

# ラッピング・ポリシングの見える化の試み

畝田 道雄(金沢工業大学\*1), 橋本 洋平(金沢大学\*2)

## 1. はじめに

半導体デバイスをはじめ、各種の光学部品、摺動部品などの製造プロセスに不可欠な加工技術である研磨加工(ラッピング・ポリシング)では、未だ加工現象が十分に解明されておらず、効率的な技術開発や条件検討を行うための障壁となっている。このため、研磨加工の見える化が近年の重要な研究課題の1つとなっている。ここでは、筆者らが近年行っている「見える化」の試みをいくつか紹介する。

## 2. ウェーハとパッドの接触状態の見える化

研磨加工では図1のようにウェーハを研磨ヘッドが保持するとともに、それによってパッド上に押圧しながら、ウェーハとパッドによる相対運動による機械的作用によってプロセスが進行すると言われる。一方、パッドの表面には微細な起伏(アスペリティ)があり、また、そのアスペリティの規模はパッドの種類、研磨時間の進行に伴う摩耗、コンディショニングによる回復によって変化するが、それを定量的かつオンマシ(機上)で測定する手法開発が求められていた。

図2は台形プリズムを使った接触画像解析法に基づく測定装置の外観である<sup>1)</sup>。この原理は文献<sup>12)</sup>で詳述しているのここでは割愛するが、これによってオンマシ測定を可能にするとともに、図3のような接触画像を得ることができる。この接触画像において、白く光る部分が真実接触領域であり、本測定装置では(1)接触点数、(2)接触率、(3)接触点間隔、そして(4)分散度の4つの定量パラメータを出力できる。図(a)のコンディショニング直後と比べ、図(b)の研磨後では接触点数および接触率が減少することがわかる。

この測定による効果の一例を紹介したい<sup>2)</sup>。図4は片面研

磨装置を用いて8inchのベアシリコンを軟質発泡ウレタンパッドとコロイダルシリカスラリーによって合計19回の連続研磨(1回当たりの研磨時間は5min)を行ったときの(a)研磨レートの変化、並びに(b)接触点数の変化を示している。なお、図中の

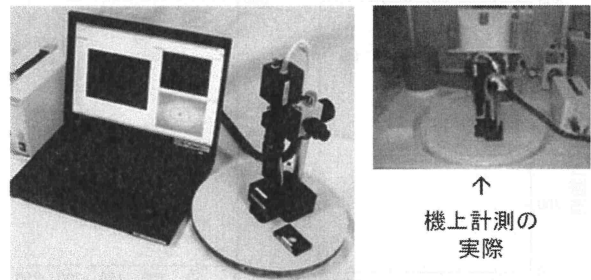


図2 ウェーハとパッドの接触状態の見える化のための専用測定装置

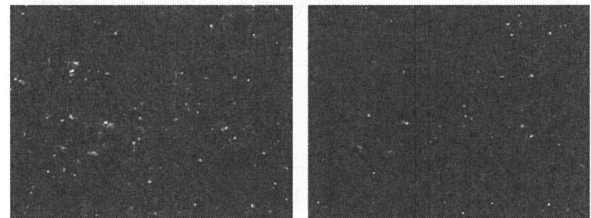


図3 接触画像の一例  
(a) コンディショニング直後 (b) 研磨後

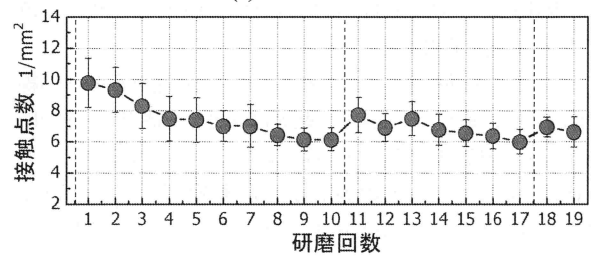
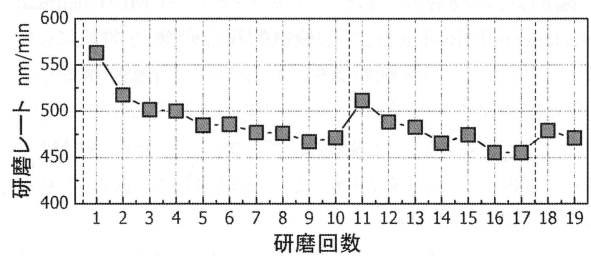


図4 研磨回数の増加に伴う研磨レートと接触点数の変化

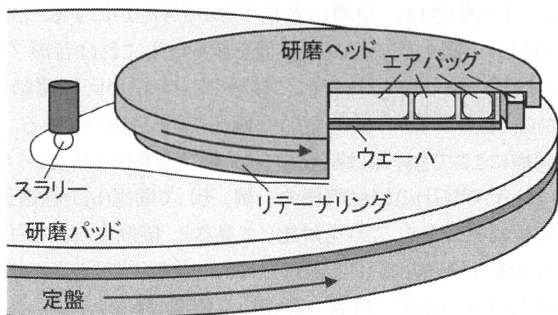


図1 CMPプロセスの模式図

\*1 金沢工業大学: 〒924-0834 石川県白山市八束穂3-1  
\*2 金沢大学: 〒920-1192 石川県金沢市角間町

点線はコンディショニングを行ったタイミングを意味する。このように研磨レートの変化(特に減少傾向)に合わせるように接触点数も変化していることが見て取れよう。

図5は研磨レートに対する(a)接触点数,ならびに(b)分散度の相関図であり,これから接触点数が増えるにつれて基本的には研磨レートは増大するが,一方,ある点を境にして接触点数の増加に対して研磨レートは減少に転ずるといふ,結果が得られている。このことは,接触点数はある一定程度までは確保する必要があるが,それを越えると過剰状態になるといえる。このことは,同図(b)のように接触点数の増加に伴って分散性が低下するためであるとも言える。

何事も「ほどほどに」といふことが研磨加工においても存在することが,とても興味深い。

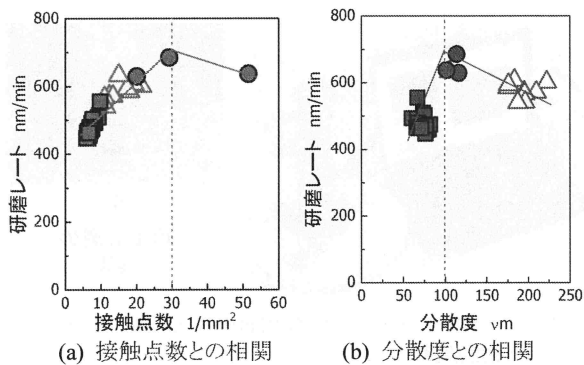


図5 研磨レートとパッド接触に関するパラメータとの相関

### 3. 研磨液挙動の見える化

#### 3.1 マクロ的視点から

パッドと合わせて研磨加工に大きな影響を及ぼすものがスラリーである。とりわけ,スラリーによる機械的作用と化学的作用によって研磨は進行すると考えられることから,その挙動の見える化を通じた理解は極めて大切であるといえよう。

図6はその理解の一助として,サファイアのCMP (Chemical Mechanical Polishing, 化学的機械的複合研磨)を対象にしたウェーハとパッドの接触界面を流れるスラリー挙動を観察したときの模式図であり,図6はその結果の一例である<sup>3)</sup>。なお,サファイアを対象にした理由はとても単純で,無色透明材であり,研磨レートが比較的遅いこと(過研磨による観察結果の変化を避けること)にある。

また,図7については,コンターマップを「線速比」として表し,線速比が1になればパッドと完全に追従してスラリーが流れていることを意味する。

このように接触界面におけるスラリーの流速を意味する線速比は1に満たない。さらに,図8は線速比と研磨レートの関係を示し,線速比が高いほど高い研磨レートが得られる,という結果を示している。この線形性は興味深いところであるが,それ以上に何故,線速比が1に満たないのか,という疑問を抱く読者もいるだろう。このことを解明するために実施した,次節の取り組みを紹介したい。

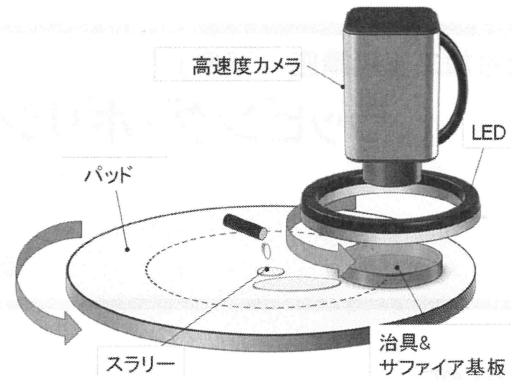


図6 ウェーハとパッドの接触界面を流れるスラリー挙動の観察方法(サファイアCMP)

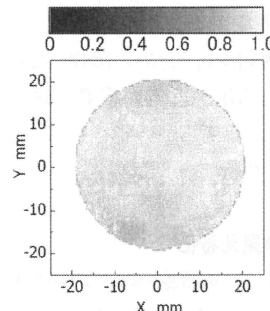


図7 接触界面における線速比分布

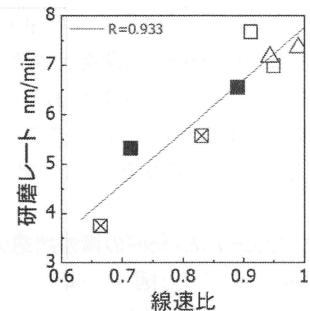


図8 線速比と研磨レートの関係

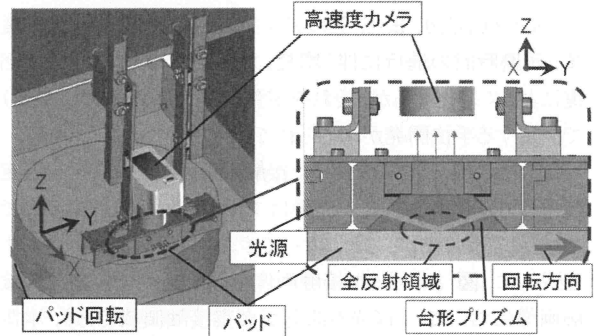


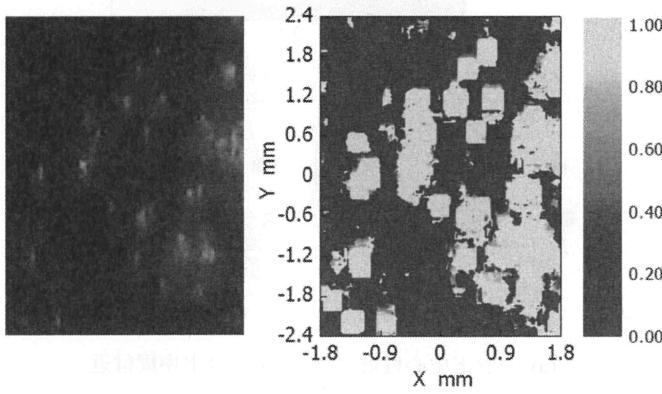
図9 接触画像解析法の原理を利用した接触界面のミクロ動的接触観察の方法

#### 3.2 ミクロ的視点から

第2章と前節の知見を組み合わせ,スラリーが接触界面でどのように流(さ)れ,研磨に寄与するかを明らかにすることを目的として,図9のような実験装置を作った<sup>4)</sup>。これは台形プリズムをウェーハとみなし,それに接触するパッドが回転運動しながら,上方からその様子をカメラ観察できる仕組みである。

同様にここでも詳細は割愛する(文献<sup>4)</sup>を参照されたい)が,図10(a)が得られる接触画像の一例,そして同図(b)が線速比の解析結果である。これを対比して見ると,接触点((a)で白く光る領域)の近傍における線速比はおおよそ1であり,一方,接触点以外の領域では高い線速比が観測できない。

これらの結果を総括すると,図11の模式図を描くことができよう。すなわち,研磨に直接寄与するスラリーはパッドの接触点によって運搬され,そこでの速度(流速)はパッドと同じにな



(a) 取得される画像 (b) 同定される線速

図 10 線速比分布のミクロ的解析結果

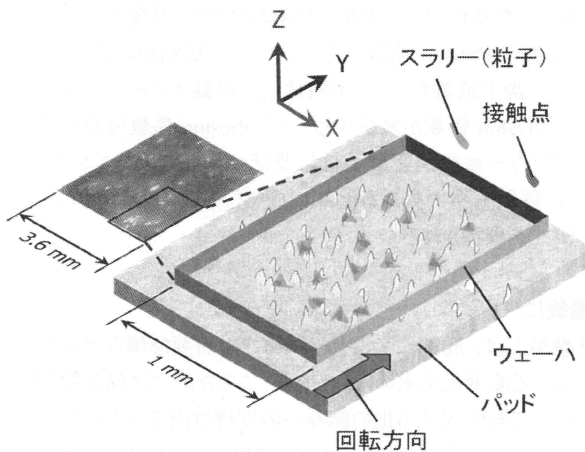


図 11 研磨作用に及ぼす接触点の役割

る。一方、第 2 章のようにパッドの全面がウェーハと接触するわけではないことから、接触界面においてスラリーがパッドと同程度に流れる部分は局所的であって、それを接触界面全体で平均的に理解する場合、図 7 のように 1 を満たない分布になる。そして、図 8 のように線速比が高いほど研磨レートが高くなる、という結果は、接触点数が多くスラリーを効果的に運搬できるとともに、スラリー中の粒子が研磨に寄与することができることから、その「結果論」として高い研磨レートを得ることができるといえよう。

#### 4. 研磨レート分布の見える化

研磨加工では加工物内の厚みを均一に上げることが望まれており、研磨レート(単位時間当たりの材料除去量)のウェーハ面内分布は重要な研磨結果の 1 つである。この分布は使用する装置や消耗品の状態などによって異なることが知られているが、各因子の影響など十分に解明されていない。本章では、この分布に関する見える化の試みを記す。

図 1 に示す一般的な CMP では、加工対象であるウェーハには研磨パッドと同程度の回転数が与えられる。このウェーハ回転により研磨レートは軸対称な分布となるため、図 12 に示すように、研磨レート分布はウェーハ半径位置に関する分布として表される。ただし一般的に取得されるこの分布からは、

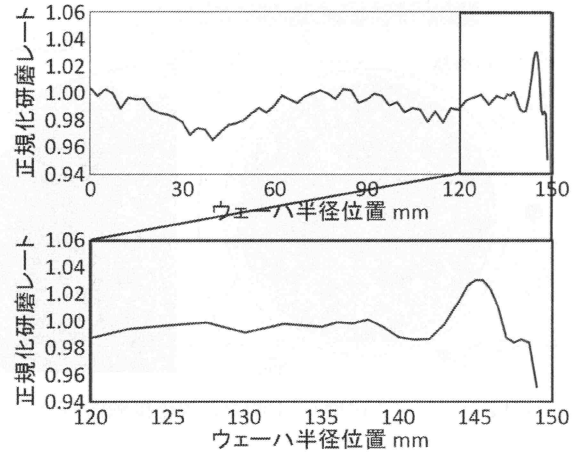


図 12 一般的な研磨レート分布

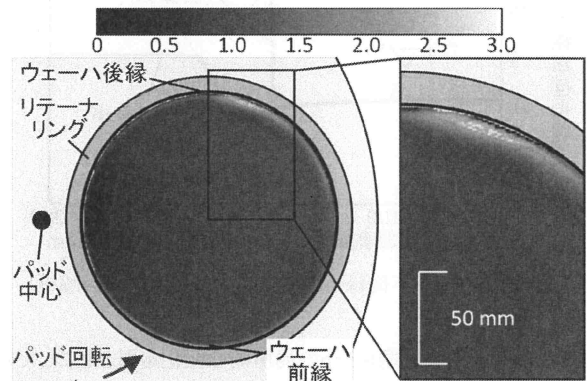


図 13 ウェーハ非回転状態における正規化研磨レート分布

ウェーハ半径位置 145mm の位置で研磨レートが極大となる原因を推測することはできない。この原因を検討する手法として、ウェーハを回転させない条件で研磨実験を行い、ウェーハ各位置における研磨レート分布を取得する<sup>9)</sup>。図 13 にこのウェーハ非回転条件で取得した研磨レート分布を示す。図から研磨レートはウェーハ後縁近傍で局所的に大きく変化し、ウェーハ半径位置 145mm で極大値をとることがわかる。このため、ウェーハ後縁近傍における研磨レート分布の局所的な変化が、図 12 に例示するような研磨レート分布の均一性を悪化させる原因であるといえる。なお、図 13 ではパッド中心から離れるほど研磨レートが大きくなっているが、これは主にウェーハ非回転時の相対速度分布の偏りによるものであり、相対速度分布が均一分布となる一般的な条件においては概ね無視できる現象である。

次に、なぜウェーハ後縁近傍で研磨レートが局所的に変化するのかを明らかにした取組み<sup>9)</sup>について記す。研磨レートは Preston 則<sup>7)</sup>に基づきパッドとの接触応力に比例する。この接触応力のウェーハ面内分布は有限要素法解析を活用することで推定できる。ウェーハを保持する研磨ヘッド構造を正確にモデル化するとともに、研磨パッド表面の凹凸構造を非線形弾性特性により再現した解析によって得られたウェーハ非回転条件における接触応力分布を図 14 に示す。図に示すように、ウェーハ後縁近傍で接触応力が局所的な変化しており、

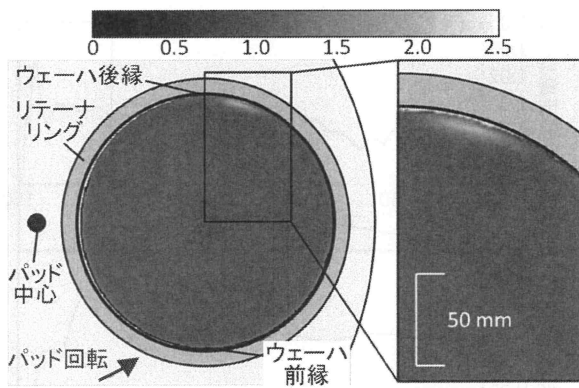


図 14 ウェーハと研磨パッド間の正規化接触応力分布

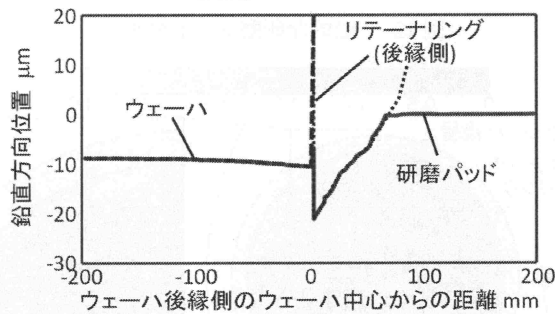


図 15 ウェーハ後縁近傍の各部材の変形状態(解析)

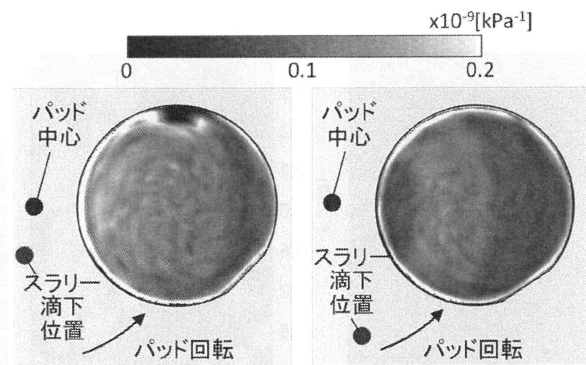
この応力集中が研磨レートの局所的な変化を引き起こしているといえる。また、このときのウェーハ後縁近傍での各部材の変形状態を図 15 に示す。ウェーハを保持するために、ウェーハ後縁側のリテーナリングの内側面には大きな接触力が加わる。この接触力により、リテーナリングは研磨パッドを押し込むように変形する。このため、ウェーハ外周近傍では研磨パッドとの接触力が低くなる一方、その内側において非常に大きな接触力が生じるようになる。これが、ウェーハ後縁近傍で研磨レートが局所的に変化するメカニズムである。

この取組のように、実験的アプローチだけでなく解析を活用したアプローチも見える化(現象の理解)には重要であり、研磨加工の解析技術の技術進展も見える化を推し進める重要なツールであるといえる。

最後に、研磨圧力分布の高精度解析技術を活用した、Preston 係数分布の可視化技術について紹介する。Preston 係数は、相対速度と接触応力の積と研磨レートとの関係における係数であり、ウェーハの材質や研磨パッドとの接触状態、研磨液挙動などが影響する。この Preston 係数のウェーハ内の分布  $k_p(r, \phi)$  は Preston 則に基づき、式(1)で表される。

$$k_p(r, \phi) = \frac{MRR(r, \phi)}{p(r, \phi) \cdot v(r, \phi)} \quad (1)$$

ここで、 $MRR(r, \phi)$  は実験により取得できるウェーハ非回転条件における研磨レート分布、 $p(r, \phi)$  と  $v(r, \phi)$  は解析により取得できるウェーハ非回転条件における接触応力分布と相対速度分布である。図 16 にスラリー滴下位置を変化させたときの



(a) パッド中心付近 (b) パッド中周付近

図 16 スラリー滴下位置による Preston 係数分布の違い

Preston 係数分布を示す。図(a)に示すパッド中心付近にスラリーを滴下した条件では、多量の新鮮なスラリーが浸入するパッド中心側で Preston 係数が大きくなる。一方図(b)に示すようにスラリー滴下位置をパッド中周付近に移動すると、パッド中心側の Preston 係数が減少する。この Preston 係数分布の違いは、スラリー挙動が研磨特性に及ぼす影響を表しており、Preston 係数分布の見える化により研磨加工の理解がさらに深まることが期待される。

## 5. 最後に

研磨加工は、近年の半導体デバイスの需要急増などに伴い、さらなる高度化が求められている。このためには現象解明が不可欠であり、見える化の試みへの期待は高まっている。

本記事では紹介できなかったが、研磨パッド周辺の研磨液流れを観察した試みや、分子動力学解析による材料除去の可視化などさまざまな取り組みが行われている。今後、研磨加工の見える化がより一層進むとともに、見える化によって着想された技術により高度化が進むことを期待している。

## 6. 参考文献

- 1) M. Uneda et al: Relationships between Contact Image Analysis Results for Pad Surface Texture and Removal Rate in CMP, J. Electrochemical Soc., 159, 2 (2012) H90.
- 2) M. Uneda et al.: Influence of Pad Surface Asperity on Removal Rate in Chemical Mechanical Polishing of Large-Diameter Silicon Wafer Applied to Substrate of GaN-Based LEDs, Sensors and Materials, 26, 6 (2014) 435.
- 3) M. Uneda et al.: Investigation of Slurry Flow Behavior in Chemical Mechanical Polishing of Hard and Brittle Material, J. Jpn. Soc. Prec. Eng., 83, 8 (2017) 756 (in Japanese).
- 4) M. Uneda et al.: Analysis of the material removal mechanism in chemical mechanical polishing with insitu macroscale nonwoven pad contact interface observation using an evanescent field, Precision Engineering, 82 (2023) 281.
- 5) Y. Hashimoto et al: Novel method to visualize Preston's coefficient distribution for chemical mechanical polishing process, Jpn. J. Appl. Phys., 61, (2022) 116542.
- 6) N. Suzuki et al: Prediction of polishing pressure distribution in CMP process with airbag type wafer carrier, CIRP Annals, 66, 1, (2017), 329.
- 7) F. W. Preston: The theory and design of plate glass polishing machines, J. Glass Tech., 11, (1927) 214.