離砥粒のために切れ刃となる砥粒は工具の動きに追従しないことなどが挙げられる。このため、研磨においては熟練作業者の経験で高精度な加工を実現している。一方、研磨を理論的に取り扱おうとする試みは、昔から行われている¹⁾。現在では計算機の発達により詳細な理論計算に基づく実用的なシミュレーションソフトが開発され、研磨シミュレーションによる高精度な研磨加工が可能となっている²⁾。本稿では、大口径シリコンウエハの高平坦化研磨シミュレーションについて、基本的な考え方と解析例について紹介する。

2. 研磨シミュレーション

2.1 基本原理

研磨による加工方法をまとめると以下のようになる。

- ① 工作物とポリシング工具を研磨剤が介在する条件下で押し付け合い、擦り合わせることで加工が進む。
- ② 表面粗さを小さくするために μm 以下の微細砥粒と軟質なポリシング工具が用いられており、微細砥粒の一粒一粒による工作物の加工量および工具の摩耗量はきわめて小さい。
- ③ 工作物にはポリシング工具の形状精度が転写されるので、軟質な工具にもかかわらず、その形状精度の

維持、ときには形状修正を要する。

①では工作物と工具が擦れ合う速度（相対速度）と研磨圧が加工量算出の主な因子であること、②では砥粒一粒の加工現象から加工量を算出することは現状では難しいこと、③ではポリシング工具の形状も高精度に管理する必要があることを示す。

ポリシングにおいては、加工量が、相対速度、研磨圧力、時間に比例することはよく知られている。ある加工条件の領域内では、いわゆる Preston の式が適用でき、加工量 h （除去深さとして取り扱い、単位は μm ）、相対速度 v 、圧力 p 、時間 t とすると、式 (1) のように加工量を表現できる。

$$h = \eta \cdot v \cdot p \cdot t \quad (1)$$

ここでの比例定数 η は、比加工量・圧力比と呼ばれ、単位は $[(\mu\text{m}/\text{m})/\text{Pa}]$ などと表され、これは、工作物の材質や砥粒、加工液、工具などの性質、加工条件で決まる特性値である。この比例定数を実験的に求めることによって、加工能率や材料の相違、研磨条件などについて、他の実験データとの比較が容易となる。相対速度 v は、工作物とポリシング工具の幾何学的関係から求められる。研磨圧力 p は、厄介なパラメータといえ、算出に工夫を要する。その理由は、軟質なポリシング工具は工作物の凹凸に沿って変形し、一定荷重下でも接触位置によって圧力が変化するためである。研磨シミュレーションの基本は、工作物上の各座標について v と p を求め、実験値から η を決定し、それを基に加工条件を変化させた場合の工作物形状を予測することである。ここからは、片面研磨で工作物よりも小さい工具を用いる、小径工具を用いた揺動速度制御型研磨を例にシミュレーション手法を説明する³⁾。

2.2 相対速度

図 1 に対象とする直線揺動制御型の片面研磨機の模式図を示す。台座にパッドを貼り付けたポリシング工具は工作物の上側に配置され、その直径は工作物であるウエハより小さく、ウエハ全面を加工するためにウエハ上を揺動する。工具とウエハは強制回転駆動され、研磨ヘッドは工具の傾きを拘束せずに加圧を行うエアバック機構となってい

*原稿受付 平成 26 年 6 月 25 日

**正 会 員 防衛大学校（神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

***正 会 員 元防衛大学校（神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

図1 揺動速度制御型研磨機

図2 ウエハと工具の位置関係と相対速度

る。また、直径 300 mm ウエハを平坦度 $0.1 \mu\text{m}$ 以下にする高精度加工を行うために、空気静圧ベアリングもしくは超精密ころがり軸受を採用した回転テーブルや高平坦吸着面をもつ真空チャック⁴⁾が使用される。工具直径は、加工の制御性と生産性の兼ね合いからウエハの $1/2 \sim 2/3$ が適切と考えている。

図2は、Y 方向に直線揺動している円環状工具とウエハの位置関係、および工具やウエハの速度と相対速度ベクトルを示す図である。ここで、接触面の任意の点 P における相対速度を考える。添え字 W はウエハ、添え字 T は工具に関する値である。ここでは、直線揺動速度はウエハ回転および工具回転による速度と比較してきわめて小さいとして無視すると、ウエハ上の点 P が工具から受ける相対速度 V_W 、工具上の点 P がウエハから受ける相対速度 V_T は、次式で求められる。

$$V_W = \frac{\sqrt{\omega_T^2 d^2 + 2(\omega_W - \omega_T)\omega_T \cdot d \cdot R_W \cdot \cos \theta_W + (\omega_W - \omega_T)^2 R_W^2}}{1} \quad (2)$$

$$V_T = \frac{\sqrt{\omega_W^2 d^2 + 2(\omega_W - \omega_T)\omega_W \cdot d \cdot R_T \cdot \cos \theta_T + (\omega_W - \omega_T)^2 R_T^2}}{1} \quad (3)$$

工作物中心で回転させる加工法においては、ウエハ形状が中心軸対称形状に加工される。そこで、ウエハ中心からの等距離（図の半径 R_W で示す円周上）における相対速度

図3 平均相対速度の算出方法

分布から平均相対速度 $\overline{V_W}$ を求める。図3は、平均相対速度 $\overline{V_W}$ を計算する手法を示すもので、AB 間を n 等分微小区間に分割し、各分割点における相対速度を V_{W0} , V_{W1} , ..., V_{Wn} とする。ウエハ 1 回転当たりウエハが工具と接触する角度を考慮すると、ウエハ上の半径 R_W に位置する点が受ける平均相対速度 $\overline{V_W}$ は次式になる。

$$\overline{V_W} = \left(\frac{V_{W0} + V_{W1} + \dots + V_{Wn}}{n+1} \right) \cdot \frac{\alpha}{\pi} \quad (4)$$

同様に、工具上の半径 R_T に位置する点が受ける平均相対速度 $\overline{V_T}$ は次式になる。

$$\overline{V_T} = \left(\frac{V_{T0} + V_{T1} + \dots + V_{Tn}}{n+1} \right) \cdot \frac{\beta}{\pi} \quad (5)$$

$\overline{V_W}$ と $\overline{V_T}$ のそれぞれに加工時間を乗算したものが、式(1)の $v \cdot t$ である。

2.3 研磨圧力

加工中の任意の点における圧力を求めるには、ポリシング工具の変形特性を決定する必要がある。軟質材料については、まずは完全弾性体として取り扱うことから始めてよいと考える。塑性変形と粘弾性を理論に導入することは容易であるが、その係数を実験より求めることが難しいためである。弾性定数の決定には、加工条件を模した実験が必要である⁵⁾。このとき、基本的に同一の研磨パッドを使用するので弾性定数として相対弾性定数 E [kPa/ μm] を使うと便利である。

圧力算出のために以下を仮定して理論式を導出する。

- ① 工作物は剛体とする。
- ② 工作物は円形であり、工具は円形もしくは円環状とする。
- ③ 工具は加工面の形状に沿って変形する弾性体とする。
- ④ 工作物と工具の間に介在する砥粒や加工液の厚さは無視する。
- ⑤ 圧力分布は工具の弾性変形量で定まる。

図4は圧力分布を算出する手法を示すもので、図4(a)においてウエハと工具間の間隙はZ座標系における工具形状からウエハ形状を引いた値となる。次に図4(b)に示すように、工具が傾斜しウエハと接触した場合のウエハ

図4 ウエハと工具の接触状態

と工具間の間隙を $\delta_w(R_w, \theta_w)$ とする。工具をウエハに押し付けると工具は変形しつつウエハに接触する。工具の変形量は二点鎖線とウエハ形状との差、もしくは接触していない箇所では変形なしと考えることができ、その変形に必要な荷重と工具上面にかかる荷重がつり合うとして計算できる。工具の傾斜量 θ_0 、最大変形量 $\delta_{\max}$ を用いると、ウエハ上の任意の点における圧力 $p_w(R_w, \theta_w)$ は、次式で表される。

$$p_w(R_w, \theta_w) = \{\delta_{\max} - C_w(R_w, \theta_w) + C_T(R_{T1}, \theta_{T1}) - (R_{T1} \cos \theta_{T1} - R_w \cos \theta_w + d) \tan \theta_0\} E \quad (6)$$

最大変形量 $\delta_{\max}$ は、工具上面にかかる荷重と $p_w(R_w, \theta_w)$ を工具全面で積分した値とがつり合うことから算出できる。 p_w についても相対速度と同様に、平均圧力 $\bar{p}_w$ を使用する。工具の傾斜量 θ_0 は、工具に生じる圧力分布 $p_T(R_T, \theta_T)$ の工具中心に対するモーメントが0とすることで算出できる。また、工具がウエハからはみ出す場合については、合力とモーメントのつり合いにより算出できる。計算式は、紙面の都合上割愛する。

2.4 加工量とウエハ形状

研磨中の状態は時々刻々と変化するので、シミュレーションでは微小時間 Δt ごとの変化を考える。ウエハの加工量 $W_w(R_w)$ と工具の摩耗量 $W_T(R_T)$ は、前述の式を用いて次のように表せる。

$$W_w(R_w) = \eta_w \cdot \bar{V}_w \cdot \bar{p}_w \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$W_T(R_T) = \eta_T \cdot \bar{V}_T \cdot \bar{p}_T \cdot \Delta t \quad (8)$$

これらの式とウエハおよび工具の初期形状より、ウエハの形状生成過程のシミュレーションが可能となる。

2.5 理論の補正

式(1)では、相対速度が加工量に比例することを示しているが、実際の加工では相対速度が高速領域になると比

図5 工具の揺動範囲

表1 計算条件

工具半径	R_{T0}	150 mm
工作物半径	R_{W0}	100 mm
回転数	工具 r_T 工作物 r_{WC}	200 rpm
平均圧力	工作物 p_w	49 kPa
比摩耗量・圧力比	η_T	$0.04 \mu\text{m}/(\text{km} \cdot \text{kPa})$
比加工量・圧力比	η_w	$0.20 \mu\text{m}/(\text{km} \cdot \text{kPa})$
相対弾性定数	E	$4.4 \text{ kPa}/\mu\text{m}$
揺動範囲	s	5–125 mm
揺動速度	d	100 mm/min
加工時間	t	1.2 min

例関係から外れ、飽和傾向を示す⁶⁾。このために、相対速度 v を次式で補正した値 v_c を用いることで、飽和傾向をシミュレーションに組み込む。 f , g は実験から得られる定数である。

$$v_c = f(1 - e^{-gv}) \quad (9)$$

3. 研磨シミュレーションによる揺動研磨の解析

今回の理論に基づく研磨シミュレーションを用いた解析例を紹介する。図5に示す円形工具での揺動研磨において、シミュレーションを用いることで等速揺動と揺動速度制御の平坦化特性の違いについて明らかにできる。初期形状は平面、計算条件を表1とし、加工形状の推移の計算結果を図6に示す。図7が最適揺動制御時の揺動速度分布である。均一性は、平坦化を評価するパラメータで、 $[\pm (\text{加工量の最大値} - \text{加工量の最小値}) / \text{平均加工量} / 2]$ で与えられる。最終形状を比較すると、等速揺動時の加工量均一性は $\pm 17\%$ 、最適揺動制御時は $\pm 1\%$ 以下となることわかる。また、最適揺動制御時の揺動速度分布と形状の推移を照らし合わせることで、工具位置に対する加工の進み具合を確認できる。このように、研磨シミュレーションによって形状予測だけでなく、高平坦化するための最適加工条件を求めることができる⁸⁾。この手法により、直径 300 mm のシリコンウエハを平坦度 $0.1 \mu\text{m}$ 以下に平坦化する技術が確立されており、450 mm ウエハにも対応できる。

最後に、表2の条件による高平坦化研磨の実験結果を

図6 揺動速度制御による加工量の均一化

図7 揺動範囲と揺動速度分布

表2 シリコンウエハ研磨のシミュレーション・計算条件

工作物		シリコンウエハ 直径 300 mm	
工具	直径	200 mm	
	ポリシングパッド	硬質ポリウレタン	軟質ポリウレタン
回転速度	工作物	100 rpm	75 rpm
	工具	-130 rpm	-150 rpm
揺動範囲		5~120 mm	-120~60 mm
圧力		20 kPa	10 kPa
スラリー	種類	コロイダルシリカ	
	供給量	200 ml/min	40 ml/min
相対弾性定数		4.4 kPa/μm	0.64 kPa/μm
比摩耗量・圧力比		0 μm/(km・kPa)	
比加工量・圧力比		0.15 μm/(km・kPa)	0.43 μm/(km・kPa)
相対速度補正係数	f	0.08	
	g	20	15

図9 低平坦度初期形状からの高平坦化研磨

図8 高平坦度初期形状からの高平坦化研磨

示す。図8は良好な平坦度をもつウエハを硬い研磨パッドで平坦化した結果で、図9は平坦度2μmの初期形状をもつウエハを柔らかい研磨パッドで平坦化した結果である。初期形状の平坦度や研磨パッドの硬軟に関わりなく揺動速度制御により高平坦度を達成できる⁹⁾。

4. おわりに

研磨シミュレーションの一例として、大口径ウエハの研磨シミュレーションについて紹介した。さらに詳細な式や、他の研磨法についての理論式は参考文献を参照願いたい¹⁰⁾。今回の例では変数が η と E のみで、アカデミック

な視点からは加工現象をさらに詳細に取り扱うアイデアも浮かぶが、運動精度が十分に高い装置を用い、ウエハと同じ精度で研磨パッド形状を管理し、加工面に均一にスラリーを供給するといった実験下において、実用的に十分な結果が得られている。本稿が、読者の皆様それぞれの加工条件に沿ったシミュレーションを開発する一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) F.W. Preston: J. Soc. Glass Technol, **11** (1927) 247.
- 2) 河西敏雄, 宇根篤暢: ワンポイントレッスン第1回 現場で使える研磨加工の理論と計算手法, 砥粒加工学会誌, **55** (2011) 591.
- 3) 宇根篤暢, 餅田正秋: 小形工具による揺動速度制御加工 (第1報) 直線揺動法による形状生成過程の理論解析, 精密工学会誌, **68**, 2 (2002) 201.
- 4) 宇根篤暢, P. ガンユー, 餅田正秋, 吉富健一郎, 松井伸介: 静圧シール型真空ピンチャックの開発, 精密工学会誌, **69**, 6 (2003) 798.
- 5) 餅田正秋, 宇根篤暢: 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2報) 粘弾性ポリシヤの特性, 1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1999) 691.
- 6) 宇根篤暢, 餅田正秋: 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, 精密工学会誌, **68**, 3 (2002) 461.
- 7) 宇根篤暢, 吉富健一郎, 餅田正秋: 小形工具による揺動速度制御加工 (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 (2001) 1201.
- 8) 吉富健一郎, 宇根篤暢, 餅田正秋: 小口径工具による大口径ウエハの形状修正研磨 (第1報) —シミュレーションによる最適研磨

条件の検討一，砥粒加工学会誌，**47**, 4 (2003) 196.

- 9) 宇根篤暢，杉浦秀樹，吉富健一郎，餅田正秋：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.
- 10) 宇根篤暢，河西敏雄：研磨加工の理論と計算手法，日刊工業新聞社，(2010).

吉富健一郎

2000年九州大学大学院工学研究科知能機械工学専攻博士後期課程修了。同年防衛大学校システム工学群機械工学科助手，2010年同講師を経て，2012年同准教授。博士（工学）。研磨加工，研削加工，形状計測などの研究に従事。

宇根篤暢

1971年大阪大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社入社。1990年NTT LSI研究所グループリーダー，1996年防衛大学校機械工学教室機械工学科教授，2000年同システム工学群機械工学科教授を経て，2011年同退官，同年株式会社岡本工作機械製作所役員。工学博士，防衛大学校名誉教授。研磨加工，微細加工，形状計測などの研究に従事。