

研磨パッドの表面形状の分析と力学モデル構築のための基礎検討

名古屋大学 ○大鹿 真悟 ◎鈴木 教和, 橋本 洋平, 社本 英二

要旨

研磨パッド表面に存在する凹凸構造の分析は、研磨メカニズムを理解する上で重要である。本研究では、レーザ顕微鏡を用いて研磨パッド表面凹凸の形状計測を行った。さらに、凹凸形状を楕円球の集合体とみなしてモデル化し、測定形状にベストフィットする曲率半径を同定して、突起の高さ及び曲率半径の分布関数を求めた。次に、Hertz 接触理論に基づく研磨パッドとウェハの新しい接触モデルを考案し、その変形特性について考察した。

1. 緒言

半導体デバイス製造に利用される CMP (Chemical Mechanical Polishing) においては、研磨レート向上や高精度化・安定化を実現する技術開発が望まれている。CMP における研磨レートは、多くの場合、研磨圧力と相対速度の積に比例するという“Preston 則”に従うことが知られている。現実と傾向がよく一致するため広く利用されているが、工作物表面で生じている材料除去メカニズムとの相関については、解明されていない部分が多い。

ここで、工作物と接する研磨パッド表面凹凸の挙動に注目する。研磨パッド表面凹凸は様々な方法で評価され、研磨特性との相関が研究されている¹⁾²⁾。CMP の研究分野では、この力学モデルとして、粗面の接触モデルの一つである Greenwood-Williamson モデル³⁾ (以降、GW モデルと呼ぶ) が用いられることが多い。GW モデルでは、図 1 に示すように、凹凸形状を球形状突起の集合体と考える。球の頂点は正規分布に基づいて存在し、最密面に対し $\pm 3\sigma$ (球の頂点分布の標準偏差) の間に全ての球の頂点が存在すると仮定する。著者らのグループにおいても、研磨プロセスのマクロな解析を行う際に、GW モデルを利用しているが、研磨パッドの表面凹凸の力学モデルとして GW モデルを適用する根拠は存在しない。また、実際の表面形状に基づくミクロ/マクロな変形挙動や弾性特性はほとんど明らかにされていない。そこで、研磨パッドの表面凹凸の変形挙動を解析的に分析して研磨メカニズムを考察することを目的とし、本研究では、新たな接触モデルを提案する。具体的には、研磨パッドの表面形状を測定して幾何学的特徴を数値化し、この結果に基づき弾性接触理論を用いて力学モデルを定式化する。本稿では、研磨パッドの表面形状の測定結果及び分析結果について述べた後に、新しい力学モデルの定式化および計算結果について説明する。

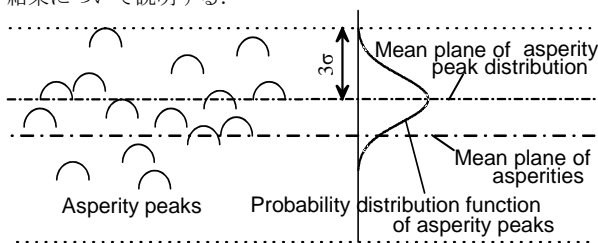


Fig. 1 Schematic diagram of pad surface defined by GW model

2. 研磨パッドの表面形状の分析

レーザ顕微鏡 (オリンパス製 OLS4100) を用いて研磨パッドの表面形状を測定した。評価には、標準的な研磨・ドレス条件で 40 min 程度酸化膜プロセスに使用した研磨パッド (ニッタ・ハース製 IC1000TM) を用いた。実験後に乾燥した研磨パッドの半径 2 分の 1 付近の領域を切り取り、 $\square 1.24 \text{ mm}$ の領域について形状計測を行った。計測した 3 次元形状データを図 2 に示す。図から、表面凹凸の高低差は $100 \mu\text{m}$ 程度あり、工作物に接触しそうな高い位置にある突起は面内で分散していることがわかる。形状測定データの負荷曲線を図 3 に示す。CMP プロセスにおいて研磨パッドの真実接触面積は約 1% 前後となることが知られている。これを考慮すると、最高点から $25 \mu\text{m}$ 前後の範囲が接触することになる。

そこで、その範囲に存在する突起について以下の手順で分析を行った。

- 測定データ中の最高点位置を検出し、最高点を中心にデータ点数 61×61 ($\square 12.5 \mu\text{m}$) の領域を抽出する。
- 手順 a) で抽出した領域を除外する。
- 最高点から $25 \mu\text{m}$ の範囲に存在する突起を全て抽出するまで手順 a) と b) を繰り返す。

抽出した突起形状の一例を図 4 に示す。図は各軸の比が等しくなるように示しており、球というよりは尖った形状であることがわかる。この他にも高台のような形状や x 軸と y 軸で半径が大きく異なる形状が存在した。すなわち、突起の半径が全て同一であると仮定した GW モデルとは一致しないことがわかる。

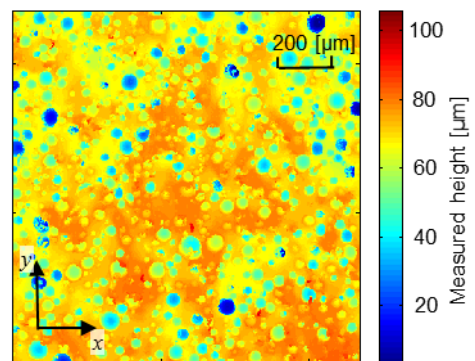


Fig. 2 Measured height distribution of polishing pad

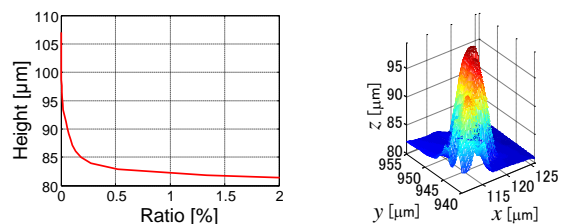


Fig. 3 Load curve of pad surface Fig. 4 Measured asperity geometry

そこで、本研究では突起の形状を式(1)で示す楕円球で近似し、最小二乗法を用いて各軸の曲率半径 R_x, R_y, R_z を同定する。

$$\frac{(x-x_0)^2}{R_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{R_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{R_z^2} = 1 \quad (1)$$

x_0, y_0, z_0 は楕円球の中心座標であり、フィッティングする球面は $z-z_0 \geq 0$ の範囲とする。

抽出した突起頂点の高さ分布と、突起に対して上述の方法で同定した各軸の半径の分布を図 5 に示す。図に示されるように突起頂点から $20 \mu\text{m}$ 程度の範囲においては、突起の数が少ないのに対し、その下側の領域になると急激に突起数が増加することがわかる。また、突起形状の各軸方向の楕円半径はばらつきが大きく、概ね $10 \sim 30 \mu\text{m}$ の範囲で分布している。さらに、 R_x 及び R_y に対して R_z がやや大きくなる傾向があり、図 4 に示す測定事例の様に尖った形状が多いことが確認できた。

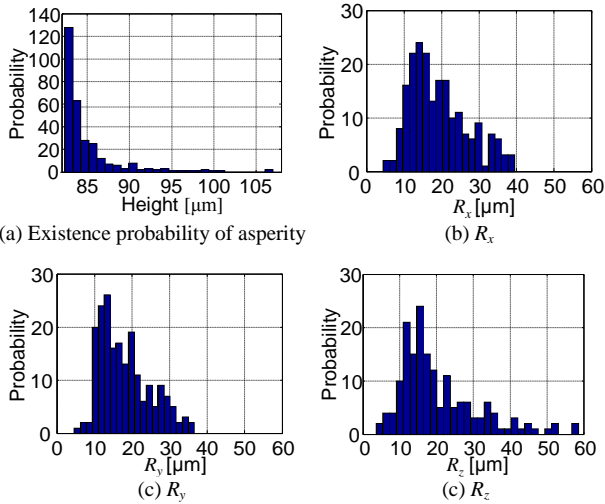


Fig. 5 Asperity existence function and curvature radius distribution

3. 力学モデルの定式化

従来研究の多くで用いられている表面凹凸形状の力学モデルでは球形状を対象としているため、前章で測定された楕円球形状には直接適用できない。そこで、楕円球の圧縮変形に対する力学モデルを定式化する。まず、単一の楕円球突起が平面に弾性接触する場合の力学モデルを考える。ここでは、接触対象の形状を楕円球へと拡張させた Hertz の接触理論³⁾を用いる。図 6 の模式図に示すように、式(1)で表される楕円球と剛体平板の接触において、接触領域は楕円形状となり、その面積 A_0 は式(2)で表される。

$$A_0(\delta) = \pi ab \quad (2)$$

ここで、 a と b は接触領域の楕円形状の長半径と短半径であり、楕円球頂点が圧縮されて δ 変形した際の a は式(3)で表される。

$$a(\delta, R_x, R_y, R_z) = \sqrt{\frac{2R_x^2 \delta}{R_z} \left(1 - \frac{E(e)}{K(e)}\right)} \quad (3)$$

ここで、 $K(e)$ と $E(e)$ は第一種完全楕円積分と第二種完全楕円積分である。 e は式(4)により算出される長半径と短半径の比に依存するパラメータであり、式(5)の関係式を与える。

$$\frac{1 - e^2 E(e) - K(e)}{K(e) - E(e)} = \frac{R_x^2}{R_y^2} \quad (4)$$

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (5)$$

また、この圧縮変形に対する反力 P_0 はヤング率 E とポアソン比 ν を用いて式(6)で表される。

$$P_0(\delta, R_x, R_y, R_z) = \frac{2}{3} \pi a \frac{\delta}{K(e)} \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (6)$$

次に、単一の楕円球の突起に対する力学モデルを発展させ、研磨パッドの表面突起構造の力学モデルの定式化を行う。ここでは、図 7 の模式図に示すように、研磨パッドの表面を、複数の楕円球の突起の集合と考える。そして、式(7)に示すように、全ての楕円球突起に対する反力の総和をとることにより、表面突起構造の変形量 δ と接触圧力 P の関係を求める。

$$P(\delta) = \sum_{i=1}^n P_0^i(\delta) / A \quad (7)$$

ここで、 A は見かけの圧縮面積であり、 $P_0^i(\delta)$ は i 番目の突起 (突起頂点の高さ h^i 、各軸の半径 R_x^i, R_y^i, R_z^i) における、表面突起構造の変形量 δ に対する反力であり、式(8)で表される。

$$P_0^i(\delta) = \begin{cases} 0 & (\delta - h^i < 0) \\ P_0(\delta - h^i, R_x^i, R_y^i, R_z^i) & (0 \leq \delta - h^i \leq R_z^i) \\ P_0(R_z^i, R_x^i, R_y^i, R_z^i) & (R_z^i < \delta - h^i) \end{cases} \quad (8)$$

なお、突起が z 方向の半径 R_z^i より大きく変形する場合は、突起の

反力はそれ以上増加しないと仮定する。

4. 分析結果に基づく提案力学モデルの評価

定式化を行った力学モデルに対して、研磨パッド表面の分析により同定された楕円形状を適用することにより、提案モデルの評価を行う。本研究で提案した力学モデルにより算出される、研磨パッドの圧縮動作における応力-ひずみ曲線を図 8 に示す。比較のため、GW モデルによる結果と別途行った圧縮実験から得られた試験結果を合わせて示す。なお、解析に用いた主な条件は表 1 に示す。図から、GW モデルに対して提案モデルの方がやや弾性率が小さくなるのが分かる。これは、GW モデルに対して突起の形状や存在確率分布が異なることが主な原因であると考えられる。また、提案モデルにおいては、実験による測定結果と近い特性を計算できていることから、提案手法を用いることで概ね妥当な圧縮特性の推定が可能であると考えられる。このため、今後、提案モデルを用いて表面凹凸形状の力学特性を詳細に分析するとともに、変形挙動と研磨メカニズムの関係について検討していく予定である。これにより、研磨メカニズムの解明に取組む。

5. 結言

CMP プロセスに用いられる研磨パッド表面の凹凸形状の分析を行った。その結果、突起の形状は従来の GW モデルで仮定する球形状ではなく、楕円球に近い形状であることを明らかにした。また、弾性接触理論を用いて楕円球の力学モデルと、表面凹凸の接触モデルを定式化した。さらに、提案モデルを用いることで実験結果と近い弾性特性を推定し得ることを確認した。

参考文献

- 1) 畝田 道雄ら, 精密工学会誌, 76, 11(2010) 1276
- 2) P. Khajornrungruang et al., Proc. ICPT2014, (2014) 205
- 3) K. L. Johnson: Contact Mechanics, Cambridge University Press (1985)

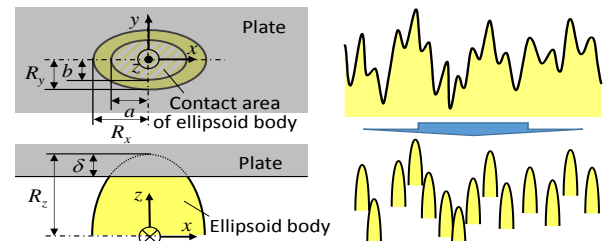


Fig. 6 Contact model between right plate and elliptic asperity

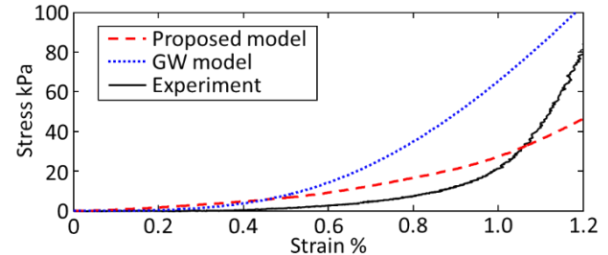


Fig. 8 Estimated and measured stress-strain curves for analyses

Table 1 Conditions for analyses

	Proposed model	GW model
Asperity structure	Elliptic R_x, R_y, R_z : Identification results	Spherical $R: 50\mu\text{m}$
Asperity model	Measured distribution is applied. (fig. 5)	Density: 100mm^{-2} Gaussian dist. is applied. ($\sigma: 6\mu\text{m}$)
Young modulus	100 MPa	100 MPa
Poisson's ratio	0.3	0.3