

平坦化CMPにおけるパッドドレッシングに関する研究

Study on fundamental pad conditioning mechanism

for Chemical Mechanical Polishing

藤田 隆^{*1}, 土肥俊郎², 上川大地³

Takashi Fujita¹, Toshiro Doi², Daichi Kamikawa^{3,2}

¹株式会社 東京精密

Tokyo Seimitsu Co.Ltd

²埼玉大学 教育学部

Faculty of Education, Saitama University

³芝浦工業大学

Shibaura Institute of Technology

Abstract

The various pad surface treatments were evaluated to clarify dominant factors on a pad surface to get removal rate on CMP(Chemical Mechanical Polishing). On evaluating the dominant surface factors, pad surface recovery without grinding removal of pad surface was tried using a no-conditioning pad. After eliminating the by-products involved in the pad surface, recovery ratio on removal rate became 31% at most, which indicated that the by-products clogging in the pad surface was not a dominant factor to inhibit removal rate. Not grinding the surface but scraping the surface was valid for effective surface recovery to get removal rate. In this study, a noble pad conditioner was proposed from their results. The developed conditioner, which is the scraping brush conditioner, makes use of deflective deformation in order to apply constant contact force against height variation of pad surface. Consequently, it was demonstrated that the developed conditioner was applicable on surface reference conditioning on CMP without the stick-slip motion that occurs on the traditional conditioner.

Key word: pad conditioning, CMP, surface treatment, surface reference conditioning, removal rate recovery

1. 研究の背景と目的

半導体の微細化・多層化が進むにつれて、CMP (Chemical Mechanical Polishing)技術は、半導体製造工程になくはならない必須の技術になっている。層間絶縁膜の平坦化のみならず、Cu配線や素子分離など、現在では様々な工程に利用されている。平坦化CMPにおける重要な仕様の1つに、

研磨レートの面内均一性(研磨均一性)がある。研磨均一性を向上させるためには、研磨レートに影響する要素を面内で均一に分布させることが重要になる。この重要な要素として、研磨圧力¹や研磨の相対速度などがあるが、従来から定量化が進んでいない重要な要素として、パッドの表面状態がある。パッドの表面状態は、パッドドレッシングにより形成されるが、パッドドレッシングをOFFすると研磨レートが急激に落ち込むという事実から、パッド表面状態の厳密な制御が重要なことは明らかである。このような中で、パッドの表面状態を定

*〒192-0032 東京都八王子市石川町 2968-6
電話:0426-42-0381,FAX:0426-42-0467
E-mail : fujitata@accretech.jp

性的および定量的に把握する試みはいくつかあるが^{2,3}、現在もなお、未開の部分が多くあるのが実情である。

そこで本研究では、最初に研磨レートを左右するパッド表面の支配的な要素を明らかにすることを試みる。続いて、そのレート確保に支配的な要因に基づき、効率的なパッド回復再生方法を検討する。その後、CMP に求められるパッド表面基準ドレッシングと従来の汎用的なドレッシング機構の問題点を考慮して、新しいパッドドレッシング機構を考案し、今後の CMP 対応ドレッサーとしての適用可能性を検討する。

2. 目詰まりパッドとレート低下の支配要因

目詰まりのパッドに対して、パッド表面を削らずに様々な処理を施すことにより研磨レートの回復度合いを評価する。目詰まりのパッドを作成するにあたっては、量産装置(東京精密(製)A-FP-210A)を使用した。Fig.1 に、コンディショニング OFF 後の研磨レート低下挙動を示す。通常の研磨使用時には、2157A/min の研磨レートを確保していたが、コンディショニングを OFF して 50 枚目処理後の研磨レートは 709A/min となり、初期に対して 67% 研磨レートが減少した。

この最終の状態の研磨パッドを切り出して、使用し、各種処理による研磨レートの回復評価を行った。まず、目詰まりしたパッドの表面観察を行い、研磨レートが低下した推定要因を列挙した。Fig.2 に、目詰まりしたパッド表面の SEM 観察写真を示し、Fig.3 にパッドの目詰まり状態の模式図を示す。SEM によるパッド表面状態観察から、研磨レートが低下した要因として、①ポア内に詰まった副生成物、②表面微小粗さの平滑化、③表層部に埋めこまれた副生成物、④ポアエッジの鈍化、⑤パッド表面の化学的な改質が挙げられる。

このような研磨レートの低下要因を基にして、それぞれの要因に対応した効果的な回復処理方法を施し、パッドの表面観察と研磨レートの回復度合いを評価した。Table1 に、研磨レート低下の推定要因とその要因を排除するためのパッド表面処理方法に対応させて示す。それぞれの処理方法に対する作用・効果については、処理方法ごとに後

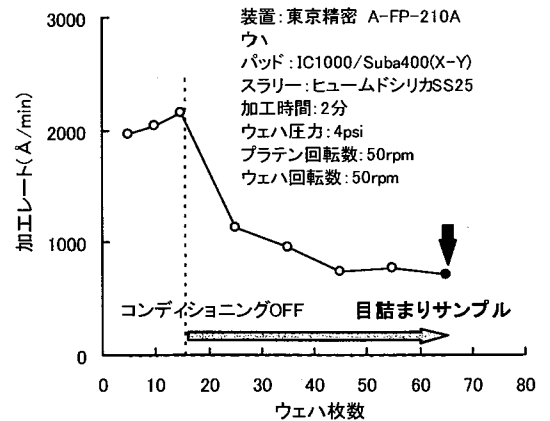


Fig.1. ドレッシング OFF 後のレート変化と目詰まりサンプルパッド

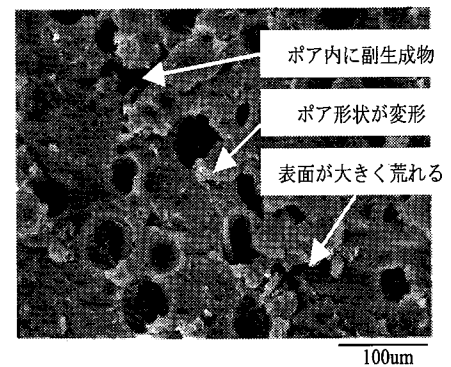


Fig.2. 目詰まりパッドの SEM 観察結果

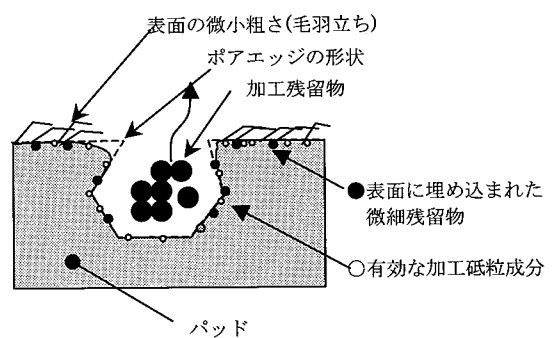


Fig.3. 目詰まり状態のパッド表面模式図

述する。

3. 表面回復処理手順とレート回復評価

Fig.4 に、実験手順を示す。研磨パッドは、Fig.1 に示した最終のパッドを切り出して使用した。実験手順は、まず目詰まりしたパッドに処理を施

し、パッドの表面状態の観察と研磨レートの評価を行った。その後、次の処理を重ねて行うといった順番で一連の処理を行い、研磨レートの回復率が高い効果を見つけ出す方法で行った。Table2に、表面処理後の研磨レートの回復率を評価した研磨条件を示す。研磨パッドは、外周が200mmの小型の研磨装置を使用した。スラリーおよびパッドは、目詰まりさせた研磨条件と同一とした。Fig.5に、目詰まりパッドを使用して、各種処理を施して評価したレート回復率の変化を示す。ここで、レート回復率は次式で規定した。

$$S = \frac{R_i - R_c}{R_b - R_c} \times 100 \quad (1)$$

R_c : 目詰まり状態の研磨レート, R_b : 立ち上げ状態の研磨レート, R_i : 各処理後の研磨レート
それぞれの処理毎に研磨レートの回復率と表面状態を対比させて考察する。

4. 各表面処理による表面観察とレート回復評価

4-1. 高圧ジェット水によるパッド表面処理状態

高圧ジェット水処理では、研磨レート低下の第1の要因として考えられたポア内にある研磨副生成物を排出除去することを狙って行った。実験条件は、圧力10MPaの高圧ジェット水を5分間直径200mmのパッドに当て続けて処理した。Fig.5より、高圧ジェット処理後のレート回復率は21.8%となった。高圧ジェット水は、ポア内の詰まりを除去する効果は確認されたが、研磨レートを回復させるには、十分な効果は得られなかった。Fig.6(a)に、高圧ジェット水処理後のパッド表面状態を示す。Fig.2(a)に示した目詰まり状態と比較して、ポア形状は少し歪んだ形状となっているが、ポア内の副生成物はほとんど排出除去されている。これより、研磨レートの低下要因として、ポア内の研磨副生成物による影響は支配的ではないと考えられる。

4-2. ブラシ処理によるパッド表面処理

ブラシ処理によるパッド表面処理は、ポア内の研磨副生成物の排出除去、パッド表面の微小粗さの回復、ポアエッジの回復を狙って行った。ブラシ処理は、ナイロンブラシを使用して、面圧

Table. 1. レート低下支配要因と回復処理方法

レート低下支配要因	物理的な回復処理法
①ポア内の研磨副生成物	高圧ジェット水処理
②表面微小粗さの平滑化	ブラシ処理
③表層部に埋めこまれている副生成物	超音波処理
④ポアエッジの鈍化	
⑤パッド表面の化学的な改質	ドレッシング処理

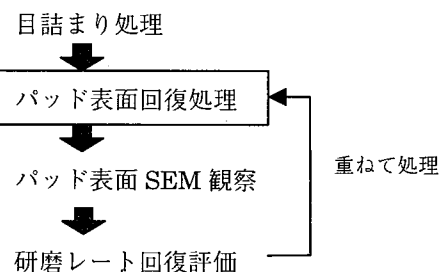


Fig.4. 実験手順

Table. 2. パッド表面回復処理条件

処理方法	処理条件
高圧ジェット水処理 (洗車用)	処理時間: 5min 圧力: 10MPa, ノズル距離: 約 150mm
ブラシ処理	ナイロンブラシ 面圧 300gf/cm ² , 15min
超音波処理	周波数: 38kHz, 処理時間: 10min
ドレッシング処理	ダイヤモンドドレッサー 番手 #100 (4inch Disk) 処理時間: 5min

30kPaで15分間行った。パッドサンプルは、先の高圧ジェット処理した後のサンプルを使用して、その上から重ねて処理した。Fig.5より、ブラシ処理後は、初期の目詰まり状態から31.4%の回復率であった。これは、高圧ジェット水の効果とブラシ効果を合わせた回復率であるが、立ち上げ状態と比較して、3割程度しか回復しておらず、いずれも研磨レートを回復させる支配的な要因では

Table3.研磨レート回復評価の実験条件

試料サンプル	15mm□酸化膜
研磨装置	小型修正リング式ポリッシング装置
パッド直径	φ200mm
スラリー	Fumed Silica Slurry (Cabot SS25)
定盤回転数	80rpm
研磨圧力	700gf/cm ²
研磨時間	2min

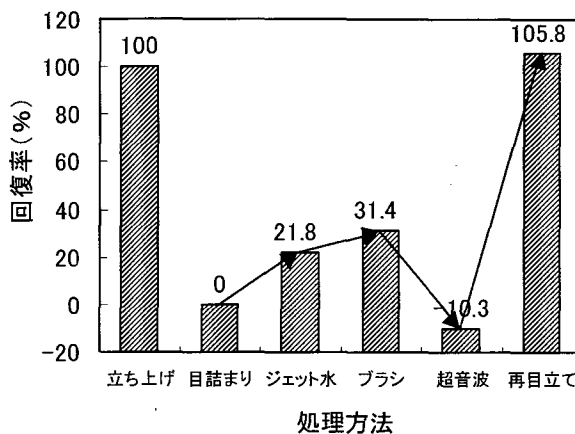
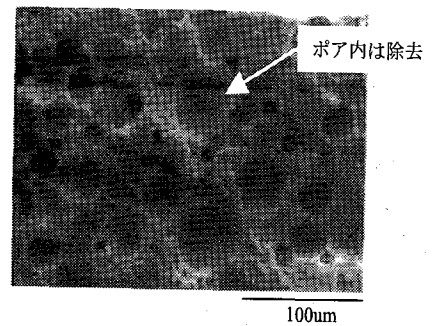


Fig. 5.各種処理による研磨レート回復率

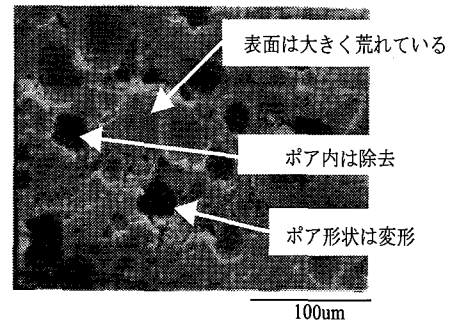
ない。Fig.6(b)に、ブラシ処理後のパッド表面状態を示す。ポア内の研磨副生成物は、高圧水ジェット後と同様、ほとんど除去されている。しかし、パッド表面の微小粗さは定性的に一部回復が見られるが完全に回復したとはいえず、ポアエッジ付近も回復していない。ブラシ処理では表面の微小粗さやポアエッジ形状を回復するには不十分であり、これらの影響を検証することはできなかった。

4-3.超音波処理によるパッド表面処理

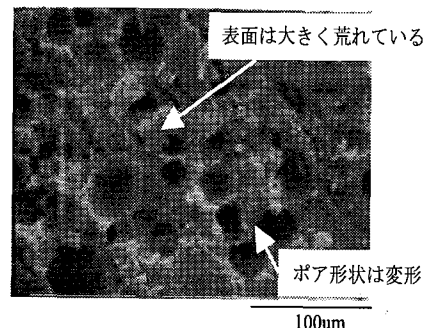
超音波処理では、キャビテーションの効果によって、パッド内部に埋めこまれて付着している研磨副生成物の剥離除去することを狙って行った。パッド全面を超音波処理槽に浸漬して、38kHz、15分間連続超音波処理した。Fig.6(c)に超音波処理で処理を行ったパッド表面状態のSEM観察結果を示す。ブラシ処理と同様、ポア内の副生成物



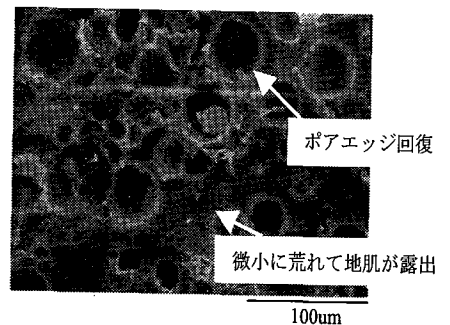
(a) 高圧ジェット水処理後の表面状態



(b) ブラシ・リンス処理後の表面状態



(c) 超音波処理後の表面状態



(d) 通常ドレッシング後の表面状態

Fig.6.パッド表面のSEM観察結果

は除去されているが、埋めこまれた副生成物の除去までは観察できなかった。ブラシ処理に重ねて行った超音波処理では、研磨レートの回復率は、-10.3%となり、初期の目詰まりパッドよりも低下

した。これは、パッド内部に含まれる副生成物を除去するというより、研磨に寄与する有効砥粒までも除去してしまったためと考えられる。

4-4. 通常のコンディショニングによる回復処理

パッド表面を回復させる上で、パッド表面のポアに詰まっている研磨副生成物は、研磨レート回復に支配的ではないことは明らかになった。一方、パッド表面を削ることなく、ポアエッジ形状およびパッド表面の微小粗さを回復させる効果的な方法は現在のところ見当たらない。そうしたことから最後に、パッドを元の表面状態に戻すべく、通常ダイヤモンドコンディショニングによるパッド回復処理を行った。Fig.5より、研磨レートの回復率は105%と、ほぼ目詰まり前の立ち上げ状態まで回復した。また、Fig.6(d)に、通常ダイヤモンドコンディショニングによって得たパッド表面状態のSEM観察結果を示す。表面は、先の状態とは大きく異なり、ポア内の副生成物が除去されていることのみならず、パッドのポア形状は回復し、パッド表面の微小粗さも回復していることを確認した。パッド表面処理では、1つのパッドに、様々な処理を重ねて行ったが、最終的に表面を削りながら荒らすことで、十分初期の研磨レートを確保できることを示した。

5. パッド表面の化学的改質によるレート低下

表面を削らない物理的な処理方法では、パッドのポア内に詰まった研磨副生成物を除去すること

は可能であった。しかし、表面の微小粗さやポアエッジの形状について回復させるまでには至らなかった。一方、研磨により化学的にパッド表面が改質されている可能性もある。目詰まり過程における表面の化学的改質は、既に一部報告されているが、ここでは、そこから引用してパッド表面の化学的な改質について述べる。Fig.7に、ドレッシングをOFFした状態の研磨レートの低下挙動を示す。ドレッシングをOFFすると、研磨レートは急激に減少する(2812A/min→1183A/min)。その後、ダミーウェハとしてSiを投入すると、ドレッシングを行っていないにもかかわらず、レートは回復している(1183A/min→1629A/min)。パッド表面の物理的な形態は回復しておらず、ほとんど変化していない。この研磨対象材料を変えたことによる研磨レート回復挙動は、パッド表面の化学的な影響を示唆する。Fig.8に、Fig.7に対応したパッド表面のFT-IRスペクトルを示す。FT-IRスペクトルの結果から、パッド表面が加水分解していることを示している。パッドの化学的な改質は、スラリー内に存在するシラノールが、パッドを構成するポリウレタン内の極性分子と水素結合することにより起こるとされている。その結果、極性分子が食いつぶされ、パッドの吸湿性が低下するためスラリーの保持性が低下し、研磨レートが低下する。いずれにしても、パッド表面の化学的改質は、FTIRのスペクトル結果からも明らかに起こっており、目詰まり過程における化学的改質は、研磨レート低下の一因と考えられる。

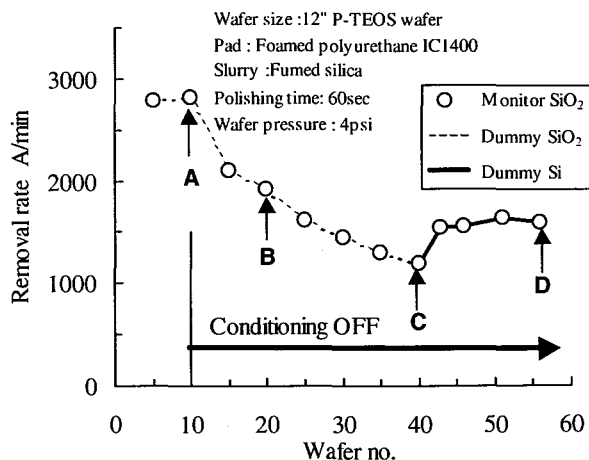


Fig. 7. 目詰まり過程における研磨レートの変化

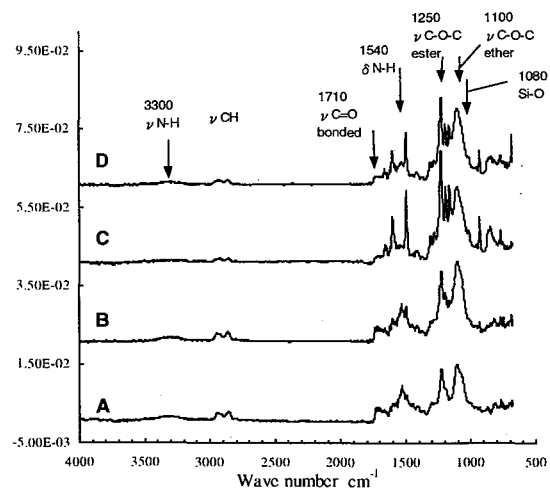


Fig. 8. 目詰まり過程での表面のFT-IRスペクトル

6.新しいパッドドレッサーの開発への展開

CMP におけるドレッサーの役割は、目詰まりによる研磨レート低下を防ぎ、研磨レートを安定維持させることである。よって、より効率的なパッドドレッシングを行うためには、研磨レート確保におけるパッド表面の支配的な要素を抽出し、それらの要素に効果的な最小限の回復処理を施せばよい。本研究では、このパッド表面を回復させる支配的要素の明確化に加えて、CMP に要求されるドレッシング仕様を見直し、また現在のドレッサーが抱える問題点を考慮した上で、新しいドレッサーを開発することとした。

6-1.レート回復に必要なパッド表面機能

パッド表面を回復させるために必要な要素として残された要因は次の3つとなる。

- ・ポアエッジの形状
- ・パッド表面の微小粗さ(一部)
- ・パッド表面の化学的改質

特に、パッド表面の化学的改質がレート低下に影響している事実から、パッドの表面回復のために、表面を物理的に削ることは避けられない。しかしながら、一般的に行われているような単純なディスク型ドレッサーでパッド表面を研削する場合、表面研削量が多くなり、その結果、パッド寿命は短くなる。

そこで、パッド表面の微小粗さ回復とポアエッジ形状の効果的な回復を図るために、従来の「表面を押し削る」効果ではなく、「微小に搔き削る」効果によって、パッドの表面状態の回復を試みた。具体的には、小さな針を使用して表面を微小に荒らして表面状態を観察した。Fig.9 に、微小な針で削り取った後のパッド表面の SEM 観察結果を示す。針の先端で微小に削り取ることで、定性的ではあるが、パッド表面のポアエッジ形状を再生することができ、表面の微小粗さも回復できている。また、表面の研削量も微小な力で削ることが可能である。以上から、パッドの表面状態の回復に効果がある見通しを得た。

6-2.ドレッシングの要求仕様

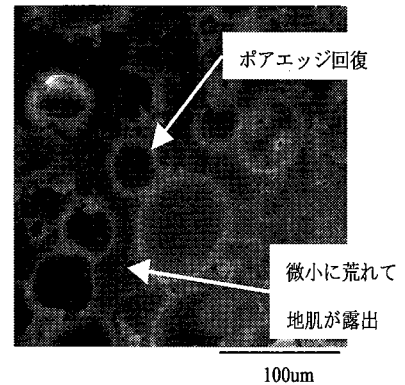
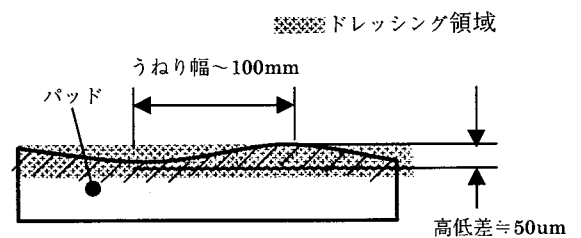


Fig.9.針で搔き削った後のパッド観察表面



高低差の要因：パッド厚み誤差、接着部厚み誤差、貼り付け誤差等

Fig.10.CMP に要求されるドレッシング仕様

CMP で使用されるパッドは、パッドの厚みむらや研磨定盤への貼り付けむらがあることから、貼り付け後のパッドは平面ではない。貼り付けた後のパッド表面は通常 $30\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ 程度の高低差をもつ。しかし、CMP においては、ウェハ面内を均一に研磨するため、このような起伏を有するパッド表面に対しても、表面に倣って均一にドレッシングすることが求められる。Fig.10 に、CMP に要求されるパッドドレッシングの仕様の概念図を示す。パッドは弾性材料であることから、CMP におけるパッドドレッシングは、弾性材料の表面基準研削加工と位置付けることができる。開発するドレッサーはこうしたカテゴリーに見合う普遍性を有する構成である必要がある。

6-3.現在のドレッサーの問題点

従来のパッドドレッサーでは、ダイヤモンド砥粒が電着されたドレッシングプレートを、パッドに押しつけてドレッシングを行うのが一般的である。Fig.11 に、従来のパッドドレッサー機構図を

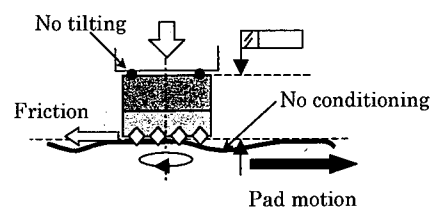
示す。(a)はドレッサーを軸受に完全固定した場合を示す。このような状態では、ドレッサーはパッド表面うねりの山部分のみを削り取ることになる。そのため、パッド表面に沿った均一なドレッシングはできない。一方、(b)のドレッサーはジンバル機構を介して、ドレッサー面がパッド面に倣うように保持されている。しかし、この機構では、実際のドレッシングにおいてパッド表面に倣って均一にドレッシングできない。なぜなら、高速運動するパッドに接触するドレッサー表面には大きい摩擦力が働くため、ドレッサーはパッドに対して傾くからである⁵⁾。傾くことによって、摩擦が軽減されるとドレッサーは元の姿勢に戻ることから、結果的には断続的にパッドに接触(スティックスリップ)することになる。その結果、原理上パッド周方向にばらついたドレッシングとなる。このようなことから、従来のパッドドレッシングにおいては、現時点で問題が表面化していないかもしれないが、弾性体の表面基準研削という観点から、構造上において本質的な問題を抱えていると考えられる。

7.新しいパッドドレッサーの提案と効果の検証

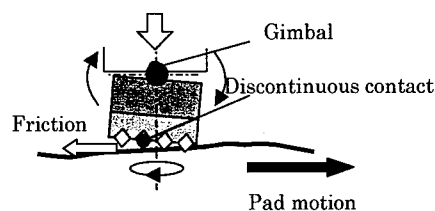
以上に述べた3つの観点から新しいドレッシング機構を考案した。Fig.12に新しく考案したドレッシング機構を示し、Fig.13に、ドレッサーの接触外観写真を示す。ドレッサーは、可撓性部材の先端に砥粒を配置した構成とする。一つ一つの砥粒は独立して変位し、パッドの表面に沿って接触する。砥粒を保持する可撓性部材の曲げ変形・座屈変形により、パッド表面のうねりの高低差 ΔX に対して、1つ1つの砥粒の接触圧力差 ΔP は、非常に小さくできる。結果として、パッド表面のうねりに関係なく、絶えず一定圧力下でパッド表面を研削するドレッシング機構になる。

この構成は、先に述べたドレッサーの3つの開発指針をすべて満足している。

- ・レート回復に必要な機能である「掻き削り効果」により表面の微小粗さの回復やポアエッジ形状の回復が可能であること。
- ・CMP ドレッシングの要求仕様であるうねりを有するパッド表面に対して、絶えず一定の研削



(a)軸受により水平回転する場合



(b)ジンバル機構を用いた場合

Fig. 11. ディスクプレート型ドレッサーの接触機構

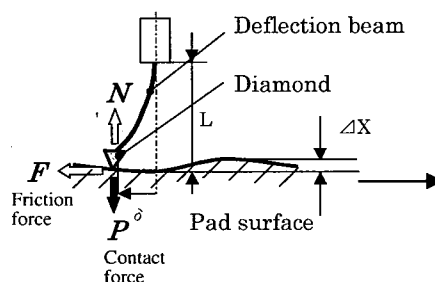


Fig.12.新しいドレッシング機構の概念図

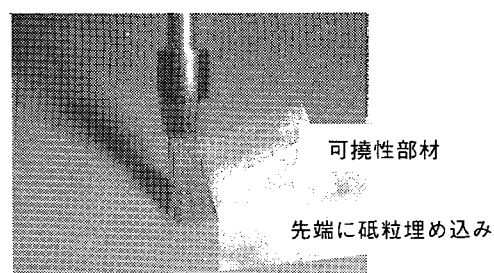


Fig. 13. 可撓性ドレッサーの接触外観図

圧力を与える均一ドレッシング機構であること。
 ・現ドレッサーが抱える潜在的な問題点であるドレッサー面板の断続的な接触(スティックスリップ)をなくす機構であること。
 本仕様に基づくドレッサーがパッド表面の高低差によらず、均一にドレッシングする効果を確認する。均一なドレッシング能力を確認する簡易的な方法として、パッド表面を染色してドレッシン

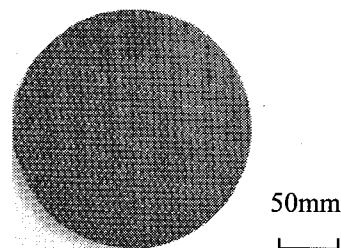
グを施し、染色した部分が除去される色むらからドレッシングの均一性を評価した。Fig.14に、従来のドレッシングディスクによりドレッシングしたパッド表面と新しい可撓性部材によるドレッシングのパッド状態を比較して示す。従来のドレッシングディスクでは、表面のドレッシングがパッドの貼り付けむらを転写しているのに対して、新しい可撓性部材によるドレッシングでは、パッド表面が色むら無く、均一にドレッシングされている。現在のところ、CMP ドレッシングに対する適用可能性を検討している段階であるが、CMPに求められる仕様に対し、従来のドレッサーと比較すると、極めて妥当な構成である。今後、砥粒脱落等の品質管理上の問題などにもケアしながら、均一ドレッシングに対する効果を詳細に確認し、実用化へつなげていく。

8.まとめ

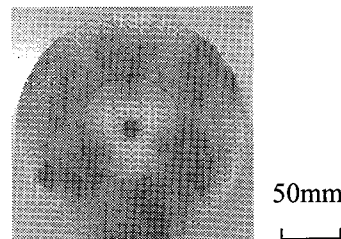
研磨レート確保に大きく影響するパッド表面の支配的な要因を検討した。この支配的な要因に基づいて、パッド表面を効率的に回復再生する新しいドレッシング方法を検討し、パッド表面を均一にドレッシングできる見通しを得た。

本研究で得た結果を以下に述べる。

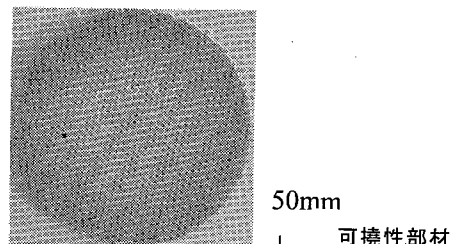
- (1) 目詰まりしたパッドを使用して、表面を削ることなくレートを回復させることを試みた。結果として、高圧ジェット水処理後は、21.8%研磨レートが回復し、その後のブラシ処理では31.4%回復した。また、パッド表面のSEM観察結果から、これらの処理は、パッド表面のポアに詰まっている研磨の副生成物を除去する機能があることを確認した。
- (2) パッドの表面改質・ポアエッジの回復、ならびに表面の微小粗さの回復は、表面を削ることなく、回復させることは困難である。これらの要素を効果的に回復させる方法として、微小な針で「搔き削る処理」を施した。SEMによる表面観察の結果、パッド表面が回復している見通しを得た。
- (3) レート回復に有効な処理方法および、CMPに求められるドレッシング仕様、従来ドレッシングの問題点の3つを加味して、可撓性部材を使用した新しいドレッサーを考案した。染



(a)初期のパッド表面状態(染色後)



(b)従来ドレッサーによるドレッシング後



(c)開発したドレッサーによるドレッシング後

Fig.14.簡易的評価によるドレッシング均一性

色パッドを使用した簡易テストの結果、従来のドレッサーと比較して、均一にドレッシングできることを確認した。

(参考文献)

- 1 D.Wang, J.Lee, K.Holland, T.Bibby, S.Beaudoin, T.Cale, J.Electrochem.Soc., 144.3.(1997)1121.
- 2 D.Stein, D.Hetherington, M.Dugger and T.Stout, J. of Electronic Materials, Vol.25, No.10 (1996)1623.
- 3 Hiroyuki Kojima, Takashi Nishiguchi, Proceedings of CMP-MIC (2003) 37.
- 4 藤田 隆, 石倉美奈子, 河井奈緒子, 木下 修, 森岡善隆:パッド表面分析による研磨メカニズムの検討(第4報), 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2005).845.
- 5 S.Sundararajan, Dipto G.Thakurta, Donald W.Schwendeman, Shyam P. Murarka and William N.Gill, J. Electrochem. Soc., 146.2.(1999)761.