研磨の「見える化」に基づく メカニズム分析へのアプローチ*

Polishing Mechanism Analysis Based on Visualizing of Consumables Effect

畠田道雄**
Michio UNEDA

Key words chemical mechanical polishing, visualization, Preston's Law, polishing pad, slurry

1. はじめに

現在、LED やパワー半導体などの製造プロセスにおいて、CMP (Chemical Mechanical Polishing: 化学的機械的複合研磨) は欠かすことのできない重要な技術と位置付けられ、CMP プロセスのさらなる高度化が求められている¹⁾²⁾。CMP では研磨パッドとウェーハの相互間の接触界面に専用研磨液 (以下、スラリー) を介在させ、研磨パッドとウェーハの間に研磨圧力を付与し、それぞれを相対運動させる。そして、研磨パッドによって接触界面へ運搬されるスラリーに含まれる砥粒の接触による機械的作用とスラリーの化学的作用が複合され、ウェーハ表面を高平坦化させることができるといわれている³⁾⁴⁾。

ここで、CMP における材料除去速度である研磨レート RR に関しては、式 (1) で与えられる Preston の経験則がある⁵⁾。

$$RR = \eta \cdot p \cdot v \quad (1)$$

このように、研磨レート RR は研磨圧力 p と研磨パッド-ウェーハ間における相対摩擦速度 v に加えて、プレストン係数 η の積に比例することが示されている。一方、プレストン係数 η にはスラリーの機械的・化学的作用が包含されており、その解明はいまだに完成しておらず、この係数の要素を明確化することは CMP のメカニズムを知る上で非常に重要である^{6)~8)}。とりわけ、そのメカニズムを解明するためには、それに多く用いられる消耗副資材の役割の明確化が必須であり、その中でも研磨パッドとスラリーが担う役割は大きい。

研磨パッドに着目すれば、その表面性状 (アスペリテイ) がウェーハの研磨特性に及ぼす影響は大であること、すなわち研磨パッドとウェーハ相互間の真実接触状態が研磨レートや精度に及ぼす影響は著しいことが数多く指摘されている^{9)~12)}。特に、見かけ上の接触面積はウェーハ面積と等しいと考えることができるが、真実接触面積は著しく

小さい状態にあることが指摘されており、このことはコンディショナによる研磨パッド表面性状の制御が極めて重要であることを示唆するものである¹³⁾。

さらに、スラリーに視線を向けると、スラリー中における微細粒子 (砥粒) によって研磨が進むものと考えられることができる一方で、研磨パッドとウェーハ相互間で形成される接触界面を流れるスラリーの流れ場 (以下、スラリフロー) が研磨特性に大きな影響を及ぼすということも容易に想像できる⁶⁾¹⁴⁾。

このような事柄を背景に置くと、研磨パッドとスラリーの作用を「見える化」することが可能になれば、研磨メカニズムの解明とともに、消耗副資材としての在るべき姿の追究につなげられるものと考えられる¹⁵⁾。本稿では、著者によるこれまでの知見に基づいて研磨パッドとスラリーの両面にわたる検討結果をレビューしてみたい。とりわけ、式 (1) で与えられるプレストンの経験則をベースにした研磨レートを与える新しい実験式についても言及することを通じて、メカニズム分析へのアプローチとする。本稿が読者各位の参考となれば幸甚である。

2. 研磨パッド表面性状評価手法の概要

2.1 接触画像解析法の概要

研磨パッドをはじめとして、さまざまな物体 (物質) の表面性状を評価しようとするとき、第一に試行されるものは接触式、あるいは非接触式のいずれかによる表面粗さの測定であろう¹⁶⁾。しかしながら、研磨パッドの表面には周知のとおりポア (気泡) が存在し、ポアの影響を除外した表面性状を表面粗さで評価することは困難であること、さらには粘弾性体である研磨パッドを接触式で測定可能であるのかということが絶えずついてくる課題であった。

このような中であって、研磨パッドとウェーハ相互間の接触状態を可能な限り模擬し、実プロセスに近い状態で評価しようとする試みが行われるようになってきた^{9)~12)}。それぞれの提案手法にはさまざまな長所があるものと考えられるが、著者らはポアサイズに比較して大きな測定領域を確保でき、かつオンマシン測定 (機上測定) を可能にする

*原稿受付 平成 29 年 12 月 26 日

**正 会 員 金沢工業大学工学部機械工学科 (石川県白山市八東穂 3-1)

図1 接触画像解析法の原理

図2 接触画像解析法の汎用測定装置

図3 研磨回数と研磨レートの関係

ため、本章で述べる手法を提案した。

具体的には、研磨パッド表面性状の定量評価手法として、ダブリズムによる全反射面に物体が接触した場合における光の散乱現象に着目した^{17)~19)}。ダブリズムとは光学ガラスの一種であり、像回転プリズムとも称される。図1に示す模式図のように、ダブリズムの一方の斜面から入射した光は、内部で屈折、底面で全反射して反対側の斜面から出射するという特徴を有する。このとき、全反射面にダブリズムとの接触領域（後述する接触点を含む）があると、その接触領域で光が拡散反射することが知られている。著者らは当該原理に基づき、ダブリズムに研磨圧力に相当する観察荷重を与え、研磨パッド相互間との接触領域から拡散反射した光をダブリズム上方に設置したマイクログラフで取得することによって、研磨パッドとウェーハに見立てたダブリズム相互間の接触画像を撮影し、解析する手法を提案し、「接触画像解析法」と称している。また、図2に示すような汎用測定装置（不二越機械工業：PSP-100）の開発にもつなげている。少なく

図4 同一箇所における接触画像の変化
(画像サイズは7.3 mm×5.5 mm)

とも研磨プロセスにおける「見える化」を行う上でダブリズムは非常に有益なツールであり、例えばさらに微細領域における観察によって研磨界面における微粒子の挙動の観察に成功した研究も報告されている⁴⁾²⁰⁾。

2.2 接触画像解析法による分析と研磨メカニズムの考察

図3は両面同時研磨装置によって直径300 mmのシリコンウェーハを連続研磨した際に得られた研磨レートの変化である。なお、図3中のコンディショニングとは研磨パッドの表面性状を整えることを目的に行われる研磨の前処理であり、ここではダイヤモンドディスクコンディショナが用いられた。さらには、フレキシブルファイバーコンディショナも開発されており、大変興味深い結果が報告されている¹³⁾。

図3のように1回目のコンディショニング直後は幾分の研磨レートの上昇が見られるものの、その後は次第に研磨レートの低下傾向が見られる。図4は上記研磨テストによって取得された同一箇所における接触画像の変化である。このように、図4(a)のようにコンディショニング直後は多くの接触領域（画像内に白色で現れる領域）が見られる。一方、図4(b)（研磨回数：2回）、(c)（同：4回）、(d)（同：6回）、(e)（同：8回）のように、研磨回数を重ねるにつれて接触領域が減少するとともに、一部に接触領域の拡大（凝集現象）が見受けられる。また、図4(f)のように、研磨直後に実施した2回目のコンディショニングによって、凝集領域は解消され、接触領域の数が増えるとともに分散することが確認できる。

接触画像解析法で定量評価できる四つの評価パラメータのうち、代表例として図5(a)、(b)に接触点数と分散度の結果をそれぞれ示す（その他の二つは接触率と接触点間隔）。図5(a)の接触点数は当初一定傾向を示した後、次第に減少する。また、2回目のコンディショニングによって接触点数は増大し、1回目のコンディショニング直後の結果と同等となる。図5(b)に示す分散度は、徐々に増大する傾向を示した後一定傾向を示し、2回目のコンディショニングによって減少する。そして、この傾向は図4で示した接触画像の変化、とりわけ凝集の発生と解消の関

図5 研磨回数と接触画像解析パラメータの関係

図6 研磨パッド表面性状が砥粒の研磨作用に及ぼすメカニズム

係に追従する。すなわち、凝集の発生によって分散度の数値は増加し、コンディショニングによる凝集の解消によって分散度は減少する。したがって、分散度のパラメータは接触画像における接触領域の凝集有無を判断し得る指標であるといえる。

さらに、図3で示した研磨レートと図5で示した接触点数ならびに分散度の傾向を見ると、研磨レートと接触点数の傾向はほぼ同等であり、また、分散度はおよそ反対の傾向を示すことも分かる。したがって、研磨パッド表面性状が研磨レートに及ぼすメカニズムをモデル化すると図6のように描けるものと考えられる²¹⁾。このように、研磨パッドとウェーハ相互間での真実接触領域の数が多く、かつその接触部の間隔は小さく、研磨パッド全体に凝集の少ない接触領域を多数分散させた状態をつくり出すことで、ウェーハ界面で作用できる（研磨に寄与できる）砥粒数は増加し、その結果、高い研磨レートが得られると考えられる。すなわち、研磨パッド表面性状を制御するコンディショニングに関して、使用するコンディショナも含めた条件を適切につくり上げることによって、上記の研磨パッド状態を作り出し、高い研磨レートを取得できるといえる¹³⁾。

図7 スラリーフローの2次元面内観察手法

図8 ウェーハ界面におけるスラリーフロー（線速比）分布

3. スラリーフロー評価を通じたプレストン係数を与える実験式

3.1 スラリーフロー評価の概要

現在までに研磨パッドとウェーハ相互間におけるスラリーに起因する流体圧力状態やその流れ場を推測するシミュレーション技術も開発されている中であって²²⁾、著者らは実験力学に基づく光学的手法によって、その場観察を試みている。図7は著者らによる実験モデルであり、同図中の座標系で示すように、研磨パッド中心からウェーハ中心までの方向をX軸、それに垂直な方向をY軸、カメラ光軸方向となる鉛直方向をZ軸と定義し、スラリーフローはウェーハ界面(X-Y平面)における2次元(面内)流れ場として評価した。ところで、スラリーフローはX-Y-Z空間にわたる3次元的な振る舞いを呈すると考えられる。例えば、福田らは断面(Y-Z平面)における2次元流れ場を研磨パッド表面性状の拡大モデルによって評価し、循環流れの存在も実験的に明らかにしている¹⁴⁾。したがって、スラリーフローはX-Y平面の2次元のみで完全に評価することは難しいことを認識した上で、ウェーハ界面はX-Yの2次元平面であることから、これに着目して以下の議論を進めたい²³⁾。

また、スラリーフロー解析で得られるスラリー流れの方向は研磨パッドの回転方向に追従することが分かっている。そのため、本稿では線速比（スラリー流速/研磨パッド線速）を定義する。すなわち、同解析で得られるスラリー流速分布を、接触界面全面で求めた研磨パッドの線速度分布で除することによって線速比分布を求め、スラリーフ

図9 各研磨パッドに対するスラリー線速比の関係

図10 各研磨パッドによる研磨レートの結果

ローの評価を試みた。

図8はウェーハ界面におけるスラリーフロー（線速比）を示したコンター図である。使用した研磨パッドは不織布タイプでスラリーは吸着性が異なる2種類を用いた場合の結果であり、スラリー(ii)の方がウェーハに対する砥粒（コロイダルシリカ）の吸着性が高いものである。このように、スラリーで比較するとき、スラリー(ii)の方が線速比は小さくなる傾向を示す。さらに、コンター図面内において線速比は完全一様ではなく、接触界面で複雑な様相を示すということがいえる。

図9に4種類の不織布タイプ研磨パッド（A・B・C・D）と2種類のスラリーの組み合わせによるスラリーフローの線速比を示す。この結果、消耗副資材の違い（あるいは組み合わせ）によって線速比は変化し、研磨パッドD、A、C、Bの順に線速比は高く、スラリーの吸着性が(i)に比較すると(ii)の方が線速比は小さくなる。図10に図9と同様の組み合わせによる研磨テストで得られた研磨レートを示す。図9の結果と同じく、研磨パッドD、A、C、Bの順に研磨レートは高い結果を示した。また、スラリーに関しては、研磨パッドAを除いて、スラリー(i)に比較すると(ii)の方が研磨レートは小さい。

図9と図10の結果に基づき、スラリーフローの線速比とそのときの研磨レートの関係が図11となる。それぞれのプロットは4種類の研磨パッドと2種類のスラリーの組み合わせを意味する。この結果、線速比と研磨レートには高い相関関係が得られる。したがって、研磨レートはスラリー線速比の影響を強く受けるといえ、図6で示したモデル図からもスラリーを運搬する役割を有する研磨パッドが適度にスラリーを保持し、研磨パッドとウェーハの接触領域に砥粒を流動させることが高い研磨レートにつながるといえる²⁴⁾。このことから、線速比に影響を及ぼす因子を明確化することによって、研磨レートの制御要因を明らかに

図11 スラリー線速比と研磨レートの関係

できると考えられる。

3.2 消耗副資材の分析に基づくメカニズムの検討

これまでの結果から、スラリー線速比は研磨レートに大きな影響を及ぼすことを示した。とりわけ、研磨圧力や回転数を一定としたにもかかわらず研磨レートがスラリー線速比によって変化することを踏まえると、式(1)で示したプレストン係数 η はスラリー線速比に比例すると解釈できることになる。したがって、重回帰分析を用いた統計的評価を行えば、各パラメータがスラリー線速比に及ぼす影響を明らかにでき、このことはプレストン係数を与える実験式を示すことができるものとなる。

重回帰分析とは、目的変数 y が複数ある説明変数 X_n によって影響を受ける場合に、その関係を定量的に数値化し、影響分析する手法であり、目的変数の推定と目的変数に対する説明変数の影響度を評価できる。また、 T 値は説明変数が目的変数に影響を与えているかどうかを示し、絶対値が1.4を超えると有意な説明変数であるといえる。 P 値は説明変数を用いた場合の信頼度を示し、値が0.5を下回ると信頼性があるといえるものである²⁵⁾²⁶⁾。

本章における検討範囲で得られた実験データの一覧を表1(a)に示す。この結果に基づいてスラリー線速比を目的変数とし、説明変数にスラリーの吸着性、研磨パッドの接触点数と密度を用いた場合における重回帰分析結果を表1(b)に示す。この結果、プレストン係数を式(2)のように定義することができる。

$$\eta \propto V_E = P_C^{0.647} \times P_D^{1.46} \times 10^{-0.0580 S_A} \times 10^{-5.14} \quad (2)$$

このことから、研磨メカニズムの解明には、以上の要素を分析し、評価に加えることが重要であるといえる。さらに、式(2)は、高い研磨レートを志向する際に消耗副資材として用いられる研磨パッドならびにスラリーに求められる諸元を見極めることができる比較的安易な数式であり、さまざまな場面で活用されることを願っている。

4. おわりに

本稿においては研磨の「見える化」に基づくメカニズム分析のアプローチとして、著者らによる研磨パッド表面性状（アスペリティ）とスラリーフロー（線速比）の評価手法を紹介した。加えて、一連の実験結果から得たプレストン係数を与える新しい実験式を導出した。紙数の都合もあ

表 1 重回帰分析によるメカニズム分析

(a) 使用データ					
研磨 パッド	スラリー 吸着性 ($X_1=S_A$)	接触点数 [1/mm ²] ($X_2=P_C$)	密度 [kg/m ³] ($X_3=P_D$)	スラリー 線速比 ($y=V_E$)	
A	(i)	0	122	390	0.949
B		0	69.9	436	0.830
C		0	62.0	467	0.891
D		0	51.6	590	0.990
A	(ii)	1	122	390	0.911
B		1	69.9	436	0.664
C		1	62.0	467	0.714
D		1	51.6	590	0.943

(b) 重回帰分析の結果			
相関係数	0.936		
	偏回帰係数 (K_n)	T 値 (影響度)	P 値 (危険率)
切片	-5.14 (K_0)	-4.54	0.0105
スラリー吸着性 ($X_1=S_A$)	-0.0580 (K_1)	-2.81	0.0483
接触点数 [1/mm ²] ($X_2=P_C$)	0.647 (K_2)	4.20	0.0137
密度 [kg/m ³] ($X_3=P_D$)	1.46 (K_3)	4.46	0.0111

り詳細は割愛したが、それぞれの詳細については著者らによる拙論をご高覧いただければ幸いである。今後、さらに研磨の「見える化」に基づくメカニズム分析による基礎科学が進み、当該分野における AI 導入をはじめとしたイノベーション化につながることを強く期待したい²⁷⁾²⁸⁾。

参 考 文 献

- 1) 酒井孝正：省エネルギー対策の最新動向と展望，産業と環境，**45**, 7 (2015) 9.
- 2) 滝修：サファイア・SiC 基板と MEMS ウエハの研削・研磨技術，THE CHEMICAL TIMES, **1**, 227, 関東化学，(2013) 1.
- 3) 會田英雄，青田奈津子，木村豊，川又友喜，小山浩司，山崎努，土肥俊郎：LED 用サファイア単結晶基板の超精密 CMP 加工技術とその PSS 加工プロセスへの応用，精密工学会誌，**78**, 11 (2012) 932.
- 4) 木村景一：最先端電子デバイスを支える超精密ポリシング技術，精密工学会誌，**78**, 11 (2012) 923.
- 5) F.W. Preston: The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines, Journal of the Society of Glass Technology, **11** (1927) 214.
- 6) S.R. Runnels and L.M. Eyman: Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing, Journal of the Electrochemical Society, **141**, 6 (1994) 1698.
- 7) 橋本洋平，鈴木教和，浅羽正和，樋野励，杜本英二：研磨パッドの微細凹凸接触を考慮した CMP プロセスの EHL 解析，精密工学会誌，**79**, 1 (2013) 73.
- 8) 畠田道雄，福田有哉，横川和弘，堀田和利，杉山博保，玉井一誠，森永均，石川憲一：サファイア CMP の研磨レートに及ぼすスラリーフローの影響，砥粒加工学会誌，**58**, 9 (2014) 583.
- 9) 三橋真成，小野秀之，磯部晶：CMP による平坦化研磨—パッドとウエハの接触状態—，精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1995) 409.
- 10) 三橋真成，小野秀之，磯部晶，山森篤：CMP による平坦化研磨—パッド実接触面積と研磨レート—，精密工学会春季大会学

- 術講演会講演論文集，(1996) 927.
- 11) H. Kojima and T. Nishiguchi: A New Method for Evaluating CMP Pad Surface Conditions Using Digital Images, Proceedings of 8th International Conference on CMP-MIC 2003, **8** (2003) 37.
 - 12) 畠田道雄，岡部憲嗣，守屋紀彦，澁谷和孝，石川憲一：ダブリズムを用いた接触画像解析に基づくポリシングパッド表面性状の定量評価手法の開発に関する研究，精密工学会誌，**77**, 9 (2011) 883.
 - 13) 畠田道雄，高橋直紀，新井雄太郎，藤田隆：フレキシブルファイバードレッサによる新規パッドドレッシング方法の有効性評価—フレキシブルファイバードレッサの工具寿命検証—，砥粒加工学会誌，**59**, 8 (2015) 459.
 - 14) 福田明，御手洗真人：研磨パッド・アスベリティ内スラリー流れの可視化方法の検討，精密工学会誌，**83**, 2 (2017) 173-179.
 - 15) 嶋昇平，濱田聡美，高東智佳子，和田雄高，福永明：化学機械研磨プロセス開発における「その場」観察の適用事例，エバラ時報，**251** (2016) 26.
 - 16) 片山実：触針式粗さ測定 基礎から最近の動向まで，砥粒加工学会誌，**61**, 11 (2017) 574.
 - 17) 酒井優：微量バイオセンシングに向けた金ナノ粒子ベアの高感度検出，神奈川科学技術アカデミー（光科学重点研究室 近接場光学グループ）平成 16 年度研究概要，(2004) 資料 4.
 - 18) 山田博昭：レーザと蛍光スクリーンを用いたレーダ像の投射型ディスプレイ，テレビジョン学会誌，**42**, 10 (1988) 1104.
 - 19) 鷺見和彦：指紋認証システム，映像情報メディア学会誌，**58**, 6 (2004) 759.
 - 20) 出井良和，木村景一，パナートカチオンルンルアン，鈴木恵友，迫田卓：エバネッセント光を応用した酸化膜 CMP における研磨界面での現象解析，2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2012) 799.
 - 21) A. Isobe, M. Akaji and S. Kurokawa: Proposal of New Polishing Mechanism Based on Feret's Diameter of Contact Area between Polishing Pad and Wafer, Japanese Journal of Applied Physics, (2013) 126503.
 - 22) D.G. Thakurta, C.L. Borst, D.W. Schwendeman, R.J. Gutmann and W.N. Gill: Three-Dimensional Chemical Mechanical Planarization Slurry Flow Modell Based on Lubrication Theory, Journal of the Electrochemical Society, **148**, 4 (2001) G207.
 - 23) 畠田道雄，富家勇一，堀田和利，玉井一誠，森永均，石川憲一：難加工基板の CMP におけるスラリーフロー評価法に関する研究—基板界面におけるスラリー流れ場とそれに及ぼす影響因子の評価—，精密工学会誌，**83**, 8 (2017) 756.
 - 24) 村田順二，谷泰弘，広川良一，野村信幸，張宇，宇野純基：ガラス研磨用エポキシ樹脂研磨パッドの開発，日本機械学会論文集 (C 編)，**77**, 777 (2011) 2153.
 - 25) 菅民郎：Excel で学ぶ多変量解析入門，(2013) 110.
 - 26) 内田治：すぐに使え EXCEL による分散分析と回帰分析，(2009) 146.
 - 27) 土肥俊郎：超精密加工とその応用技術の確立とを目指す産学官連携事業—シンギュラリティを見据えた新機軸展開の可能性—，精密工学会誌，**84**, 1 (2018) 22.
 - 28) 松永敬弘，畠田道雄，澁谷和孝，中村由夫，市川大造，石川憲一：CMP における研磨装置と消耗副資材の関係解明を通じたコンディショニング条件決定法の研究，2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2017) 531.

畠田道雄

金沢工業大学工学部機械工学科教授，防衛庁技術研究本部（防衛庁技官），金沢工業大学助手，講師，准教授，九州大学客員准教授（2011 年，兼任）を経て，2013 年から現職，博士（工学），シニア教育士（工学・技術）。