

# CMPにおけるウエハとパッドすきま内スラリー流れの数値解析\*

## (溝なし, 同心円溝, 放射状溝での比較)

永山 勝也<sup>\*1</sup>, 木村 景一<sup>\*1</sup>  
森下 浩文<sup>\*1</sup>, 田中 和博<sup>\*2</sup>

### A Computational Study on Slurry Flow Between a Wafer and Pad in CMP (Cases without Groove, with Circular Grooves and Radial Grooves)

Katsuya NAGAYAMA<sup>\*3</sup>, Keiichi KIMURA,  
Hirofumi MORISHITA and Kazuhiro TANAKA

<sup>\*3</sup> Department of Mechanical Information Science & Technology, Kyushu Institute of Technology,  
680-4 Kawazu, Iizuka-shi, Fukuoka, 820-8502 Japan

In recent years, CMP (Chemical and Mechanical Polishing) greatly has taken its role as technology of planarizations to produce multi-level inter-connections. While slurry is flowing on a polishing pad in CMP, the polishing pad is in contact with the wafer to polish the wafer surface. Grooves are expected to supply slurry evenly, and to remove wasted particles. Our study aims at developing the design of the best patterns of grooves. By predicting slurry flows between wafers and polishing pads in CMP using CFD, the influence of the slurry flow by the grooved pad can be analyzed. In this paper simulations were carried out for cases without groove, with circular grooves and radial grooves. With analysis of the flow field, how grooves affect the velocity distributions are studied. We also simulated the replacement of old slurry to new slurry, and the roles of the grooves are discussed.

**Key Words:** Polishing, Computational Fluid Dynamics, Shear Flow, Micro Channel

## 1. 緒 言

近年, 超 LSI の高集積化, 高性能化に伴い配線の微細化, 多層化が必要となっており, CMP<sup>(1)</sup>(Chemical Mechanical Polishing)による平坦化処理が注目されている。CMP はウエハにポリシングパッドを接触させて加工を行い, 大きな面を機械的に平坦にするため, その概念は単純なうえ高精度平坦化において非常に実績のある超精密ポリシング技術である。

CMP はポリシングパッド上にスラリーを滴下させながらウエハの平坦化を行うが, パッド上には同心円, 放射状, 格子状, あるいはらせん状形等の溝が設置されている。これらはウエハ下にスラリーを効率よく均一に供給することでのウエハ面の平坦性, 均一性の向上や, 加工くずを含むスラリーの排出を促しディブスクラッチや加工欠陥を防ぐ効果を得ることが知られている。しかしパッド溝の形状によってスラリーの流動が変化しそれが研磨性能に及ぼす影響は未解明であり, さまざまなパッド溝によるスラリー流れを

数値解析<sup>(2)(3)</sup>により明らかにし, 研磨性能との関係を導くことは重要である。

Muldowney<sup>(2)</sup>は, パッドとウエハ間の凹凸すきまの流動特性を近似して, まず三次元の流れ解析を同心円溝付きパッドで行った。Muldowney<sup>(3)</sup>はさらに, 同心円溝内部での粒子の運動についても調べている。Bae<sup>(4)</sup>らは多孔質のパッドのマイクロな孔の部分を二次元流れ解析し, 化学反応を考慮してウエハ面での研磨速度を算出した。Takano<sup>(5)</sup>らは, パッド溝内部流動を二次元で, SPH 法を用いた粒子解析を行い, 加工くずの溝内部流動を計算した。

Lin<sup>(6)</sup>らは, 同心円溝付きパッドでの流動を近似を用いながら理論解析を行い, 研磨速度の算出を行った。Borucki<sup>(7)</sup>らは, パッドでの摩擦熱の解析を, 研磨面垂直方向の一次元モデルと, 研磨面における二次元モデルを組合わせて計算した。

本研究<sup>(8)</sup>は, パッドとウエハすきまの全体の三次元解析をはん用流体解析コード<sup>(2)(3)</sup>を用いて行い, 特に溝内部流動を詳しく解析し, 溝パターン形状の違いによるスラリー流れの違いを分析する。そしてスラリーフロー状態と研磨性能の関係を解明し, パッド溝パターン形状, 断面形状の最適設計法の確立を最終目的とする。本報告ではその第1段階として, 溝なしパッド,

\* 原稿受付 2007 年 1 月 31 日。

<sup>\*1</sup> 正員, 九州工業大学情報工学部 (〒820-8502 飯塚市大字川津 680-4)。

<sup>\*2</sup> 正員, フェロー, 九州工業大学情報工学部。  
E-mail: nagayama@mse.kyutech.ac.jp

同心円溝パッド, さらには放射状溝パッドにおけるスラリー流れの数値解析を行った. 具体的には, まず溝なしパッド, 周方向溝(同心円溝)パッドにおいて, 速度分布とスラリー輸送の観点から, パッド溝の役割を調べた. また可視化実験による検証も行っている点も特徴である. さらに溝のもう一つの基本要素と考えられる半径方向溝(放射状溝)付きのパッドでのスラリー流動現象を明らかにした.

## 2. おもな記号

- $C$ : 濃度(体積分率)  
 $D$ : 拡散係数  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $F$ : 外力  $\text{N}$   
 $L$ : 代表長さ  $\text{m}$   
 $p$ : 圧力  $\text{Pa}$   
 $t$ : 時間  $\text{s}$   
 $V$ : 流速  $\text{m/s}$   
 $U$ : 代表速度  $\text{m/s}$   
 $\Omega$ : 回転数  $\text{rpm}$   
 $\rho$ : 流体の密度  $\text{kg/m}^3$   
 $\mu$ : 粘性係数  $\text{Pa}\cdot\text{s}$   
 $\vec{v}$ : 速度ベクトル( $V_x, V_y, V_z$ )  $\text{m/s}$   
 $Re$ : レイノルズ数

## 3. 解析方法

**3.1 解析モデル** 本解析ははん用熱流体解析コード FLUENT 6.2 を使用した. 基礎方程式は質量保存に関する連続の式(1), 運動量に関する Navier-Stokes 方程式(2)で構成される.  $F$  は外力項であり, ここでは重力を考慮した. また, ウエハ下の古いスラリー溶液がウエハ外の新鮮なスラリー溶液に入れ換わるスラリー輸送の解析を行う際は, 拡散方程式(3)を用いる.  $C$  は一般には濃度だがここでは新鮮なスラリー溶液の体積分率とした. 式(3)の2項は対流輸送の影響であり, 3項は拡散の影響であり  $D$  は拡散係数である. これらの式を有限体積法にて離散化を行っている.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + [\mu \Delta (\vec{v} + \vec{v}^T)] + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} C) = \rho D \nabla^2 C \quad (3)$$

**3.2 解析対象** 本研究の解析対象である CMP 装置のウエハおよびポリシングパッドの位置関係を図

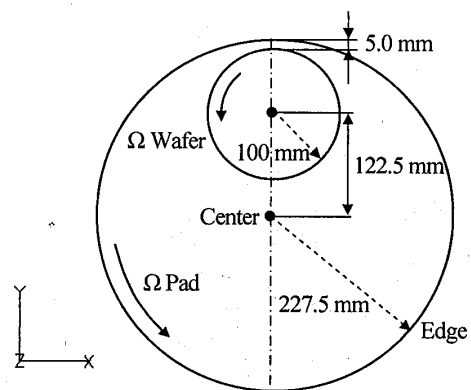


Fig. 1 Dimension of CMP model

1に示す. ウエハ直径 200 mm, パッド直径 450 mm で, ウエハとパッドの中心間距離は, 122.5 mm である. パッド溝によるスラリー流れの影響を明らかにするため, 溝なし, 同心円溝付き, 放射状溝付きで比較を行った. 図1でパッド上の水平面を  $xy$  平面とし, 垂直方向を  $z$  軸とした.

**3.3 解析条件** 本解析ではウエハの下面, パッドとのすきまのみの解析とし(パッド表面全体ではない), 時間刻みを  $10^{-8} \text{s}$  とした. スラリーの物性値は水と大差はないと仮定し, ここでは水と同等の値を用いる. ウエハおよびポリシングパッドは, それぞれの中心を軸に 60 r/min で同じ反時計回りに回転する. ウエハとパッドのすきま領域におけるウエハの外周側面では, 大気開放になるので境界条件として圧力はゲージ圧で 0 Pa とし, また速度こう配は零として, ウエハとパッドのすきまに流れ込むスラリー流れの解析を行い, パッド溝の影響を評価する.

同心円溝パッド解析モデルは, 図2に示すように溝ピッチ 20 mm, 溝幅 1.0 mm, 山幅 1.0 mm, 溝深さ 1.0 mm としている. また, 溝のないランド部でのウエハとパッドのすきまを  $10 \mu\text{m}$  と仮定した. 実際はパッドには凹凸があり接触している部分もあるが, 計算能力の制約, またウエハ面全体的な流動の概略を解明するため, すきまは一定値とした. この場合レイノルズ数は, 代表速度をパッド外周速度 1.43 m/s, 代表長さをギャップ  $10 \mu\text{m}$ , 水の動粘度を用いると, 1.4 と低レイノルズ数であり層流を仮定した. 解析格子は六面体格子を使用し, 格子数は溝なしパッドの場合 400 000, 同心円溝パッドの場合 1 000 000 とした. 解析は三次元解析である.

一方放射状溝パッド解析モデル図3では, 放射状に形成された溝が, パッド中心を軸に時間的に移動しながらウエハ下を通過する. これは, FLUENT に搭載されているスライディングメッシュを用いて解析を行

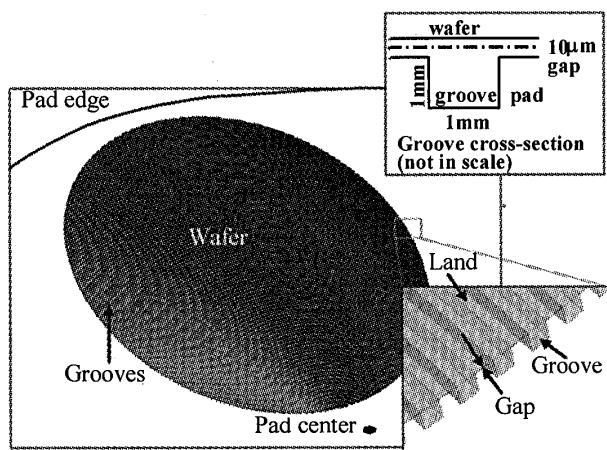


Fig. 2 Computational model of wafer and circularly grooved pad

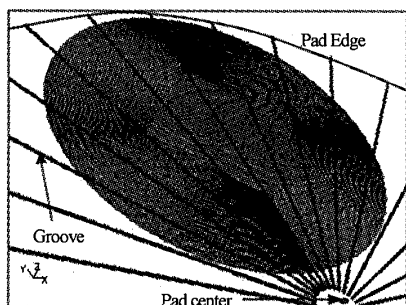


Fig. 3 Computational model of wafer and radially grooved pad

う。放射状溝のピッチを  $11.25^\circ$  とし、溝幅  $1.0\text{ mm}$ 、溝深さ  $1.0\text{ mm}$  としている。格子数は  $600\,000$  とする。なお図 2, 3 のウエハ部分には、解像度の点でしま模様になっているものの、格子を表示している。

#### 4. 解析結果および考察

ここでは、まず溝なしパッド、周方向溝(同心円溝)パッドを、流れとスラリー輸送の観点で比較して溝の役割を分析する。次に可視化実験による検証について考察する。さらに半径方向溝(放射状溝)の役割について分析した。

##### 4・1 流れ解析結果(溝なしと同心円溝付きの比較)

図 4 にウエハ面から下  $5\text{ }\mu\text{m}$  (ランド部すきま  $10\text{ }\mu\text{m}$  の中央)の、パッド中心を基準とする接線方向速度分布を示す。図 4(a)は溝なしパッド、(b)は同心円溝パッドモデルの解析結果である。これにより溝なしパッド、同心円溝パッドによる CMP スラリーの流れは共通して、パッド中心よりの位置ではスラリーの接線方向速度が小さいが、パッドエッジ付近に行くに従って大きくなっていることがわかる。パッドエッジ付近

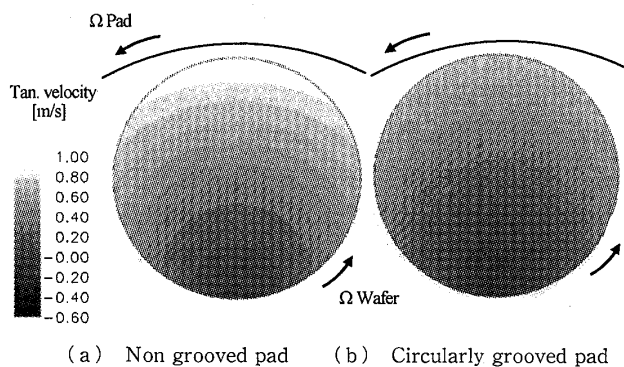


Fig. 4 Tangential velocity magnitude in pad-wafer gap

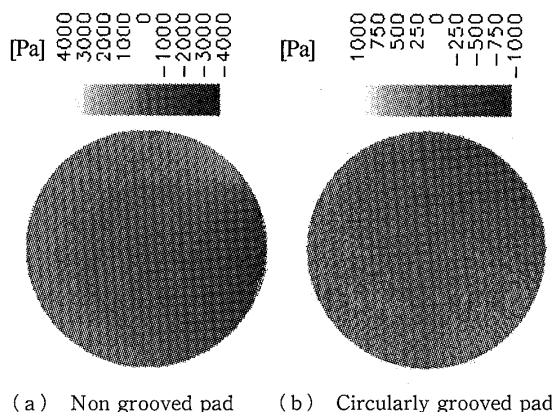


Fig. 5 Static pressure distribution

では、ウエハおよびパッドの回転が同方向でそれぞれの影響が合成され、接線方向速度は最大でパッド速度に近い  $1.0\text{ m/s}$  程度である。反対にパッド中心に近づくにつれ、ウエハ自身がその中心を軸に回転するため、ウエハ回転方向とパッド回転方向は相反し、接線方向速度は小さくなる。

図 5 にウエハ面から下  $5\text{ }\mu\text{m}$ 、つまりランド部すきま  $10\text{ }\mu\text{m}$  の中央位置での、静圧分布をゲージ圧で示す。なお実際は表面張力やウエハを押さえつける力の影響があるが、ここでは圧力の変動にのみ着目している。また図 4, 5 で同心円溝は  $50$  本もあり、解像度の点でしま模様になっているが全体的な傾向は以上つかめる。溝なしでは、パッドの回転によりスラリーを吸い込む、図で右側位置での圧力が低くなっていることがわかる。一方溝ありの場合は、圧力差は小さくなっており、溝により圧力の均一化が進んでいるものと思われる。

次に同心円溝付きパッドでの流動について、ウエハ面の数点で詳しく分析する。図 6 のように、ウエハ中心を (b)、そこから  $Y$  軸方向に  $\pm 80\text{ mm}$  の位置に (a), (c) をとった。図 7 でウエハ下面  $5\text{ }\mu\text{m}$  での各点の速度ベクトルを示したものである。パッド外側

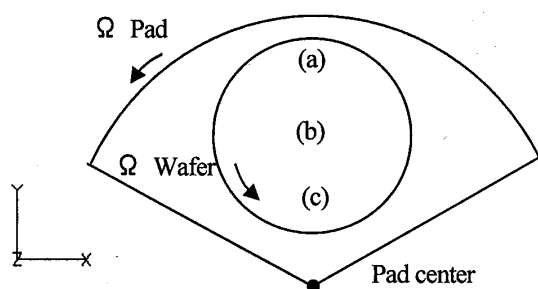


Fig. 6 Points for velocity analysis

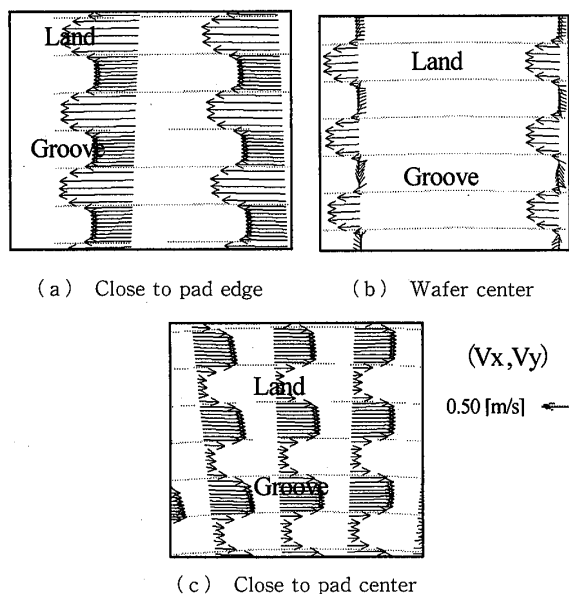
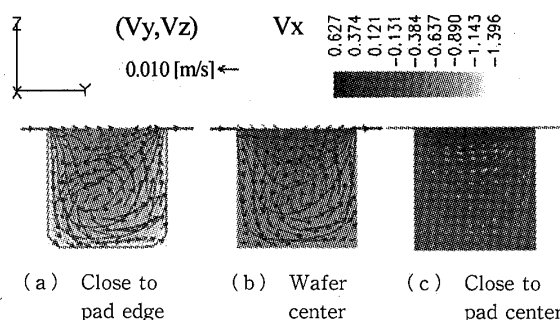


Fig. 7 Velocity vectors at several points

Fig. 8 Contour of velocity ( $V_x$ ) and velocity vectors ( $V_y, V_z$ )

(a)では回転方向の速度が大きく、ウエハ中央(b)では速度が小さく、パッド中心より(c)では、ウエハ回転で接線方向速度が部分的に逆向きになっている。共通して、ランド部ではウエハとパッド両方の影響を強く受けるが(5  $\mu\text{m}$  はギャップ中央位置)、溝部ではパッドが遠い分ウエハの影響が強く出ている。例えば、(a)のランド部ではパッドの影響で速度が大きい。(b)はウエハ中央でウエハ速度は零なので溝付近の速

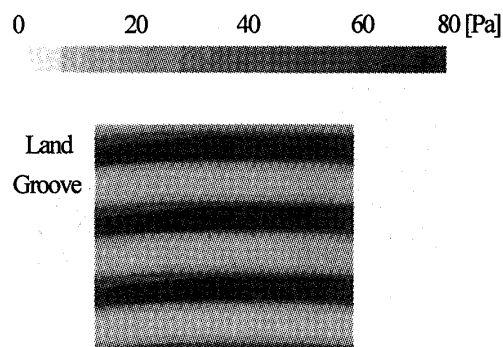


Fig. 9 Shear stress at wafer surface

度は小さく、(c)ではウエハの逆速度の影響が溝付近に出ている。

次に溝内部の流動について考察する。図6, 7の各点で、溝内部の流れを溝断面から(図2では右方向から)見た結果を、図8に速度3成分で示す。濃淡は  $V_x$  (紙面手前が  $x$  軸正、紙面奥がパッド回転方向で  $x$  軸負表示)、ベクトル  $V_y, V_z$  が溝断面内における速度分布を示している。溝上ではウエハの影響を、溝底ではパッド回転の影響を強く受けると考えられる。例えば  $V_x$  (濃淡)は、パッド外側(a)において、溝内部全体でパッド回転方向であり、ウエハ中心(b)で速度は零のため、ウエハ下面で小さい。さらにパッド中心より(c)においては、ウエハがパッドと逆の方向に動くため、ウエハ下面付近で逆流が( $x$  軸方向で正)生じている。一方断面平面での流動はベクトル  $V_y, V_z$  から、(a)、(b)で溝内に対流が生じていることがわかる。パッド中心より(c)では見られない。

図9は、速度こう配から求めた、ウエハ下面流体せん断応力分布をパッド中心側(c)付近で示した。せん断応力は機械的な研磨性能に大きく影響すると考えられる。実際はパッドには微細な凹凸があり接触による摩擦の影響が大きい、流れに伴うせん断応力傾向は同じで目安になる。ランド部で大きなせん断応力が働き、溝部では小さくなるなど、場所で大きく異なる。なお本回転数の条件では、ウエハ面全体ではランド部でせん断応力の変化は小さかった。

#### 4.2 スラリー輸送(溝なしと同心円溝付きの比較)

図10は、溝なしパッド(a)と同心円溝パッド(b)におけるウエハ面から下5  $\mu\text{m}$  (ギャップ中央面)での新しく流入するスラリーの質量分率を表す。これは、ある時刻零でのウエハ下には古いスラリー(黒表示)が満たされているものとし、それから時々刻々と流入する新鮮なスラリーのようすを示したものである。初期条件としてスラリー流れは定常解析の解を用い、拡散係数を  $2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  とし、時間刻みを  $10^{-3} \text{ s}$  としてい

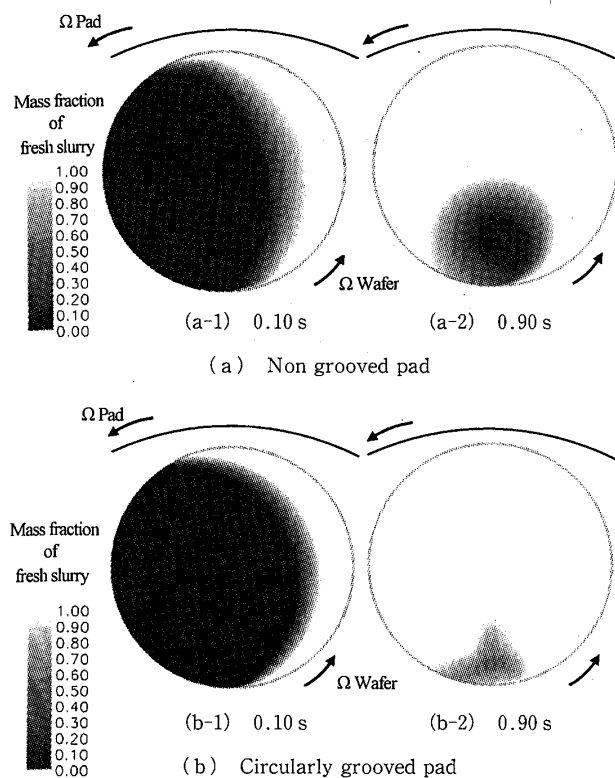
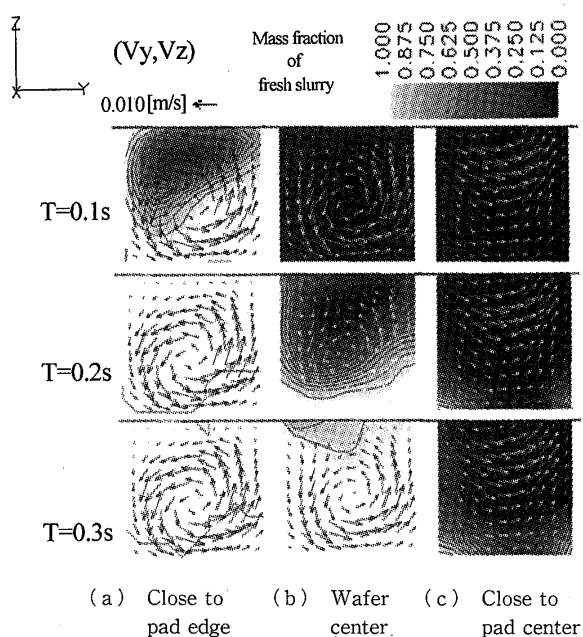


Fig. 10 Slurry mixing dynamics in pad-wafer gap

Fig. 11 Contour of slurry and velocity vectors ( $V_y$ ,  $V_z$ )

る。

0.10 s 後では溝なしパッド, 同心円パッドの場合ともに, 新しいスラリー(白表示)は, 時間が経過するにつれ, パッドおよびウエハの回転により, ウエハ右側から巻き込まれるように流入している。0.90 s 後での両者を比較すると, 溝なしパッドはウエハ下パッド中

心付近に長時間古いスラリー(黒表示)がとどまっているのがわかる。それに対し, 同心円溝付きパッドではパッド中心付近でも, 古いスラリーがあまりとどまっておらず, 溝の効果により入換えの促進が行われていることが明らかである。

図 11 に, 図 6~8 の 3 点 (a)~(c) の同心円溝パッドにおける溝断面での新しく流入するスラリーの体積分率を濃淡で示す。ベクトルでは溝断面の速度 ( $V_y$ ,  $V_z$ ) を示す。また, 時刻  $t=0.1$ ,  $t=0.2$ ,  $t=0.3$  s での解析結果である。新しいスラリー(白表示)はパッド回転により溝を通じ輸送され, 溝底からウエハ下面に到達していくことがわかる。また入換えはパッド外側 (a) から, (b), さらにパッド内側 (c) の順に進み, (c) では 0.3 s 後も古いスラリーが停留しているが, ウエハ回転による逆流の影響と考えられる。(a), (b) では溝内部では小さいながら対流が見られ, 溝底からウエハ下面にスラリーが輸送され, さらに拡散もありウエハ面に到達していると考えられる。なお拡散は係数零だと  $10 \mu\text{m}$  ギャップ内で分布ができたが, 拡散を考慮するとギャップ内で濃度は一様であり, ミクロの領域では拡散による輸送効果があることがわかる。(c) では対流は見られず, しかも溝軸方向の逆流の点でスラリーは停留しやすいと考えられる。以上のように同心円溝はスラリーの輸送の役割があり, またその効果は位置により異なることもわかる。

#### 4.3 実験との比較検証(同心円溝付きパッド)

解析と同じ寸法のウエハとパッドを使用し, スラリー流れ可視化実験を行い, 解析結果の妥当性を検証した。実験ではウエハの代わりとして, 合成石英ガラスを用いた。ポリシングパッド-ウエハ間のスラリー膜厚は非常に薄いため, スラリーの代換流体として純水を用い, 蛍光剤を混合して紫外線を照射し, スラリーフローの可視化を行った。ポリシングパッド上に蛍光剤を滴下し, UV ランプからの紫外線を照射して蛍光剤を発光させ, ビデオカメラによりそのようすを撮影した。映像から, 白く発光している部分を新しいスラリー領域, 発光しない部分は古いスラリー領域と判別した。ポリシングパッドは同心円溝パッドを使用し, 実験, 解析の条件として, ここではパッド回転数を 30 r/min, ウエハ回転数 30 r/min としている。

図 12 に可視化実験結果, 図 13 にそれと同条件の解析結果を示す。実験結果でウエハ下に蛍光剤が入り込む瞬間を初期条件とし, (a) は 0.20 s 後, (b) は 0.30 s 後, (c) は 0.40 s 後, (d) は 0.50 s 後とそれぞれの時刻における実験と解析の結果を表している。

実験結果と解析結果はともに 0.20 s 後, 0.30 s 後に

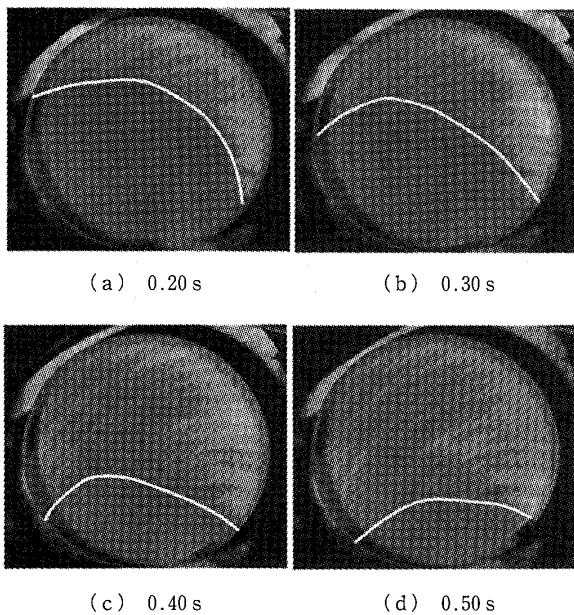


Fig. 12 Experimental result of slurry flow

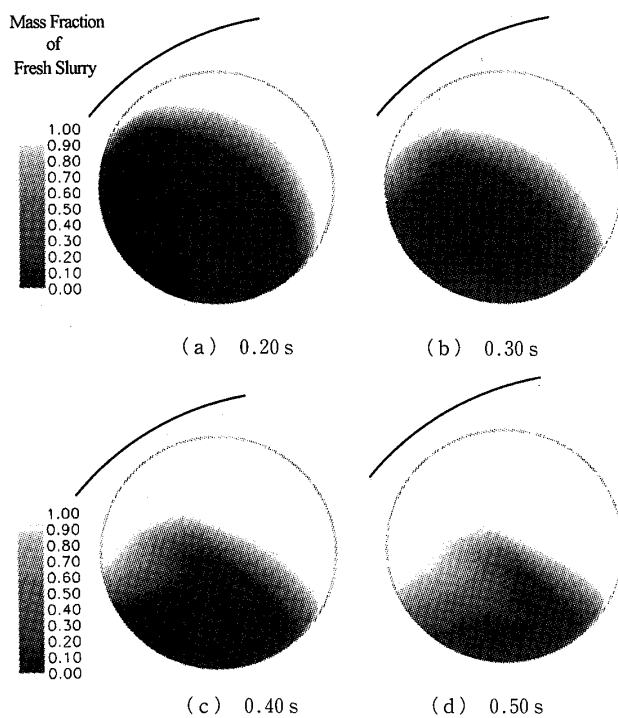


Fig. 13 Simulation result of slurry flow

においてスラリーがパッドエッジ際のほうから巻き込まれるように流入しているのがわかる。これは、パッドエッジ付近では回転半径が大きくなり速度が増加するためスラリーは素早く流入すると思われる。0.40 s以降もパッド中心側では、エッジ側に比べ入換えが進まないことを実験、解析とものとらえている。

**4・4 解析結果および考察(放射状溝)** 周方向溝(同心円溝)の役割に続き、ここでは溝のもう一つの基

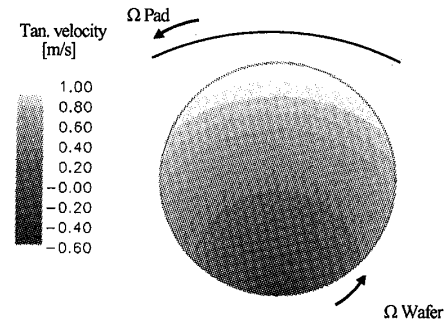


Fig. 14 Tangential velocity magnitude in pad-wafer gap for radially grooved pad

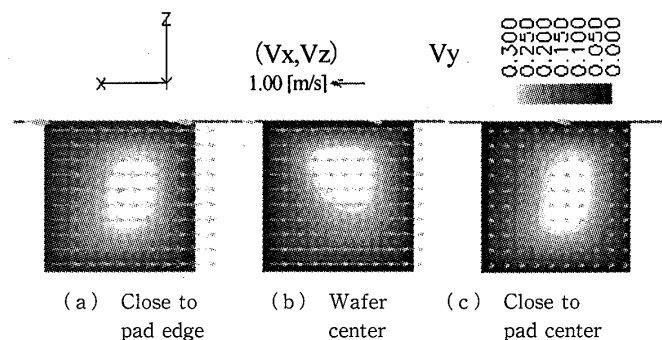
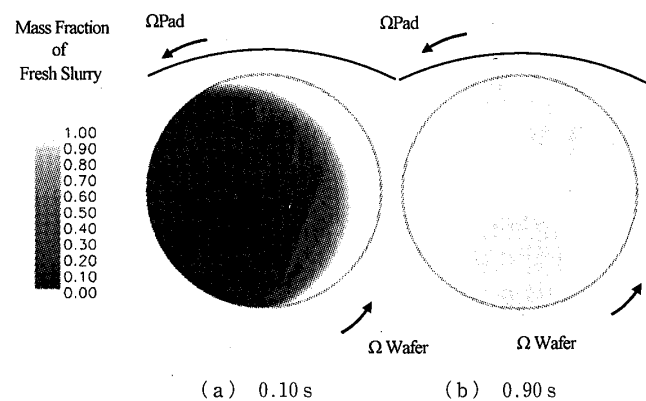
Fig. 15 Contour of velocity ( $V_y$ ) and velocity vectors ( $V_x, V_z$ )

Fig. 16 Slurry mixing dynamics in pad-wafer gap for radially grooved pad

本要素と考えられる半径方向溝(放射状溝)の役割について検討する。図 14 にウエハ面から下  $5\mu\text{m}$ (ギャップ中心)を基準とする接線方向速度分布を示す。基本的には、図 5 の溝なし、同心円パッドと類似で、パッド外側ほど接線方向速度が大きい。ランド部は低レイノルズ数流れで上下壁面により速度分布がほぼ決まるためだろう。ただし図を細かく見ると溝部では異なることがわかる。

次に溝内部の流動について考察する。図 6 の各点

で、溝内部の流れを溝断面パッド中心側から見た結果を、図15に速度3成分で示す。濃淡は $V_y$ (紙面手前が半径方向内側で負、紙面奥が半径方向外側で正表示)、ベクトルは $V_x, V_z$ で溝断面内における速度分布を示している。

ベクトルからは、パッド回転の影響で、 $V_x$ が、パッド外側(a)、(b)、パッド中心より(c)の順であることがわかるが、同心円溝のような対流は見られない。 $V_y$ (濃淡)は、(a)~(c)に共通して、強い溝中央で半径方向外向き流れが見られるが、これはパッド回転による遠心力の影響と考えられる。放射状溝には、溝外側へのスラリー輸送が特徴的といえる。

図16は、放射状溝パッドにおけるウエハ面から下5 $\mu\text{m}$ 位置での新しく流入するスラリーの質量分率を表す。溝なし、同心円パッドでは、ウエハ下側で古いスラリーが長時間とどまる傾向にあるが、放射状溝パッドの場合、新しいスラリーがウエハ下全面に広がる。放射状溝は、溝方向がパッド回転と直交しており、同心溝のような逆流が生じにくく、効率的に新しいスラリーが供給されているためと考えられる。さらに、放射状溝の場合、パッド回転の遠心力による溝方向のスラリー供給の効果も考えられる。

## 5. 結 言

CMPにおける溝なしパッド、同心円溝パッド、放射状溝によるスラリー流れの数値解析を行った。

1) 溝なしパッドと同心円パッドとも、スラリーの接線方向速度は、パッド中心から離れるほど大きいことがわかった。また同心円溝パッドにおいて、ウエハ近傍における速度が、またせん断応力も、ランド部と溝部で急激に変化していることがわかった。

(2) スラリー入換えの際には、古いスラリーはパッド中心よりの位置で長時間とどまることを明らかにした。溝なしパッドと同心円溝パッドでは同心円溝パッドのほうが新しいスラリーへの入換えが促進されることがわかった。溝内部での流動で見ると、スラリーはパッド接線方向速度により溝などを介し流入し、溝

内部では小さいながら対流が見られ、溝底からウエハ下面にスラリーが輸送され、さらには拡散効果もありウエハに到達していると考えられる。

(3) 実験との可視化と計算結果を比較し、スラリーはウエハ外側から巻き込まれるように流入し、またパッド中心側で古いスラリーの滞留部が見られる点で、定性的に一致することを確認した。

(4) 放射状溝の場合、スラリーの入換えは、同心円溝の場合よりもさらに促進されることがわかった。溝方向がパッド回転と直交しており、逆流が生じにくく効率的に新しいスラリーが供給される。またパッド回転の遠心力による溝方向のスラリー供給の効果も考えられる。

## 文 献

- (1) Doi, T., Details of Semiconductor CMP Technology Printed in Japan by Kougyou tyousakai, (2001).
- (2) Muldowney, G. P., Characterization of CMP Pad Surface using a Porous-Media Flow Approach, *Proceedings of AIChE Annual Meeting*, No. 191 g, (2003), p. 12.
- (3) Muldowney, G. P., and Tselepidakis, D. T., A Computational Study of Slurry Flow in Grooved CMP Polishing Pad, *Proceedings of CMP-MIC*, (2004), pp. 147-156.
- (4) Bae, S. H. et al., Effects of Chemical Reaction on the Polishing Rate and Surface Planarity in the Copper CMP, *Korea-Australia Reology Journal*, Vol. 14, No. 2 (2002), pp. 63-70.
- (5) Takano, K. et al., SPH-Based Flow Simulation of Polishing Slurry Including Polished Debris in CMP, *Japanese Journal of Precision Engineering*, Vol. 73, No. 1 (2007), pp. 90-95.
- (6) Lin, J. F. et al., Analysis of the Tribological Mechanisms Arising in the Chemical Mechanical Polishing of Copper-Film Wafers When Using a Pad With Concentric Grooves, *Trans. of the ASME, Journal of Tribology*, Vol. 128 (2006), pp. 445-457.
- (7) Borucki, L. et al., Analysis of Frictional Heating of Grooved and Flat CMP Polishing Pads, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 151, No. 12 (2004), G 809-G 819.
- (8) Nagayama, K. et al., A Computational Study on Slurry Flow between a Wafer and CMP Pad with Grooves, *Towards Synthesis of Micro-/Nano-systems, JSPE Publication Series*, No. 5 (2005), 277-280, Springer.