

CMPにおける巨視的および微視的モデルに基づいた加工メカニズムに関する研究

磯部, 晶

<https://doi.org/10.15017/1456011>

出版情報：九州大学, 2014, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

平成 25 年度
九州大学 博士論文

CMP における巨視的および
微視的モデルに基づいた
加工メカニズムに関する研究

磯部 晶

目次

第1章 序論

- 1.1 CMPの必要性とその概要
 - 1.2 研磨パッド
 - 1.3 スラリー
 - 1.4 パッドコンディショナー
 - 1.5 CMP装置
 - 1.6 CMPに求められる性能
 - 1.7 CMPのメカニズム
 - 1.8 本研究の意義と概要および本論文の構成
- 参考文献

第2章 研磨パッド表面変化のマクロモデルに関する

研究

- 2.1 ドレッシングによる軌跡の評価
 - 2.2 モデルの提案
 - 2.3 実験
 - 2.4 マクロモデルによる様々な研磨挙動の表現
 - 2.5 結論
- 参考文献

第3章 フェレ径に基づいた研磨メカニズムの提案

- 3.1 従来モデルの問題点
 - 3.2 提案モデル
 - 3.3 実験方法
 - 3.4 実験結果
 - 3.5 考察
 - 3.6 結論
- 参考文献

第4章 材料除去メカニズムの数値的考察

- 4.1 計算モデルと接触頻度の計算
- 4.2 パッドの接触状態と接触頻度の関係
- 4.3 材料除去量の計算
- 4.4 結論

参考文献

第5章 欠陥制御に関する一考察

- 5.1 実験方法
- 5.2 実験結果
- 5.3 考察①
- 5.4 考察②
- 5.5 結論

参考文献

第6章 単層パッドによるローカル平坦化改善

一平坦化モデルに関する考察

- 6.1 実験方法
- 6.2 実験結果
- 6.3 考察
- 6.4 結論

参考文献

第7章 総括

謝辞

研究業績目録

第1章 序論

人類最古のもの作りの技術とされている研磨はその起源を石器時代に遡ることができ、時代とともに発達してきた。この古くて新しい研磨という技術は、時代の要請に応えるべく常に改良が加えられ、先端的な加工方法としてそれぞれの時代に重宝されてきた。1947年にショックレーによりトランジスタが発明され、その後集積回路がシリコン上に作製されるようになり、珪石器時代が幕を開ける[1]。そこでは、半導体基板表面を無擾乱な平滑表面に超精密加工する必要があり、研磨技術も急速に発展した。1960年代の半ばにはそれまでの機械研磨に化学的作用を複合化させるようになり、これが現在のCMP（Chemical Mechanical Polishing）の礎石となる。さらに、1980年代後半にIBMによってデバイスの製造工程にCMPが応用されるようになった。そこでは、表面平滑化だけでなく、デバイス構造に起因する段差の平坦化や、研磨量の精密制御など、極めて高度な技術が求められるようになり、新たな発展を遂げることであり現在に至っている。

本論文は、超精密加工分野に含まれる研磨技術に分類されるものであって、半導体デバイスの作製や、それを作り込むシリコン基板、その他ガラスやファイアなどの光学デバイス用基板の作製に用いられるCMPに関するものである。研磨が時代の最先端の加工技術であるためには、常に新しい要素を導入しながら改善され、ニーズに応じていく必要がある。そのためには加工のメカニズムを追求しなければならない。このような観点から本論文ではCMPにおける加工メカニズムについて論述するものである。本論文における着眼点は、マクロからミクロに至る広範囲な視点で加工メカニズムを解き明かそうというところにオリジナリティがある。ここでいうマクロな視点とは、CMPにおける工具に相当し、加工特性に直接的に影響を及ぼす研磨パッドに着目し、その表面状態を平均的にとらえて研磨の現象と関連づけようとするものである。ミクロの視点とは、研磨パッドの表面アスペリティ（微細な凹凸形状）と砥粒、基板の相互作用を考慮するものである。CMPは今や電子デバイスや光学デバイスの製造には必須のプロセスであるが、その研磨メカニズムについては、未だに完全に解明されたとは言いがたい。そのため、安定した加工特性が保証されていないのが実情である。一般的にCMPの性能としては、研磨レート、その面内均一性・安定性、グローバルおよびローカル平坦性、スクラッチやパーティクルなどの欠陥等がある。本論文では、その多くに関わる材料除去メカニズムに関して、特に研磨パッドの表面状態との関係をモデル化することによって、それぞ

れの研磨特性への影響を明らかにすることを目的とする。そして、研磨レート向上・安定化に向けた研磨パッド表面状態の方向性を示し、さらにローカル平坦性、欠陥抑制との関連性を議論して、安定した CMP 特性が確保できる加工条件設定方法を提示する。

本章では、高性能デバイス製造のために CMP が必要となる背景・課題について述べる。そこで、まず CMP とはどのようなものか、その構成、使用される消耗材料、装置について整理する。そして、本論文で主題としている加工メカニズムに関して、これまでに報告されているガラス、半導体基板の研磨メカニズムとそのモデルについて考察する。

1.1 CMPの必要性とその概要

CMP (Chemical Mechanical Polishing) とは、化学機械研磨の略であり、スラリー中の砥粒の機械的作用だけでなく、スラリーに添加された化学成分によって化学反応を生じさせ、被研磨物の表面を溶解または改質するという化学的作用を複合化させた研磨方法である。被加工物の表面を材料除去しやすい状態に改質することにより、きわめて平滑性の高い加工表面を得ることができる。この CMP のルーツは 1960 年代に始まったシリコンウエハの仕上げ加工に求めることが出来る。その後、1980 年代後半に IBM によってデバイス構造そのものの平坦化に応用が検討され、 $0.7\sim 0.5\mu\text{m}$ 世代のデバイスに実際に適用が開始された。同様の検討は日本でも研究レベルでは行われていたが、1990 年代に入りデバイスの設計ルールが $0.35\mu\text{m}$ を切るようになると、一躍脚光を浴びることになる。リソグラフィーの焦点深度が浅くなり、露光領域のチップ表面高さを揃えるグローバル平坦化が必要となってきたためである[2]。それまでは塗布膜による平坦化手法が一般的であった。それ以外にも、リフロー法、エッチバック法などの平坦化方法があったが、これらの手法では局所的な平坦化しか達成できなかった。さらに、この時期に同時に進んだアルミ配線の多層化では、各層毎の段差が積み重なり、上層配線層になるほど平坦化が厳しくなっていた。CMP は、清浄であるべきデバイス表面に砥粒を含むスラリーを接触させるといふ、当時としては「非常識な」工程であったが、上述した課題を解決できる新しい手法として世界中で適用されるようになっていった。導入当初は ILD (Inter Layer Dielectrics=配線層間膜) の平坦化が主な適用工程であったが、その後、

タングステン (W) プラグ、STI (Shallow Trench Isolation=浅溝素子分離)、配線層間絶縁膜に Cu を埋め込み余剰 Cu を CMP で除去するダマシ配線法など、平坦化 CMP は適用工程を広げていく。近年では HKRMG (High-k Replacement Metal Gate) や Fin-FET (Fin-Field Effect Transistor) などのトランジスタ構造の作り込みにも用いられるようになってきた。今や CMP は定着し LSI の製造になくてはならないキープロセスとなっている。また、基板研磨の分野でも、最近では従来のシリコン基板やガラス基板以外に LED 向けのサファイア基板、パワーデバイス用の SiC や GaN 基板など、その応用範囲は大きく広がり、さらに今後も広がり続けると考えられる[3-10]。

CMP の用途は上述したように大きく二つに大別される。シリコンやサファイアなどの基板の研磨はその上にデバイスを作製するため、結晶レベルの平滑性が要求される。一方、デバイス製造工程で用いられる CMP は、主にそのデバイス構造に起因する表面の凹凸を平坦化することが目的となる。適用工程は多岐にわたり、適用工程によって求められる性能に違いがある。そうした様々な研磨性能と研磨条件や消耗材料との関係を明らかにすることが性能向上のためには必要であるが、残念ながら CMP のメカニズムについては完全には解明されていないのが現状である。

CMP には通常、ロータリー方式の研磨装置が用いられ、図 1.1 に示すように円形テーブル (プラテン) 上に貼られた研磨パッドにスラリーを滴下し、研磨対象基板を保持したヘッドを回転させながら回転するプラテン上に押しつける[9]。研磨パッドの表面を目立てするためにコンディショナーやドレッサーと呼ばれるダイヤモンド砥粒を電着したディスクが用いられる。この目立ては研磨によってパッド表面のアスペリティが変化し、あるいは研磨屑が目詰まりすることによって研磨レートが変動することを防ぐために行われる。

これら 3つの材料、すなわち、スラリー、研磨パッド、コンディショナーが CMP の性能を左右する重要な消耗材料である。これらの詳細については 1.2~4 節で説明する。

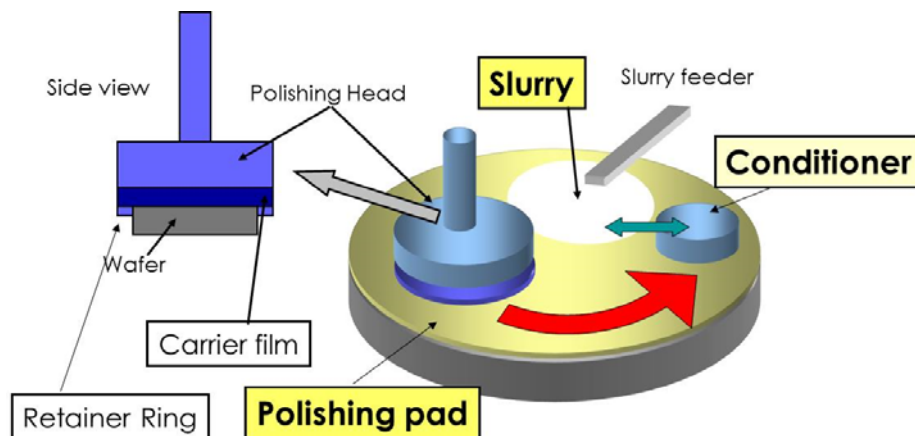


図 1.1 CMP の構成要素

CMP 装置はプラテン数、ヘッド数の組み合わせで様々な構成の装置が市販されている。また、ロータリー方式以外にも様々な方式がこれまで提案されてきた。それらに加えて、面内均一性を左右するヘッド構造の変遷について 1.5 節にて解説する。

CMP の用途別の要求性能について 1.6 節に、それぞれの性能に関わる CMP のメカニズムに関してこれまでの研究者により報告されてきたモデルを 1.7 節に整理する。1.8 節では本研究の目的、意義および構成について述べる。

1.2 研磨パッド

研磨パッドとは CMP における加工工具に相当し、その表面にスラリーを保持し、被加工物と接触して加工が行われる。研磨パッドには大きく分けて、硬質発泡タイプ、不織布タイプ、スエードタイプが存在する。それぞれの特徴について解説する[11]。

1.2.1 硬質発泡タイプ

硬質発泡タイプは、ポリウレタン製が一般的で、空孔を含んでいる。図 1.2 に代表的な硬質ウレタンパッドである IC1000、MH-S-15A（いずれもニッタハース製、商品名）の断面 SEM 写真を示す。これらの研磨パッドは、イソシアネートと硬化剤を混合したプレポリマーを反応させてブロックを作り、それを薄くスライスすることにより製造される。空孔は、プレポリマーに水を混合することにより自己発泡させることにより形成される。この方法では空孔の大きさや分布の制御が難しいが、上記 MH-S-15A のようなシリコンやガラス向けの硬質発泡タイプの研磨パッドはこの方法で作製される。一方、デバイス製造に広く使用されている IC1000 では中空の樹脂フィラーをプレポリマーに混合する。そうすることによって小さく均一な空孔を実現している。空孔のサイズや密度が研磨性能に与える影響は大きく、これは、スラリーの保持、供給、パッド表面粗さやバルク弾性率などに影響するためと考えられる。このタイプのパッドは、図 1.3 に示すように出荷直後は表面が平滑で、このままでは研磨性能が出せない[12,13]。そこで、コンディショナーを用いたブレイクインと呼ばれる目立て工程により表面を荒らす必要がある。さらに、安定的な表面状態とするために、ブレイクイン後に数枚から数十枚のダミー研磨を行う必要もある。また、研磨枚数を重ねることによって研磨パッド表面状態が変化し、研磨レートが徐々に低下するために、シリコンやガラスの研磨では、ブレイクインと同様の目立て工程（ドレッシングあるいはコンディショニングと呼ばれる）を数バッチ毎に行い研磨レートを維持している。一方、デバイス平坦化の場合にはより高精度な研磨量管理が必要であるため、研磨バッチ毎にあるいは研磨中に同時にドレッシングを行っている。研磨と研磨の間に行う場合を *ex-situ* ドレッシング、研磨中に同時に行う場合を *in-situ* ドレッシングと呼ぶ。

硬質発泡タイプのパッドをデバイス用として適用する場合、一般的に、不織布パッドやフォーム層からなるクッション層との積層パッドで用いられる。パッドの表面にはスラリーの供給や研磨生成物の排出を容易にする目的で溝を形成する場合が多い。溝のパターンは XY の格子形状、同心円形状、放射形状、Perforate 形状およびそれらの複合など様々なものがアプリケーションに応じて適用される。

この硬質発泡タイプの研磨パッドはデバイス製造に幅広く適用されている。少ない研磨量で凹凸を平坦化する必要があるためである。また、パッド表面状態によって研磨性能が影響を受けることも知られているので、本論文の研究対象として取り上げる。

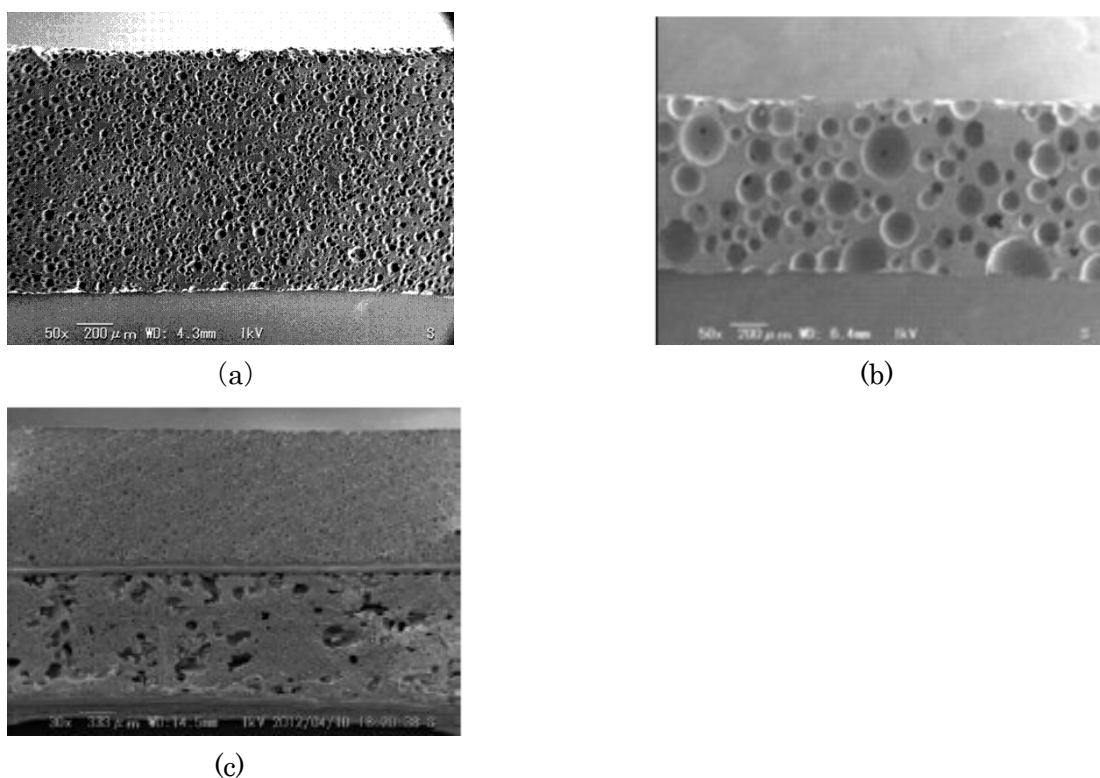
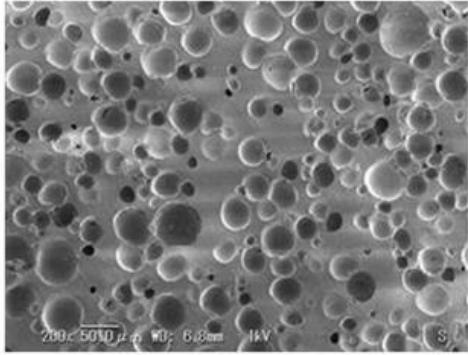
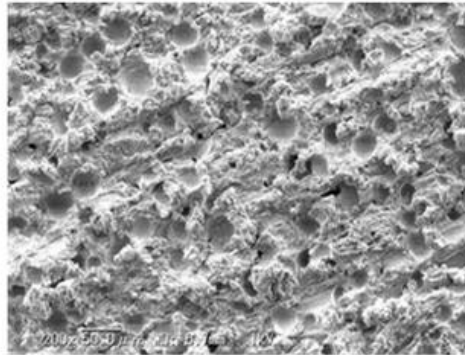


図 1.2 硬質発泡タイプ研磨パッドの例 (a) IC1000、(b) MH-S-15A、
(c) IC1000/SUBA400 (いずれもニッタハース製 商品名)



(a)



(b)

図 1.3 IC1000 の表面状態 (a) 出荷直後、(b)ブレークイン後

1.2.2 不織布タイプ、スエードタイプ

本論文では直接取り上げるものではないが、その他のパッドについても簡単に触れておく。不織布タイプは、図 1.4 に示すように、ポリエステルなどの不織布にウレタンなどを含浸したもので、不織布のタイプや含浸させる樹脂の量などでその物性を変化させることができる。硬質発泡タイプと後述するスエードタイプの中間的な用途で用いられる場合が多い。すなわち、硬質発泡タイプは平坦性重視、スエードタイプは平滑性、低欠陥重視であるが、不織布タイプはある程度の平坦性を維持しつつ、表面平滑性や欠陥性は硬質発泡タイプ以上のものを求める場合に用いられる。シリコンやサファイアウエハの製造に用いられている。

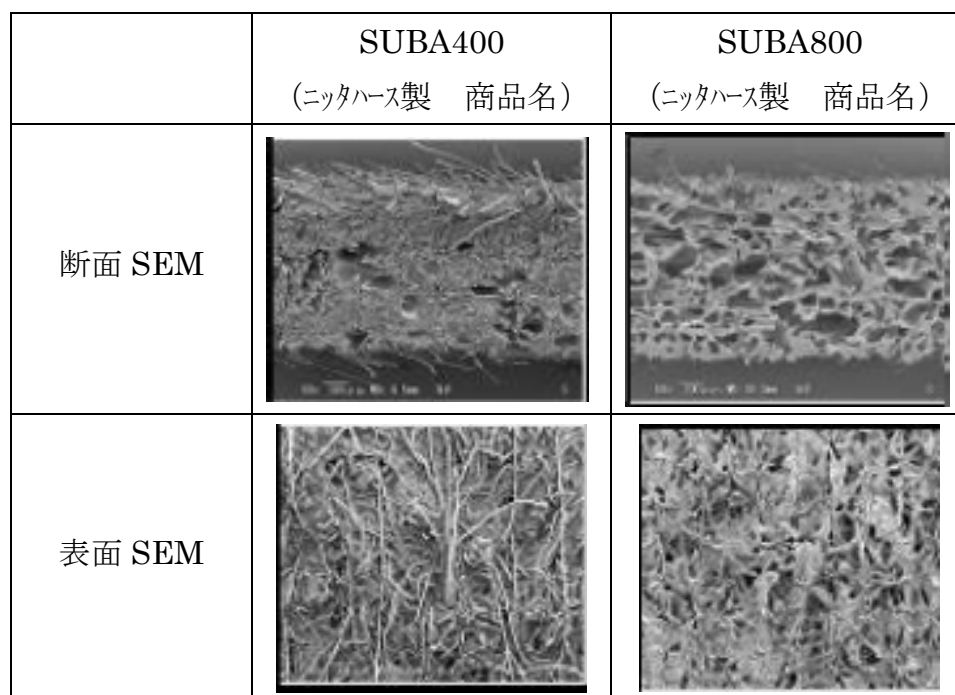


図 1.4 不織布タイプ研磨パッドの例

スエードタイプは、湿式成型により基材上に塗工される。図 1.5 に示すように、基材としては上記不織布パッドに用いられるのと同様の不織布を用いた製品と、Polyethylene Terephthalate (PET)を用いた製品がある。これらの基材にウレタン樹脂の Dimethylformamide (DMF)溶液を塗り、凝固剤 (水) と DMF を置換

させることにより涙滴状のポアが形成される。この工程は凝固と呼ばれ、研磨性能に大きく影響するポアの形状を決定する重要な工程である。その後、洗浄乾燥工程を経るが、この時点ではパッド表面はスキン層で覆われている。これをバフにより除去することによってポアを表面に露出させる。涙滴状のポア形状のためバフ量によってポア径は変化し、また、研磨を重ねることによっても同様にポア径が変化して研磨性能に影響を与える。

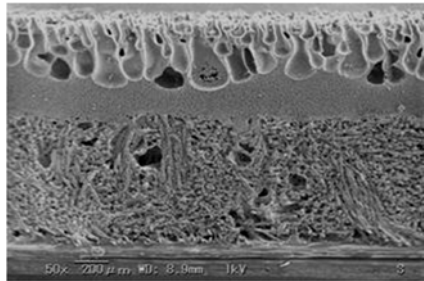
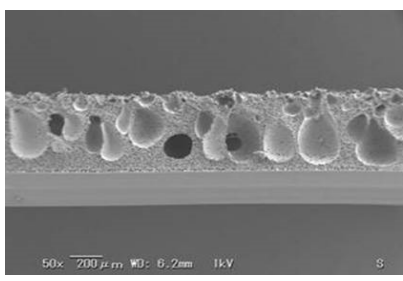
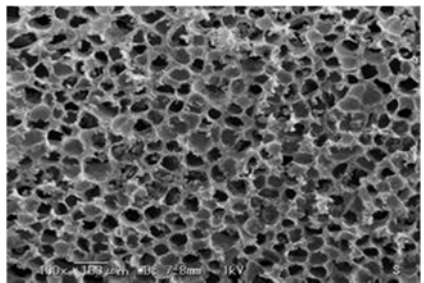
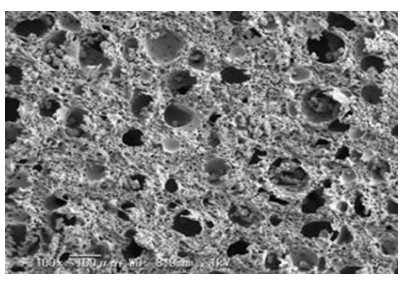
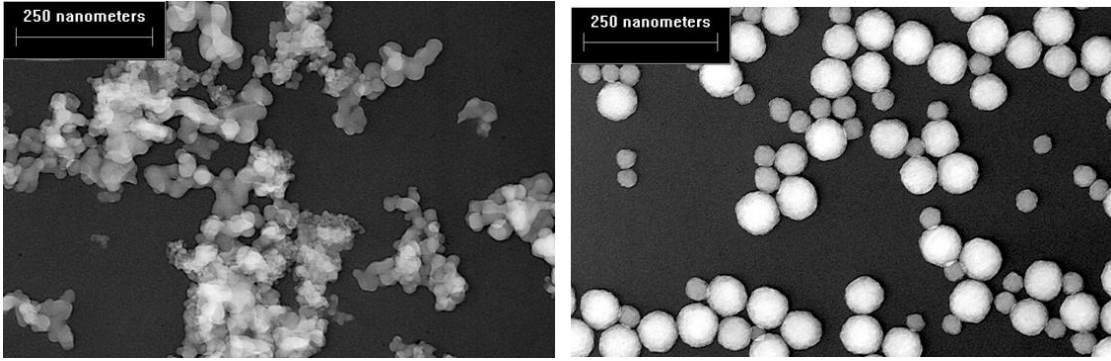
	Supreme (Felt ベース) (ニッタハース製 商品名)	SPM3100 (PET ベース) (ニッタハース製 商品名)
断面 SEM		
表面 SEM		

図 1.5 スエードタイプパッドの例

1.3 スラリー

CMP 用スラリーは、研磨用途により様々な種類が存在する[14-17]。CMP の C=化学作用を持たせるために、添加剤として酸化剤やキレート剤などを用いる場合がある。SiO₂ 研磨の場合には、KOH 溶液を溶媒として pH=11 程度のアルカリ液中にシリカ砥粒を分散させて用いる。ゼータ電位の絶対値がアルカリ領域で大きいため、その反発力により凝集を抑えることができる。また、アルカリ溶液を用いることにより、被加工物の SiO₂ 表面に水和層が形成され、それが砥粒により材料除去されると考えられている。一方、タングステン CMP 用には一般的に pH=2 程度の酸性のスラリーが用いられ、酸化剤として H₂O₂ を添加してタングステン表面を機械的に除去されやすい酸化物に変化させる。タングステン CMP の場合は当初アルミナスラリーが用いられていたが、スラリー中に微量の鉄イオンを添加することによって、触媒効果により酸化が加速され、機械作用の少ないシリカ砥粒を用いても十分な研磨レートが得られるようになったので、現在ではそうしたスラリーが主流となっている。このように、スラリーにおける C (=化学作用) の作用とは、単純にエッチングのような直接的に材料除去を行うのみではなく、何らかの反応生成物・改質層の形成を伴う反応形態をとるものと考えられている。

CMP 用スラリーに用いられるシリカ砥粒には、高温で気相反応により製造されるフュームドシリカと、溶液中にて低温で製造されるコロイダルシリカがある (図 1.6)。この他に、用途に応じてセリア砥粒、アルミナ砥粒などが用いられる。本論文では現在デバイス用 CMP で最も広く用いられているシリカ砥粒を主に取り上げるが、メカニズムの議論においてはその材料による影響は考慮していないため、シリカ以外の砥粒についても成り立つと考える。



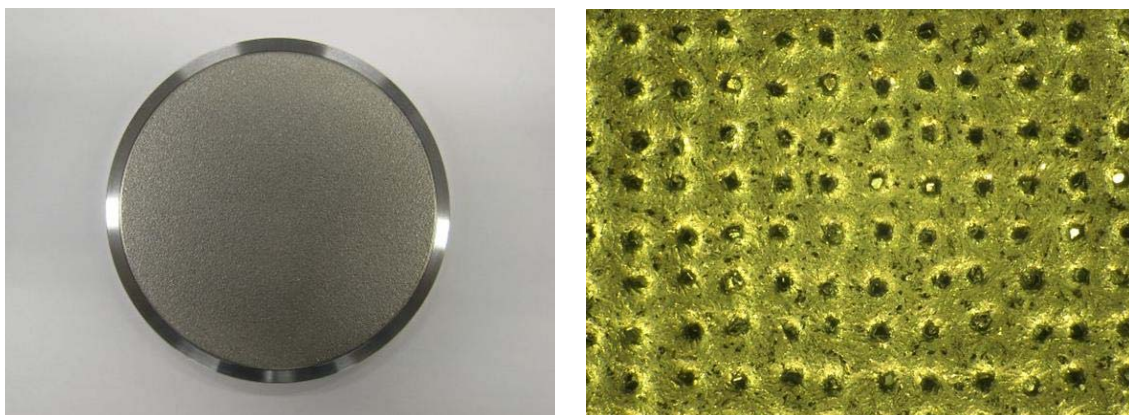
(a)

(b)

図 1.6 シリカ砥粒の SEM 外観 (a)フュームドシリカ、(b)コロイダルシリカ

1.4 パッドコンディショナー

パッドの表面状態を一定とするために、ダイヤモンド砥粒を埋め込んだディスクで研磨パッド表面を目立てする必要がある[18-20]。これに用いる部材をパッドコンディショナーあるいはドレッサーと呼ぶ。金属のディスクやペレットにダイヤモンド砥粒をニッケル電着させたものが主流で、4インチサイズのディスクをスキャンさせる方式と、基板サイズより少し大きめのリング状のものを固定位置で回転させて使用するものがある。現在、デバイス製造用では前者が主流である。ダイヤモンド砥粒は当初ランダムに配置されたものが用いられていたが、安定性に問題があり、ダイヤモンドをグリッド状に配置したものが現在主流となっている。図 1.7 にコンディショナーディスクの外観とダイヤモンド砥粒配列を示した顕微鏡写真を示す。用いられるダイヤモンドの種類によって、パッドのカットレートや表面粗さを変えることができ、ディスク上のダイヤ配置デザインも各種工夫されている。ダイヤモンドのサイズは、メッシュサイズ #100 (粒径=150 μm 程度) のものが多く使われている。砥粒径が小さいものを用いると研磨パッド表面を細かく荒らすことができるが、ダイヤモンドドレッサーの摩耗による劣化が早く、また砥粒と基台との接地面積が小さくなるため脱粒の危険が増す。



(a)

(b)

図 1.7 コンディショナーディスクの例 (a)外観 (b)ダイヤモンド砥粒配列

1.5 CMP装置

1.5.1 CMP装置の構成

現在の CMP 装置は円形のテーブルを回転させて基板を保持したヘッドを押しつけるロータリー方式が主流である[21,22]。基板の研磨では複数基板を同時に研磨するバッチ式装置が主流で、表面と裏面を同時に研磨する両面同時研磨装置も用いられる。基板の保持には、セラミックプレートなどにワックスで加熱・接着して固定する方法、バックングフィルムの外周にテンプレートを配して保持する方法、両面研磨の場合には基板の大きさの穴の開いたキャリアに基板をはめ込んで両面から研磨パッドで挟み込む方法などが用いられる。

一方、デバイス製造用の装置は現在、一つのプラテンに一つのヘッドを有した構成が主流で、そうしたプラテンユニットを複数組み込んで生産性を上げたり、2段階、3段階の研磨を同一装置内で完了させたりすることができるようになってきている。図 1.8 に、東京精密製 CMP 装置 (ChaMP-332) の平面概略図を示す[23-25]。ここでは二つのヘッドが3つのプラテン間を移動することにより、効率よく2段階研磨を行うことを可能としている。また、洗浄機も一体となっており、ブラシ洗浄、薬液洗浄を行った後スピンドライによりドライインドライアウトを実現している。このようなマルチヘッド、マルチプラテン、洗浄機組み込みによるドライインドライアウトがデバイス向け量産装置の主流である。

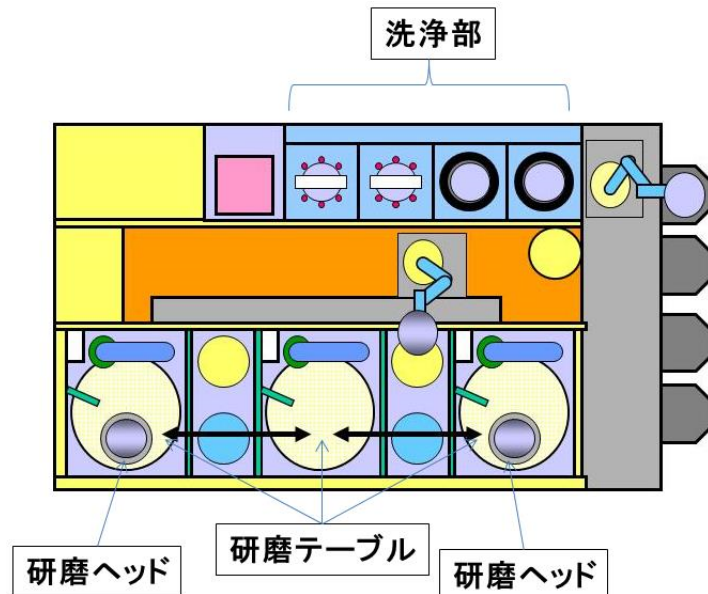


図 1.8 量産用 CMP の装置レイアウト例 東京精密製 (ChaMP-332)

1.5.2 基板・パッド間の相対速度と様々な研磨方式

CMP の研磨レートは後述するように、経験的に基板圧力と基板・パッド間の相対速度に比例する。現在主流となっているロータリー研磨方式の特徴は、プラテンの回転速度とヘッドの回転速度を同じにすると、基板上のすべての点でパッドとの相対速度が一定となることである。これは、図 1.9 に示すように、単純に幾何学的計算により求めることができる[26]。実際には回転速度を完全に一致させると、基板上の同じ位置をパッド上の同じ位置が繰り返し通過することになるため、少しだけ回転速度をずらすのが普通である。

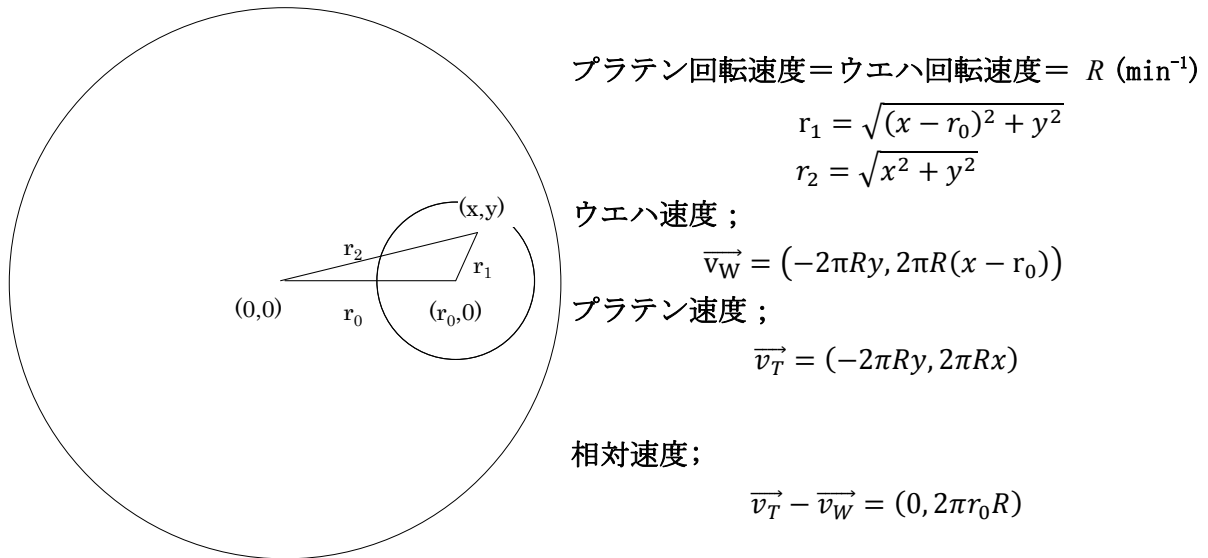


図 1.9 ロータリー方式研磨におけるウエハとプラテンの相対速度計算

ちなみに、平坦化 CMP がデバイス製造工程に用いられるようになった 90 年代には、様々な方式の研磨装置が提案され実際に量産適用されてきた。図 1.10 にそれらの運動形態を示す[27]。図 1.10(b)は、リニア方式の研磨装置で LAM 社 (OnTrack) が製造販売していた。ベルト状の研磨パッドを回転させ、その上に基板を押しつける方式で、ベルトの速度に対して基板の回転速度を低く抑えれば基板内の相対速度はほぼ一定となる。ロータリー方式よりも相対速度を上げることができることを特徴としていたが、特殊な研磨パッドが必要であり、性能の優位性もあまり認められなかったため大きく普及はしなかった。図 1.10(c)は、オービタル方式とよばれるもので、基板とほぼ同じサイズの研磨パッドを基板の下で小円運動させる運動形態である。昔からレンズ研磨などに用

いられていた方式で、土肥等により CMP への応用が提案され装置化された[28]。デバイス用装置としての商品化では、タングステン CMP 用にインテルがガード社に開発させ、ここを IPEC 社が買収し最終的にはノベラス社が販売していた。この方式も理論的に相対速度が面内一定となるが、パッドを常に基板が覆っているためパッドの目詰まりが大きく、また、パッド表面のドレスを均一に行うことも難しいことなどから、タングステンプラグ以外の工程への適用は難しかった。タングステンプラグ工程は、高い平坦性は必要なく比較的柔らかい不織布系の研磨パッドを用いることができた。しかし、ILD やダマシンなどの高い平坦性を必要とする研磨を行おうとすると、硬質の研磨パッドを用いる必要がある。その場合には均一なドレスを行う必要があるのだが、この方式では構造的に難しかった。図 1.10(d)は、基板より小さい径のパッドを基板上で回転させながらスキャンして研磨する方式で、小径パッド方式などとも呼ばれている。この方式は岡本工作機械で製品化され、その後ニコンに引き継がれて販売された。これまで述べてきた他の方式と大きく異なる点は、面内の相対速度が一定とはなり得ないというところである。スキャンにより面内分布を制御しようという考えであるが、パッドの表面状態のばらつきなどにより、計算通りに制御することは難しく普及することはなかった。

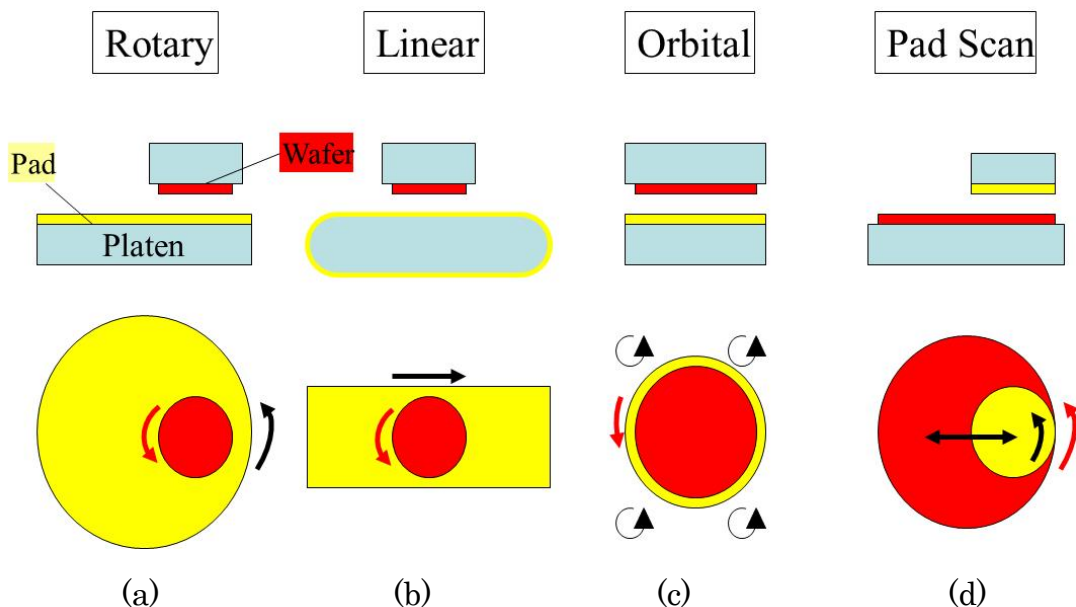


図 1.10 様々な研磨方式 (a)ロータリー方式、(b)リニア方式、(c)オービタル方式、(d)小径パッドスキャン方式

1.5.3 研磨ヘッド

研磨レートを決定するもう一つの要素である圧力については、基板を保持する研磨ヘッドの構造が重要である。最も単純な方式は、セラミックなどのプレートにワックスにより基板を貼り付ける方式で、今でもサファイアなどの基板製造研磨では用いられている。セラミックプレートの平坦度を基板に転写することになるので、ワックスを均一に塗布することが必要となる。基板への加圧はデッドウェイトを用いる方式や、油圧を用いる方式などがある。デバイス製造に CMP が導入された際には、バッキングフィルムやキャリアフィルムと呼ばれるスエードフィルムを介して剛体ヘッドに基板を保持する方式が用いられていた[27]。現在でもシリコンなどの基板研磨には用いられている。ただし、シリコンなどの基板用では、キャリアフィルムの上にテンプレートと呼ばれるガラスエポキシ製のリングが貼られ、これが基板の横ずれを防止していたが、デバイス用 CMP 装置ではキャリアフィルムとは独立してウエハの飛び出しを防止するリテーナーリングを設け、寿命が来たらキャリアフィルムのみを交換するという方式が採用されていた。この場合、基板の厚さに対してリテーナーリングの高さの調整が必要であった。リテーナーリング表面はウエハ表面高さより 200 μm 程度低い位置で、研磨パッドに直接接触しないように調整されていた。しかし、この方式ではキャリアフィルムの弾性率の分布に起因する研磨レートの面内ばらつきが問題であった。その問題を解決する目的で、エアバッグ方式が実用化された[29,30]。これは、弾性体を介して基板を押すのではなく、流体の圧力で基板に加圧することにより、面内の圧力を一定にすることができるという考えである。

バッキングフィルム方式では基板のエッジが研磨パッドに強く押し当てられるため、エッジ部の膜が研磨されすぎるといった問題があった[31]。そこで、基板の外周部のすぐ外側を基板と同じ圧力で押すことにより基板エッジ部の過研磨を抑える構造が提案された。すなわち、リテーナーリングを独立して制御し圧力を与えるというものであった。しかし、このバッキングフィルムタイプにリテーナー独立制御を組み合わせた方式はすぐにエアバッグ方式に移行しあまり普及しなかった。エアバッグ方式では研磨中の基板の飛び出しを抑えるために、リテーナーリングにも圧力を加えて常に研磨パッドと接触させておく必要があり、結果的には上記エッジ圧力制御の機能も持ち合わせていたためである。こ

うしたヘッド機構の変遷を図 1.11 に示す。その後、エアバッグ方式はエアバッグを分割しウエハ面内を同心円状に圧力制御するゾーンコントロール方式により面内プロファイルを制御できるようになっていく。

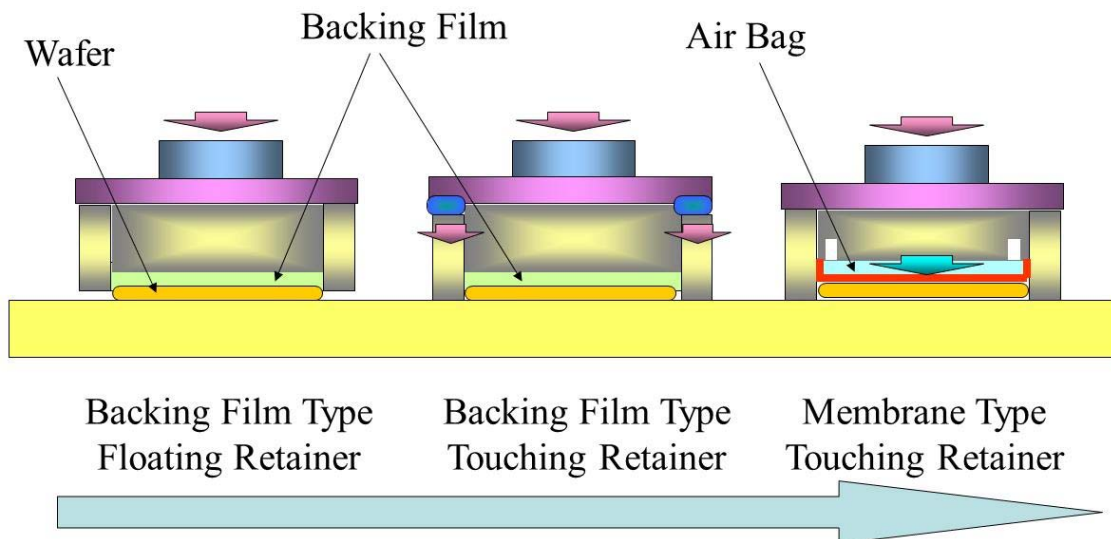


図 1.11 CMP ヘッドの変遷

1.6 CMPに求められる性能

ウエハ製造ではインゴットから基板を切り出し、ラッピングや研削といった粗加工から徐々に精密な表面に仕上げていく。CMPには最終的には原子レベルの平滑性が要求されるがそれと同時に、基板の外周ぎりぎりまでデバイスを形成できるよう、基板エッジ部の平坦性も求められる。近年ではLED用のサファイアやパワーデバイス用のSiC、GaNといった研磨レートが非常に低い材料を研磨する必要があり、研磨レートの向上も大きな課題となっている。

デバイス製造ではその構造の継続的な微細化に伴い[32]、さらに繊細な研磨が要求される。CMPが用いられるデバイスの製造工程は多岐にわたっており、工程毎に重視する性能も異なってくる。CMP適用工程としては、前述したようにILD、STI、タングステンプラグ、Cuダマシンなどがあるが、近年ではトランジスタの構造形成のためにメタルゲートダマシンやFinFETのためのPoly SiのCMPなど非常に幅広い。CMP導入初期はILDがCMPの主要工程であったが、この工程は層間膜の途中で研磨を終了し、残膜を制御する必要がある。また、mm単位の平面上距離間での平坦性、すなわちグローバル平坦性が求められる。一方、その他の工程のほとんどは、すべて複数の膜が露出し、その選択比などを利用して構造を形成する。たとえばSTIの場合にはシリコン窒化膜をストッパーとして溝部に埋め込んだシリコン酸化膜を研磨し、シリコン窒化膜上のシリコン酸化膜を除去する。ここではエロージョンやディッシングと呼ばれるローカル平坦性の制御が重要となる。

量産である以上、生産性の向上は永遠のテーマであり、研磨レートの向上は常に求められる。スループットの向上だけでなく、研磨時間が短くなることによりスラリーの使用量低減も期待できるからである。近年の微細な構造形成のための研磨では、もともと研磨量が少なく、研磨レートよりもその他の性能を重視する場合も多い。その場合でも、研磨レートの向上はスラリーを希釈して使用することによるコスト削減につながるため、研磨レート向上は常に重要なテーマと考えるべきである。

微細構造形成という観点では加工の再現性が非常に重要である。すなわち、ウエハ面内均一性、ウエハ間均一性、ロット間均一性などである。CMPは様々な要因により研磨レートが影響を受けるため、そうしたパラメータの管理が重

要であるが、近年ではそれでも不十分なため、成膜結果を **CMP** 装置に知らせてそれに応じた研磨をするフィードフォワード方式、研磨結果により次のウエハ研磨条件を調整するフィードバック方式、研磨中の残膜をリアルタイムでモニターして研磨を制御する方式などが適用され始めている [33]。これらは **APC (Advanced Process Control)** と呼ばれている。

以上述べた研磨レートとその再現性、マイクロクラッチに代表される欠陥制御、グローバル平坦性とローカル平坦性が **CMP** の重要テーマである。本論文でもこれらのテーマについての研究成果について報告をしていく。

1.7 CMPのメカニズム

幅広く使われている CMP であるが、その材料除去メカニズムに関しては未だに不明な点が多い。材料除去率 (Material Removal Rate : MRR) を表すプレストンの式 (1-1) [34]は有名であるが、これは経験式であり、理論に基づいたものではないのである。

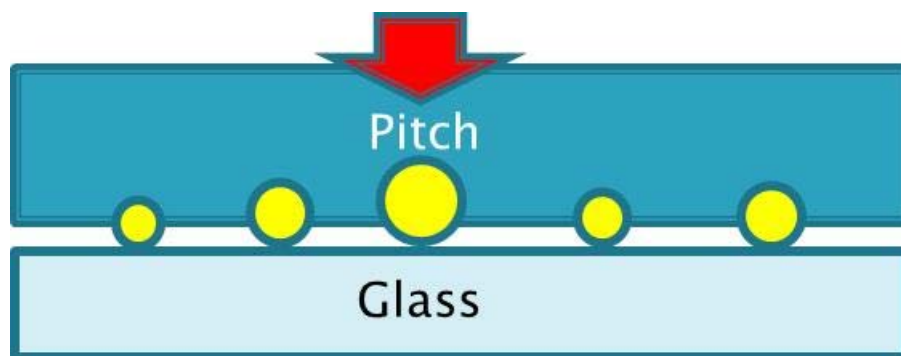
$$MRR = k \times p \times v \quad (1-1)$$

k : 定数、 p : 圧力、 v : 相対速度

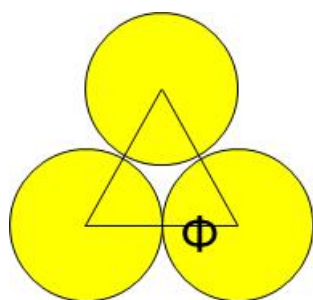
研磨のメカニズムを考える場合に、それを難しくさせているのは、 k で表されている定数の中に、様々な変動要因が含まれており、またそれらの要因は相互に影響し合い、すべての条件を同一にして一つのパラメータだけを変化させて評価することがきわめて難しいことにある。たとえば、パッドと基板の摩擦力が変化すると研磨中の温度が変化する。温度が変化するとパッドの物性、例えば表面弾性率が変化する。表面弾性率が変化すると基板との接触状態が変化しそれにより摩擦力が変化するというふうに、原因と結果が複雑に絡み合っている。したがって、研磨に直接作用するパラメータを見いださない限り、研磨レートとの相関性は普遍とは言えず、逆にそうしたパラメータを見つけることができれば、研磨のメカニズムに肉薄することができると考えられる。

研磨のメカニズムとしては、微小切削説、塑性流動説、化学反応説があるが、化学反応説の一つとして、Izumitani はガラスの研磨においてスラリー中のアルカリによりガラス表面が改質しその改質した層を砥粒が機械的に除去しているとした[35]。CMP のメカニズムとしてはこの説のように、基板表面を化学作用により軟質あるいは脆弱に改質して、砥粒により機械的に材料除去するというモデルが現在広く受け入れられている。CMP の C (=化学的作用)はこの表面改質であり、M (=機械的作用)は改質された表面層の砥粒による材料除去と考えられているのである。この、砥粒による材料除去についての様々なモデルがこれまで提案されてきた。L. Cook は砥粒と材料除去の関係について、以下のようなモデルを提案した[36]。図 1.12 には Cook の論文における砥粒と基板の接触状態を示し、図 1.13 には同じく材料除去の考え方を示す。彼はパッドを平面と考え、その上に均一に砥粒が存在していると考えた。そして、材料除去は

砥粒の基板への食い込み量により決まり、その食い込み量は基板圧力に比例すると考えた。食い込み深さは改質層より浅く、従って、材料除去の圧力依存性は機械的要素のみで考えることが出来る。一つの砥粒の食い込みがパッドの相対運動により基板上に溝を形成し、その溝の体積は基板圧力と相対速度で決まるため、プレストンの式が説明できるとした。



(a)



Particles/area $N/A = 2K/\sqrt{3}\phi^2$
(K:Filling factor)

(b)

図 1.12 研磨中の砥粒と基板（ガラス）の接触状態（L. Cook[34]）

(a) 横から見た図、(b) 最密充填された場合の平面図

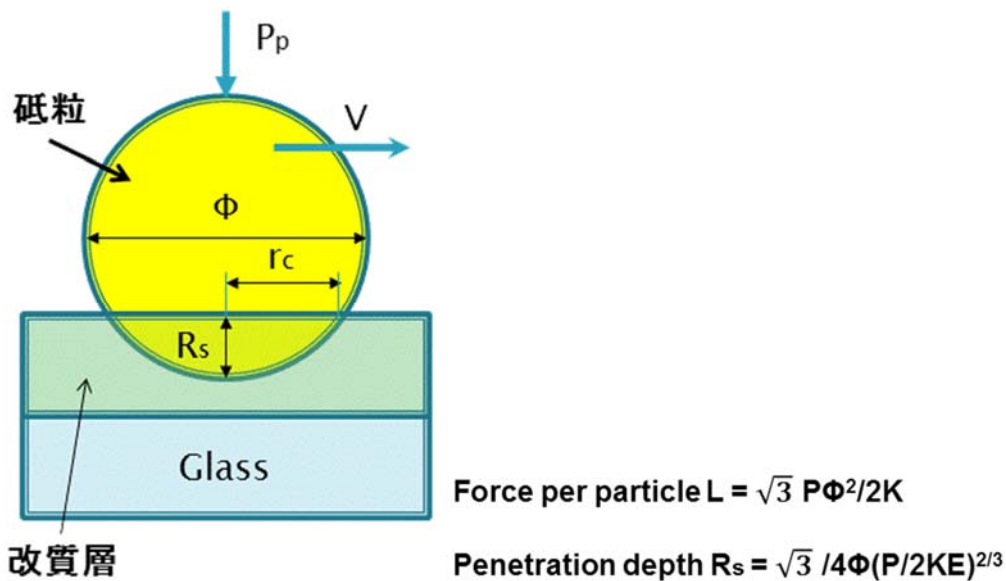


図 1.13 砥粒の基板への食い込みと材料除去レート (L. Cook[34])

この当時はまだパッドのコンタクトエリアという考えは広まっていなかった。1995年に三橋等が標準的な研磨パッドであるIC1000をガラスに押し当てて観察し、基板との接触面積はわずか1%かそれ以下であること、その接触面積は基板圧力と比例関係にあることを報告した[37]。この結果は現在では広く受け入れられており、それに基づいた様々なモデルが提案されてきた[38-40]。

Qin等は研磨パッドの接触面積は基板圧力に比例することをGreenwood-Williamsonモデルに基づく理論式から導き出し[41]、砥粒圧力は基板圧力によって変化しないと結論づけた[42]。すなわち、研磨パッドの接触面積が基板圧力に比例するという事は、平均パッドコンタクト圧力は基板圧力を変化させても変化しないことになるからである。そうすると、砥粒1個あたりの圧力も変化しないので、Cookのモデルは成り立たないことになる。そこで、Qin等はプレストンの式の基板圧力依存性をパッドの接触面積の変化によって説明した。すなわち、接触面積が大きくなるほど作用砥粒数が増えて研磨レートが向上するというものである。

Qinのモデルでは依然として基板圧力はすべて砥粒に加わり、それによって砥粒の食い込み量が決まると考えていたが、Luo等は、砥粒はパッド表面に埋め込まれており、パッドと基板は接触していると考えた[43,44]。Choi等は砥粒サイズ、砥粒濃度と基板圧力を変化させて研磨レートと表面粗さの変化を評価した

[45]。研磨レートは基板圧力に比例したが、表面粗さは一定だった。また、砥粒濃度を変化させても表面粗さに変化はなく、唯一砥粒サイズを変化させたときのみ粗さが変化した。もしも基板圧力がすべて砥粒に伝わり食い込み量を決定するとするならば、砥粒濃度が高い方が砥粒 1 個あたりの圧力が減少して表面粗さは小さくなるはずである。この結果から Choi 等は、砥粒はパッド表面に埋まっており、基板圧力の大部分は研磨パッドと基板の接触によって支えられていると考えた。この結論は Luo 等のモデルも支持している。

ここで取り上げた 3 つの研究グループ (Qin、Luo、Choi) の結論はいずれも研磨パッドの接触面積により研磨レートの基板圧力依存性が説明できるというもので、パッドの接触部にその面積に比例した数の砥粒が存在するという前提に基づいている。ただし、砥粒 1 個あたりの材料除去量は Cook と同様に砥粒の食い込み量と、その相對運動により形成される溝の体積で説明している。その後、様々な研究者によって同様のモデルが提案されてきたが、基本的な前提は同一である[46-49]。

一方で、Runnels は研磨パッドと基板の間には薄いスラリーの層が存在し[50]、流体として作用したスラリーが基板上の凹凸を平坦化するというモデルを提案した[51]。しかし、このモデルではパッド表面を平滑面と仮定しており、そのため、スラリー層の厚さを 10~50 μm と大きめに見積もっている。その後 Levert 等の実験によりパッドが接触しない状態では研磨レートが 3 桁落ちるということが確かめられた[52]。また、Kimura 等はスラリーが介在した状態での研磨パッドの基板との接触状態を観察し、実際の研磨に近い状態でも確かに研磨パッドは基板と接触していることを確かめた[53]。ただし、その接触率が 2% 以下であることから、そのような微小な接触部のみで十分な材料除去ができるのか疑問を示した。AFM のプローブの先を SiO_2 として基板上の SiO_2 がプローブに吸着する現象を確認し、この結果から、パッドアスペリティの非接触部で砥粒が基板上を転動し基板上の SiO_2 分子が砥粒に吸着されることにより材料除去が行われるというモデルを提案した。

1.8 本研究の意義と概要および本論文の構成

ここまで CMP の応用範囲の広がり、それに用いられている消耗材料、装置について解説した。また、それぞれの応用に求められる性能向上課題について述べた。表 1-I に CMP に求められる性能とその構成要素との関係をまとめた。3つの消耗材料、ならびに研磨条件、研磨装置といった構成要素が CMP の様々な性能に関わっている。その中でも、研磨パッドとコンディショナーによって決定される研磨パッド表面は研磨レート、平坦性、スクラッチなど様々な性能要素に関わっている。パッドの表面状態と材料除去の関係については、前節で述べたように、様々なモデルが提案されているが、依然疑問点が存在する。そのため、レート向上、平坦性改善、欠陥低減といった課題の解決に対して必ずしも明確な指針が示されていないのが現状である。そこで、本論文では、研磨パッドの表面状態と研磨レートの関係についてそのメカニズムを考察していく。

表 1-I CMP の構成要素と性能との関係

CMP に求められる性能		CMP の構成要素				
大分類	小分類	パッド	コンディショナ	スラリー	研磨条件	装置
基本性能	平坦性	○	○	○	○	○
副作用	パーティクル	△	—	△	—	○
	スクラッチ	○	○	◎	△	△
	有効領域	○	—	△	○	○
プロセス信頼性	再現性	◎	◎	—	—	○
	均一性	○	○	○	○	○
生産性	研磨レート	○	○	◎	○	△
	ランニングコスト	◎	△	◎	○	◎

研磨のメカニズムやモデルを考える場合には、そのスケール別に、原子分子の相互作用を考慮するレベル、パッドアスペリティを考慮するレベル、全体の平均的な振る舞いを考えるレベルまでいくつかのレベルで考えることができる。本研究では、巨視的モデルとして、研磨パッドの平均的な振る舞いから導出したモデル、微視的モデルとして、パッドアスペリティ、砥粒と基板の接触状態

を考慮して導き出したモデルを提案し、さらにそのモデルの平坦性、欠陥形成との関連性について議論する。従来のモデルでは材料除去メカニズムを示していても、それを活かした具体的なプロセス改善や消耗材開発につながった事例は少ない。本論文では、提案したモデルの妥当性を示すに留まらず、モデルに基づいたプロセス改善、消耗材開発の方向性を示すことを目的とする。

図 1.14 に本論文の構成をまとめた。

第 2 章では、研磨レートの安定性についてのマクロモデルを提案する。ここでは材料除去のミクロメカニズムは考慮せずに、単純にドレッシングと研磨により、パッド面積のうち高レートの領域と低レートの領域の面積の割合がどう変化するかという考え方によりモデル式を提案した。実際の文献値や自らの実験結果と比較した結果、きわめて良い一致が見られた。現実の生産現場での研磨レート不安定化事例をこのモデルに当てはめ、プロセス改善の方策を示した。

第 3 章では、研磨レートと研磨パッド表面状態の関係についてのミクロモデルを提案する。従来提案されてきたモデルの問題点を指摘し、矛盾無く説明が出来る新たなモデルとして、研磨パッドの基板との接触部の周縁に滞留した砥粒が材料除去を行っているとした。パッド表面状態を変化させた研磨パッドによる研磨評価結果から、パッド接触部の総フェレ径が研磨レートに対しきわめてリニアな関係を示し、上記モデルを支持していることを示した。さらに、フェレ径の圧力依存性を計算し、フェレ径もほぼ圧力に比例関係があることを確認した。研磨レートの圧力依存性は、フェレ径が圧力にほぼ比例して変化し、それに伴って作用砥粒数が変化することにより説明できることを示した。

第 4 章では別の観点からフェレ径モデルの妥当性を検証した。すなわち、研磨パッドの接触部が 1 回の接触あたりどれだけの材料除去をしているのかを具体的に数値計算を行い、さらにはパッド接触部に何個の砥粒が存在して材料除去に寄与しているかを計算した。その結果、ひとつのパッド接触部で仕事をしている砥粒数は意外と少なく、砥粒がパッド接触部の周縁で材料除去を行っているというモデルを支持するものであった。この結果から、研磨レート向上の方向性として、研磨パッドアスペリティは微小で多数の接触点を持つよう、また、砥粒を多く滞留させるような形状が望ましいことを示した。

第 5 章では欠陥抑制評価の一例としてリテーナーリング圧力、リング材料とマイクロスクラッチの関係についての評価結果を紹介した。考察において材料

除去モデルとの関連性を考慮し、アスペリティの影響について議論した。アスペリティの形状としては前章で示した微小で多数の接触点を有する形状が欠陥低減の観点からも望ましい可能性を示した。

第6章では平坦性評価の一例として、単層パッドによるローカル平坦性の改善事例を紹介し、その結果からグローバル平坦化とローカル平坦化のマクロモデルを議論した。また、材料除去のマイクロモデルとの関連においてアスペリティの影響について考察を行った。その結果、ローカル平坦化の観点からも、微小で多数の接触点を有する形状が望ましい可能性を示した

第7章では本論文を総括し、本論文の意義と今後の課題について述べる。

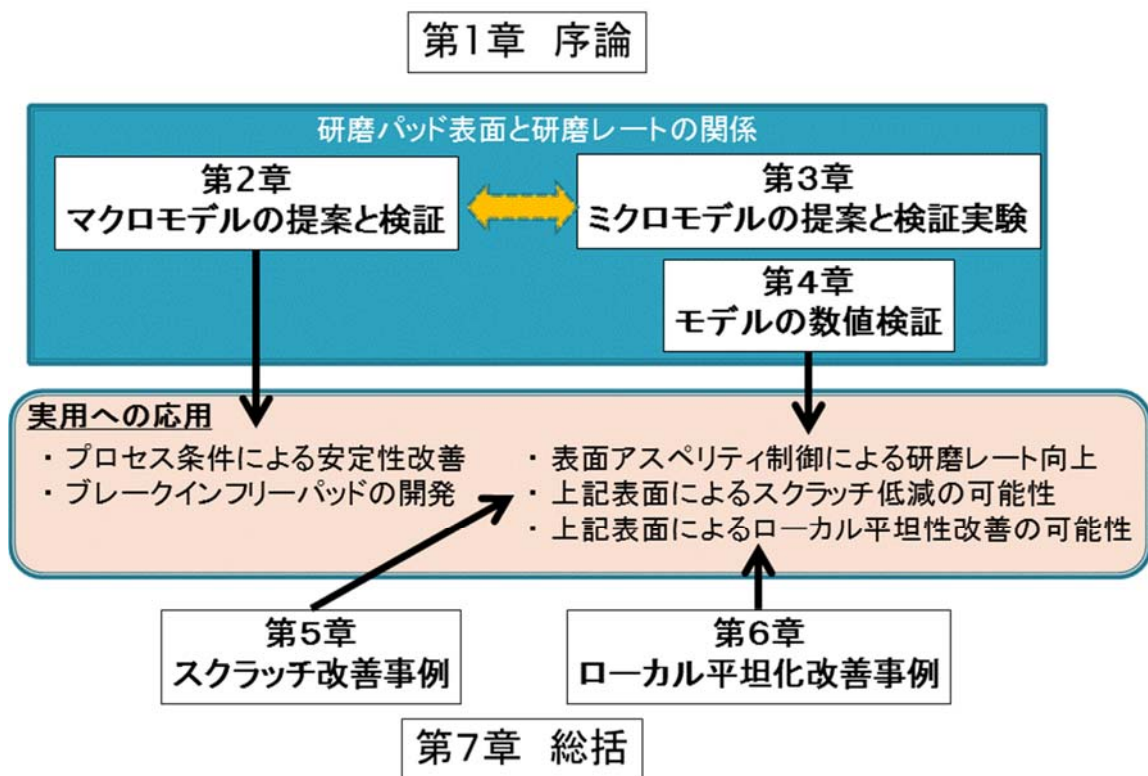


図 1.14 本論文の構成

第 1 章の参考文献

- [1] 西村義男 「硅石器時代の技術と文明」 1985 日本経済新聞社
- [2] A. Isobe: "Planarization – From the viewpoint of fine patterning and reliability", Proc. SEMI Technology Symp. Japan 1991, p. 276.
- [3] M.Krishnan, J.W.Nalaskowski, and L.M.Cook: "Chemical Processes in Glass Polishing", Chem. Rev. **110** (2010) 178.
- [4] Y. Moon, R. Venigalla, C. Sheraw, C. Wang, J. Cummings, D. Canaperi, D. Lee, L. Hall, and L. Economikos: "Chemical mechanical polishing for front-end-line integration in 22nm technology and beyond", Proc. ICPT, 2009, p. 183.
- [5] W. J. Patric, W. L. Guthrie, C. L. Standley, and P. M. Schiabile: "Application of chemical mechanical polishing to the fabrication of VLSI circuit interconnection", J. Electrochem. Soc. **138** (1991) 555.
- [6] S. Y. Kim and Y. J. Seo: "Correlation analysis between pattern and non-pattern wafer for characterization of shallow trench Isolation-chemical mechanical polishing (STI-CMP) process", Microelectron. Eng. **60** (2002) 357.
- [7] H. P. Feng, L. Y. Lin, M. Y. Cheng Y. Y. Wang, and C. C. Wan: "Behavior of copper removal by CMP and its correlation to deposit structure and impurity content", J. Electrochem. Soc. **155** (2008) H21.
- [8] Z. C. Lin, W. S. Huang, and J. S. Tsai: "A study of material removal amount of sapphire wafer in application of chemical mechanical polishing with different polishing pads", J. Mech. Sci. Technol. **26** (2012) 2353.
- [9] K. Wijekoon, R. Lin, B. Fishkin, S. Yang, F. Redeker, G. Amico, and S. Nanjangud: "Tungsten CMP process developed", Solid State Technol., **4** (1998) 53.
- [10] P. B. Zantye, A. Kumar, and A. K. Sikder: "Chemical mechanical planarization for microelectronics applications", Mater. Sci. and Eng. R. **45** (2004) 89.
- [11] 礮部晶 : 「平面精密研磨に用いられる研磨パッドの技術動向」 精密工学会誌 **78** (2012) 937.
- [12] J. David, B. Bonner, T. Osterheld, and R. Jin: "Advanced STI CMP solutions for new device technologies", Proc. SEMI Technology Symp. Jpn., 1999, p. 8.

- [13] T. Eusner, N. Saka, and J. H. Chun: “Breaking-in pad for scratch-free, Cu chemical-mechanical polishing”, *J. Electrochem. Soc.* **158** (2011) H379.
- [14] Y. Matsumura and Akira Isobe : “Ultra-high-removal-rate Cu-slurry technology for 3D-IC TSV”, *Proc. 6th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT)*, 2009, p. 125.
- [15] H. Nishizawa, H. Nojo, and Akira Isobe : “Fundamental study on CMP slurry of cobalt barrier metal for next generation process”, *Proc. Advanced Metallization Conf.(ADMETA) 19th Asian session*, 2009, p. 76.
- [16] H. Nishizawa, J. H. park, and Akira Isobe: “Fundamental study on CMP slurry of cobalt barrier metal for next generation process”, *Proc. 7th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT)*, 2010, p. 325.
- [17] Rika Tanaka, Haruki Nojo, Koishi Yoshida: “Advanced W-CMP slurry for high planarity”, *Proc. 4th Int’l Conf. CMP/Planarization Technol.* 2007, p. 315.
- [18] M. Y. Tsai, S. T. Chen, Y. S. Liao, and J. Sung: “Novel diamond conditioner dressing characteristics of CMP polishing pad”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **49** (2009) 722.
- [19] N. H. Kim, Y. J. Seo, and W. S. Lee: “Temperature effects of pad conditioning process on oxide CMP: Polishing pad, slurry characteristics, and surface reactions”, *Microelectron. Eng.* **83** (2006) 362.
- [20] M.Y. Tsai, and W.K. Chen: “Effect of CMP conditioner diamond shape on pad topography and oxide wafer performances”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **55** (2011) 253.
- [21] K. Maeda, T. Kozuki, Y. Yamamoto, and S. Kadomura: “Technology trends of oxide CMP focused on equipment and consumables”, *Proc. Pacrim CMP*, 2004, p. 43.
- [22] 磯部晶 : 「要素技術を統合する次世代 CMP 装置開発」 砥粒加工学会誌 **50** (2006) 448.
- [23] Akira Isobe: “CMP hardware trend for future ULSI devices” presented at 19th VMIC(Invited presentation), 2002.
- [24] 磯部晶 : 「LSI デバイスの進展とそれを支える CMP 装置」 月刊トライボロ

- ジー, **16** (2002) 184.
- [25] Akira Isobe: “CMP productivity improvement by ChaMP”, presented at IC-China Technology Seminar in Shanghai, 2005.
- [26] 宇根、河西：「現場で使える研磨加工の理論と計算手法」日刊工業新聞社、2010年
- [27] 礩部晶：「CMPの基礎と実際」、砥粒加工学会第17回グラインディングアカデミーテキスト、2009年、p. 40.
- [28] 土肥、中川、河西：「シリコンデバイス・ウエハのプラナリゼーション加工技術（第1報）－概念提案とポリシング加工システムの原理試作－」、電子情報通信学会春季全国大会、1991、C-529
- [29] T. H. Osterheld, S. Zuniga, S. Huey, P. M. Garretson, B. Bonner, D. Bennett, and R. Jin: “A novel retaining ring in advanced polishing head design for significantly improved CMP performance”, MRS Proc. **566** (1999) 63.
- [30] M. M. Touzov, T. Fujita, and T. Doy: “Novel retaining ring to reduce CMP edge exclusion”, Proc. ISSM, 2001, p. 337.
- [31] Y. R. Jeong, P. Y. Huang, and W. C. Pan: “Tribological analysis of CMP with partial asperity contact”, J. Electrochem. Soc. **150** (2003) G630.
- [32] G. E. Moore: “Cramming more component onto electronics circuit”, Electronics, **38** (1965) 21.
- [33] 礩部晶：「CMPにおけるe-manufacturing」presented at SEAJ Forum 2004(招待講演).
- [34] F. Preston: “The theory and design of plate glass polishing machines”, J. Soc. Glass Technol. **11** (1927) 127.
- [35] T. Izumitani: Optical glass (AIP Translation series, NY, 1986) Chap. 4, p. 91.
- [36] L. M. Cook: “Chemical Processes in Glass Polishing”, J. Non-Cryst. Solids **120** (1990) 152.
- [37] 三橋眞成、小野秀之、礩部晶：「CMPによる平坦化研磨－パッドとウエハの接触状態－」精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, 1995, p. 20.
- [38] C. L. Elmufdi and G. P. Muldowney: “A novel optical technique to measure pad-wafer contact area in chemical mechanical planarization”, MRS Proc. **914** (2006) 0914- F12-06.

- [39] L. J. Borucki, T. Sun, Y. Zhuang, D. Slutz, and A. Philipossian: “Pad topography, contact area and hydrodynamic lubrication in chemical-mechanical polishing”, *MRS Proc.* **1157** (2009) 1157-E01-02.
- [40] M. Uneda, Y. Maeda, K. Ishikawa, K. Ichikawa, T. Doi, T. Yamazaki, and H. Aida: “Relationships between contact image analysis results for pad surface texture and removal rate in CMP”, *J. Electrochem. Soc.* **159** (2012) H90.
- [41] J.A. Greenwood, and J.B. Williamson: “Contact of nominally flat surfaces”, *Proc. R. Soc. A* **295** (1966) 300.
- [42] K. Qin, B. Moudgil, and C.W.Park: “A chemical mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects”, *Thin Solid Films* **446** (2004) 277.
- [43] J. Luo and D. A. Dorfield: “Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling”, *Semicond. Manuf.* **14** (2001) 112.
- [44] J. Luo and D. A. Dornfield: “Optimization of CMP from the viewpoint of consumable effects semiconductor devices, materials, and processing”, *J. Electrochem. Soc.* **150** (2003) G807.
- [45] W. Choi and R. K. Singh: “Roles of Colloidal Silicon Dioxide Particles in Chemical Mechanical Polishing of Dielectric Silicon Dioxide”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** (2005) 8383.
- [46] Y. R. Jeng and P. Y. Huang: “Impact of abrasive particles on the material removal rate in CMP”, *Electrochem. Solid-State Lett.* **7** (2004) G40.
- [47] J. Seok, C. P. Sukam, A. T. Kim, J. A. Tichy, and T. S. Cale: “Multiscale material removal modeling of chemical mechanical polishing”, *Wear* **254** (2003) 307.
- [48] G. Fu, A. Chandra, S. Guha, and G. Subhash: “A plasticity based model of material removal in chemical mechanical polishing(CMP)”, *Semicond. Manuf.* **14** (2001) 406.
- [49] J. Xin, W. Cai, and J.A. Tichy: “A fundamental model proposed for material removal in chemical-mechanical polishing”, *Wear* **268** (2010) 837.
- [50] S. R. Runnels and L. M. Eyman: “Tribology analysis of chemical-mechanical polishing”, *J. Electrochem. Soc.* **141** (1994) 1698.
- [51] S. R. Runnels: “Feature-scale fluid-based erosion modeling chemical-mechanical

polishing”, J. Electrochem. Soc. **141** (1994) 1900.

- [52] J. A. Levert, F. M. Mess, R. F. Salant, and S. Danyluk: “Mechanism of chemical-mechanical polishing of SiO₂ dielectric on integrated circuits”, Tribology Trans. **41** (1998) 593.
- [53] K. Kimura: “Experimental analysis on material removal mechanism in CMP process for SiO₂ film with AFM observation”, presented at Levitronix Users Conf. 2011.

第2章 研磨パッド表面変化のマクロモデルに関する研究

研磨パッドの表面状態は基板との接触状態に影響を与え、さらにはスラリーの流れやスラリー中の砥粒の挙動にも影響を与えると考えられ、それらにより研磨レートが変動すると考えられる。そうしたミクロな観点から研磨メカニズムを論じた報告は数多いが[1-10]、マクロ挙動として論じた報告は少ない。本章では、ドレッシングと研磨により研磨パッド表面が変化し、研磨レートが変動する現象について、マクロ的な観点からモデル化を検討した結果について論ずる。

2.1 ドレッシングによる軌跡の評価

ドレッシングによるパッド表面の変化を調べるために、コンディショナーのダイヤモンド砥粒による軌跡を分析した。コンディショナーは多数のダイヤモンド砥粒をその表面に有しているが、実際にパッドと接触する砥粒数は非常に少ないということが知られている[11,12]。しかしそれでもダイヤモンド砥粒の軌跡を直接測定することは、研磨パッドが多数のポアを有するためにきわめて難しい。そこで、ダイヤモンド砥粒の軌跡を調べるために図 2.1 に示すような実験を行った[13,14]。4 インチディスクコンディショナーを PET 製樹脂板に押しつけて回転させる。樹脂板は実際の研磨パッドを模して不織布のクッション層と積層している。本来ならば、実際の研磨パッドと同じ物性のポリウレタンの無発泡平面で評価すべきであるが、予備実験で概ね同じ形状の軌跡が形成されることを確認した上で、より平面度の高い PET 板を用いた。ちなみに、PET の貯蔵弾性率 E' は室温で約 2000 MPa、 $\tan \delta$ は 0.015 とウレタンよりもやや粘性が低く、軌跡はよりくっきりと観察された。実際のウレタンパッドでは軌跡幅はやや小さくなると考えられる。

表 2-I に示す仕様の 2 種類のディスクを評価した。ディスク荷重は 4.08 kgf と 7.94 kgf で 1 回転だけディスクを回転させた。コンディショナーディスクにより樹脂板の表面に形成された凹凸を段差測定機 Surfcom 1400D (東京精密製) を用いて測定した。測定データはフラットな領域、すなわちダイヤモンド砥粒の軌跡が存在しない領域を除去して、図 2.2 に示すように、平均表面粗さ R_a と残され

た山／谷の長さ、すなわち軌跡の幅の総和を指標とした。 R_a はコンディショナーの仕様に依存するが荷重を変えても変化しなかった。軌跡の幅の総和は荷重を 2 倍にするとほぼ 2 倍となった。本評価ではコンディショナーディスクを 1 回転させてその軌跡を解析したが、それはそのコンディショナーの作用ダイヤの任意の方向に対する軌跡を代表していると考えて差し支えない。なぜならば、ダイヤは特定の方向性を持ってディスクに配置されているわけではないからである。コンディショナーとプラテンの相対速度を 1 m/s と仮定し軌跡幅の総和を 15mm とすると 1 秒間にダイヤが軌跡を形成する面積は $1.5E4 \text{ mm}^2$ となる。パッドの直径が 800 mm とするとその面積は $5.02E5 \text{ mm}^2$ となり、1 秒間にダイヤの軌跡が形成されるのはパッド面積のわずか 3% であることがわかる。

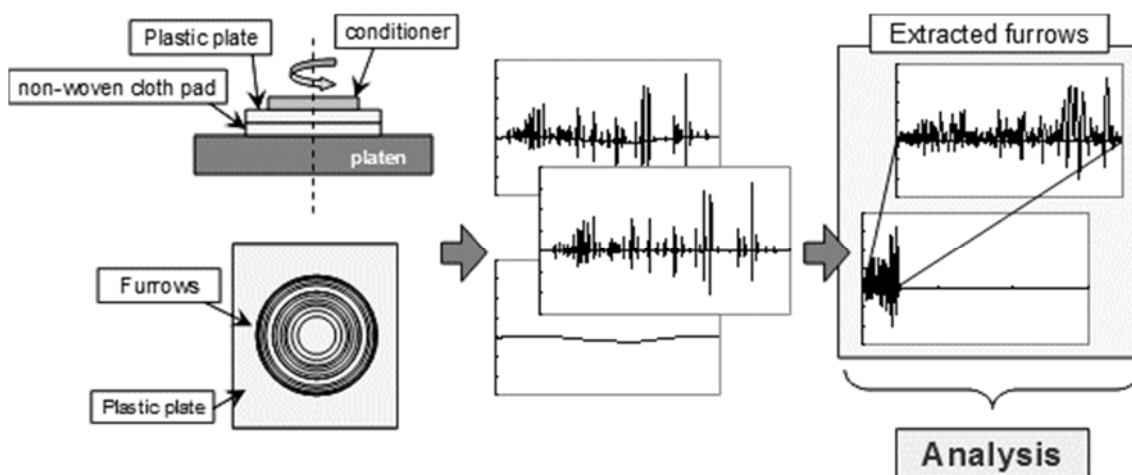


図 2.1 CMP コンディショナーの軌跡評価方法

表 2-I 評価したコンディショナーの仕様

Conditioner	Diamond specifications			
	Size (μm)	Protrusion (μm)	Pitch (μm)	Shape
A	100	50	300	Blocky
B	210	120	500	

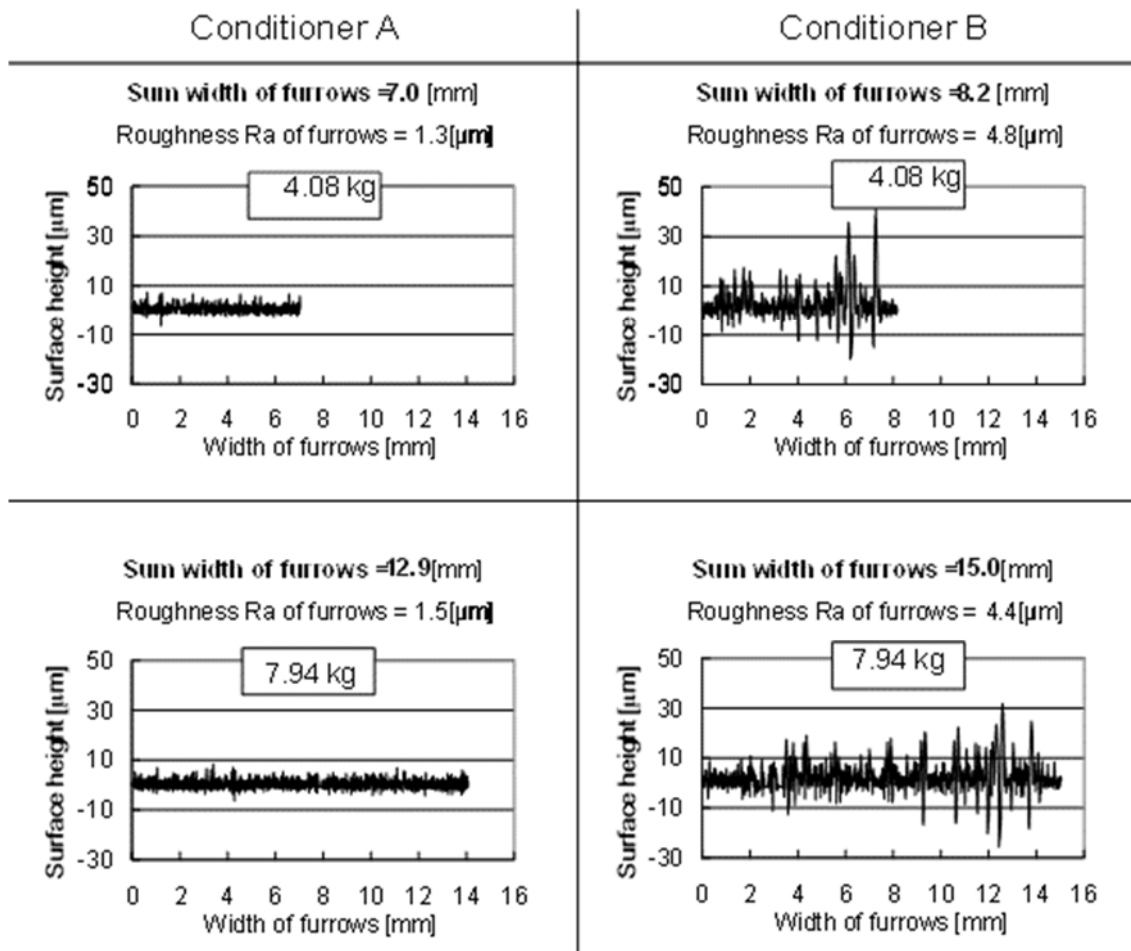


図 2.2 2 種類のコンディショナーの軌跡評価結果

2.2 モデルの提案

上記分析でわかったように、パッド表面は均一にドレッシングされるわけではなく、まだらにドレッシングされている。そうしたまだらな表面による CMP の平均化された結果として研磨レートが得られると考えられる。そこで、パッド表面のマクロ変化はドレッシングされた面積の割合により表現できると考え以下のモデルを提案する[15]。パッド表面を図 2.3 に示すように微少な領域に分割し、それぞれの領域はレートが高い状態“H”あるいは低い状態“L”のいずれかに定義されるとする。パッドのマクロ表面状態のドレッシングによる変化を $C_d(t)$ という関数で表すことにする。ここで $C_d(t) = 1$ とはすべての微小領域が“H”となっている状態を意味し、 $C_d(t) = 0$ とはすべての領域が“L”となっている状態を意味する。研磨パッド全体のある割合が単位時間でドレッシングにより“L”から“H”に変化し、次の単位時間で残された“L”の状態のうちの同じ割合が“H”に変化する（図 2.3）。

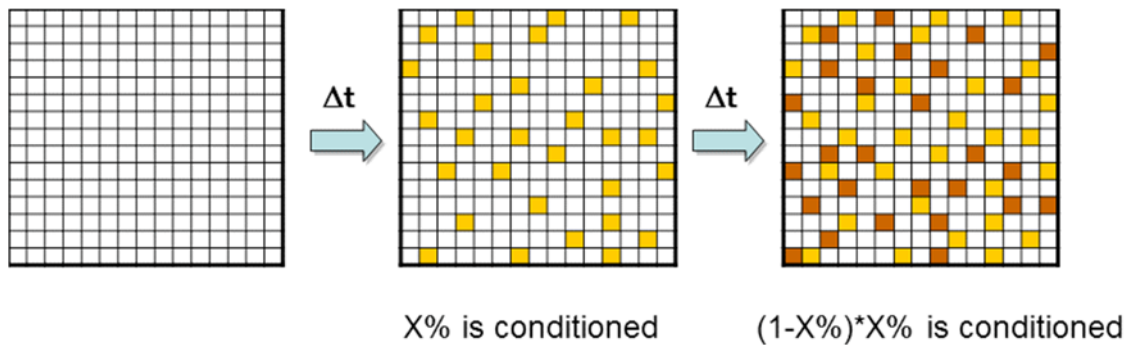


図 2.3 マクロモデルのコンセプト

こうした現象は、式(2-1)のような指数関数で表すことができる。

$$C_d(t) = 1 + (C_0 - 1)\exp(-At) \quad (2-1)$$

ここで C_0 は $C_d(0)$ 、 A は定数である。図 2.4 にこの関数の 1 例として $C_0=0$ 、 $A=0.1$ の場合のグラフを示す。

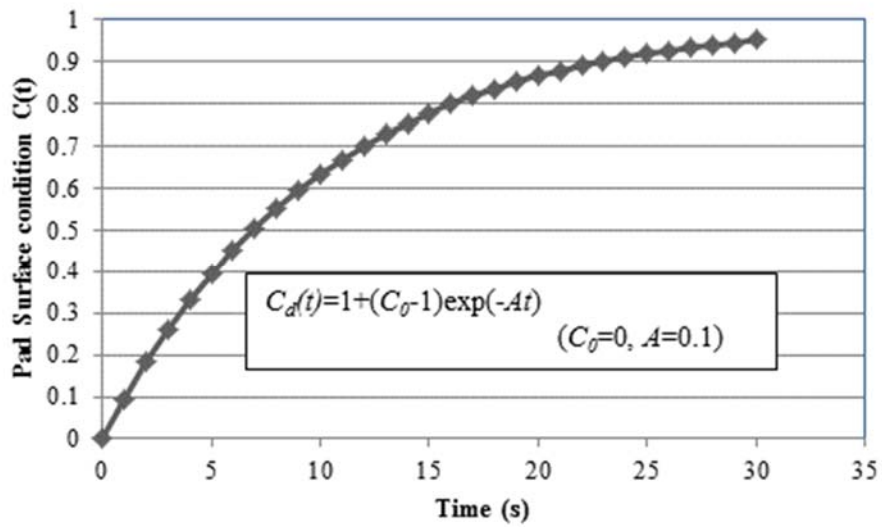


図 2.4 ドレッシングによるパッド表面状態変化を表すグラフ

ここで、研磨による目詰まり (Glazing) に起因するパッド表面状態の変化 $C_g(t)$ をこの逆の現象と仮定するとそれは式(2-2)で表すことができる。

$$C_g(t) = C_0 \exp(-Bt) \quad (2-2)$$

ここで C_0 は $C_g(0)$ 、 B は定数である。

図 2.5 は $C_0 = 1$ 、 $B = 0.1$ の場合のグラフである。

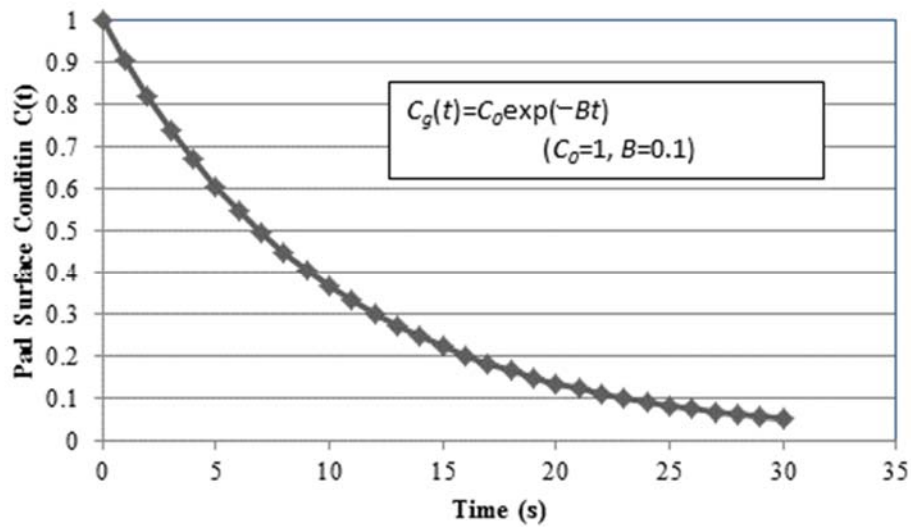


図 2.5 研磨によるパッド表面状態変化を表すグラフ

目詰まりについてのミクロ的なメカニズムは不明であるが、数多く報告されている研磨中の研磨レート低下の挙動は図 2.5 に表される指数関数のカーブに非常によく似ている。実験結果とこの関数の一致性を確認するためには、式(2-2)を研磨レートに換算する必要がある。そこで、パッド上すべての領域が“H”の状態にあるときの研磨レートを R_H 、すべての領域が“L”の状態にあるときの研磨レート R_L と仮定すると、その途中の状態 $C(t)$ における研磨レートは式(2-3)で表すことができる。

$$RR = R_L + (R_H - R_L)C(t) \quad (2-3)$$

Stein 等はドレッシングなしで研磨を連続して行った場合の研磨レートの低下を報告している[16]。図 2.6 は彼らの実験データにマッチングするように式(2-2)と式(2-3)の各定数を合わせ込んで比較したグラフである。この時の各値は、Pad Lot A では $R_H = 214 \text{ nm/min}$ 、 $R_L = 90 \text{ nm/min}$ 、 $B = 0.001$ 、Pad Lot B では $R_H = 218 \text{ nm/min}$ 、 $R_L = 118 \text{ nm/min}$ 、 $B = 0.001$ であった。実験データと計算による値は非常に良い一致を示している。

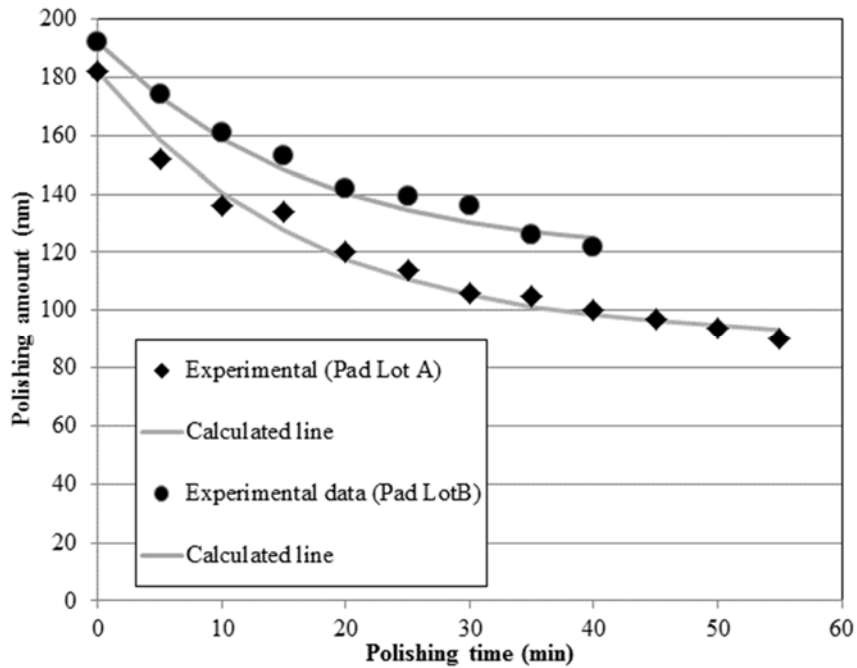


図 2.6 マクロモデルによる計算値と Stein 等の実験データの比較[16]

藤田等も同様の研磨レート低下現象を報告している[17]。図 2.7 は同様に実験データと計算値を合わせ込んだグラフである。ここでは $R_H=300$ nm/min、 $R_L=120$ nm/min、 $B=0.002$ であり、やはり非常に良い一致を示している。定数 B が図 2.6 と異なるのは、研磨条件や基板サイズ、プラテンサイズなどの違いによるものと考えられる。

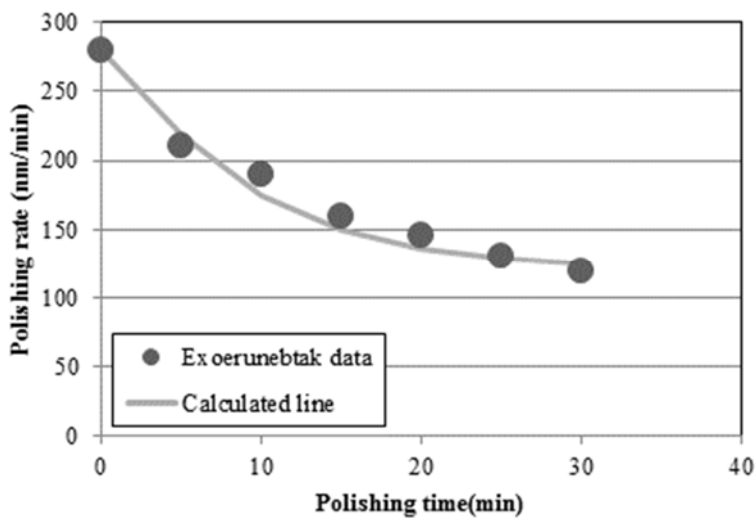


図 2.7 マクロモデルによる計算値と藤田等の実験データの比較[17]

2.3 実験

さらにこれらの式の妥当性を検証するために以下の実験を行った。PTEOS 膜を成膜した基板をドレッシング有り無しで連続研磨してその研磨レートの変化を測定した。最初に新品の研磨パッドのブレイクインを行い、20 枚の PTEOS 膜付きダミーウエハを *ex-situ* ドレスを適用して研磨し、パッド表面の安定状態を作り込んだ。その後ドレッシングなしで 25 枚の PTEOS 膜付きウエハを連続研磨し、その後ダミー研磨と同様の条件で 25 枚の PTEOS 膜付きウエハを研磨した。その後再びドレッシングなしで 25 枚の研磨を行い、再び 25 枚をドレッシング有りで研磨したが、この時のドレッシング時間はそれまでの条件の 3 分の 1 の時間とした。荏原製作所製 EPO-222 が CMP 装置として用いられ、研磨パッドにはニッタハース社製の SUBA400 と積層した IC1000 に XY 溝加工を施したものをを用いた。スラリーにはニッタハース社製の酸化膜用スラリーILD-3225 を用いた。このスラリーはフェームドシリカを KOH 溶液中に分散したもので、DIW で希釈して砥粒濃度を 12.5%に調整した。ドレッサーは 270mm の直径のホイールに KINIK 社製ダイヤモンドペレット PDE181EP1AG150730NC を装着したものをを用いた。

研磨条件を表 2-II にまとめた。PTEOS 膜の研磨レートの変化を、提案したモデル式による計算値と比較して図 2.8 に示す。ここで、定数 A は 0.0177、 B は 0.001833 であった。ドレスなしの際の研磨レート低下のカーブだけではなく、異なるドレス時間での研磨レートの変化も計算値とよく一致していることがわかる。

表 2-II 研磨条件

	Parameters	Condition		Parameters	Condition
研磨条件	ウエハ圧力	45 kPa	ドレス条件	Type	Ex-situ
	プラテン回転	60 min ⁻¹		荷重	100 N
	ヘッド回転	41 min ⁻¹		プラテン回転	40 min ⁻¹
	スラリー流量	150 ml/min		ディスク回転	17 min ⁻¹
	時間	60 s		時間	18 or 6 s

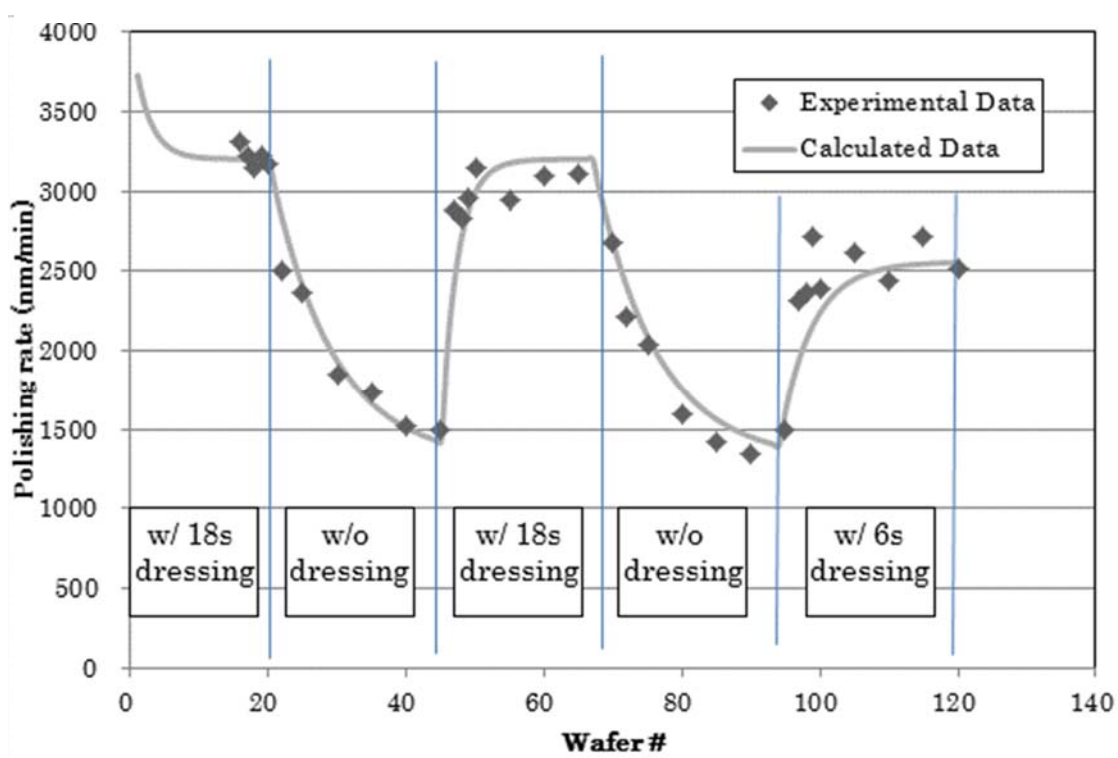


図 2.8 PTEOS の研磨レート変化:マクロモデルによる計算値と実験データの比較

2.4 マクロモデルによる様々な研磨挙動の表現

パッドの表面状態に起因すると考えられる研磨レート変動現象には様々な事例がある。そうした挙動を、提案したマクロモデルで表現することが可能かどうかをいくつかの事例で検証してみる。

2.4.1 ex-situ ドレスによる研磨レート安定化挙動

実際のデバイス製造ラインで ex-situ ドレスを用いる場合は、1枚研磨毎にドレスを行う。これを式(2-1)、(2-2)を用いて表現すると以下ようになる。初期状態 C_0 からドレス時間 t_d ドレスを行うと表面状態は式(2-1)に t_d を代入して式(2-4)で表されるが、これを研磨の初期状態として式(2-2)に代入すると研磨時間 t_g に対して式(2-5)で表すことができる。

$$C_a(t_d) = 1 + (C_0 - 1)exp(-At_d) \quad (2-4)$$

$$C_g(t_g) = C_a(t_d)exp(-Bt_g) \quad (2-5)$$

この値が次のドレス時の初期値 C_0 として用いられこのサイクルが連続していく。図 2.9 は初期値 C_0 を 0 と 1 から、すなわち、完全にパッド表面がドレスされた状態と完全に目詰まりした状態からのパッド表面状態の変化をモデル式により計算した結果である。ここで、定数 A には 0.01323 を用いたが、これは 2.1 節で求めたドレッサーのパッド表面変化率 3%に相当する。定数 B には 2.3 節の実験で求められた 0.001833 を用いた。ドレス時間は 15 s とし、研磨時間は 60 s とした。パッド表面状態を表すカーブは初期値にかかわらず一定値に収束することがわかる。これは、ドレス条件と研磨条件が決まると連続研磨によりある一定の研磨レートに収束することを示している。これがダミー研磨の効果であると考えられる。経験的に生産現場ではダミーウエハを連続研磨することにより研磨レートの安定化を図ってきたが、このマクロモデルは研磨レート安定化のメカニズムをうまく説明していると思われる。

ドレッシングのパラメータを変化させた場合の効果を図 2.10 に示す。ここでは定数 A のみを 0.00656 に変化させた。この値は 1 秒間のドレスによるパッド表面の変化率 1.5%に相当する。平衡状態の表面状態の値は図 2.9 よりも低く、ま

た、平衡に達する時間も図 2.9 よりも長い。これもドレッサーが劣化してくると研磨レートが低くなり、レート安定化に時間がかかるという経験と良く一致する。

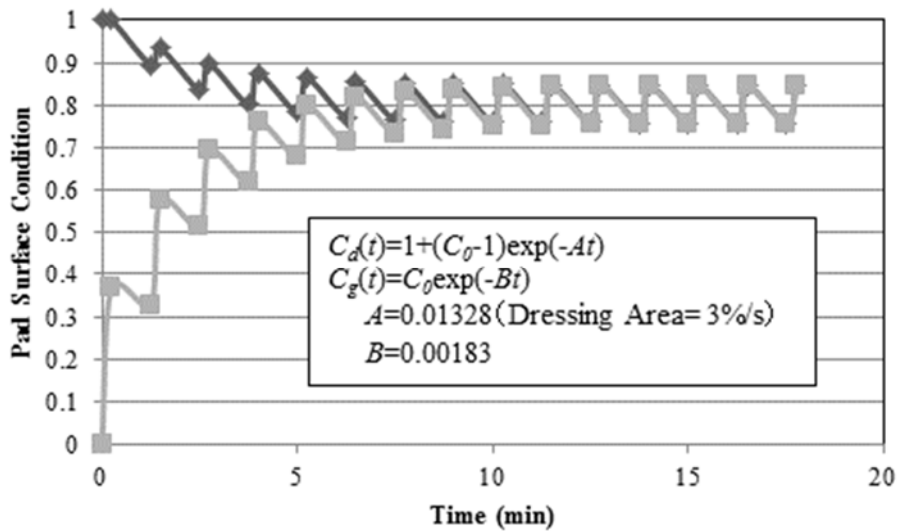


図 2.9 ex-situ ドレス研磨を連続した場合のパッド表面状態の変化①

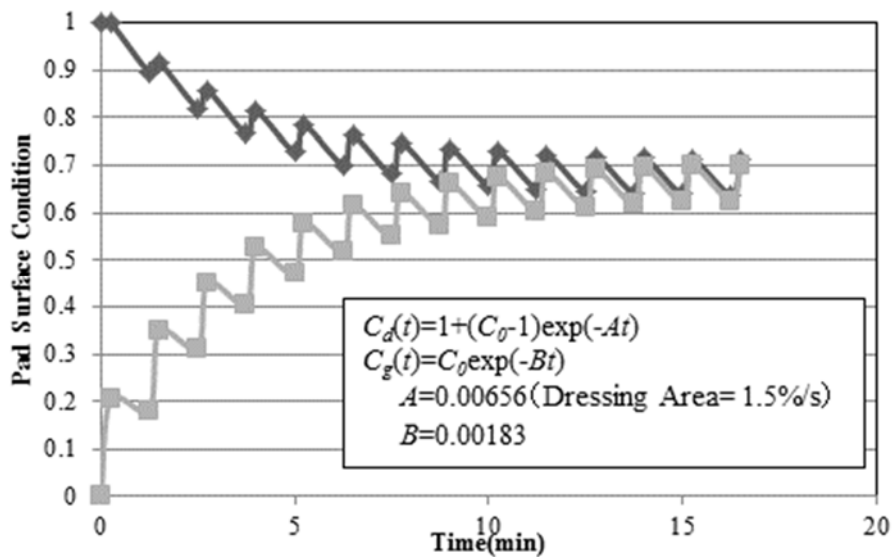


図 2.10 ex-situ ドレス研磨を連続した場合のパッド表面状態の変化②

2.4.2 in-situ ドレスによる研磨レート安定化挙動

近年では ILDCMP のドレスには In-situ ドレスを適用する機会が多い。in-situ ドレスでは研磨と同時にドレスを行うが、パッド上の 1 点に着目すると、パッドが 1 回転する間にウエハとドレッサーが通過する。すなわち、短時間の研磨とドレスを繰り返していると考えることができる。そこで、図 2.10 と同じ定数を用いて計算した。プラテン回転速度は 60 min^{-1} とし、ドレスのデューティ比は 1.0、すなわち研磨中常にドレスを行うとした。図 2.11 にその結果を示す。平衡状態の表面状態の値は ex-situ ドレスの場合より高く、平衡状態に達する時間もきわめて短い(図 2.10 の横軸は min であるのに対し図 2.11 では s である)。この結果は、in-situ ドレスの方が ex-situ ドレスよりも研磨レートが高く安定性も高いという生産現場での経験と一致する。

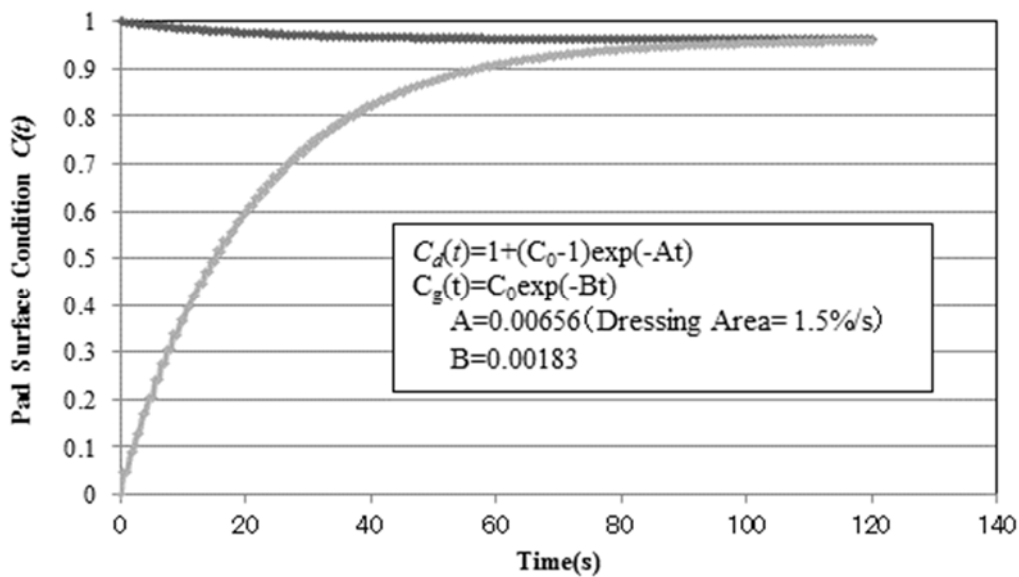


図 2.11 in-situ ドレス研磨時の研磨パッド表面変化

2.4.3 パターンウエハの研磨

ダミー研磨により研磨レートを安定化させたにもかかわらずパターン付きウエハを研磨するとその 1 枚目が過剰研磨となる場合がある。こうしたケースは ex-situ ドレスの時代によく見られた。この現象をマクロモデルにより表現して

みる。仮定として、パターンウエハによる研磨パッドの目詰まりはブランケットウエハよりも大きいとし、定数 B は 2.3 節で求めたブランケット膜の 2 倍の 0.00367 とした。パッド表面が安定した状態からブランケットウエハを 3 枚、パターンウエハを 10 枚、さらにブランケットウエハを 3 枚研磨した場合の表面状態の変化を図 2.12 に示す。パターンウエハによる平衡状態はブランケットウエハより低い値を示し、状態が安定するのに数枚の研磨が必要である。また、パターンウエハ研磨後にブランケットウエハを研磨するとパターンウエハの低い平衡状態に影響されて安定に時間がかかることがわかる。この挙動はこの節の最初に説明した実際に起きている現象をよく表現している。

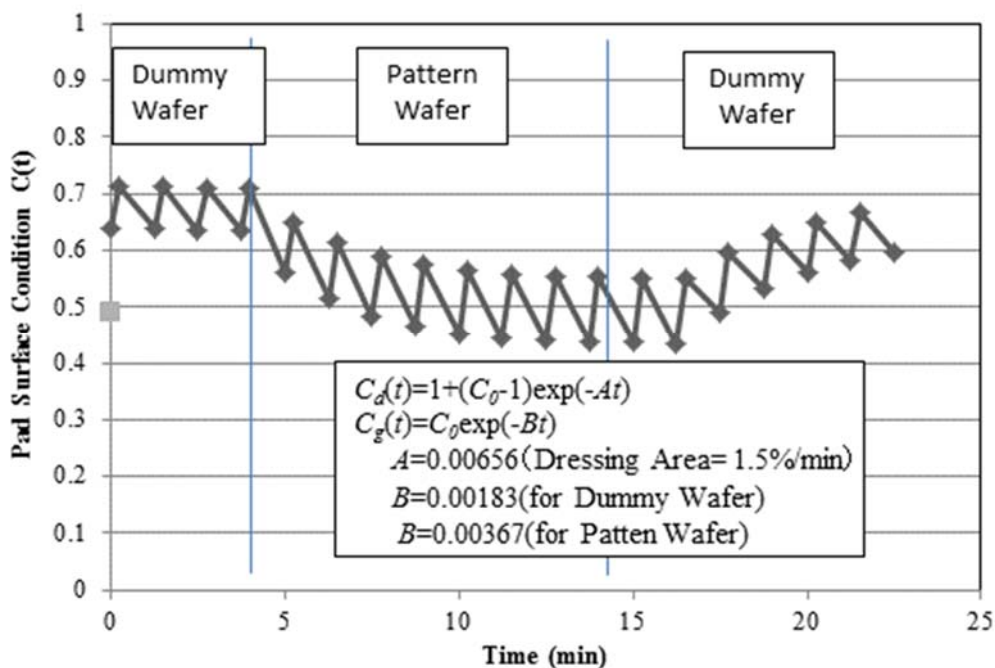


図 2.12 パターンウエハ研磨によるパッド表面状態変化

このモデルを用いて上記パターンウエハ研磨に関連した研磨レートの不安定性を解決することができる。図 2.13 はダミーウエハの研磨時に研磨圧力を高めに設定してパターンウエハと定数 B を同じにした場合を示している。パターンウエハの 1 枚目からパッド表面状態は安定している。これ以外にもドレス時間を短く設定してパターンウエハと同じ平衡状態に合わせ込むことも考えられる。

次に、同じ条件で in-situ ドレスを用いてパターンウエハを研磨した場合のパッド表面状態の変化を図 2.13 に示す。ブランケットウエハの場合と同様に、平衡状態までの時間が ex-situ ドレスの場合より短く、パターン付きウエハでも in-situ ドレスの方が ex-situ ドレスよりも研磨レートの安定性が高いという経験と良く一致する。

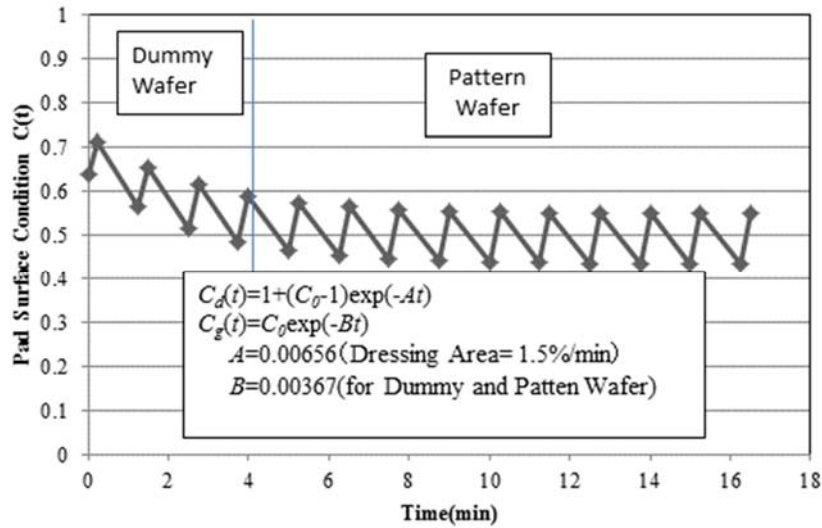


図 2.13 パターンウエハ研磨によるパッド表面状態の変化：ダミー研磨条件による安定化

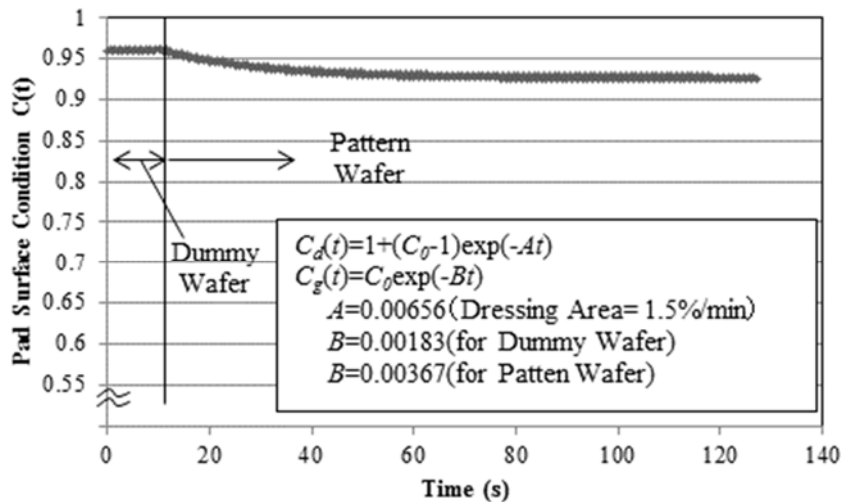


図 2.14 パターンウエハ研磨によるパッド表面状態の変化 (in-situ ドレスの場合)

2.4.4 ブレークインフリーパッドの効果

通常はブレークイン工程により研磨パッドの表面を量産時に近づける必要がある。この工程は通常 30 分程度のドレッシングによりなされ、さらに数枚から数 10 枚のダミーウエハ研磨が必要であり、CMP の生産性を低下させる一要因となっている。研磨パッドの表面を工場出荷前に一定の粗さに仕上げる「ブレークインフリー」パッドがニッタハースにより開発され、すでに量産適用されている。この製品の効果をマクロモデルに基づいて説明する[15]。

図 2.15 は従来の研磨パッドの表面状態の変化を示したものである。工場出荷時には非常に低いパッド表面状態にあるがブレークインとダミー研磨により量産研磨状態に近づける。しかし、コンディショナーのばらつきや研磨パッド物性のばらつき、その他の要因によってブレークイン後の到達表面状態にはある程度のレンジが存在する。そのため、ダミー研磨を行うことによって、前節までに述べてきた自律的作用により量産時の平衡状態に近づけるのだが、ブレークイン直後の表面状態が不明のため、考えられる最大の表面状態のばらつきに対応できるだけの枚数のダミー研磨を行う必要があり、生産性を落としている。

一方、ブレークインフリーパッドでは、研磨パッド工場にて表面を加工し、その表面状態を検査することができるため、表面状態のばらつきも最小限に抑えることが出来る。そのため、図 2.16 に示すように、ダミー枚数も最小限に抑えることが可能で、単にブレークイン工程を省略できるだけでなく、ダミー枚数も最小限に抑えることができ、研磨パッド交換に伴う生産性の悪化を大幅に改善することに成功しているのである。

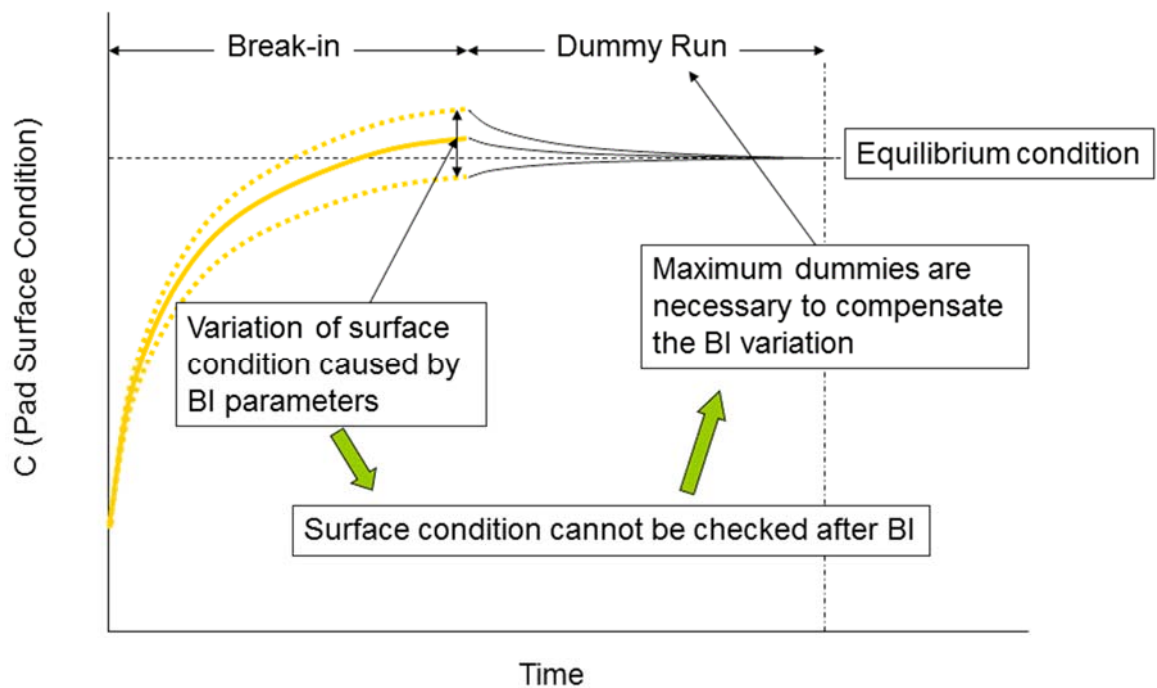


図 2.15 新品研磨パッドのブレイクインとダミー研磨による研磨パッド表面状態の変化

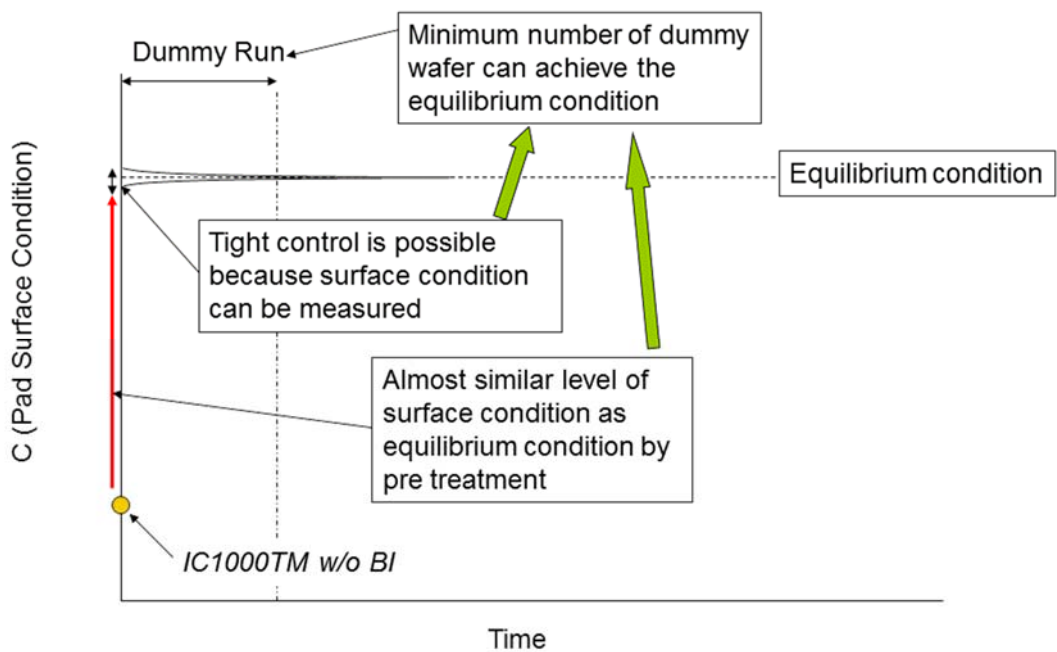


図 2.16 ブレイクインフリーパッドの研磨パッド表面状態の変化

2.5 結論

ドレッシングと研磨により変化する研磨パッド表面状態、およびそれに伴う研磨レートの変化を表す式を提案した。この式はパッド表面の微視的变化に着目したものではなく、パッド表面を小さいエリアに分割し、それぞれのエリアが、レートが低い“L”とレートが高い“H”のいずれかの状態をとるとし、その状態がドレッシングと研磨により一定の割合で変化するという仮定に基づいて導き出した。単純なモデルであるにもかかわらず、自他の実験結果ときわめて良い一致を示した。これはあくまでも経験式と位置づけられるが、様々な量産現場における研磨レート変動現象をよく説明することが出来ていることを確認した。このモデルは、研磨レート安定化のための方策として、研磨条件やダミー研磨条件の最適化の方向性を示し、また、消耗材料の開発の指針を示すことが期待される。

第 2 章の参考文献

- [1] G. Namtz and L. Camilletti: “Modeling of chemical mechanical polishing: A review”, IEEE Trans. Semicond. Manuf. **8** (1995) 382.
- [2] S. Wiegand and D. Stoyan: “Stochastic models for pad structure and pad conditioning used in chemical -mechanical polishing”, J. Eng. Math. **54** (2006) 333.
- [3] Y. Yamada, M. Kawakubo, and K. Kadomura: “Diamond conditioner micro wear effect on pad surface height distribution in tungsten chemical mechanical polishing “, Jpn. J. Appl. Phys. **55** (2011) 05EC05.
- [4] J. C. Yang, J. H. Choi, T. Hwang, C. G. Lee, and T. S. Kim: “Effect of diamond size of CMP conditioner on wafer removal rates and defects for solid (non-porous) CMP pad with micro-holes”, Int. J. Mach. Tools Manuf. **50** (2010) 860.
- [5] A. S. Lawing: “Pad conditioning and pad surface characterization in oxide chemical mechanical polishing”, MRS Proc. **732** (2002) 15-3.
- [6] A.S. Lawing: “Pad conditioning effects in chemical mechanical polishing”, presented at SEMI Technol. Symp. SEMICON China, 2004.
- [7] A. S. Lawing and C. Juras: “Pad surface analysis and conditioning effects: Implications on process design, break-in response and next generation pad and conditioning platforms”, Proc. ICPT, 2007, p. 25.
- [8] G.P. Muldowney: “The effect of pad grooving and texturing on CMP process performance”, Proc. PacRim, 2004, p. 31.
- [9] G.P. Muldowney: “Microscopy based description of CMP pad microtexture and asperity-scale modeling of slurry flow dynamics”, Proc. CMPMIC, 2006, 7.G.
- [10] C. L. Elmufdi and G. P. Muldowney: “A novel optical technique to measure pad-wafer contact area in chemical mechanical planarization”, MRS Proc. **914** (2006) F12-06.
- [11] T. Sun, L. Borucki, Y. Zhuang and A. Philipossian: “Investigation of diamond grid size and conditioning force effect on CMP pads topography”, MRS Proc. **991** (2007) C01-07.
- [12] Y. Yamada, M. Kawakubo, O. Hirai, N. Konishi, S. Kurokawa, and T. Doi: “Frictional characterization of chemical-mechanical polishing pad surface diamond

- conditioner wear”, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 6282.
- [13] 尾形、妹尾、吉田、磯部：「研磨性能に影響を及ぼすパッド表面指標の研究」精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 2010年 p.143.
- [14] Akira Isobe, Kenjiro Ogata, and Shuhei Kurokawa: “Macromodel for changes in polishing pad surface condition caused by dressing and polishing”, Jpn. J. Appl. Phys. **53**(2014) 016501.
- [15] A. Isobe, and J.H. Park: “Study of pad surface treatment for the improvement of process performance and productivity”, presented at 12th International symposium on Chemical Mechanical Planarization(CAMP), 2007.
- [16] D. Stein, D. Hetherington, M. Dugger, and T. Stout: “Optical interferometry for surface measurements of CMP Pads”, J. Electron. Mater. **25** (1996) 1623.
- [17] 藤田、石倉、河井、森岡：「パッド表面分析による研磨メカニズムの研究(第2報)–ドレッシング無しの研磨過程におけるパッド表面状態の解析–」,精密工学会誌 **74** (2008) 815.

第3章 フェレ径に基づいた研磨メカニズムの提案

本章では新たな材料除去マイクロモデルを提案する。従来の材料除去モデルでは現実の研磨を考えると辻褃の合わない部分がある。そうした矛盾点を解消するために、パッドアスペリティの基板との接触部周縁で砥粒が作用しているという新しいモデルを提案した。様々なパッド表面パラメータと研磨レートの関係について評価を行い、提案したモデルの妥当性を確認した。また、このモデルによっても研磨レートの圧力依存性が説明できることを示した。

3.1 従来モデルの問題点

第1章でいくつかの材料除去モデルを示した。Qin、Luo や Choi 等のモデルはいずれもパッドのコンタクト部に面積に比例した数の砥粒が存在して材料除去を行うと考えている[1-4]。しかしながら、パッドの凸部と基板に挟まれて、パッド表面に埋め込まれた形で砥粒が存在するということが現実に起こりうるのであろうか？パッドが基板の下を通過する際、密着した基板／パッド界面に砥粒が侵入することは難しいと考えられる。近年、基板／パッド間のスラリー中の砥粒の動きを直接観察した報告がなされているが[5,6]、砥粒は研磨パッドアスペリティの谷を移動するが、移動した砥粒がパッドと基板の接触部に挟まれるというような報告は見られていない。パッドが基板の直下にはその表面に砥粒は存在しうるが、基板直下にパッドが移動する際にそのままそこに残るだろうか。基板によってこそぎ落とされると考える方が自然であろう。仮に砥粒が基板／パッド界面に存在するとして、それはパッドが基板外にあるときに凸部上に存在した砥粒の一部が、パッドが基板直下に移動したときにも残ったものと考えることが出来るかもしれない。しかし、彼らのモデルはプレストンの式[7]における研磨レートの圧力依存性の説明として提示されており、そうした圧力依存に伴うパッド接触面積の変化と、基板／パッド界面に残留する砥粒数に都合良く比例関係が存在するというのは考えづらい。さらに譲って、パッドの基板接触部にその面積に比例した砥粒が存在すると仮定した場合にも、砥粒1個あたりの材料除去量を計算してみると矛盾が生じる。パッドが基板直下を通過する間は砥粒の入れ替えが生じないと仮定するならば、その間砥粒は

材料除去をし続けることになる。移動距離が 200mm、図 1.13 で示した砥粒 1 個あたりの材料除去の断面積を最小単位の分子 1 個分として $0.5 \text{ nm} \times 0.5 \text{ nm}$ と仮定すると、砥粒 1 個の材料除去体積は $0.5 \times 0.5 \times 200 = 50 \times 10^6 \text{ nm}^3$ となる。これはほぼ $\phi 500 \text{ nm}$ の球体に相当し、50 nm 程度の砥粒の大きさを想定したときに大きすぎる値である。一方、パッドの接触部以外で材料除去が行われているというモデル[8]についてはどうだろう。確かにこのモデルでは、砥粒は常に入れ替わりながら材料除去を行っているので、砥粒 1 個あたりの材料除去量は少なくともトータルの研磨レートを達成することが可能であろう。しかし、このモデルでは今のところ研磨レートの圧力依存性を説明することが出来ていない。

次節以降にて、上記問題点を解消する新たなモデルを提案し、その妥当性確認実験結果、さらにはそのモデルによる研磨レートの圧力依存性についての検証を行っていく。

3.2 提案モデル

提案するモデルについて図 3.1 を用いて説明する。パッドアスペリティの谷の部分で移動してきたスラリー中の砥粒が、パッドの基板との接触部に滞留し、そこで材料除去を行うというものである。材料除去は、基板表面の材料が砥粒表面へ分子レベルで吸着されることにより行われる。砥粒はパッド接触部近傍で材料除去を行うが、常に入れ替わっていると考えられる。そのため、1 個あたりの材料除去量は少なくとも、多数の砥粒が作用することにより全体として高い研磨レートを達成することが可能となる。このモデルでは、研磨レートを決定しているのはやはり作用砥粒数であるが、ここでは砥粒が常に入れ替わっていると考えられるので平均作用砥粒数と考える。パッドの接触部あたりに滞留する砥粒数は、接触部面積ではなく、進行方向に対する接触部の幅に比例すると考えることが出来る。グラウンドを整地するのに使うトンボのイメージである。

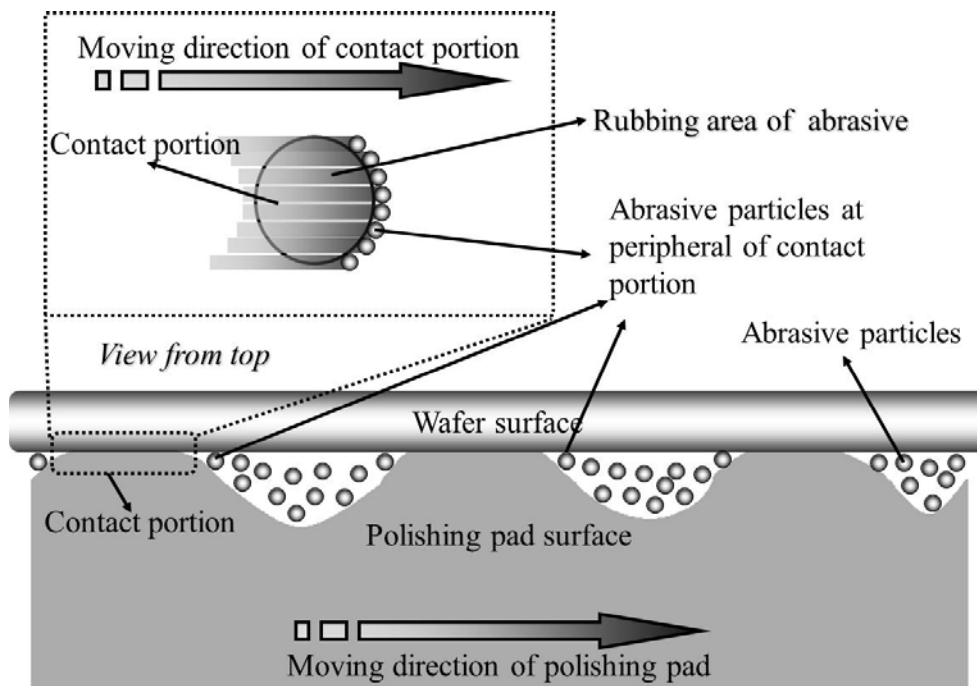


図 3.1 提案モデルの説明図

3.3 実験方法

上記モデルの妥当性を確認するため、様々なパッド表面パラメータと研磨レートとの関係を調べる実験を行った。前章で述べたように研磨パッド表面は研磨そのものによって刻々と変化し、研磨レートも一定とはならない。特に酸化膜研磨において顕著である[9-11]。これはスラリー中の砥粒によってパッド表面も研磨されることにより、パッド表面アスペリティが変化するためと考えられている。このような非定常の状態ではパッド表面と研磨レートとの関係を調べることは難しい。そこで、スラリー中の砥粒濃度が低く研磨中のパッド表面状態変化が少ないと考えられるタングステン CMP で実験を行った。タングステン CMP のメカニズムはスラリー中の酸化剤により酸化されたタングステン膜表面が砥粒により機械的に研磨されるというものである[12,13]。酸化は CMP の C (=化学的要素) であるが、本評価内では同一条件を用いているのでほぼ一定と考えることができ、パッド表面状態に起因した M (=機械的要素) のみの比較ができると考えられる。

ニッタハース社製 IC1400 を研磨パッドとして用いた。4 種類の異なる表面状態をサンドペーパーの番手を変えたバフにより作製した[14,15]。表面粗さはキーンズ社製粗さ測定機 VK-9700 を用いて R_a 、 R_p 、 R_v 、 R_z を求めた[16-18]。パッドと基板の接触状態は、図 3.2 に示すように、研磨実験で適用した基板圧力と同じ 35 kPa でパッドサンプルをサファイアガラスに押しつけレーザー顕微鏡を用いて観察した。図 3.3 はそれらのパッド表面の接触部の観察写真である。測定面積は $1.04 \times 1.38 \text{ mm}^2$ で、観察された画像から接触面積、接触点数、総フェレ径を求めた。フェレ径とは図 3.4 に示すように、接触部のある方向への投影長さのことである。総フェレ径 (F) は式(3-1)のように表すことができる。

$$F = \sum f_n \quad (3-1)$$

ここで、 f_n は個々のコンタクト部のフェレ径を表す。すなわち、視野内の全ての接触部のフェレ径の総和である。

CMP 実験は荏原製作所製 EPO-222 を用い、スラリーにはキャボット社製 SSW-2000 に H_2O_2 2wt% を添加し純水で 2 倍希釈したものをを用いた。このスラリーのシリカ砥粒濃度は原液中で 6%、研磨時の濃度は 3% 以下となっており、通

常の酸化膜用スラリーの 12.5% よりもはるかに少ない。

研磨条件は基板圧力 35 kPa、プラテンとヘッドの回転速度はそれぞれ 120、119 min^{-1} 、スラリー流量は 125 ml/min、研磨時間は 60 s であった。200mm 径の基板上にシリコン酸化膜と TiN 膜を介してタングステン 800nm が成膜されたものを研磨し、研磨レートは 4 端子シート抵抗測定機を用いて測定したものを膜厚に換算し、研磨前後の差から求めた。

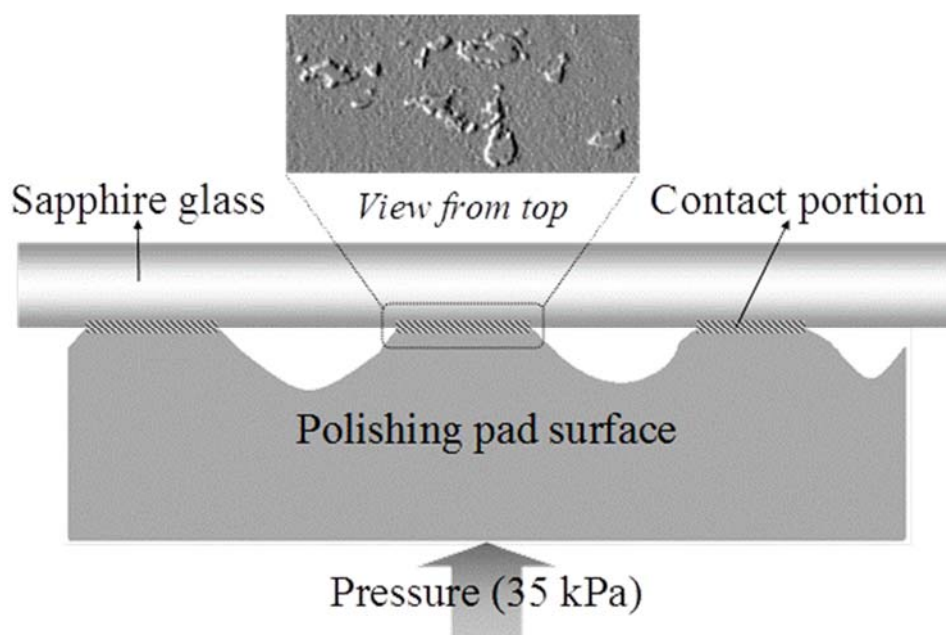


図 3.2 パッドの接触状態の測定

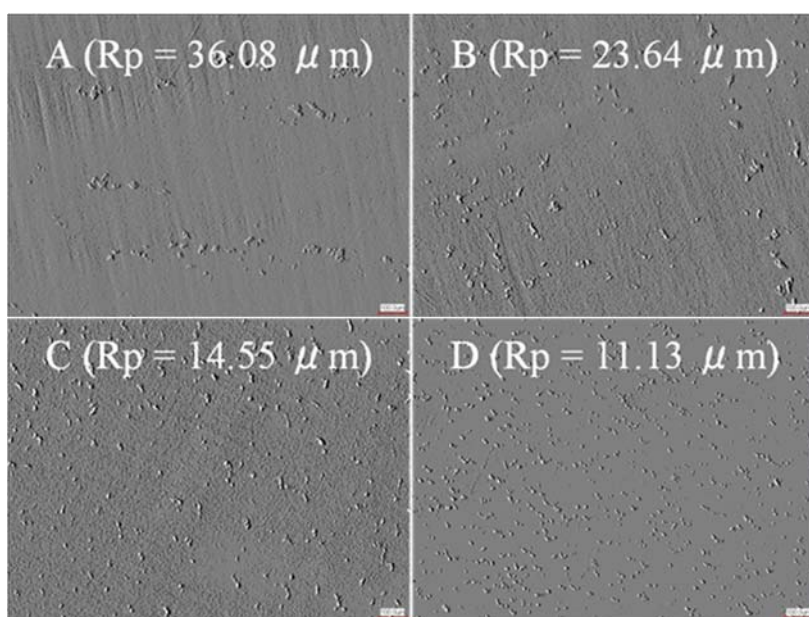


図 3.3 評価した 4 種類のパッド表面状態

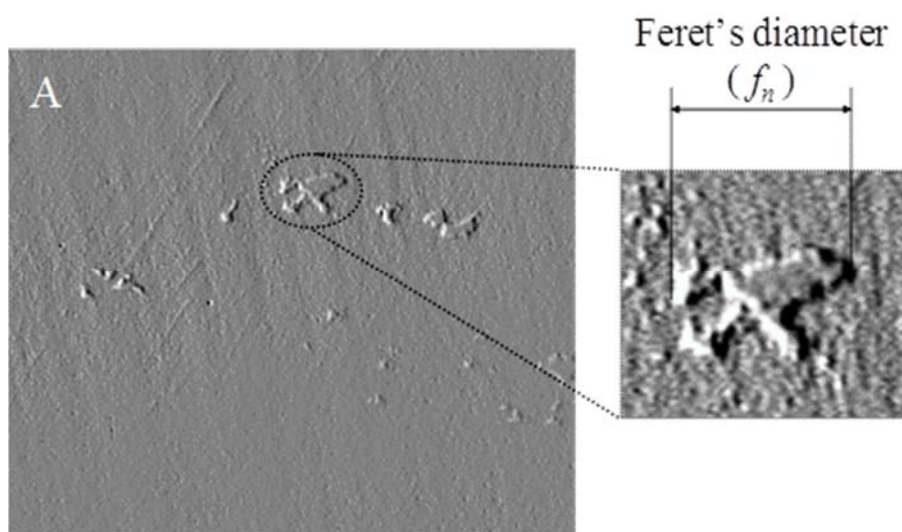


図 3.4 フェレ径の定義

3.4 実験結果

パッド表面粗さの評価結果を表 3-I にまとめた。図 3.5～図 3.8 には各粗さ指標に基づく研磨レートとパッド表面粗さの関係を示す。図 3.5 は R_p と研磨レート（研磨レート）の関係である。 R_p が高いほど研磨レートは低くなる傾向が見られるが、その関係はリニアではない。他の粗さ指標 R_a 、 R_v 、 R_z についても同様の傾向である。一般的にこれらの指標は粗さの波長を考慮していないため研磨のキーパラメータとはなり得ないと考えられる（図 3.9）。Khajornrugang 等はパッド表面粗さの波長を考慮したパワースペクトラム解析を提案しているが [11]、それでも「粗さ」そのものは直接的なキーパラメータとはなりえないと考える。実際の研磨中にはパッドの基板への接触部が仕事をしていると考え、その接触状態を表す指標の方がより直接的と考えられるからである。パッドの表面粗さももちろんパッドの接触状態に強い影響を及ぼしそのため研磨レートと相関があるように見えるが、あくまでも間接的なパラメータであると考えべきである。

表 3-I 評価パッドの各粗さ指標

	R_p (μm)	R_v (μm)	R_z (μm)	R_a (μm)
Pad A	36.07	13.50	49.41	8.38
Pad B	23.64	8.04	31.79	5.04
Pad C	14.55	4.08	18.64	2.82
Pad D	11.13	3.24	14.37	2.44

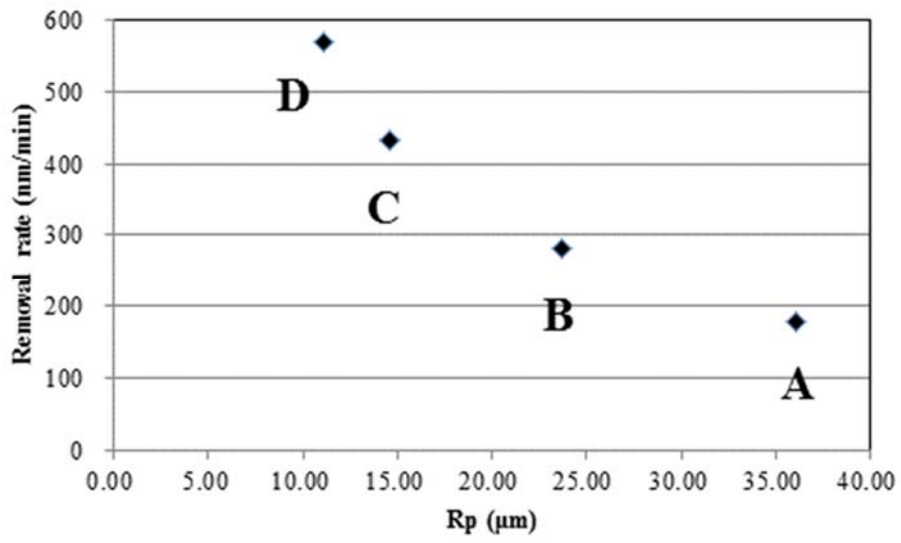


図 3.5 R_p と研磨レートの関係

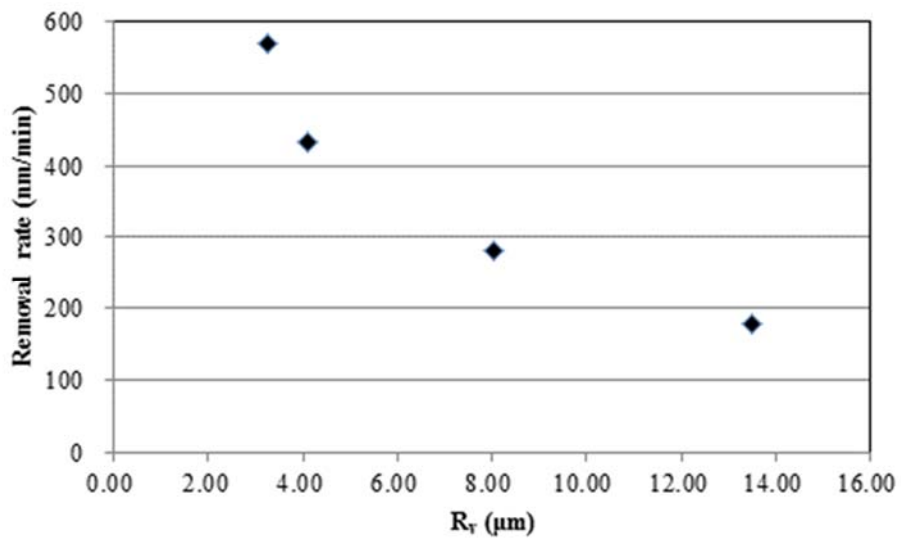


図 3.6 R_r と研磨レートの関係

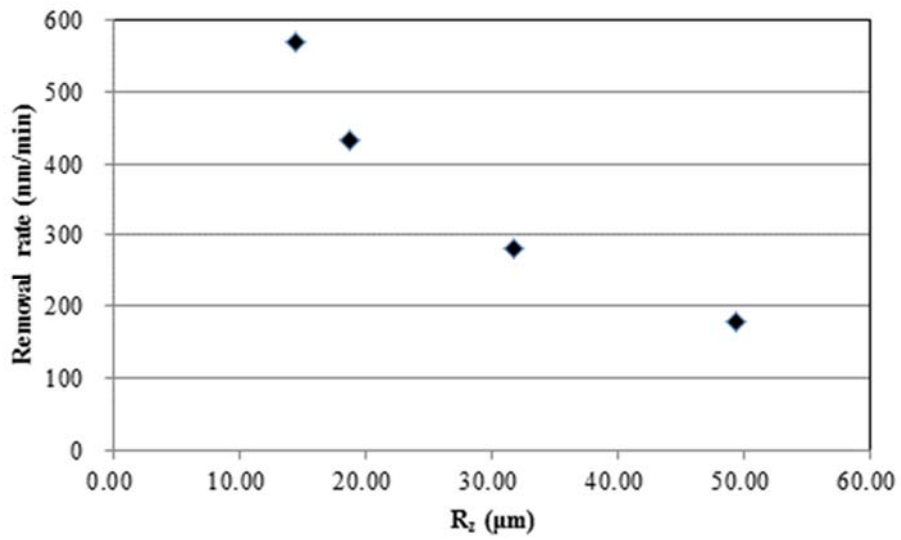


図 3.7 R_z と研磨レートの関係

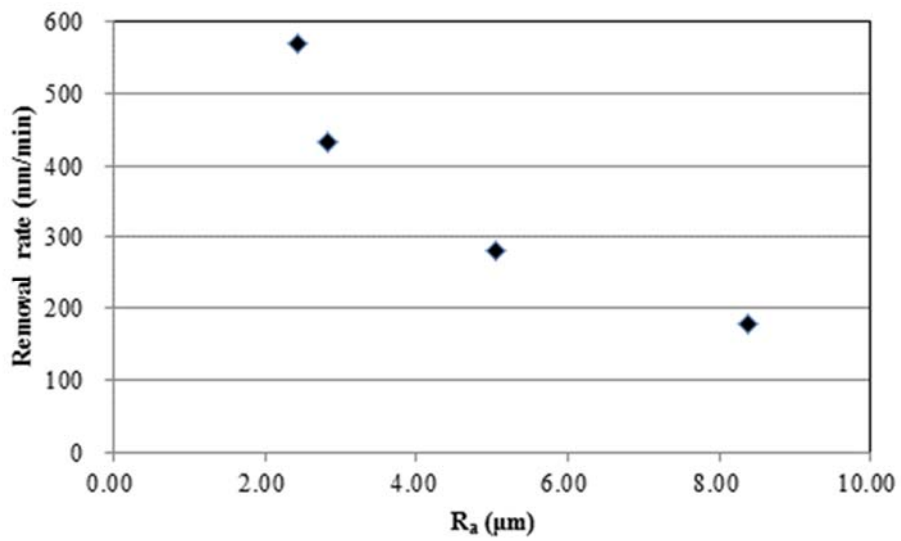


図 3.8 R_a と研磨レートの関係

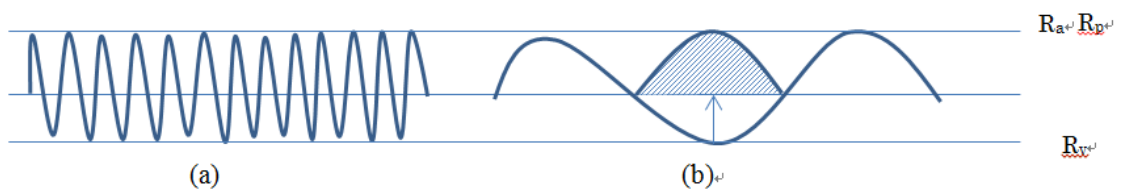


図 3.9 粗さ指標の説明図、(a)も(b)も同じ R_a 、 R_p 、 R_v を示す

パッドの接触状態に関する測定結果を表 3-II にまとめた。図 3.10 は研磨レートとパッドの接触面積の関係を示した。ここで、接触面積の定義は 1 mm^2 の面積中の接触面積 (μm^2) である。以降の各指標も同様に 1 mm^2 中の値に換算している。接触面積が大きいほど研磨レートが高い。しかし、その相関関係はリニアではない。図 3.11 は接触点数と研磨レートの関係であるが、やはり接触面積と同様に接触点数が多いほど研磨レートは高いもののリニアとは言えない。最後に総フェレ径と研磨レートの関係を図 3.12 に示す。4つのプロットが綺麗に直線上に並んでおりリニアな関係にあることがわかる。

表 3-II 各パッドの接触状態指標 ($/\text{mm}^2$)

	Number of Contact Portion	Contact Area (μm^2)	Total Feret's Diameter (μm)
Pad A	118	9252	1078
Pad B	261	26261	2564
Pad C	474	41398	4438
Pad D	525	45688	5764

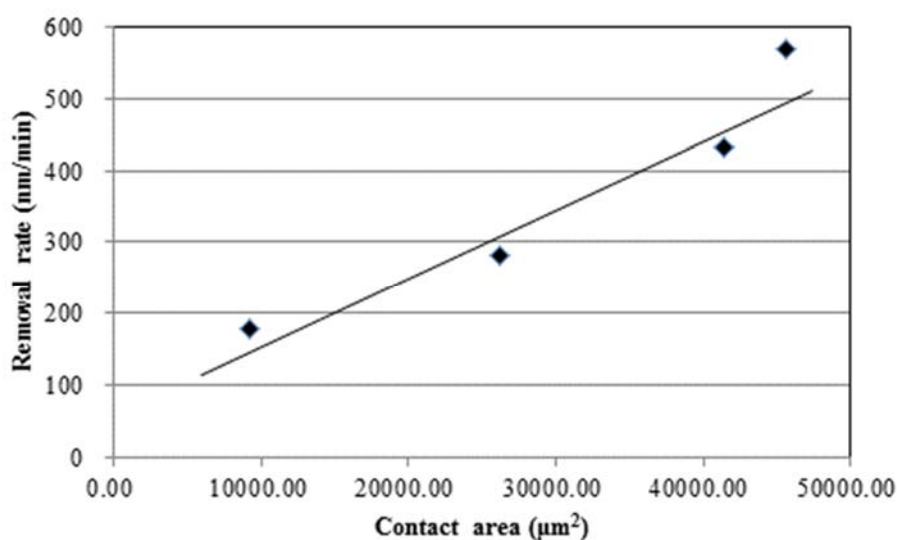


図 3.10 接触面積と研磨レートの関係

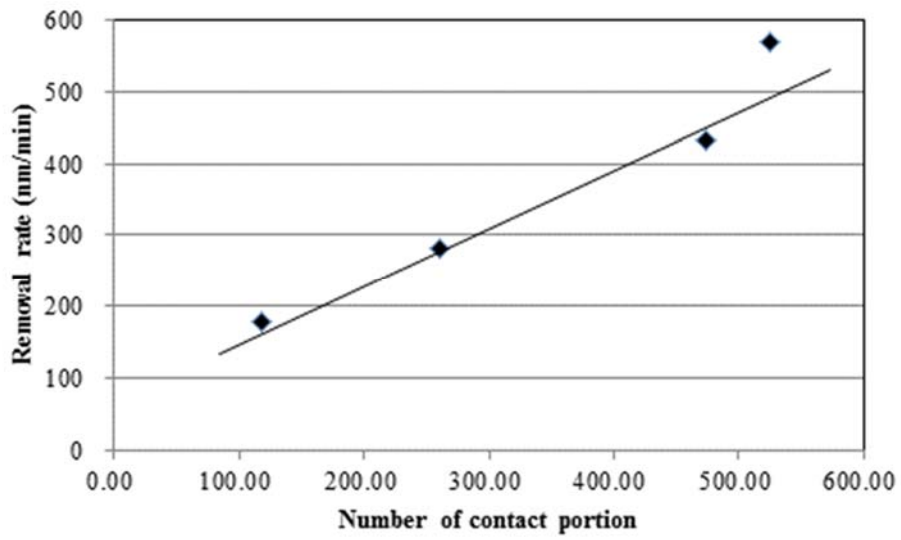


図 3.11 接触点数と研磨レートの関係

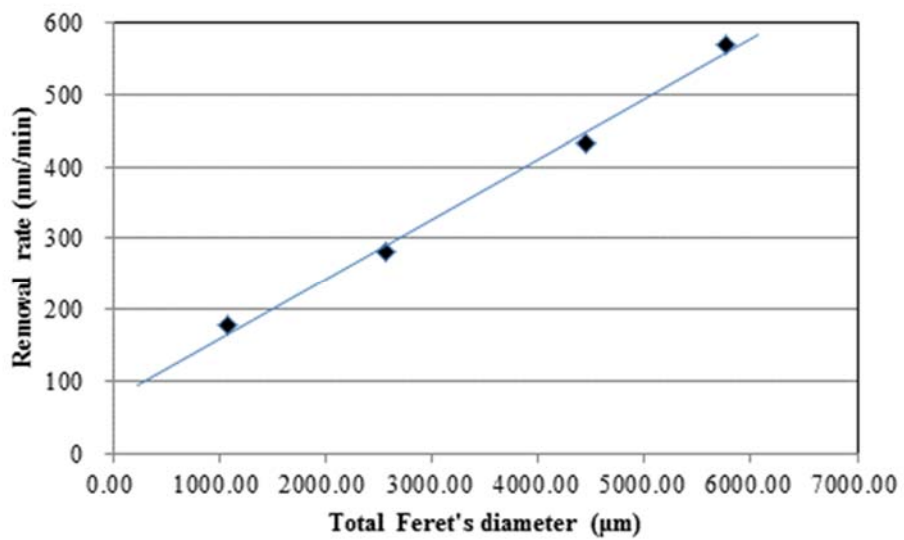


図 3.12 総フェレ径と研磨レートの関係

3.5 考察

総フェレ径とはまさに 3.2 節で説明したトンボの幅に相当するパラメータである。図 3.13 は研磨中の基板接触部の基板上の軌跡を示す。ここで、単位時間の軌跡の総和は、フェレ径×軌跡の長さ（＝相対速度）で表される。スラリー中の砥粒が図 3.1 に示すようにパッドの接触部の進行方向側の周縁に滞留すると考えるならば、接触部に滞留する砥粒数はフェレ径に比例すると考えられる。したがって、フェレ径と研磨レートが比例するという結果は提案したモデルが妥当であることの検証となっている。

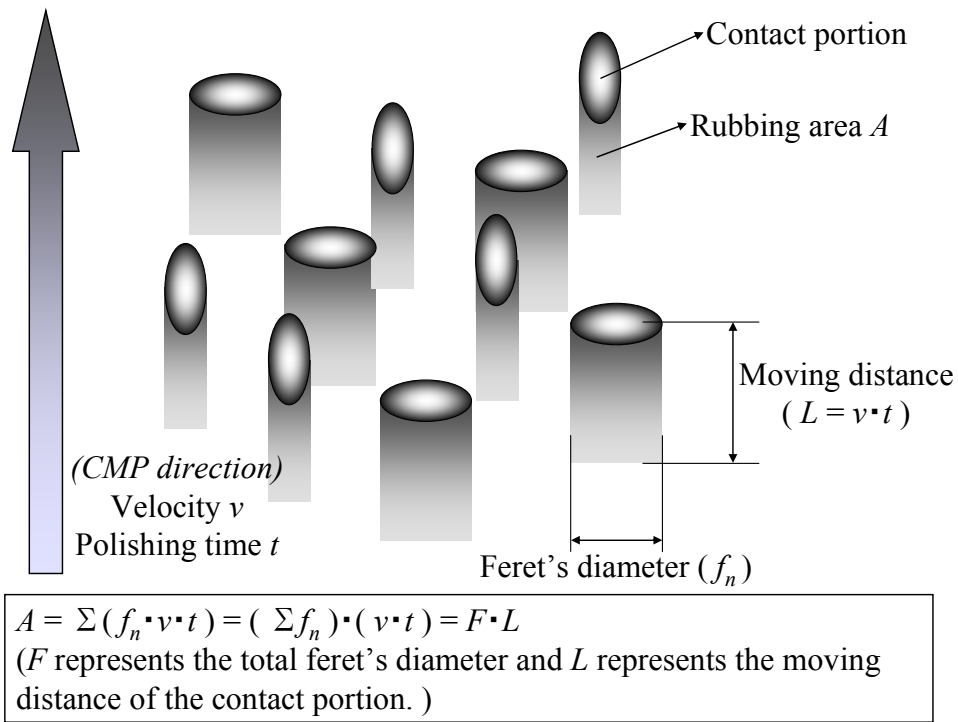


図 3.13 総フェレ径と移動距離

総フェレ径と研磨レートの間に関係があることを示したが、直線を延長すると y 軸との交点は 100 nm/min あたりであることがわかる。これは、図 3.14 に示すように、パッドのアスペリティが基板に接触しなくても、砥粒径未満の距離にピークが存在することにより砥粒が滞留しうることによって説明できる。

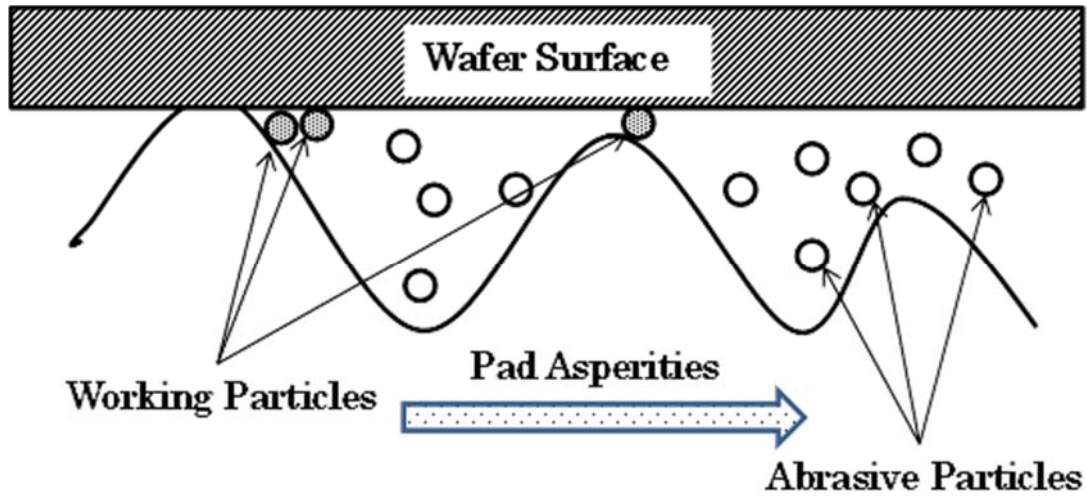


図 3.14 基板表面近傍の研磨パッド表面アスペリティと砥粒

最後に、このモデルで研磨レートの圧力依存性が説明できるかを検証する。接触点数が一定だとすると総接触面積は基板圧力に比例するので、フェレ径は（基板圧力）^{1/2} に比例する。しかし、基板圧力が増加すると新たな接触部が発生するため、この関係は成り立たない。そこで、総フェレ径と接触面積の関係を計算してみる。第 1 章で説明したように三橋等は接触面積と基板圧力は比例関係があることを実験結果で示し[20]、Qin 等は理論式で示した[1]。Qin の報告では接触面積 A は式 (3-2) で表される。そして、基板荷重 L は式 (3-3) で表される。

$$A = \pi N A_0 \beta \int_h^{\infty} (z - h) \varphi(z) dz \quad (3-2)$$

$$L = \frac{4}{3} N A_0 E^* \beta^{1/2} \int_h^{\infty} (z - h)^{3/2} \varphi(z) dz \quad (3-3)$$

ここで、 N はパッド表面のアスペリティ密度、 A_0 は基板面積、 β はアスペリティの頂点の平均曲率半径、 h はアスペリティを有するパッド表面と平滑な基板間の距離、 φ はアスペリティ高さの分布関数、 E^* は接触したパッドと基板の複合弾性率で、以下の式で定義される。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_w^2}{E_w} \quad (3-4)$$

ここで、 E と ν はそれぞれヤング率とポアソン比で、下付きの p と w はそれぞれ

れパッドと基板を表す。Qin は式(3-5)で表される正規分布を式(3-2)と(3-3)に用い、さらに数値計算によって接触面積が基板圧力に比例することを示したのである。

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-5)$$

ここで、 σ はパッドアスペリティ高さの標準偏差である。

もし、総フェレ径と接触面積の関係が比例関係にあるならば、総フェレ径は基板圧力と比例関係にあることになり、研磨レートの圧力依存性を説明できることになる。総フェレ径 F は式(3-2)から式(3-6)で表すことができる。

$$F = 2NA_0\beta^{1/2} \int_h^\infty (z-h)^{1/2} \varphi(z) dz \quad (3-6)$$

この積分は解くことができないため、数値計算により求めてみる。入力した値は、 $\sigma=10 \mu\text{m}$ 、 $\beta=25 \mu\text{m}$ とした。計算結果を図 3.15 に示す。このグラフから総フェレ径は接触面積と比例に近い関係があることがわかる。したがって、総フェレ径は基板圧力とほぼ比例関係があると言うことができ、プレストンの式の圧力依存性をフェレ径でも説明できることになる。得られたカーブは若干上に凸であるが、研磨レートと圧力の関係でこうした傾向は多く報告されており、そうした傾向も含めてフェレ径こそが研磨の圧力依存性をより正確に表現できているのかもしれない。ここで、注意すべきは、この計算は同じ表面アスペリティを有する研磨パッドの圧力を変化させた場合の総フェレ径と接触面積の関係を示すものであり、異なる研磨パッド表面では異なる傾きを示す。したがって、図 3.10 と図 3.12 で異なる傾向を示すこととは矛盾しない。

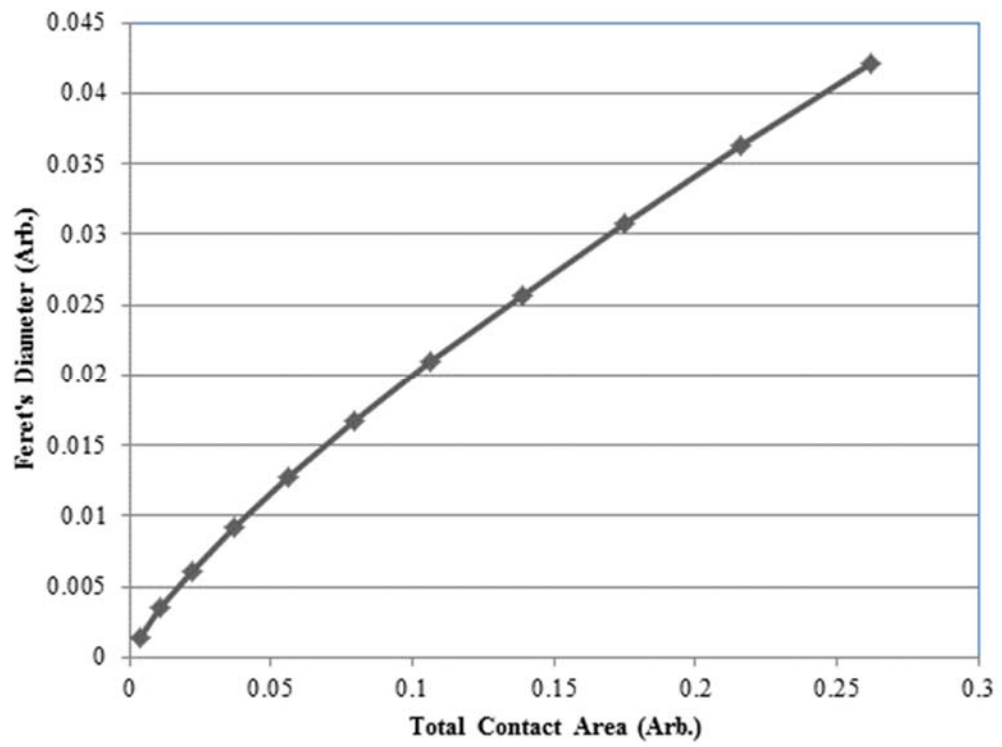


図 3.15 研磨パッドの接触面積と総フェレ径の関係

3.6 結論

研磨パッドの基板接触部周縁に滞留したスラリー中の砥粒により研磨中の材料除去が行われているという新しいモデルを提案した。このモデルでは研磨中の砥粒の入れ替わりが素直に理解でき、従来モデルの矛盾点を解消することが出来る。研磨パッドの表面パラメータと研磨レートとの関係性を評価したところ、フェレ径のみに極めてリニアな関係が見いだされ、この結果もこのモデルを支持している。さらに、このモデルに基づいて研磨レートの基板圧力依存性を説明することが出来ることも示した。研磨の材料除去と研磨パッド表面状態との関係をこのように理解することによって、研磨性能の改善のための様々な方策、すなわち研磨パッド材料開発やコンディショナー、研磨条件／ドレス条件の最適化などの方向性がこれまでとは異なってくる可能性がある。また、研磨による欠陥生成や平坦化のメカニズムについても異なる解釈を検討しなければならないかもしれない。

第3章の参考文献

- [1] K. Qin, B. Moudgil, and C.W.Park: “A chemical mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects”, *Thin Solid Films* **446** (2004) 277.
- [2] J. Luo and D. A. Dorfield: “Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling”, *Semicond. Manuf.* **14** (2001) 112.
- [3] J. Luo and D. A. Dorfield: “Optimization of CMP from the viewpoint of consumable effects semiconductor devices, materials, and processing”, *J. Electrochem. Soc.* **150** (2003) G807.
- [4] W. Choi and R. K. Singh: “Roles of colloidal silicon dioxide particles in chemical mechanical polishing of dielectric silicon dioxide”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 8383.
- [5] E. J. Terrell and C. F. Higgs III: “A modeling approach for predicting the abrasive particle motion during chemical mechanical polishing”, *J. Tribology* **129** (2007) 933.
- [6] G. P. Muldowney and D. P. Tselepidakis: “A computational study of slurry flow I grooved CMP polishing pad”, *Proc. CMPMIC*, 2004, 4A.
- [7] F. Preston: “The theory and design of plate glass polishing machines”, *J. Soc. Glass Technol.* **11** (1927) 127.
- [8] K. Kimura: “Experimental analysis on material removal mechanism in CMP process for SiO₂ film with AFM observation”, presented at Levitronix Users Conf. 2011.
- [9] D. Stein, D. Hetherington, M. Dugger, and T. Stout: “Optical interferometry for surface measurements of CMP Pads”, *J. Electron. Mater.* **25** (1996) 1623.
- [10] 藤田、石倉、河井、森岡 : 「パッド表面分析による研磨メカニズムの研究 (第2報)–ドレッシング無しの研磨過程におけるパッド表面状態の解析–」, *精密工学会誌* **74** (2008) 815.
- [11] S. A. Lawing: “Pad conditioning effects in chemical mechanical polishing”, presented at SEMI Technol. Symp. SEMICON China, 2004.
- [12] E. A. Kneer : “Electrochemical Measurements during the Chemical Mechanical Polishing of Tungsten Thin Films “, *J. Electrochem. Soc.* **144** (1997) 3041.

- [13] S. Ojima, T. Funakoshi, T. Hori, M. Abe, and T. Doi: “Evaluation of tungsten CMP by using optimized recovery slurry”, Proc. Pacrim CMP, 2004, p. 234.
- [14] M. Akaji, S. Haba, K. Yoshida, A. Isobe, and M. Kinoshita : “Study of optimum polishing pad surface for CMP”, Proc. 6th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT), 2009, p. 97.
- [15] 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”, Jpn. J. Appl. Phys., **52** (2013)126503.
- [16] JIS B0601:2013.
- [17] ISO 4287:1997.
- [18] http://www.accretech.jp/pdf/measuring/sfexplain_1.pdf#search='JIS+ISO+Ra'.
- [19] P. Khajornrugang, K. Kimura, T. Okazono, K. Suzuki, and T. Kushida: “Spatial fourier transform analysis of polishing pad surface topography”, Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 05FE04.
- [20] 三橋、小野、磯部：「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).20.

第4章 材料除去メカニズムの数値的考察

前章ではパッドのコンタクト部に滞留した砥粒が、基板上的材料除去を行うというモデルを提案した。パッドと基板の接触面積率は1%以下であるが、そのような低い接触率によって滑らかな研磨面が形成できるのか、また、現実の研磨レートが実現できるのかという疑問が提起されている[1]。そこで本章ではパッド接触部が基板上的の1点を通過する頻度を計算することにより、モデルの妥当性について検討した。さらに、砥粒1個あたりの材料除去量を仮定して、パッドの接触部あたり何個の砥粒が材料除去に寄与しているかを計算した。得られた砥粒個数から、より詳細に材料除去のメカニズムを考察した。

4.1 計算モデルと接触頻度の計算

現実のパッドの接触部は様々な大きさ、形状を有しているが、計算のために単純化して図4.1に示すように、接触率1%とし、研磨パッドの $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ の領域毎に $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ の正方形の接触部が一つ存在すると仮定した。研磨パッドは接触部の正方形の1辺に垂直方向に 1 m/s の速度で移動するとする。この時の1つの接触部の軌跡は $10 \mu\text{m} \times 1 \text{ m} = 10^7 \mu\text{m}^2$ となる。基板の面積を $S_w \mu\text{m}^2$ とすると、基板内の接点数は $S_w/(100 \times 100)$ 個となり、基板内の接触部の1秒間の軌跡の総和は $S_w \times 10^3 \mu\text{m}^2$ となる。すなわち、基板上的の任意の1点は1秒間に1000回パッドの接触部が通過するということになる。この数字は十分大きく、接触面積率が1%しかなくても平滑な面を形成することは妥当であると考えてよいだろう[2,3]。

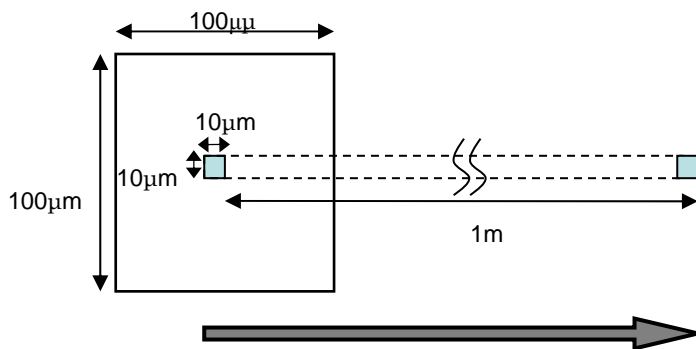


図4.1 接触頻度計算のための研磨パッド接触部の単純化モデル

4.2 パッドの接触状態と接触頻度の関係

前節の単純化されたモデルで、接触面積、接触面積率を変化させた場合の接触頻度を計算した。図 4.2 は接触部の面積が 1×1 、 5×5 、 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ の場合について、その接触面積率を変化させた場合の接触頻度を示す。接触面積が大きくなるほど接触頻度が増加する。接触頻度が多いほど表面は平滑化すると考えると、この結果は、接触面積率が IC1000 よりも大きいスエードパッドでより平滑な面が得られるという経験と一致する。また、同じ接触面積率では一つあたりの接触部の面積が小さいほど接触頻度が高くなっている。図 4.3 には接触面積率を 1% に固定して接触部の 1 辺の長さを変化させた場合の接触頻度の変化を示す。接触頻度は接触部のサイズと反比例の関係があることがわかる。これは、同じ接触面積率でも小さく多数の接触部が存在する方が高い接触頻度となることを示している。

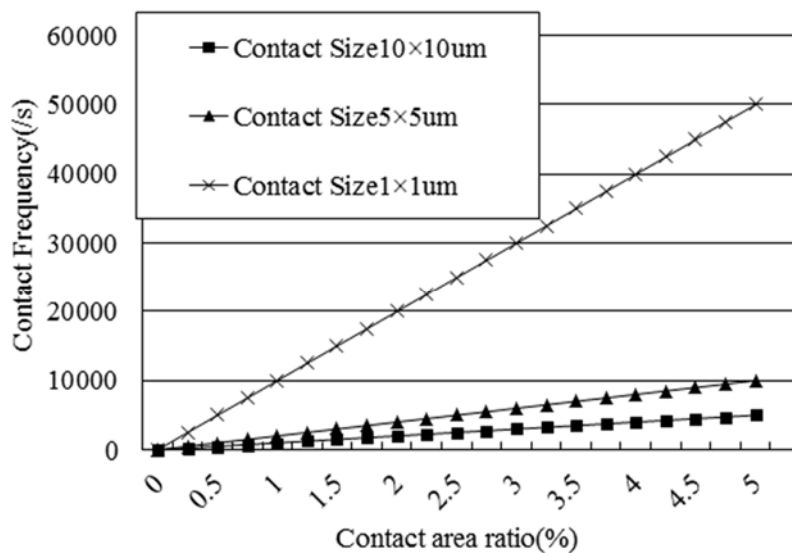


図 4.2 研磨パッドの接触面積率と接触頻度の関係

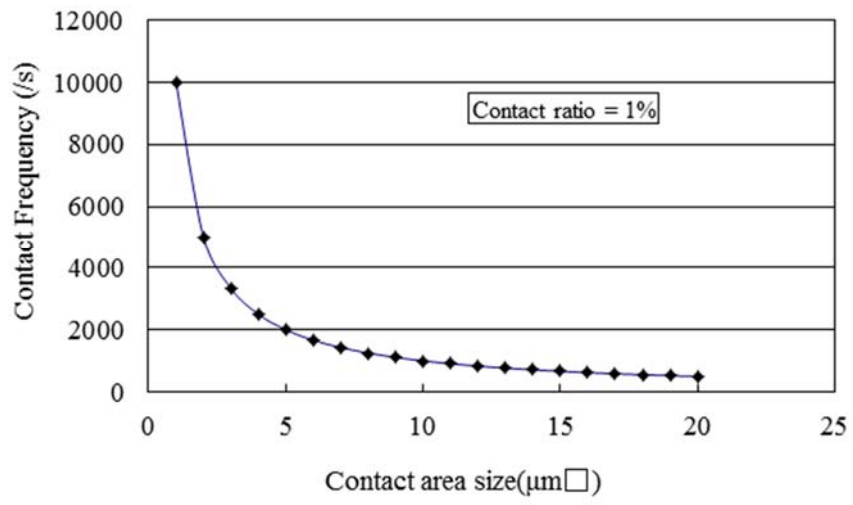


図4.3 研磨パッド接触部の大きさと接触頻度の関係

4.3 材料除去量の計算

次に、実際の研磨レートとの関係を数値的に考慮して、1回の接触あたりの材料除去量を計算してみる。研磨レートをILDの標準的な研磨レートに近い0.3 $\mu\text{m}/\text{min}$ とすると[4-6]、1秒間の研磨量は5 nmとなる。4.1節で計算したように接触面積が $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ で1%の接触面積率の場合は1秒間に1000回接触部が基板上の1点を通過する。すなわち、1回の接触で5/1000 nmの材料除去が行われるということになるが、もちろん、このように原子サイズ以下の単位で材料除去が行われているとは考えられない。可能性としては、すべての接触で材料除去が行われず、何回かに1回材料除去がなされるという考え方があるが、それよりも、砥粒が材料除去を行っていると考え、接触部に存在する作用砥粒数によって見かけ上、上記のような1接触あたりの材料除去量が少なくなると考えた方が妥当と考えられる。そこで、砥粒の接触部に基板側の材料が原子レベルで吸着されて材料除去が行われるというモデル[1,7]に従って、パッドの接触部あたり何個の砥粒が材料除去に寄与しているかを試算してみる。

砥粒と基板表面の接触径はヘルツの接触理論に従い以下の式で表すことができる[8]。

$$\text{Contact Diameter} = 2\sqrt{rd} \quad (4-1)$$

ここで r は砥粒半径、 d は砥粒の基板への押し込み量である。

押し込み量は砥粒と基板の弾性率と、砥粒に加わる圧力で決定されるが、いずれも不明である。砥粒径を50 nmとし、押し込み量と接触直径の関係を計算すると図4.4のようになる。押し込み量を0.2 nmと仮定すると、接触径は4.5 nmとなる。この数値を用いて以降の試算を行ってみる。

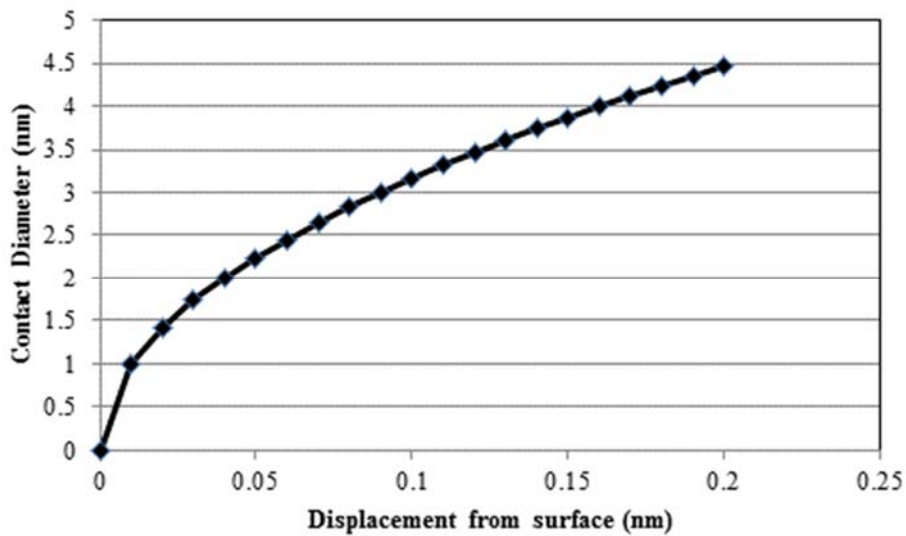


図4.4 砥粒の基板表面への押し込み深さと接触径の関係

材料除去が分子単位で砥粒に吸着されることにより行われると仮定し、その分子の大きさを0.5 nmと仮定すると、図4.5に示すように一つの砥粒が0.5 nm × 4.5 nmの基板材料の断面を吸着することがわかる。ここで、パッドの接触部の幅を10 μmと仮定し、研磨レートが0.3 μm/min (=5 nm/s) とすると、1000回の接触で10 μm × 5 nmの断面を除去することになる。上記砥粒1個あたりの断面除去量でパッド1回接触あたりの除去量を除すると、 $(10 \mu\text{m} \times 5 \text{ nm}) \div 1000 \div (0.5 \text{ nm} \times 4.5 \text{ nm}) = 22.2$ という数値が得られる。すなわち、一つのパッド接触部あたり約22個の砥粒が材料除去を行っているということになる。

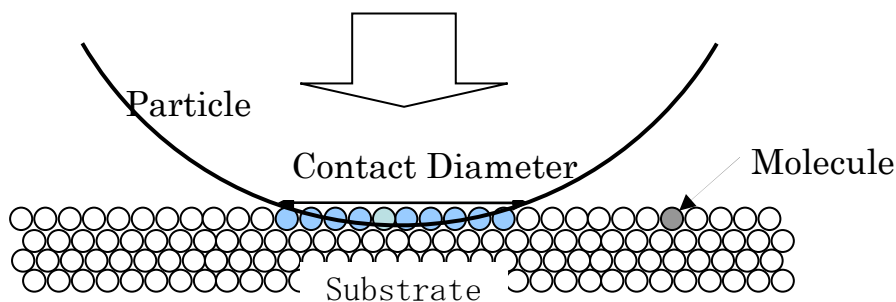


図4.5 砥粒の基板表面への接触

この数値は、一つのパッド接触部 ($10 \times 10 \mu\text{m}^2$) 上に存在しうる50 nm径の砥粒数約46000個と比べるときわめて小さい。22個という数字は砥粒の押し込み量を0.2 nmと仮定して得られた数字であるが、例えば押し込み量を0.05nmと仮定しても、得られる接触部あたりの砥粒数は約45個であり、以降の議論に大きな影響はないと考えられる。Qin、Luo、Choi等これまでの研究者はパッドの接触部で砥粒がその接触面積に比例して存在すると仮定した[9-12]。しかし、ここで得られた数値は存在しうる砥粒数約46000個に比べて非常に小さい。このように小さな割合で存在する砥粒が研磨レートの荷重依存性の原因であると結びつけるのには無理があると考えられる。第3章で提案したフェレ径に基づくモデルで考えると、10 μm 幅の接触部の1辺に存在しうる砥粒数は200個である。そうすると22個や45個といった数値はその数分の1から10分の1程度である。パッドのアスペリティの谷を移動してきた砥粒がパッドと基板の接触部に滞留し、常に入れ替わりながら材料除去を行っていると考ええると、最密に並んで存在しうる砥粒数の数分の1という上記砥粒数は妥当であると考えられる。また、これまでの研究者のモデルでは砥粒はパッド上に固定されていることになるが、そうすると砥粒の研磨能力がすぐに落ちてしまうことが考えられる。すでに第3章で示したように、砥粒がパッド上に固定されているとするならば、砥粒1個あたりの材料除去量は砥粒サイズの10倍にもなってしまうことになる。上記のように砥粒が常に入れ替わると考えるとそうした問題を考える必要は無くなり、ここでもフェレ径モデルの妥当性を示している。

このフェレ径に基づくモデルによるならば、パッド接触部に存在する砥粒数を増やすような接触状態を実現できれば研磨レートを向上させることが出来ることになる。すでに、同じ接触面積率でも小さく多数の接触点を持つ方がパッド接触頻度は高く、研磨レートが向上することを示した。同じ接触面積率、接触点数でも接触部の形状によって滞留する砥粒数は変化すると考えられる。本章では計算を単純化するために接触部を正方形としたが、図4.6に示すような二つの接触部があれば、(a)の形状よりも(b)の形状の方が多くの砥粒を滞留させることが出来ると考えられる。(b)の形状はパッドに含まれるポアに囲まれた形状を想起させる。研磨パッド中のポアの存在が研磨レートに影響を与える一つの要素である可能性がある。こうしたパッド接触部の形状を、意識的に制御することによっても、研磨性能を向上させることができる可能性がある。



(a)



(b)

図 4.6 研磨パッド接触部の形状

4.4 結論

パッドの接触部が基板上の任意の 1 点を 1 秒間に何回通過するかを計算し、典型的な例で 1000 回に達することを示した。この接触回数から計算すると 1 回の接触あたりの材料除去は分子サイズよりもきわめて小さいことがわかった。そこで砥粒の作用を考慮に入れ、砥粒の接触部で表面吸着により材料除去が行われるという仮定の下、接触部に存在する砥粒の数を計算した。得られた値は、20 個～40 個程度であり、フェレ径モデルでコンタクト部の周縁に滞留する砥粒数として妥当であると結論した。さらに、接触部形状の最適化により研磨レートを改善できる可能性があることを示した。

第4章の参考文献

- [1] K. Kimura: “Experimental analysis on material removal mechanism in CMP process for SiO₂ film with AFM observation”, presented at Levitronix Users Conf. 2011.
- [2] Akira Isobe, Hideyuki Nishizawa, Shinichi Haba, and Syuhei Kurokawa: “Numerical discussion of polishing mechanism considering contact area of polishing pad and that of polishing abrasives”, Proc. ICPT2011, p. 252.
- [3] 磯部、西澤、羽場：「研磨パッドおよび砥粒のコンタクトエリアを考慮した研磨メカニズムの数量的考察」精密工学会春期大会学術講演会講演論文集、2011、p. 347.
- [4] 藤田、石倉、河井、森岡：「パッド表面分析による研磨メカニズムの研究(第2報)ードレッシング無しの研磨過程におけるパッド表面状態の解析ー」,精密工学会誌 **74** (2008) 815.
- [5] S. Li, G. Gaudet, F. Sun, and A. Naman: “ILD CMP with Silica abrasive particles: Interfacial removal kinetics and effect of pad surface texture”, J. Electrochem. Soc.. **157** (2010) H1061.
- [6] G. P. Muldowney: “The effect of pad grooving and texturing on CMP process performance”, Proc. Pacrim-CMP 2004, p. 31.
- [7] R. Burtovry, Y. Lin, B. Zdyrko, A. Tregub, M. Moinpour, M. Buehler, and L. Luzinov: “AFM measurements of interactions between CMP slurry particles and substrate”, J. Electrochem. Soc. **154** (2007) H476.
- [8] Y. R. Jeng, and P. Y. Huang: “Impact of abrasive particles on the material removal rate in CMP”, J. Electrochem. Solid-State Lett., **7** (2004) G40.
- [9] K. Qin, B. Moudgil, and C.W.Park: “A chemical mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects”, Thin Solid Films **446** (2004) 277.
- [10] J. Luo and D. A. Dorfield: “Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling”, Semicond. Manuf. **14** (2001) 112.
- [11] J. Luo and D. A. Dorfield: “Optimization of CMP from the viewpoint of consumable effects semiconductor devices, materials, and processing”, J. Electrochem. Soc. **150** (2003) G807.

- [12] W. Choi and R. K. Singh: “Roles of colloidal silicon dioxide particles in chemical mechanical polishing of dielectric silicon dioxide”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 8383.

第5章 欠陥制御に関する一考察

デバイスノードが進むにつれ欠陥制御の重要性はますます高まっている[1-3]。配線スピード向上のために Low-k/Cu 配線が用いられるようになってきているが、Low-k 膜は強度が弱く[4,5]、基板エッジ部での剥がれが問題となることも多い[6]。そこで、基板エッジ部の圧力制御をリテーナーリングで行うことにより、エッジ部に強い圧力がかかることを防ぐことが重要となる。一方、CMP で最もよく知られた欠陥モードであるマイクロスクラッチ[7,8]もまたリテーナーリングの影響を受ける可能性がある。マイクロスクラッチはスラリー中の粗大粒子により発生すると考えられており、スラリーの品質管理や粗大粒子数 (Large Particle Count : LPC) のモニター、あるいは CMP 装置直前に設ける Point of Use (POU) フィルターによる粗大粒子除去などに多くの努力が払われてきた[9-11]。しかし、近年では、元々のスラリー中の粗大粒子よりも、スラリー供給システム内や CMP 中に研磨パッド上で成長する粗大粒子がマイクロスクラッチの主要因であると考えられるようになってきた。そうした粗大粒子はスラリーに加わるストレスにより成長が加速されることが知られており、スラリー供給システムのポンプによるストレスや研磨中のパッドと基板間に生じる圧力がその原因となることが報告されている[12-14]。そうすると、パッドとリテーナーリング間の圧力もスクラッチに影響する可能性がある。

本章では、リテーナーリングの圧力と CMP の欠陥の関係、さらには、リテーナーリングの材質の影響を評価した。得られた結果を基に、マイクロスクラッチのメカニズムについて前章までに述べた材料除去メカニズムと関連させて考察する。

5.1 実験方法

CMP 装置としては東京精密製 ChaMP-232 を用いた[15-18]。図 5.1 にこの装置のエアフローティングヘッドを一般的なエアバッグヘッドと比較して示す[19-22]。通常のエアバッグヘッドではリテーナーリングの圧力をヘッド全体の荷重により制御する。基板圧力はエアバッグに加える空気の圧力で制御するが、リテーナーリングの圧力はトータルヘッド荷重と基板圧力の差により決まる。

リテーナーリングの面積は基板面積よりも小さいので、リングの「圧力」制御は基板圧力ほど正確に行うことができない。そのため、リテーナーリングの圧力は基板圧力よりも高く設定することが推奨されている。これは、リテーナーリングの圧力が、ヘッド荷重や基板圧力のばらつきによりマイナスになってしまうと、研磨中に基板がスリップアウトしてしまう危険があるからである。本来はリテーナーリング圧力が基板圧力よりも低くてもプラスの圧力である限りリングはパッドに接地しているので基板がスリップアウトしないはずである。ChaMP-232 のヘッド構造は基板圧力とリテーナーリング圧力を独立して制御する構造となっている。ヘッドの高さ位置を、基板とリテーナーリングがパッドに接触するぎりぎりの高さに固定し、それぞれの圧力をエアバッグで制御する構造となっている。また、基板は、基板裏面から吹き出すエアによりフローティング状態となり、通常のエアバッグ方式と同様のすぐれた面内圧力均一性を実現している。この構造により、正確なリテーナーリング圧力制御が可能となり、基板圧力以下のリテーナーリング圧力も可能となっている。

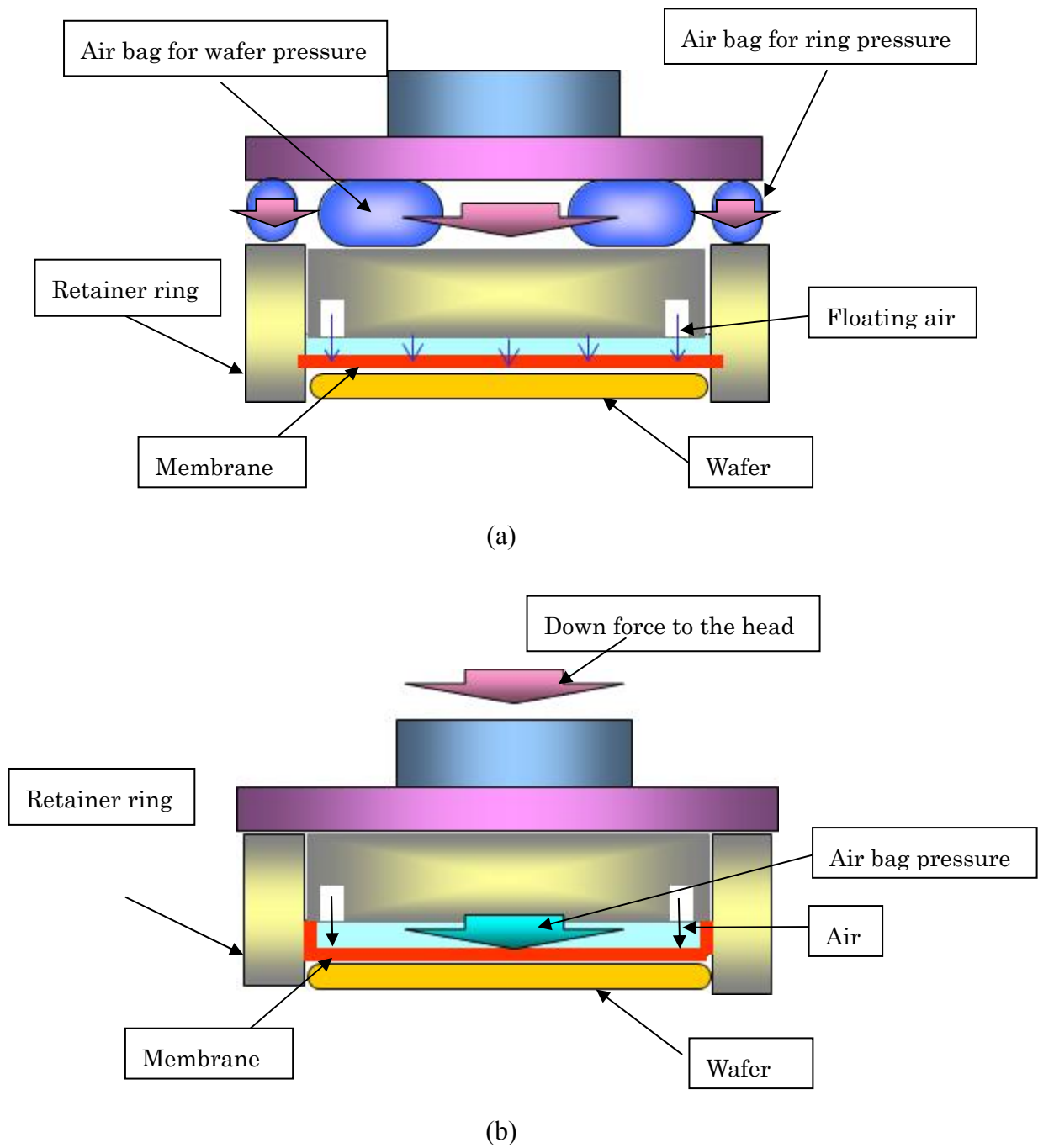


図 5.1 ヘッド構造の比較 (a)ChaMP-232 に搭載されているエアフローティングヘッド、(b)通常のエアバッグヘッド

5.1.1 実験 1

図 5.2 に示す Low-k/Cu のブランケット膜構造を有する 200 mm シリコン基板を研磨した。上から順にメッキにより成膜された 600 nm 厚の Cu、30 nm 厚の Ta、100 nm 厚の Cap-SiO₂、150 nm 厚の CVD 成膜された Low-k 膜から構成されている。Cap-SiO₂ は通常その成膜前に Low-k 膜との密着性改善のためのプラズマ処理を行うが[23,24]、本実験では膜剥がれを加速させるためこの工程をスキップした。欠陥評価は日立ハイテク製欠陥検査装置 LS6700 を用いた。また、欠陥形状は光学顕微鏡および SEM で確認した。CuCMP の研磨条件は、基板圧力 20.7 kPa、プラテン回転速度 83 min⁻¹、ヘッド回転速度 78 min⁻¹、そしてリテーナーリング圧力は 10.3 から 41.4 kPa まで変化させた。スラリーは酸化剤に H₂O₂ を用いるタイプの市販コロイダルシリカスラリーを用いた。研磨パッドはニッタハース社製 IC1400 (k 溝) を用いた。バリア CMP では、基板圧力 17.2 kPa、プラテン回転速度 83 min⁻¹、ヘッド回転速度 78 min⁻¹、リテーナーリング圧力 10.3 kPa とした。スラリーは市販されている H₂O₂ ベースのコロイダルシリカスラリーを用い、研磨パッドには IC1400 (k 溝) を用いた[25-26]。

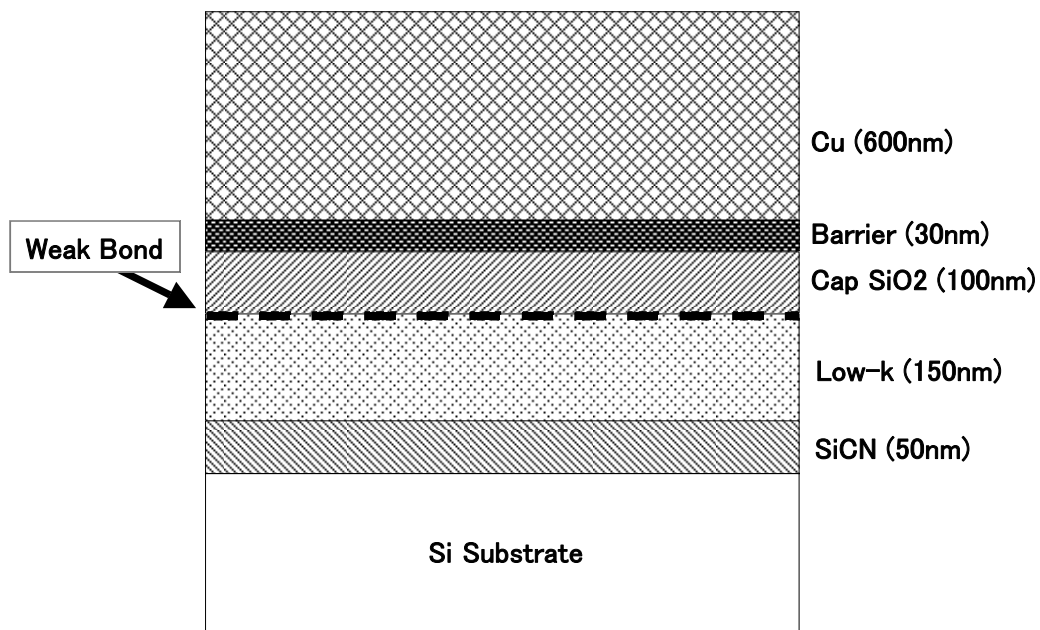


図 5.2 評価した Cu/Low-k 膜の膜構成

5.1.2 実験2

PTEOS 膜を成膜した 200 mm シリコン基板を研磨した。実験 1 と同じ装置を用い、基板圧力は 20.7 kPa、プラテン回転速度とヘッド回転速度はいずれも 90 min^{-1} 、リテーナーリング圧力は 6.9 から 41.4 kPa まで変化させた。スラリーにはキャボット社製 SS25 を 2 倍希釈で用い、研磨パッドにはニッタハース社製 IC1000/SUBA400 (A21XY 溝) を用いた。スラリーをプラテンに供給する直前に POU フィルターを適用した場合としない場合を比較した。用いたフィルターはフィルターサイズ $3 \mu\text{m}$ のミリポア製 Solaris(10 in.)であった。CMP 後の洗浄は、1% NH_4OH で 20 s の薬液処理と純水で 20 s のリンス処理をブラシ 1 チャンバーで、0.5%DHF をかけながらの 20 s のブラシスクラブと純水による 20 s のリンス処理をブラシ 2 チャンバーで、0.5%DHF によるスピネッチング 10 s、純水によるメガソニック洗浄 15 s、純水によるリンス処理 30 s、 N_2 を用いたスピンドライ 12s をスピンドライチャンバーで行った。欠陥評価は LS6700 を用い、検出された欠陥はこの装置によって自動的にパーティクルとスクラッチに分類された。

5.1.3 実験3

用いた研磨装置の標準のリテーナーリング材料は polyetheretherketone (PEEK) であった。リング材料の効果を検討するために、これ以外に 2 種類の材料を用いたリテーナーリングを評価した。一つは polyphenylenesulfide (PPS)、もう一つは polybutylenenaphthalate (PBN) である。PPS はリテーナーリング材料として市販の CMP 装置で広く用いられている材料であり、PBN は PEEK よりも摩耗レートが低いという理由で選定された。研磨装置および消耗材料は実験 2 と同一で、研磨条件はリング圧力を 20.7 kPa に固定したことで、POU フィルターを適用しなかったこと以外は実験 2 と同一であった。

リング材料の摩耗レートも評価した。それぞれの材料を $15 \times 15 \times 2 \text{ mm}^3$ の大きさのサンプルに切り出し、図 5.3 に示すような 200 mm 基板サイズのサンプルホルダーを作製した。基板研磨評価に用いたのと同じ装置を用いて研磨を行い、基板圧力として 6.9 kPa を用いた。この基板圧力は、サンプルの面積で換算すると 337.8 kPa となる。また、プラテンとヘッドの回転速度は 30 min^{-1} とした。同じ材料のサンプル 3 個を装着し、30 min の研磨を 4 回行って、それぞれの研磨前後の厚みの変化を測定し、一つの材料に付き一連の評価を 2 回行って、計 24

の研磨レートを得、その平均値をその材料の摩耗レートとした[27.28]。

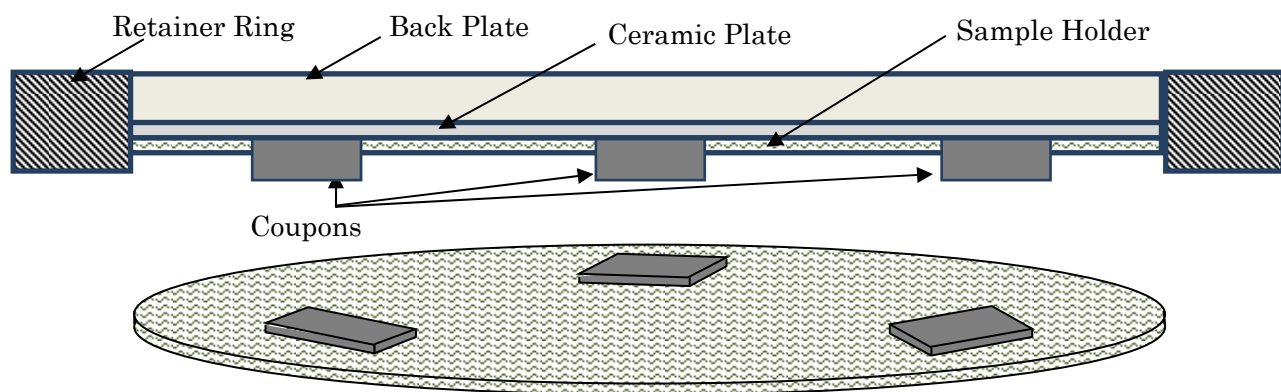


図 5.3 摩耗率測定サンプル保持治具

5.2 実験結果

5.2.1 実験1

図 5.4 に Low-k/Cu 研磨後の欠陥数とリテーナーリング圧力の関係を示す。リテーナーリング圧力が高いほど欠陥数は多い。図 5.5 は面内の欠陥の分布の例を示し、図 5.6 は典型的な欠陥の SEM 観察例を示す。欠陥のモードは膜剥がれであり、剥離界面は Low-k 膜とその上層の Cap-SiO₂ であった。しかし、欠陥の面内分布はランダムであり。特に基板エッジ周辺に集中しているわけではなかった。膜剥がれは基板エッジのストレス集中部で発生すると予想していたが、予想と異なる結果であった。リテーナーリング圧力が高いほど欠陥数が多いという結果も、エッジ部のストレス集中が主原因とする予想とは矛盾している。リテーナーリング圧力が高いほど基板エッジ部の圧力集中は抑えられると考えられるからである。

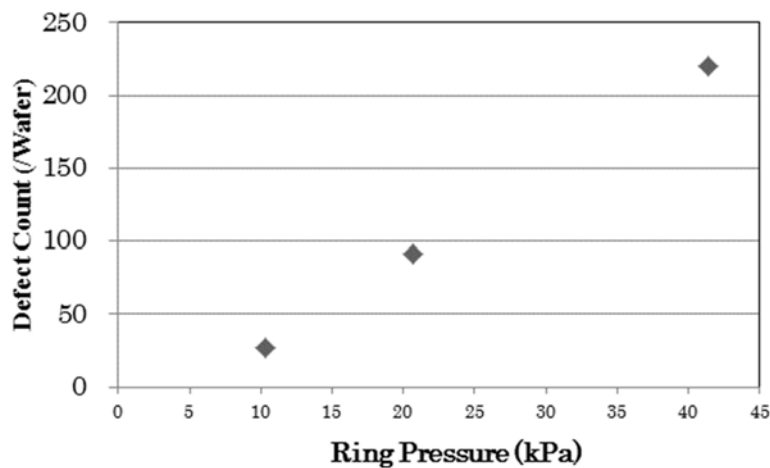


図 5.4 リテーナーリング圧力と欠陥数の関係

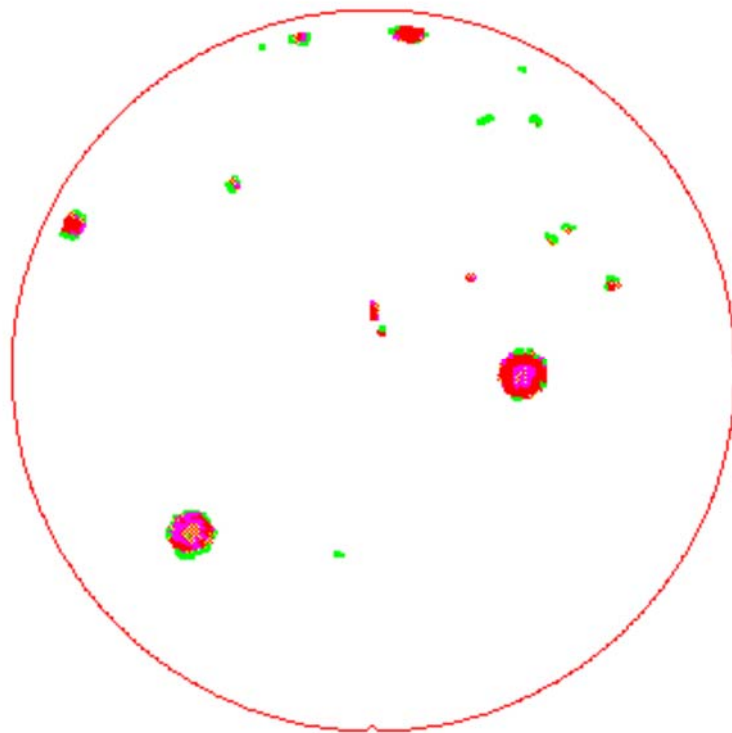


図 5.5 欠陥の基板面内分布

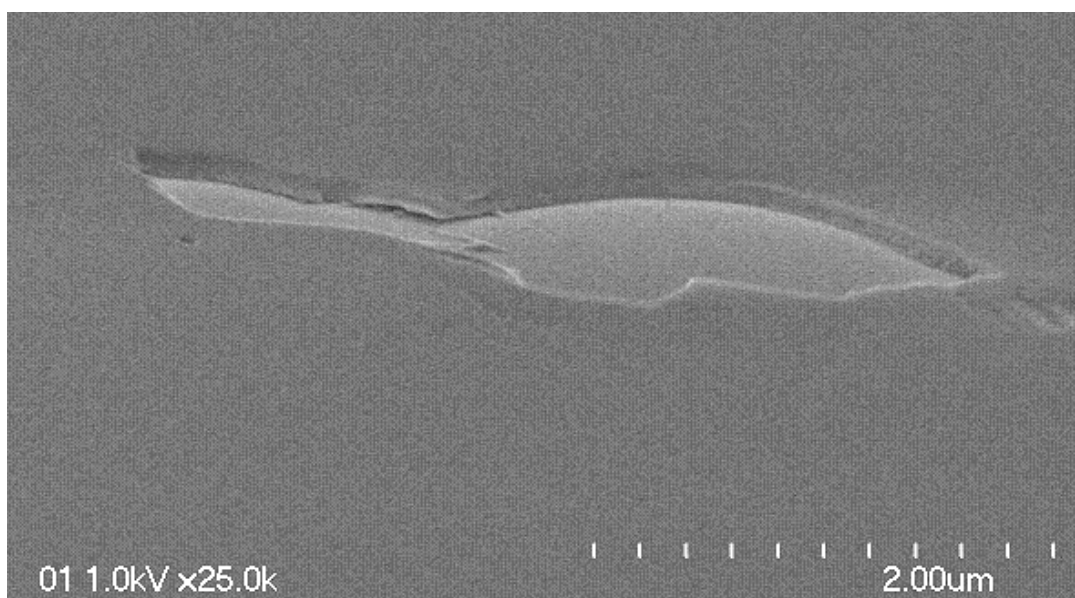


図 5.6 欠陥部の SEM 写真

5.2.2 実験2

図 5.7 は PTEOS 研磨後のマイクロクラッチ数とリテーナーリング圧力の関係を示すグラフである。POU フィルターを用いた場合のマイクロクラッチ数はほぼゼロである。数値がマイナスを示すのは、研磨前後の欠陥数を測定していることから来るノイズと考えられる。一方、POU フィルターを用いない場合には、マイクロクラッチ数はリテーナーリング圧力が高いほど多くなっている。これは、リテーナーリング圧力によるストレスによって研磨パッド上で粗大粒子が成長し、マイクロクラッチの原因となったと考えることができる。

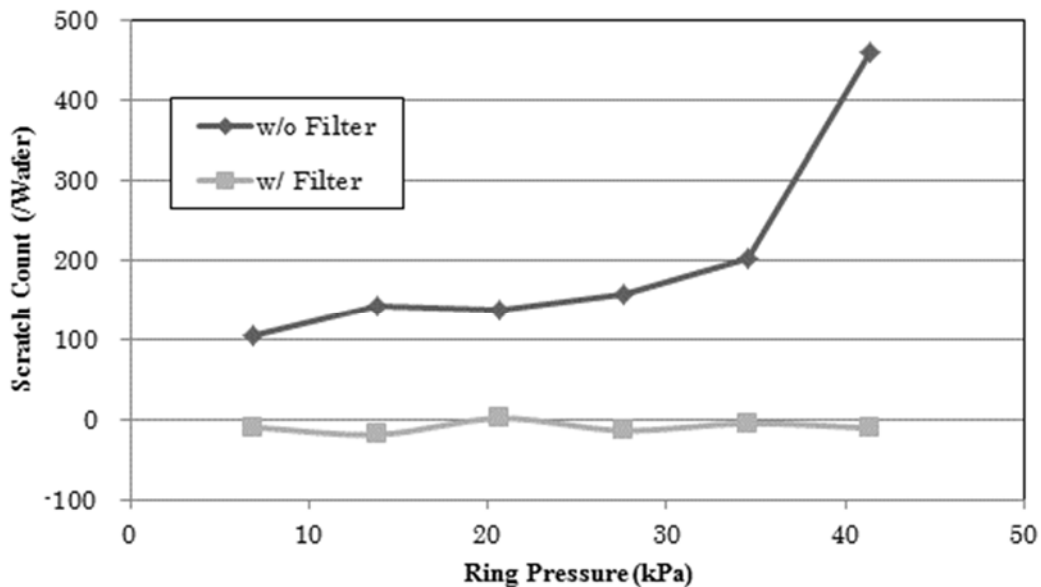


図 5.7 リテーナーリング圧力と欠陥数の関係

5.2.3 実験3

図 5.8 は実験に用いたリテーナーリング材料の摩耗レートの比較を示している。PPS が最も高く、PBN が最も低い。それぞれの材料のリテーナーリングを用いた研磨後のマイクロクラッチ数の比較を摩耗レートを横軸として図 5.9 に示す。摩耗レートの高い材料でマイクロクラッチ数も高いことがわかる。すなわち、リテーナーリングから研磨された物質がマイクロクラッチの原因となっていると考えることができる。しかし、いずれの材料も樹脂であり、

PTEOS に比べれば硬度はきわめて低く、スクラッチの原因となるとは考えにくい。さらに、研磨後のリテーナーリング表面は滑らかで欠けなども観察されず、マイクロスクラッチの原因となるような大きな塊でリテーナーリングから脱落したとは考えづらい。そのため、単純にリテーナーリングからの物質がマイクロスクラッチの原因であるとは考えられない。

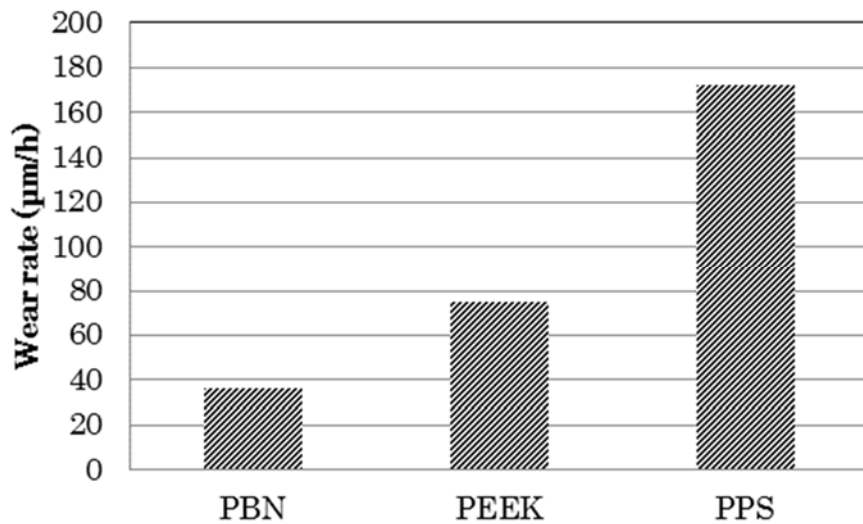


図 5.8 リテーナーリング材料の摩耗レートの比較

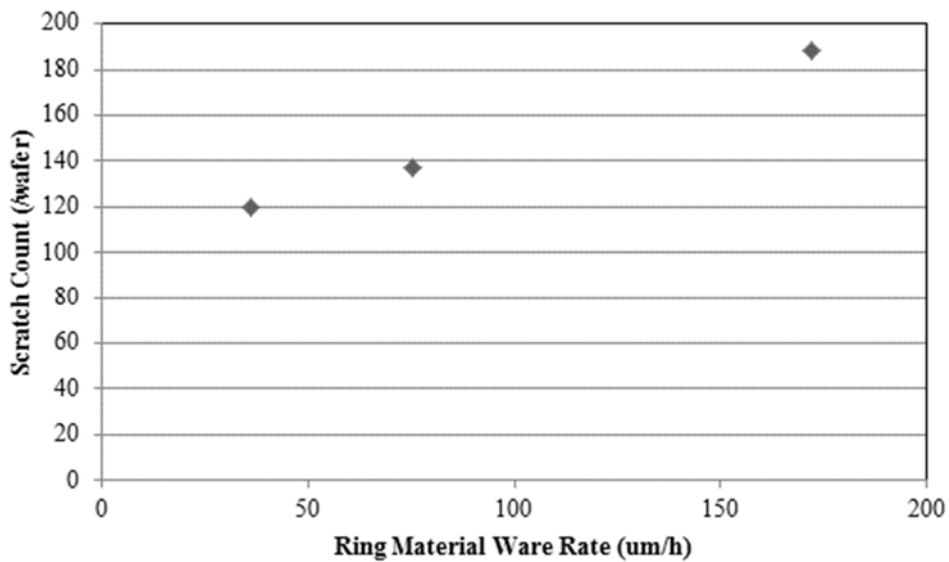


図 5.9 リテーナーリング摩耗レートと欠陥数の関係

リテーナーリング材料の摩耗レートが圧力に比例すると仮定し、図 5.7 におけるリテーナーリング圧力を摩耗レートに換算して図 5.9 に重ねると図 5.10 のようになる。高いリテーナーリング圧力下のマイクロスクラッチ数は、材料依存性の直線よりも上にある。これもまた、単純にリテーナーリングから研磨された物質によってマイクロスクラッチが引き起こされたのではないことを示している。

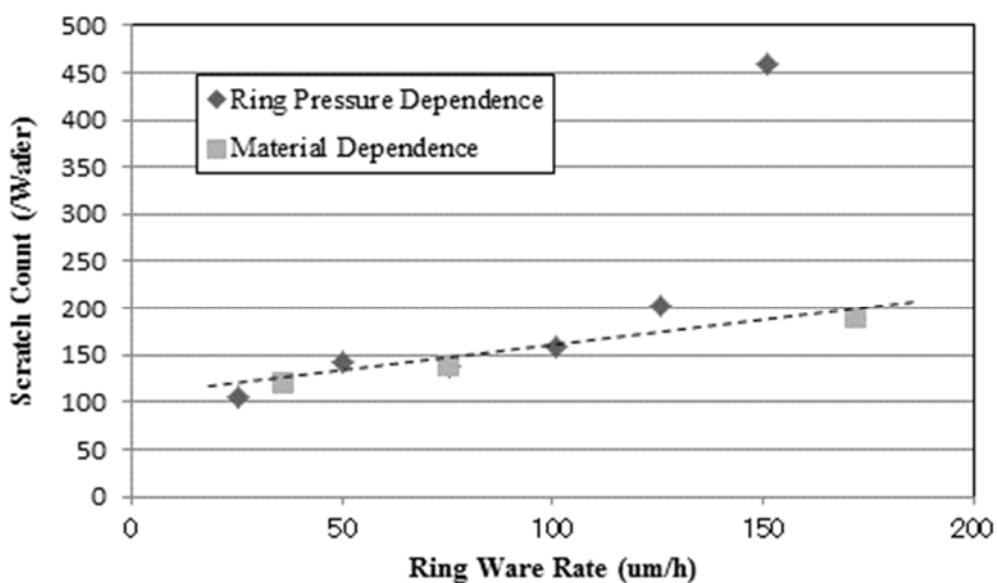


図 5.10 リテーナーリング摩耗レート（換算）とスクラッチ数の関係

5.3 考察①

上記結果により、以下のようなマイクロスクラッチ発生メカニズムが考えられる。

リテーナーリングから樹脂が研磨され、研磨された樹脂は研磨パッド上でスラリー中の粗大砥粒と凝集してさらに大きな粒子に成長する。そうして成長した非常に大きな粗大粒子がマイクロスクラッチを引き起こす。この凝集は与えられるストレスにより加速される。したがって、リテーナーリング圧力は樹脂材料の研磨レートと、凝集に関わるストレスの両方に関与している。そのために、同一材料でリテーナーリング圧力を変化させた場合のマイクロスクラッチ数を、摩耗レートを横軸としてプロットした図 5.10 では、高摩耗レートの領域で材料を変化させた場合の直線よりも高い値をとることになる。

このような樹脂と砥粒の凝集が研磨パッド上で起こりうるかどうかの直接的な検証は難しいが、その証拠となり得る過去の事例が存在する。今から 15 年以上前、タングステンプラグ CMP が量産導入された時期に、アライメントマーク部の異物詰まりという問題が発生した。プラグ部は CMP 後もタングステンで埋め込まれているが、アライメントマーク部はその後の工程でアルミ膜の上から読み取る必要があるため、タングステンが完全に埋まらないような設計となっていた。したがって、研磨中に異物がアライメントマークに詰まり、その後の工程で、詰まった異物からのデガスによりアライメントマーク部にアルミ膜がうまく成膜できず、また、パーティクルの発生源にもなるという問題が生じた。この問題はエアバッグ方式のヘッドでのみ発生し、バックリングフィルムタイプのヘッドでは見られなかった。すなわち、リテーナーリングを研磨パッドに接触させる方式のみで見られた現象であった。図 5.11 にアライメントマークの異物詰まりの観察写真を示す。詰まった異物を EDX 分析すると、図 5.12 に示すように W、Si、O、S が検出された。W は基板から研磨されたもの、Si と O はシリカ砥粒からのものと考えられた。そして S はリテーナーリングの材料に由来すると考えられた。リテーナーリング材料は PPS であり、PPS は S を含んでいる。それ以外に S の発生源と考えられるものは何もなかった。そこで、リテーナーリングの材料を摩耗レートがきわめて低いと考えられる SiC に変更したところアライメントマークへの異物詰まりは発生しなかった。詰まり部の外観か

ら砥粒とみられる球形の形状が見られ、上記分析の結果と併せて考えると、リテーナーリングから研磨された樹脂が砥粒と反応し凝集したものがアライメントマークに詰まったものと推測された。この結果は、同様の現象により成長した粗大粒子がスクラッチの原因となり得ることを示しており、本章で推定したリテーナーリングに関連したマイクロスクラッチの発生メカニズムの妥当性を支持している。

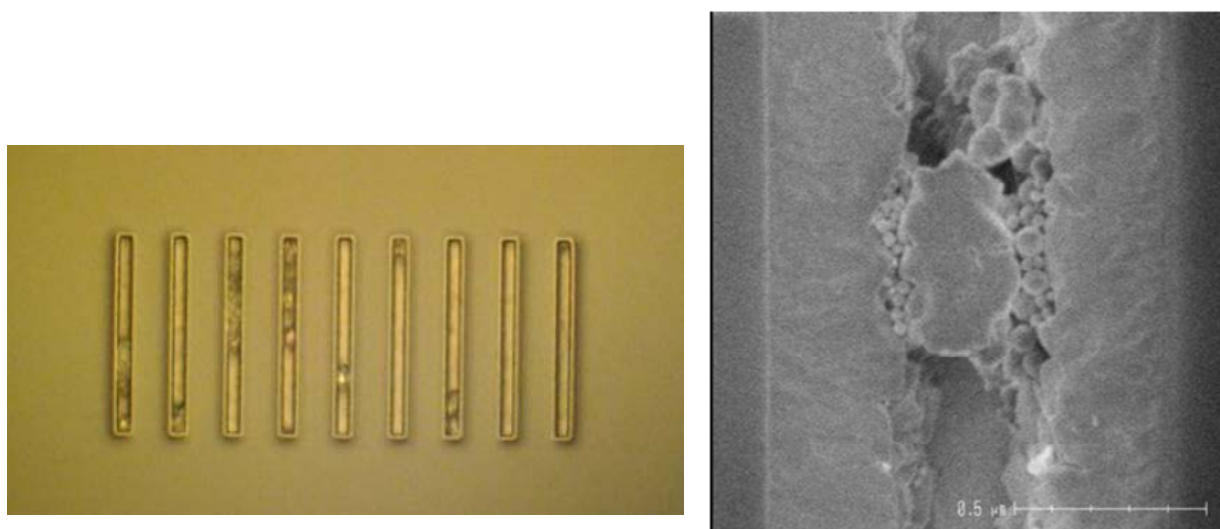


図 5.11 WCMP でアライメントマーク部に観察された異物

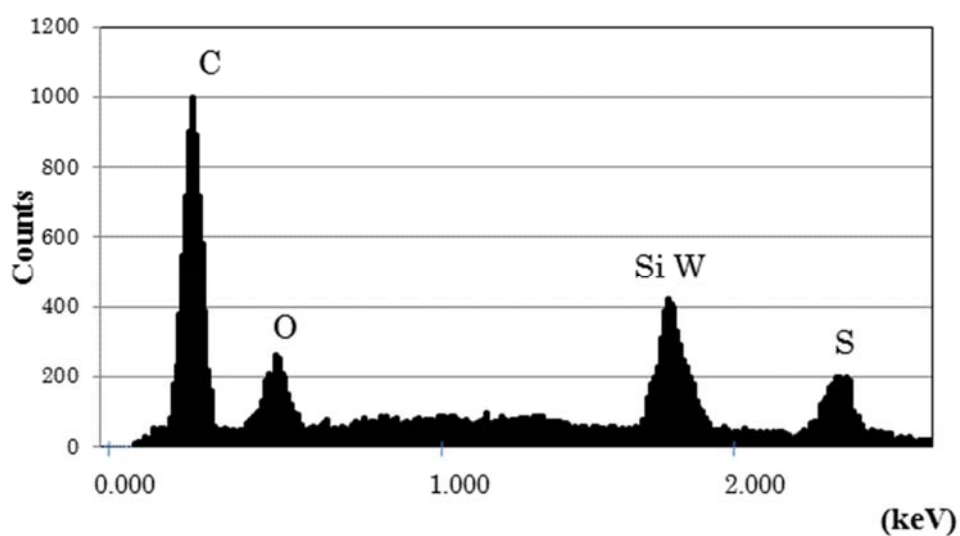


図 5.12 アライメントマーク部異物の EDX 分析

5.4 考察②

ここで示した CMP の欠陥生成メカニズムは、あくまでもリテーナーリングが関与した特殊なケースであり、スラリー中の粗大粒子制御がやはり最優先の欠陥対策であると考えられる。しかし、ここで得られた結果はスクラッチの原因粒子のサイズに関してある示唆を行っていると考えられる。すなわち、ここでは単純に粗大粒子が存在するだけではなく、それがリテーナーリングの樹脂と反応して巨大な粒子に成長して初めてスクラッチが発生しているのである。スクラッチ防止を目的としてスラリー中の LPC をモニターするが、そのサイズは通常 $0.5\ \mu\text{m}$ が一般的である。この時の数は $1\ \text{ml}$ 中に 10^4 個のレベルであり、 $0.5\ \mu\text{m}$ のサイズの粒子がそのままスクラッチの原因と考えているわけではない。もしそうならばウエハはスクラッチだらけになってしまうと考えられる。あくまでも実際のスクラッチ要因となる巨大粒子の個数とそれよりも小さな（それでも平均粒子径に比べれば非常に大きい）LPC に相関があるという仮定の下での管理であると言える。 $1\ \mu\text{m}$ 以上のサイズでも $10^2\sim 10^4$ 個/ml、 $10\ \mu\text{m}$ サイズの巨大粒子も $1\ \text{ml}$ 中に 10 個程度は存在するというデータもある[29]。本章で得られた結果では、スラリー中の粗大粒子がさらにリテーナーリングから研磨された樹脂と凝集してスクラッチの原因となると考察された。やはりスクラッチの原因となる粒子サイズはかなり大きなものであると考えられる。

第 3 章で提案したフェレ径に基づく材料除去モデルと関連づけてスクラッチの発生モデルを考察する。フェレ径モデルでは材料除去はパッドのコンタクト部周縁に滞留した砥粒によって行われるとした。しかし、スクラッチの場合はやはりパッド接触部で砥粒が基板と挟まれていると考えるべきであろう。図 5.13 に示すようにある程度の大きさまでは砥粒は研磨パッド側に沈み込み、基板圧力を上げて砥粒圧力は上がらないことが確かめられている[30]。研磨パッドに埋まりきれない砥粒サイズは研磨パッドの弾性率で決まるので、柔らかい樹脂材料のパッドでスクラッチが少ないのはこれが理由と考えられる。実際のパッド弾性率からパッドに埋まらない砥粒サイズを計算により求めることが出来るはずであるが、パッド最表面の弾性率はバルク弾性率とは異なると考えられる[31]。今後のさらなる研究が必要である。一方、この時の砥粒サイズが数 μm から $10\ \mu\text{m}$ 以上であると仮定すると、パッドのコンタクト部をそのサイズ以下に

制御することが出来れば、そのサイズの砥粒はパッドアスペリテイの凸部と基板との間に挟み込まれることはないと考えられる。したがって、図 5.14 に示すように、パッドの接触部のサイズを小さく制御することによりスクラッチ数を抑制することが出来ると考えられる。これは第 3 章、第 4 章で示した研磨レート向上のためには小さく多数のコンタクトを有するパッド表面形状を形成するという方向性と合致している。今後の課題としてこの仮説の実証を行っていきたい。

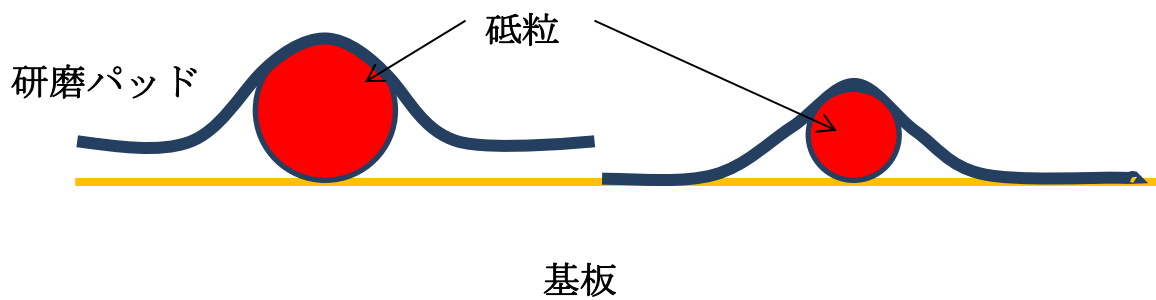


図 5.13 パッドコンタクト部で基板と挟まれた砥粒

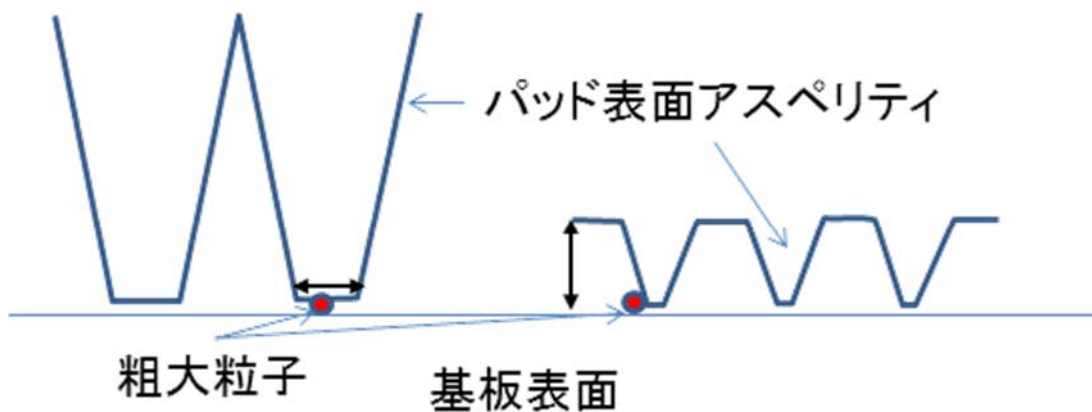


図 5.14 パッド表面アスペリテイと粗大粒子の関係

5.5 結論

CMP の欠陥数とリテーナーリング圧力に強い相関が見られた。この相関は基板エッジ部の圧力集中に関連したものではなく、リテーナーリング材料樹脂が CMP により研磨され、スラリー中の粗大粒子と凝集を起こしてスクラッチの要因となり得る巨大な粒子が成長したためと考えられる。リテーナーリング圧力を下げるか、摩耗レートの低いリテーナーリング材料を採用することによりこのモードのマイクロスクラッチは低減することが出来ると考えられる。マイクロスクラッチの要因となる粗大粒子は、スラリーの品質を管理する指標である LPC の規格である $0.5\mu\text{m}$ 程度の大きさではなく、もっと大きく成長した粒子であると考えられる。ミクロな材料除去メカニズムとつきあわせて考えると、研磨パッドのコンタクト部を一定の大きさ以下に制御することがスクラッチ低減にも効果があると考えられ、今後その実証を行っていききたい。

第 5 章の参考文献

- [1] F. C. Chang, S. Tanawade, and R.K. Singh : “Effects of Stress-Induced Particle Agglomeration on Defectivity during CMP of Low- k Dielectrics “, J. Electrochem. Soc. **156** (2009) H39.
- [2] A. K. Sikder, P. Zantye, S. Thagella, A. Kumar, B. M. Vinogradov, and N. V. Gitis: “Delamination studies in Cu-ultra low-k stack”, Proc. CMPMIC, 2003, p. 120.
- [3] T. Y. Kwon, B. J. Cho, M. Ramachandran, A. A. Busnaina, and J. G. Park: “Investigation of source-based scratch formation during oxide chemical mechanical planarization”, Tribology Lett. **50** (2013) 169.
- [4] T. C. Chang, T. M. Tsai, P. T. Liu, C. W. Chen, S. T. Yan, H. Aoki, Y. C. Chang, and T.Y. Tseng: “CMP of ultra low-k material porous-polysilazane (PPSZ) for interconnect applications”, Thin Solid Films **447** (2004) 524.
- [5] C. L. Borst, D. G. Thakurta, W. N. Gill, and R. J. Gutmann: “Chemical-mechanical planarization of low-k polymers for advanced IC structures”, J. Electron Packaging **124** (2002) 362.
- [6] K. Jami, S. Vedula, G. Blumenstock, J. Chen, K. Kim, and Y. Kim: “Optimization of edge die yield through defectivity reduction”, Solid State Technol. **52** (2009) 10.
- [7] S. Kamo, H. Miyauchi, and H. Shida: “CMP pad surface characterization for the scratch generation mechanism”, Proc. Int. Conf. Planarization/CMP Technol., 2009, p. 271.
- [8] Y. J. Seo, S. Y. Kim, and W. S. Lee: “Reduction of process defects using a modified set-up for chemical mechanical polishing equipment”, Microelectron. Eng. **65** (2003) 371.
- [9] Z. Lin, J. Zahka, and G. Vasilopoulos. Tech. Rep., Millipore Corporation, Billerica MA (1998) MA071.
- [10] E. E. Remsen, S. Anjur, D. Boldridge, M. Kamiti, S. Li, T. Johns, C. Dowell, J. Kasthurirangan, and P. Feeney: “Analysis of Large Particle Count in Fumed Silica Slurries and Its Correlation with Scratch Defects Generated by CMP”, J. Electrochem. Soc. **153** (2006) G453.
- [11] Y. J. Seo, S. Y. Kim, Y. O. Choi, Y. T. Oh, and W. S. Lee: “Effect of slurry filter size

- on the chemical mechanical polishing (CMP) defect density”, *Mater. Lett.* **58** (2004) 2091.
- [12] K. Tamai, T. Akatsuka, H. Morinaga, T. Doi, and S. Kurokawa: “Impact of SiO₂ agglomeration on surface defectivity during CMP process”, *Proc. Int. Conf. Planarization/CMP Technol.*, 2009, p. 288.
- [13] G. Basim and B. Moudgil: “Effect of soft agglomerates on CMP slurry performance”, *J. Colloid Interface Sci.* **256** (2002) 137.
- [14] N. C. Crawford, S. Kim, R. Williams, D. Boldbridge, and M. W. Liberatore: “Shear thickening of chemical mechanical polishing slurries under high shear”, *Rheol. Acta* **51** (2012) 637.
- [15] A. Isobe : “CMP hardware trends for future ULSI devices”, Presented at 19th VMIC, 2002 (Invited).
- [16] Akira Isobe : “Unique air floating concept head “Sylphide” for next generation CMP”, presented at IC-China Seminar at Shanghai in 2004
- [17] 磯部晶 : 「LSI デバイスの進展とそれを支える CMP 装置」月刊トライボロジー **16** (2002) 184
- [18] 磯部晶 : 「CMP の「継続的改善」に求められる研磨パッド材特性」*Material Stage* **6** (2006) 69.
- [19] S. Yamada, and A. Isobe : “Leading edge CMP head development for excellent polishing planarity & uniformity using solo pad”, *Proc. 19th VMIC*, 2002, p. 469.
- [20] Akira Isobe, Akihiko Yamane, Katsunori Tanaka, Soshi Yamada, and Minoru Numoto : “A novel air floating head for next generation CMP”, *Proc. CMPMIC*, 2003, p. 509.
- [21] Takashi Fukui, Katsunori Tanaka, Minoru Numoto, Akihiko Yamane, and Akira Isobe : “A study toward edge exclusion 1 mm ; substrate shape and polishing profile correlation”, *Proc. 20th VMIC*, 2003, 3K.
- [22] Akira Isobe: “CMP productivity improvement with ChaMP”, presented at IC China Seminar at Shanghai in 2005.
- [23] S. Kondo, et al.: “Low-pressure CMP for reliable porous low-k / Cu integration”, *Proc. IEEE Int. Interconnect Technology Conf.*, 2003, p. 86.

- [24] S. Takemiya, N. Nakazawa, and S. Shinmaru: “Effect of additive in barrier CMP slurries on the polishing selectivity of low-k layers”, Reports Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd. **56** (2006) 29.
- [25] Akihisa Ueno, Toshiyuki Yokoyama, Akihiko Yamane, Soshi Yamada, Tsutomu Yamazaki, and Akira Isobe : “Ability of preventing delamination for low-k film with air float concept (AFC) CMP head in copper CMP”, Proc. 20th VMIC, 2003, 3H.
- [26] T. Yokoyama, T. Komiyama, T. Fukui, T. Yamazaki, A. Yamane, and A. Isobe : “Improvement of copper CMP performance by controlling pad temperature using solo pad”, Proc. 1st PACRIM CMP, 2004, p. 5.
- [27] Osamu Kinoshita, Tsutomu Yamazaki, Yomoyuki Fukuda, and Akira Isobe : “Defect improvement in CMP process by using lower retainer ring pressure”, Proc. 1st PACRIM CMP, 2004, p. 240.
- [28] A. Isobe, T. Komiyama, T. Yokoyama, and S. Kurokawa: “New model of defect formation caused by retainer ring in chemical mechanical polishing”, Jpn. J. Appl. Phys., **52** (2013) 126502.
- [29] Don Grant: “A New Method for Determining the Size Distribution of the Working Particles in CMP Slurries”, presented at Levitronix CMP Conference 2005.
- [30] W. Choi and R. K. Singh: “Roles of colloidal silicon dioxide particles in chemical mechanical polishing of dielectric silicon dioxide”, Jpn. J. Appl. Phys, **44** (2005) 8383.
- [31] 鈴木、浅羽、橋本、社本 : 「圧縮試験装置を用いた CMP 研磨パッドの非線形粘弾性の同定」 精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集 2011, p. 161.

第6章 単層パッドによるローカル平坦化改善

ー平坦化モデルに関する考察

第1章で説明したようにCMPは平坦化を目的としたプロセスであるが工程により平坦化の種類が分かれる。ILDの場合はグローバル平坦化、STIやタンゲストンプラグ、Cuダマシンなどはローカル平坦化となる。ILDのグローバル平坦化はリソグラフィーの露光エリアの高さを揃えてフォーカスマージンを改善することを目的としている[1-3]。グローバル平坦化のメカニズムとモデルについては様々な報告があり[4-7]、通常用いられる硬質ウレタンパッドとクッション層の積層構造パッドの代わりに、上層の硬質ウレタンパッドのみの単層パッドを用いるとグローバル平坦性に効果があることが知られている[8-10]。しかし、単層パッドはウエハ面内の圧力を分散するクッション層が無いいため、面内均一性を制御することが難しく、研磨ヘッドの工夫が必要である。一方、単層パッドによるローカル平坦性の改善についてはSTIに関する報告があるが[11,12]、これは評価パターンが4mm²と大きく、グローバル平坦化効果の影響が大きいと考えられる。そこで、単層パッドのローカル平坦性改善効果についてCuダマシン構造を用いて評価した。その評価結果に基づいて、パッド表面を平滑と見なしたマクロ的なモデルでグローバル平坦化、ローカル平坦化について考察を行い、ローカル平坦化についてはさらにミクロ的モデルが必要であることを指摘した[13,14]。

6.1 実験方法

Cu膜付きブランケットウエハとパターン付きウエハを研磨し、それぞれ研磨レートと表面トポグラフィーを評価した。研磨パッドにはニッタハース製IC1000単層パッドと、同IC1400積層パッドを用いた。IC1400の上層パッドはIC1000と同一である。いずれのパッドもその表面に同心円溝(kグループ)が形成されている。Cu研磨スラリーにはシリカベースで酸化剤にH₂O₂を用いた市販スラリーを用いた。コンディショナーには三菱マテリアル製#100ダイヤモンド粒4インチドットタイプのものを用いた。

研磨装置には東京精密製 ChaMP-332 を用いた[15-18]。これは 300mm ウエハ用量産装置で、3 プラテン 2 ヘッドの構成を持つ。一つのヘッドが右あるいは左のプラテンと中央のプラテンの間を移動することができ、2 ステップの CMP を効率よく行うことができる。今回の評価では一つのプラテンのみを用いて CuCMP を行った。この装置は第 5 章で説明したとおり、エアフローティングコンセプトに基づいたヘッド構造を有しており、単層パッドでも良好な面内均一性を得ることができる。また、この装置は白色光を用いた終点検出器を備えており、研磨中の基板からの反射光の変化で終点を検知する[19]。プラテン内には冷却水を流す流路が設けられており、プラテン温度を制御できる。最初の実験では冷却水の温度は 20 °C に設定されており、後半の実験では 20~40 °C に変化させた。研磨パッド表面の温度をモニターするためには IR カメラを用いた。

研磨条件は基板圧力 20.7 kPa、リテーナーリング圧力 6.9 kPa、プラテン回転速度とヘッド回転速度はそれぞれ 83、78 min⁻¹ であった。スラリー流量は 270 ml/min、研磨パッドのドレッシングは ex-situ モードで 30 s、ディスク荷重 59 N、プラテン回転速度、ディスク回転速度をそれぞれ 80 min⁻¹、88 min⁻¹ で毎回行った。

評価用ウエハは、SiO₂ 上に Ta 膜を介して 1.5 μm の厚さの Cu を成膜したブランケットウエハと、MIT754 パターン上に 1000 nm の Cu と 15 nm の Ta を成膜したパターン付きウエハを用いた。ブランケットウエハの研磨時間は 60 s、TEG ウエハの研磨時間は終点検出器により”Just Cleared”の時間とした。

研磨レートは研磨前後の Cu 膜厚の変化を 4 端子シート抵抗測定機を用いて評価した。面内均一性を基板の直径方向の研磨レートプロファイルとして測定した。ディッシング+エロージョン[20-23]は触針式プロファイロメータを用いてライン/スペース (L/S) = 9.0/1.0 μm のパターンを測定し代表値として用いた。基板面内の分布は中心から外周にかけて半径上の 4 チップを測定して評価した。

6.2 実験結果

ブランケットウエハで測定した研磨レートの面内プロファイルを図 6.1 に示す。IC1400 の研磨レートは 925 nm/min、面内均一性は $1\sigma = 1.9\%$ だった。IC1000 の研磨レートは IC1400 よりも低い 765 nm/min だったが均一性はほぼ同等の 2.0% であった。

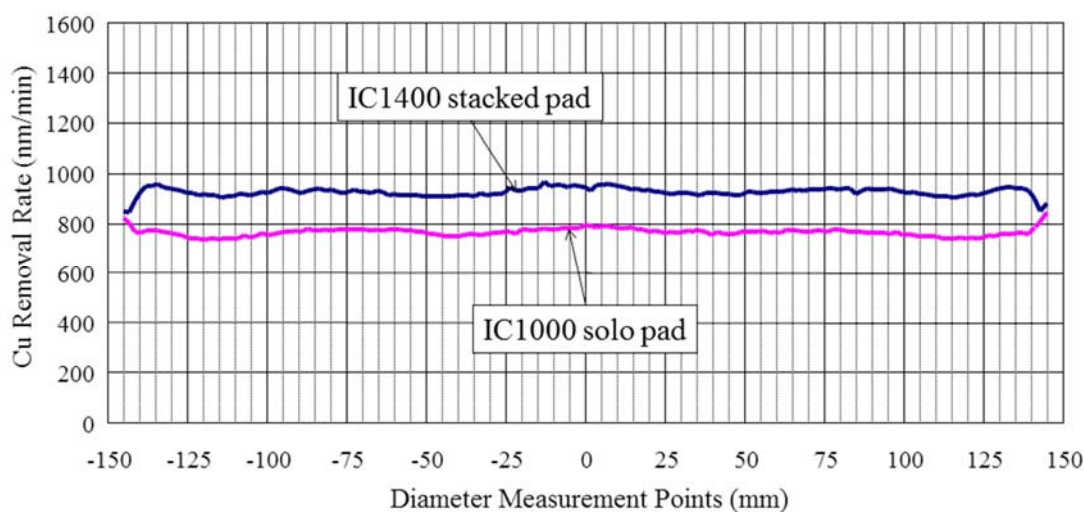


図 6.1 Cu 研磨レートの面内分布の比較 (IC1000 vs IC1400)

次にパターン付きウエハを同じ条件で研磨した。研磨レートはパッドによって異なるが、研磨時間は終点検出により決定しているので、研磨量は同等と考えられる。この時のエロージョン+ディッシングの平均値は IC1400 で 72 nm、IC1000 で 59 nm であった。

どちらの研磨パッドも基板に接して研磨を行う表面は同じ IC1000 であるが、積層の IC1400 よりも単層の IC1000 では研磨レートが低く、平坦性が良好な結果となった。図 6.2 で示す測定によりパッドのバルク圧縮率を測定すると、IC1400 で 3~4%、IC1000 で約 1% となる。この圧縮率の違いが上記研磨レートと平坦性の違いを説明できる可能性がある。すなわち、ILD と同様に IC1000 単層パッドの低圧縮率によって平坦性が改善し、また、パッドの追従性が悪いことにより、基板とパッドの接触部が少なくなり研磨レートが低下したと考えることができる[24]。しかし、後で議論するように、ローカル平坦性とグローバ

ル平坦性はそのメカニズムが異なるはずであり、別の要素がローカル平坦性に影響を与えている可能性がある。

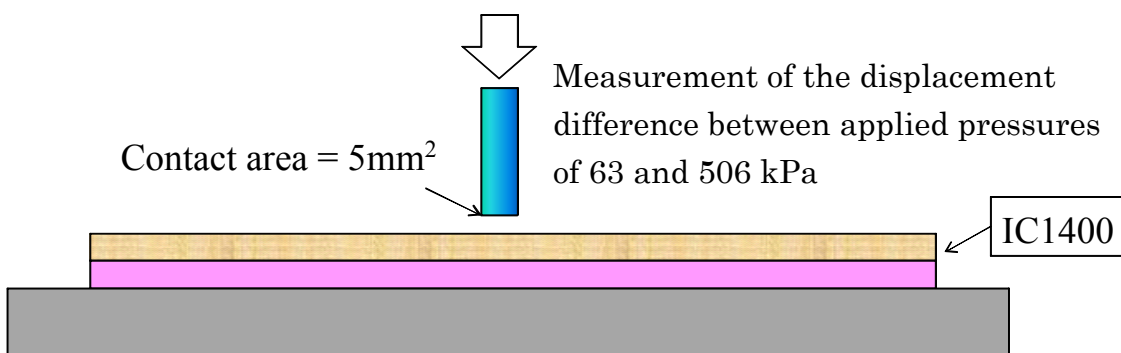


図 6.2 研磨パッドのバルク圧縮率測定の方法

考えられる別の要因として、研磨中の温度の違いがある。図 6.3 はブランケットトウエハ研磨中のパッド上の温度変化を比較したものである。いずれの研磨パッドにおいても研磨中に温度が上昇するが、IC1400 では温度が上昇し続けるのに対し、IC1000 では研磨開始 30 s 後に上昇が止まる。これは、研磨パッドの熱伝導率の差によるものと考えられる。IC1400 は下層のクッション層の存在により IC1000 よりも熱伝導率が低いと考えられる。そのため、研磨により発生した熱をプラテンに逃がすことが難しくパッド表面温度が上昇し続ける。結果として IC1400 の方が IC1000 よりも研磨中の温度が高くなる。

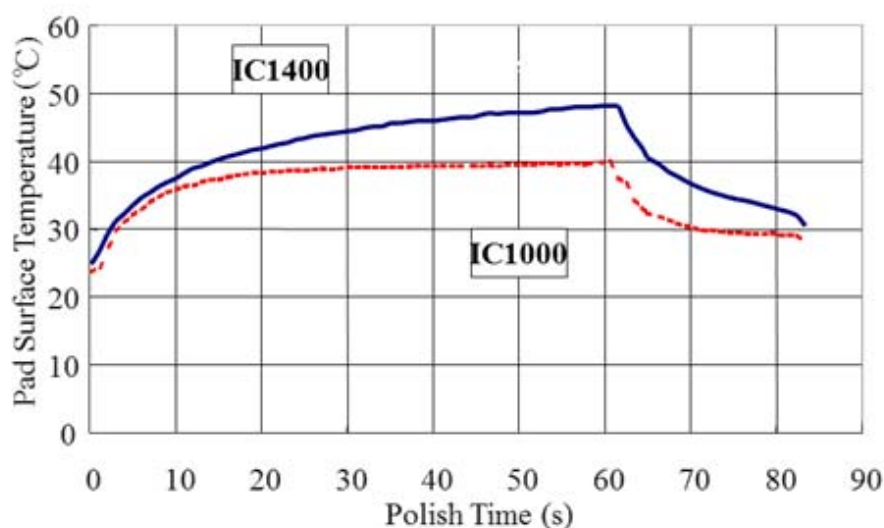


図 6.3 研磨中の研磨パッド表面温度の変化

研磨パッドの表面温度が平坦性に影響を与えているという仮説を確かめるためにプラテン設定温度を変化させて研磨試験を行った。図 6.4 にプラテン設定温度と研磨レートの関係を示す。いずれのパッドもプラテン設定温度の上昇とともに研磨レートも増加するが、その傾きは IC1000 の方が大きい。図 6.5 にはプラテン設定温度とディッシング+エロージョン量の関係を示す。傾向は図 6.4 と同様である。

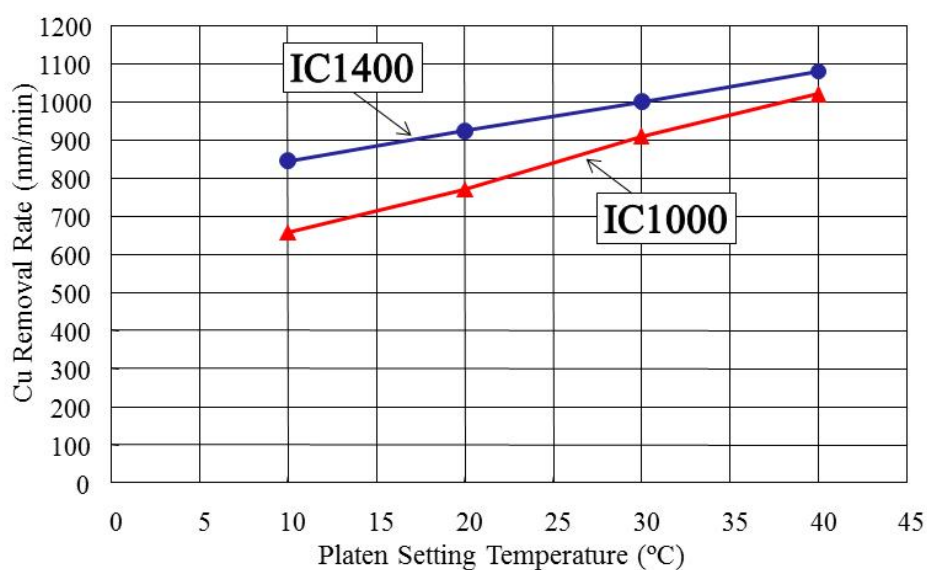


図 6.4 プラテン設定温度と研磨レートの関係

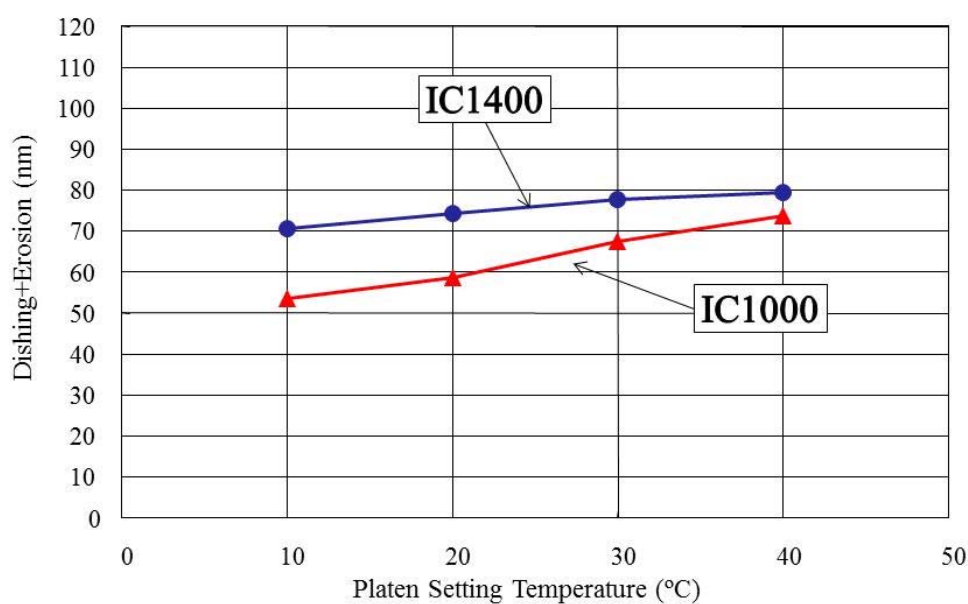


図 6.5 プラテン設定温度とディッシング+エロージョンの関係

研磨中のパッド表面温度は IR カメラでモニターしたが、その一例を図 6.6 に示す。図中の色は温度を表し、基板の通過する部分の温度が高く、特に基板の中心に相当する位置で最高温度となっている。図 6.3 の測定値はこの位置の温度をプロットしたものである。IC1400 では IC1000 よりも研磨中の温度が高だけでなく、パッド内の温度レンジも大きいことがわかる。研磨中の最高到達温度とプラテン設定温度との関係を図 6.7 に示す。IC1000 は IC1400 よりも傾きが大きく、IC1400 よりも熱伝導率が高いことを示している。

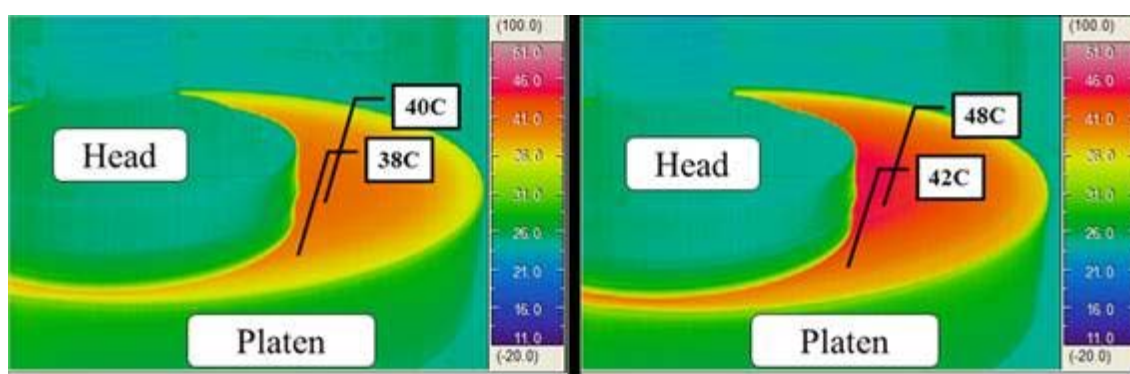


図 6.6 IR カメラによる研磨中の温度モニター例

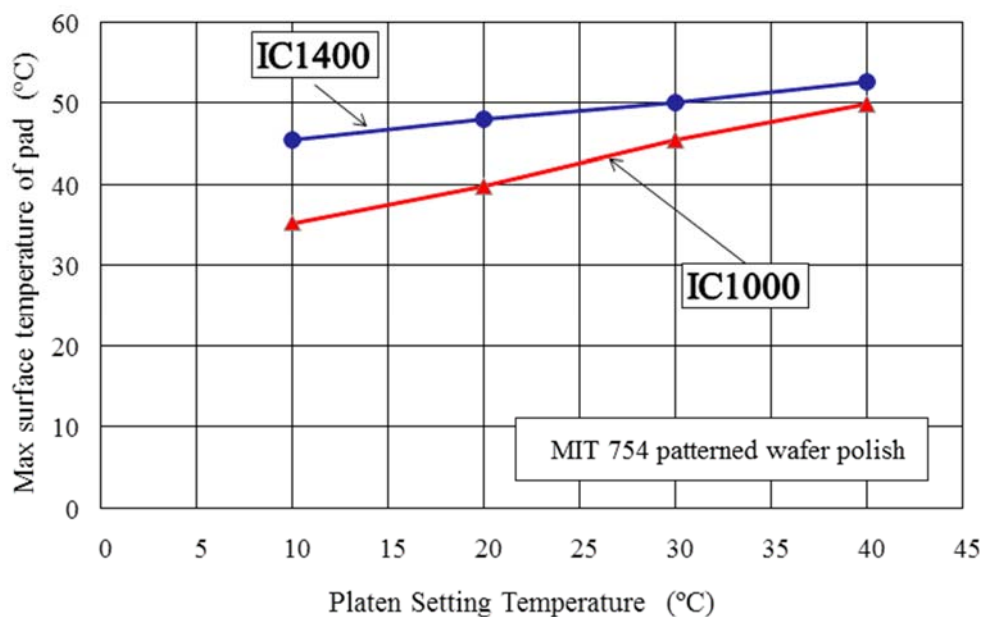


図 6.7 プラテン設定温度とパッド上到達温度の関係

研磨パッド表面温度と研磨レート、平坦性の関係を明らかにするために図 6.4、6.5 の横軸を、プラテン設定温度から研磨パッド表面到達温度に置き換えて図 6.8、6.9 に示す。これらのグラフでは研磨パッドの種類にかかわらず平坦性も研磨レートも研磨パッド表面温度と強い相関があることを示している。

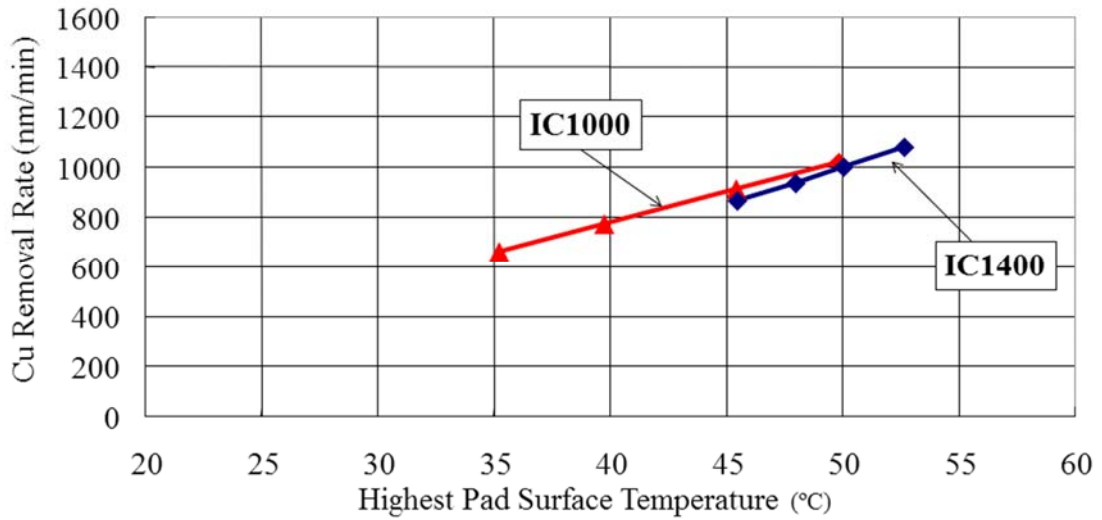


図 6.8 パッド表面温度と研磨レートの関係

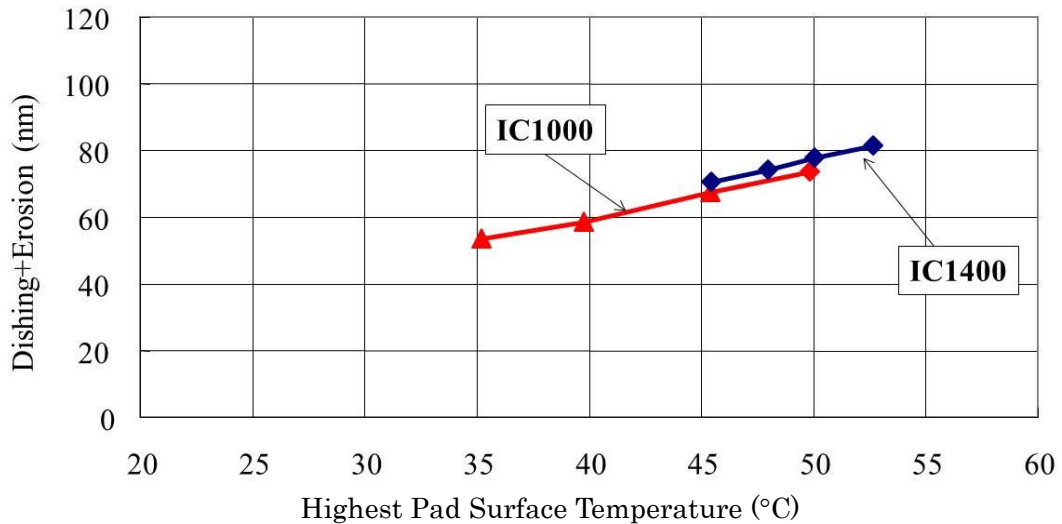


図 6.9 パッド表面温度とディッシング+エロージョンの関係

図 6.10 にはウエハ面内の各測定位置でのディッシング+エロージョン量を示す。IC1000 ではディッシング+エロージョン量が IC1400 よりも少なく、また、面内のばらつきも小さい。IC1400 ではディッシング+エロージョンの面内ばらつきが見られ、ウエハ中心部が大きく周辺部が小さい傾向を示している。

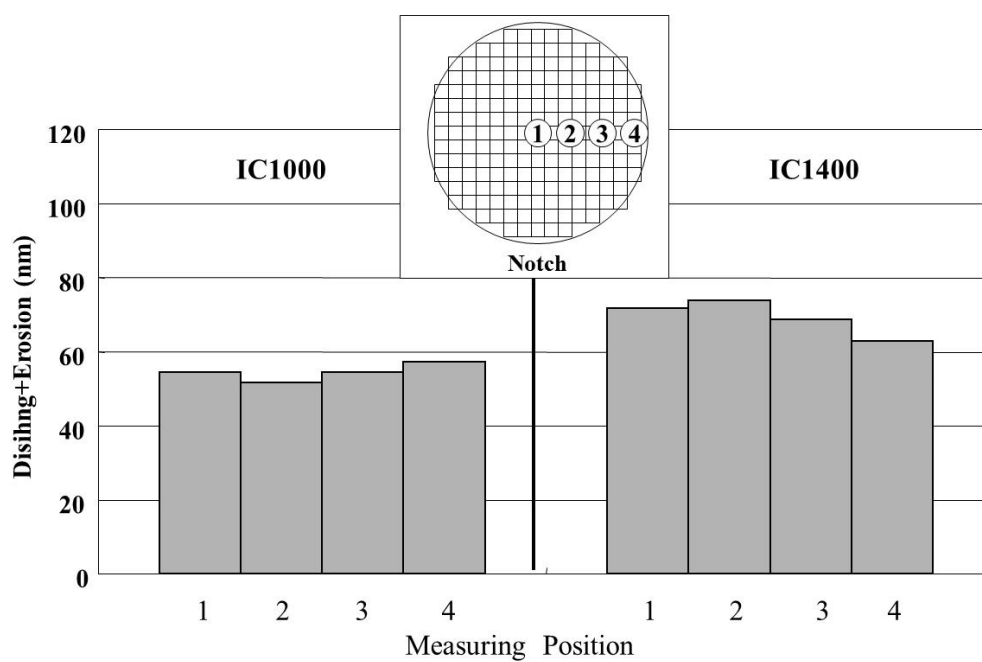


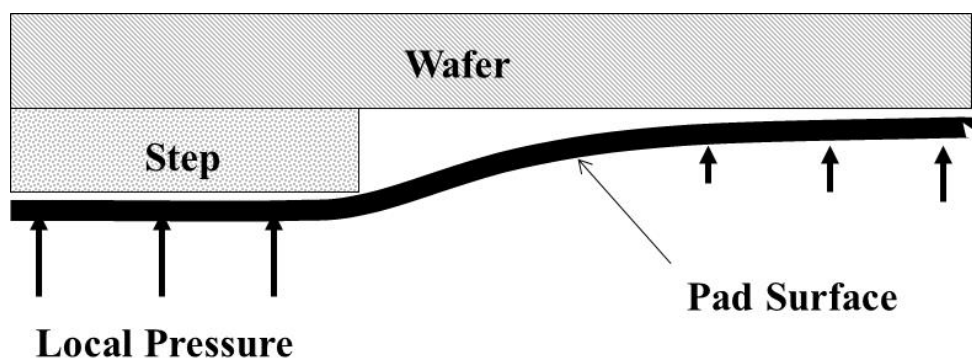
図 6.10 ディッシング+エロージョンのウエハ面内分布

6.3 考察

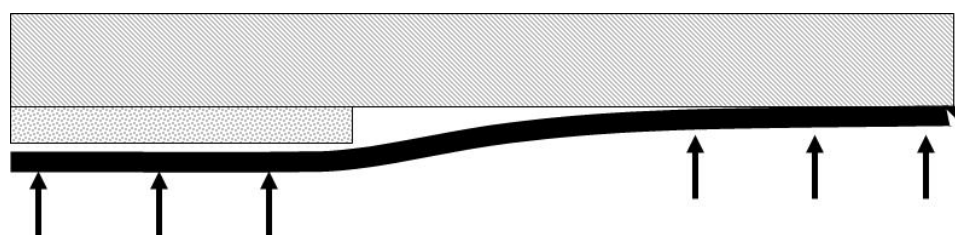
以上の結果は、研磨パッドの表面温度の違いが、研磨レートと平坦性両方の研磨パッド間差の支配的要因であることを示している。では次に、温度による研磨レートと平坦性の変化のメカニズムについて考察する。研磨パッド表面温度が高いほど研磨レートが高い理由は、単純に温度による化学的要素の加速で説明できる。また、平坦性の違いも同様の理由で説明することができる。すなわち、スラリー中のエッチング要素が温度により加速され、研磨レートとともにディッシングが進行するというものである。もしそうだとすると、温度が上昇するとパターンサイズによらずディッシングが悪化するはずであるが、実際にはそうした傾向は観察されなかった。別の可能性として、温度によってパッド表面の物性が変化したということが考えられる。研磨パッドの物性とグローバル平坦化、ローカル平坦化の関係については以下のように考えることができる。

ILD CMP の場合、図 6.11 に示すようにウエハ上のパターンに起因するローカル圧力の差によって平坦化が進行する。実際の研磨パッドは多数のポアやドレッシングにより荒らされた表面に μm オーダーの凹凸があり、パッド表面とウエハとの接触面積率はわずか 1%かそれ以下であることが知られている[25]。しかし、図 6.11 に示したように、パッドを平滑な表面とし、プレストンの式がローカルな圧力依存性でも成り立つと考えるモデルは、研磨パッドのマクロ挙動を議論する場合には問題ないと考えられている。研磨開始時には凸部と凹部のローカル圧力差により凸部の研磨が高い(図 6.11(a))。研磨が進行すると凸部の高さが減少し、ローカル圧力差も小さくなる。このため、徐々に凸部と凹部の研磨レート差が少なくなり、やがてその差が無くなるとそれ以上平坦化は進行しなくなる(図 6.11(b))。これを「限界平坦性」と呼ぶことにする。限界平坦性はパッドの変形量に影響を受ける。パッドの変形量が少ない場合には限界平坦性の凹凸間の距離は長くなりあるいは凹凸の段差は低くなる。Boning 等はウエハ上のパターン密度と研磨パッドの物性、ヤング率とポアソン比を用いて、平坦性のシミュレーションを行っている[4]。ここでグローバル平坦性に関わる積層研磨パッドの変形を考える際には、上層パッドの曲げ弾性率[26]と下層パッドの

ヤング率が重要指標となる。これは、図 6.2 で示した圧縮率測定のお考え方に非常に似ている。単層パッドのグローバル平坦性が良い理由はここにある。



(a)



(b)

図 6.11 グローバル平坦化説明図 (a) 研磨開始時凸部は凹部に比べ圧力が高いため研磨レートが高い、(b) 凸部の段差が十分低くなると、凸部と凹部の圧力差がなくなりそれ以上平坦化が進まない

一方、STI や Cu などの CMP では、平坦化は 2 段階で行われる。初期の段差を平坦化する段階と、ストッパー膜上の余剰膜を完全に除去するオーバーポリッシュの段階である。最初の段階は ILD と同様であるが、通常はパターンサイズが小さいために ILD に比べると平坦化は容易である。そこで、ストッパー膜露出時には初期段差は完全に平坦化されていると仮定すると、オーバーポリッシュ時には研磨時間が長いほど平坦性が悪化することがわかる。ここでは、この第 2 段階の平坦化挙動について考察する。もしもストッパー膜の研磨レートと埋め込み膜の研磨レートが全く同じであれば平坦性の悪化は起きない。一般的にストッパー膜の研磨レートは埋め込み膜よりも低く設定されている。たと

例えば Cu ダマシンにおいて Cu の研磨レートがバリア膜の 10 倍と仮定する。オーバーポリッシュ開始時には初期段差が解消されていると仮定しているので図 6.12(a)に示すようにローカル圧力も同じで、そのままの研磨レート比 (バリア : Cu=1 : 10) と考えられる。研磨が進行するとこの研磨レート差により段差が大きくなり、それによってローカル圧力差が生じる。局所的な研磨レートもローカル圧力に比例すると仮定すると、圧力比が 10 : 1 になるまでディッシングは進行する。ここで、ILDCMP の場合と同様に、研磨パッド表面が平滑であると仮定すると、わずかの段差が生じただけで圧力差は急激に増大する。ILD の場合はパターン間の距離は mm オーダーであったものが、STI や Cu ダマシンの場合には μm オーダーであるためである。したがって、ローカル平坦化のメカニズムを考慮する場合には、パッド表面を平滑と考えるべきではない。Elbel 等はタングステン CMP のディッシングのモデルにパッド表面をスプリングのネットワークと考えるモデルを提唱した[27]。また、Vlassak 等はパッドの表面アスペリティとディッシングの関係について報告している[20]。いずれも、ローカル平坦性はパッドのバルク物性ではなく表面物性が支配的であるとの考察である。図 6.13 に示すようにパッドの表面をバネの集合と考えるとそのことが理解しやすい。バネ定数が大きい、すなわち、研磨パッド表面の実効弾性率が高い場合、段差によるローカル圧力差は短時間で大きくなりローカル平坦性の悪化はストップする。一方、バネ定数が小さい場合、すなわち、パッド表面の実効弾性率が小さい場合は、段差によるローカル圧力差は大きくならず段差が大きくなっても平坦性の悪化が継続する。ここで、研磨パッドの表面実効弾性率は、パッド材料の弾性率と表面アスペリティにより決まると考えられる。

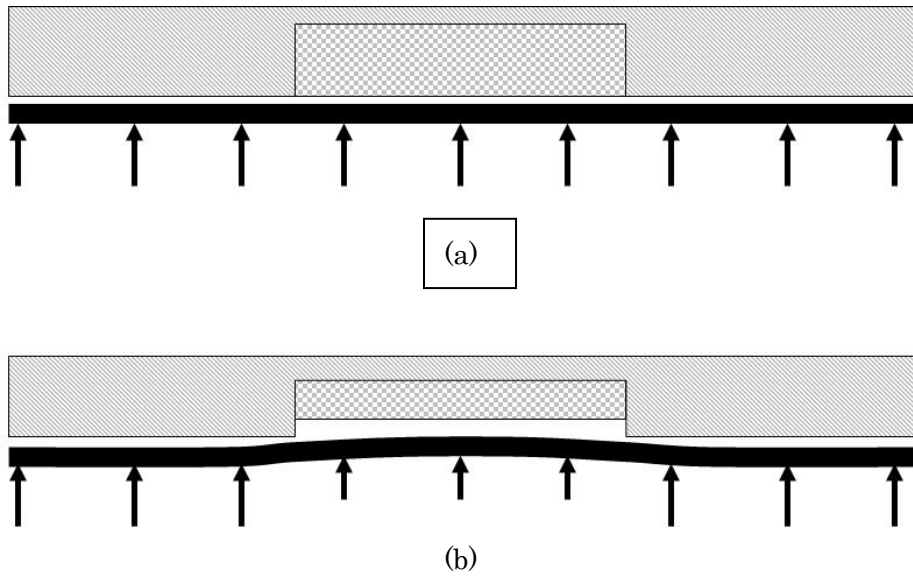


図 6.12 ローカル平坦化の説明図 (a) ストッパー膜露出時は圧力差はない、
 (b) 被研磨膜の研磨レート差により段差が生じ、生じた段差によって圧力差が生じる。圧力比と選択比の逆数が一致したところ平坦性悪化は止まる

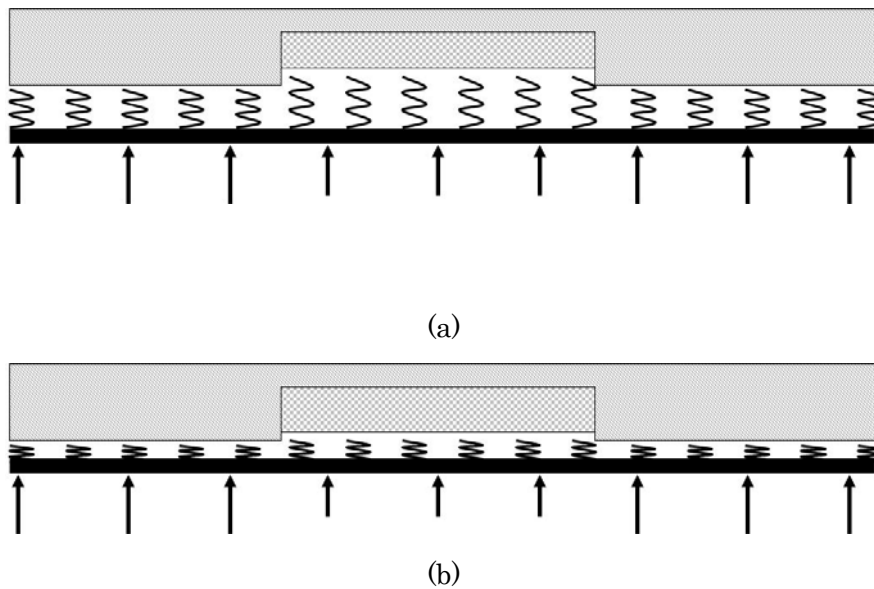


図 6.13 スプリングモデルによるローカル平坦化の説明図

研磨パッドのバルク材料としての弾性率のダイナミック測定 (Dynamic Mechanical Analysis : DMA) が報告されており [28,29]、IC1000 の貯蔵弾性率 (E') の温度依存性は図 6.14 のような挙動を示すことが知られている。この弾性率の変化が本章で述べた単層パッドによるローカル平坦性向上の要因と考えることができるが、バルク弾性率そのものが直接要因ではないと考えられる。表面弾性率の変化が本実験結果の原因と考えることができ、当然、表面弾性率はバルク弾性率の影響を受けるのでこうした結果になったと考えられる。すなわち、IC1000 単層パッドは熱伝導率が IC1400 積層パッドよりも高いために研磨中に発生した熱をプラテンに逃がすことができ、パッド表面温度を低く保つことができる。これにより、パッドの表面弾性率を高く保つことができるのでローカル平坦性が改善したと考えることができるのである。なお、第 5 章でも指摘したように、パッドの最表面の弾性率はバルク材料の弾性率とは異なることが知られている [30]。パッド表面では表面アスペリティによっても実効的な表面弾性率は変化すると考えられる。例えば、図 6.15 に示すように、大きなアスペリティと小さなアスペリティでは、小さなアスペリティの方が圧力に対する変形が小さいと考えられ、実効弾性率は大きいと推定する事が出来る。前章までに、研磨レート、マイクロスクラッチともに、微小で多数の接触点を有するような研磨パッドが有利であるとしたが、同じ方向が平坦性についても有利であると考えられるのである。一方、さらにミクロな砥粒の挙動まで考慮すると、さらなる平坦化改善を目的とした研磨パッドやスラリー開発のヒントが得られる可能性がある。前章までは平坦なウエハ上の砥粒挙動を考慮してきたのであるが、デバイスの CMP ではウエハ上に凹凸があり、しかも、その凹凸の大きさは研磨パッドの接触部の大きさに比べると極めて小さく、近年では砥粒サイズと同程度にまで微細化が進んでいる。そのような場合、研磨パッドとウエハはどのように接触し、そこで砥粒はどのような挙動をとるのか、シミュレーションや実験により確かめていくことにより、新たな知見が得られるのではないだろうか？今後の課題として取り組んでいきたい。

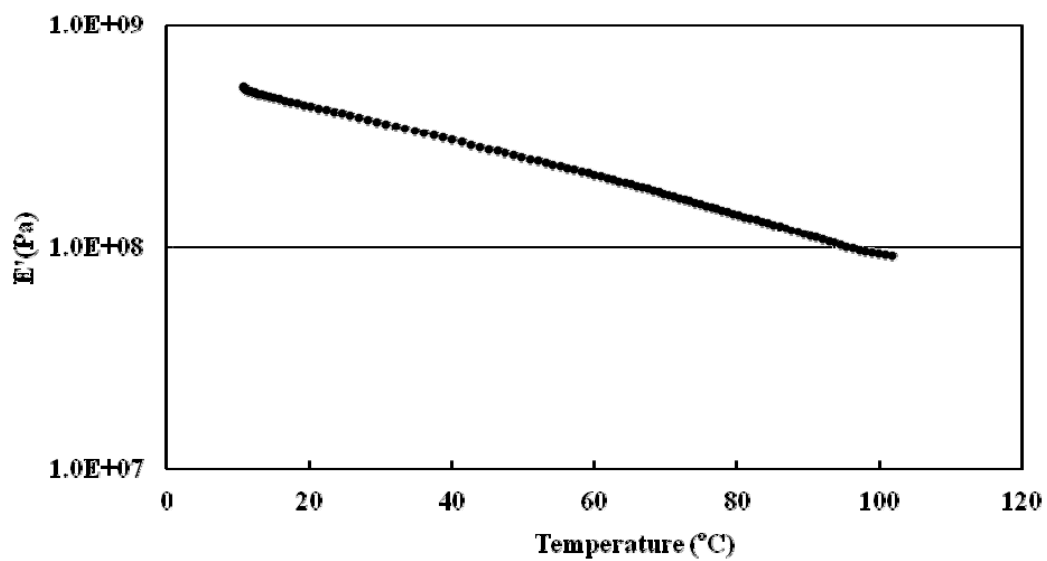


図 6.14 IC1000 の弾性率 (E') の温度依存性

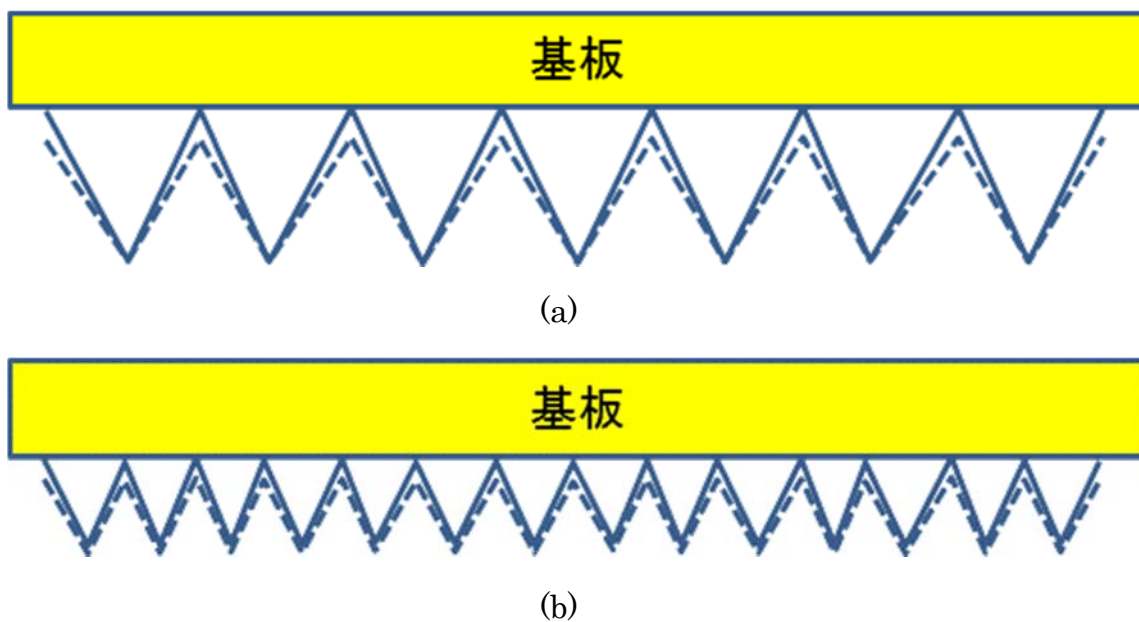


図 6.15 研磨パッド表面アスペリティと基板の接触 (a) 表面粗さが大きいとアスペリティ変形も大きい、(b)表面粗さが小さいとアスペリティ変形も小さい

6.4 結論

CuCMPにおいて単層パッドが積層パッドよりもローカル平坦性に優れることを実験により確かめた。これは研磨中の研磨パッド表面温度の違いであることを突き止めた。温度の違いによる表面弾性率の違いによりローカル平坦性が異なっていたのである。前章までに述べてきたパッドアスペリティとの関係を考慮すると、研磨レートとマイクロクラッチに有利であると考えられた微小な表面アスペリティは、圧力による変形が大きなアスペリティに比べて少ないと考えられ、ローカル平坦性にも有利であると考えられる。今後、凹凸を有するウエハ表面と研磨パッドのミクロな接触状態、および、そこにおける砥粒の挙動をシミュレーションや実験により研究することによって、さらなる研磨メカニズムの解明と、研磨パッドや研磨スラリーの飛躍的な発展を期待することが出来ると信じるものである。

第6章の参考文献

- [1] A. Isobe: "Planarization - From the viewpoint of fine patterning and reliability", Proc. SEMI Technology Symp. Japan, 1991, p. 276.
- [2] International Technology Roadmap for Semiconductors 2011 ed., Lithography, p. 7.
- [3] P. B. Zantye, A. Kumar, and A. K. Sikder: "Chemical mechanical planarization for microelectronics applications, Mater. Sci. and Eng. R. **45** (2004) 89.
- [4] D. Boning, B. Lee, C. Oji, D. Ouma, T. Park, T. Smith, and T. Tugbawa: "Pattern dependent modeling for CMP optimization and control", MRS Proc. **566** (1999) 761.
- [5] G. Namtz and L. Camilletti: "Modeling of chemical mechanical polishing: A review", IEEE Trans. Semicond. Manuf., **8** (1995) 382.
- [6] D. O. Ouma, S. Boning, J. E. Chung, W. G. Easter, V. Saxena, S. Misra, and A. Crevasse: "Characterization and modeling of oxide chemical-mechanical polishing using planarization length and pattern density concepts", IEEE Trans. Semicond. Manuf. **15** (2002) 232.
- [7] D. G. Takurta, D. W. Schwenenman, R. J. Gutmann, S. Shankar, L. Jiang, and W.N. Gill: "Three dimensional wafer-scale copper chemical-mechanical planarization model", Thin Soid Films **414** (2002) 430.
- [8] K. S. Choi, C. W. Nam, C. W. Jeon, C. K. Oh, M. S. Chae, S. D. Kim, and C. T. Kim: "A New Approach to Optimize Pre-metal Dielectrics CMP Process for DRAMs", Proc. Advanced Metallization Conf., 1998, p. 225.
- [9] 山田、菅谷、小西、黒河、土肥：「硬質パッドを用いた高平坦化 CMP 技術の開発：CMP プロセスにおけるウエーハ面内研磨均一性の改善」，精密工学会誌 **74** (2008) 1199.
- [10] K. S. Choi, C. W. Nam, C. W. Jeon, C. K. Oh, M. S. Chae. S. D. Kim, and C. T. Kim: "A new approach to optimize pre-metal dielectrics CMP process for DRAMs", Proc. ULSI XIV, MRS, 1999, p. 225.
- [11] J. David, B. Bonner, T. Osterheld, and R. Jin: "Advanced STI CMP solutions for new device technologies", Proc. SEMI Technology Symp. in Japan, 1999, p. 8.
- [12] R. Jin, J. David, B. Abbassi, T. Osterheld, and F. Redeker: "A production-proven shallow trench isolation (STI) solution using novel CMP concepts", Proc. 4th

- International Conf. on CMP, 1999, p. 314.
- [13] T. Yokoyama, T. Komiyama, T. Fukui, T. Yamazaki, A. Yamane, and A. Isobe : “Improvement of copper CMP performance by controlling pad temperature using solo pad”, Proc. 1st PACRIM CMP, 2004, p. 5.
- [14] A. Isobe, T. Komiyama, T. Yokoyama, and S. Kurokawa: “Mechanisms of local planarization improvement using solo pad in chemical mechanical polishing”, Jpn. J. Appl. Phys., **52** (2013) 126501.
- [15] 磯部晶 : 「LSI デバイスの進展とそれを支える CMP 装置」月刊トライボロジー **16** (2002) 184.
- [16] 磯部晶 : 「CMP の「継続的改善」に求められる研磨パッド材特性」Material Stage **6** (2006) 69.
- [17] S. Yamada, and A. Isobe : “Leading edge CMP head development for excellent polishing planarity & uniformity using solo pad”, Proc. 19th VMIC, 2002, p. 469.
- [18] A. Isobe, A. Yamane, K. Tanaka, S. Yamada, and M. Numoto : “A novel air floating head for next generation CMP”, Proc. CMPMIC, 2003, p. 509.
- [19] O. Matsushita, A. Yamane, and A. Isobe: “Novel EDP using white light for ILD application”, Proc. CMPMIC 2003, 8F.
- [20] J. Vlassak: “A contact-mechanics based model for dishing and erosion in chemical-mechanical polishing”, MRS Proc. **671** (2001) M4.6.1.
- [21] S. Takemiya, N. Nakazawa, and S. Shinmaru: “Effect of additive in barrier CMP slurries on the polishing selectivity of low-k layers”, Rep-Res. Lab. Asahi Glass Co., Ltd., **36** (2006) 29.
- [22] Z. Junxiong, C. Lan, R. Wenbo, L. Zhigang, and S. Weixing: “Dummy fill effect on CMP planarity”, J. Semicond. **31** (2010) 106003.
- [23] J. Warnock: “A two-dimensional process model for dishing and erosion in chemical-mechanical polish planarization”, J. Electrochem. Soc. **138** (1991) 2392.
- [24] H. J. Kim, J. K. Choi, M. K. Hong, K. Lee, and Y. Ko: “Contact behavior and chemical mechanical polishing (CMP) performance of hole-type polishing pad”, ECS J. Solid State Sci. Technol. **1** (2012) 204.
- [25] 三橋、小野、磯部 : 「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, p. 20.
- [26] ISO178:2010.
- [27] N. Elbel, B. Neureither, B. Ebersberger, and P. Lahnor: “Tungsten Chemical mechanical polishing”, *J. Electrochem. Soc.* **145** (1998) 1659.
- [28] H. Lu, Y. Obeng and K.A. Richardson: “Applicability of dynamic mechanical analysis for CMP polyurethane pad studies”, *Mater. Charact.* **49** (2002) 177.
- [29] I. Li, K. M. Forsthoefel, Y. S. Obeng, W. G. Easter, and A. Maury: “Dynamic mechanical analysis (DMA) of CMP pad materials”, *MRS Proc.* **613** (2000) E7.3.
- [30] 鈴木、浅羽、橋本、社本：「圧縮試験装置を用いた CMP 研磨パッドの非線形粘弾性の同定」 精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集 2011, p. 161.

第7章 総括

CMP は今や電子デバイス製造になくなくてはならない工程となっているが、その基本的メカニズムは未だ完全には解明されていなかった。本論文では CMP に求められる様々な性能に深く影響を与えていると考えられる研磨パッド表面がどのように研磨における材料除去に関わっているかを巨視的および微視的な視点からモデル化を試みた。巨視的モデルでは提案したモデルが実際の研磨レート変動現象と良く一致することを示した。また、様々な研磨レート変動現象に対してその改善策を提示した。パターン付きウエハ研磨前にブランケットダミーウエハの研磨条件・ドレス条件を変更し、パターン付きウエハ研磨時の研磨パッド表面状態をあらかじめ作り込むというのは定性的には有効であることが確認されており、将来的には提案したマクロモデルの式の定数を求めることにより、定量的にレート安定化の方策がとられるようになることを期待する。また、この考え方に基づくブレークインフリーパッドの開発につなげることが出来た。微視的モデルでは、従来の研磨モデルでは説明できなかった様々な現象を矛盾無く説明できる新たなモデルを提示することが出来た。研磨レートの向上のためには「小さい多数の基板との接触点を有する研磨パッド表面」が望ましいことが示され、そうした表面はマイクロクラッチ低減やローカル平坦性向上に対しても効果的である可能性を指摘した。いずれおモデルにおいても、単にモデルを提示するに留まらず、実際の CMP プロセスの改善につながる提言を行うことが出来たことにこの論文の意義があると考ええる。

得られた結果を以下にまとめる。

(研磨パッド表面変化のマクロモデルに関する研究)

- ・ コンディショナーディスクによって研磨パッド表面に形成される軌跡の面積を測定し、実際のプロセスでは1秒間にドレスされる面積はパッド全体の3%程度以下であることがわかった。
- ・ 研磨パッド表面を微小エリアに分割し、それぞれのエリアが低レートの“L”、高レートの“H”のいずれかの状態をとり、コンディショナーディスクによって“L”から“H”に、研磨によって“H”から“L”に変化するというモデルをたて、表面状態変化を式で表した。

- ・ 得られた式を研磨レートに換算し、文献に報告されている研磨レート変動データ、ならびに自ら行った実験結果と比較して、非常に良い一致を確認した。
- ・ さらに、量産現場でこれまでに経験されている様々な研磨レート変動現象をこのモデルでうまく説明することが出来た。

(フェレ径に基づいた研磨メカニズムの提案)

- ・ 研磨レートの圧力依存性は、圧力に依存して変化する研磨パッドと基板との接触面積に比例して作用砥粒数が変化することに由来するという従来のモデルでは、研磨パッド接触部で砥粒の入れ替わりが起こらず、現実的ではないという指摘を行った。
- ・ 研磨パッドの接触部と基板に挟まれてではなく、接触部の周縁に滞留した砥粒が材料除去を行っているという新しいモデルを提案した。
- ・ モデルの検証のために、表面粗さの異なる研磨パッドを用いて研磨評価を行い、研磨レートと表面粗さ指標との関係を調べた結果、 R_a 、 R_p 、 R_v 、 R_z 、さらにはパッドの接触面積率、接触点数には緩い相関しか見られなかった。
- ・ 一方、研磨パッドの基板接触部の総フェレ径とは強い相関関係が認められ、上記モデルの妥当性を支持していた。
- ・ さらに、基板圧力を変えたときに総フェレ径がどのように変化するかを計算し、基板圧力と総フェレ径はほぼ比例関係にあることを確認した。これにより、プレストンの式の研磨レートと基板圧力の比例関係をこのモデルでも説明することを示した。

(材料除去モデルの数値的考察)

- ・ 研磨パッドの接触部が基板上の任意の1点を1秒間に何回通過するかを計算し、典型的な例で1000回に達することを示した。また、接触面積率や接触部の大きさによる影響も調べた。
- ・ 上記接触回数から計算すると1回の接触あたりの材料除去は分子サイズよりもきわめて小さく、砥粒の作用を考慮に入れる必要があることがわかった。
- ・ 砥粒の接触部で吸着により材料除去が行われるという仮定の下、研磨パッドの基板接触部に存在する砥粒の数を計算したところ、20個～40個程度という数字が導き出された。

- ・ この数字はフェレ径モデルで研磨パッドの基板接触部の周縁に滞留する砥粒数として妥当と考えられる。

(欠陥制御に関する一考察)

- ・ リテーナーリングの圧力、材料を変化させて、マイクロスクラッチ発生数に相関があることを確認した。
- ・ リテーナーリングから研磨された樹脂とスラリー中の粗大粒子が凝集成長してスクラッチの原因となったと推定した。
- ・ 数 μm 以上の大きさの粗大粒子が基板とパッドアスペリティの接触部に挟まれてマイクロスクラッチを引き起こすと考えられ、パッド接触部のサイズを粗大粒子よりも小さくすることにより、マイクロスクラッチを低減できる可能性を示した。

(単層パッドによるローカル平坦化改善—平坦化モデルに関する考察)

- ・ 単層研磨パッドを用いて CuCMP を行い、積層研磨パッドとの平坦性を比較したところ、単層研磨パッドの方が良好であった。
- ・ 研磨パッド表面温度の解析から単層パッドによるローカル平坦性の改善はグローバル平坦性の場合と異なり、研磨パッド表面の温度の違いによる表面弾性率の違いに起因すると考えられる。
- ・ 研磨パッド表面を平滑と見なしたモデルによりグローバル平坦化とローカル平坦化のメカニズムに関して考察した。ローカル平坦化に関しては、研磨パッド表面の物性による影響が大きく、表面をバネの集合体と見なしたモデルでうまく説明することが出来る。
- ・ 表面アスペリティとの関係を考慮すると、微小なアスペリティの方が研磨パッド表面の実効弾性率が高いと考えられ、ローカル平坦化に有利であると考えられる。これは、研磨レート、マイクロスクラッチ改善の方向性と一致している。

今後の課題

マクロモデルにおいては、パッド表面変化を数式化し、現実の研磨レート変動現象と定数の合わせ込みを行うことにより、良い一致を見ることが出来たが、次のステップとしては、その定数の意味をミクロな現象にさかのぼって理解することにより、ミクロモデルとマクロモデルが融合し、CMPの加工メカニズムがさらに解明されることが必要である。それはまた、さらなるプロセス改善のヒントとなるであろう。また、すでに小さい多数の接触点を有する研磨パッド表面が研磨レート向上に効果があることは確認しているが、マイクロスクラッチ低減やローカル平坦性向上にも有効であるという仮説を実際に検証していく必要がある。さらに、これまでの平坦化モデルでは、第6章で説明したように研磨パッド表面を平滑面と見なしてその局所的な圧力差による研磨レート差で平坦化の進行を説明していたが、フェレ径モデルが材料除去メカニズムである場合、考え方を考える必要がある。平坦化に関してフェレ径モデルがどのように働くのかを考察・検証していく必要がある。そうした上で、理想的な研磨パッド表面状態を実現する研磨パッド開発、パッドコンディショナー開発、あるいはプロセス開発を行うことにより、総合的に高性能なCMPを具現化することが重要な課題であると言える。

謝辞

本研究を行うに当たり、熱心にご指導いただきました黒河周平教授には大変感謝しております。国際会議での発表は数多く経験していましたが、きちんとした学術論文誌に投稿した経験は無く、右も左もわからない状態だった私を根気よく導いていただき、その結果、およそ 20 年にわたる CMP に関する成果をまとめることができました。また、土肥俊郎教授、澤田廉士教授には、独りよがりであったり、説明不足であったりした内容について厳しくご指摘いただき、また、有意義なディスカッションを通じて、この論文の完成度を 1 ランク上げることが出来たと感謝しております。特に土肥先生は 3 年前にこの博士課程への挑戦を勧めていただいたのがきっかけとなっており、先生の勧めがなければ今日の日はなかったと思います。本当にありがとうございました。

CMP に携わって 20 数年がたち、その間に NEC、東京精密、ニッタハースと会社を変わることになりましたが、それぞれの会社の上司、同僚、部下の皆さんの指導、示唆、協力、激励などがあってこの論文に結びついたと思っています。最初に CMP に携わるきっかけを作っていたいただいたのは当時 NEC 半導体生産技術本部本部長代理だった水野修博士でした。1991 年の SEMI テクノロジーシンポジウムで平坦化に関する講演の機会を与えていただき、これからはローカル平坦化からグローバル平坦化が必要となり、CMP という技術がそれを実現する候補のひとつであるとの内容を話させていただき、同時に CMP の調査を開始しました。その後、日本では東芝と並んで 0.35 μm 世代にいち早く CMP を量産適用することに成功することができました。当時は海のものとも山のものともわからない CMP という技術について自由に評価検討を許していただいた水野博士をはじめとする NEC の自由な開発風土があったればこそだったと思います。その後、1995 年頃、同社生産技術研究所の三橋眞成博士と CMP の共同研究を行い、研磨パッドの真実接触面積が 1%程度であることを見いだしました。この成果は主に三橋博士によるものですが、世間にコンタクトエリアの概念が広がる何年も前にこうした知見を得ていたことは、研磨に関するメカニズムを考察する上で大変役に立ちました。また、NEC 時代には部下にも恵まれ、様々な実験に評価に取り組んでくれました。今回の論文作成に当たっても吉田茂之さんには当時のデータを提供していただき大変助かりました。その後 2002

年に東京精密に移り、CMP 装置事業を任せられ、開発成果をアピールするために、毎年 3～4 件の国際学会発表を自らも含め部下の皆さんにも行ってもらいました。結果的には事業を成功させることは出来ませんでした、大変貴重な経験と充実した数年間を過ごすことが出来ました。その機会を与えていただいたのは、私を東京精密に引っ張っていただいた故松田昌国さんでした。また、小宮山孝さん、横山利幸さんには投稿論文の連名者となっただき当時のデータを使わせていただくことが出来ました。2006 年に 2 度目の転職として、ニッタハースへ転職することになりました。転職を熱心に勧めてくださった故青木勝詔社長は私の入社後 4 ヶ月で病に倒れられ、ほとんど一緒に仕事が出来なかったことが残念でなりません。青木社長が生きておられたら私の人生もまた違ったものになっていたと思います。ニッタハースでも優秀な部下に恵まれ、羽場真一博士、西澤秀明博士、新田浩士博士、赤時正敏さん、尾形謙次郎さん達とは共著論文で、また今回の論文作成でご協力いただきました。また、柏原洋史さん、河井奈緒子さんにはデータ提供のご協力をいただきました。その他にも多くの優秀な若い技術者達と開発を行うことが出来ました。ニッタハースでは、プラナリゼーション研究会の幹事を務める機会をいただきました。この経験も大変有意義なものでした。幹事会のメンバーの多くの方とは以前よりおつきあいがありましたが、より深いおつきあいをさせていただくことにより、さらに CMP に対する知見が広がり、また、プラナリゼーション研究会のプログラム企画を立てるために、様々な分野の方ともお知り合いになることが出来ました。それらもこの論文につながったと言えると思います。

以上の方々は私がお世話になったほんの一部の方々です。こうした多くの方々に支えられてこの論文を完成させることが出来ました。深く感謝の意を表したいと思います。本当にありがとうございました。

平成 26 年 2 月
磯部 晶

研究業績目録

本研究に直接関係する学術雑誌投稿論文

1. Akira Isobe, Toshiyuki Yokoyama, Takashi Komiyama, and Syuhei Kurokawa: “Mechanisms of Local Planarization Improvement using Solo Pad in Chemical Mechanical Polishing”, Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 126501
2. Akira Isobe, Takashi Komiyama, and Syuhei Kurokawa: “New Model of Defect Formation Caused by Retainer Ring in Chemical Mechanical Polishing”, Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 126502
3. Akira Isobe, Masatoshi Akaji, Syuhei Kurokawa: “Proposal of New Polishing Mechanism Based on Feret’s Diameter of Contact Area between Polishing Pad and Wafer”, Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 126503
4. Akira Isobe, Kenjiro Ogata, and Syuhei Kurokawa : “Macromodel for Changes in Polishing Pad Surface Condition Caused by Dressing and Polishing”, Jpn. J. Appl. Phys. **53**(2014) 016501

本研究に直接関係する国際会議発表

1. Akira Isobe, Hideaki Nishizawa, Shinichi Haba, and Shuhei Kurokawa: “Numerical discussion of polishing mechanism considering contact area of polishing pad and that of polishing abrasives”, Proc. ICPT2011, p. 252

その他の本研究に関連のある業績

英文学術誌

1. Hideaki Nishizawa, Haruki Nojo, and Akira Isobe : “Fundamental study on Chemical-Mechanical polishing slurry of cobalt barrier metal for the next generation interconnect process”, Jpn. J. Appl. Phys. 49(2010)05FC03-1

国際会議発表、招待講演

1. Akira Isobe : ”Planarization – From the viewpoint of fine patterning and reliability”, SEMI Technical Symp. 1991, p.276
2. Soshi Yamada and Akira Isobe : “Leading Edge CMP Head Development for Excellent Polishing Planarity & Uniformity Using Solo Pad”, Proc. 19th VMIC, 2002, 9F
3. Takashi Fujita, Toshiro Doy, Akira Isobe, and Osamu Kinoshita : “Study of Electro-CMP for Copper Damascene Process”, Proc. 19th VMIC, 2002, p. 158
4. Akira Isobe : “CMP hardware trends for future ULSI devices”, presented at VMIC, 2002 (Invited)
5. Akira Isobe, Akihiko Yamane, Katsunori Tanaka, Soshi Yamada, and Minoru Numoto : “A Novel Air Floating Head for Next Generation CMP”, Proc. CMPMIC, 2003, p. 509
6. Osamu Matsushita, Akihiko Yamane, and Akira Isobe : “Novel EDP Using White Light for ILD Application”, Proc. CMPMIC, 2003, 8F

7. Takashi Fukui, Katsunori Tanaka, Minoru Numoto, Akihiko Yamane, and Akira Isobe : “A Study toward Edge Exclusion 1 mm ; Substrate Shape and Polishing Profile Correlation”, Proc. 20th VMIC, 2003, 3K
8. Akihisa Ueno, Toshiyuki Yokoyama, Akihiko Yamane, Soshi Yamada, Tsutomu Yamazaki, and Akira Isobe : “Ability of Preventing Delamination for Low-k Film with Air Float Concept (AFC) CMP Head in Copper CMP”, Proc. 20th VMIC, 2003, 3H
9. T. Yokoyama, T. Komiyama, T. Fukui, T. Yamazaki, A. Yamane, and A. Isobe : “Improvement of Copper CMP Performance by Controlling Pad Temperature Using Solo Pad”, Proc. 1st PACRIM CMP, 2004, P. 5
10. Osamu Kinoshita, Tsutomu Yamazaki, Yomoyuki Fukuda, and Akira Isobe : “Defect Improvement in CMP Process by Using Lower Retainer Ring Pressure”, Proc. 1st PACRIM CMP, 2004, p. 240
11. T. Yokoyama, T. Komiyama, T. Fukui, T. Yamazaki, A. Yamane, and A. Isobe : Improvement of Copper CMP Performance by Controlling Pad Temperature Using Solo Pad”, Proc. CMPMIC, 2003
12. Akira Isobe : “Unique Air Floating Concept Head “Sylphide” for Next Generation CMP”, presented at IC-China Seminar at Shanghai in 2004
13. Akira Isobe : “CMP Productivity Improvement with ChaMP”, presented at IC-China Seminar at Shanghai in 2005
14. Rika Tanaka, Haruki Nojo, Koichi Yoshida, and Akira Isobe : “Advanced W-CMP slurry for high planarity”, Proc. 4th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT) 2007, p. 315

15. Akira Isobe and Jae Hong Park : “Study of pad surface treatment for the improvement of process performance and productivity”, presented at 12th International symposium on Chemical Mechanical Planarization(CAMP), 2007
16. Hiroshi Nitta, Akira Isobe, Jae Hong Park and Takashi Hirao : “Chemical Enhanced Planarization” (CEP) Slurry for Thick Copper Process”, Proc. 5th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT), 2008, p. 125
17. Masatoshi Akaji, Shinichi Haba, Kouichi Yoshida, Akira Isobe, and Masaharu Kinoshita : “Study of optimum polishing pad surface for CMP”, Proc. 6th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT), 2009, p. 97
18. Yoshiyuki Matsumura and Akira Isobe : “Ultra-high-Removal-Rate Cu-Slurry Technology for 3D-IC TSV”, Proc. 6th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT), 2009, p. 125
19. H. Nishizawa, H. Nojo, and Akira Isobe : “Fundamental study on CMP slurry of cobalt barrier metal for next generation process”, Proc. Advanced Metallization Conf.(ADMETA) 19th Asian session, 2009, p. 76
20. H. Nishizawa, J. H. park, and A. Isobe : “One step polishing slurry for Cu-TSV process”, Proc. 7th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT), 2010, p. 325
21. Kenjiro Ogata, Hiroyuki Seno, Akira Isobe, and Koichi Yoshid : “A Novel Evaluation Method for pad Conditioners”, Proc. 8th Int. Conf. Planarization/CMP Technol.(ICPT), 2011, p. 360

国内学術会議、学術誌、解説記事等

1. 三橋真成、小野秀之、礮部品：CMP による平坦化研磨－パッドとウエハの接触状態－、精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集 1995 年 p. 409
2. 三橋真成、小野秀之、礮部品、山森篤：CMP による平坦化研磨－パッド真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 年 p. 927
3. 赤時正敏、森崎貞和、木下正治、繁田好胤、礮部品、吉田光一、朴裁弘、柏原洋史、河井奈緒子、宮本一隆、田中佑典、淡井良平：研磨パッドのブレークインフリーを目指した表面加工とその評価結果、精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 2009 年 p. 1037
4. 尾形謙次郎、妹尾浩行、吉田公一、礮部品：研磨性能に影響を及ぼすパッド表面指標の研究、精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、2010 年、p. 143
5. 山本恵司、羽場真一、礮部品：ナップパッドの研磨レート低下メカニズムに関する研究、精密工学会大会学術講演会講演論文集、2010 年、p.731
6. 礮部品、西澤秀明、羽場真一：研磨パッドおよび砥粒のコンタクトエリアを考慮した研磨メカニズムの数量的考察、精密工学会春期大会学術講演会講演論文集、2011 年、p. 347
7. 電子ジャーナル Electronic Journal 別冊 2002 半導体テクノロジー大全：第 4 編半導体製造技術 第 13 章 CMP 第 1 節 CMP 技術総論、第 3 節層間絶縁膜 CMP 技術と装置・材料
8. 電子ジャーナル Electronic Journal 別冊 2004 半導体テクノロジー大全：第 4 編半導体製造技術 第 13 章 CMP 第 1 節 CMP 技術総論、第 3 節層間絶縁膜 CMP 技術と装置・材料

9. 礬部晶：LSI デバイスの進展とそれを支える CMP 装置、月刊トライボロジー 16 (2002) 184 (解説記事)
10. 礬部晶：CMP における e-manufacturing、SEAJ Forum 2004
11. 礬部晶：CMP の「継続的改善」に求められる研磨パッド材特性、Material Stage 6 (2006) 69 (解説記事)
12. 礬部晶：CMP の基礎と実際、砥粒加工学会 第 17 回グラインディングアカデミーテキスト、2009 年、p. 40
13. 礬部晶：要素技術を統合する次世代 CMP 装置開発、砥粒加工学会誌 50 (2006) 448 (解説記事)
14. 礬部晶：平面精密研磨に用いられる研磨パッドの技術動向 精密工学会誌 78 (2012) 937 (解説記事)