

博士論文

研磨による平坦化技術とその応用に関する研究

(半導体ウエハと LSI 多層配線における平坦化)

Study on planarization by polishing technology and
its application

国立大学法人 横浜国立大学大学院
工学府

富永 茂
Shigeru Tominaga

2013 年 3 月

目次

第 1 章 序論	・・・	1
1.1 緒言	・・・	2
1.2 多層配線技術と平坦化技術の変遷	・・・	3
1.3 本研究の目的と本論文の構成	・・・	8
第 1 章の参考文献	・・・	11
第 2 章 研磨による加工量の解析手法の研究	・・・	13
2.1 緒言	・・・	14
2.2 研磨による加工量の解析手法	・・・	16
2.2.1 研磨軌跡の算出法	・・・	16
2.2.2 研磨走行距離を用いた加工量の解析手法	・・・	21
2.3 代表的な研磨装置の運動解析結果	・・・	27
2.3.1 プラテン・ロータリ型研磨装置	・・・	28
2.3.2 キャリア型研磨装置	・・・	35
2.3.3 オービタル回転型研磨装置	・・・	42
2.3.4 改良オスカー型研磨装置	・・・	47
2.3.5 速度制御型研磨装置	・・・	52
2.3.5.1 同径工具による揺動速度制御型	・・・	52
2.3.5.2 小径工具による速度制御型	・・・	57
2.3.5.3 ドーナツ状工具による速度制御型	・・・	61
2.4 まとめ	・・・	66
第 2 章の参考文献	・・・	68
第 3 章 パッドコンディショニングにおける均一加工の研究	・・・	69
3.1 緒言	・・・	70
3.2 コンデッショナによるパッド加工量の解析	・・・	72
3.2.1 解析方法と解析結果	・・・	73
3.2.2 コンデッショナによるパッド加工実験	・・・	79

3.2.3	パッド加工実験結果の検討	・・・	83
3.3	揺動速度制御法を用いた		
	パッドコンディショニングの検討	・・・	85
3.3.1	パッドコンディショニングの現状と課題	・・・	85
3.3.2	コンディショニングにおける		
	揺動速度制御法の検討	・・・	87
3.3.3	直線揺動型コンディショニングの実験と		
	実験結果	・・・	94
3.4	まとめ	・・・	98
	第3章の参考文献	・・・	99
第4章	自己放出型固定砥粒パッドによる		
	加工技術に関する研究	・・・	101
4.1	緒言	・・・	102
4.2	自己放出型固定砥粒パッドの開発概要	・・・	104
4.2.1	自己放出型固定砥粒パッドの構造及び製作	・・・	105
4.2.2	自己放出型固定砥粒パッドの加工特性	・・・	109
4.3	接触面積を制御する加工技術の検討	・・・	117
4.4	パッド表面の水分量を制御する加工技術の検討	・・・	121
4.4.1	セミドライ研磨法のパッド表面水分量の最適化	・・・	121
4.4.2	セミドライ研磨による加工特性	・・・	124
4.5	砥粒の強制放出による加工技術の検討	・・・	127
4.5.1	砥粒の強制放出による研磨技術を用いた		
	平坦化加工実験	・・・	129
4.5.2	自己放出型固定砥粒パッドによる		
	平坦化機構の考察	・・・	132
4.6	まとめ	・・・	137
	第4章の参考文献	・・・	138

第 5 章 Cu 配線材を対象とした複合電解研磨技術の研究	・・・141
5.1 緒言	・・・142
5.2 複合電解研磨技術と電解研磨技術の 平坦化加工機構の比較	・・・143
5.2.1 電解研磨の平坦化加工機構	・・・143
5.2.2 複合電解研磨の平坦化加工機構	・・・148
5.3 非接触電極型電解セルパッドの開発概要	・・・152
5.4 複合電解研磨技術による平坦化加工技術の検討	・・・156
5.4.1 超 LSI デバイスの Cu 多層配線形成プロセスの課題	・・・156
5.4.2 Cu 多層配線形成プロセス用 複合電解研磨技術の検討	・・・158
5.5 複合電解研磨技術による高速加工条件での 平坦化技術の検討	・・・164
5.5.1 WoW 積層法の概要	・・・165
5.5.2 Hybrid CMP/e-CMP プロセスの検討	・・・167
5.5.3 Hybrid CMP/e-CMP プロセスによる加工結果	・・・169
5.5.4 Cu デュアルダマシン TSV プロセスへの適用結果	・・・171
5.6 まとめ	・・・175
第 5 章の参考文献	・・・177
第 6 章 総括	・・・181
本論文を構成する業績	・・・187
査読付き投稿論文並びに国際学会議論文	・・・187
登録特許	・・・187
解説書	・・・187
本論文に関するその他の業績	・・・188

謝辞	・ ・ ・ 190
研磨軌跡の参考資料	・ ・ ・ 193

第 1 章

序論

1.1 緒言

今世紀に入って、IT 技術 (Information Technology) が急速に発展した。人々が情報技術やパソコンなど、その製品を使いこなすようになり、生活習慣も大きく変化している。これまでの情報の媒体であった紙はディスクやメモリ素子に、情報の伝達手段であった郵便や固定電話は電子メールや携帯電話、インターネットに置き換わりつつある。2003 年には、世界のインターネットの利用者数が 9 億人を超え、日本国内でも 7.7 千万人[1]を超えた。2011 年になると、世界のインターネットの利用者数は 21 億人を超え、日本国内でもインターネットの利用者数 9.6 千万人[2]を超えたと言われている。世帯当たりのパソコン普及率は 78%、携帯電話普及率は 94%[3]で飽和状態に達している。

これほどの IT 技術の急速な発展には、LSI (Large Scale Integrated circuits) デバイスの性能向上と低価格化が大きく貢献している。LSI デバイスは、多数のトランジスタ素子とこれらの素子間を接続する配線材で構成されている。LSI デバイスは素子の微細化と高密度集積によりその性能向上と低価格化を実現させてきたが、LSI デバイスの集積度 (LSI デバイス上に搭載される素子の数) が増加すると、デバイスの処理速度が低下するいわゆる信号遅延の問題が発生する。この問題は、素子間を平面的に接続配線することにより、配線長さが増大して配線抵抗の増加と配線間の静電気容量の増加によって生じる。この問題の対策として、配線を平面から立体化する多層配線技術が開発された。現在の高集積度 LSI デバイスはトランジスタ素子の微細加工技術と多層配線技術によって牽引されてきたとも言える。以下に、高集積度 LSI デバイスの多層配線技術と多層配線技術に使用される平坦化技術の変遷を述べ、平坦化技術の課題や新たな取り組みについて述べる。

1.2 多層配線技術と平坦化技術の変遷

LSI デバイスの集積度は、IC の開発以来 60 年近くも止まることなく増加しており、しかも指数関数的に増加してきた。集積度の増加に対応して、配線の多層化は、1990 年代の中ごろには、Al 配線材で 4 層、近年では Cu 配線材で 8~10 層に達するまでになった。図 1-1 に LSI デバイスの集積度と配線層数の推移を示す。図 1-1 は、インテル社のロジック LSI デバイスの集積度の推移と米 SEMATECH の技術トレンドに関するロードマップ[4]から求めた配線層数の推移を重ねて作成したものである。1971 年にインテル社が 1kbit の DRAM (Dynamic Random Access Memory) と 4bit のマイクロプロセッサ(ロジック LSI)を開発した。これが LSI デバイスの幕開けとなったと言われている。その後、図 1-1 に示すようにロジック LSI デバイスの集積度も DRAM の集積度も指数関数的に増加している。

配線においては、LSI デバイスの素子形成プロセスで利用されるフォトリソグラフィ技術を利用した微細加工が行われるが、LSI デバイスの集積度が増加し、配線幅が縮小して配線層数が増加すると、ウエハ表面の凹部と凸部の差が大きくなり、凹凸部の両方にフォトリソグラフィの焦点を合わせることができなくなった。これは光学的な焦点深度の問題で、この問題に対処するためには前段の配線層面を平坦化処理する必要がある。そこで、1990 年代の前半に、初めて平坦化 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術が導入された。多層配線プロセスに平坦化 CMP 技術が導入されたことによって、配線層間にボーダレス構造を形成することができ、多層配線技術が飛躍的に向上して集積度の指数関数的な増加を支えたと言える。

LSI デバイスはデザインルールの世代ごとに、トランジスタ素子と同様に多層配線構造も約 70%ずつ縮小されてきた。トランジスタの動作速度を律速する主要因がゲート遅延であったこともあり、図 1-1 の配線層数の推移に示すように、デザインルール 0.35 μm 世代と 0.25 μm 世代の LSI デバイスでは、Al 多層配線プロセスが適用された。0.25

μm 以降の世代からは、ゲート遅延よりむしろ配線抵抗と配線間の寄生容量で決定される配線遅延が動作速度を律速する主要因となり、 $0.18\mu\text{m}$ 世代では、配線溝とビアホールに配線抵抗の低い Cu 膜を一括して埋め込むデュアルダマシン法が採用された。 $0.13\mu\text{m}$ 世代では層間絶縁膜に機械強度の低い low-k 材が導入されたことにより、低圧力で Cu 膜を平坦化する CMP 技術の開発が開始された。なお、この世代から半導体ウエハ径が $200\text{mm}\phi$ から $300\text{mm}\phi$ へと大口径化され、その対応も検討された。

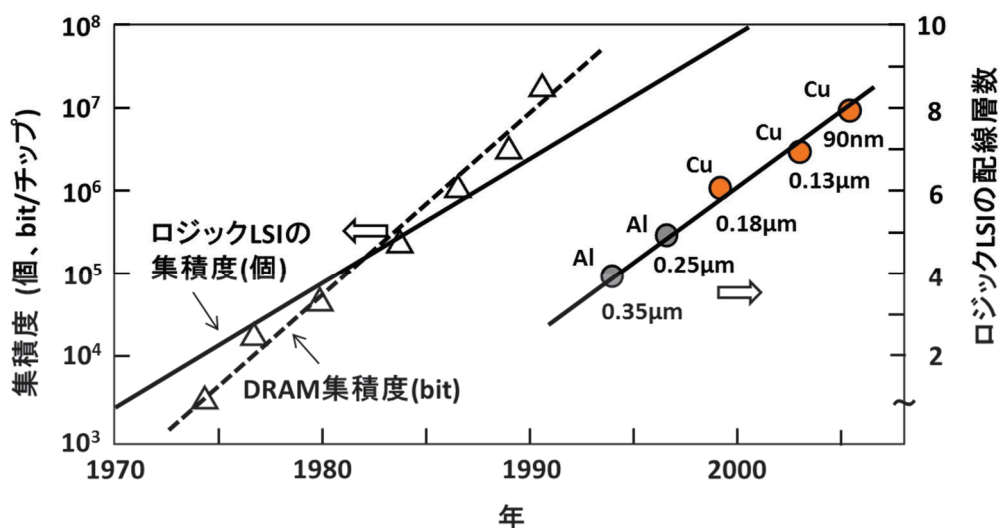


図 1-1 LSI デバイスの集積度と配線層数の推移

図 1-2 に Al 多層配線のプロセスフローを示す。図 1-2 はタングステンビアの形成フローを省略して示した。Al 材は RIE (Reactive Ion Etching) による加工が容易であったので、PVD (Plasma Vapor Deposition) などの蒸着技術により、Al 材を下段の層間絶縁膜に蒸着し、配線パターンを形成した後、Al 面を RIE 加工して配線パターンを残す方法がとられた。パターン形成された Al 面に層間絶縁膜を CVD (Chemical Vapor Deposition) などで堆積し、その表面の余分な層間絶縁膜を CMP によって除去・平坦化して、Al 多層配線が形成される。Al 多層配線に使用される層間絶縁膜としては SiO_2 系の TEOS

(Tetra-Ethoxysilane) 膜が一般的に使用され、その比誘電率は～4.0であった。

Al 多層配線プロセスが適用された 0.25 μ m 世代の LSI は、1997 年ごろから量産が開始された。その後、新世代の LSI デバイスが次々に開発されてきたとはいえ、現在も生産が続けられ、生産コスト低減の努力が継続されている。平坦化特性を改善して加工マージンを低減することで、層間絶縁膜の堆積量が抑えられ、配線プロセスのコスト低減が図れる。このため、平坦化 CMP 工程には、平坦化特性の改善と研磨加工にともなう消耗材のコスト低減が要求されている。

図 1-3 に Cu デュアルダマシン法のプロセスフローを示す。ダマシン (Damascene) という名称は、装飾用に表面に溝を形成して金属や宝石を埋め込む象嵌法に由来している。Cu デュアルダマシン法による Cu 多層配線プロセスでは、層間絶縁膜に低誘電率材料(low-k 材)が使用され、ビアホールと配線溝を同時に層間絶縁膜に形成した後に Cu 金属の拡散を防ぐバリア膜で被覆する。その上に PVD で電極となる Cu シード層を製膜し、電気めっき法によってビアホールと配線溝に Cu 膜を充填する。その後、表面の余分な Cu 膜を CMP によって除去・平坦化して、Cu 材が層間絶縁膜に埋め込まれて Cu 多層配線が形成される。

0.13 μ m 世代の LSI の層間絶縁膜には SiOF 膜が導入され、90nm 世代では SiOC 膜が導入されたが、65nm 世代以降では、層間絶縁膜の比誘電率を下げるためにポーラス系や有機系の low-k 材が導入された。このうち、ポーラス系の膜は機械強度が弱いため、平坦化 CMP には低圧力加工条件でエロージョンやディッシングの抑制と研磨による加工速度(除去速度)の向上が求められている[5]。

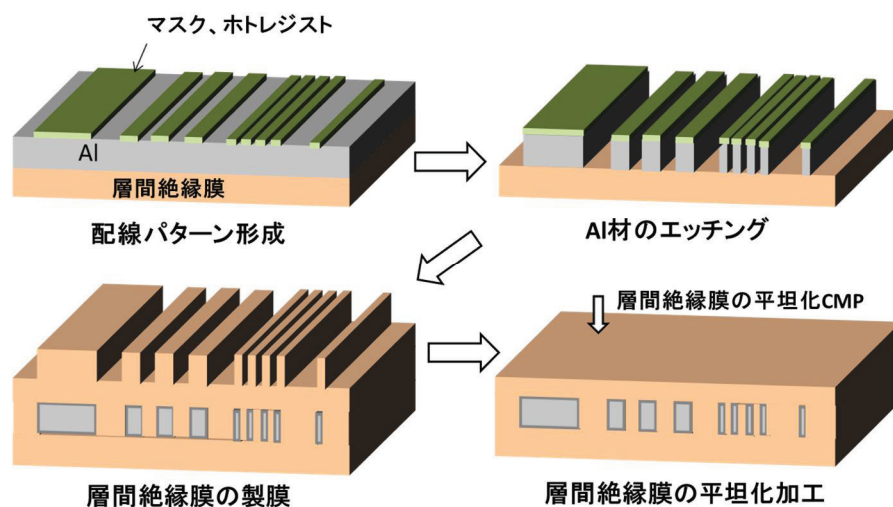


図 1-2 Al 多層配線のプロセスフロー

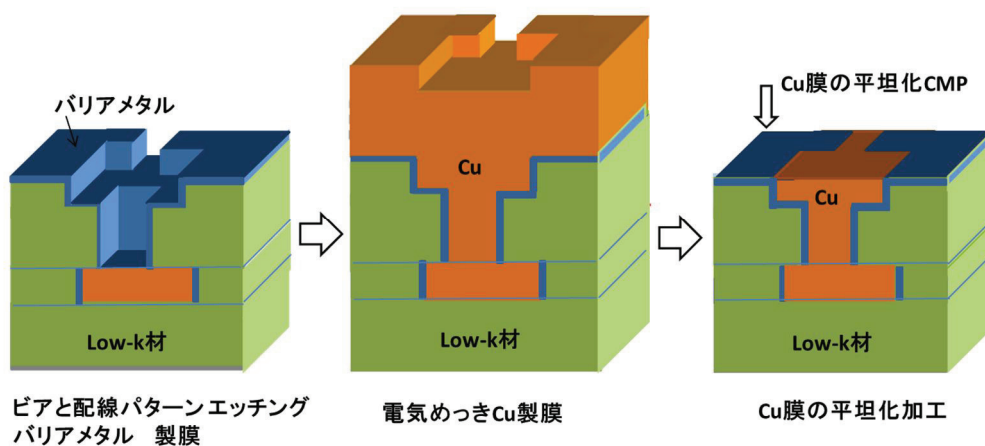


図 1-3 Cu デュアルダマシン法のプロセスフロー

LSI デバイスの高集積化の努力は現在も続けられているが、一方で、既存の LSI デバイスを組合せてさらに高容量化、多機能化する技術として、LSI デバイスを積層した 3 次元積層デバイスの開発も進められている。開発の方向は、TSV (Through Silicon Via) 技術を使用したチップレベルでの 3 次元デバイス化[6]とウエハレベルでの 3 次元デバイス化の 2 つの方向がある。ウエハレベルでの 3 次元デバイス化では、ウエハを積層、接着した後に Cu デュアルダマシン TSV プロセスで上下間の LSI デバイスを TSV により接続し、同時に再配列配線を行う積

層デバイス技術[7]が注目されている。Cuデュアルダマシン TSV プロセスでは、TSV の深さが 10 から 20 μm 程度であるため、電気めっき Cu 膜の厚さが 10 μm 程度に達する。また、ウエハ間の接着強度も比較的弱い。従って Cu デュアルダマシン TSV プロセスでは低圧力条件で超高速の平坦化加工が求められている。

3次元積層デバイスが普及すると LSI デバイスの製造と 3次元積層デバイスの製造が企業分担され、各種デバイスを組合せて積層する 3次元デバイス化事業に新たに参入する企業が増加するといわれている。このために平坦化技術には、平坦化 CMP システムに代わる新しい低価格で小型の平坦化加工システムも重要となる。

1.3 本研究の目的と本論文の構成

平坦化 CMP に求められる加工特性は、凹凸のある表面を、半導体ウエハ全面に対して限られた加工マージン内で平坦性と加工残膜の均一性を確保しつつ、高い除去速度で加工できることである。LSI デバイスの高集積化、微細化が進むなかで、多層配線技術は基盤技術として重要な位置を占め、その多層配線技術を支える平坦化 CMP には、加工特性の向上にとどまらず、low-k 材などの新たな配線材料への対応やウエハの大口径化の対応など、その要求事項が多様化している。要求課題は次の 3 項目にまとめられる。

- (1) ウエハの大口径化の対応として、小型でより高い加工精度及び高速加工を目指した研磨装置の開発とその研磨機構の運動解析。
- (2) Al 配線材を使用した多層配線プロセスの平坦化研磨技術では、多層配線プロセスコスト低減のための、平坦性の改善と研磨による加工に使用される消耗材のコスト低減。
- (3) Cu 配線材を使用した次世代 LSI デバイスの多層配線プロセスや、LSI デバイスを積層した 3 次元積層デバイスの Cu デュアルダマシニング TSV プロセスでは、機械強度が弱い low-k 材やウエハ積層用の接着材料に対応するための低圧力で高い除去速度の平坦化加工技術。

本論文は、LSI デバイスの多層配線プロセスに適用される平坦化研磨技術の加工特性を向上させることを目的として、各種研磨装置の運動解析結果をもとにした均一加工の予測法としての加工量の解析手法に関する研究と、新型研磨パッドによる加工特性の改善方法に関する研究をまとめたものである。

本論文は図 1-4 に示す研究取り組みの流れに従い、6 章の構成でまとめたものであり、その概要はつぎの通りである。

第 1 章では本研究の背景と目的ならびに工業的な意義について述べる。

第 2 章では研磨による加工量の解析手法を検討する。まず、加工条

件と走行距離プロファイル（半導体ウエハなどの工作物の径方向に対する走行距離分布）の関係を求め、工作物の加工面の加工均一性の概要を検討する。また、各種研磨装置の運動解析を行い、研磨装置ごとに加工条件と研磨軌跡の分散状態、及び走行距離プロファイルを例示する。

第 3 章では、第 2 章で検討した加工量の解析手法をパッドコンディショニングによる研磨パッドの加工解析に適用し、加工による除去速度プロファイルと算出した走行距離プロファイルの関係を検討する。また、直線揺動型のパッドコンディショニング法に使用される揺動関数を、走行距離プロファイルを利用して改良し、改良前の揺動関数と改良後の揺動関数を使用した加工結果を比較する。そして、改良した揺動関数を用いた加工結果の均一性が改善されることにより、研磨による加工量の解析手法の妥当性を論じる。

第 4 章では、Al 配線材を使用した多層配線プロセスの層間絶縁膜（シリコン酸化膜）の平坦化加工の改善を目的として、新たに開発した自己放出型固定砥粒パッドの概要を述べ、CMP 消耗材コストの大半を占めるスラリーを使用しない平坦化加工技術を検討する。さらに、多層配線プロセスの平坦化加工で利用されている研磨システムに自己放出型固定砥粒パッドを適用して、層間絶縁膜の平坦化加工特性の改善方法を検討する。

第 5 章では、Cu 配線材を使用した多層配線プロセスの Cu 膜の平坦化加工の改善を目的として、非接触電極型電解セルパッドの概要を述べ、低圧力で高速加工の加工条件で高平坦性が得られる複合電解研磨（e-CMP）技術を検討する。まず、一般的な電解研磨と e-CMP の平坦化の加工機構を比較し、e-CMP の平坦化加工機構の特徴として、低圧力で高平坦性が得られる加工機構を明確にする。次に、加工液である電解液の組成と非接触型電解セルパッドの構造を検討し、クエン酸水溶液と BTA を用いた電解液組成を、比誘電率 1.8 の次世代 LSI デバイス用の Cu 配線用テストで評価し、低圧力でプロセスウィンドウの良好な平坦化加工特性が得られることを示す。また、高速加工条件で平

平坦化加工特性を改善するために、e-CMP と Cu-CMP を組み合わせた Hybrid CMP/e-CMP プロセスによる加工方法を検討し、3次元積層デバイスの Cu デュアルダマシン TSV プロセスに適用することで、低圧力、高速加工（除去速度 3.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ ）の条件で TSV 配線不良が低減できることを示す。

第6章では、これらの研究内容を総括する。

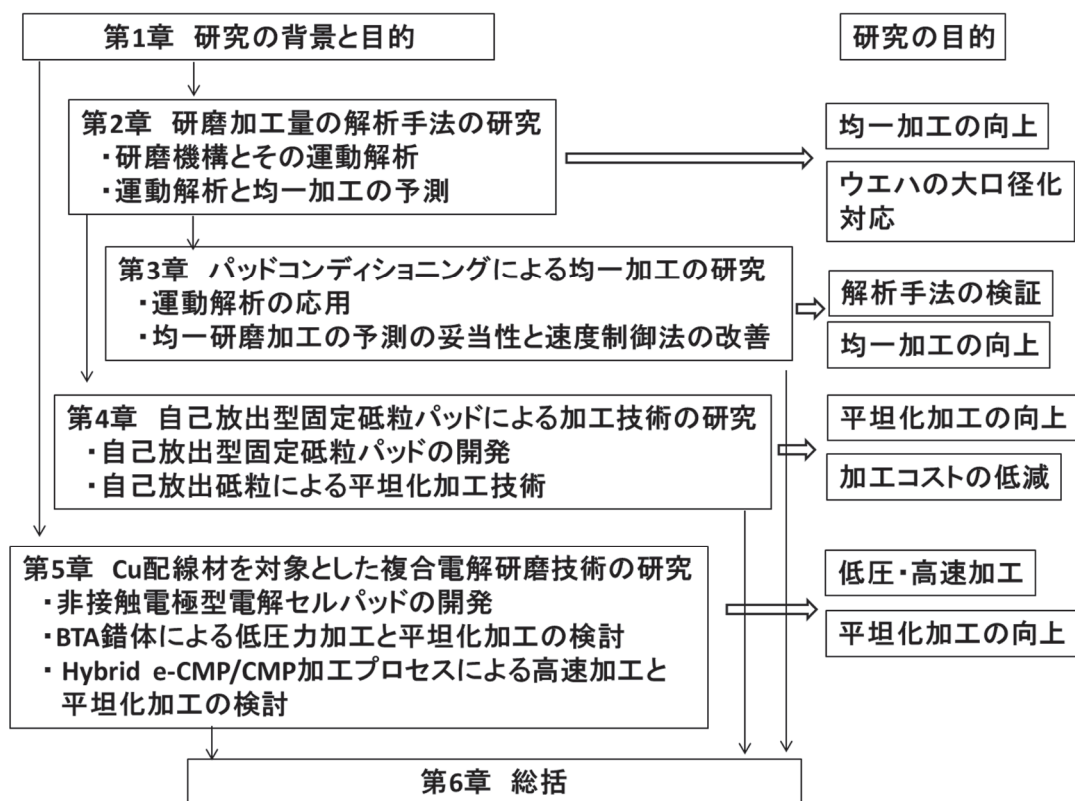


図 1-4 本研究の目的と論文の構成

第 1 章の参考文献

- [1] 総務省、“平成 15 年通信利用動向調査の結果”、(2004)
- [2] International Telecommunication Union, 2012 (16th Edition)
- [3] 総務省、“平成 23 年通信利用動向調査の結果”、(2012)
- [4] Int’l SEMATECH, International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), 2007 Edition
- [5] 特許庁、“LSI の多層配線技術”、平成 15 年度特許出願技術動向調査報告書、(2003)
- [6] 傳田精一、“三次元実装のための TSV 技術”、工業調査会, pp.83-91 (2009)
- [7] N. Maeda, H. Kitada, K. Fujimoto, K. Suzuki, T. Nakamura, and T. Ohba, Proc. Advanced Metallization (2008)

第 2 章

研磨による加工量の解析手法の研究

2.1 緒言

研磨による加工は、ラッピングや研削加工工程で得られた形状精度を維持しながら、工作物の鏡面化と加工ひずみの僅少化など、表面品質を向上させることを目的としている[1]。

LSI デバイスの多層配線プロセスでは、工作物である半導体ウエハの表面に形成されたシリコン酸化膜や銅配線材などの微細な凹凸部の平坦化を目的として、平坦化 **CMP (Chemical Mechanical Polishing)** 技術が利用されている。平坦化 **CMP** 加工では、工作物であるウエハ面内の除去速度に不均一性が生じると、除去速度の速い部分で過剰研磨となり平坦性が悪化するため、除去速度を一定とする均一加工が重要である。また、均一に加工するためには、ウエハの各加工点が工具面で分散性のよい研磨軌跡が得られる加工条件を選定する必要がある。

平坦化 **CMP** 技術では、合成樹脂製の研磨パッドと微細砥粒及びケミカル成分で調合されたスラリーを使用し、ウエハの全面にわたって均一な除去速度が得られるよう研磨装置の運動機構や加工条件が設定される[2]。一方、除去しようとするウエハ表面の厚さがウエハの場所によって不均一である場合には、ウエハの場所によって除去速度を調節しなければならない場合がある。研磨加工の運動解析は、これらの除去速度の調節のための適切な加工条件の設定を可能にし、合理性を有する研磨装置や研磨システムを構築する際の裏付けとなる。

研磨加工の運動解析の手法として、工具の 1 点が工作物面上を描く軌跡を求め、工具の各点の軌跡を全点重ねるとともに砥粒形状から予想される加工痕形状を導入することによって、シミュレーションによる工作物の加工後の形状を予測する方法が紹介[3]されている。また、工作物の平均加工量が工作物と工具の相対速度、加工圧力及び加工時間に比例することを示す **Preston** 式を算出ベースとし、工作物と工具の平均相対速度と工作物と工具が対向してお互いに作用し合う正味作用時間を求める手法が提案[4]されている。しかし、この手法は、平均相対速度や研磨加工に関与しない工具と工作物のはみ出し領域を除外

し、さらに、工具の弾性変形による加工圧力分布を算出して加工量を解析する必要があるため、解析方法が複雑であった。

本章では、半導体ウエハなどの工作物の1点が工具面上を描く軌跡から算出される研磨走行距離に着目し、Preston 式を算出ベースとした研磨走行距離と工具や工作物の弾性変形による加工圧力分布を考慮した加工量の解析手法を検討する。本手法は、解析の要点をとらえた簡素化した手法で、複雑な運動機構を有する各種の研磨装置の運動解析を実施して、均一研磨加工の予測に利用できる。しかも、パソコンに搭載されている汎用表計算ソフトを利用することができるので、研磨加工の現場で各種の研磨装置の運動解析を容易に行える利点がある。

本章の 2.2 節では、工具面上を工作物の任意点が描く研磨軌跡を求め一般式を示し、研磨加工に関与しない工具と工作物のはみ出し領域を除外して、研磨軌跡の総長である研磨走行距離と、工具や工作物の弾性変形による加工圧力分布を結合させた加工量の解析手法を提案する。

2.3 節では、Down face 型研磨装置である、プラテン・ロータリ研磨装置[5]、キャリア型研磨装置[6]、オービタル回転型研磨装置[7]、改良オスカー式研磨装置[8]について、また Up face 型研磨装置である、同径工具による揺動速度制御型、小径工具による揺動制御型[9]、円環状工具による速度制御型[10]の各研磨装置について、研磨軌跡を求め一般式を適用し、研磨軌跡の分散状態と走行距離プロファイル(工作物の径方向に対する走行距離)をそれぞれ加工条件との関係として例示し、加工均一性の概要を検討する。

2.2 研磨による加工量の解析手法

工具面上を半導体ウエハなどの工作物の任意点が描く研磨軌跡を求める一般式を提案し、研磨加工に關与しない工具と工作物のはみ出し領域を除外して、研磨軌跡の総長である研磨走行距離と、工具や工作物の弾性変形による加工圧力分布を結合させた加工量の解析手法を提案する。

2.2.1 研磨軌跡の算出法

(1) Down face 型研磨装置

図 2-1 に代表的な片面研磨装置の模式図を示す。図 2-1 は、上向きで回転する工具に、工作物が加工面を下向きにして対向させて回転させ、工作物の回転軸が工具の中心に対して運動する研磨装置の構成を示したものである。工作物の加工面を下向きに工具に対向させるため、Down face 型研磨装置と呼ばれる。図 2-2 に研磨開始から時間 t が経過したときの工作物の任意点と工具中心との位置関係を示す。工作物中心 O_w は、工具の回転が停止しているときの工具面の仮想座標系 (X, Y) に対して、 $X=h(t)$ 、 $Y=g(t)$ の関数で表わされる運動をしているものとする。

工具が回転を停止しているとき、工作物の任意点 (r, θ_0) の工具面の仮想座標系 (X, Y) での位置は、次式で表される。

$$X(t) = r \cos(\omega_w t + \theta_0) + h(t) \quad \dots (2.1)$$

$$Y(t) = r \sin(\omega_w t + \theta_0) + g(t) \quad \dots (2.2)$$

ここで、 ω_w は工作物の回転角速度であり、 $h(t)$ 、 $g(t)$ はそれぞれ工作物中心の X 方向、 Y 方向の運動関数である。工具中心 O_p から工作物の任意点までの距離を $R(t)$ 、工作物の任意点と原点 O_p とを結ぶ直線と X 軸との角度を $\theta(t)$ とすると、 $R(t)$ 、 $\theta(t)$ はそれぞれ次式で表され

る。

$$R(t) = (X(t)^2 + Y(t)^2)^{1/2} \quad \dots (2.3)$$

$$\theta(t) = \cos^{-1}[X(t)/R(t)] \quad \dots (2.4)$$

工具の回転を考慮すると、極座標の記述法に従い、工作物の任意点の工具面上の座標(x,y)は次式で表される。

$$x(t) = R(t) \cos[\theta(t) - \omega_p t] \quad \dots (2.5)$$

$$y(t) = R(t) \sin[\theta(t) - \omega_p t] \quad \dots (2.6)$$

ここで、 ω_p は工具の回転角速度である。

ただし、(2.4)式の $\theta(t)$ は、 $Y(t)$ が負の値のとき、 $-\theta(t)$ に修正する必要がある。 $\theta(t)$ は $-\pi \sim \pi$ まで変化する変数であり、 $\omega_p t$ は時間経過に従って増加する変数であるため、(2.5)式および(2.6)式の $[\theta(t) - \omega_p t]$ は、 $Y(t)$ の値が負の値のとき $\theta(t)$ と $\omega_p t$ に π だけの位相ずれが生じるためである。

図 2-3 および図 2-4 に、(2.4)式の $\theta(t)$ と修正した値 θ_1 で算出した sin 関数と cos 関数を比較した例を示す。図は、 $Y(t)$ の値が負の値のとき $\theta(t)$ に π だけの位相ずれが生じていることを示している。図 2-3 及び図 2-4 に示す $\theta(t)$ および θ_1 は次式で算出した。

$$X(t) = \cos(2\pi n_1 t) \quad \dots (2.7)$$

$$Y(t) = \sin(2\pi n_1 t) \quad \dots (2.8)$$

$$R(t) = (X(t)^2 + Y(t)^2)^{1/2} \quad \dots (2.5)$$

$$\theta(t) = \cos^{-1}[X(t)/R(t)] \quad \dots (2.6)$$

$$\omega t = 2\pi n_2 t \quad \dots (2.9)$$

ただし、 $Y(t) \geq 0$ のとき $\theta_1 = \theta(t)$ であり、 $Y(t) < 0$ のとき $\theta_1 = -\theta(t)$ である。ここで、 n_1 は工作物の回転数に相当し、 n_2 は工具回転数に相当する。図 2-3 及び図 2-4 は、 $n_1 = 5\text{rpm}$ 、 $n_2 = 3\text{rpm}$ としたときの sin

関数と \cos 関数の時間変化を示したものである。

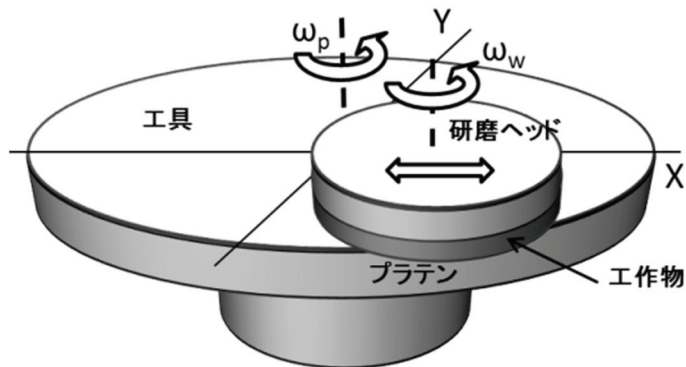


図 2-1 Down face 型研磨装置の模式図

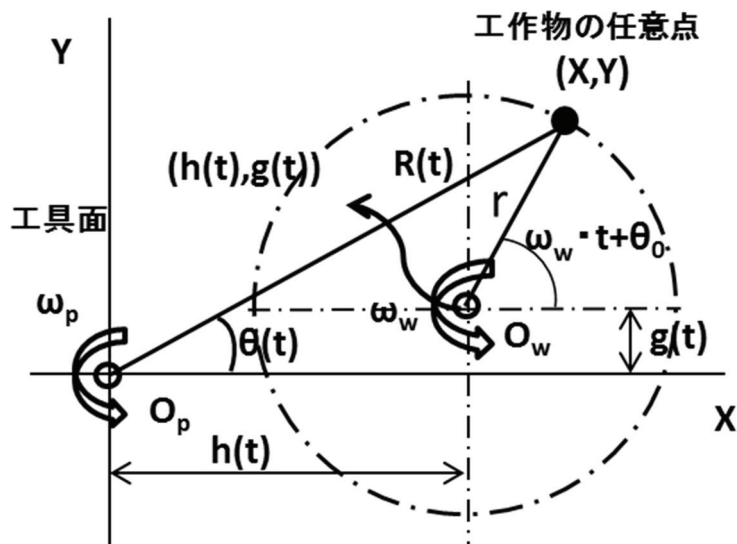


図 2-2 Down face 型研磨装置の位置関係

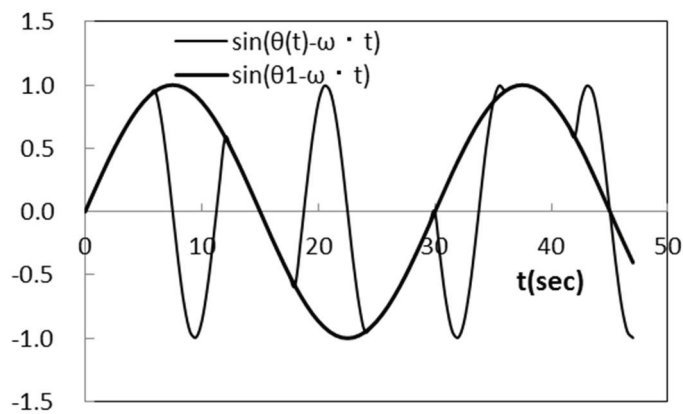


図 2-3 $\theta(t)$ と修正した値 θ_1 で算出した \sin 関数

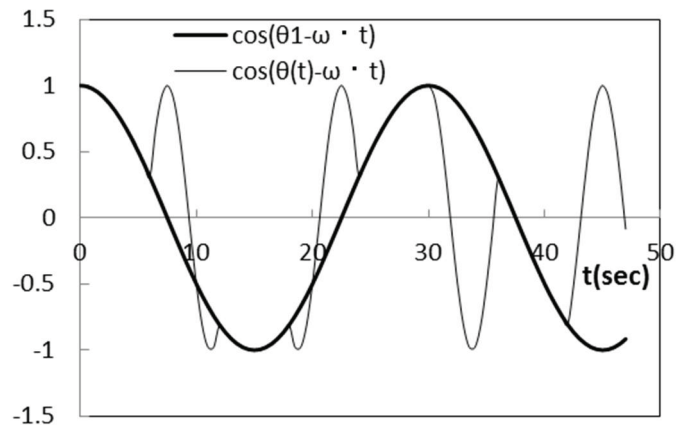


図 2-4 $\theta(t)$ と修正した値 θ_1 で算出した \cos 関数

(2) Up face 型研磨装置

図 2-5 に Up face 型片面研磨装置の模式図を示す。上向きで回転する工作物に工具を下向きに対向させて回転させる構造であるので、工具面に対して加工面を下向きに対向させる Down face 型研磨装置に対して、Up face 型研磨装置と呼ばれる。工具は研磨ヘッドに固定され、工具の中心位置が工作物の中心に対して運動するものとした。

図 2-6 に研磨開始から時間 t が経過したときの工作物の任意点を工具面から見たときの位置関係を示す。工具中心 O_p の運動関数を工作物の中心 O_w を原点とする仮想座標系 (X', Y') で $X' = h(t)$ 、 $Y' = g(t)$ とすると、工具面から見たときの工作物中心 O_w の運動関数は、工具の回転が停止しているときの工具仮想座標系 (X, Y) に対して、 $X = -X' = -h(t)$ 、 $Y = -Y' = -g(t)$ で表され、工作物の任意点 (r, θ_0) を、工具中心 O_p を原点とする座標系 (x, y) で表すと (2.5) 式及び (2.6) 式と同形となる。

従って、Down face 型研磨装置、Up face 型研磨装置を問わず、各種の研磨装置は、工作物中心と工具中心の相対運動関数のみが異なるだけであるので、工具中心の座標系で工作物中心の運動関数を入れ替えることで、各種の研磨装置で同じ表計算ソフトが利用できる。

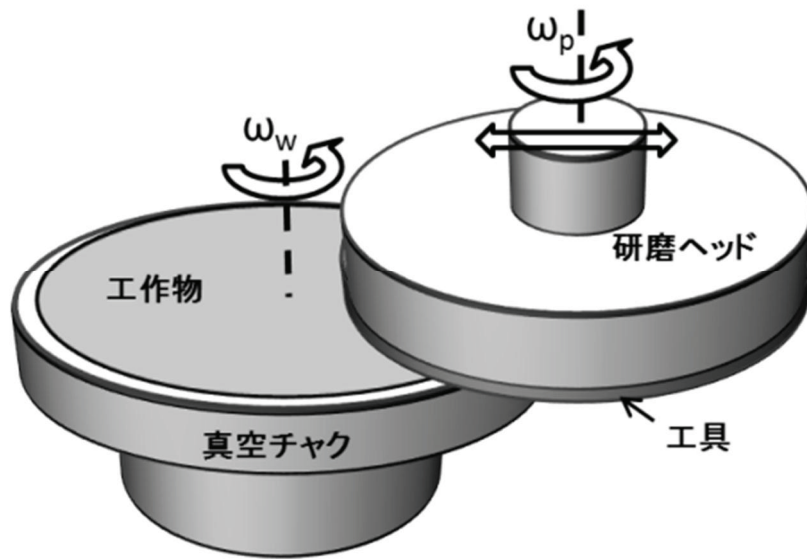


図 2-5 Up face 研磨装置の模式図

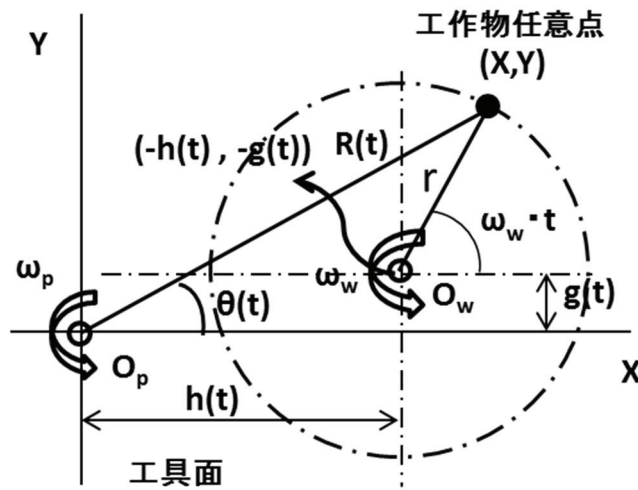


図 2-6 Up face 研磨装置の工具面から見た位置関係

2.2.2 研磨走行距離を用いた加工量の解析手法

研磨における平均加工量 \hat{H} は Preston 式と呼ばれる次式で表される [11]。

$$\hat{H} = \alpha P V T \quad \cdot \cdot \cdot (2.10)$$

ここで、 P は加工圧力、 V は工作物と工具の相対速度、 T は加工時間、 α は比例定数である。(2.10)式は、工作物の平均加工量（平均加工厚さ）が加工圧力、相対速度及び加工時間に比例することを検証して得られた経験式である。

工作物の形状が円形の場合、加工量は工作物の中心点の点対称となり、工作物の半径 r と加工開始からの時間 t の関数となるのが一般的である。従って、半径 R の工作物の各点の加工量を $H(r)$ とすると、平均加工量 \hat{H} は次式で表される。

$$\hat{H} = (1/R) \int_0^R H(r) dr \quad \cdot \cdot \cdot (2.11)$$

加工圧力と工作物と工具の相対速度は、工作物半径 r と時間 t の関数となるので、加工圧力を $p(r,t)$ 、相対速度を $v(r,t)$ と置くと、加工時間 T までの工作物の各点の加工量 $H(r)$ は次式で表される

$$H(r) = \alpha \int_0^T p(r,t) v(r,t) dt \quad \cdot \cdot \cdot (2.12)$$

比例定数 α は、工作物の材質、加工液を構成する化学成分や砥粒の種類、加工液の砥粒濃度及び温度などに依存する。研磨による加工機構としては、工作物と砥粒の相互作用として延性モード機構と脆性破壊モード機構の 2 つ加工機構から説明 [12] されるが、これらの影響も比例定数 α に含まれる。従って、平均加工量 \hat{H} に対する砥粒の粒径や粒度分布の影響も比例定数 α に含まれることになる。

加工圧力 $p(r,t)$ は、工作物の荷重や工作物表面の変形による弾性作用などの圧力を時間や工作物の各点の関数として記述されるものであり、相対速度 $v(r,t)$ は工作物と工具の幾何学的な変位や回転数などの運動関数で記述されるものである。(2.11)式を解析する場合、加工圧力 $p(r,t)$ と相対速度 $v(r,t)$ の積を解析することになるが、これらの解析には、加工に関与しない工作物と工具のはみ出し領域や、工具の摩耗量や工作物の弾性変形による圧力分布を考慮する必要があり、解析的な取扱いを複雑なものにしている。工作物と工具の回転軸が固定された一部の研磨装置に適用した解析結果が報告されている[13]が、工作物と工具の回転軸が運動する一般的な研磨装置に適用するためには、さらに複雑な計算手順を要する。

本節では、相対速度と加工時間の積である研磨走行距離に着目した解析方法を検討する。十分に管理された研磨装置では、加工圧力 $p(r,t)$ が加工時間 T 内で時間的に大きな変動がないことが想定できるので、(2.12)式の加工圧力を r のみの関数として $p(r)$ とおくと、 $H(r)$ は次式で表される。

$$H(r) = \alpha p(r) \int_0^T v(r,t) dt = \alpha p(r) L(r) \quad \dots (2.13)$$

ここで、 $L(r)$ は半径 r の点の研磨走行距離(以下走行距離)である。

走行距離 $L(r)$ は、工作物の任意の点(工作物の中心から半径 r の点)が工具面上を描く軌跡の総長で求められる。図 2-7 に工作物の任意の点が工具面上を描く軌跡の例を示す。図 2-7 に示す工具の中心 O_p を原点とする直交座標 (x,y) を想定し、加工開始から時間 t_k 後の工作物の任意点の座標を $(x(t_k), y(t_k))$ とすれば、軌跡線の長さが走行距離となるので、加工時間 T までの走行距離 $L(r)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} L(r) &= \int_0^T v(r,t) dt \\ &= \sum \delta L_k = \sum_{k=0}^n [(\delta x_k)^2 + (\delta y_k)^2]^{1/2} \quad \dots (2.14) \end{aligned}$$

ここで、時間分解能を δt とし、 $t_0=0$ 、 $t_k = t_{k-1} + \delta t$ とすると、 $\delta x_k = x(t_k + \delta t) - x(t_k)$ 、 $\delta y_k = y(t_k + \delta t) - y(t_k)$ 、 $n = T / \delta t$ で表される。図 2-8 に示す $R(t_k)$ は、時間 t_k での工作物任意点と工具中心 O_p との距離である。工具半径を R_p とすると、 $R(t_k) > R_p$ の場合、工作物が工具からはみ出すので、 $\delta L_k = 0$ とすることによって研磨加工に参与しない工作物と工具のはみ出し領域を走行距離から除外することができる。

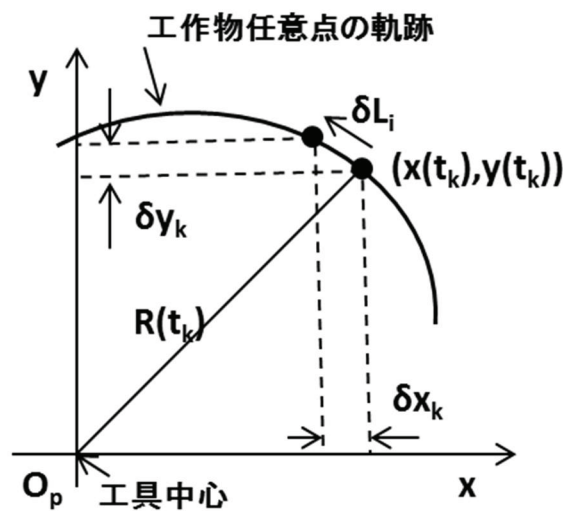


図 2-7 工具面上の工作物任意点の軌跡例

加工圧力は、工具に接する工作物表面の単位面積当たりの工作物の荷重量で表されるが、荷重による工具表面からの沈み込量と工具の弾性定数の積で表すこともできる。加工時間 T 内で工作物の各点の加工量が微小であるときは、沈み込量の変化による圧力変化が無視できる。

工作物表面が水平状態から加工を開始する場合、工作物の各点の圧力は一定であるので、工作物の中心から半径 r の点の加工量 $H(r)$ は走行距離 $L(r)$ にのみ依存することになる。従って、圧力変化が無視できる程度の研磨時間内では、初期圧力 P_0 を用いて加工時間 T での加工量 $H(r)$ は次式となる。

$$H(r) = \alpha p(r) L(r) = \alpha P_0 L(r) \quad \cdot \cdot \cdot (2.15)$$

工作物の半径 r の値を変えて $L(r)$ を算出することで、工作物の半径方向の各点での走行距離(走行距離のプロファイル)を求めることができる。(2.15)式は、走行距離のプロファイルを求めることで研磨による加工量プロファイルの概要を求めることができることを示す。

工作物表面が水平状態でなくある曲面を持つ場合は、工作物の各点で工作物の工具表面からの沈み込量が異なるため、工作物に作用する圧力には、工作物の厚さ $h(r)$ と平均厚さ h_{av} の差 Δh に相当する圧力差が生じる。図 2-8 に工具表面からの沈み込量と圧力変化の説明図を示す。各点での加工圧力は初期圧力 P_0 に $E \Delta h$ (工具または工作物の相対弾性定数を E とした) が加算されるため、工作物の半径 r の点の加工量 $H(r)$ は次式で表される。

$$H(r) = \alpha p(r) L(r) = \alpha P_0 (1 + E \Delta h / P_0) L(r) \quad \cdot \cdot \cdot (2.16)$$

(2.16)式は、工作物の厚い部分では加工量が増加し、薄い部分では Δh が負の数となるため、加工量が減少することを示す

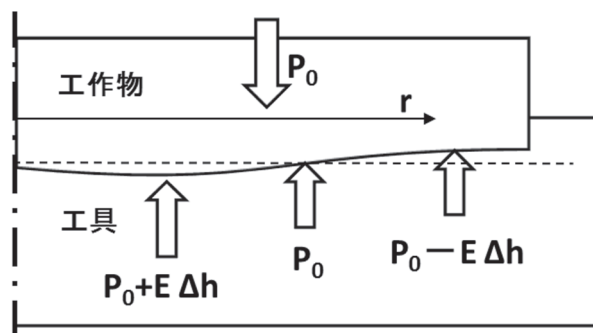


図 2-8 工具表面からの沈み込量と加工圧力の変化

長時間の研磨加工によって工作物表面が変形する場合は、(2.15)式より、圧力変化が無視できる程度の微小加工時間 Δt を設定して加工量を算出し、工作物が加工量の分布によって変形する場合に求めた

(2.16)式より加工時間 Δt で 2 回目の加工量を算出し、以降目的とする加工時間まで加工時間 Δt の加工量の算出を繰り返すことで目的の加工時間までの加工量を求めることができる。目的の加工時間までに n 回の算出を繰り返すと、 n 回目の各点での加工量は次式で表される。

$$H_n(r) = H_{n-1}(r) + \alpha P_0 (1 + E \Delta h_{n-1}/P_0) L(r) \cdots (2.17)$$

ここで、 $H_{n-1}(r)$ は $n-1$ 回目の加工量であり、 Δh_{n-1} は $n-1$ 回目の計算で得られた平均加工量と加工量の差である。表 2.1 に加工時間と加工量の関係式を示す。

表 2.1 加工時間と加工量の関係

時間	平均加工量	加工量差	圧力	加工量
$t_0=0$	0	0	P_0	0
$t_1= t_0+ \Delta t$	0	$\Delta h_1=0$	$P_1=P_0$	$H_1=\alpha P_1 L(r)$
$t_2= t_1+ \Delta t$	$\hat{H}_1=\alpha P_1 \bar{L}$	$\Delta h_2=\hat{H}_1 - H_1$	$P_2=P_0+E\Delta h_1$	$H_2=H_1+\alpha P_2 L(r)$
$t_3= t_2+ \Delta t$	\hat{H}_2	$\Delta h_3= \hat{H}_2 - H_2$	$P_3=P_0+E\Delta h_2$	$H_3= H_2+\alpha P_3 L(r)$
$t_n= t_{n-1}+ \Delta t$	\hat{H}_{n-1}	$\Delta h_n= \hat{H}_{n-1} - H_{n-1}$	$P_n=P_0+E\Delta h_{n-1}$	$H_n=$ $H_{n-1}+\alpha P_n L(r)$

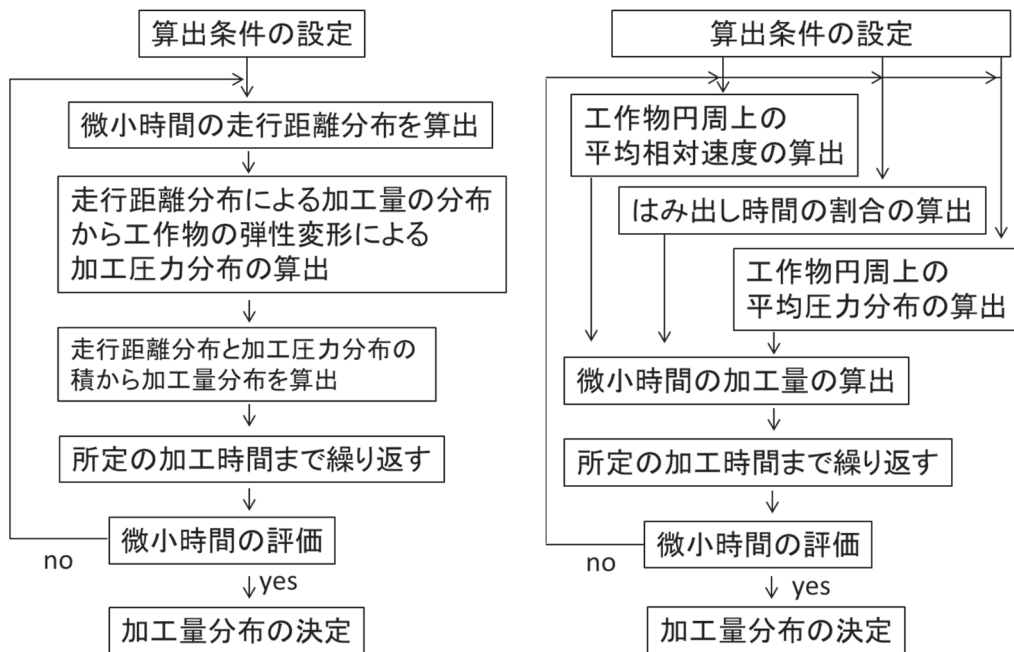
\bar{L} は走行距離の平均値を示す。

走行距離プロファイルは、工作物の周期運動が 1 周期に達するとほぼ形状が決定される。また、工作物と工具にはみ出し領域が存在する加工条件では、加工条件によって異なるが、多くても 6 秒以内には走行距離プロファイルの形状がほぼ決定される。従って、走行距離プロファイルが一定形状に落ち着く加工時間以上で微小加工時間 Δt を設定する必要があるが、微小加工時間 Δt の設定値が少なすぎると、計算回数が増加して紛らわしくなり、逆に多すぎると圧力変化が無視できなくなるので、微小加工時間 Δt の選定には注意が必要である。

以上、工作物表面が水平状態から研磨加工を開始する場合や、工作

物表面が曲面を持つ場合、また、長時間の加工の場合についてそれぞれ加工量の算出式を示した。いずれの加工量の算出式も加工量プロファイルが走行距離プロファイルに依存する。本節で検討した解析手順と既提案の解析手順の概要を図 2-9 に比較して示す。図 2-9(a)は、本節で検討した解析手順を示すもので、既提案の工作物円周上の平均相対速度の算出、はみ出し時間の割合の算出及び工作物円周上の平均圧力分布の算出を、微小時間の走行距離分布(走行距離プロファイル)を算出することで、加工量プロファイルの解析を、簡素化して行うことができるものである。

本節では、加工量プロファイルが走行距離プロファイルに依存することを示した。次節では、研磨装置の種類ごとに走行距離プロファイルの算出方法と算出結果を例示する。



(a)本節での解析手順概要 (b) 既提案の解析手順概要[12]

図 2-9 解析手順の概要比較

2.3 代表的な研磨装置の運動解析結果

平坦化 CMP 装置は、半導体ウエハなどの工作物を保持しながら回転、加圧及び揺動を与える研磨ヘッド部とその駆動機構、パッドが貼付されるパッド定盤と駆動機構、及びコンディショニング機構、洗浄機構、スラリー供給機構などで構成される。工作物全面にわたって均一に加工するためには工作物面内の圧力、走行距離プロファイルをいかに均一に保持して加工するかが重要課題となる。本節では各種研磨装置の研磨ヘッド部とパッド定盤の運動機構に着目した運動解析例を示す。

(2.5)式及び(2.6)式は、加工開始からの時間 t を与えれば工作物の任意点が工具面のどこに位置するかを表すことができる。従って、汎用表計算ソフト(Excel など)を利用することで、容易に加工経過時間ごとの工具面上の座標(x,y)が数値表示でき、工作物の任意点の研磨軌跡や走行距離が特別な計算ソフトを用いずに算出できる。以下に、Excel を用いて算出した、代表的な研磨装置の運動解析結果の例を示す。使用した解析条件は運動解析の方法を説明するための例であり、加工条件の最適化を議論するためのものではない。一般的に、1 分間当たりの加工量を除去速度として利用するので、本節では、加工時間 1 分間を用いた研磨走行距離の解析結果を例示する。

2.3.1 プラテン・ロータリ型研磨装置

LSI デバイスの多層配線プロセスの平坦化 CMP では、プラテン・ロータリ型 CMP 装置が最もよく使用されている。プラテン・ロータリ型 CMP 装置は半導体ウエハなどの工作物径の 2.5~3 倍のプラテン径を有するため装置が大型であるが、研磨ヘッドとプラテン(工具)の回転数が同じであれば、工作物のどの点をとっても工作物と工具の相対速度が同じで、原理的には均一に加工できる。しかし、實際上、微妙なポリシングマークが発生することもあるので、研磨ヘッドを揺動運動させる。

図 2-10 にプラテン・ロータリ型研磨装置の模式図を示す。上向きで回転する円形工具に研磨ヘッドに固定した工作物を対向させて回転させる Down face 型研磨装置である。研磨ヘッドの回転軸 O_w は、工具が回転停止しているときの工具仮想座標系 (X, Y) の X 軸方向に正弦関数で揺動運動させるものとした。研磨ヘッドの回転軸を揺動運動させることで、加工液が工作物面に均一に供給され、また研磨軌跡密度を分散させてポリシングマークの発生を防止する効果がある。研磨加工に関与しない工作物と工具のはみ出し領域がないよう、工具の大きさは、工作物の大きさの 2.5~3 倍程度に設定されている。図 2-11 に工作物と工具の位置関係を示す。図 2-11 は、研磨ヘッドの回転軸 O_w が工具中心 O_p を原点とする工具仮想座標系 (X, Y) で示される点 (L_x, L_y) を揺動中心として、X 軸に平行に振幅 a の正弦関数で揺動運動することを示す。

図 2-11 の位置関係をもとに、工作物の任意点 (r, θ_0) の工具面上の座標 (x, y) は前節で述べた式と同じ式であるが、以下にまとめて示す。

工具が回転を停止しているとき、工具仮想座標系 (X, Y) での工作物の任意点の位置は次式で表される。

$$X(t) = r \cos(\omega_w t + \theta_0) + h(t) \quad \dots (2.1)$$

$$Y(t) = r \sin(\omega_w t + \theta_0) + g(t) \quad \dots (2.2)$$

工具中心 O_p から工作物の任意点までの距離を $R(t)$ 、工作物の任意点と原点 O_p とを結ぶ直線と X 軸との角度を $\theta(t)$ とすると、 $R(t)$ 、 $\theta(t)$ はそれぞれ次式で表される。

$$R(t) = (X(t)^2 + Y(t)^2)^{1/2} \quad \dots (2.3)$$

$$\theta(t) = \cos^{-1}[X(t)/R(t)] \quad \dots (2.4)$$

工具が回転角速度 ω_p で回転するときの工作物の任意点 (r, θ_0) の工具面上の座標 (x, y) は $R(t)$ と $\theta(t)$ を用いて次式で表される。

$$x(t) = R(t) \cos[\theta(t) - \omega_p t] \quad \dots (2.5)$$

$$y(t) = R(t) \sin[\theta(t) - \omega_p t] \quad \dots (2.6)$$

工作物の任意点 (r, θ_0) の θ_0 に関しては、いずれの値でも研磨軌跡、走行距離の算出結果が同一となるので、以下では $\theta_0=0$ とする。研磨ヘッド(工作物中心)の運動関数 $(h(t), g(t))$ は、揺動関数を正弦関数とすると次式で表せる。

$$h(t) = L_x - a \sin(2\pi m t) \quad \dots (2.18)$$

$$g(t) = L_y \quad \dots (2.19)$$

ここで、 ω_p 、 ω_w はそれぞれ工具、工作物の回転角速度であり、それぞれ、回転数 $n_p(\text{rpm})$ 、 $n_w(\text{rpm})$ とすると $\omega_p=2\pi n_p/60$ 、 $\omega_w=2\pi n_w/60$ である。また、 (L_x, L_y) は揺動中心位置、 a は揺動振幅、 m は揺動回数である。本節では、研磨ヘッドの回転軸が揺動中心 $(L_x, 0)$ で X 軸上を揺動する揺動条件(1)と研磨ヘッドの回転軸が揺動中心 $(0, L_y)$ で X 軸に平行に揺動する揺動条件(2)の運動解析結果を比較して示す。

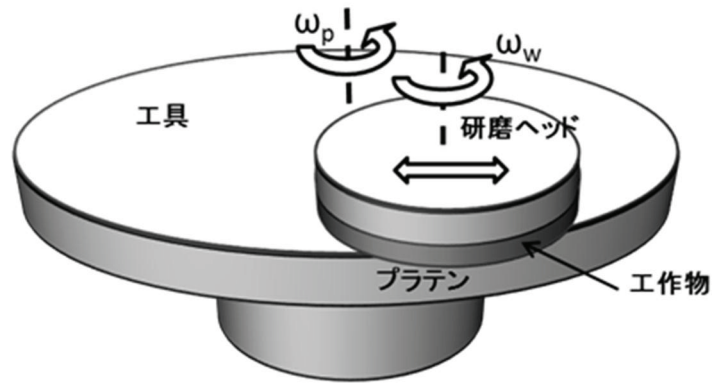


図 2-10 プラテン・ロータリ型研磨装置の模式図

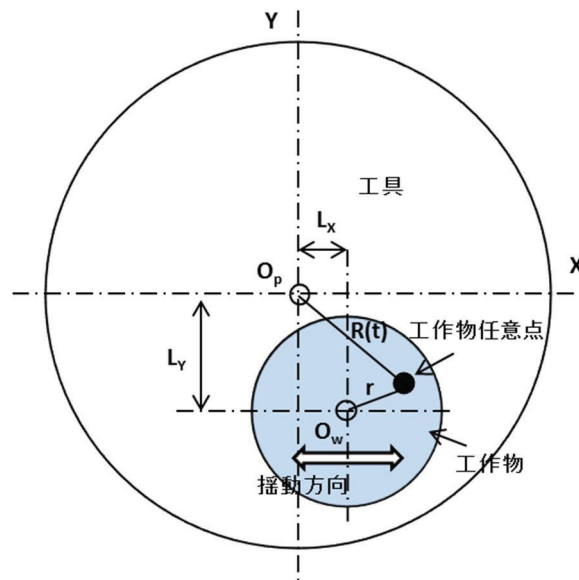


図 2-11 工作物と工具の位置関係

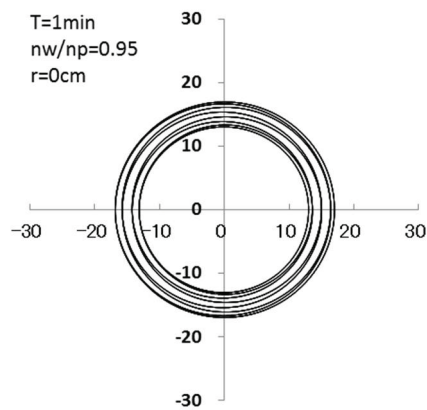
以下に、表 2-2 に示す解析条件とパラメータで、揺動条件(1) $L_x=15$ cm、 $L_y=0$ のときと、揺動条件(2) $L_x=0$ 、 $L_y=-15$ cm のときについて算出した研磨軌跡と走行距離プロファイルを示す。揺動条件(1)は、研磨ヘッドの回転軸が X 軸上を揺動中心($L_x, 0$)で揺動するときのもので、揺動条件(2)は、研磨ヘッドの回転軸が揺動中心($0, L_y$)で X 軸に平行に揺動するものである。

図 2-12 及び図 2-13 に、揺動振幅 $a=2$ cm、揺動回数 $m=5$ /min、工具回転数 $n_p=40$ rpm、工作物回転数/工具回転数比 $n_w/n_p=0/95$ 、加工時間 $T=1$ min としたときの、揺動条件(1)と揺動条件(2)について、工

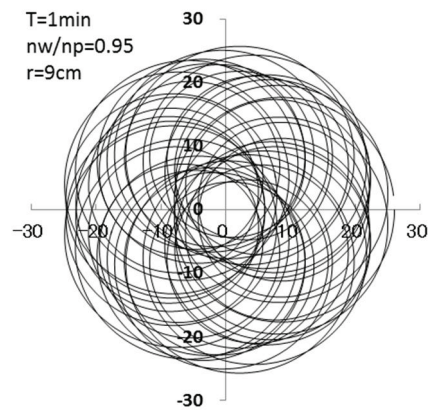
作物半径 $r=0$ 、 $r=9$ cm の点が工具面上を描く研磨軌跡を示す。図 2-12(a)に示す揺動条件(1)の工作物半径 $r=0$ の点の研磨軌跡は、工具半径 13 cm と工具半径 17 cm の幅 4 cm の円環内部にあり、揺動中心位置 $L_x=15$ cm を中心に幅 2 cm 内に分散することを示す。一方、図 2-13(a)に示す揺動条件(2)の工作物半径 $r=0$ の点の研磨軌跡は、工具半径 15 cm の円周となり、軌跡の分散がみられない。これは、工作物半径 $r=9$ cm の点の研磨軌跡も同様で、揺動条件(1)では図 2-12(b)に示すように、揺動中心位置 $L_x=15$ cm を中心に幅 22 cm の円環内に研磨軌跡が描かれるのに対して、揺動条件(2)では図 2-13(b) に示すように、幅 18 cm の円環内に研磨軌跡が描かれ、揺動条件(1)で揺動さない($a=0$) ときの研磨軌跡と同一になる。揺動条件(2)には揺動による研磨液の分散効果はあるものの、軌跡密度の分散には揺動効果が少ないといえる。

表 2-2 プラテン・ロータリ型の解析条件とパラメータ

	揺動条件(1)	揺動条件(2)
揺動振幅 a (cm)	2	2
揺動回数 m (1/min)	5	5
工具回転数 n_p (rpm)	40	40
初期 X 座標 L_x (cm)	15	0
初期 Y 座標 L_y (cm)	0	-15
工作物回転数 n_w (rpm)	parameter	parameter
工具半径 R_p (cm)	30	30
工作物半径 R_w (cm)	10	10
加工時間 T (min)	1	1

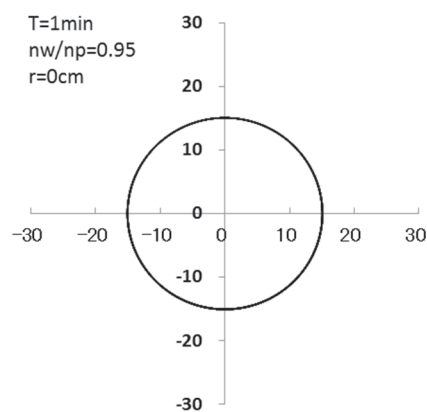


(a) $r=0$

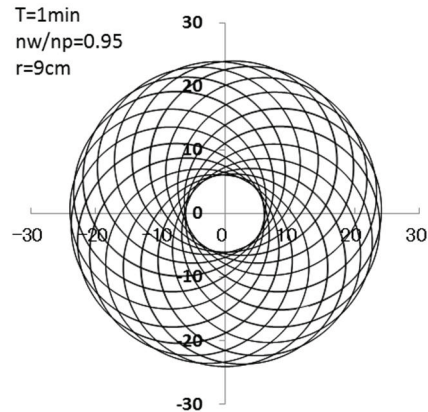


(b) $r=9\text{cm}$

図 2-12 揺動条件(1)のときの研磨軌跡



(a) $r=0$



(b) $r=9\text{ cm}$

図 2-13 揺動条件(2)のときの研磨軌跡

図 2-14 及び図 2-15 に、揺動振幅 $a = 2\text{ cm}$ 、揺動回数 $m = 5 / \text{min}$ 、工具回転数 $n_p = 40\text{ rpm}$ 、加工時間 $T = 1\text{ min}$ としたときの、それぞれ揺動条件(1)のときと揺動条件(2)のときの、走行距離プロファイルの工作物と工具の回転数比 n_w/n_p 依存性を示す。走行距離プロファイルは、工作物の半径に対して走行距離をプロットしたもので、走行距離の単位は cm である。図 2-14 及び図 2-15 は、揺動条件(1)のときと揺動条件(2)のときで走行距離プロファイルがほぼ同一で、回転比 $n_w/n_p = 1$ で直線を示し、 $n_w/n_p = 1$ からずれると工作物の外周部でわずかに増加す

ることを示す。

図 2-16 に、図 2-15 と同一条件のときの回転数比 n_w/n_p に対する走行距離の工作物面内不均一性を示す。工作物面内不均一性(% σ)は、走行距離の半径に対する標準偏差を走行距離の平均値に対する百分率で表したものである。図 2-16 は、回転数比 $n_w/n_p=1$ で% $\sigma=0$ となり、 $n_w/n_p=1$ からずれると増大し、工作物の外周部ほど加工量が大きくなることによって工作物面内不均一性が増加することを示す。回転数比 n_w/n_p に対する工作物面内不均一性(% σ)は、揺動条件(1)のときと揺動条件(2)のときで同一であった。

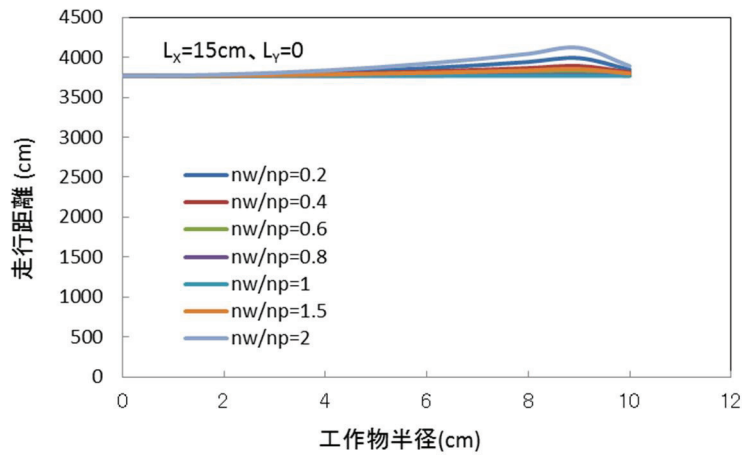


図 2-14 揺動条件(1)の走行距離プロファイルの回転比依存性

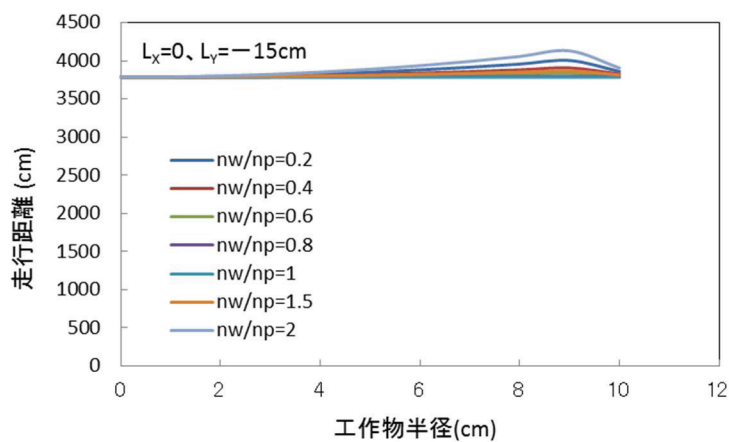


図 2-15 揺動条件(2)の走行距離プロファイルの回転比依存性

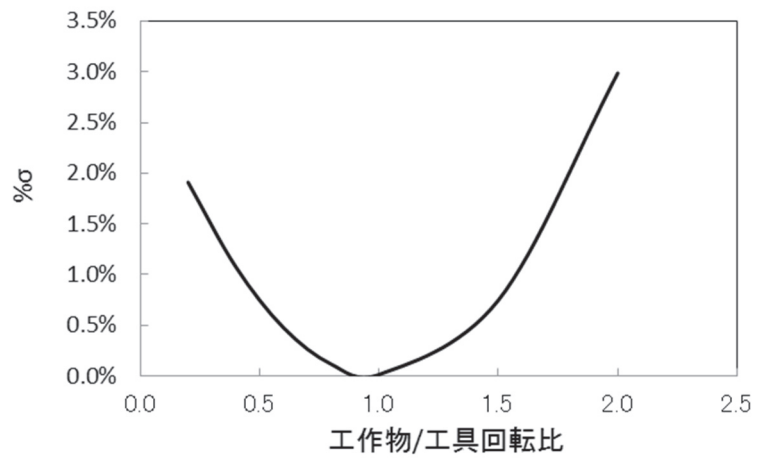


図 2-16 走行距離の工作物面内不均一性

2.3.2 キャリア型研磨装置

キャリア型研磨装置は、主としてベアシリコンウエハの両面ラッピングや鏡面研磨に利用され、複数枚のウエハの両面を一度に研磨加工するバッチ式研磨装置である。研磨パッドを貼付した上下定盤を回転させてウエハの両面を挟圧するとともに、ウエハを保持したキャリアを遊星運動させる研磨機構を有する。多層配線プロセスに使用される平坦化 CMP に利用された実績はないが、キャリアの運動関数が各種研磨装置のヘッドの運動関数の一般化関数の形であるため、本節で検討することとした。

図 2-17 に片面研磨用のキャリア型研磨装置の模式図[5]を示す。キャリアは太陽ギアとインターナルギアの回転により、太陽ギアを中心に公転するとともに自転する。ウエハなどの工作物はキャリア内に収納され、重錘などで上向きに回転する工具面に対向させて加圧される Down face 型研磨装置である。図 2-18 にキャリア型研磨装置の工具と工作物の位置関係を示す。キャリア中心は工具中心から半径 a_1 の円周を角速度 ω_m で回転し、工作物中心はキャリア中心から半径 a_2 の円周を角速度 ω_c で回転するものとした。研磨開始時のキャリアと工作物の初期位置を工具の回転が停止しているときの工具仮想座標系 (X, Y) の X 軸上とすると、工作物中心の運動関数 $(h(t), g(t))$ は次式で表される。

$$h(t) = a_1 \cos(\omega_m t) + a_2 \cos(\omega_c t) \quad \cdot \cdot \cdot (2.20)$$

$$g(t) = a_1 \sin(\omega_m t) + a_2 \sin(\omega_c t) \quad \cdot \cdot \cdot (2.21)$$

異なる初期位置のキャリアや工作物に対しても、上式で取り扱っても差はない。ここで、 a_1 、 ω_m はそれぞれキャリア中心の公転半径、公転角速度(公転数 n_m rpm)であり、 a_2 、 ω_c はそれぞれキャリアの自転半径、自転角速度(自転数 n_c rpm)である。太陽ギア回転角速度を ω_a (回転数 n_a rpm)、太陽ギア半径を R_a とし、インターナルギア回転角速度

を ω_b (回転数 n_b rpm)、インターナルギア半径を R_b 、キャリア半径を R_c とすると、これらは次式の関係で表される。

$$\omega_m = (\omega_b R_b + \omega_a R_a) / (R_a + R_b) \quad \dots (2.22)$$

$$\omega_c = (R_a + R_c) (\omega_b \cdot R_b - \omega_a R_a) / (R_a + R_b) R_c \quad \dots (2.23)$$

$$a_1 = R_a + R_c \quad \dots (2.24)$$

$$a_2 = R_c / 2 = (R_b - R_a) / 2 \quad \dots (2.25)$$

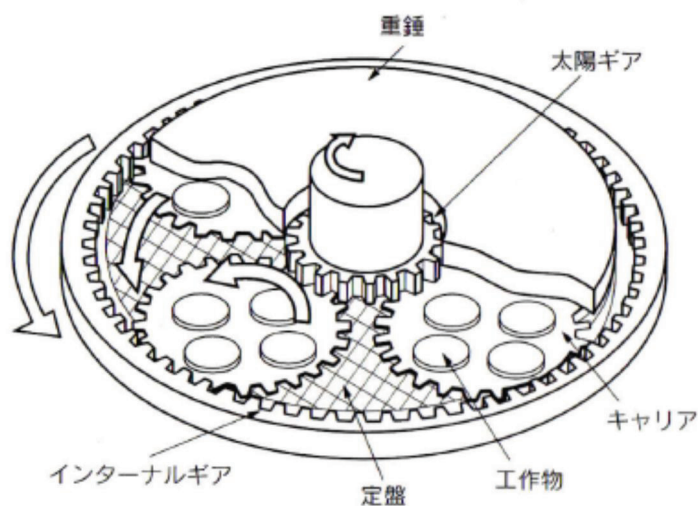


図 2-17 片面研磨用キャリア型研磨装置の模式図

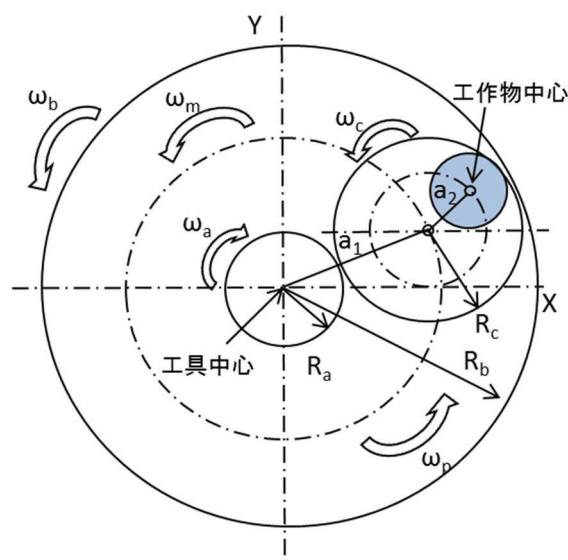


図 2-18 工作物と工具の位置関係

以下に、表 2-3 に示す解析条件とパラメータで算出した研磨軌跡と走行距離プロファイルを示す。一般に工作物はキャリアに固定されて自転(回転)しないので $n_w=0$ とした。

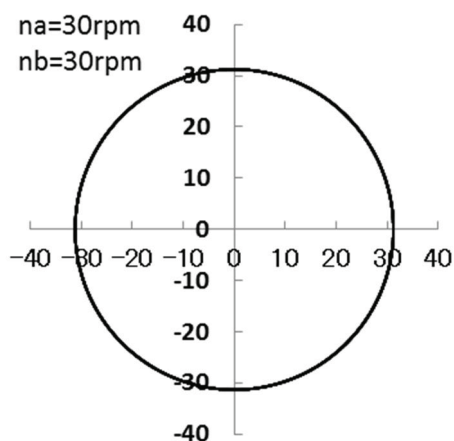
図 2-19 にインターナルギア回転数 $n_b=30$ rpm、加工時間 $T=1$ min とし、太陽ギア回転数 $n_a=30$ rpm、 50 rpm としたときの工作物中心の運動軌跡の例を比較して示す。工作物中心の運動軌跡は、(2.20)式、及び(2.21)式に示すように、工具回転数には依存しない。図 2-19(a)は、インターナルギア回転数 n_b と太陽ギア回転数 n_a が同一のときの運動軌跡を示したもので、工作物中心の運動軌跡は半径 31.2 cm の単一円形軌道を描き、回転同期が生じることを示す。インターナルギア回転数 n_b と太陽ギア回転数 n_a が異なると、図 2-19(b)に示したように、工作物中心は半径 $31.2\sim 17.5$ cm の円環内を複雑に運動する。

図 2-20 にインターナルギア回転数 $n_b=30$ rpm、工具回転数 $n_p=50$ rpm、研磨時間 $T=1$ min とし、太陽ギア回転数 $n_a=30$ rpm、及び 50 rpm としたときの工作物半径 $r=4$ cm の点の研磨軌跡を比較して示す。図 2-20(a)に示すように、太陽ギア回転数 $n_a=30$ rpm としたときの研磨軌跡は単一の同期軌跡を描くが、図 2-20(b)に示すように、太陽ギア回転数 $n_a=50$ rpm では研磨軌跡が均等に分散される。

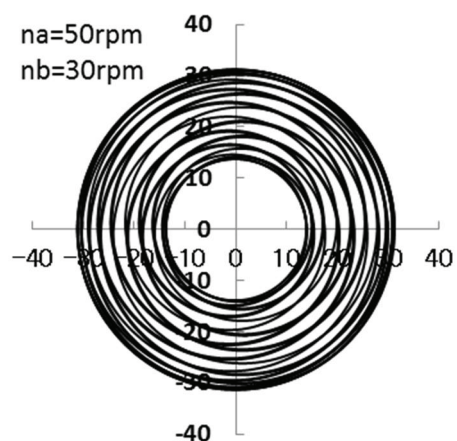
図 2-21 に、太陽ギア回転数 $n_a=31$ rpm、 32 rpm としたときの工作物半径 $r=4$ cm の点の研磨軌跡を示す。図 2-21 は、インターナルギア回転数 n_b と太陽ギア回転数 n_a をわずかに変えることで、同期がずれて研磨軌跡が分散される様子を示したものであるが、図 2-21(a)に示すように、太陽ギア回転数 $n_a=31$ rpm では研磨軌跡の分散が十分ではなく、図 2-21(b)に示すように、太陽ギア回転数 $n_a=32$ rpm で十分に分散される。

表 2-3 キャリア型研磨装置の解析条件とパラメータ

太陽ギア半径 $R_a(\text{cm})$	5
太陽ギア回転数 $n_a(\text{rpm})$	parameter
インターナルギア半径 $R_b(\text{cm})$	40
インターナルギア回転数 $n_b(\text{rpm})$	30
工作物半径 $R_w(\text{cm})$	5
キャリア半径 $R_c(\text{cm})$	17.5
工具外半径 $R_p(\text{cm})$	40
工具回転数 $n_p(\text{rpm})$	parameter
工作物回転数 $n_w(\text{rpm})$	0
加工時間 $T(\text{min})$	1

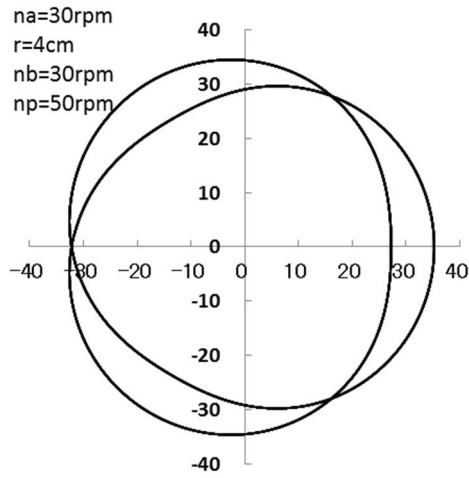


(a) $n_a=30 \text{ rpm}$

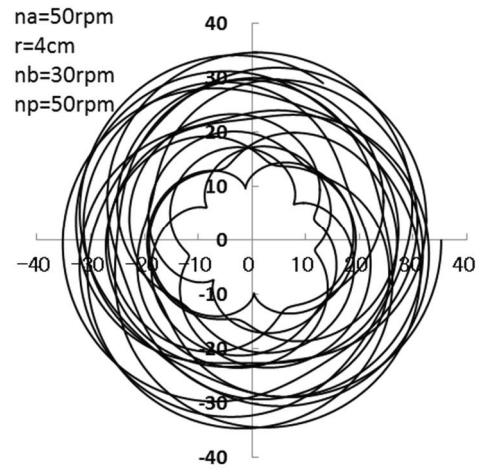


(b) $n_a=50 \text{ rpm}$

図 2-19 工作物中心の軌跡

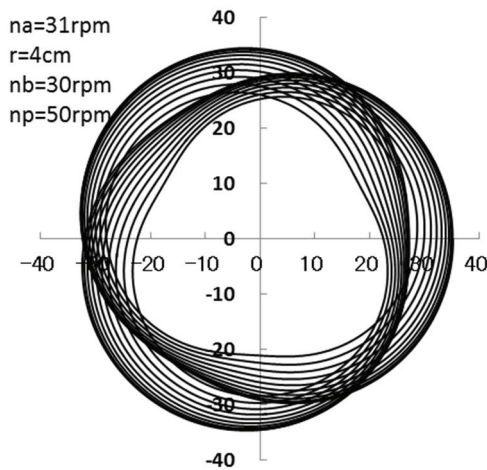


(a) $n_a=30$ rpm

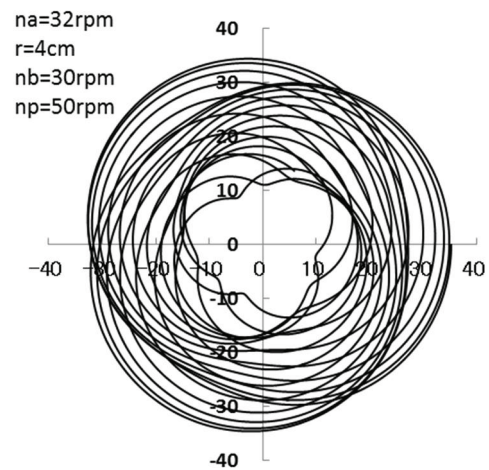


(b) $n_a=50$ rpm

図 2-20 工作物半径 $r=4$ cm の研磨軌跡例



a) $n_a=31$ rpm



(b) $n_a=32$ rpm

図 2-21 工作物半径 $r=4$ cm の研磨軌跡例

図 2-22 及び図 2-23 にそれぞれ、インターナルギア回転数 $n_b=30$ rpm、工具回転数 $n_p=50$ rpm としたときの走行距離プロファイルの太陽ギア回転数依存性と走行距離の工作物面内不均一性の太陽ギア回転数依存性を示す。図 2-22 に示す走行距離プロファイルは、工作物の中央部が低いならかな凹形状を示し、太陽ギア回転数 n_a の変化に対してほぼ同じ形状で変化する。走行距離は研磨軌跡に同期が生じる太陽ギア回

転数 $n_a=30 \text{ rpm}$ のとき最も大きい。図 2-23 に示す工作物面内不均一性($\% \sigma$)は、走行距離が最も大きく、研磨軌跡の分散が最も少ないインターナルギア回転数 $n_b=30 \text{ rpm}$ で極小を示す。

図 2-24 及び図 2-25 にそれぞれ、インターナルギア回転数 $n_b=30 \text{ rpm}$ 、太陽ギア回転数 $n_a=60 \text{ rpm}$ としたときの走行距離プロファイルの工具回転数 n_p 依存性と面内不均一性の工具回転数依存性を示す。図 2-24 に示す走行距離プロファイルは、工具回転数 n_p の増加とともに直線に近くなり、走行距離も増加する。図 2-25 に示す工作物面内不均一性は、工具回転 $n_p=40 \text{ rpm}$ では 12%に達するが、 $n_p=60 \text{ rpm}$ まで急激に低下し 2%以下なる。工具回転をさらに増加させると低下の割合は減少し、 $n_p=100 \text{ rpm}$ で 1%以下になる。

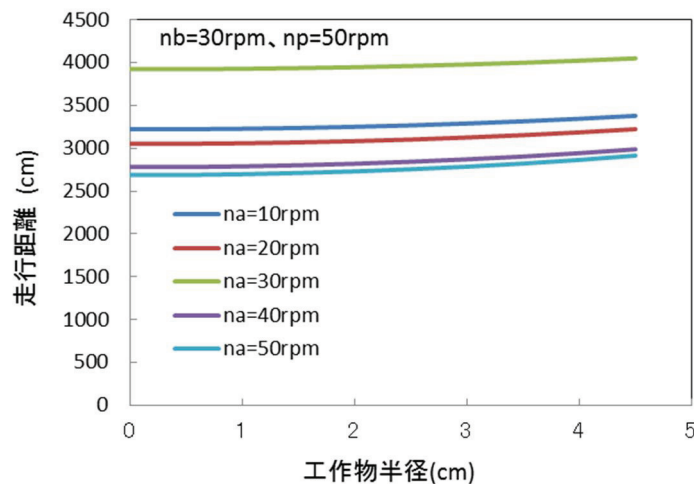


図 2-22 走行距離プロファイルの太陽ギア回転数依存性

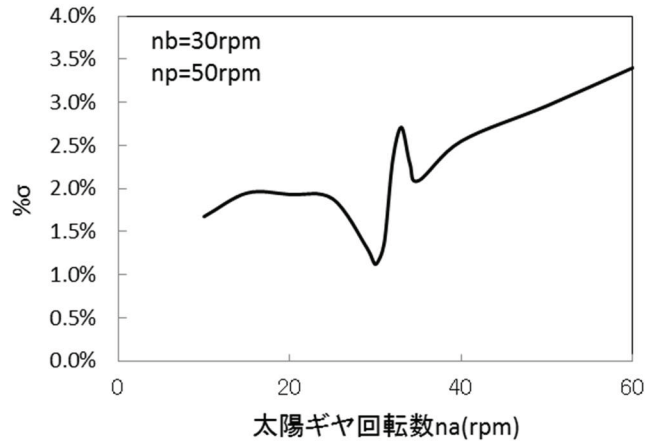


図 2-23 工作物面内不均一性の太陽ギヤ回転数依存性

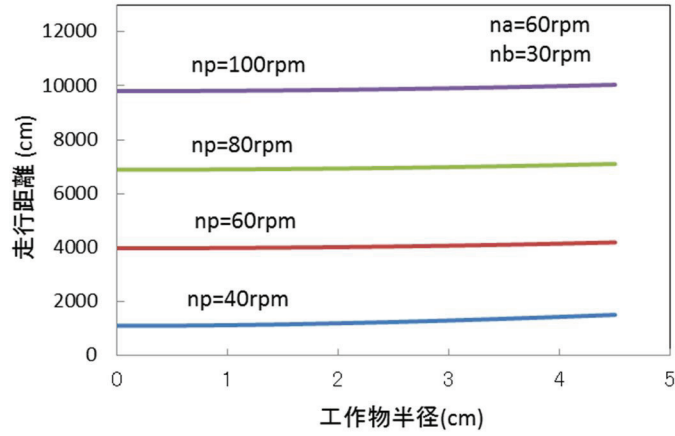


図 2-24 走行距離プロファイルの工具回転数依存性

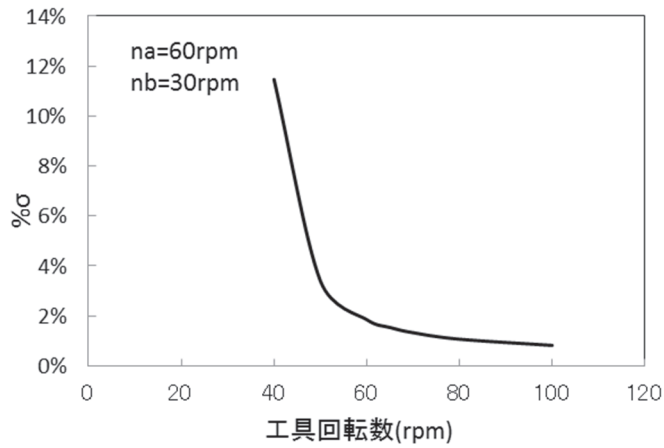


図 2-25 工作物面内不均一性の工具回転数依存

2.3.3 オービタル回転型研磨装置

オービタル回転型研磨装置は、半導体ウエハなどの工作物のどの位置でも同一の小円運動軌跡を描かせ、均一相対速度が得られるような偏心小円運動機構を有する装置である。

図 2-26 にオービタル回転型研磨装置の模式図を示す。オービタル回転型研磨装置は、上向きで小円回転(オービタル回転)する円形工具に研磨ヘッドに固定した工作物を偏心位置で対向させて回転させる Down face 型研磨装置である。

図 2-27 にオービタル回転型研磨装置の工具と工作物の位置関係を示す。図 2-27 は図 2-26 の研磨装置を真上から見たときの位置関係図で、工具座標系を (X', Y') とし、プラテン(工具)が小円回転半径 a 、回転角速度 ω_m でオービタル回転をしているものとした。 (L_x, L_y) の位置にある工作物中心を工具中心から観測すると、工作物が逆回転して見える。従って、工具中心を原点とする工具仮想座標系 (X, Y) で研磨ヘッド(工作物中心)の運動を表すと、工具中心を原点とする工具仮想座標系 (X, Y) で (L_x, L_y) の偏心位置にある研磨ヘッド(工作物中心)の運動関数 $(h(t), g(t))$ は次式で表せる。

$$h(t) = -a \cos(\omega_m t) + L_x \quad \dots (2.26)$$

$$g(t) = -a \sin(\omega_m t) + L_y \quad \dots (2.27)$$

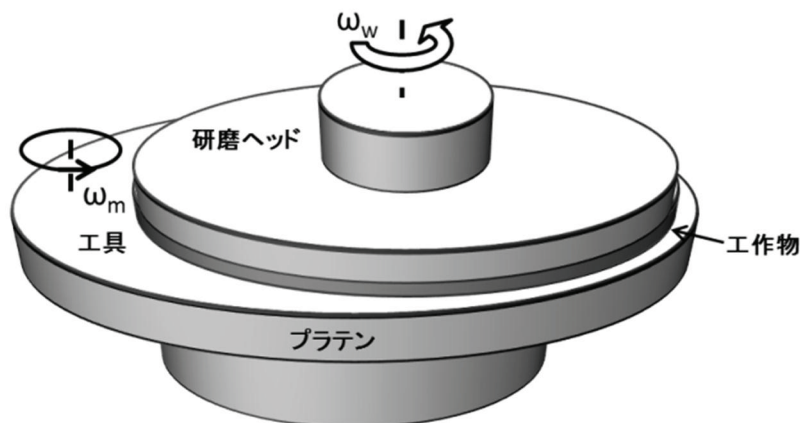


図 2-26 オービタル回転型研磨装置の模式図

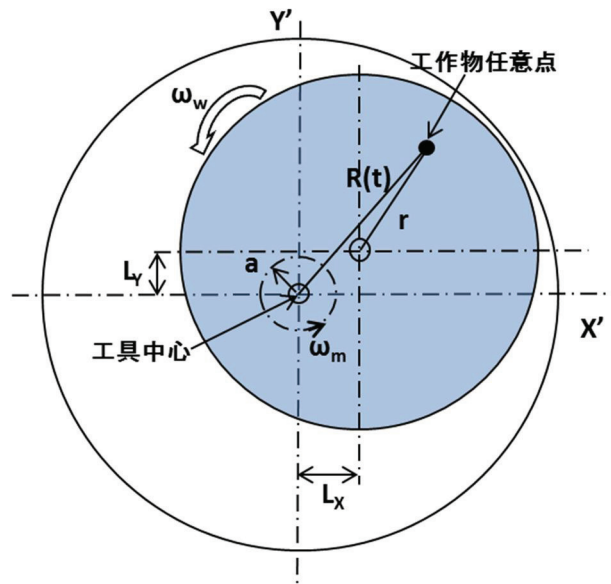


図 2-27 オービタル回転型研磨装置の位置関係

以下に、表 2-4 に示す解析条件とパラメータで、算出した研磨軌跡と走行距離プロファイルを示す。

図 2-28 及び図 2-29 にそれぞれ、オービタル回転半径 $a = 1.3 \text{ cm}$ 、オービタル回転数 $n_m = 250 \text{ rpm}$ 、工作物中心の偏心位置 $L_x = 2.5 \text{ cm}$ 、 $L_y = 0$ 、工作物回転数とオービタル回転数の比 $n_w/n_m = 0.05$ としたときの研磨軌跡を示す。図 2-28 は工具回転数 $n_p = 0$ のときの工作物半径 $r = 5 \text{ cm}$ 、 $r = 15 \text{ cm}$ の点の研磨軌跡を示したもので、工具座標 $(3.8, 0)$ を中心とした花卉状の単一軌道を描くことを示す。図 2-29 は工具回転数 $n_p = 3 \text{ rpm}$ のときの工作物半径 $r = 5 \text{ cm}$ 、 $r = 15 \text{ cm}$ の点の研磨軌跡を示したもので、図 2-27 と比較すると工具を回転させることで研磨軌跡が分散されることを示す。

表 2-4 オービタル回転型研磨装置の解析条件とパラメータ

オービタル回転半径 a (cm)	1.3
オービタル回転数 m (rpm)	250
初期 X 座標 L_X (cm)	2.5
初期 Y 座標 L_Y (cm)	0
工作物半径 R_w (cm)	15
工作物回転数 n_w (rpm)	parameter
工具半径 R_w (cm)	22.5
工具回転数 n_p (rpm)	parameter
加工時間 T (min)	1

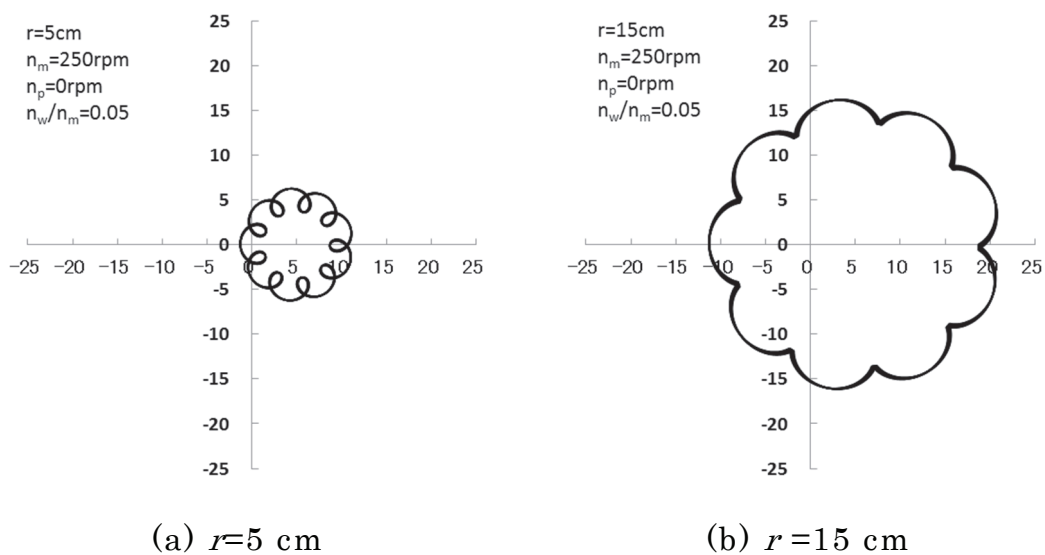


図 2-28 研磨軌跡例($n_m=250\text{ rpm}$ 、 $n_w/n_m=0.05$ 、 $n_p=0$)

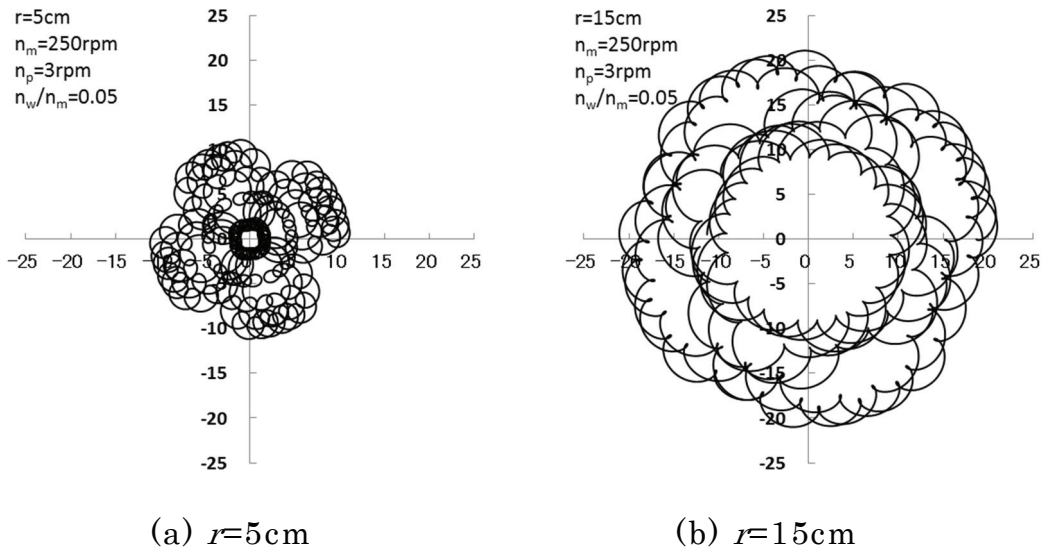


図 2-29 研磨軌跡例($n_m=250$ rpm、 $n_w/n_m=0.05$ 、 $n_p=3$ rpm)

図 2-30 及び図 2-31 にそれぞれ、オービタル回転半径 $a=1.3$ cm、オービタル回転数 $n_m=250$ rpm、工作物中心の偏心位置 $L_x=2.5$ cm、 $L_y=0$ 、工具回転数 $n_p=3$ rpm としたときの走行距離プロファイルの工作物回転数依存性と工作物回転数に対する走行距離の工作物面内不均一性を示す。工作物回転数はオービタル回転数との比 n_w/n_m として示した。図 2-30 は、 n_w/n_m が 0.1 以下である場合は走行距離プロファイルがほぼ直線を示し、 n_w/n_m が 0.1 以上になると工作物の外周ほど走行距離が増加する曲線となることを示す。図 2-31 は、工作物面内不均一性が工作物回転数 n_w の増加に対して単調増加することを示す。図 2-31 より、工作物を均一に加工するためには、工作物回転数 n_w がオービタル回転数 n_m の 10%以下とすべきことが分かる。

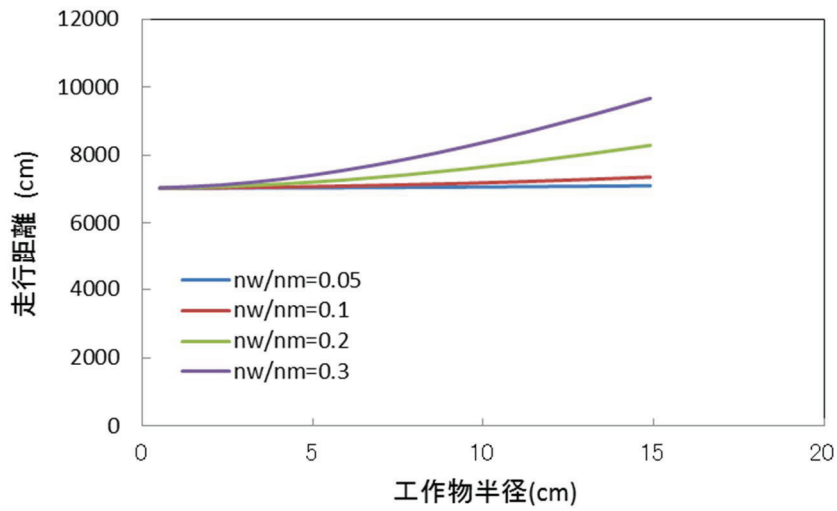


図 2-30 走行距離プロファイルの回転比依存性
(解析条件 $n_m=250$ rpm、 $n_p=3$ rpm)

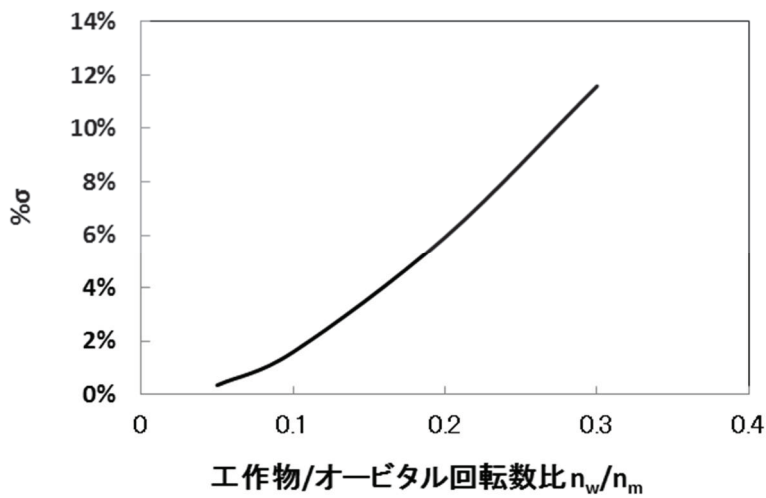


図 2-31 回転比に対する工作物面内不均一性

2.3.4 改良オスカー型研磨装置

オスカー型研磨装置は、レンズ研磨用に古くから使用されている研磨装置で、工具である研磨皿を円弧状に往復運動させ、工作物を回転運動させて、両者の接触部分を研磨する装置である。本節では、平板の패드定盤に半導体ウエハなどの工作物を回転させながら押圧して、工作物を円弧状に往復運動させる改良オスカー型研磨装置について検討する。

図 2-32 に改良オスカー型研磨装置の模式図を示す。図 2-32 に示すように、改良オスカー型研磨装置は、上向きで回転する円形工具に研磨ヘッドに固定した工作物を偏心位置で対向させて円弧揺動させながら回転させる Down face 型研磨装置である。

図 2-33 に改良オスカー型研磨装置の工具と工作物の位置関係を示す。プラテン(工具)の中心軸から L_X の距離に揺動支点を置き、長さ L のアームの先端に研磨ヘッドが取り付けられ、揺動角度 α で円弧揺動させるものとした。

プラテン(工具)中心軸を原点とする工具仮想座標系 (X, Y) で、 X 軸とアームとの角度を $\theta_m(t)$ とし、角速度 ω_m (揺動回数 m) でアームが正弦関数で揺動するものとする、工作物中心の運動関数 $(h(t), g(t))$ は次式で表せる。

$$h(t) = L \cos \theta_m(t) - L_X \quad \dots (2.28)$$

$$g(t) = L \sin \theta_m(t) \quad \dots (2.29)$$

$$\theta_m(t) = (\alpha/2) \cdot \sin(\omega_m t) \quad \dots (2.30)$$

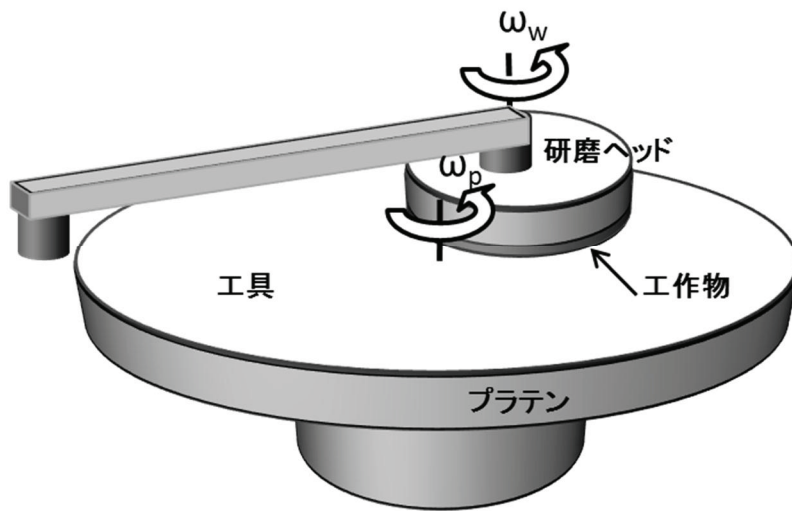


図 2-32 改良オスカー型研磨装置の模式図

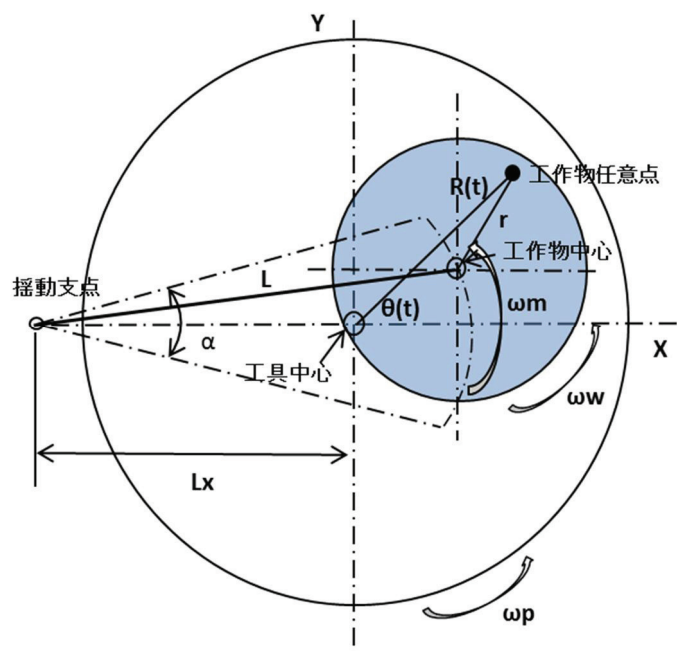


図 2-33 改良オスカー型研磨装置の位置関係

以下に、表 2-5 に示す解析条件とパラメータで算出した、研磨軌跡プロフィールと走行距離を示す。

図 2-34 及び図 2-35 にそれぞれ、揺動支点位置 $L_x=35$ cm、アーム長 $L=45$ cm、揺動角度 $\alpha=45$ 度、工具回転数 $n_p=40$ rpm、工作物回転

数 $n_w=40$ rpm としたときの工作物半径 $r=0$ 、 $r=9$ cm の点の研磨軌跡を示す。図 2-34 は、揺動回数 $m=10$ /min としたときの研磨軌跡を示すもので、研磨軌跡が同期軌跡を示す。図 2-35 は、揺動回数 $m=6$ /min としたときの研磨軌跡を示すもので、図 2.34 に示す同期軌道からずれて、研磨軌跡が分散されていることを示す。2.3.1 節のプラテン・ロータリ型研磨装置の研磨軌跡（図 2-14）と比較すると、プラテン・ロータリ型研磨装置では工作物回転数と工具回転数が等しいとき研磨軌跡に同期が見られたが、改良オスカー型研磨装置では、揺動回数によって同期が生じる特徴がある。

表 2-5 改オスカー型研磨装置の解析条件とパラメータ

揺動支点位置 L_x (cm)	35
アーム長 L (cm)	45
揺動角度 α (deg.)	45
揺動回数 m (1/min)	parameter
工具回転数 n_p (rpm)	40
工作物回転数 n_w (rpm)	parameter
工具半径 R_p (cm)	30
工作物半径 R_w (cm)	10
加工時間 T (min)	1

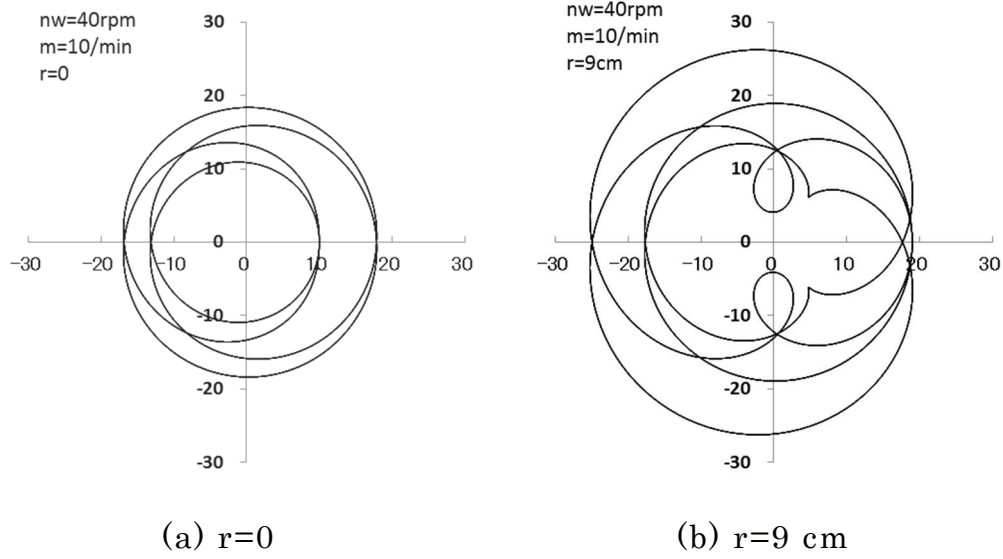


図 2-34 揺動回数 $m = 10 / \text{min}$ のときの研磨軌跡

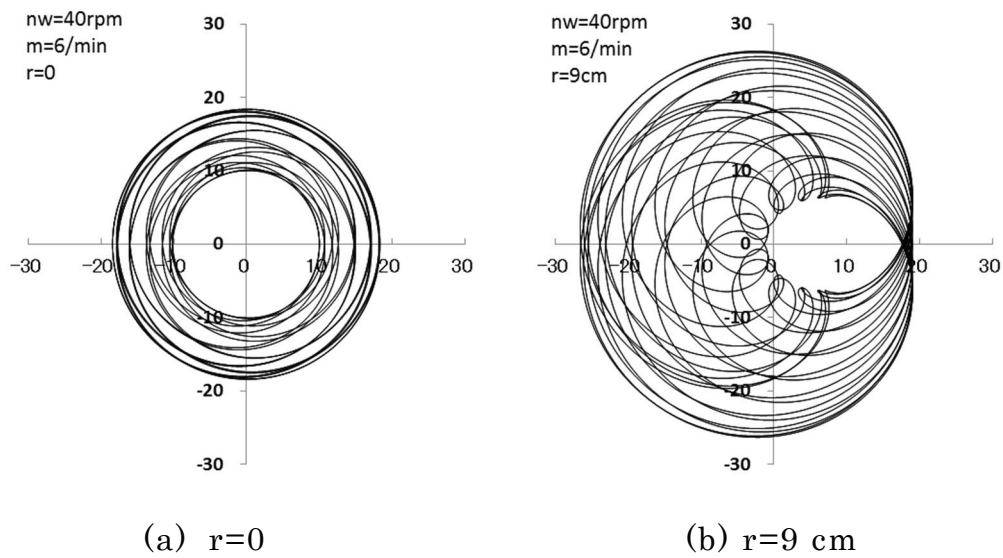


図 2-35 揺動回数 $m = 6 / \text{min}$ のときの研磨軌跡

図 2-36 及び図 2-37 にそれぞれ、揺動支点位置 $L_X=35\text{cm}$ 、アーム長 $L=45\text{ cm}$ 、揺動角度 $\alpha=45$ 度、揺動回数 $m = 5 / \text{min}$ 、工具回転数 $n_p=40\text{ rpm}$ としたときの走行距離プロファイルの工作物回転数 n_w 依存性と工作物回転数 n_p に対する走行距離の工作物面内不均一性を示す。図 2-36 に示す走行距離プロファイルの工作物回転数 n_p 依存性では、工作物回転数 n_p と工作物回転数 n_w とが等しいとき、走行距離プロファ

イルが直線を示し、工作物回転数 n_w が工作物回転数 n_p からずれると工作物の外周部ほど走行距離が増加することを示している。図 2-37 は、工作物回転数 n_p に対する走行距離の工作物面内不均一性を示すもので、工作物面内不均一性は工作物回転数 $n_w=40 \text{ rpm}$ のとき極小となり、工作物回転数が $n_w=40 \text{ rpm}$ ($n_w/n_p=1$) からずれるにしたがって工作物面内不均一性が增大することを示す。

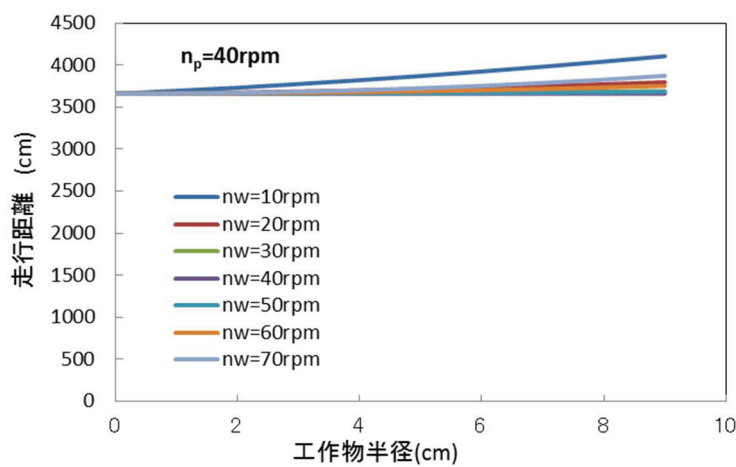


図 2-36 走行距離プロファイルの工作物回転数依存

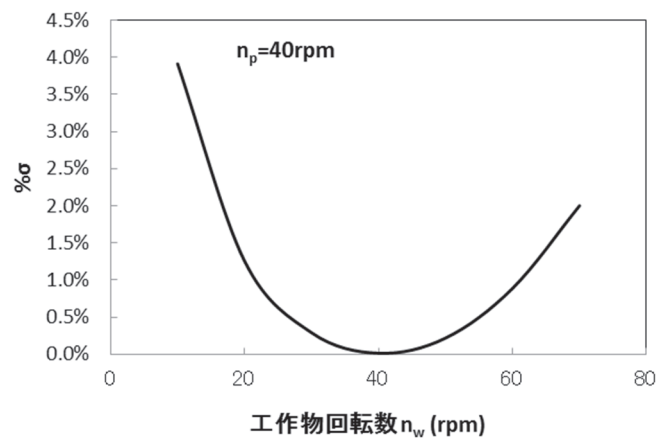


図 2-37 工作物回転数に対する工作物面内不均一性

2.3.5 速度制御型研磨装置

速度制御型研磨装置には、工具形状により、同径工具による揺動速度制御型、小径工具による揺動速度制御型およびドーナツ状工具による速度制御型の3種類に大別される。それぞれ、工具径は工作物径と同等かそれ以下で、研磨加工に関与しない工作物と工具のはみ出し領域が発生する特徴がある。速度制御方法では、工作物中心(研磨ヘッド)の運動関数($h(t)$ 、 $g(t)$)が正弦関数や速度関数で表される。

2.3.5.1 同径工具による揺動速度制御型装置

図 2-38 に同径工具による揺動速度制御型研磨装置の模式図を示す。同径工具による揺動速度制御型研磨装置は、上向きで回転する工作物に、工作物と同径の工具を研磨ヘッドに固定し、偏心位置で工作物に対向させて回転させる Up face 型研磨装置である。

図 2-39 に同径工具による揺動速度制御型装置の工具と工作物の位置関係を示す。図 2-39 は図 2-38 の研磨装置を真上から見たときの位置関係図である。工具中心の運動は、工作物中心を原点とする座標($L_x, 0$)を揺動中心として、 X' 軸方向に揺動振幅 a で揺動させるものとした。 $(L_x, 0)$ の位置にある工作物中心の運動を工具中心から観測すると、工作物中心の運動は、揺動振幅 a で逆方向に運動して見える。従って、工作物から見た工具中心の運動関数を $X' = h(t)$ 、 $Y' = g(t)$ とすると、工具仮想座標系(X, Y)に対して、工作物中心の運動は、 $X = -X' = -h(t)$ 、 $Y = -Y' = -g(t)$ の関数で表され、工具中心を原点とする工具仮想座標系(X, Y)での工作物中心の運動関数($h(t)$ 、 $g(t)$)は、揺動関数を正弦関数とする場合、次式で表せる。

$$h(t) = -(a \cos(2\pi m t) + L_x) \quad \dots (2.31)$$

$$g(t) = 0 \quad \dots (2.32)$$

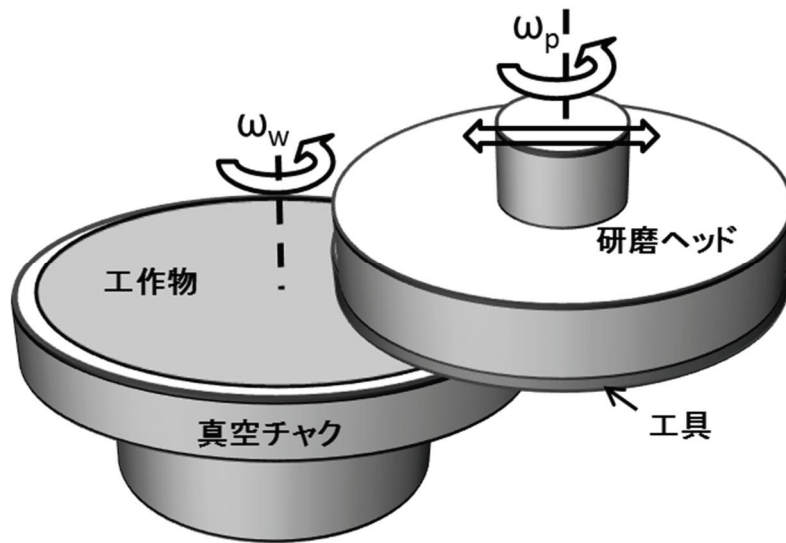


図 2.38 同径工具による速度制御型研磨装置の模式図

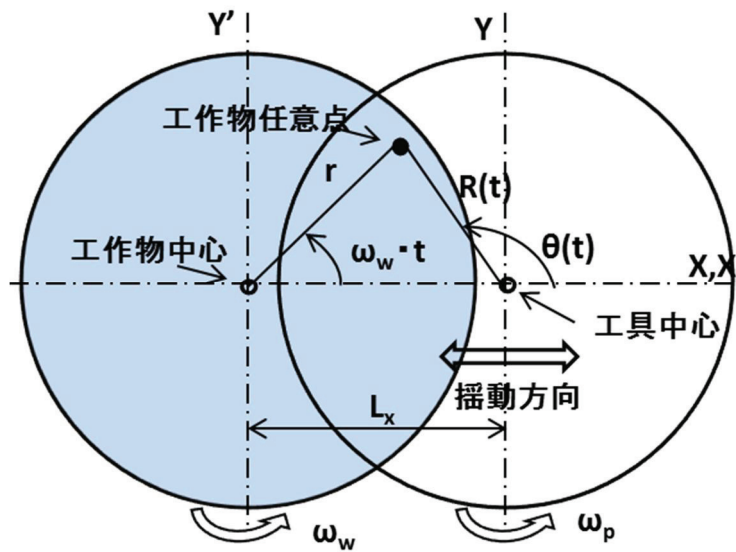


図 2.39 同径工具による速度制御型研磨装置の位置関係

以下に、表 2-6 に示す解析条件とパラメータで算出した研磨軌跡と走行距離プロファイルを示す。

図 2-40 に、揺動中心位置 $L_x=0$ 、揺動振幅 $a=12.5$ cm、揺動回数 $m=4$ /min、工具回転数 $n_p=41$ rpm としたときの工作物半径 $r=10$ cm の点の研磨軌跡を示す。図 2-40(a)は、工作物/工具回転数比 $n_w/n_p=-1$ としたときすなわち工作物と工具の回転方向が逆方向であるときの研

磨軌跡であり、図 2-40(b)は工作物/工具回転数比 $n_w/n_p=1$ としたときの研磨軌跡である。図 2-40 に半径 15 cm の円を示した。この円は半径 15 cm の工具を意味し、円の外側は研磨に関与しない工作物と工具のはみ出し領域である。図 2-40 は回転方向が異なるだけで工具内を描く研磨軌跡が大きく異なることを示す。

表 2-6 同径工具による速度制御型研磨装置の解析条件とパラメータ

揺動振幅 $a(\text{cm})$	parameter
揺動回数 $m(1/\text{min})$	parameter
揺動中心位置 $L_x(\text{cm})$	0
工作物半径 $R_w(\text{cm})$	0
工作物回転数 $n_w(\text{rpm})$	parameter
工具外半径 $R_b(\text{cm})$	15
工具内半径 $R_a(\text{cm})$	0
工具回転数 $n_p(\text{rpm})$	41
加工時間 $T(\text{min})$	1

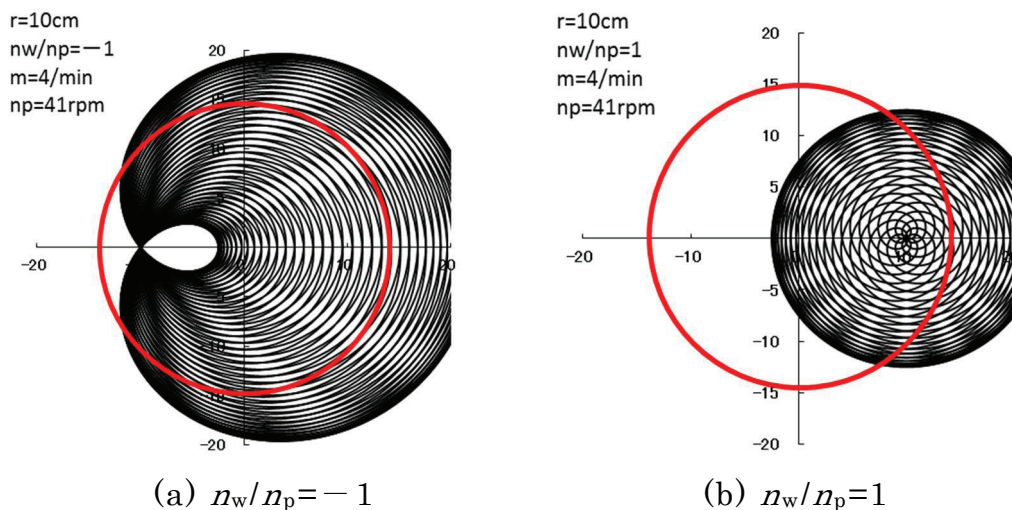


図 2-40 工作物半径 $r=10\text{ cm}$ の点の研磨軌跡

図 2-41 に、揺動中心位置 $L_X=0$ 、揺動振幅 $a=12.5$ cm、揺動回数 $m=11$ /min、工具回転数 $n_p=41$ rpm としたときの走行距離プロファイルの工作物/工具回転数比 n_w/n_p 依存性を示す。走行距離プロファイルは $n_w/n_p=-1$ のとき最も直線に近く、同径工具による速度制御型研磨装置では、工作物を均一に加工する条件として、工作物と工具の回転数が等しく逆回転させる条件($n_w/n_p=-1$)が最適であることが分かる。

図 2-42 及び図 2-43 にそれぞれ、揺動中心位置 $L_X=0$ 、揺動振幅 $a=12.5$ cm、工具回転数 $n_p=41$ rpm、工作物/工具回転数比 $n_w/n_p=-1$ としたときの走行距離プロファイルの工作物/工具回転数比依存性と揺動振幅に対する工作物面内不均一性を示す。図 2-43 より揺動振幅 $a=12.5$ cm で走行距離の工作物面内不均一性が最小値を示すことが分る。

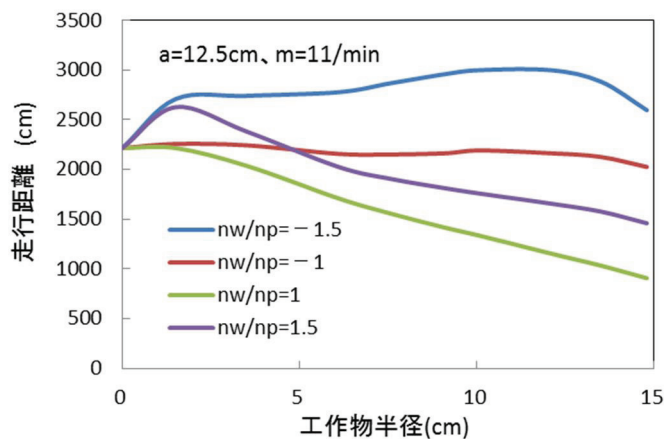


図 2-41 走行距離プロファイルの工作物/工具回転数比依存性

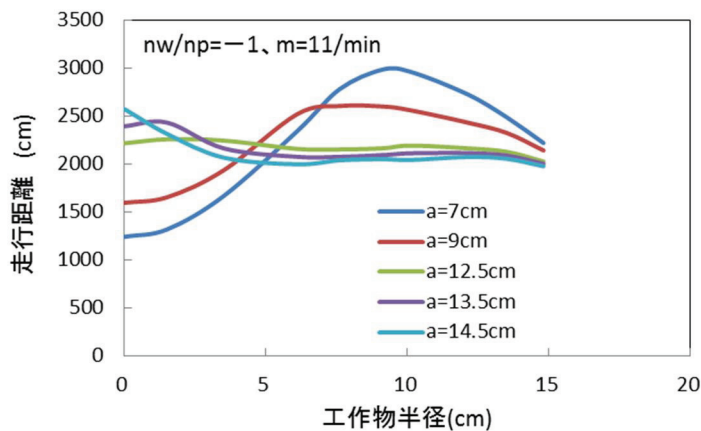


図 2-42 走行距離プロファイルの揺動振幅依存性

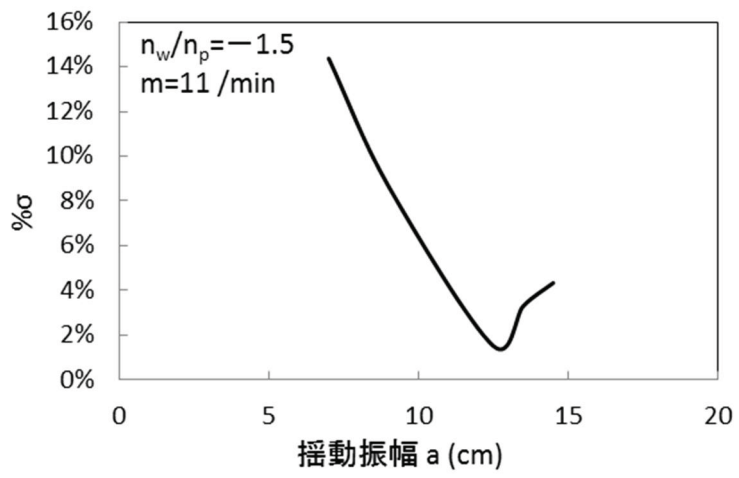


図 2-43 揺動振幅に対する工作物面内不均一性

2.3.5.2 小径工具による速度制御型装置

図 2-44 に小径工具による揺動速度制御型研磨装置の模式図を示す。小径工具による揺動速度制御型研磨装置は、工具径が工作物径より小さく、速度制御が複雑であるものが多い。ここでは、揺動関数を正弦関数とし、2.3.4.1 項の同径工具による速度制御型と同一の取り扱いをするものとした。ただし、外半径 $R_b=5\text{ cm}$ 、内半径 $R_a=1\text{ cm}$ の円環状工具を使用するものとし、走行距離や工作物面内不均一性が、研磨に関与しない工作物と工具のはみ出し領域にどのように影響されるかを解析するものとした。

図 2-45 に小径工具による揺動速度制御型研磨装置の工具と工作物の位置関係を示す。工作物中心を原点とする座標 $(L_x, 0)$ を揺動中心として、 X' 軸方向に揺動振幅 a で揺動する工具中心の運動を仮定した。

研磨ヘッド(工具)の揺動中心位置を L_x 、揺動振幅を a 、揺動回数を m とすると、工具中心を原点とする工具仮想座標系 (X, Y) での作物中心の運動関数 $(h(t), g(t))$ は 2.3.4.1 項と同様に次式で表される。

$$h(t) = -(a \cos(2\pi m t) + L_x) \quad \dots (2.33)$$

$$g(t) = 0 \quad \dots (2.34)$$

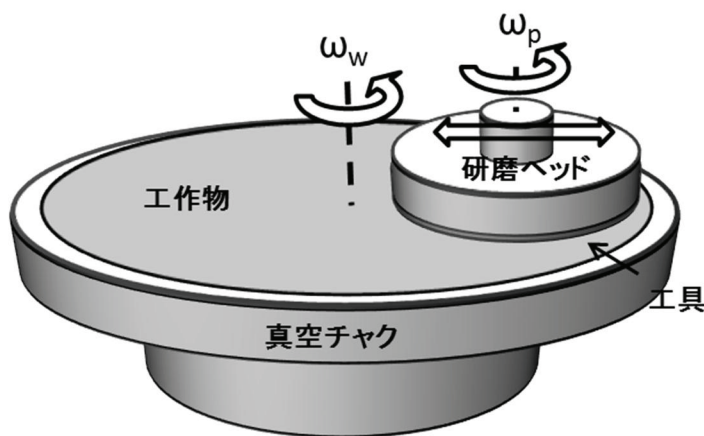


図 2.44 小径工具による速度制御型研磨装置の模式図

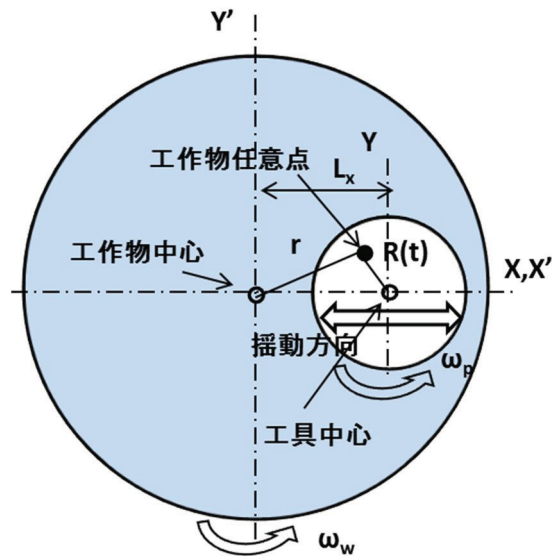


図 2.45 小径工具による速度制御型研磨装置の位置関係

以下に、表 2-7 に示す解析条件とパラメータで算出した研磨軌跡と走行距離プロファイルを示す。

図 2-46 に揺動中心位置 $L_x=10$ cm、揺動振幅 $a=6$ cm、揺動回数 $m=15$ /min、工作物回転数 $n_w=39$ rpm、工具回転数 $n_p=41$ rpm としたときの工作物の各点($r=0$ 、 $r=7.5$ cm、 $r=14$ cm)での工具面上の研磨軌跡を示す。図 2-46 に半径 5 cm と半径 1 cm の 2 つの円を示した。この円は外径 10cm、内径 2 cm の円環状工具を意味し、円環の内側と外側は研磨に関与しない工作物と工具のはみ出し領域である。研磨軌跡の殆どの部分は工具からはみ出し、走行距離は工具領域のみを積算して求めるため、工作物の半径方向の各点での走行距離は複雑に変化することが予想される。

表 2-7 小径工具による速度制御型研磨装置の
解析条件とパラメータ

揺動振幅 $a(\text{cm})$	6
揺動回数 $m(1/\text{min})$	15
揺動中心位置 $L_X(\text{cm})$	parameter
工作物半径 $R_w(\text{cm})$	15
工作物回転数 $n_w(\text{rpm})$	39
工具外半径 $R_b(\text{cm})$	5
工具内半径 $R_a(\text{cm})$	1
工具回転数 $n_p(\text{rpm})$	41
加工時間 $T(\text{min})$	1

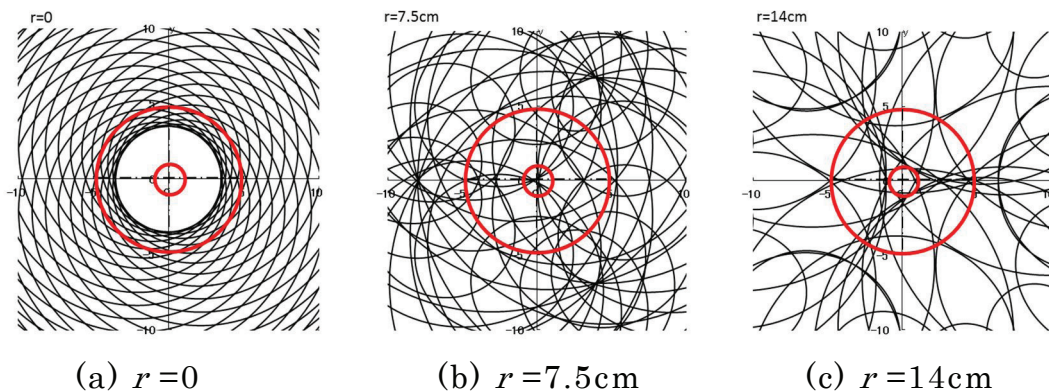


図 2-46 研磨軌跡例($a=6\text{cm}$ 、 $L_X=10\text{cm}$ 、 $n_w=39\text{rpm}$)

図 2-47 及び図 2-48 それぞれ、揺動振幅 $a=6\text{ cm}$ 、揺動回数 $m=15$ /min、工作物回転数 $n_w=39\text{ rpm}$ 、工具回転数 $n_p=41\text{ rpm}$ としたときの、走行距離プロファイルの揺動中心位置依存性と動中心位置に対する工作物面内不均一性を示す。図 2-47 は、揺動中心位置 $L_X=8.5\text{ cm}$ 、 9 cm 、 9.5 cm 、 10 cm の場合の走行距離プロファイルを示したもので、工作物半径に対する走行距離が脈動することを示す。図 2-48 は、揺動中心位置 $L_X=9.5\text{ cm}$ に工作物面内不均一性の極小値があり、極小値もせいぜい 5%程度であることを示す。工作物を均一に加工するためには、走

行距離プロファイルが均一となるように、揺動関数を検討することが重要である。

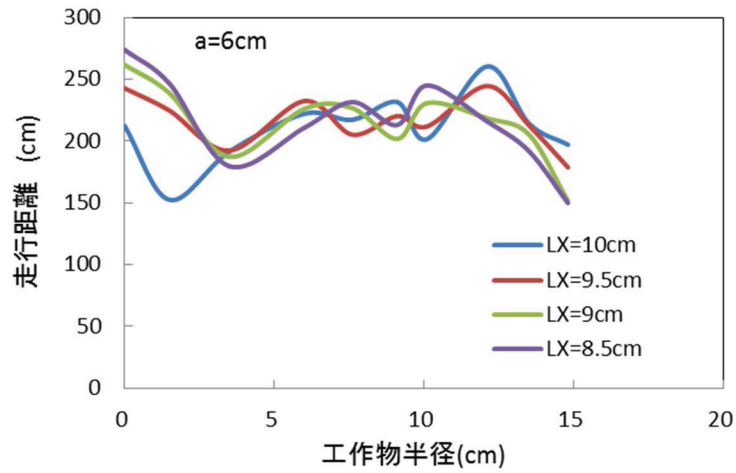


図 2-47 走行距離プロファイルの揺動中心位置依存性

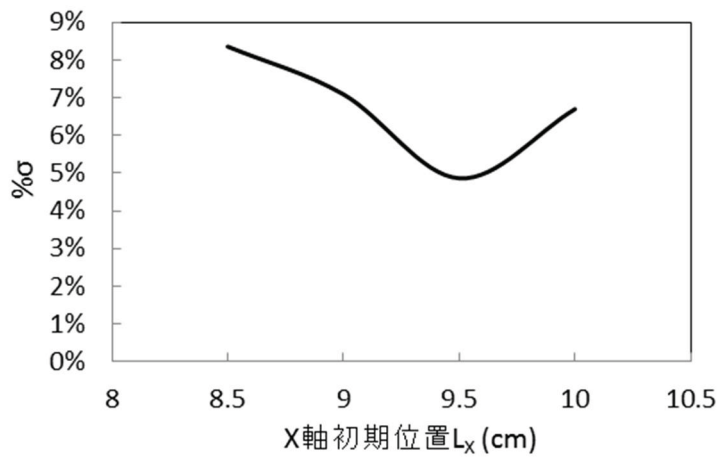


図 2-48 工作物面内不均一性と初期位置の関係

2.3.5.3 円環状工具による速度制御型研磨装置

円環状工具による速度制御型研磨装置は、これまで説明した研磨装置が圧力転写型の研磨装置であるのに対して、運動転写型の研磨機構に分類される研磨装置である。

図 2-49 に円環状工具による速度制御型研磨装置の模式図を示す。円環状工具による速度制御型研磨装置は円環状工具を工具の移動方向にわずかに傾けて、一定速度で工具を移動させる。工具を傾けて工作物に圧接させるため、工作物と工具の接触部分は実際の工具形状と異なり、円環状工具の外周部近傍の狭い範囲となる。十分な加工量(走行距離)を得るために、工具回転数が極端に大きく設定されるので、この装置の研磨機構は運動転写型の研磨機構に分類される。

図 2-50 に円環状工具による速度制御型研磨装置の工具と工作物の位置関係を示す。工具中心(研磨ヘッド軸)は工作物中心を原点とする座標系(X', Y')で初期位置 L_x を出発点とし、 X' 軸方向に一定速度 $V(t)$ で運動するものとした。

工具中心(研磨ヘッド軸)の運動を、 $X' = -V(t)t + L_x$ 、 $Y' = 0$ とすると、工具中心から観測した工作物中心の運動は、工具中心を原点とする工具仮想座標系(X, Y)に対して、 $X = -X' = -h(t)$ 、 $Y = -Y' = -g(t)$ の関数で表され、工作物中心の運動関数($h(t)$ 、 $g(t)$)は次式で表される。

$$h(t) = -(-V(t)t + L_x) \quad \dots (2.35)$$

$$g(t) = 0 \quad \dots (2.36)$$

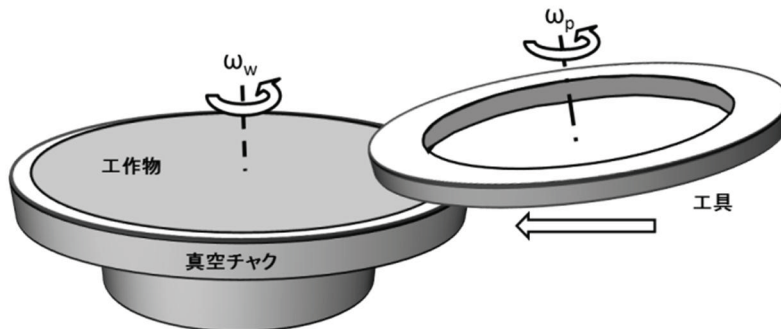


図 2-49 円環状工具による速度制御型研磨装置の模式図

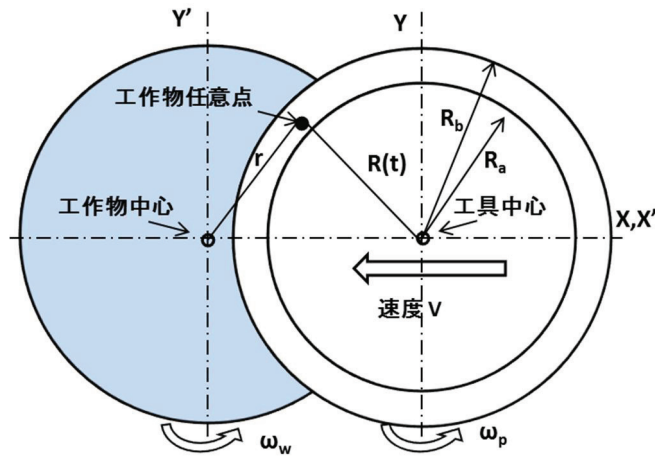


図 2-50 円環状工具による速度制御型研磨装置の位置関係

以下に、表 2-8 に示す解析条件とパラメータで算出した走行距離プロファイルを、また、研磨時間を変えて算出した研磨軌跡を示す。実際の工具は、工具外半径 15 cm の場合、工具内半径が 12 cm 程度であるが、工具の傾きを加味した工作物との接触領域を 0.5 cm と仮定して、工具内半径を 14.5 cm として算出した。また、工具移動速度は一定速度とした。

表 2-8 円環状工具による速度制御型研磨装置の解析条件とパラメータ

工具速度 $V(\text{cm/sec})$	parameter
初期 X 位置 $L_X(\text{cm})$	30
工具回転数 $n_p(\text{rpm})$	200
工作物回転数 $n_w(\text{rpm})$	parameter
工具外半径 $R_b(\text{cm})$	15
工具内半径 $R_a(\text{cm})$	14.5
工作物半径 $R_w(\text{cm})$	15
加工時間 $T(\text{min})$	1

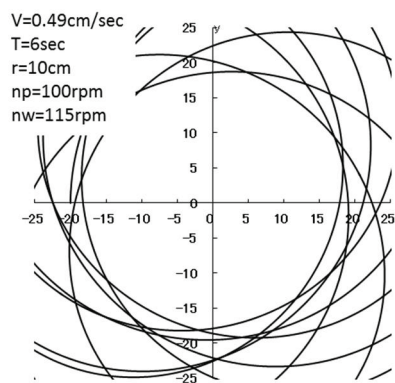
図 2-51 に、工具移動速度 $V=0.49$ cm/sec、初期 X 位置 $L_x=30$ cm、工具回転数 $n_p=100$ rpm、工作物回転数 $n_w=115$ rpm とし、加工時間 $T=6$ sec、12 sec、24 sec、36 sec としたときの工作物半径 $r=10$ cm の点の研磨軌跡を示す。図 2-51(a)に、工具の外周端が研磨時間 $T=6$ sec 間で工作物の外周から内側に 2.9 cm 移動したときの研磨軌跡を示す。図 2-51(b)は、工具の外周端が研磨時間 $T=12$ sec 間で移動距離 5.9 cm、図 2-51(c)は加工時間 $T=24$ sec 間で移動距離 11.8 cm、また、図 2-51(d)は加工時間 $T=36$ sec 間で移動距離 17.68 cm を移動したときの研磨軌跡を示したものである。図 2-47 より、工作物半径 $r=10$ cm の点の研磨軌跡が加工時間の経過とともに伸長し、密集していく様子が分かる。

図 2-52 に、工具移動速度 $V=0.43$ cm/sec、初期 X 位置 $L_x=30$ cm、工具回転数 $n_p=200$ rpm、加工時間 $T=1$ min としたときの走行距離プロフィールの工作物回転数 n_w の依存性を示す。工作物は 300 mm ϕ ウエハを想定した。加工時間 $T=1$ min 間に、工具の外周端の移動距離は工作物の外周から内側に 25.8 cm であり、工具の外周端は 300 mm ϕ ウエハの径方向の全径を移動するものではない。図 2-52 は、工作物回転数 $n_w=214$ rpm、216 rpm、218 rpm のときの走行距離プロフィールと面内不均一性% σ の算出結果とを示すもので、 $n_w=216$ rpm のときの走行距離プロフィールの直線性が最もよいことを示す。 $n_w=216$ rpm のときの走行距離の工作物面内不均一性は 1.46% である。

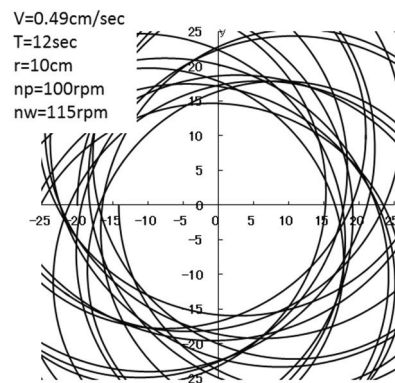
図 2-53 に初期 X 位置 $L_x=30$ cm、工具回転数 $n_p=200$ rpm、工作物回転数 $n_w=216$ rpm、加工時間 $T=1$ min としたときの走行距離プロフィールの工具移動速度依存性を示す。図 2-53 は、工具移動速度 $V=0.41$ cm/sec、0.43 cm/sec、0.46 cm/sec、0.49 cm/sec のときの走行距離プロフィールと面内不均一性% σ の算出結果を示すもので、工具の外周端の移動距離は工作物の外周から内側にそれぞれ、24.6 cm、25.8 cm、27.6 cm、29.4 cm である。工具移動速度 $V=0.49$ cm/sec では、300 mm ϕ ウエハの直径のほぼ全径を横切って移動する。図 2-53 は、工具移動速度 $V=0.43$ cm/sec、0.46 cm/sec、0.49 cm/sec のときの面内不均一性

が 1.5%以下であり、均一性の良好な加工が予測できるが、工具移動速度によって、走行距離プロファイルの脈動パターンが異なることを示す。

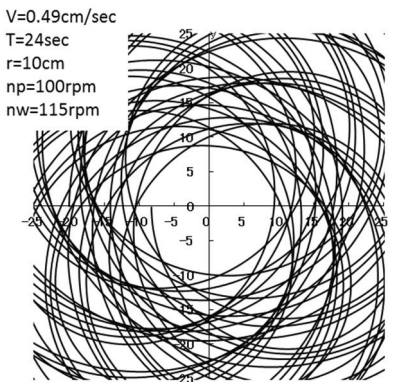
ドーナツ状工具による速度制御型研磨装置では、工具と工作物との接触領域が少なく、工具回転数 n_p 、工作物回転数 n_w や工具移動速度 V などの加工条件のわずかな変化で走行距離プロファイルが変化する特徴がある。



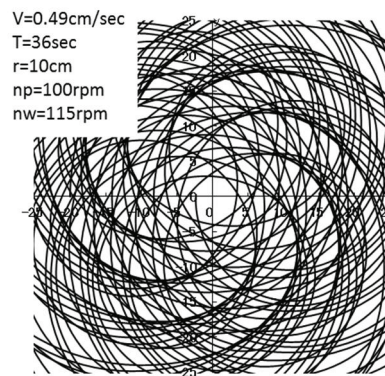
(a) $T=6$ sec



(b) $T=12$ sec



(c) $T=24$ sec



(d) $T=36$ sec

図 2-51 工具半径 $r=10$ cm の点の研磨軌跡

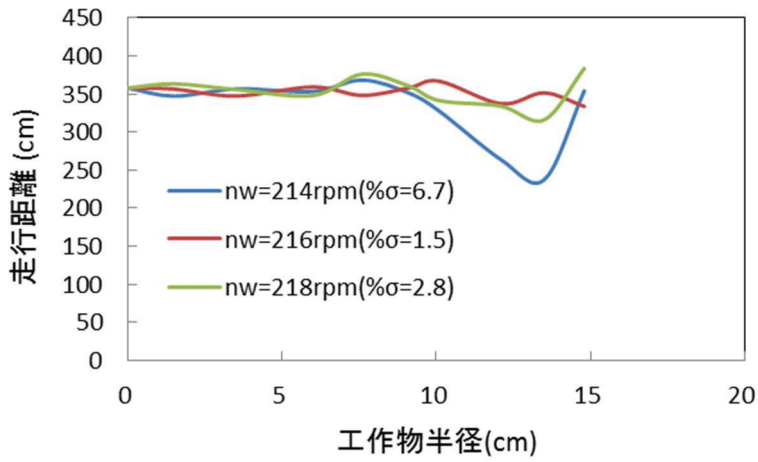


図 2-52 走行距離プロファイルの工作物回転数の依存性

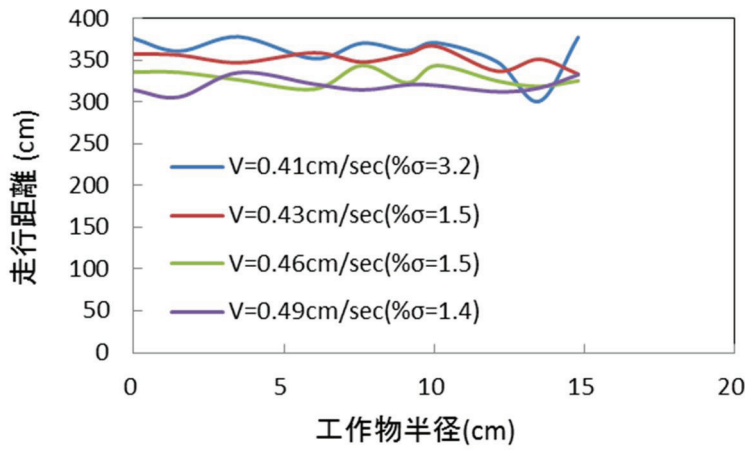


図 2-53 走行距離プロファイルの工具速度依存性

2.4 まとめ

半導体ウエハなどの工作物の1点が工具面上を描く軌跡から算出される研磨走行距離に着目し、研磨走行距離プロファイルと、工具や工作物の弾性変形による加工圧力分布を考慮した加工量の解析手法を示した。また、代表的な研磨装置の研磨ヘッド部とパッド定盤の運動機構に着目した運動解析例を示した。

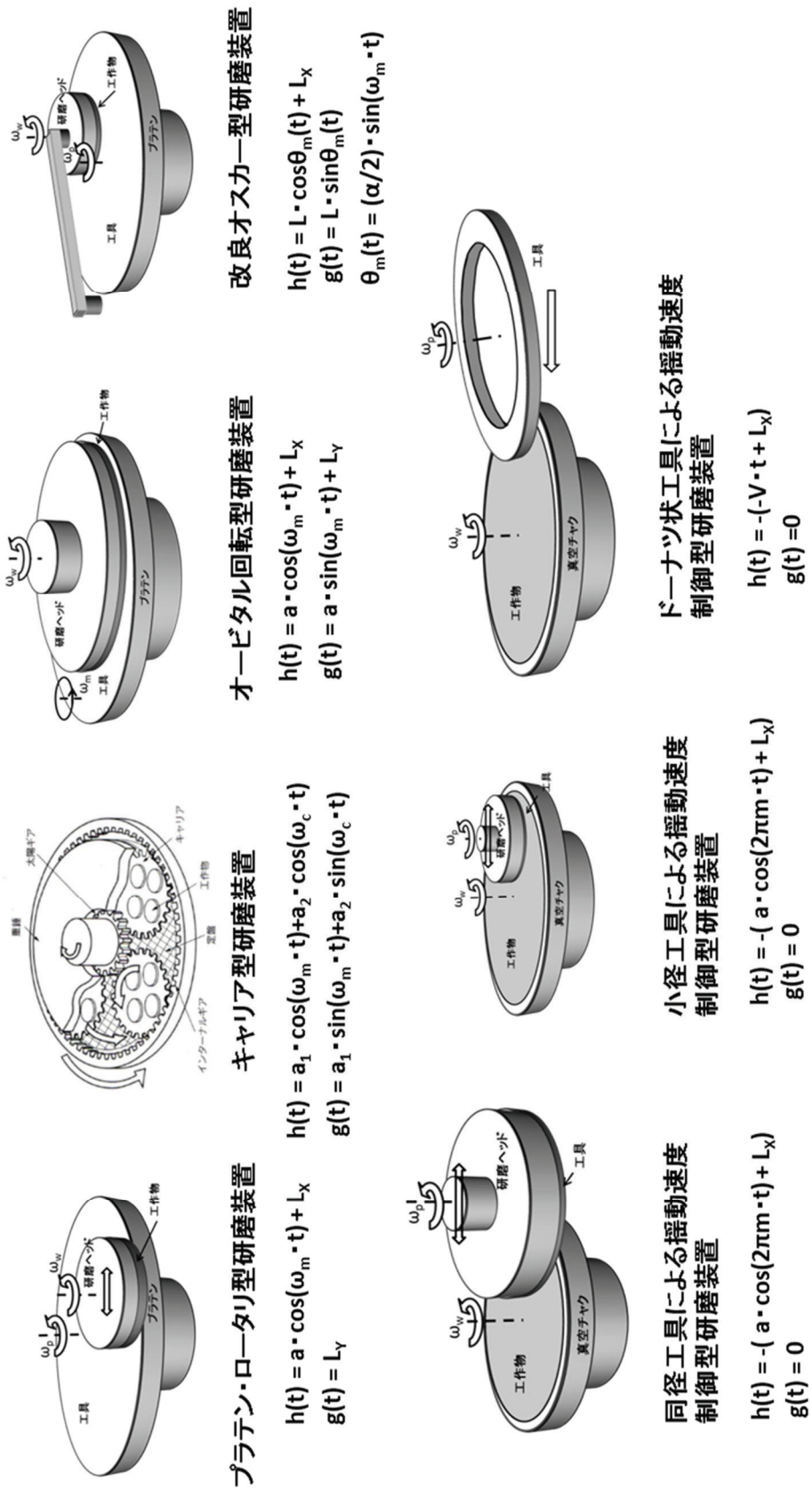
2.2節では、工具面上を工作物の任意点が描く研磨軌跡を求める一般式を示し、研磨加工に関与しない工具と工作物のはみ出し領域を除外した研磨走行距離と、工具や工作物の弾性変形による加工圧力分布を結合させた加工量の解析方法を示した。この解析方法の手順は、まず、工具の弾性変形による圧力変化が無視できる程度の微小加工時間 Δt を設定し、微小加工時間 Δt で算出した走行距離プロファイルから求まる工作物の形状変化を用いて、工具の弾性変形による圧力変化を検討する。次いで、目的とする加工時間まで微小加工時間 Δt の加工量の算出を繰り返すことで、目的の加工時間までの加工量プロファイルを求める手順である。

2.3節では、Down face型研磨装置とUp face型研磨装置の代表的な研磨装置に研磨軌跡と研磨走行距離を求める一般式を適用し、研磨軌跡の分散状態と走行距離プロファイル(工作物の径方向に対する走行距離)を算出し、加工条件と加工均一性との関係を検討した。

本手法によれば、複雑な運動機構を有する各種の研磨装置の運動解析を、研磨ヘッドの運動関数を入れ替えることで、統一的な手法で均一研磨加工の予測が行える。しかも、パソコンに搭載されている汎用表計算ソフトを利用することができるので、研磨加工の現場で各種の研磨装置の運動解析を容易に行える利点がある。

図2-54に各種研磨装置と研磨ヘッドの運動関数をまとめて示した。また、本論文の末尾に、代表的な研磨装置の研磨軌跡の時間経過の算出例を参考資料として示した。

図2.54 各種装置と研磨ヘッドの運動関数



第 2 章の参考文献

- [1] 安永暢男、高木純一郎、“精密機械加工の原理”、日刊工業新聞社、初版第 1 版発行(2011) p.161
- [2] 土肥俊郎編著、“詳説半導体 CMP 技術”、工業調査会、(2001) pp.39-60
- [3] 社団法人日本機械学会、“生産加工の原理”、日刊工業新聞社、初版第 1 版発行(1998) pp.158-159
- [4] 宇根淳暢、河西敏雄、“研磨加工の理論と計算手法”、日刊工業新聞社、初版第 1 版発行(2010) pp.44-78
- [5] 土肥俊郎編著、“詳説半導体 CMP 技術”、工業調査会、(2001) p.52
- [6] 宇根淳暢、河西敏雄、“研磨加工の理論と計算手法”、日刊工業新聞社、初版第 1 版発行(2010) p.63
- [7] 土肥俊郎、中川威雄、河西敏雄、電子情報通信学会春季全国大会論文集 C-529 (1991)
- [8] 宇根淳暢、河西敏雄、“研磨加工の理論と計算手法”、日刊工業新聞社、初版第 1 版発行(2010) pp.44-51
- [9] 特許公報、特許第 4858798、“研磨装置、研磨方法およびこの研磨装置を用いた半導体デバイス製造方法”、(株)ニコン
- [10] 木村景一、1999 年度精密工学会秋季大会論文集、p.245 (1999)
- [11] 竹内芳美編、“機械工学ハンドブック”、朝倉書店、(2006) p.220
- [12] 安永暢夫、高木純一郎、“精密機械加工の原理”、日刊工業新聞社、初版第 1 版発行(2011) pp.185-186
- [13] 宇根淳暢、河西敏雄、“研磨加工の理論と計算手法”、日刊工業新聞社、初版第 1 版発行(2010) pp.84-85

第 3 章

パッドコンディショニングにおける

均一加工の研究

3.1 緒言

平坦化 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術は、半導体デバイスのプロセス技術のうち、多層配線プロセスや素子分離プロセスに欠かせない技術である。それ故、様々な凹凸のあるパターンをウエハレベルでサブミクロン以下に均一、平坦に加工することが要求され、加工の再現性や加工能率の要求も高い。平坦化 CMP の加工主要部は、研磨パッドを貼付した定盤(プラテン)とウエハを保持した研磨ヘッドで構成されるが、研磨パッドの加工能力を維持して再現性の高い加工をするためには、パッドコンディショニング部とその制御機構も重要な構成要素である。

パッドコンディショニングは、研磨パッドから研磨残渣や反応生成物を取り除き、パッド表面の圧縮変形部の削除や起毛状態などのパッド表面の品質を安定した状態に維持することを目的としている。キャリア型両面研磨装置に外径 300 mm ϕ の両面型のコンディショナを使用した場合のパッド研削結果の検討が報告[1]されているが、一般的には、片面をダイヤモンド砥粒でコートした外径 100 mm ϕ のディスク型コンディショナやリング型コンディショナが使用され、コンディショナの数倍の外径の研磨パッド全面に揺動(sweep)させながら水平方向の速度を変化させて研磨パッドの厚さを均一に研削する必要がある。このため、コンディショナを研磨パッドの半径方向のすべてにわたって均一軌跡となるような運動をさせなければならない。しかし、均一軌跡となるようなコンディショナの運動を実現するためには、実験や経験によってコンディショナの運動を最適化する必要があった。

また、コンディショナの外径を研磨パッドの半径程度に大きくして、コンディショナを偏心位置で固定して回転させる固定コンディショニング法では、研磨パッドが内径方向に傾斜して加工され、また、使用するコンディショナの形状によって加工される傾斜角が異なる現象が生じる。

本章では、固定コンディショニング法における研磨パッドの加工現

象を解明するため、研磨走行距離を用いた加工解析と研磨パッド加工実験結果を比較し、加工実験から得られた加工量プロファイルと研磨走行距離プロファイルから検討する。また、研磨パッド表面の均一加工を実現するために、直線揺動型のパッドコンディショニング法の速度制御法を検討する。

3.2 節では、第 2 章で述べた研磨走行距離を用いた加工量の解析手法を、固定コンディショニング法における研磨パッドの加工解析に応用し、使用するコンディショナの形状によって異なる傾斜角が生じる加工現象を研磨走行距離プロファイルから解明する。また、卓上片面研磨機を使用した研磨パッドの加工実験結果と解析結果を比較して、研磨走行距離を用いた加工量の解析手法の妥当性を評価する。

3.3 節では、プラテン・ロータリ型研磨装置に使用される直線揺動コンディショニング機構の課題を整理し、直線揺動型のパッドコンディショニング法の速度制御法として、揺動関数を走行距離プロファイルから調整する方法を検討し、検討した調整方法をパッドコンディショニング実験により評価する。

3.2 コンデッショナによるパッド加工量の解析

本節では、パッドコンディショニングにおけるパッド加工現象を解明するため、パッド加工量の理論解析結果とパッド加工実験結果を比較する。

パッドコンディショニングは、一枚の研磨パッドを断続的に長時間加工するため、平坦化 CMP によるウエハ平坦化加工とは異なり、パッドコンディショニングの加工均一性は、コンディショニング前のパッドの表面形状に大きく影響される。パッドコンディショニングは研磨パッドの寿命まで継続して行われ、研磨パッドの加工量は数百 μm から場合によっては数 mm にも及ぶ。このため、研磨パッドの表面形状が不均一になるとコンデッショナとパッド表面の圧力分布がその後の加工均一性を支配することとなる。

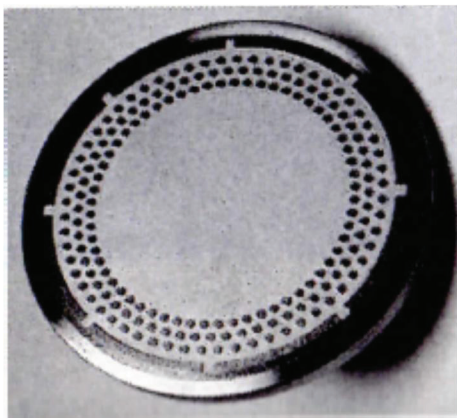
加工時間が長時間に及ぶ場合の工作物の半径 r の点の研磨による加工量 $H_n(r)$ は、圧力変化が無視できる程度の微小加工時間 Δt で加工時間 $n \Delta t$ まで加工したとき加工量とし、次式で表される。

$$H_n(r) = H_{n-1}(r) + \alpha P_0 (1 + E \Delta h_{n-1} / P_0) L(r) \cdots (2.17)$$

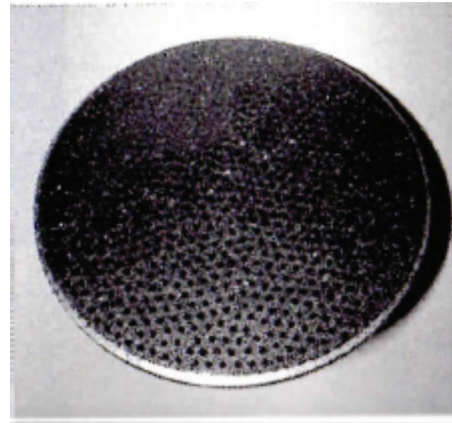
ここで、 α は圧力を含む比例定数、 E は工具の相対弾性定数、 P_0 は平均研磨圧、 $H_{n-1}(r)$ は $(n-1) \Delta t$ までの加工量、 Δh_{n-1} は工作物厚さと工作物の平均厚さの差、 $L(r)$ は半径 r の点の研磨走行距離(以下走行距離という)である。

パッドコンディショニングでは、工作物は研磨パッドであり、工具にはコンデッショナを使用する。コンデッショナは、一般的には円形の金属製の台座表面に人工ダイヤモンド粒子を配列して作製され、配列形状が台座全面に均等配列したものを本節では、ディスク型と呼ぶ。また、台座の外周部に幅を持たせて配列したものをリング型と呼ぶ。図 3-1 にリング型とディスク型の外観写真の例[2]を示す。コンデッショナが工具として作用する領域は人工ダイヤモンドが配列された領域

である。人工ダイヤモンドには、ブロッキー形状からイレギュラーまで様々であり、使用される粒径も様々で研削後のパッド表面の微細形状が異なるが、研削能力は、コンディショナの回転数や研削圧力で制御するのが一般的である。



(a) リング型



(b) ディスク型

図 3-1 リング型とディスク型コンディショナの外観写真の例

本節では、固定コンデッショニングによる加工解析として、(2.17)式で表される加工量をリング型とディスク型のコンディショナについて算出し、算出結果を、卓上片面研磨機を使用したパッド加工実験結果と比較して評価した。

3.2.1 解析方法と解析結果

(1) 走行距離プロファイルの算出

パッド半径 r の点の研磨走行距離は、コンディショナ面に描くパッド半径 r の点の研磨軌跡の総長として求めることができる。図 3-2 に固定コンデッショニングの位置関係を示す。図 3-2 はリング型のコンディショナの例を示したが、ディスク型の場合は、コンディショナの内径 d をゼロとすればよい。図 3-2 に示す O_w はパッドの中心点、 O_p はコンディショナの中心点である。パッドは O_w を軸として回転角速

度 ω_p で回転し、コンディショナは O_w から L_x の距離の偏心位置で O_p を軸として回転角速度 ω_p で回転するものとする。コンディショナは偏心位置に固定されているため、研磨ヘッド軸の運動関数は、 $h(t)=L_x$ 、 $g(t)=0$ となる。

パッドの任意点をコンディショナの中心点 O_p を原点とする座標系 (x,y) で表すと 2.2.2 節と同式で表されるが以下にまとめて示す。

$$x(t) = R(t) \cos[\theta(t) - \omega_p t] \quad \dots (2.5)$$

$$y(t) = R(t) \sin[\theta(t) - \omega_p t] \quad \dots (2.6)$$

ただし、 $R(t)$ 、 $\theta(t)$ は次式で表される。

$$R(t) = (X(t)^2 + Y(t)^2)^{1/2} \quad \dots (2.3)$$

$$\theta(t) = \cos^{-1}[X(t)/R(t)] \quad \dots (2.4)$$

また、 $X(t)$ 、 $Y(t)$ は次式で表される。

$$X(t) = r \cos(\omega_w t) - L_x \quad \dots (3.1)$$

$$Y(t) = r \sin(\omega_w t) \quad \dots (3.2)$$

走行距離は、(2.5)式及び(2.6)式より算出した加工時間 T までの研磨軌跡の総長さとし(2.14)式より求める。

$$\begin{aligned} L(r) &= \int_0^T v(r,t) dt \\ &= \sum_{k=0}^n \delta L_k = \sum_{k=0}^n [(\delta x_k)^2 + (\delta y_k)^2]^{1/2} \quad \dots (2.14) \end{aligned}$$

ただし、コンディショナの中心点 O_p から研磨パッドの任意点までの距離を $R(t)$ とすると、ディスク型コンディショナの場合、 $R(t) > D$ のとき $\delta L=0$ とし、リング型コンディショナの場合、 $R(t) > D$ 及び $R(t) < d$ のとき $\delta L_k=0$ とし、加工に関与しない工作物であるパッドとコンデ

イショナのはみ出し領域を走行距離から除外することができる。

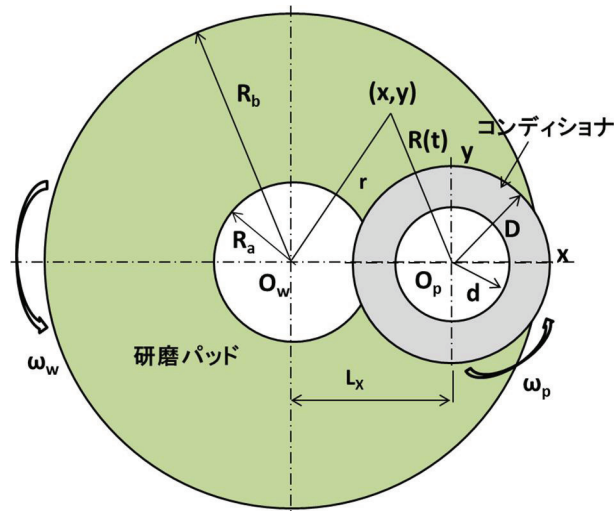


図 3.2 固定コンディショニングの位置関係

表 3-1 に走行距離の算出条件を示す。コンディショナの内径を除いてディスク型とリング型で同一条件である。

図 3-3 にディスク型とリング型について算出した加工時間 1 分間の走行距離プロファイルの算出結果を示す。ディスク型コンディショナでの走行距離プロファイルはパッド中央部($r=8$ cm)で極大をもつ凸形状を示すが、リング型コンディショナではリング内径に相当する部分で走行距離が減少し、ディスク型とは逆に凹形状を示す。

表 3-1 走行距離の算出条件

	ディスク型	リング型
パッド回転数 n_w (rpm)	60	60
コンディショナ回転数 n_p (rpm)	59	59
偏心位置 L_x (cm)	80	80
コンディショナ外径 D (cm)	10	10
コンディショナ内径 d (cm)	0	6
コンディショニング時間 T (min)	1	1

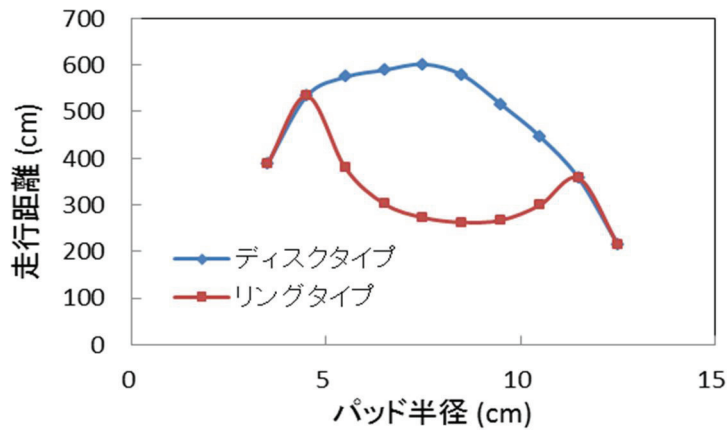


図 3-3 1 分間当たりの走行距離プロファイルの算出結果

(2) パッド加工量の解析

工作物であるパッド半径 r の点の加工量は、長時間の加工によって工作物表面が曲面を持つ場、(2.17)式に示すように圧力変化が無視できる程度の微小研磨時間 Δt の走行距離プロファイルを利用して、工作物表面の変形による圧力を考慮する。

$$H_n(r) = H_{n-1}(r) + \alpha P_0 (1 + E \Delta h_n / P_0) L(r) \quad \dots (2.17)$$

ここで、 α は Preston の式の比例定数であり、 P_0 は加工圧力である。また、 $H_{n-1}(r)$ は $n-1$ 回目の加工量であり、 Δh_n は $n-1$ 回目の計算で得られた平均加工量と加工量の差である。

コンディショナが研磨加工によってパッド表面の曲面によって傾く場合は、パッド表面の傾きに従って加工量の差 Δh_n を補正する必要がある。補正を β_n とすると、次式で表される。

$$\beta_n = (\check{r} - r) \tan \gamma_n \quad \dots (3.3)$$

ここで $\tan \gamma_n$ は $n-1$ 回目の加工量によるパッドの傾きであり、 \check{r} はパッド中心からパッド中央部までの距離でパッドの外半径と内半径の差の $1/2$ の値である。(2.17)式はパッド傾きを考慮した場合には次式に

変形される。

$$H_n(r) = H_{n-1}(r) + \alpha P_0 (1 + E(\beta_n + \Delta h_n)/P_0) L(r) \cdots (3.4)$$

図 3-4 にパッドとコンディショナの z 方向の位置関係を示す。図 3-4(a)は、コンディショナが傾斜しない場合の状態を示すもので、図 3-4(b)は重錘などで加圧されるときコンディショナが傾斜する場合の状態を示すものである。図 3-4(b)はパッド半径 r の点の傾斜による補正値 β を説明するものである。

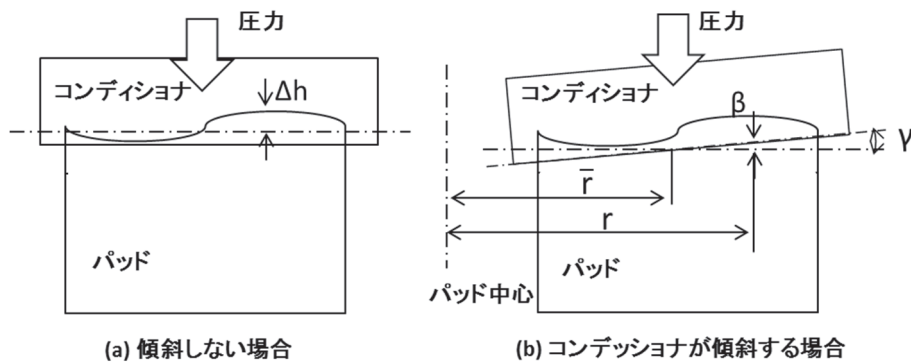


図 3-4 パッドとコンディショナの z 方向の位置関係

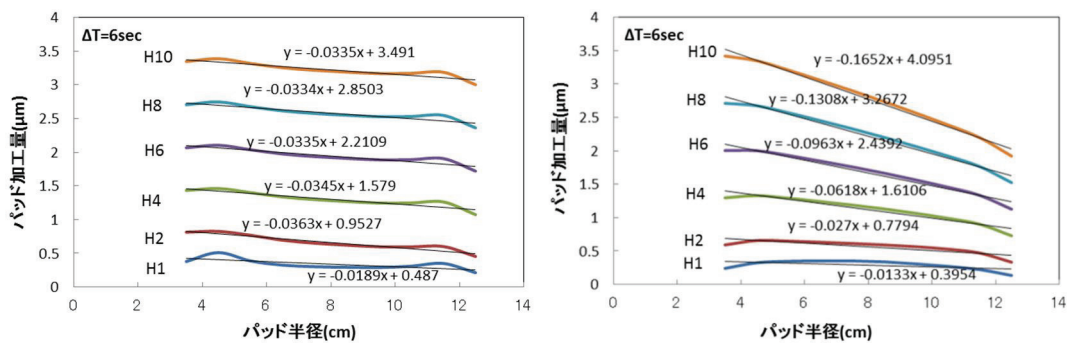
図 3-5 に(3.4)式より求めた加工時間 1 分間のパッド加工量プロファイルの時間変化の解析結果を示す。解析条件を表 3-2 に示す。表 3-2 の相対弾性定数 E はパッドの相対弾性定数を使用し、市販のウレタンパッドの相対弾性定数が $2.45(\text{kPa}/\mu\text{m})$ 程度であり、本節で対象とするパッドの圧縮が市販のウレタンパッドの 0.25 倍であることより求めた。また、 αP_0 は予備試験により求めた値である

図 3-5 は、微小加工時間 Δt を 6 秒間とし、(3.4)式を 10 回繰り返して算出して加工量プロファイルを示した。図に示す記号 H_n は加工時間 $n \Delta t$ のときの加工量プロファイルであり、図 3-5 に示す一次式は加工量の直線近似式である。図 3-5(a)にリング型コンディショナの場合について、図 3-5(b)にディスク型コンディショナの場合について得られた解析結果を示す。図 3-5 は、リング型、ディスク型ともに、 H_1 による

加工量プロファイルの傾き(H_1 は6秒間の走行距離と αP_0 の積)が加工時間の経過とともに増加する様子を示している。特に、ディスク型の加工量プロファイルの傾きの増加がリング型より大きい。これはコンディショナの形状による走行距離プロファイルの2つの極小点を結ぶ傾きの相違によるものである。6秒間の走行距離プロファイルの形状は、図3-3に示す1分間当たりの走行距離プロファイルの形状と同形であり、2つの極小点を結ぶ傾きの相違はわずかであるが、図3-5は加工時間の経過によって増幅されることを示している。コンディショナが強制的に保持されて傾かない場合のパッド加工量の解析結果を参考として図3-6に示す。パッド加工量プロファイルは走行距離プロファイルの影響を受けるが、加工時間の経過にともなって走行距離プロファイルの影響が少なくなることを示し、パッド加工量の傾斜がわずかに残ることを示す。

表 3-2 パッド加工量の解析条件

	ディスク型	リング型
微小加工時間 ΔT (sec)	6	6
加工圧力 P_0 (kPa)	2.15	2.78
加工速度 (μ m/min)	3.45	3.34
αP_0 (μ m/cm)	0.0061	0.0096
相対弾性定数 E (kPa/ μ m)	9.8	



(a)リング型

(b)ディスク型

図 3-5 パッド加工量プロファイルの時間変化

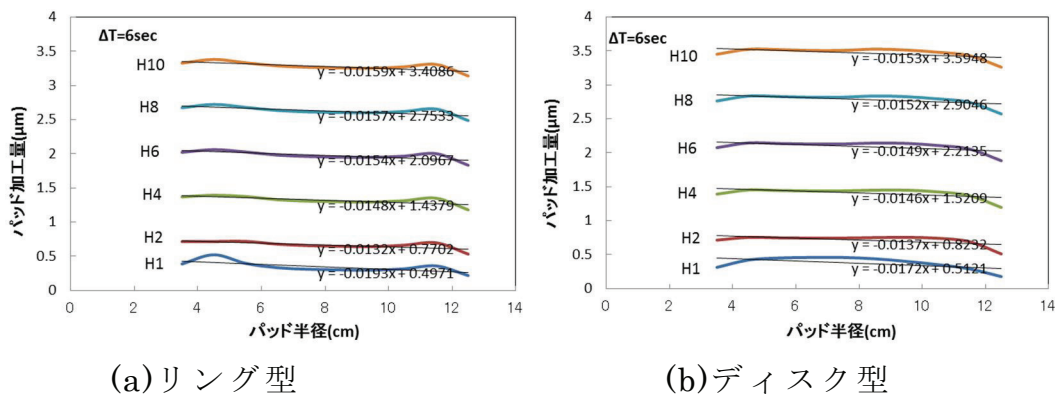


図 3-6 パッド加工量プロファイルの時間変化の比較例
(強制保持され、のときコンディショナが傾かない場合)

3.2.2 コンディショナによるパッド加工実験

前節で述べたパッドコンディショニングの解析結果を評価するため、コンディショナの回転軸を工作物であるパッドの回転軸位置から偏心させて軸の運動を停止させた、固定コンディショニング法によるパッドの加工厚みプロファイルを測定した。コンディショニング実験には卓上片面研磨機(ナノファクタ社製 NF300 型)を使用した。卓上片面研磨機は上向きに回転する径 300 mm φ の定盤に研磨パッドを貼付し、定盤の偏心位置に工作物を固定した研磨ヘッドを加圧しながら対向させて回転させ、研磨液を研磨パッド面に供給しながら工作物を研磨する研磨機である。

図 3-7 に実験に使用した卓上片面研磨機の模式図を示す。コンディショニング実験では、研磨ヘッドにコンディショナを固定し、パッドの中心位置から 80 mm の位置で加圧しながら自転させてパッドを加工した。加工液には純水を使用し、一定供給速度 10 ml/min をパッド面上、コンディショナの前面に供給した。パッドには外径 250 mm φ、内径 70 mm φ の円環状固定砥粒研磨パッドを使用し、コンディショナには外径 100 mm φ のディスク型と外径 100 mm、内径 60 mm φ のリング型コンディショナを使用した。コンディショニング時間を 180 分

間とし、60 分間ごとにコンディショニングを中断してダイヤル式マイクロメータを用いてパッド半径方向のパッド厚さ分布を測定した。実験で使用したおもなコンディショニング条件を表 3-3 に示す。表 3-3 に示すコンディショニング条件は、前節で使用した解析条件と同一である。実験に使用したパッドはセリア砥粒を合成樹脂で固定した固定砥粒パッドで、市販の発泡ウレタンパッドと比較して相対弾性定数が 4 倍ほど大きい。

表 3-3 コンディショニング条件

パッド	固定砥粒研磨パッド
パッド寸法	外径 250mm ϕ 、内径 70mm ϕ
コンディショナ	100mm ϕ 、ディスク型 100-60mm ϕ 、リング型
コンディショナ圧力	ディスク型 2.15kPa リング型 2.78kPa
パッド回転数	60rpm
コンディショナ回転数	59rpm
加工時間	60min、120min、180min
加工液(スラリー)	純水
加工液供給速度	10ml/min

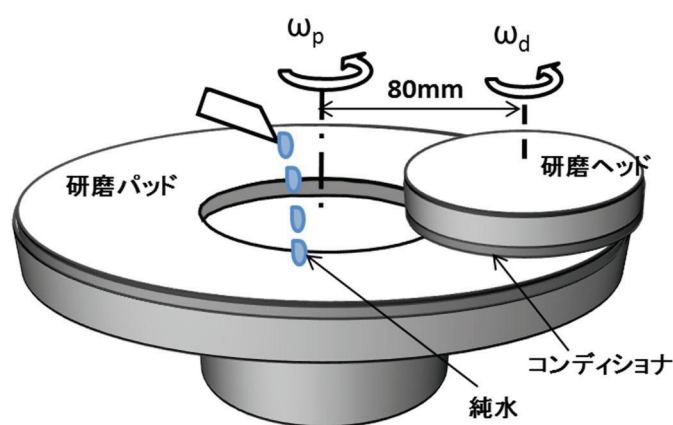


図 3-7 卓上片面研磨機の模式図

図 3-8 及び図 3-9 にそれぞれディスク型とリング型コンディショナを使用したときの、パッド半径方向の厚さプロファイルの経時変化を示す。図 3-8 及び図 3-9 は、ディスク型、リング型ともにコンディショニングの時間経過に伴ってパッド内周部の加工量が増加して、パッド中央が凹状の傾斜形に加工されることを示している。これは、研磨ヘッドが自転軸に対してクリアランスを有する(傾くことができる)ため、コンディショナが加工量に応じて傾いて加圧されるためである。ディスク型コンディショナを使用した場合は、リング型を使用した場合と比較して凹状に加工される傾向が顕著であった。

図 3-10 および図 3-11 にそれぞれディスク型とリング型を使用したときの、研磨パッドの厚さ変化から求めたパッド除去速度プロファイルを示す。図 3-10 は、ディスク型を使用したときの除去速度プロファイルの経時変化を示したもので、コンディショニング時間の経過とともに各測定点の除去速度は増加傾向を示し、除去速度プロファイルがパッド内周部ほど速く、半径に対して直線的な傾斜プロファイルへと変化する様子を示す。図 3-11 は、リング型を使用したときの除去速度プロファイルの経時変化を示したもので、コンディショニング時間に対して各測定点の除去速度は増加傾向を示すが、除去速度の変化量は少なく、ディスク型の除去速度プロファイルと比較すると、傾斜傾向が少ないことを示している。

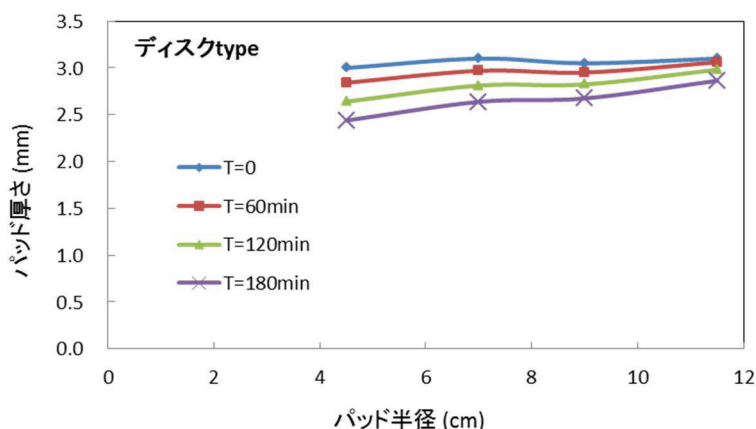


図 3-8 ディスク型によるパッド厚さプロファイルの経時変化

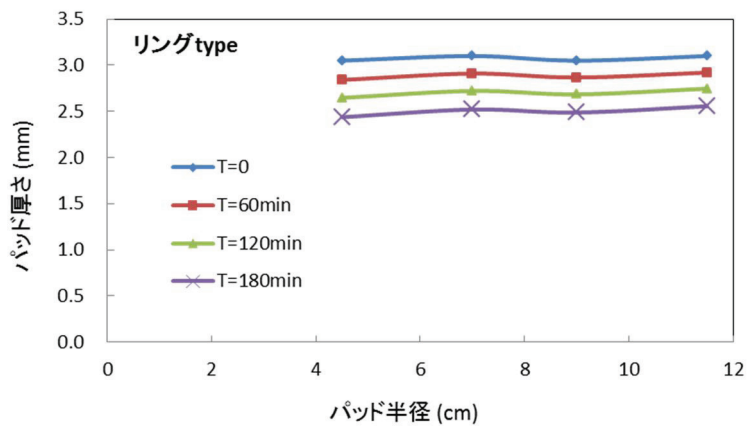


図 3-9 リング型によるパッド厚さプロファイルの経時変化

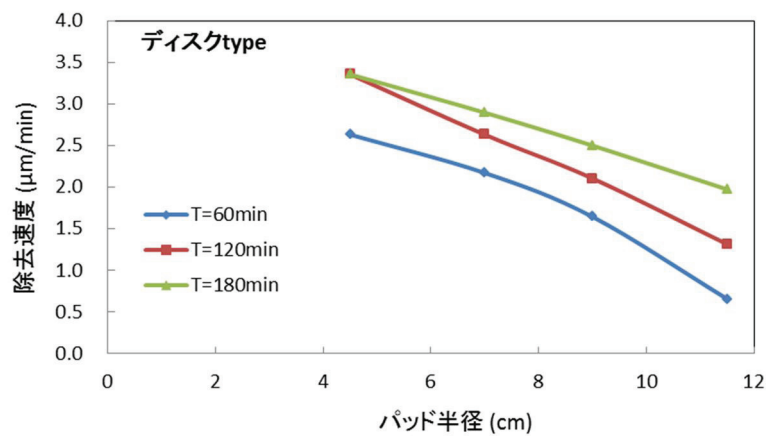


図 3-10 ディスク型によるパッド除去速度プロファイルの経時変化

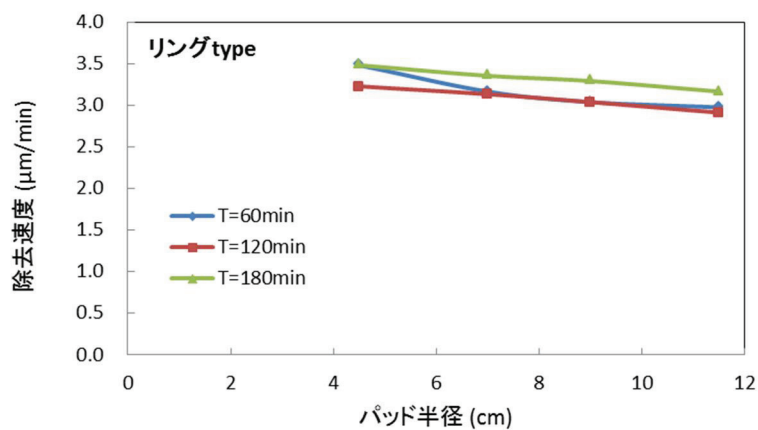


図 3-11 リング型によるパッド除去速度プロファイルの経時変化

3.2.3 パッド加工実験結果の検討

図 3-12 にコンディショナによるパッド加工速度の測定値と解析結果(算出値)の比較を示す。コンディショナによる加工速度の測定値は、加工時間 60 分間、120 分間及び 180 分間の加工速度平均値とした。また、加工速度の算出値は、加工時間 1 分間の加工量 H_{10} の一次近似式(従って加工速度である)とした。図 3-12 に示す実線はリング型及びディスク型コンディショナによる加工実験結果を示すもので、破線はそれぞれの算出値を示す。加工実験結果と算出値によい一致が見られる。パッドコンディショニングでは、コンディショナの幾何形状が異なるだけで他の条件は同一であるのに対し、パッド加工速度プロファイルが大きく異なった。この相違は、コンディショナの幾何形状で決まる走行距離プロファイルの相違によるもので、特にコンディショナがパッドの形状に合わせて傾く場合、走行距離プロファイルの 2 つの極小点を通る傾斜に従って傾き、加工時間の経過とともに傾きが増加することによって生じるものと判断される。走行距離の 2 つの極小点は、図 3-3 に示す 1 分間当たりの走行距離プロファイルの算出結果からも分かるように、ディスク型ではパッド外半径の点($r=12.5$ cm)とパッド内半径の点($r=3.5$ cm)であり、リング型ではパッド外半径の点($r=12.5$ cm)とパッド幅のほぼ中央部の点($r=8$ cm)である。これら 2 つの極小点を通る傾斜がディスク型とリング型で差があり、この差がパッド加工速度プロファイルの相違の原因であると判断される。

本節では、パッドコンディショニングによるパッド加工現象を解明するため、パッド加工量の理論解析結果とパッド加工実験結果を比較した。比較の結果、理論解析結果とパッド加工実験結果に良い一致が見られ、パッド加工量の理論解析の妥当性が結論づけられた。

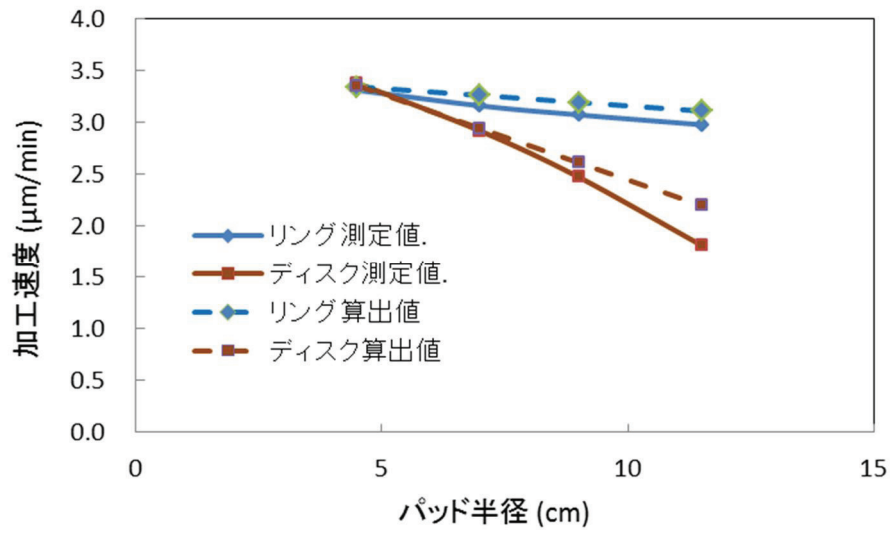


図 3-12 パッド加工速度の測定値と算出値の比較

3.3 揺動速度制御法を用いたパッドコンディショニングの検討

本節では、LSI デバイスの平坦化プロセスに使用されている直線揺動型のパッドコンディショニングの速度制御法に、前節で説明した研磨走行距離を用いた加工解析法を適用し、新たな速度制御法を提案する。また、パッドコンディショニングの実施結果から提案した速度制御法を評価[3]する。

3.3.1 パッドコンディショニングの現状と課題

LSI デバイスの平坦化プロセスでは、プラテン・ロータリ型研磨装置を用いた平坦化 CMP プロセスが最もよく使用されている。プラテン・ロータリ型研磨装置の研磨パッドの径は、ウエハ径 200 mm ϕ 用の装置では 500~600 mm ϕ 、ウエハ径 300 mm ϕ 用の装置では 750~800 mm ϕ 程度であり、外径 100 mm ϕ のコンディショナを使用する場合、パッド全面にわたって均一軌跡となるようコンディショナを運動させなければならない。

図 3-13 にプラテン・ロータリ型研磨装置の研磨主要部の概要を示す。研磨主要部は、研磨パッドを貼付した定盤(プラテン)、ウエハを保持した研磨ヘッド、コンディショニング部、スラリー(研磨液)供給部及びそれらの制御装置で構成される。図 3-13 は、中心から半分の研磨パッド領域で研磨ヘッドを直線揺動させてパッド面上にスラリーを供給しながらウエハ研磨を行い、ウエハ研磨側の反対側のパッド領域では、ウエハ研磨と同時にパッドコンディショニング(in-situ コンディショニング)が行われることを示すものである。

研磨ヘッドが正弦関数で直線揺動するため、コンディショナも研磨ヘッドと同期した直線揺動運動を行う必要がある。パッド全面にわたって均一軌跡となるような運動をさせためには、直線揺動運動の速度を制御する必要がある。このため、コンディショニングの速度制御法では、コンディショナの運動軌道を 10 ゾーンに均等分割し、各分割ゾ

ーンの滞在時間(または相対速度)を数値制御するゾーン制御法が採用されている。揺動関数を正弦波関数とすると、揺動中心部ではコンディショナの滞在時間が短く(移動速度が速く)なり、揺動の折り返し付近では滞在時間が長くなる。このためゾーン制御法では、各分割ゾーンの滞在時間をあらかじめ入力する必要する。

各分割ゾーンの滞在時間の決定手順としては、コンディショナの回転軸の運動関数を正弦関数としたときに算出される各ゾーンの相対滞在時間を基準にコンディショニング実験を行い、得られた研磨パッドの厚さプロファイルから相対滞在時間を逆算し、実験を繰り返すことで最適な相対滞在時間を決定する手順が採られる。表 3-4 にコンディショナの回転軸の運動関数を正弦関数としたときの各ゾーンでの相対滞在時間を示す。しかし、実験や経験によって相対滞在時間を最適化するため、実験の労力やコストの負担などの課題がある。

コンディショニングの運動解析により、研磨パッドの半径方向の全領域を均一に加工できる相対滞在時間を決定できれば、上記の課題が解決され、コンディショナの選定や研磨パッドの消耗の低減などにも寄与できる可能性が大きい。

表 3-4 正弦関数の各ゾーンでの相対滞在時間

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δt	20.5%	9.0%	7.4%	6.7%	6.4%	6.4%	6.7%	7.4%	9.0%	20.5%

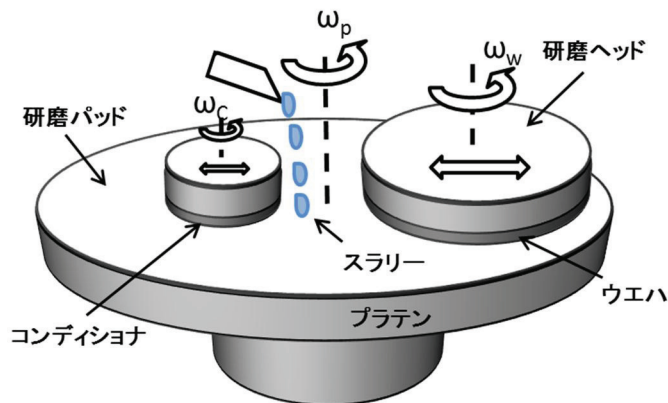


図 3-13 プラテン・ロータリ型研磨装置の研磨主要部の概要

3.3.2 コンディショニングにおける揺動速度制御法の検討

半導体デバイスの平坦化 CMP プロセスでは、パッドコンディショニングの速度制御法としてゾーン制御法が一般的に採用されている。ゾーン制御法は、前述したように、コンディショナの回転軸の運動軌道を 10 等分に分割し、回転軸が各分割した領域(ゾーンという)を通過する時間(ゾーン滞在時間という)を数値制御する方法である。この方法では、各ゾーンに正弦関数を基準とした滞在時間を入力し、コンディショニング後の研磨パッドの厚さプロファイルの測定データから各ゾーンの滞在時間を調節する方法がとられている。

揺動コンディショニング法には、直線揺動型と円弧揺動型の 2 種類の方法がある。円弧揺動型は 2.3.4 節の改良オスカー型研磨装置の研磨ヘッドの揺動機構をコンディショナの揺動機構に応用したものと考えてよい。揺動支点を有するアームの先端にコンディショナの回転軸が設置され、アームの揺動角を正弦関数やゾーン制御による変形正弦関数で運動させるものである。直線揺動型は、2.3.4.2 節の小径工具による速度制御型研磨装置の揺動機構と同一で、工作物を研磨パッドに、工具をコンディショナに置き換えて取り扱うことができる。

本節では、直線揺動型コンディショニングの速度制御法を検討するが、円弧揺動型コンディショニングにも同じ制御法が適用できる。

直線揺動型コンディショニングの速度制御の算出手順を図 3-14 に示す。速度制御の算出目的は、正弦関数で決まる各ゾーンの滞在時間を、パッドを均一に加工するために調節することである。滞在時間を調節する手順を以下に示す。

①コンディショナの揺動範囲を決定し、各ゾーンの中心位置を決定する。

②決定された各ゾーンの中心位置でのパッドのコンディショナ面に描く研磨軌跡を算出する。

③パッドサイズとコンディショナサイズの関係からパッドとコンディショナの、はみ出し領域を除外した走行距離を求める。

④ 求めた走行距離の平均値により、各点の走行距離を正規化した相対走行距離の逆数を算出する。

⑤ 逆数と正弦関数による滞在時間の積を求め、新たな滞在時間とする。

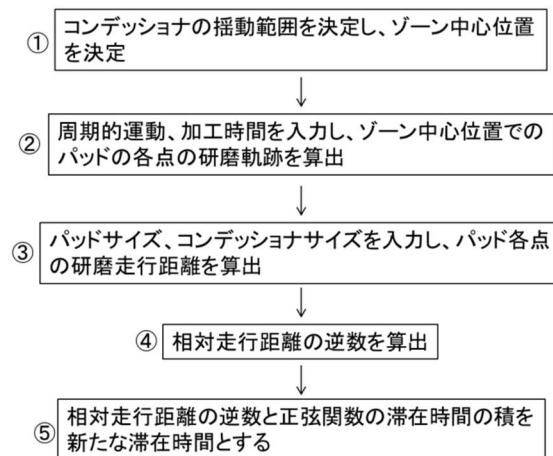


図 3-14 速度制御法の算出手順

(1) ゾーン中心位置の決定

図 3-15 に直線揺動型コンディショニングの位置関係を示す。揺動中心位置($L_x, 0$)と揺動振幅 a を決めると、各ゾーン位置が算出できる。図 3-15 に示す z_0 及び z_{10} はそれぞれ、ゾーン番号 0 の位置とゾーン番号 10 の位置である。ゾーン中心位置は、隣り合う各ゾーン番号のゾーン位置の平均値で表される。 z_0 の位置を 3.8 cm とし、200 mm ϕ ウエハ用の z_{10} を 21.6 cm とした場合、及び 300 mm ϕ ウエハ用の z_{10} を 34.5 cm とした場合のゾーン中心位置の算出結果を表 3-5 に示す。

表 3-5 ゾーン位置とゾーン中心位置

ゾーン番号	200mm φ 用ゾーン(cm)		300mm φ 用ゾーン(cm)	
	ゾーン位置	ゾーン中心	ゾーン位置	ゾーン中心
0	3.8		3.8	
1	5.6	4.7	6.9	5.3
2	7.4	6.5	9.9	8.4
3	9.1	8.3	13.0	11.4
4	10.9	10.0	16.0	14.5
5	12.7	11.8	19.1	17.5
6	14.5	13.6	22.1	20.6
7	16.3	15.4	25.1	23.6
8	18.0	17.1	28.2	26.7
9	19.8	18.9	31.2	29.7
10	21.6	20.7	34.5	32.8

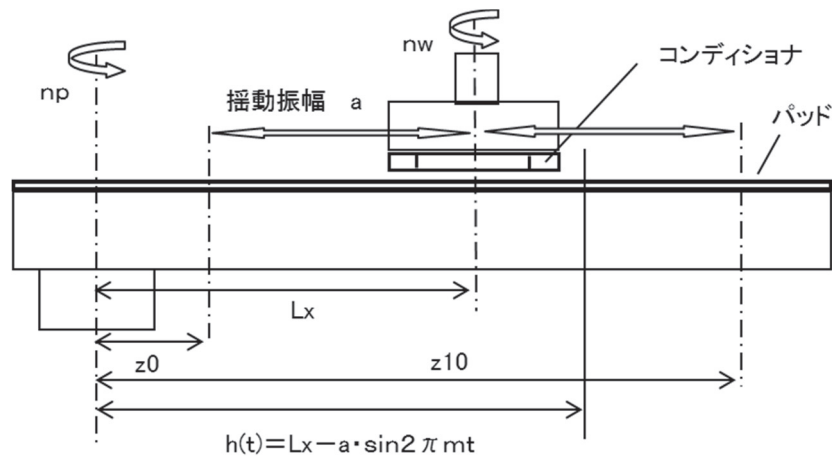


図 3.15 直線揺動型コンディショニングの位置関係

(2) 研磨軌跡及び相対走行距離の算出

コンディショナの回転軸の揺動関数を、(3.4)式及び(3.5)式に示す揺動中心位置($Lx, 0$)、揺動振幅 a の正弦関数、揺動回数 m として、(2.5)式、(2.6)式を用いて研磨軌跡をもとめ、パッドサイズとコンディショ

ナサイズを考慮して、(2.14)式を用いて走行距離プロファイルを算出する。

$$h(t)=Lx - a \sin(2 \pi m t) \quad \cdot \cdot \cdot (3.4)$$

$$g(t)=0 \quad \cdot \cdot \cdot (3.5)$$

本節では、200 mm φ ウエハ用研磨装置と 300 mm φ ウエハ用研磨装置を想定し、外径－内径がそれぞれ 100－80 mm φ と 100－60 mm φ のリング型コンディショナ及び 100 mm φ のディスク型コンディショナの 3 種類のコンディショナについて走行距離プロファイルを算出した。

表 3-6 に走行距離プロファイルの算出条件を示す。表 3-6 の算出条件を使用して算出した走行距離プロファイルを、ゾーンの平均走行距離に対する各ゾーンの走行距離の比とした相対走行距離プロファイルを図 3-16 及び図 3-17 に示す。図 3-16 及び図 3-17 とともに、揺動中心位置(図 3-16 ではパッド半径 12.7 cm の位置、図 3-17 ではパッド半径 19.1 cm に相当する)を中央として右 3 ゾーンの走行距離が平均走行距離を下回り、左 4 ゾーン目にピークを示す。図 3-16 と図 3-17 を比較すると、図 3-17 が走行距離の偏差が大きく、走行距離の不均一性が大きいといえる。走行距離の不均一性は、揺動関数を正弦関数として取り扱ったことに起因する。正弦関数の速度は、揺動中心部ほど早く、コンディショナ回転軸のゾーン滞在時間は揺動中心部ほど短い。従って、相対走行距離の偏差を利用して正弦関数の滞在時間を調整して各ゾーンの滞在時間を変更することで、均一な走行距離プロファイルが得られると考えられる。

表 3-6 走行距離プロファイルの算出条件

ウエハサイズ	200mm ϕ	300mm ϕ
研磨パッドの直径(cm)	52	75
コンディショナ外内径 $D - d$ (cm)	10-8 10-6 10-0	10-8 10-6 10-0
パッド回転数 n_w (rpm)	97	97
コンディショナ回転数 n_p (rpm)	83	83
揺動振幅 a (cm)	8.9	15.2
揺動中心位置 L_x (cm)	12.7	19.1
揺動回数 m (1/min)	3	3
コンディショニング時間 T (min)	1	1

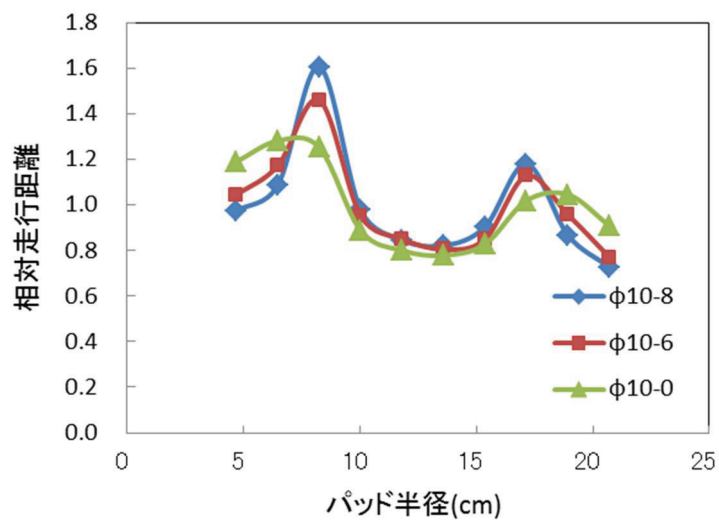


図 3-16 200 mm ϕ ウエハ用研磨装置を想定した
相対走行距離プロファイル

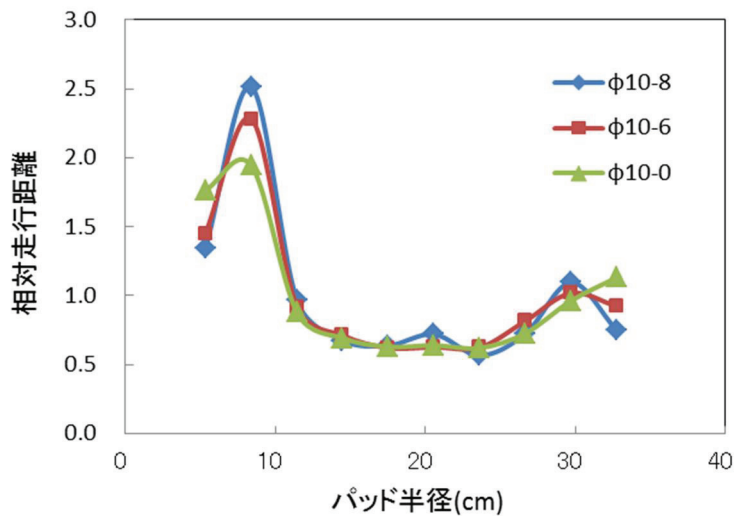


図 3-17 300 mm φ ウエハ用研磨装置を想定した
相対走行距離プロファイル

(3) 相対走行距離の逆数とゾーン滞在時間の調整値

相対走行距離は、ゾーンの平均走行距離に対する各ゾーンの走行距離の比として算出したもので、走行距離の偏差を表すと言える。表 3-7 に相対走行距離の逆数の算出値とゾーン滞在時間の調整値を示す。表 3-7 は、200 mm φ ウエハ用研磨装置を想定し、100-80 mm φ のリング型コンディショナを使用したときの走行距離の算出値を用いて調整したものである。滞在時間の調整値は、相対走行距離の逆数と正弦関数の滞在時間の積を各ゾーンの滞在時間が 100% となるよう調整したものである。表 3-7 に示すゾーン滞在時間の調整値は正弦関数を変形したもので、数学的な取扱いが困難であるため、ゾーン滞在時間の調整値を使用して実際にコンディショニングを実施し、研磨パッドの厚さのプロファイルの均一性を測定して、その妥当性を評価する必要がある。

表 3-7 相対走行距離の逆数とゾーン滞在時間の調整値

ゾーン 番号	ゾーン中心 (cm)	平均走行距 離の逆数	正弦関数 滞在時間	調整値 滞在時間
1	4.7	1.03	20.5%	19.4%
2	6.5	0.92	9.0%	7.7%
3	8.3	0.62	7.4%	4.2%
4	10.0	1.02	6.7%	6.3%
5	11.8	1.18	6.4%	7.0%
6	13.6	1.22	6.4%	7.2%
7	15.4	1.11	6.7%	6.8%
8	17.1	0.85	7.4%	5.8%
9	18.9	1.15	9.0%	9.6%
10	20.7	1.37	20.5%	25.9%

3.3.3 直線揺動型コンディショニングの実験と実験結果

前節で、直線揺動型コンディショニングでは揺動関数を正弦関数とすると、研磨パッドの半径方向の各点での走行距離が揺動中心から離れるに従って大きくなり、不均一になることを示した。そして、この不均一性を回避する方法として、コンディショナ回転軸のゾーン滞在時間を、走行距離の偏差の割合で調整する方法を述べた。以下では、本方法で調整したゾーン滞在時間を使用して、コンディショニングによる研磨パッドの加工実験を実施し、正弦関数をもとにした滞在時間と本方法で調整した滞在時間による研磨パッドの除去速度プロファイルを比較し、本方法の妥当性を評価する。

(1) 実験方法

200 mm φ ウエハ用プラテン・ロータリ研磨装置(Applied materials 社製 3400 型) を使用し、直線揺動型コンディショニングを実施して、研磨パッドの厚みプロファイルをダイヤル式マイクロメータを用いて測定した。研磨主要部の概要を図 3.13 に、また直線揺動型コンディショニングの位置関係を図 3.15 に示した。使用した研磨パッドは外径 520 mm φ のスパイラル型セリア固定砥粒パッドであり、コンディショニングには 100-80 mm φ のリング型コンディショナを使用した。コンディショニング条件を表 3-8 に示す。表 3-8 に示すおもなコンディショニング条件は、表 3-6 に示す走行距離プロファイルの算出条件と同一とした。コンディショニングに使用したゾーン滞在時間は、表 3-9 に示す調整値滞在時間とした。

表 3-8 直線揺動型コンディショニング条件

研磨パッド	セリア固定砥粒研磨パッド
パッド寸法	外径 520mm φ
コンディショナ	100-80mm φ、リング型
パッド回転数	97rpm
コンディショナ回転数	83rpm
揺動中心位置	127mm
揺動振幅	89mm
揺動回数	3/min
コンディショニング時間	30min、90min、150min 45min、75min、135min
研磨液	純水
研磨液供給速度	125ml/min

表 3-9 ゾーン滞在時間

ゾーン 番号	ゾーン中心 (cm)	正弦関数 滞在時間	調整値 滞在時間
1	4.7	20.5%	19.4%
2	6.5	9.0%	7.7%
3	8.3	7.4%	4.2%
4	10.0	6.7%	6.3%
5	11.8	6.4%	7.0%
6	13.6	6.4%	7.2%
7	15.4	6.7%	6.8%
8	17.1	7.4%	5.8%
9	18.9	9.0%	9.6%
10	20.7	20.5%	25.9%

(2) 実験結果と検討

図 3-18 及び図 3-19 に、それぞれ表 3-9 に示す正弦関数滞在時間と調整滞在時間を使用したときの、コンディショニング時間に対する研磨パッド厚さプロファイルの測定結果を示す。図 3-18 は、正弦関数のゾーン滞在時間を使用したときのパッド厚さプロファイルの経時変化を示したもので、パッドの中心部がパッド外周部より多く研削されて、コンディショニングの時間経過にともなってなだらかな凹状に変化することを示す。図 3-19 は、調整滞在時間を使用したときのパッド厚さプロファイルの経時変化を示したもので、コンディショニングの時間経過に対して、半径方向の各点のパッド厚さが均一に減少していることを示す。

以上の実験結果より、直線揺動型コンディショニングのゾーン制御法では、走行距離の偏差の割合で調整したゾーン滞在時間を使用することで、パッドの表面が均一に除去されて、パッドの平坦性が確保されることを確認した。ゾーン滞在時間の調整方法は、研削(研磨)量が走行距離に比例することを仮定して、走行距離がパッド全面にわたって均一となるよう、コンディショナの揺動速度を改良することで均一研削が行えることを前提にしている。実験に使用したセリア固定砥粒パッドは、市販のウレタンパッドと比較すると圧縮変形量が小さく、研削による圧力分布の変化がパッドの表面形状の変化に反映され易い。このため研削量と走行距離が比例関係にあり、走行距離プロファイルを検討することで、パッドの均一研削のためのコンディショナの運動関数を検討することができるものと判断される。

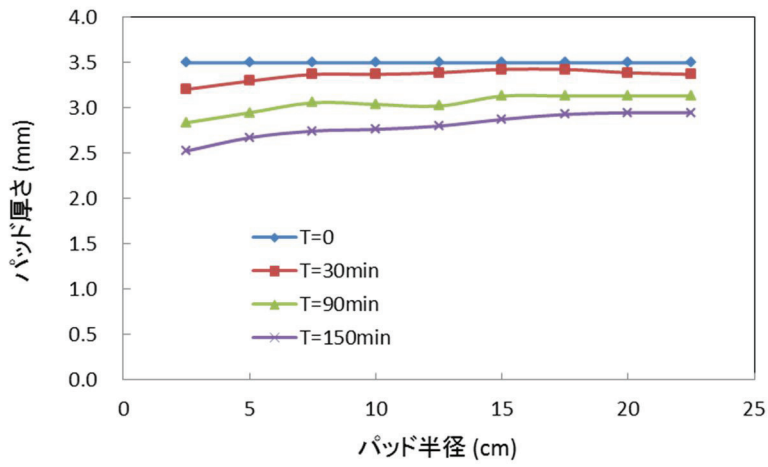


図 3-18 研磨パッド厚さプロファイルの経時変化
(正弦関数のゾーン滞在時間を使用)

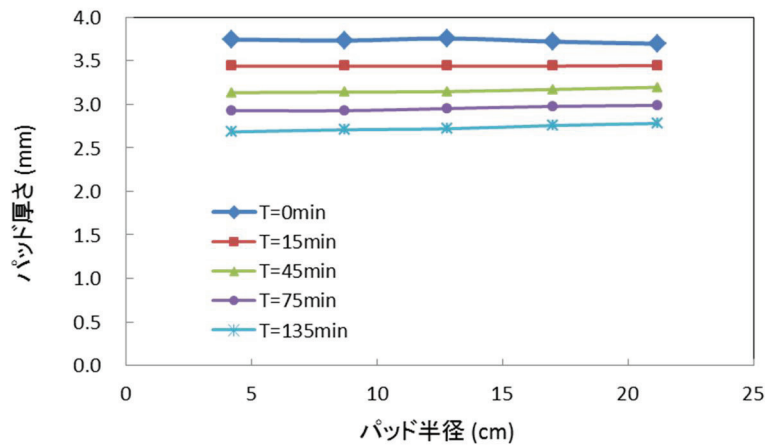


図 3-19 研磨パッド厚さプロファイルの経時変化
(調整ゾーン滞在時間を使用)

3.4 まとめ

パッドコンディショニングにおけるパッド加工現象を解明し、パッド表面の均一加工を実現するために、第2章で述べた加工量プロファイルの解析手法をパッドコンディショニングに適用し、解析結果と加工実験結果を比較検討した。

3.2節では、固定コンデッショニングにおいて、コンデッショナが傾斜するときのパッドの加工量プロファイルの解析結果と加工実験結果を比較し、微小加工時間の走行距離プロファイルがパッドの加工形状を決定し、形状変化による加工圧力分布と走行距離プロファイルをパッド加工量に反映させることで、パッド加工量プロファイルを解析できることを示した。コンデッショナの形状やコンデッショナの回転数などの加工条件で決まるパッド加工現象は、走行距離プロファイルとパッドの相対弾性係数で求まるパッド加工量のプロファイルから説明できるものと判断された。

3.3節では、直線揺動型パッドコンディショニングにおける揺動速度の制御方法を検討した。コンデッショナによるパッド加工量プロファイルは、コンデッショナの形状や、コンデッショナの回転数、揺動速度などのコンディショニング条件に左右される。しかし、走行距離プロファイルが均一であれば、パッド加工量プロファイルが均一となるため、走行距離プロファイルが均一となるよう、揺動速度を調整する方法を検討し、調整した揺動速度を適用してパッドコンディショニング実験を行い、パッドの均一除去性が改善されることを示した。

第 3 章の参考文献

- [1] S.Lee, S.Jeong, H.Lee, J.Park, M.Kionshita, and H.Jeong, Proc. International Conference on Planarization/CMP Technology, pp.333-338 (2009)
- [2] 力田直樹、“最新 CMP 技術と周辺部材”、技術情報協会、p.211 (2008)
- [3] 富永茂、“最新 CMP 技術と周辺部材”、技術情報協会、pp.56-65 (2008)

第 4 章

自己放出型固定砥粒パッドによる

加工技術に関する研究

4.1 緒言

LSI デバイスの Al 多層配線プロセスでは、プロセスコストの低減が課題とされ、その一貫として、Al 多層配線プロセスに適用される層間絶縁膜の平坦化 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術には、平坦性の改善と平坦化 CMP 加工にともなう消耗材のコスト低減が求められている。

平坦化 CMP 技術は、水溶液に分散させた砥粒を工作物表面に作用させる遊離砥粒研磨技術と、研磨パッドに固定した砥粒を工作物表面に作用させる固定砥粒研磨技術に大別[1]される。

遊離砥粒研磨技術は、数～10 数 wt%の砥粒を分散させた加工液(スラリー)を研磨パッド上に供給しながら工作物を研磨パッド上で摺動させて、スラリーの化学的作用により生じる反応生成物を機械的作用で除去する加工技術である。砥粒には、シリカ(SiO₂)、セリア(CeO₂)、ジルコニア(ZeO₂)やアルミナ(Al₂O₃)などの 1 μ m 以下の砥粒が使用され、スラリーには、酸、アルカリなどの化学液、界面活性剤、反応抑制剤などが添加される。研磨パッドには、不織布、スエード風人工皮革、硬質発泡ウレタンなどが用いられる。LSI デバイスウエハの平坦化 CMP では、研磨パッドに硬質発泡ウレタンを表層とし、下層に緩衝層を配した 2 層構造の研磨パッドが使用されるが、平坦性を改善する目的で、ポア密度を高くした高硬度発泡ウレタンパッドや無発泡ウレタンパッドなども採用[2]されている。

固定砥粒研磨技術では、砥粒を研磨パッドに固定した固定砥粒パッドを使用し、加工液に純水や薬液を使用してパッドに固定された砥粒による機械的作用によって工作物の表面を加工する。固定砥粒研磨技術は、以前からレンズ等の仕上げ研磨などに用いられていたが、デバイスウエハへの適用が試みられ、高平坦化技術として期待[3]されている。固定砥粒パッドは、シリカ、セリアやアルミナなどの微粒子を研磨摩擦力で脱落しないよう、合成樹脂などで固定するが、デバイスウエハ面にスラッチやデフレクトが発生し易いなどの課題がある。

本章では、スラッチやデフエクトの発生を抑制できる自己放出型固定砥粒研磨パッドを用い、LSI デバイスの Al 積層配線技術の層間絶縁膜に使用されるシリコン酸化膜を平坦化加工の対象として、ウエハとパッドの接触面積を制御する加工技術、パッド表面の水分量を制御する加工技術、パッドコンディショニングを利用した砥粒の強制放出による加工技術について検討する。本章で検討する加工技術は、スラリーを使用しない平坦化加工で、高い平坦性を維持しながら加工能率を上げ、CMP プロセスのコスト低減とスラリー廃液で生じる産業廃棄物の低減を目的としている。

第 4.2 節では、自己放出型固定砥粒研磨パッドの構造や材料選定などのパッド開発の概要を述べ、4.3 節で、ウエハとパッドの接触面積を制御する加工技術を用いて、200 mm φ ウエハに製膜された PTEOS 膜の加工特性を評価する。4.4 節では、パッド表面の水分量を制御する加工技術を用いて、PTEOS 膜の加工特性を評価する。

最後に 4.5 節では、パッドコンディショニングによって、パッド表面の形状を制御しながら砥粒を強制放出する加工技術を検討し、LSI デバイスの Al 積層配線用のパターンウエハの平坦化加工特性を評価する。

4.2 自己放出型固定砥粒パッドの開発概要

固定砥粒研磨技術は、砥粒を研磨パッドに固定し、加工液に純水や薬液を使用して研磨パッドに固定された砥粒による機械的作用によって、工作物の表面を研磨加工するスラリーを使用しない加工技術である。スラリーを使用する遊離砥粒研磨型のCMPでは、スラリーを大量に使用する必要がある。CMPプロセスコストは、①CMP装置、洗浄装置、スラリー供給装置などの償却コスト、②消耗資材コスト、③人件費などで構成され、そのうちの70%が消耗資材コストであるパッドとスラリーのコストで、スラリーのコストはCMPプロセスコスト全体の60%程度と見積もられている[4]。スラリーを使用しない固定砥粒研磨技術には、CMPプロセスコスト低減と産業廃棄物の低減に寄与するだけでなく、高平坦化特性や研磨傷(スクラッチやデフェクト)が少ない、高い加工特性が期待されている。

研磨パッドに砥粒を固定し、工作物との摺動摩擦などを利用して研磨パッドから砥粒を放出させて遊離砥粒研磨を行う自己放出型固定砥粒パッドがいくつか提案されている。これらの中には、合成樹脂製のレジンにシリコンゴムを使用し、シリコンゴムの摩耗性を利用したセルフドレス型パッド[5]やレジンに水溶性樹脂を添加してパッド自体を溶解させることで砥粒の遊離化を図ったもの[6]などがある。しかし、これらの自己放出型固定砥粒パッドは、加工特性の安定性に課題があり、研磨傷の発生や研磨レートが低いなどの問題もあった。

固定した砥粒を工作物との摺動摩擦などを利用してパッドから放出させて遊離化する自己放出型固定砥粒研磨パッドでは、加工に必要な量の砥粒をパッドから放出させるため、パッド自体を脆くし、摩耗し易い構造とする一方で、加工中にパッド表面の凸部に集中する加工圧力に対して、凸部の形状を保持する必要がある。また、少なくとも1～数分間の加工時間内では、パッド表面の局所的な偏減りを抑制できる耐摩耗性も必要であり、加工の再現性を得るためには、パッドの表面の材質の均質性とパッド厚み方向の材質の均質性を実現する必要がある。

ある。本節では、砥粒を放出する部位や耐摩耗性のある加工圧力の支持部位などのそれぞれの機能を有する材料をパッド表面に配置した構造を持ち、パッド厚み方向に均質な材質を有するスパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドの詳細を説明する。

4.2.1 自己放出型固定砥粒パッドの構造及び製作

加工能率の高い自己放出型固定砥粒パッドの実現を目的として、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドを開発した。スパイラル形状の新型固定砥粒パッドは、パッド表面に砥粒を放出する機能を有する材料と、加工点を確保する機能を有する材料の2種類の材料を規則的に配列させることで高い加工能率を実現させ、パッド表面の均質性とパッド厚み方向の均質性を実現させたものである。

図4-1にスパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドの構造図[7]を示す。図4-1はパッドの外観と断面の拡大図を摸式図として示したもので、砥粒層、繊維層及び樹脂層の3種類の薄い層が研磨表面に対して垂直に配列され、各層がそれぞれ交互に繰り返して配列されていることを示す。

図4-2に砥粒層と繊維層からなる砥粒シートの製造方法の説明図を示す。図4-2は、2枚のPET (Polyethylene Terephthalate) 製不織布の間に砥粒と熱可塑性合成樹脂製のバインダーを含む水溶性スラリー(以下、砥粒スラリーという)を充填し、シート厚さを調整した後、乾燥炉で乾燥して熱可塑性合成樹脂を熔融、結合させ、長尺シート(以下、砥粒シートという)に成形する方法を模式的に示したものである。自己放出型固定砥粒パッドは、砥粒シートの片面に樹脂層を形成するための熱可塑性合成樹脂をコーティングして、加熱しながら軸芯に巻き付け、所定のパッド径まで太らせて円柱状の形成体を作製し、冷却後に軸芯に垂直な方向でスライス加工して製造される。

図4-3に本パッドの製造方法の説明図を示す。円柱状の形成体は、回転しながらバンドソーで所定の厚さにスライスされ、スライス片を

研磨パッドとして利用する。

本パッドの研磨表面には、砥粒シート及び樹脂層の切断面が螺旋状に配置されているので、砥粒シートと樹脂層の厚さを制御することにより研磨表面の均質性が得られ、また、砥粒シートの幅方向と長さ方向を均一に形成することによりパッド厚さ方向に均質なパッドが実現できる。また、砥粒スラリー中の砥粒とバインダーの混合割合や水分量を調節することで、砥粒層の脆性や空隙率を制御して砥粒層を形成できるので、砥粒層の摩耗性を制御して加工に必要な砥粒を加工中に遊離化し易い砥粒層を形成することができる。繊維層と樹脂層は、砥粒層の摩耗を保護してパッド表面に一定の耐磨耗性を持たせるとともに、パッド表面に凸部を形成して加工圧力の支持部としての機能を有する。

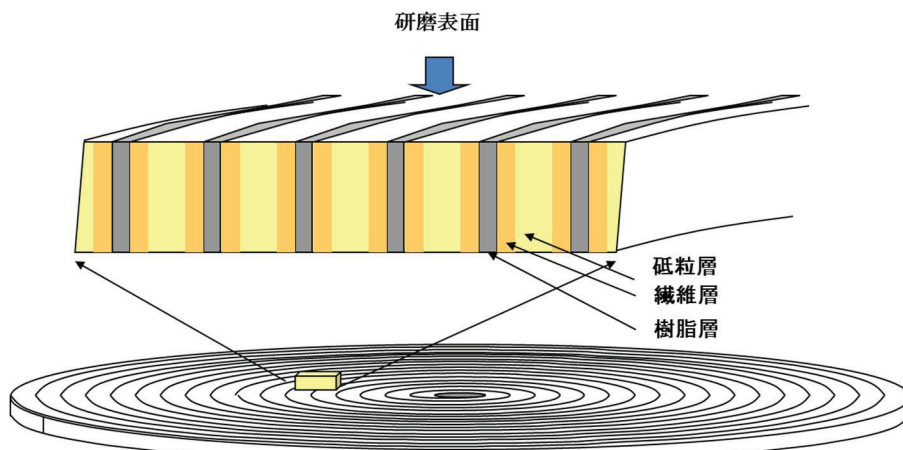


図 4-1 自己放出型固定砥粒パッドの構造図

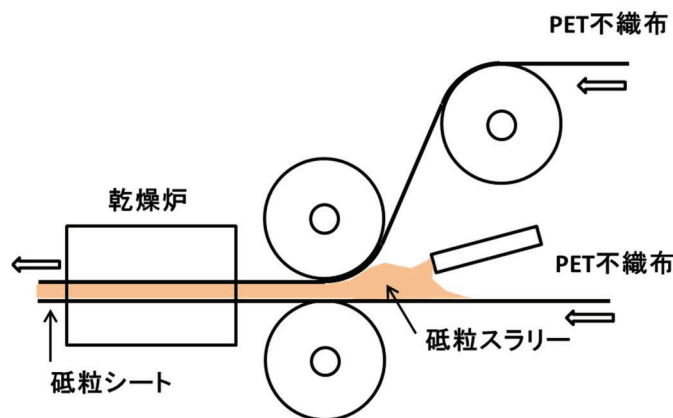


図 4-2 砥粒シートの形成方法

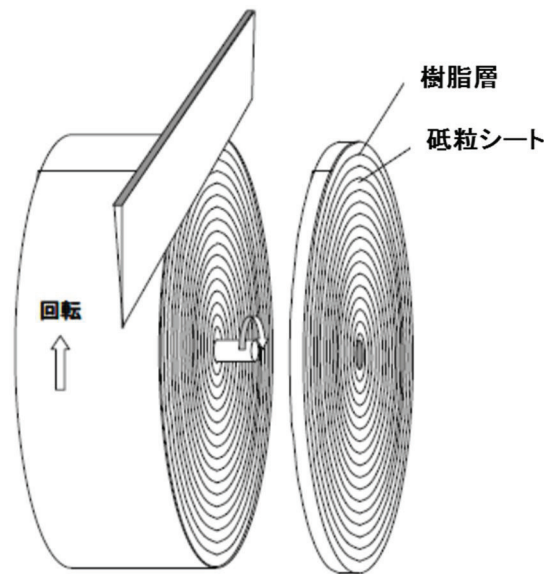


図 4-3 自己放出型固定砥粒パッドの製造方法

本パッドの材料を検討する[8]ため、平均粒径 $0.8 \mu\text{m}$ の 40 wt%セリア砥粒分散水溶液に、バインダー材として、アクリル系樹脂、ウレタン系樹脂、ポリスチレン系樹脂を混合し、固形分比率としてセリア砥粒 95 wt%、バインダー材 5 wt%の砥粒スラリーを作製して、加熱乾燥後のシート厚さ 0.3 mm の砥粒シートを 3 種類作製した。これらの砥粒シートの加工能力を評価するため、各シートを厚さ 1 mm の発泡ポリエチレンシートに貼付し、直径 300 mm ϕ の円形に打ち抜いて評価パッドを試作した。バインダー材にアクリル系樹脂を使用したものを砥粒シート A、ウレタン系樹脂を使用したものを砥粒シート B、ポリスチレン系樹脂を使用したものを砥粒シート C とした。

次に、樹脂層の材料に、アクリル系樹脂、ウレタン系樹脂、ポリスチレン系樹脂を使用し、アクリル系樹脂を使用した砥粒シート A に $70 \mu\text{m}$ 厚さにコートし、図 4-3 の製造方法で、直径 300 mm ϕ 、厚さ 3 mm の評価パッドを試作した。樹脂層の材料にアクリル系樹脂を使用したものをパッド AA、ウレタン系樹脂を使用したものをパッド AB、ポリスチレン系樹脂を使用したものをパッド AC とした。

表 4.1 に製作したパッドの仕様を示す。それぞれの試作パッドのセリア砥粒含有率は、パッド重量からバインダー材、PET 不織布及び樹脂層のそれぞれの重量を差し引いて算出した。表 4-2 に、乾燥状態のパッド AB の圧縮特性の測定値を硬質発泡ウレタンパッドと比較して示す。圧縮特性の測定手順は図 4-4 に示すように、29.4 kPa の加重圧を加えたときのパッド厚さを初期厚さ T_1 とし、その後 137.2 kPa の加重圧としたときの変位量を圧縮変位量 T_2 とした。さらに 29.4 kPa の加重圧に戻したときの圧縮変位量 T_2 からの回復量を ΔT として、圧縮率(T_2 / T_1)、回復率($\Delta T / T_2$)を算出した。パッド AB は、圧縮率が 0.1 %、回復率が 100 %であり、硬質発泡ウレタンパッドと比較すると圧縮からの回復量が 1/4.5 であり、高硬度パッドといえる。

表 4-1 製作したパッドの仕様

パッド タイプ	セリア砥粒 含有率	バインダー材	樹脂層材
シート A	95wt%	アクリル系	—
シート B	95wt%	ウレタン系	—
シート C	95wt%	ポリスチレン系	—
AA	90wt%	アクリル系	アクリル系
AB	90wt%	アクリル系	ウレタン系
AC	90wt%	アクリル系	ポリスチレン系

表 4-2 パッドの圧縮特性

	パッド AB	ウレタンパッド
パッド密度(g/cm ³)	2.4	—
初期厚さ T_1 (mm)	3.27	1.51
圧縮変位量 T_2 (μ m)	2	22
回復量 ΔT (μ m)	2	9
圧縮率 T_2 / T_1 (%)	0.1	1.5

回復率 $\Delta T / T_2$ (%)	100	41
--------------------------	-----	----

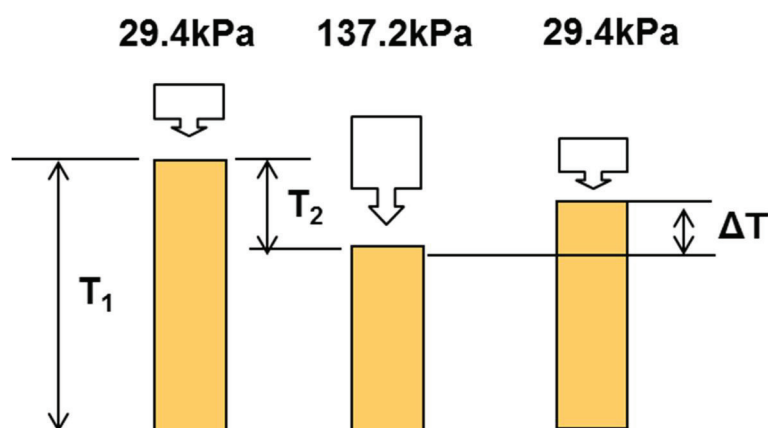


図 4-4 圧縮特性の測定手順

4.2.2 自己放出型固定砥粒パッドの加工特性

研磨加工実験には、図 4-5 に示す小型研磨機(ナノファクター社製 NF300)を使用した。直径 300 mm ϕ のパッドを小型研磨機回転定盤(プラテン)に貼付し、直径 100 mm ϕ の研磨ヘッドに加工試料 3 枚を同心状に設置し、加工液をパッド面に供給しながら所定の研磨時間まで研磨加工を行った。加工試料には厚さ 1 μ m の PTEOS (Plasma Tetra-Ethoxysilane) 膜を堆積した 200mm ϕ シリコン基板から 18x18 mm 角にダイシングした基板を使用した。試料の膜厚は、干渉式膜厚計 (SENNTECH 社製 FTP500) を用いて測定し、加工前後の膜厚差より、単位時間当たりの除去量を算出して除去速度とした。スラリーには、砥粒シートを製作したときに使用したのと同じ平均粒径 0.8 μ m の 40 wt%セリア砥粒分散水溶液を純水で希釈して、砥粒濃度 0.5 wt%、1 wt%、2 wt%に調整したセリアスラリーを使用した。加工時にパッドから放出された砥粒量を定量化するため、加工後のパッド上の加工廃液を吸引器で採取し、乾燥後の重量から加工廃液の砥粒濃度を求めた。主な加工条件を表 4-3 に示す。



図 4-5 小型研磨機の外観

表 4-3 主な加工条件

加工試料	1 μ m PTEOS 膜(18x18mm 角)
加工圧力	39.2kPa
パッド回転数	40rpm
研磨ヘッド回転数	36rpm
加工液	純水、セリアスラリー
加工液供給量	10mL/min
加工時間	1min

図 4-6 に加工液に純水を使用し、加工圧力を 4.9 kPa としたときの砥粒シート A、B、C の除去速度を比較して示す。加工圧力を 4.9 kPa としたのは、3 種類の試料とも、これ以上の圧力では、1 分間の加工時間内に砥粒層が摩耗して消滅するためである。除去速度は、砥粒シート A が 90 nm/min で最も大きく、次いで B、C の順で、バインダー材によって除去速度に大きな差があった。図 4-7 にそれぞれの研磨シートの加工廃液を自然乾燥させた後の SEM 写真を示す。図 4-7 (a) はバインダーにアクリル系樹脂を使用したもので、図 4-7 (b) はバインダーにウレタン系樹脂を使用したもの、図 4-7 (c) はポリスチレン系樹脂を

使用したものである。それぞれ、砥粒がバインダー材に被覆されているが、アクリル系樹脂を使用したバインダーでは、多くの砥粒が樹脂から分離していることを示している。このため、セリア砥粒と加工試料である PTEOS 膜とがバインダー材の外皮を介さずに、直接接触する割合が多くなり、高い除去速度が得られたものと判断される。

図 4-8 に加工液に 0.5 wt% セリアスラリーを使用し、加工圧力を 39.2 kPa としたときのパッド AA、パッド AB、パッド AC の除去速度を示す。樹脂層に使用する材料によって除去速度が異なり、樹脂層にウレタン系樹脂を使用したパッド AB が最も大きい除去速度を示した。樹脂層は、研磨パッドの補強や耐摩耗性に寄与しているのみでなく、研磨性能にも影響を与えることを示す。図 4-8 より、樹脂層に使用する材料としては、ウレタン系樹脂が適していることが分かる。

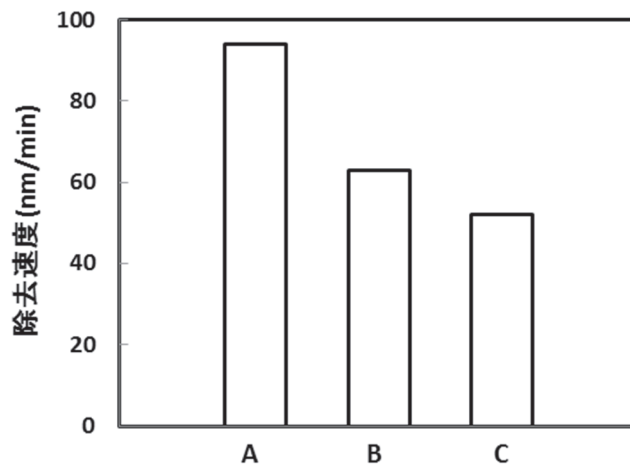
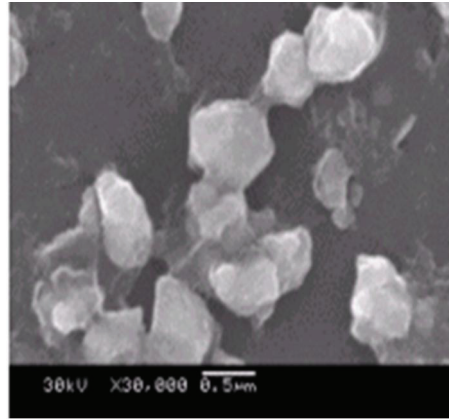
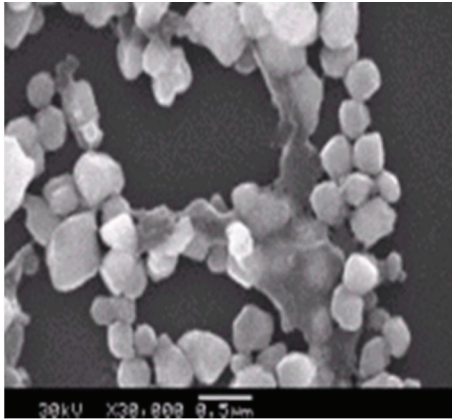
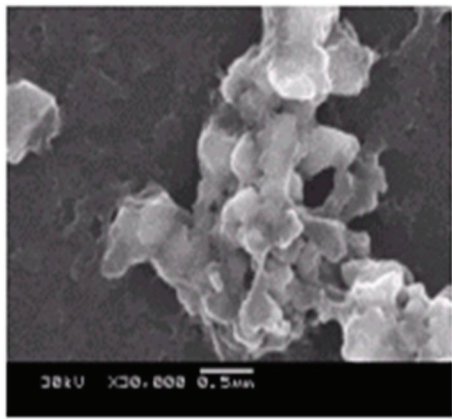


図 4-6 砥粒シート A、B、C の除去速度



(a)アクリル系樹脂バインダー

(b)ウレタン系樹脂バインダー



(c)ポリスチレン系樹脂バインダー

図 4-7 加工廃液の SEM 写真

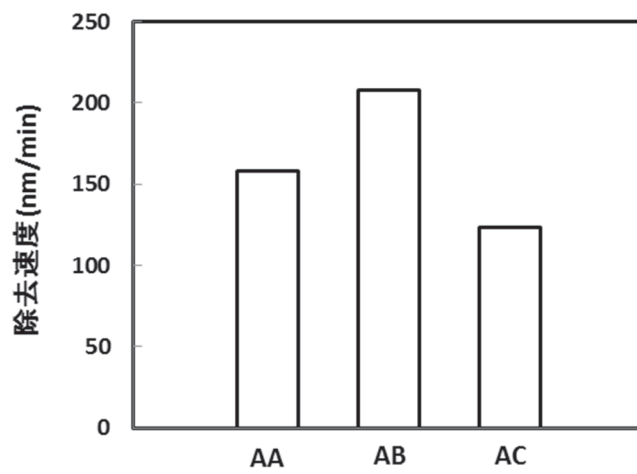


図 4-8 樹脂層の材料の異なる研磨パッドの除去速度比較

図 4-9 にパッド AB を使用したときの除去速度と加工液の砥粒濃度の関係を示す。また、市販のウレタンパッドを使用したときの除去速度を比較して示す。加工液には純水及び 0.5 wt%、1 wt%、2 wt% のセリアスラリーを使用し、純水を使用したときの砥粒濃度をゼロとした。同じ砥粒濃度のスラリーを使用したとき、パッド AB は、市販のウレタンパッドの 2 倍以上の除去速度を示した。

上記の理由を検討するため、パッド AB を使用して、加工時間を変えながら、純水及び 0.5 wt%、1 wt%、2 wt% のセリアスラリーを使用して加工したときの除去速度を測定した。また、加工終了後にパッド AB 面の加工廃液を綿布に吸収させて、乾燥後の重量変化より加工廃液の砥粒濃度を求めた。図 4-10 にパッド AB による除去速度と加工時間の関係を示す。図 4-10 は除去速度が加工時間に対してほぼ一定であることを示す。2 wt% のセリアスラリーを使用した加工時間 3 分後の除去速度は、PTEOS 膜がすべて除去され同定できなかったため除外した。

図 4-11 に加工廃液の砥粒濃度と加工時間の関係を示す。加工廃液の砥粒濃度も加工時間に対してほぼ一定である。

表 4-4 に、スラリーの砥粒濃度と、加工廃液の砥粒濃度の各加工時間の平均値を示す。表 4-4 に示す濃度増加分は、加工中にパッドの固定砥粒層から砥粒が遊離した分と考えられる。加工液に純水を使用した場合、加工廃液の砥粒濃度は 0.26 wt% あったが、スラリーの砥粒濃度が増加すると、濃度増加分が純水の場合と比較して、3~4 倍に増加していた。この原因は、スラリー中の砥粒によってパッド表面が同時に研磨され、パッドの磨耗分の砥粒が遊離化するためと考えられる。また、加工廃液の砥粒濃度が加工時間に対して一定であるということは、パッドの砥粒層から遊離する砥粒の遊離化率（単位時間あたりの遊離する砥粒量）が一定であることを示す。すなわち、パッドの構成材である砥粒層と樹脂層が、ほぼ同一の割合で磨耗することを示唆している。

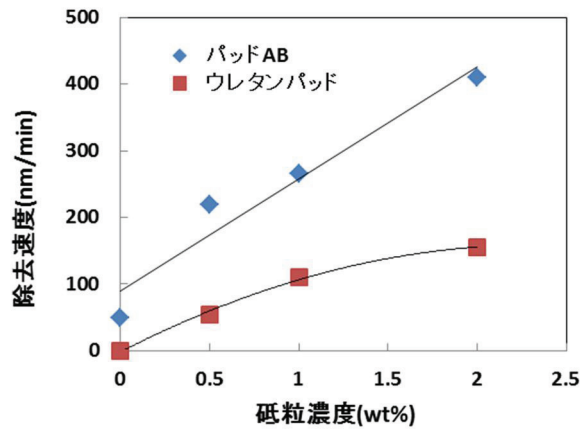


図 4-9 除去速度と加工液の砥粒濃度の関係

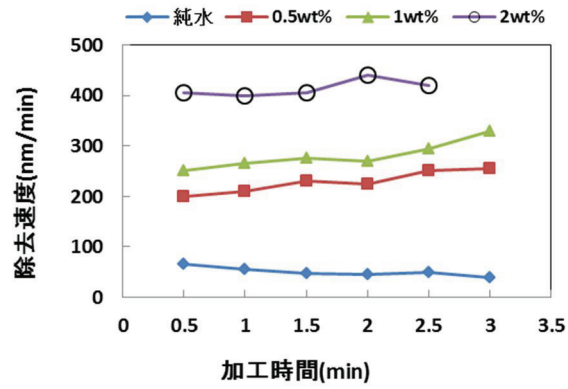


図 4-10 パッド AB による除去速度と加工時間の関係

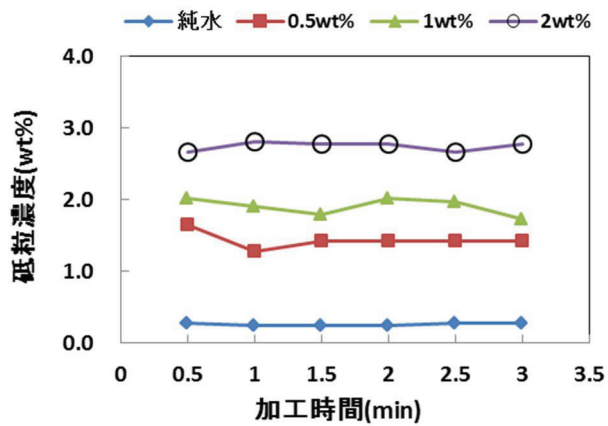


図 4-11 加工廃液の砥粒濃度と加工時間の関係

表 4-4 スラリー濃度と加工廃液の砥粒濃度

スラリー濃度	0(水)	0.5wt%	1wt%	2wt%
加工廃液濃度	0.26wt%	1.45wt%	1.9wt%	2.75wt%
濃度増加分	0.26wt%	0.96wt%	0.90wt%	0.75wt%

加工液に純水を使用したときのパッド AB の除去速度は、50 nm/min であった。これは、パッドに固定された砥粒による加工作用の関与が考えられる。パッドに固定された砥粒による加工作用の大きさを検討するため、加工廃液の砥粒濃度と除去速度の関係を求めた。図 4-12 に、図 4-10 に示す除去速度の各加工時間の平均値と、図 4-11 に示す加工廃液の砥粒濃度の各加工時間の平均値の関係を示す。比較として、図 4-9 に示す市販のウレタンパッドの除去速度を図 4-12 に示した。図 4-12 は除去速度と加工廃液の砥粒濃度とが比例関係にあることを示し、加工廃液の砥粒濃度がゼロであるとき、除去速度がゼロであることを示す。これは、パッドに固定された砥粒による加工作用が無視できる程度であることを示唆する。市販のウレタンパッドでは、加工廃液の砥粒濃度が増加する従って除去速度が飽和するのに対して、パッド AB では飽和傾向が見られなかった。これは、パッド AB が市販のウレタンパッドよりも加工に対する砥粒の利用効率が高く、高い加工能力を持つことを示唆している。

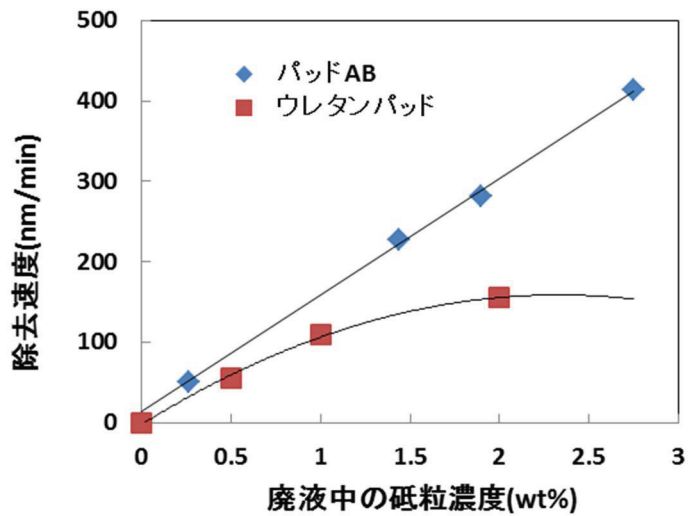


図 4-12 加工廃液の砥粒濃度と除去速度の関係

自己放出型固定砥粒パッドを光学ガラス研磨に適用した例では、高い除去速度でふちだれの発生が少なく、高い鏡面性 (PV 20 nm) が得られている[9]。また、パッド表面の微細な形状を、コンディショニング条件を変えて制御すると、比較的広範囲の加工圧力条件(3~25 kPa)で高い除去速度が得られた[10],[11]。低速加工、高速加工の条件でも、セリアスラリー研磨と比較して高い除去速度が得られている[12]。

4.3 接触面積を制御する加工技術の検討

半導体ウエハとの摺動摩擦などを利用して、研磨パッドから砥粒を放出させて遊離砥粒研磨を行う自己放出型固定砥粒パッドを研磨加工に利用する場合、摺動摩擦力を高めて砥粒の放出量を確保する必要がある。摺動摩擦力を高めるためには加工圧力を高めればよいが、加工特性や装置の機構上、ウエハへの加重量には限度がある。そのための一つの手段として、ウエハと研磨パッドの接触面積を小さくして加工圧力を高め、相対速度を増加して加工することが考えられる。

2.3.4.3 節で説明した円環状工具による速度制御型研磨装置は、円環状工具を工具の移動方向にわずかに傾けて、一定速度で工具を移動させて研磨加工する装置で、工具の傾き角度で接触面積を制御できる装置である。2.3.4.3 節で説明したように、接触面積が少ないと、研磨走行距離(加工量)が少なく、十分な加工量を得るためには、一般的な研磨装置と比較して工具回転数を極端に大きく設定する必要がある。

本節では、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドを円環状工具に加工し、円環状工具による速度制御型研磨装置に搭載し、シリコンウエハに堆積したシリコン酸化膜の研磨加工の実施結果を報告する [13], [14]。

図 4-13 に円環状工具を用いた速度制御型研磨装置の研磨主要部の摸式図を示す。速度制御型研磨装置は工作物である 200 mm ϕ ウエハを真空チャックテーブルに固定して回転させ、回転させた円環状工具を工具の移動方向にわずかに傾けてウエハに加圧して接触させ、円環状工具を一定速度で移動させて研磨加工を行う装置である。加工中は、加工液をウエハ表面に滴下させて供給する。

使用した円環状工具のサイズは、外径 200 mm ϕ 、内径 160 mm ϕ 、厚さ 20 mm であり、円環状工具に固形分比率 90 wt% の平均粒径 0.8 μ m の酸化セリウム(セリア) 砥粒を固定した。図 4-14 に円環状工具の断面の摸式図を示す。図 4-14 に示すように、工具の研磨面の微細な凹凸を形成することにより、ウエハとの摺動摩擦によって固定された

砥粒を放出させ易い表面構造を創出することができる。

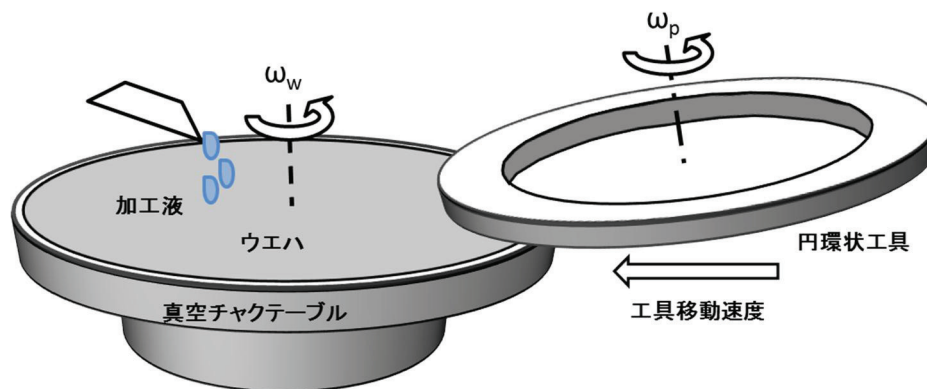


図 4-13 円環状工具による速度制御型研磨装置の主要部の模式図

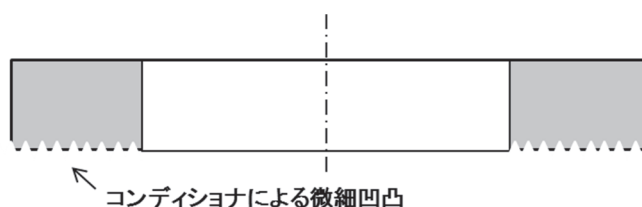


図 4-14 円環状工具の断面の模式図

図 4-15 に 3 種の製造ロットの円環状工具を用いて PTEOS (Plasma Tetra- Ethoxysilane) 膜を加工したときの、PTEOS 膜の加工量(除去量)プロファイルを示す。図 4-15 は、厚さ $1\mu\text{m}$ の PTEOS 膜を製膜した $200\text{mm}\phi$ ウエハを 1 分間加工し、加工後の PTEOS 膜の残膜のプロファイルを示したものである。除去量の単位をオングストロームで示した。図 4-15 より、円環状工具の製造ロット別の加工特性は同一であるといえる。また、図 4-15 より算出される PTEOS 膜の除去速度は $500\text{nm}/\text{min}$ であり、工具の研磨面に付けられた微細な凹凸が工具からの砥粒の自己放出に大きく寄与していることが示唆される。

図 4-16 に 2.3.4.3 節で説明した研磨走行距離プロファイルの算出例を示す。算出には、ウエハ径 $200\text{mm}\phi$ とし、工具の弾性変形を考慮して、工具外形 $200\text{mm}\phi$ 、工具内径 $189\text{mm}\phi$ とした。走行距離の算出条件は、円環状工具回転数(n_p)を 250rpm 、ウエハ回転数(n_w)を

263 rpm、工具移動速度(V)を 0.3 cm/sec とした。これらの値は、図 4-15 に示す除去量プロファイルを測定したときの加工条件とほぼ同じである。

図 4-15 に示す除去量プロファイルと図 4-16 に示す走行距離プロファイルと比較すると、プロファイル形状がほぼ同じであることが分る。とくに、除去量プロファイルのウエハ半径方向のうねりは、走行距離プロファイルのうねりにほぼ一致し、円環状工具による速度制御型研磨装置による加工量プロファイルが、走行距離プロファイルに大きく依存することを示唆している。走行距離の算出条件では、工具移動速度を 0.3 cm/sec とした。従って、1 分間の工具の移動距離は 18 cm で、工具とウエハの接触面は加工開始時にウエハの外周部であり、1 分間後には、ウエハ半径 8 cm の点で加工を終了している。2.3.4.3 節で説明したように、円環状工具による速度制御型研磨装置による走行距離プロファイルは、接触面積、工具の移動速度、及び工作物と工具の回転数に大きく依存する。従って、走行距離プロファイルの算出結果を利用して加工条件を選定することが効率的である。

図 4-17 に工具厚さに対する除去量プロファイルを示す。図 4-17 は、厚さ 20 mm の円環状工具を、回転刃を有する特殊なコンディショナで 3 mm ずつ削り、その都度 PTEOS 膜を研磨し、研磨後の残膜を示したものである。図 4-17 図の工具の移動速度は 3.4 cm/min としたもので、移動距離は 20 cm である。図 4-17 は、工具の移動速度を大きく設定してウエハの外周部を多く研磨し、円環状工具の厚さの変化に対する研磨特性の影響を調べたもので、工具の厚さ 8 mm で除去量プロファイルにわずかな変化がみられるものの、工具の厚さ 11 mm 以上では同一の除去量プロファイルを示した。これは、円環状工具の厚さ方向の均質性を示すものである。

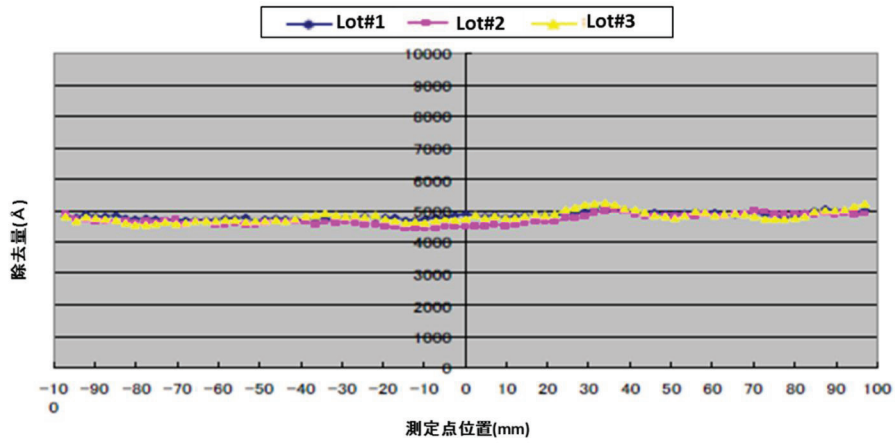


図 4-15 円環状工具の製造ロット別の除去量プロフィール

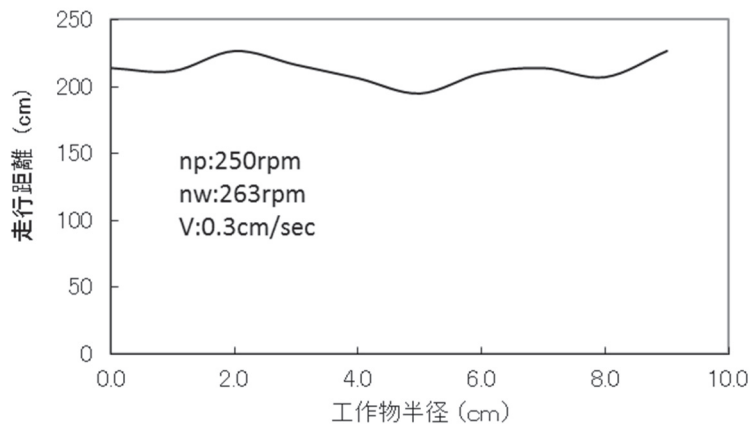


図 4-16 走行距離プロフィールの算出例

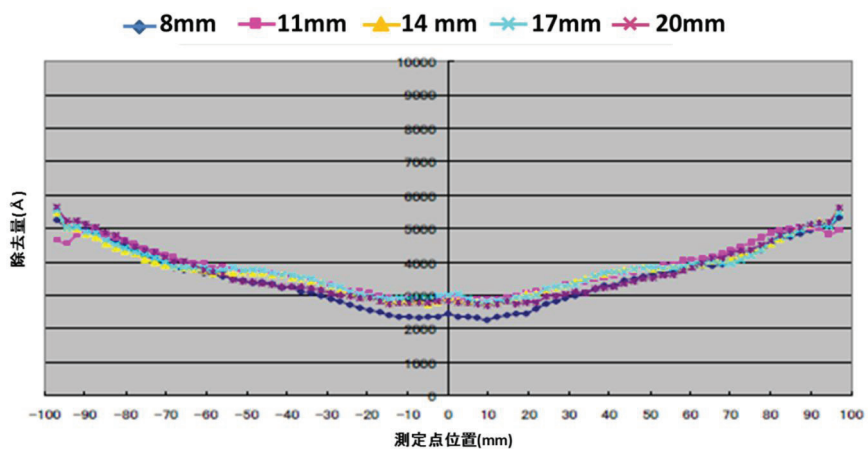


図 4-17 工具厚さに対する除去量プロフィール

4.4 パッド表面の水分量を制御する加工技術の検討

半導体ウエハとの摺動摩擦などを利用して、固定砥粒パッドから砥粒を放出させて遊離砥粒研磨を行う自己放出型固定砥粒パッドを研磨加工に利用する場合、摺動摩擦力を高めて砥粒の放出量を確保する必要がある。前節ではウエハと研磨パッドの接触面積を制御して研磨加工する加工技術について検討したが、本節では、パッド表面をセミドライ状態にしてウエハと研磨パッドの摺動摩擦力を高め、砥粒の放出量を確保する加工技術(以下セミドライ研磨技術という)を検討する。

加工液にスラリーや純水を使用して加工する場合、パッドとウエハ間に形成される水の薄膜による潤滑作用によって摺動摩擦が減少する。加工液にスラリーや純水を使用しないいわゆるドライ研磨加工の場合は、摺動摩擦力が最大となるが、ウエハ表面にスクラッチが発生することや、面内均一性が悪化するなど、ウエハ表面の品質を低下させる問題がある。本節では、パッド表面の最適な水分量を検討し、パッド表面をセミドライ状態として、200 mm φ ウエハに堆積した PTEOS (Plasma Tetra- Ethoxysilane) 膜を加工し、ウエハ表面の品質と除去速度を評価した結果[15]を報告する。

4.4.1 セミドライ研磨技術のパッド表面水分量の最適化

セミドライ研磨技術ではパッド表面の水分量に最適値が存在する。この最適値を検討するため、パッド表面の水分量と除去速度の関係を研磨加工実験により求めた。

加工実験には、図 4-5 に示す小型研磨機(ナノファクター社製 NF300)に、外径 300 mm φ、厚さ 3 mm の自己放出型固定砥粒パッドを搭載し、PTEOS 膜を堆積した 200 mm φ ウエハを 18 mm x 18 mm 角にダイシングして加工試料とし、直径 100 mm φ の研磨ヘッドに加工試料 3 枚を同心状に設置して、PTEOS 膜の除去量を測定した。自己放出型固定砥粒パッドは、平均粒径 0.2 μ m のセリア砥粒を固形

分比率 74 wt%で固定したものである。

パッド表面の水分量の測定には、赤外線式水分計(フジワーク社製 IM-3SCV)を使用した。赤外線式水分計の指示値は相対値を示すため、100 mm x 100 mm 角のパッドサンプルの含水率とパッドサンプルの中央部の水分量の指示値の関係を求めた。

図 4-18 にパッドの含水率と赤外線式水分計の指示値の関係を示す。含水率と指示値が直線関係にある領域では、パッド表面が乾燥することによって水分量が低下し、指示値が 2630 以下になるとパッド内部の含水率がパッド表面の水分に影響することを示唆している。パッドサンプルを含水率 6.5 wt%以下にするためには 5 時間以上の自然乾燥が必要のため、測定を中断した。

外径 300 mm ϕ 、厚さ 3 mm の自己放出型固定砥粒パッドの表面の水分量の測定では、パッドを純水で十分に湿潤させた後、回転数 100 rpm でパッドを回転させて、回転時間を変えてパッド表面の水分量を調整し、回転時間ごとにパッド表面を水分計で測定した。

図 4-19 にパッド表面の水分量と除去速度の測定結果を示す。図 4-19 は、表 4.7 に示す加工条件で PTEOS 膜の除去速度とパッド表面の水分計指示値との関係を示したものである。パッドを純水で十分に湿潤した状態(回転なし)で測定した水分計指示値は 7030 であり、このときの除去速度は 22 nm/min であった。除去速度は、回転時間を増加させて、水分計指示値が減少するにしたがって増加し、水分計指示値が 2500 で極大値 133 nm/min を示した。

図 4-18 と図 4-19 より、セミドライ研磨技術では、パッド表面の水分量が、PTEOS 膜の SiO₂ を水和する程度に微量で、パッド内部からパッド表面に水分が供給される状態の表面水分量に最適値があると考えられる。パッドから放出された砥粒は、わずかな水分に遊離した状態でパッドの構成材料であるバインダーの作用でパッド表面に粘性被膜を形成する。砥粒を含む粘性被膜は研磨加工中にパッドから排出されずにパッド表面に留まり、研磨加工に作用することで高い加工能力を維持するものと考えられる。

表 4-7 加工条件

加工試料	1 μ m PTEOS 膜(18x18mm 角)
加工圧力	39.2kPa
パッド回転数	40rpm
研磨ヘッド回転数	36rpm
加工液	使用せず
加工時間	1min

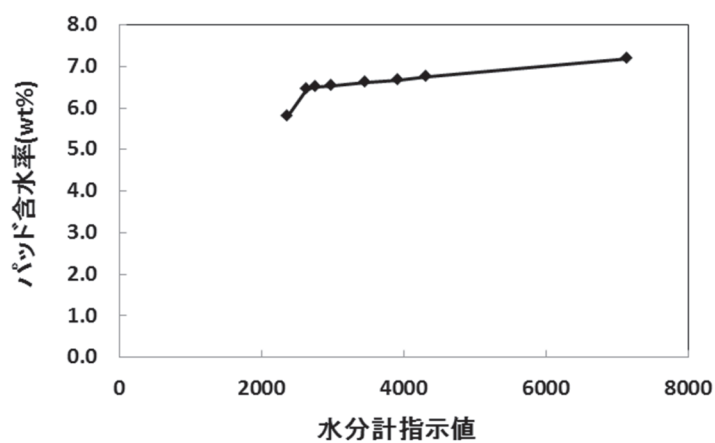


図 4-18 パッドの含水率と赤外線式水分計の指示値の関係

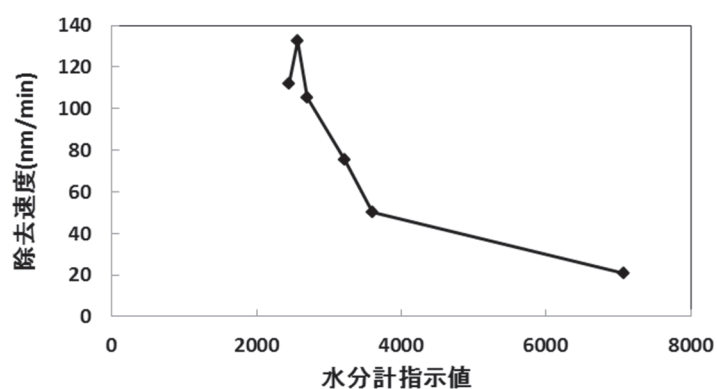


図 4-19 パッドの表面水分量と除去速度の関係

4.4.2 セミドライ研磨技術による加工特性

スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドをプラテン・ロータリ型研磨装置（MAT社製 AT-ARW-681MS）に搭載して 200 mm ϕ ウエハの PTEOS（Plasma Tetra-Ethoxysilane）膜をセミドライ研磨で加工した。使用した自己放出型固定砥粒パッドは、外径 600 mm ϕ 、厚さ 3 mm の研磨パッドで、平均粒径 0.2 μ m のセリア砥粒を固形分比率 74 wt% で固定したもので、パッド密度は 2.4 g/cm³ である。セミドライ研磨と比較するため、加工液に純水を使用した研磨加工と 1 wt% セリアスラリーを使用した研磨加工を実施した。

表 4-8 に主な加工条件を示す。加工特性として、除去速度、ウエハ面内不均一性、及び 0.2 μ m 以上のスクラッチ数を評価した。加工後の PTEOS 膜の除去量プロファイルは膜厚計(ナノメトリック社製 7200 型)を用いて、ウエハ径方向の測定点 21 点の残膜を測定し、初期膜厚の差から算出して求めた。除去速度は測定点の除去量の平均値から算出し、ウエハ面内不均一性は、測定点の除去量の標準偏差を平均値に対する百分率で算出した。スクラッチの発生個数は、同一加工条件で研磨したウエハを十分に洗浄、乾燥させた後、SPI スクラッチカウンター (KAL-Tencor 社製) を使用して測定した。

表 4-8 主な加工条件

加工試料	1 μ m PTEOS 膜(外径 200mm ϕ)
加工圧力	39.2kPa
パッド回転数	40rpm
研磨ヘッド回転数	36rpm
加工時間	1min

図 4-20 に、セミドライ研磨、純水を使用した研磨及び 1 wt% セリアスラリー研磨による除去量のプロファイルと比較して示す。図 4-20 に示す除去量のプロファイルは、加工直前にダイヤモンドコンディショ

ナを用いて 15 秒間のコンディショニングを行い、パッドを水洗した後に研磨加工して除去量を測定したものである。セミドライ①研磨とは、パッドを水洗した後、100 rpm で 4 分間パッドを回転させてパッド表面の水分を除去し、加工液を使用せずに加工する方法であり、セミドライ②研磨とは、パッド表面の水分の除去法として、パッドを回転させながら 5 秒間エアブローした後に加工する方法とした。セミドライ①及びセミドライ②によるパッド表面の水分計指示値は、水分除去操作ごと、及び測定場所により異なるが、平均すると、ともに約 3000 であった。

図 4-20 に示すように、純水研磨の除去速度は 57 nm/min と他の研磨方法と比較して低い値であり、遊離砥粒不足であることを示す。1 wt%セリアスラリー研磨では、除去速度は 301 nm/min と比較的高い値を示したが、ウエハ中央部の除去量が低く、ウエハ面内不均一性は 35%であった。これは、供給したスラリーがウエハ面に均等に分散されず、ウエハ中央部で遊離砥粒が減少するため、パッドに溝の設置などの対策を示唆するものである。セミドライ①研磨及びセミドライ②研磨は除去速度がそれぞれ 400 nm/min を示し、ウエハ面内不均一性も良好であることが示されている。特に、セミドライ②研磨によるウエハ面内不均一性は 4.9%で、良好な除去量のプロファイルを示した。

表 4-9 にスクラッチの発生個数を比較して示す。表 4-9 に示すように、セミドライ①研磨及びセミドライ②研磨では、スクラッチの発生個数がスラリー研磨の約 1/2 で、純水研磨と同程度である。スクラッチの発生は、遊離砥粒中に存在する粗粒や砥粒の凝集体によるもので、特に 1 μ m 以上の粗粒(砥粒の凝集体も含む)の個数とスクラッチ発生数には強い相間がある[16]といわれている。また、加工条件が同一であれば、加工量が多いほど加工に作用する砥粒数が多くなるため、スクラッチの発生量は加工量が多いほど多くなると予想される。しかし、表 4-9 に示す加工量の最も多いセミドライ①研磨及びセミドライ②研磨ではスクラッチ数が純水研磨と同程度であった。

セミドライ研磨技術は、パッド表面の水分を除去してパッドとウエハ間に形成される水の薄膜による潤滑作用を防止して、パッドとウエハ間に十分な摺動摩擦力を発生させ、砥粒の放出量を確保できる研磨法と言える。パッドから放出された砥粒は、わずかな水分に遊離した状態でパッドの構成材料であるバインダーの作用でパッド表面に粘性被膜を形成する。スクラッチの発生が少ない理由は、粘性被膜によって粗粒の作用が低減されるためと考えられる。

しかし、粘性被膜によってパッドの吸着力が増加し、加工中にウエハが研磨ヘッドから外れる(ウエハのデチャック)現象が見られ、研磨ヘッドの改良など、装置上の対応が必要なことが分った。

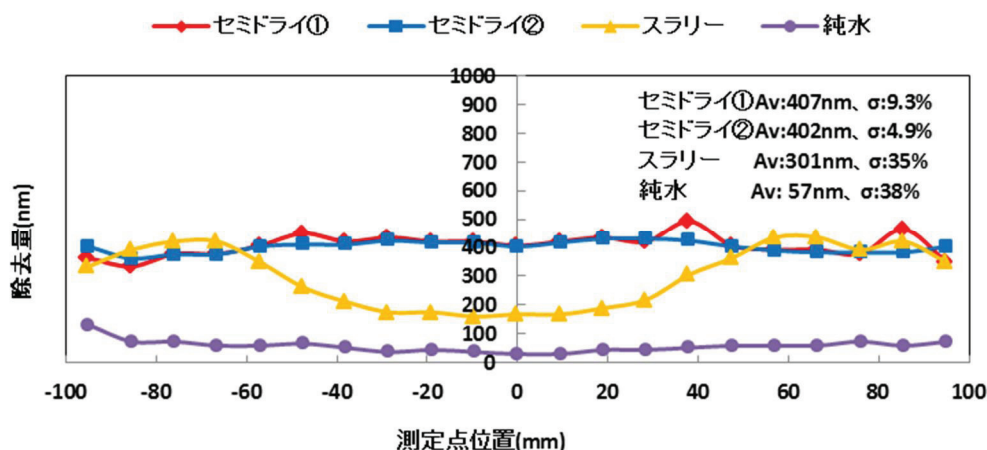


図 4-20 加工方法による除去量のプロファイル

表 4-9 スクラッチ発生個数の比較

	スクラッチ発生数	除去量
セミドライ①	27 個	407nm
セミドライ②	22 個	402nm
スラリー研磨	50 個	301nm
純水研磨	23 個	57nm

4.5 砥粒の強制放出による加工技術の検討

前節では、自己放出型固定砥粒パッドを研磨加工に利用する場合に、接触面積を制御する研磨技術及びパッド表面の水分量を制御する加工技術について検討した。本節では、砥粒の放出量をパッドコンディショニングによって制御する加工技術について、プラテン・ロータリ型研磨装置にスパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドを搭載し、パッドコンディショニングを利用して強制的にパッドから砥粒を遊離化させて、LSI デバイスの Al 多層配線用のテストウエハの平坦化加工を実施し、Al 多層配線プロセスへの適用を検討した。

LSI デバイスの Al 多層配線プロセスでは、Al 蒸着膜を RIE (Reactive Ion Etching) 加工法により配線パターンを形成し、配線パターンを層間絶縁膜で被覆して、その層間絶縁膜を平坦化加工し、その上に上層配線を形成する。層間絶縁膜の平坦化加工には CMP 加工が適用される。層間絶縁膜の平坦化加工の性能は、除去速度、ウエハ全体の均一性、チップ内均一性、過剰研磨量、及び表面の欠陥数で評価される。

図 4-21 に層間絶縁膜加工の Al 配線パターン依存の説明図[17]を示す。図 4-21 は Al 配線パターン上に層間絶縁膜を形成し、層間絶縁膜の凹凸面を平坦化研磨加工する工程を模式的に示したもので、層間絶縁膜が微細なパターン部分から平坦化され、最後に幅広パターンが平坦化される様子を示す。パターン底部面と平坦化完了後の層間絶縁膜面との差を過剰研磨量という。

Al 配線パターンでは 2 mm の幅広パターンから 50 μ m の微細な L&S (Line and Space) パターンを評価の対象とした。層間絶縁膜が Al 配線を被覆すると、Al 配線溝パターンとほぼ同じ凹凸形状の層間絶縁膜が製膜され、平坦化研磨加工ではすべての凹凸パターン部の凹凸が解消されるまで層間絶縁膜を除去するため、過剰研磨が必要である。Al 配線プロセスでは、過剰研磨量を低減すると層間絶縁膜の被覆量を低減してプロセスコストを下げることもできるので、平坦 CMP には

過剰研磨量の少ない高平坦化加工技術が求められる。

図 4-22 に自己放出型固定砥粒パッドを搭載したプラテン・ロータリ型研磨装置の研磨主要部の概要を示す。一般的なスラリーを使用した遊離砥粒研磨法では、パッド面上にスラリーを供給しながら、研磨パッド中心から半分の領域で研磨ヘッドを直線揺動させてウエハ研磨を行い、ウエハ研磨側の反対側の研磨パッド領域では、ウエハ研磨と同時にパッドコンディショニングが行われる。パッドコンディショニングがウエハ研磨と同時行われるため、in-situ コンディショニングと呼ばれる。パッドコンディショニングは、研磨パッドから研磨残渣や反応生成物を取り除き、パッド表面の品質を安定した状態に回復させるために使用される。本節では、研磨パッドに自己放出型固定砥粒パッドを使用し、加工液として純水を使用してパッドコンディショニングによる砥粒の強制放出による遊離砥粒研磨技術について検討する。

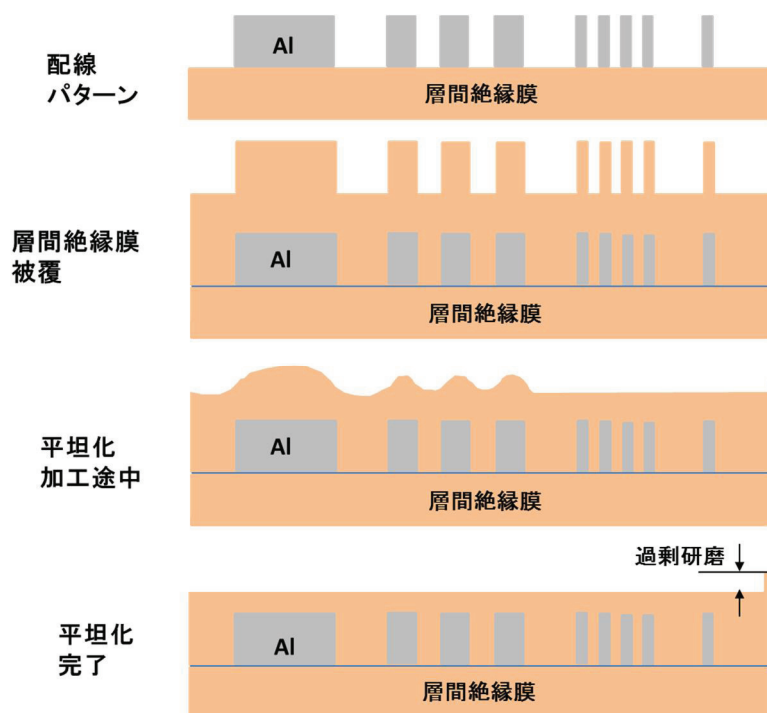


図 4-21 層間絶縁膜加工の Al 配線パターン依存性

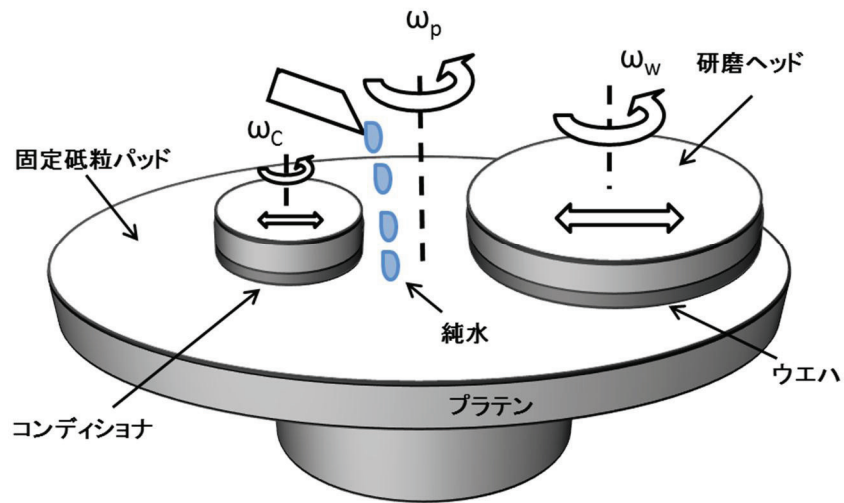


図 4-22 プラテン・ロータリ型研磨装置の研磨主要部の概要

4.5.1 砥粒の強制放出による研磨技術を用いた平坦化加工実験

プラテン・ロータリ型研磨装置（Applied materials 社製 MIRRA-3400）を使用し、ウエハ径 200 mm ϕ の Al 配線用のパターンウエハの平坦化加工の評価を行った[18]。Al 配線用のパターンウエハは、TEG (Test Element Group) ウエハとよばれ、Al 多層配線プロセスの平坦化加工特性を評価するために、各種の L&S (Line and Space) パターンや孤立パターンが PTEOS 膜で形成されたものである。

パッド径 540 mm ϕ 、平均粒径 $0.2 \mu\text{m}$ のセリア砥粒を固形分比率 74 wt% の自己放出型固定砥粒パッドを製作し、ウエハ面に遊離砥粒が均等に分散するよう、パッドに幅 2 mm の同心円と放射状の溝を設置した。図 4-23 に自己放出型固定砥粒パッドの外観写真を示す。

コンディショナには、外径 100 mm ϕ のディスク型コンディショナを使用し、3.3 節で述べたコンディショナの揺動速度制御法を利用して直線揺動させた。砥粒の遊離化量はパッドの消耗率に依存するので、コンディショニング条件(コンディショナの回転数、コンディショニング加重量)とコンディショナの種類(使用されるダイヤモンド砥粒の種類や形状)を変えてパッドの消耗率を変化させた。

パッド密度は 2.4 g/cm^3 で、パッドのセリア砥粒含有率は 74 wt% で

あるので、直径 540 mm ϕ のパッドの消耗率 $1 \mu\text{ m/min}$ 当たりの砥粒遊離化量は、 0.4 g/min となる。これは純水の供給量を 50 mL/min とした場合、 0.8 wt\% のセリアスラリーを使用することに相当する。

図 4-24 にパッド消耗率と PTEOS 膜の除去速度の関係を示す。図 4-24 は、パッド回転数 93 rpm、ウエハ回転数 90 rpm、加工圧力 5 psi (34.5kPa)、加工時間 1 分間とし、純水供給量を 50 mL/min としたときの除去速度を示すもので、パッド消耗率はコンディショニング条件とコンディショナの種別を変えて得たものである。図 4-24 より、除去速度 300 nm/min をウエハ加工プロセス条件とすると、パッド消耗率 $2 \mu\text{ m/min}$ のコンディショニング条件を選定することになり、パッド厚 2.5 mm を消耗するまでに、1250 枚のウエハを加工できる。

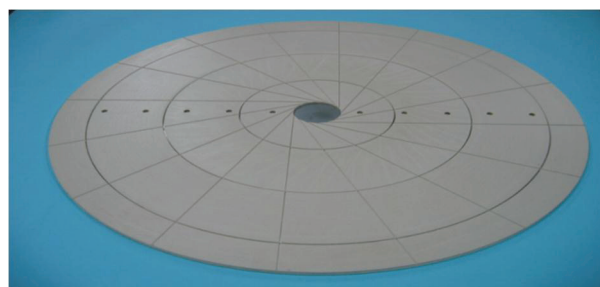


図 4-23 自己放出型固定砥粒パッドの外観写真

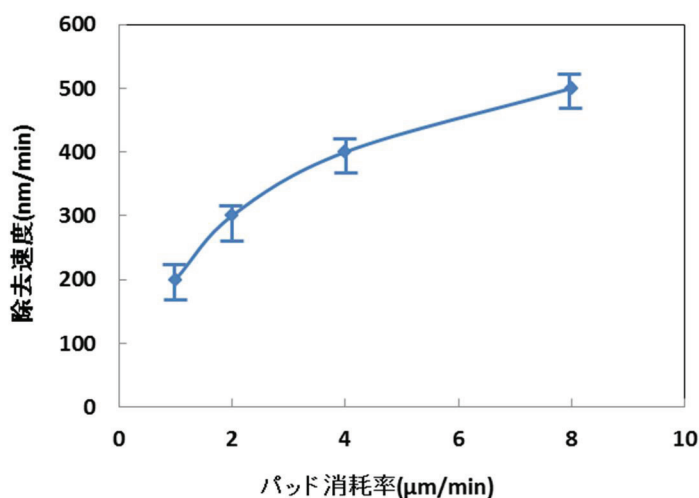


図 4-24 パッド消耗率と除去速度の関係

図 4-25 にパッド回転数を 93 rpm、ウエハ回転数を 90 rpm、加工圧力を 5 psi (34.5kPa)、加工時間を 1 分間、純水供給量を 50 mL/min とし、パッド消耗率 $2 \mu\text{m}/\text{min}$ の加工条件で加工したときの、TEG ウエハの層間絶縁膜パターンの段差解消性能を示す。TEG ウエハの各チップ内には、 $2000 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ の L&S (Line and Space) パターンが形成されている。パターン段差の測定箇所は、それぞれ TEG ウエハの同一チップ内の同一パターン上とした。図 4-25 は、PTEOS 平膜の除去速度が $300 \text{nm}/\text{min}$ である加工条件で、TEG ウエハをそれぞれ 40 秒、80 秒及び 120 秒間加工したときの $2000 \mu\text{mL}\&\text{S} \sim 50 \mu\text{mL}\&\text{S}$ の各パターンの段差の経時変化を示すもので、PTEOS 平膜の除去量 200 nm、400 nm、600 nm と段差変化の関係を示したものである。図 4-25 は、除去量の増加に従って、サイズの小さいパターンから順に減少し、除去量 600 nm で全ての L&S パターンの段差がほぼゼロになり、平坦化が完了したことを示している。

図 4-26 に段差形状の除去量依存性を示す。図 4-26 は、図 4-25 をもとに、各サイズの L&S パターを横軸上に一列に並べて、L&S パターンの断面を比較できるように表示したもので、各サイズの L&S パターの段差が解消される様子を比較することができる。図 4-26 は、平膜の除去量 200 nm ではパターンの底部は加工されずパターンの凸部のみが除去されるが、除去量 400 nm では、パターンの底部がパターン初期状態の底部から $0.12 \mu\text{m}$ 程度除去され、除去量 600 nm では、パターンの底部が $0.2 \mu\text{m}$ 程度除去されて、全ての L&S パターの段差が解消されることを示す。

従来の発泡ポリウレタンパッドとスラリーによる平坦化 CMP では、サイズの小さい L&S パターンが平坦化された時点で、サイズの大きい L&S パターンの段差が解消されずに残り、平坦化を完了するためには大きな過剰研磨量が必要であるが、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドによる平坦化加工では、過剰研磨量が $0.2 \mu\text{m}$ 程度で平坦化加工完了でき、良好な平坦化加工が実施できることが分かった。

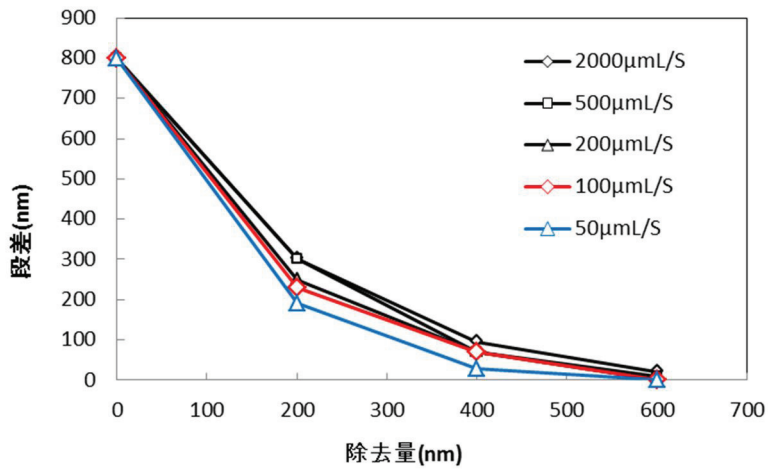


図 4.25 層間絶縁膜パターンの段差解消性能

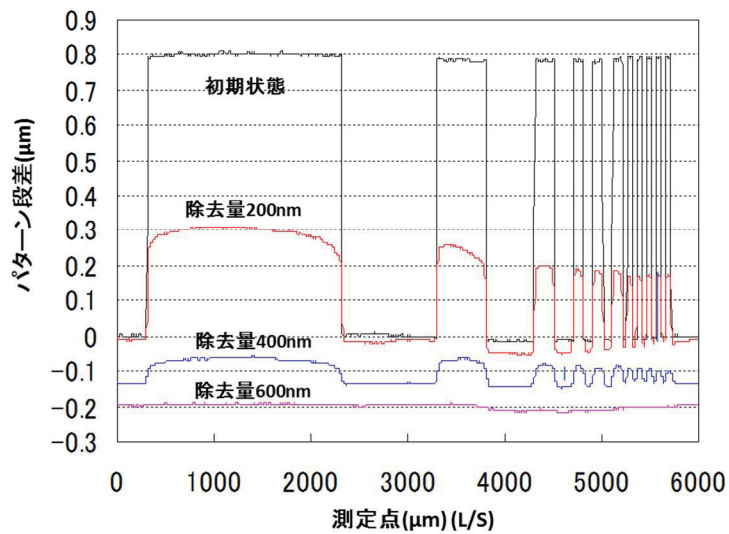


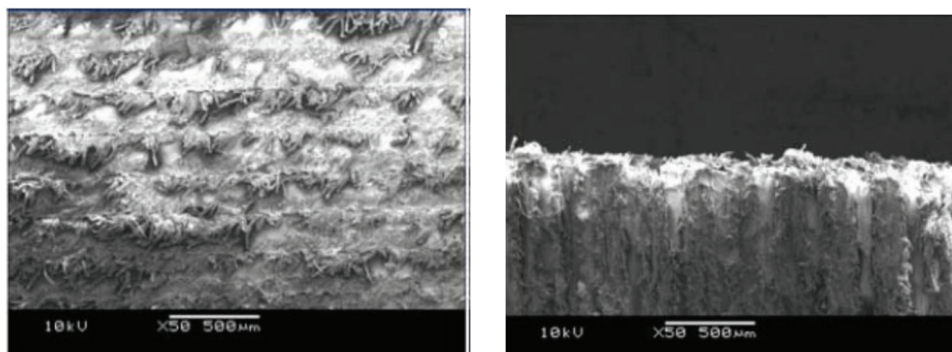
図 4.26 段差形状の除去量依存性

4.5.2 自己放出型固定砥粒パッドによる平坦化機構の考察

スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドを使用して、Al 配線の評価用 TEG ウエハを平坦化加工した結果、 $0.8 \mu\text{m}$ の初期段差が、 $0.2 \mu\text{m}$ の過剰研磨量で解消でき、新型固定砥粒パッドの良好な平坦化性能が確認できた。この要因をパッドの表面構造から検討する。

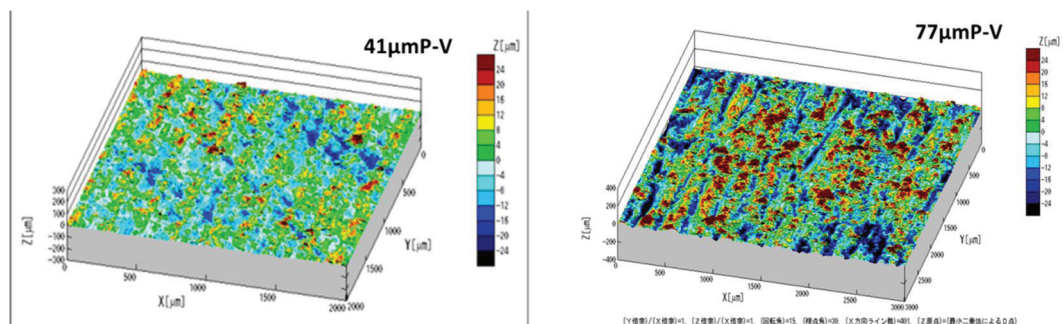
図 4-27 にパッド消耗率 $2 \mu\text{m}/\text{min}$ のコンディショニングを実施した後のパッド表面と断面の SEM 写真を示す。PET 不織布の繊維が畝状に伸びて露出していることが確認される。図 4-27 より、パッド表層に繊維からなる軟質層が形成され、軟質層の下部のパッド基材部である硬質層は、コンディショナによって凹凸が形成される構造になっていることが推測される。

図 4-28 に 3次元粗さ測定器(小坂研究所製 SE3500K) を使用して測定したパッドの 3次元プロファイルを消耗率 $2 \mu\text{m}/\text{min}$ のコンディショニング後と消耗率 $6 \mu\text{m}/\text{min}$ のコンディショニング後を比較して示す。消耗率 $2 \mu\text{m}/\text{min}$ のときの表面粗さは、P-V (Peak to Valley) 値で $41 \mu\text{m}$ であり、消耗率 $6 \mu\text{m}/\text{min}$ のときの表面粗さは、P-V 値 $77 \mu\text{m}$ であった。



(a)パッド表面の SEM 写真 (b)パッド断面の SEM 写真

図 4-27 コンディショニング後のパッド表面と断面の SEM 写真



(a) 消耗率 $2 \mu\text{m}/\text{min}$ (b) 消耗率 $6 \mu\text{m}/\text{min}$

図 4-28 パッド表面 3次元プロファイル比較

図 4-29 にパッド表面の 2 次元プロファイルの模式図を示す。図 4-29 は図 4-28 の 3 次元プロファイルの断面を模式的に 2 次元で示したもので、パッド表面を Peak の値から下面方向に順次切り取っていくと、切り取られた位置で図 4-29 の朱線で示す露出部が現れる。露出部の面積が測定範囲の面積の 50%に相当する切り取り位置が $Z=0$ に相当する。Valley 部では露出面積が測定範囲の面積と等しく 100%となる。

図 4.30 に 3 次元プロファイルデータを基にして、Z 方向の切り取り位置と露出面積の関係を消耗率 $2 \mu \text{ m/min}$ のときと消耗率 $6 \mu \text{ m/min}$ のときで比較して示す。図 4.30 に示す切り取り位置をウエハがパッドに接触してから圧縮されて沈み込む変位量とすると、露出面積は、圧縮による変形が無視できる範囲では、ウエハとパッドとの接触面積に相当する。

図 4-31 に接触面積とパッド沈み込量の関係を示す。図 4-31 は、Peak 位置を基準として、Peak 位置からの切り取り位置をパッド沈み込量とし、切り取りによる露出面積をウエハとパッドとの接触面積として表示したものである。図 4-31 は、ウエハ面積の 5%の接触面積となる沈み込み量が、消耗率 $2 \mu \text{ m/min}$ のコンディショニング条件では $9.7 \mu \text{ m}$ ののであるのに対して、消耗率 $6 \mu \text{ m/min}$ のコンディショニング条件では $20 \mu \text{ m}$ となることを示す。また、2.5%の接触面積では、それぞれ、 $6.8 \mu \text{ m}$ 、 $14.4 \mu \text{ m}$ の沈み込み量となり、パッド表層の軟質層の厚さが大きく異なることを示す。

図 4-32 に、消耗率 $2 \mu \text{ m/min}$ のときと消耗率 $6 \mu \text{ m/min}$ のときの層間絶縁膜パターンの段差解消性能を比較して示す。TEG ウエハの仕様が異なり L&S パターンの初期段差が異なるが、消耗率 $6 \mu \text{ m/min}$ のときの段差解消特性では、 $500 \mu \text{ m}$ の L&S パターンの段差解消が除去量の増加とともに小さくなり、 $500 \mu \text{ m}$ より微細な L&S パターンの段差解消に追いつけなくなることを示す。

一般に CMP 平坦化加工では、硬質パッドは平坦性がよいが加工速度や面内均一性に劣り、軟質パッドは良好な砥粒保持性のため加工速度が良いが平坦性能が劣る [19],[20]とされている。スパイラル形状

の自己放出型固定砥粒パッドでは、コンディショニング条件によって、硬質なパッド基材の上部に軟質層を制御して形成することができ、ウエハ面とパッドの接触面積を制御できる。このため、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドは軟質層で高い加工速度を維持して、硬質なパッド基材で高い平坦化加工が行える機能を有していると考えられる。

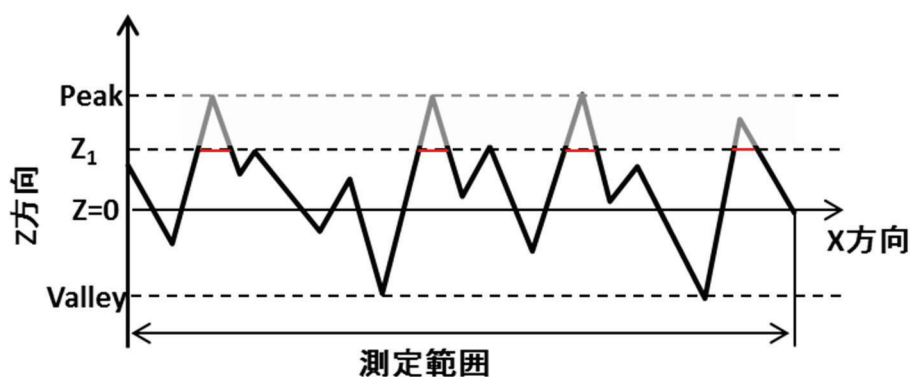


図 4-29 パッド表面の 2 次元プロファイルの模式図

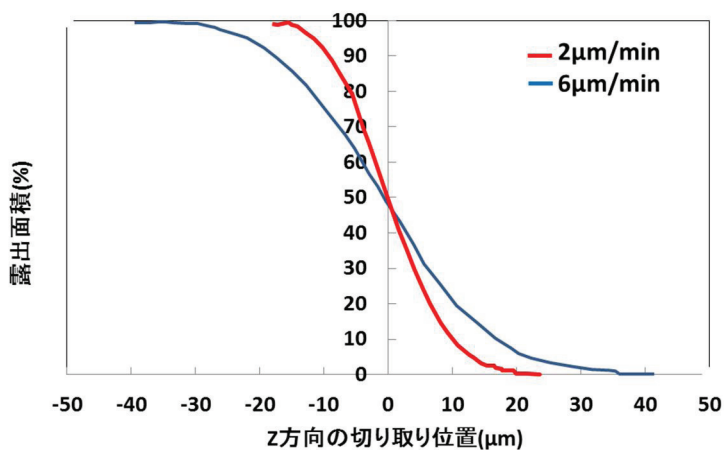


図 4-30 切り取り位置と露出面積の関係

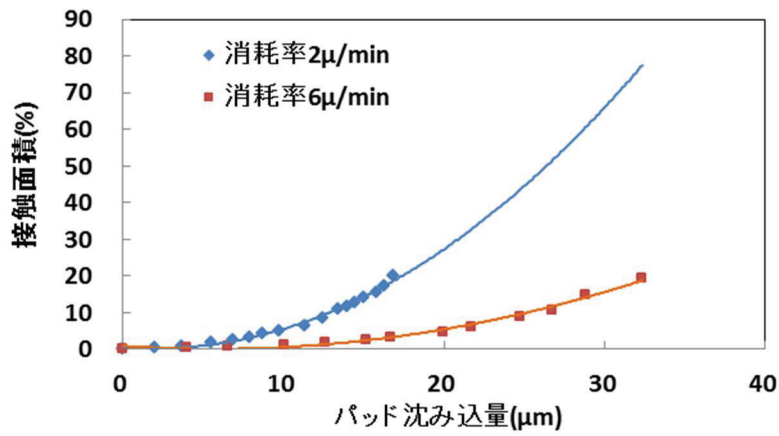
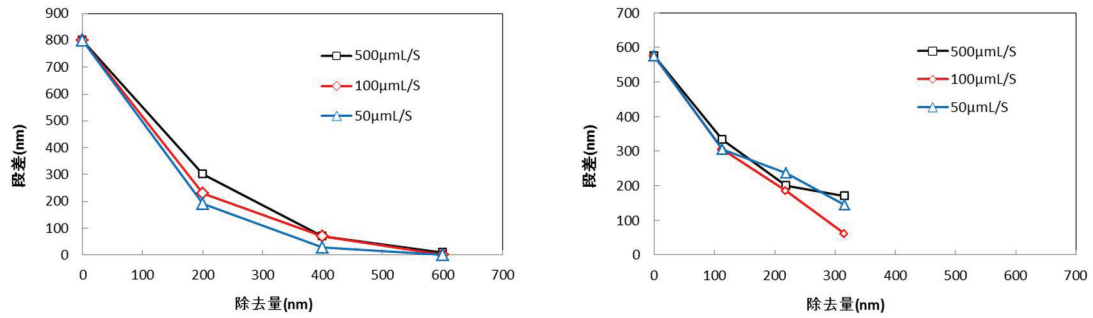


図 4-31 パッドーウエハの接触面積とパッド沈み込量の関係



(a) 消費率 2 μ m/min

(b) 消費率 6 μ m/min

図 4-32 コンディショニングによる段差解消性能比較

4.6 まとめ

LSIデバイスのAl多層配線技術の層間絶縁膜に使用されるシリコン酸化膜を研磨加工の対象として、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドによる研磨加工技術を検討した。まず、工作物である半導体ウエハとパッドの摺動摩擦を利用して砥粒を自己放出させる加工技術では、ウエハとパッドの接触面積を制御する加工技術とパッド表面の水分量を制御する加工技術を検討した。また、パッドコンディショニングを利用した砥粒の強制放出による加工技術を検討し、Al多層配線プロセスに良好に適用できることを示した。

本章第4.2節では、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドの構造や材料選定などのパッドの詳細を述べた。

4.3節では、接触面積を制御する加工技術について述べ、パッド表面の前処理と高速相対速度の条件で加工することが有効であることを示し、加工量のプロファイルが研磨走行距離プロファイルに大きく依存することを示した。

4.4節では、パッド表面の水分量を制御する加工技術について述べ、パッド表面をセミドライ状態にしてウエハを加工することで、パッドの表面に遊離砥粒を含有する粘性被膜が形成され、除去速度の向上とデフレクトの低減に寄与することを示した。

最後に、4.5節では、砥粒の強制放出による加工技術について述べ、パッドコンディショニングによってパッド表面の形状を制御することで、Al多層配線用のテストウエハの $2000\text{m}\mu \sim 50\mu\text{m}$ の各種L&Sパターンを $0.2\mu\text{m}$ の過剰研磨で平坦化できることを示し、Al多層配線技術へ良好に適用できることを示した。

第4章の参考文献

- [1] 安永暢男、高木純一郎、“精密機械加工の原理”、日刊工業新聞社、初版第1版発行、pp.6-65 (2011)
- [2] 木下正治、“CMP技術の基礎と実例講座シリーズ第20回”、グローバルネット(株)、pp.2-1-1~2-3-16 (2003)
- [3] 安井 他、“機械と工具”、工業調査会、5, p.45 (2002)
- [4] 武野泰彦、“電子材料”、Vol.30 No.5 工業調査会 (2000)
- [5] 特許公報、特開 2001-179609, “研磨パッド”、(株)キロテクノ、(株)エーイーシー
- [6] 特許公報、特開 2002-307294, “研磨装置および方法”、(株)荏原製作所
- [7] 特許公報、特開 2002-036129, “研磨パッド及びその製造方法”、(株)キロテクノ
- [8] 富永茂、榊原晋、土肥俊郎、埼玉大学地域共同研究センター紀要、2, pp.90-95 (2001)
- [9] 榎本俊之、藤田努、富永茂、鈴木眞、日本機械学会論文集、C編 73(726), pp.639-644 (2007)
- [10] 藤田努、榎本俊之、富永茂、鈴木眞、日本機械学会論文集、C編 73(737), pp.219-224 (2008)
- [11] 藤田努、榎本俊之、富永茂、鈴木眞、日本機械学会論文集、C編 73(747), pp.2803-2808 (2008)
- [12] 高崎亮、藤田努、榎本俊之、富永茂、生産加工・工作機械加工部会:生産と加工に関する学術講演会 2008(7)、pp.199-200 (2008)
- [13] 富永茂, “次世代 CMP パッドの開発動向” クリーンテクノロジー, 8月号、(2003)
- [14] 富永茂、“CMP技術の基礎と実例講座シリーズ第20回”、グローバルネット(株)、pp.3-1-1~3-1-11 (2003)
- [15] 代田渉、榊原晋、富永茂、土肥俊郎、埼玉大学地域共同研究センター紀要、3, pp.14-20 (2002)

- [16] 吉田、木下正治、第 19 回プラナリゼーション CMP 委員会、研究試料 (2001)
- [17] H.Nojo, M.Kodera, and R.Nakata, Proc. IEEE IEDM, pp.349-352 (1996)
- [18] 富永茂、“最新 CMP 技術と周辺部材”、技術情報協会、pp.55-56 (2008)
- [19] JA.Greenwood, and JBP.Williamson, Proc. the Royal Society of London, Series A, vol.295, No.1442, pp.300-319 (1966)
- [20] J.Luo, and DA.Domfeld, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol.14, No.2, pp.112-133 (2001)

第 5 章

Cu 配線材を対象とした
複合電解研磨技術の研究

5.1 緒言

平坦化 CMP (Chemical Mechanical Polishing) 技術は、LSI デバイスのプロセス技術のうち、多層配線形成プロセス技術や素子分離プロセス技術に欠かせない技術である。近年、LSI デバイスの高速化、大容量化、及び低消費電力化により、高密度多層配線プロセスに配線抵抗の低い Cu 配線と低誘電率層間絶縁膜 (low-k 材料) の適用が進められているが、界面拡散抑制構造の形成、低圧・高速研磨でのエロージョン、デッシングの抑制、バリア膜の低抵抗性と高バリア性の両立など、新たな課題[1]も出てきている。特に low-k 材料は機械的強度が低いため、従来の Cu-CMP による Cu 配線材の平坦化加工の際には、加工による機械的な応力によって層間剥離などのダメージを受けることがあった。そのため、Cu 配線材の平坦化加工に低圧力条件で高速加工を目的とした複合電解研磨 (e-CMP : electro-Chemical Mechanical Polishing) 技術が検討[2]~[7]されてきた。

本章では、Cu 配線材の e-CMP 技術を、低圧力条件、高速加工条件での平坦化加工特性の観点から検討する。まず 5.2 節で、従来から金属面の鏡面仕上げ加工に利用されている電解研磨 (ECP : Electro-Chemical Polishing) 技術を、Cu 配線材の平坦化加工に適用するときの課題を検討し、e-CMP 技術と ECP 技術の平坦化加工機構を比較して、e-CMP 技術の平坦化加工機構の特徴を明確にする。5.3 節では、開発した非接触電極型複合電解セルパッドの概要を説明し、5.4 節で超 LSI デバイスの Cu 配線形成プロセスに適用するため、非接触電極型複合電解セルパッドを用いた e-CMP 技術を検討する。最後に 5.5 節で、LSI デバイスの大容量化・多機能化技術として期待される 3 次元積層デバイスの配線形成へ適用するため、非接触電極型複合電解セルパッドを用いた Hybrid CMP/e-CMP プロセスについて検討する。

5.2 複合電解研磨技術と電解研磨技術の平坦化加工機構の比較

本節では、従来から金属面の鏡面仕上げ加工に利用されている電解研磨（ECP）技術を、LSI デバイスの Cu 配線プロセスに適用する場合を想定して、ECP 技術の Cu 配線材の平坦化加工の課題を検討する。そして、複合電解研磨（e-CMP）技術と ECP 技術の平坦化加工機構を比較し、e-CMP 技術が低圧力、高速加工の条件で高い平坦化加工を実現でき加工技術であることを明確にする。

5.2.1 電解研磨の平坦化加工機構

ECP 加工は、ステンレス製部品などの金属の鏡面仕上げ加工として広く利用されている。ECP 加工技術を Cu 配線プロセスの平坦化加工技術に適用する場合、金属の鏡面仕上げ加工技術とは異なる課題がある。以下にその課題を説明する。

直流電源のプラス極を Cu 膜に接続（アノードバイアスという）し、対極板にマイナス極を接続（カソードバイアスという）して Cu 膜と対極板の間に電解液を満たすと、Cu 膜の電解セルが形成される。Cu 膜表面（アノード）から Cu が電子を放出して Cu イオンとなって溶解し、対極板（カソード）表面では電解液の陽イオンがカソードからの電子と結合して電気回路が形成され、Cu が継続して溶解する。アノード及びカソードと電解液が接する部分は拡散層と呼ばれ、アノード近傍の拡散層では Cu イオンの濃度勾配に比例して Cu イオンが電解液に移動する。図 5-1 に Cu 膜の電解セルを模式的に示す。図 5-1 は部分的に凹部が形成された Cu 膜ウエハの電解セルの模式図である。ここでは、凹部底面をトレンチ Cu 面として Cu 膜表面として区別する。

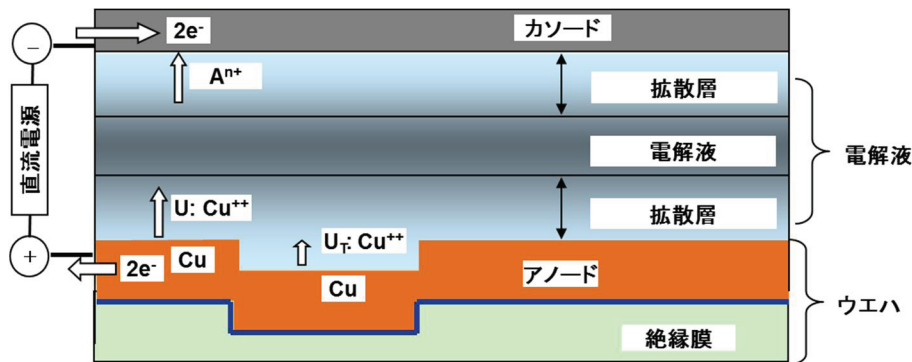


図 5-1 Cu 膜ウエハの電解セルの模式図

Cu の溶解反応は、(5.1)式に示すように 2 電子反応であるため、ファラデー定数を F (96485 A sec) とすると $2F$ の電気量で 1 mol の Cu が Cu 膜から溶解する。



従って、Cu 膜の溶解速度 R ($\mu\text{m}/\text{min}$) は、Cu の原子量を M (63.5g)、Cu 膜の密度を ρ ($8.9\text{g}/\text{cm}^3$)、電解電流密度を i (A/cm^2) とすると、(5.2)式で表される。

$$R = (M / 2F \rho) i = 22.02 i \quad \dots (5.2)$$

電解によって Cu^{2+} が拡散層を横切るフラックス J ($\text{mol}/\text{cm}^2/\text{sec}$) は、電解反応速度が Cu^{2+} 濃度の拡散律速反応であると仮定すると、拡散層の Cu^{2+} 濃度を C_x (mol/cm^3)、 Cu^{2+} の拡散係数を D ($1/\text{cm}^2 \cdot 1/\text{sec}$)、拡散層の厚さを δ (cm) として、フィックの第一法則より、(5.3)式で近似 [8]される。

$$J = D (dC_x / dx)_{x=0} = D \Delta C / \delta \quad \dots (5.3)$$

ここで x (cm) は Cu 膜表面から電解液方向の距離で、 ΔC は Cu 膜表

面と電解液の Cu^{2+} 濃度の差である。1 mol の Cu^{2+} 濃度を電解するのに必要な電気量が $2F$ であるので、電解電流密度 i は(5.4)式で表される。

$$i = 2F J = 2F D \Delta C / \delta \quad \dots (5.4)$$

(5.2)式と(5.4)式により、Cu 膜の溶解速度 R ($\mu \text{ m/min}$) は(5.5)式で表され、拡散層の厚さ δ に反比例する。ただし、 ΔC がほぼ一定な系を仮定して $K (=D M \Delta C / \rho)$ を定数とした。

$$R = (D M \Delta C / \rho) (1 / \delta) = K / \delta \quad \dots (5.5)$$

図 5-2 に Cu 膜ウエハの段差部と拡散層の拡大図を示す。凹部の段差を H とすると、トレンチ Cu 面の拡散層は Cu 膜表面より H だけ厚くなり、トレンチ Cu 面と電解液との Cu^{2+} 濃度差 ΔC を一定と仮定すると、(5.5)式よりトレンチ Cu 表面の溶解速度 R_T は Cu 膜表面の溶解速度 R_F より小さくなる。このため、段差 H は電解時間の経過とともに減少する。段差を電解時間 t の関数 $H(t)$ とすると、段差の単位時間当たりの変化量 $dH(t)/dt$ は、トレンチ Cu 面の溶解速度 R_T と Cu 膜表面の溶解速度 R_F の差であるから、(5.6)式で表される。

$$dH(t)/dt = R_T - R_F = K (1/(\delta + H(t)) - 1/\delta) \quad \dots (5.6)$$

(5.6)式を初期条件 $H_{t=0}=H_0$ (初期段差) として解くと、(5.7)式を得る。

$$\lambda / H_0 = (1 - h) - \alpha \text{Ln}(h) \quad \dots (5.7)$$

ここで、 λ は Cu 膜表面の Cu の除去量で $\lambda = K t / \delta$ であり、 h は段差で $h = H / H_0$ 、 α は拡散層の厚さで $\alpha = \delta / H_0$ である。

(5.7)式の計算結果を図 5-3 に示す。図 5.3 より、拡散層が初期段差の 2 倍 ($\alpha = 2$) である電気化学系での電解研磨では、段差が解消される

ためには、初期段差の 10 倍程度の除去量が必要であり、初期段差の 2 倍程度の除去量で段差を解消するためには、拡散層の厚さが極端に薄い ($\alpha=0.25$) 電気化学系で電解研磨を実施する必要があることが分かる。拡散層の厚さを極端に薄くして、段差解消のための除去量を少なくする電気化学系を実現するためには、(5.4)式から、電解電流密度 i を極端に大きくするか、電解液の Cu^{2+} 濃度を高くして、Cu 膜表面と電解液の Cu^{2+} 濃度の差 ΔC を小さくする必要があることが分かる。しかし、電解電流密度 i を大きくすると Cu 膜表面の Cu^{2+} 濃度が増加して ΔC が増加するので、一般的な電解研磨では段差を解消のために除去量を少なくすることは困難である。

LSI デバイスの Cu 配線形成プロセスでは、Cu 膜を厚く製膜することや、Cu 膜の除去量を多くすることは、プロセスのスループットやコストの面で不利である。ECP 技術を利用して Cu 配線形成を行うためには、トレンチ部のイオン拡散を抑制する電気化学系を使用する方法や、アノードとカソードの間隔を狭めて Cu 膜表面とトレンチ Cu 面の電界強度に差を持たせる方法などが提案[9]されているが、実用プロセスへ適用するためには、装置化やプロセスデータの蓄積などの課題がある。

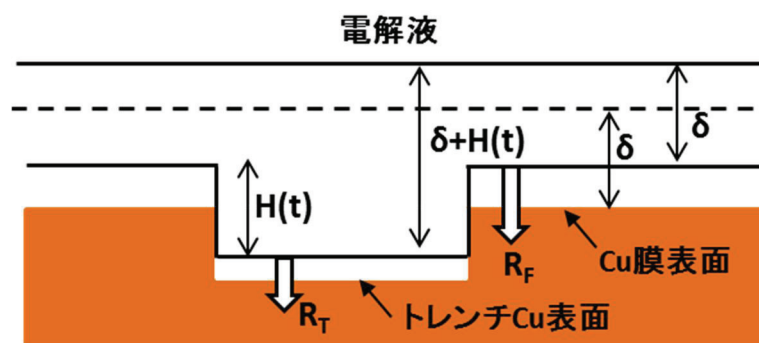


図 5-2 Cu 膜ウエハの段差部と拡散層の拡大図

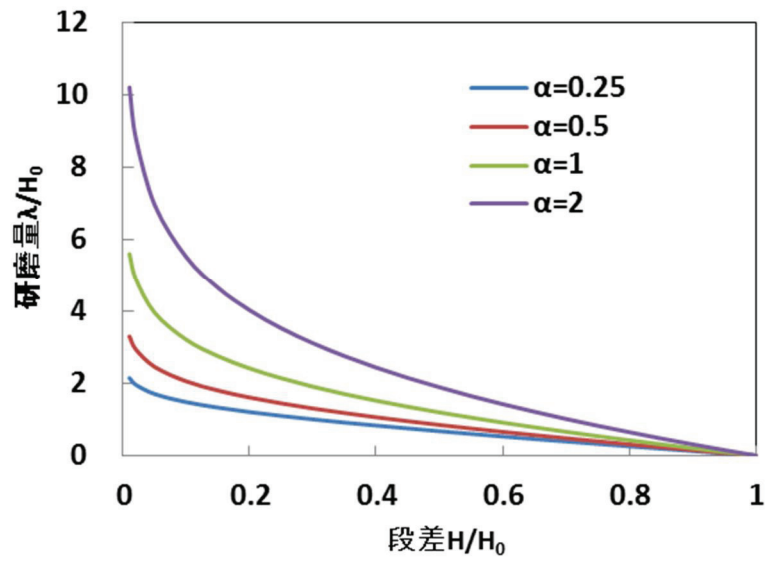


図 5-3 電解研磨による研磨量と段差解消性の関係

5.2.2 複合電解研磨の平坦化加工機構

電解研磨 (ECP) 技術では、Cu 膜表面から Cu^{2+} を電解液に直接移動させる電気化学系が選ばれるが、複合電解研磨 (e-CMP) 技術では、Cu 膜表面やトレンチ Cu 面に電気化学反応を阻止する膜 (不動態膜) として Cu 酸化物や Cu 錯体を形成させる電気化学系が選ばれ、Cu 膜表面の不動態膜を機械的に除去することによって平坦化加工を行う。このため、e-CMP 技術は、ECD 技術と比較して少ない Cu 膜の除去量で平坦化加工が行える技術である。

電解液に錯化剤を添加して、電気化学的に酸化された Cu 膜表面に Cu 錯体膜が形成される電気化学系では、Cu 錯体膜の形成反応は、(5.8) 式及び(5.9)式に示すように、Cu が電気化学的に酸化され、Cu 表面に吸着された錯化剤と反応して Cu 錯体膜が形成される。ただし、 n は 1 又は 2 である。



ここで、A は錯化剤であり、CuA は Cu 錯体を意味する。

図 5-4 に、上記した電気化学系の e-CMP における加工機構の説明図を示す。図 5-4 は Cu 配線材が絶縁膜に埋め込まれるプロセスを模式的に示したものである。図 5-4(a) で Cu 膜表面に錯化剤が吸着され、図 5-4(b) で電気化学的に酸化された Cu イオンと錯化剤が反応して Cu 膜に Cu 錯体膜が形成される。次いで図 5-4(c) で Cu 膜表面の Cu 錯体膜が選択的に機械加工によって除去され、新たな Cu 膜が露出する。図 5-4(a) ~ (c) に示すプロセスが繰り返され、Cu 膜表面がトレンチ Cu 面と同一レベルに達すると、Cu 膜表面の残膜がすべて除去され、図 5-4(d) に示すように配線形成が完了する。

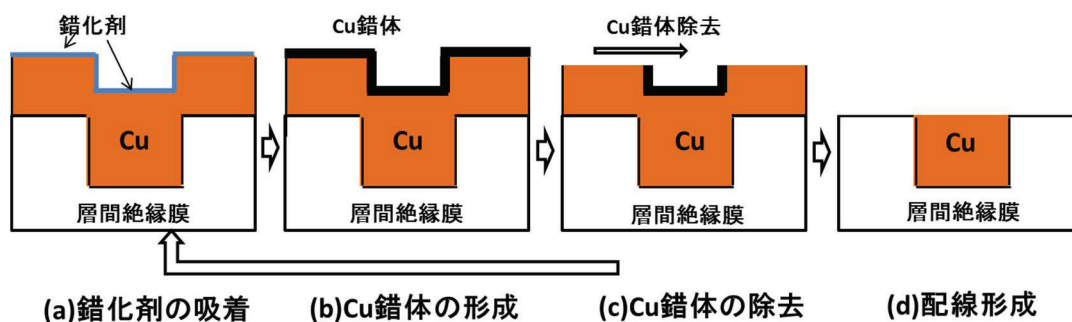


図 5-4 e-CMP における加工機構の説明図

Cu 錯体膜は電気化学的に安定な膜であり、研磨による機械加工で容易に除去できる膜であることが望ましい。Cu 錯体膜形成に有効な電解液組成として、キレート剤、酸化剤、防錆剤、重合防止剤、pH 調整剤からなる多成分電解液が提案[10]されている。

Cu-CMP 用の研磨液に BTA (Benzotriazole: $C_6H_4N_3H$) やグリシン (H_2NH_2COOH) を添加すると、グリシンは CuO 層に Cu 錯体膜を形成し、BTA は Cu_2O 層に Cu 錯体膜形成を形成する。特に、BTA は、Cu の防食剤として従来から利用されているもので、Cu-BTA 錯体は酸性水溶液中での耐エッチング性に優れ[11]ている。

クエン酸水溶液にそれぞれ BTA とグリシンを添加した電解液を使用して e-CMP を実施し、不動態膜形成剤としての比較評価を実施した結果[12]では、グリシンと比較して BTA がより良好な不動態膜を形成した。クエン酸水溶液に BTA、リン酸塩、界面活性剤を添加した電解液を使用して Cu 平膜 (パターン形成のない平膜) を e-CMP 加工し、電解電流密度に対する Cu 膜の除去速度を測定した結果を図 5-5 に示す。図 5-5 は Cu 平膜の除去速度が電解電流密度とはほぼ比例関係にあることを示し、比例定数は 18.46 であることを示す。

Cu の酸化反応が 2 電子反応であることを仮定したときの Cu 溶解速度 ($\mu m/min$) は、(5.2)式で表される。(5.2)式の比例定数が 22.02 であるので、上記の測定結果は Cu の酸化反応が 2 電子反応であることを示唆する。

Cu-BAT 錯体は 1 電子反応である。しかし、クエン酸水溶液に BTA、

リン酸塩、界面活性剤を添加した電解液による電気化学系では、Cuの酸化反応が2電子反応であり、Cu膜表面ではCuの溶解反応が生じていると考えられる。このため、e-CMPの平坦化加工機構として、図5-6に示す加工機構が考えられる。図5-6(a)はCu膜表面にCu-BAT錯体が形成されることを示し、次いで図5-6(b)はCu膜表面のCu錯体膜が選択的に機械加工によって除去され、Cu膜が露出してCuイオンとして溶解することを示す。Cu膜表面がトレンチCu面と同一レベルに達すると、図5-6(c)に示すようにCu膜表面の残膜がCuイオンとして溶解し、図5-6(d)に示す配線形成が完了する。

すなわち、露出したCu膜表面ではCu-BAT錯体が形成されずにCu²⁺が直接電解液に溶解し、トレンチCu面ではCu-BAT錯体が形成されてCuの溶解を阻止し、トレンチの段差が解消されるまでCu膜表面のCuの溶解が継続される。Cu膜表面ではCu²⁺が生成され、電解液への移動とCu-BAT錯体の形成が競争反応となるが、Cu膜表面は研磨パッドなどに常時接触して機械加工されるため、Cu膜表面へのBTAの吸着が阻止されることが原因と考えられる。

Cu-BAT錯体を利用したe-CMPでは、Cuイオンの溶解反応が律速であるため、Cuの除去速度は通電電流に比例する。図5-5に示すように、電解電流密度を増加させることでCu除去速度3.5 μm/min以上の高速研磨が可能である。また、研磨パッドによる機械加工は、BTAのCu膜表面への吸着阻止として作用すればよいため、低い加工圧力で加工できる特徴がある。

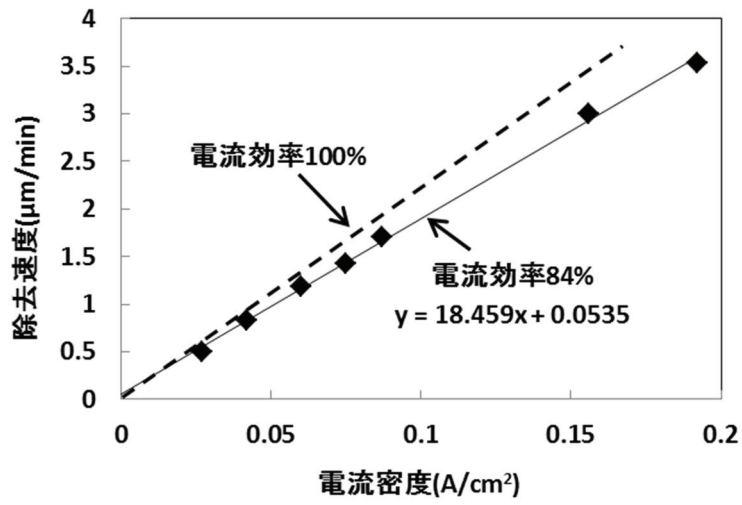


図 5-5 電解電流密度と Cu 膜の除去速度の関係

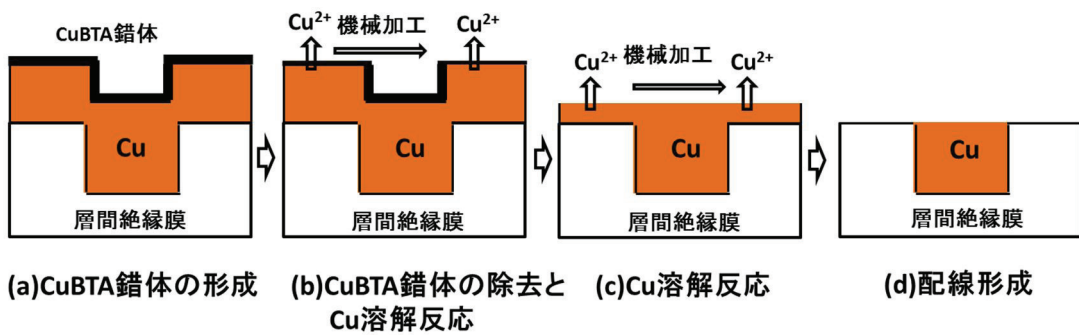


図 5-6 Cu-BTA 錯体を利用した e-CMP の加工機構

5.3 非接触電極型電解セルパッドの開発概要

複合電解研磨 (e-CMP) を行うためには、Cu 膜表面を研磨による機械加工する装置と、電気化学的に Cu 膜表面で Cu を酸化する (Cu から電子を引き抜く) ための反応装置を結合させた e-CMP 装置が必要である。特に、Cu 配線材を使用するデバイスウエハ径は 300 mm φ が主流であり、専用の e-CMP 装置は高価である。このため、既存のプラテン・ロータリ研磨装置に着脱できるパッド型の反応装置を開発することは、e-CMP 技術を利用した Cu 多層配線プロセスを開発するためには大きなメリットとなる。

本節では、既存の研磨装置に着脱できるパッド型の反応装置として、非接触電極型電解セルパッドの詳細と開発経緯を述べる。

パッド型の反応装置の要件としては、既存の装置に着脱して使用するために、CMP 研磨パッドと同程度に薄いこと、及び絶縁体であるシリコンウエハの表面に製膜された Cu 膜に直流電源のプラス極を接続する (アノードバイアス) ために、加工面である Cu 膜表面をアノード電極と接触させる必要がある。また、Cu 膜表面は機械加工するためウレタンパッドに押し付けられているので、アノード電極がパッドの一部に露出して設置される必要がある。さらに、Cu 膜表面は電解液に接液する必要があり、カソード電極、電解液、Cu 膜表面で電気化学的な回路を形成するために、ウレタンパッドなどには開口部の設置が必要である。

パッド型の反応装置は、ウレタンパッドなどの表層と合成樹脂製の支持板を貫通する小口径の開口部を多数設置し、支持板にカソード電極となる金属板を貼り合わせることで、開口部が独立した電解液収容部を形成し、Cu 膜表面がウレタンパッドなどに押し付けられると開口部ごとに電解セルが形成される構造であることが望ましい。

図 5-7 に e-CMP を実施するための電気化学的反応装置の模式図を比較して示す。模式図では、カソード電極表面で水素が発生し、Cu 膜表面で Cu がイオンとして溶解する電気化学系の例を示すが、カソード

電極表面で陽イオンが還元され、Cu 膜表面で Cu が酸化される系であればいずれの系であっても適用できる。

図 5-7(a)は電解槽型の反応装置の構造[13]を示す模式図で、専用 e-CMP 装置の例である。電解槽の底部にカソード電極が配置され、電解槽の上部に貫通孔を有するウレタンパッドと絶縁材が配置されている。Cu 膜がウレタンパッドに押圧されると、ウレタンパッドの一部に露出しているアノード電極と Cu 膜が接触し、カソード電極、電解液、Cu 膜及びアノード電極で電気化学的回路が形成される。ウレタンパッド及び絶縁材と Cu 膜は別々の回転機構で回転し、ウレタンパッドとの摩擦力で Cu 膜が機械加工される。

図 5-4(b)は、図 5-7(a)に示す反応装置の電解槽を省略するために、カソード電極を絶縁材に密着させ、ウレタンパッドと絶縁材の貫通孔を電解セルとしたもの[14]で、電解セルパッドの回転による遠心力で電解液を電解セルから排出し、新たに電解セルパッドの上方から電解液を供給して電解液の入れ替えを行う方式であり、電解槽を電解セルとすることで、CMP 研磨パッドと同程度に薄い反応装置を実現したものである。しかし、アノード電極との接触による Cu 膜のダメージの発生と、Cu 膜の研磨残りの課題があった。

図 5-7(c)は図 5-4(b)のウレタンパッドの代わりに導電性表層を使用し、導電性表層をアノード電極とすることで、絶縁材及び導電性表層に形成された凹部に電解液が充填されると、カソード電極、電解液、Cu 膜及び導電性表層で電気化学的回路が形成される構造[15]としたものである。Cu 膜は導電性表層との摩擦力で Cu 膜が機械加工される。Cu 膜が導電性表層と機械的に接触するため、機械的接触による Cu 膜のダメージを回避するため、導電性表層にグラファイトを主成分としたソフトカーボン材を使用した。しかし、ソフトカーボン材は、Cu 膜のダメージを回避できたものの、耐久性に難点があった。

図 5-7(d)は非接触電極型電解セルパッドの構造[16]を示す模式図である。非接触電極型電解セルパッドは、カソード電極と対向する Cu 膜を電解する電解セル（カソードセル）と、アノード電極と Cu 膜の間

で酸化還元反応を行い、Cu 膜をアノード電極と接触させずに間接的にアノードバイアスする電解セル（アノードセル）から構成され、2つのセルは Cu 膜で電氣的に接続されている。(5.8)式～(5.11)式にアノードセルとカソードセル内で生じる電気化学反応の例を示す。

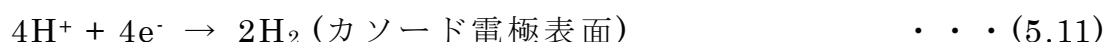
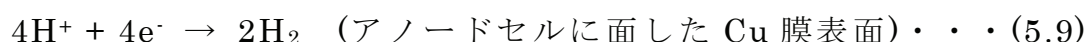
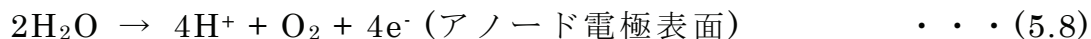
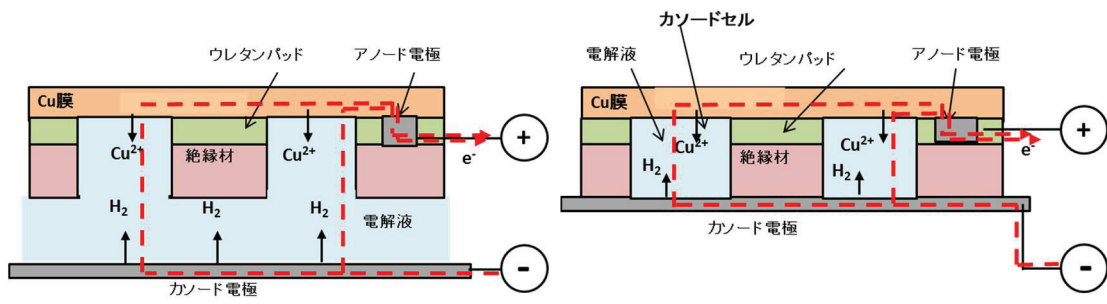


図 5-7(a)～(c)に示す反応装置の構造では、Cu 膜がアノード電極と接触してアノードバイアスされるが、図 5-7(d)に示す非接触電極型の電解セルパッドでは、Cu 膜が電気化学的にアノードバイアスされるため、アノード電極との接触によって発生する Cu 膜表面の機械的なダメージを回避できる利点がある。

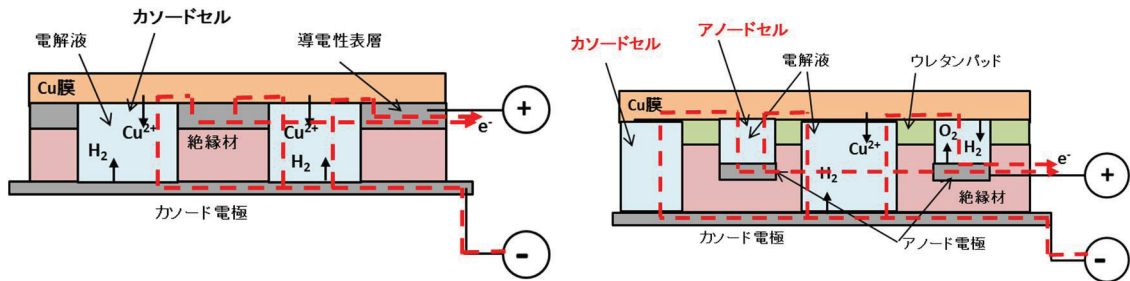
図 5-7(c)及び図 5-7(d)に示す電解セルパッドは、電解セルの形状を小さくし、電解セルパッドに均等に設置することで、Cu 膜を通る電解電流のパスを分散するので、Cu 膜が除去されて薄くなったときの Cu 膜のシート抵抗の影響を無くすことができる利点がある。また、部分的に Cu 膜が除去されても、電解電流が隣り合う電解セルに面した Cu 膜を通電パスとするので、Cu 膜の研磨残りが回避できる。

図 5-7(d)に示す非接触電極型電解セルパッドは、図 5-7(b)及び図 5-7(c)に示す電解セルパッドの課題解決策としての試行を繰り返して開発に至ったものである。



(a) 電解槽型の反応装置

(b) アノード電極を有する
電解セルパッド



(c) 導電性表層の電解セルパッド

(d) 非接触電極型電解セルパッド

図 5-7 e-CMP 用反応装置の構造の模式図

5.4 複合電解研磨技術による平坦化加工技術の検討

LSI デバイスの集積度が増加すると、素子間を接続する配線を多層化して集積度の増加に対応させるが、集積度の増加によって、配線長が増大し、また、配線間の寄生容量が増加して信号遅延が生じるため、配線抵抗と層間絶縁膜の誘電率を下げる必要がある。近年の高集積度の LSI デバイスの配線材料には Cu が使用され、層間絶縁膜には low-k 材が使用されている。

Cu 多層配線プロセスにはダマシンプロセスと呼ばれる技術が使用される。ダマシンプロセスは、予め層間絶縁膜に配線溝を形成し、層間絶縁膜の上にバリアメタルを製膜して、配線溝に Cu 配線材を埋め込むプロセスである。Cu 配線材はめっき法によって配線溝に埋め込むため余分な Cu 膜が製膜され、これを平坦化加工で除去する方法がとられる。low-k 材は一般的に機械強度が低く、平坦化加工で生じる機械的ストレスによって層間剥離などのダメージを受けることがある。このため、平坦化 CMP プロセスでは低圧力加工技術の開発が課題であり、複合電解研磨 (e-CMP) 技術は低圧力・高速加工技術の有望な技術の一つであるといわれている。

本節では、超 LSI デバイスの Cu 多層配線形成プロセスに非接触電極型電解セルパッドを利用した e-CMP 技術を適用し、低圧力・高速加工条件での平坦化加工特性を検討する。

5.4.1 超 LSI デバイスの Cu 多層配線形成プロセスの課題

LSI デバイスの Cu 多層配線プロセスに使用される平坦化加工の性能は、除去速度、ウエハ全体の均一性、チップ内均一性、欠陥数で評価され、チップ内均一性では、パターンウエハを用いてシニング (Thinning)、デッシング (Dishing)、エロージョン (Erosion) などで評価される。図 5-8 に研磨加工の配線パターン依存性[17]の説明図を示す。配線パターンは多層配線の上層部ほど幅広パターンとなり、下

層部では微細な L&S (Line and Space) パターンとなる。Cu めっき法では配線溝パターンとほぼ同じ形状の凹凸状の Cu 膜が製膜され、研磨加工で層間絶縁膜表面まで Cu 膜を除去するため、幅広パターン部ではデッシングが、微細な L&S パターン部ではシニングやエロージョンが発生し易い。

また、デバイスウエハ全面で Cu めっき膜の厚さに不均一が生じる場合や研磨加工が不均一に行われる場合、デバイスウエハの場所によっては Cu 膜の除去が完了する場所と Cu 膜が残る場所が生じる。また逆に、すべての場所で層間絶縁膜表面と同じレベルまで Cu 膜を除去すると、Cu めっき膜の薄い場所や平坦化加工の除去速度が大きい場所では過剰研磨となる。過剰研磨部では、デッシング、エロージョンやシニングが発生し易く、過剰研磨を前提としてデッシング、エロージョンやシニングを最少とする平坦化加工技術が求められる。

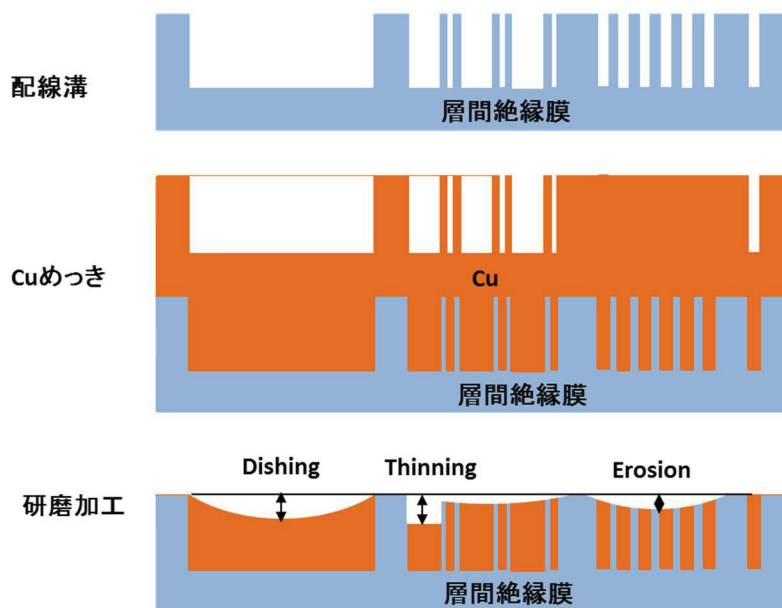


図 5-8 配線パターン依存性

5.4.2 Cu 多層配線形成プロセス用複合電解研磨技術の検討

Cu 配線材を対象とした複合電解研磨 (e-CMP) 技術には、アノード電極との機械的接触による傷などの Cu 膜のダメージの発生と Cu 研磨残りの発生などの課題があった。非接触電極型電解セルパッドを使用することで、Cu 膜のダメージや Cu 研磨残りは解消できる。しかし、5.2 章で議論した BTA 錯体が Cu 配線パターンのトレンチ Cu 面に不動態膜(電気化学反応を阻止する膜)として良好に作用するか、また、良好に作用させるための課題は何かなどの検討をする必要があった。

本節では、デザインルール 45 nm 世代の LSI に使用される比誘電率 1.8 のポーラス系層間絶縁膜を使用した Cu/low-k パターン付き 300 mm φ TEG ウェハを使用して、e-CMP 技術を検討した[18]。

(1) 電解セルパッドの構造と電解液循環の検討

図 5-14 に非接触電極型電解セルパッドをプラチン・ロータリ型研磨装置に搭載した状態の装置の模式断面図を示す。非接触電極型電解セルパッドはシート状のカソード電極面をプラチン表面と密着するよう、粘着剤でプラチン表面に貼付され、カソード電極がプラチンと電氣的に接続される。非接触電極型電解セルパッドのシート状のアノード電極は、ロータリコネクタを使用して研磨装置の回転軸の中心に通したリード線で直流電源の正極に接続される。このため、非接触電極型電解セルパッドの表面には電極などの突起物がなく、通常の CMP パッドと同様の取扱いができる。電解液は、スラリーノズルから電解セルパッド表面に供給され、電解セルパッドの開口部に充填される。プラチンの回転によって、セルパッドの開口部がウェハとの接触部に移動しウェハと接触することで、電解セルが形成される。

図 5-15 に、非接触電極型電解セルパッドの通電機構の説明図を示す。直流電源から供給された電子が、カソード電極に流れ、カソード表面で電解液中の水素イオンを還元し、同時にカソードセルに面した Cu 膜表面で Cu を酸化して Cu 膜を経由してアノードセルに流れる。次い

でアノードセルに面した Cu 膜表面で水素イオンを還元し、アノード電極表面で水を酸化して直流電源に戻り、電気化学回路が形成される。これらの電気化学反応式を(5.8)～(5.11)式に示した。これらの反応式は、図 5-15 に示すように電解セルパッドの開口部に電解液が満たされ、Cu 膜が常に電解液と接液している必要がある。電解セルパッドはプラチナに貼付されて回転するので、電解セルパッドの開口部に満たされた電解液は回転による遠心力を受け、電解セルパッドの開口部が大きいほど、また電解セルパッドの外周部ほど飛散される。従って、電解セルパッドの開口部の電解液のレベル(水位)を安定させるためには、電解セルパッドの開口部のサイズを最適化する必要がある。

電解液には、キレート剤としてクエン酸水溶液、錯化剤に BTA (Benzotriazole: $C_6H_4N_3H$) を使用した。クエン酸水溶液は、Cu イオンをキレート反応で電解液に保持するが、電解反応が進んで Cu イオン濃度が高くなると、カソードセル内のカソード電極表面で水素イオンの還元反応より Cu イオンの還元反応が律速となり、カソード電極表面に Cu が析出し、Cu の電解反応に影響を及ぼす。e-CMP 加工中、電解液はスラリーノズルから供給され、古い電解液との入れ替えが行われているが、電解液の入れ替えは電解セルパッド開口部の表面部分しか期待できない。従って次のウエハを加工する際には、ウエハ間の加工バラツキを無くすためにも、ウエハ加工後に古い電解液をすべて排出することが望ましい。

回転する電解セルパッドには、セルパッドの開口部の電解液を保持しようとする液の表面張力による保持圧と、遠心力によって飛散しようとする液圧力が働く。電解セルパッドの半径 r の位置で、表面張力による保持圧と遠心力による液圧力が等しくなる条件は、次式で表わされる[19]。

$$w^2 = K/(\rho \omega^2 r) \quad \cdot \cdot \cdot (5.12)$$

ここで、 w は開口部の電解セルパッドの半径 r 方向の幅、 K は液の表

面張力と開口部の壁材の濡れ性で定まる定数、 ρ は電解液の密度、 ω は電解セルパッドの回転角速度である。(5.12)式を用いて、電解セルパッドの回転数 100 rpm 以下では電解液が保持され、100 rpm 以上では排出されるセルパッドの開口部のサイズを決定することができる。すなわち、e-CMP 加工を 100 rpm 以下で行い、加工後に電解セルパッドの回転数を 100 rpm 以上として電解液の排出をすることで、セルパッドの開口部内の電解液の循環が行える。セルパッドの開口部のサイズの評価は、ウエハランニング試験で評価できる。

図 5-16 に、非接触電極型電解セルパッドの外観写真を示す。300 mm ϕ ウエハを破線の円で表した。図 5-16 は、螺旋状に配置された多数の矩形のアノードセルとカソードセルが、電解セルパッドに均等に分布するよう配置されていることを示す。

(5.8)～(5.11)式に示す電気化学反応により、電解セルパッドにウエハが接触する部分では、カソードセルからは水素が、アノードセルからは水素と酸素が発生する。しかし、電解セルパッドが回転しているため、ウエハと接触する電解セルは接触後直ちにウエハから離れ、発生ガスが大気中に放出するため、発生ガスによる電気化学反応への影響は無視できる。

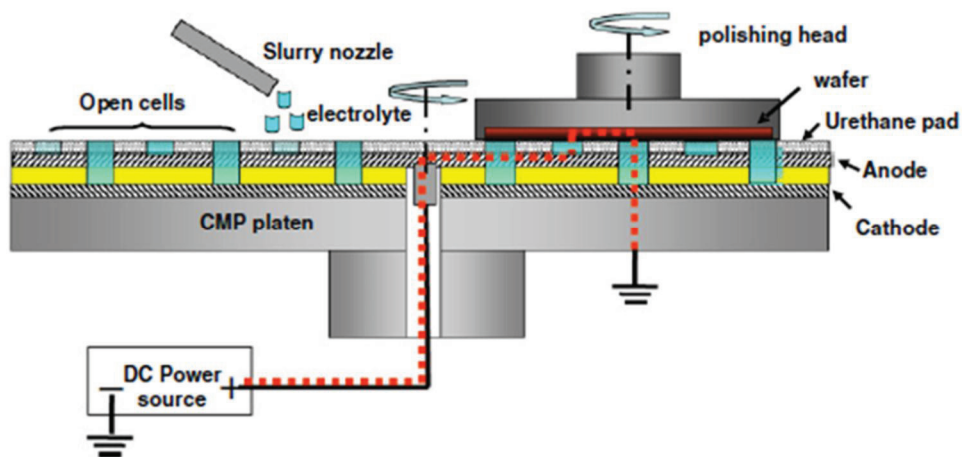


図 5-14 研磨装置に搭載された非接触電極型電解セルパッドの模式断面図

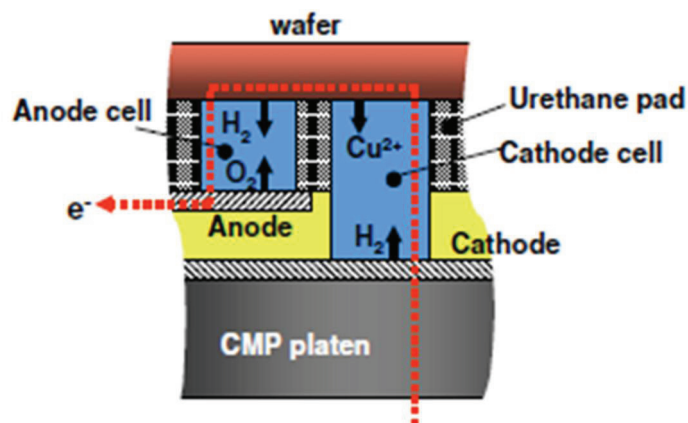


図 5-15 非接触電極型電解セルパッドの通電機構

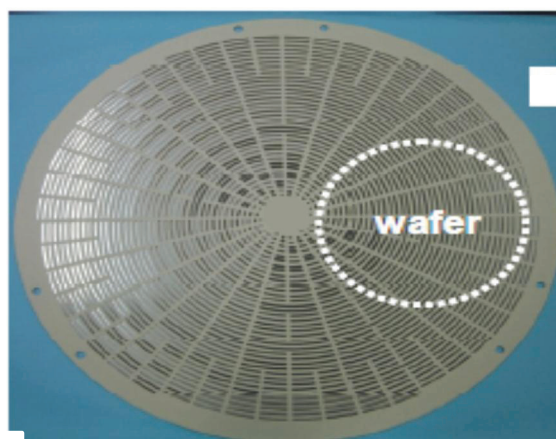


図 5-16 非接触電極型電解セルパッドの外観写

(2) 複合電解研磨技術の評価

複合電解研磨（e-CMP）技術は、Cu 配線パターンのトレンチ Cu 面に不動態膜を形成してトレンチ Cu 面の電気化学反応を阻止し、Cu 配線パターンを平坦化加工する技術である。不動態膜として BTA 錯体を用いたが、BTA 錯体の不動態膜としての能力を評価する必要がある。また、非接触電極型電解セルパッドは、ウエハ間の加工均一性を目的として、電解液の循環を課題としている。これらの課題を評価するため、Cu 除去速度とウエハ面内均一性の電解電流依存性、ウエハランニングテスト及びテストウエハによる配線パターンの段差解消特性を測

定した。

図 5-17 に 300 mm ϕ Cu 平膜を定電流複合電解研磨 (e-CMP) 加工したときの Cu 除去速度とウエハ面内均一性の電解電流依存性を示す。図 5-17 は、除去速度が電解電流に対して比例的に増加し、電解電流効率は 89% であり、電解電流 50 A で除去速度 1.4 μ m/min が得られることを示す。また、除去速度のウエハ面内不均一性は、電解電流に対してほぼ一定で約 5% の値であることを示す。

図 5-18 に電解電流 20 A とし、Cu 平膜ウエハによる 200 枚ウエハランニングテスト結果を示す。除去速度はほぼ 600 nm/min で、ウエハ間不均一性 (WTWNU: wafer to wafer non-uniformity) は 1.2% と良好な加工再現性を示し、電解セル内の電解液の循環が良好であることを示す。

図 5-19 に段差解消性能の測定例を示す。図 5-19(a) は、300 mm ϕ テストウエハを電解電流 10 A、加工時間をそれぞれ 10 秒とし、合計 90 秒間加工したときの 100 μ mL&S と 10 μ mL&S パターンの段差を測定したものである。図 5-19(a) の横軸は、300 mm ϕ Cu 平膜の除去速度 330 nm/min をもとに、それぞれの加工時間を Cu 除去量に換算して示したものである。Cu 除去量 330 nm (60 秒加工) で、100 μ m L&S と 10 μ m L&S パターンの初期段差 270 nm がともに解消され、Cu 除去量が 385 nm を超えると 100 μ m L&S パターンの段差が、また 440 nm を超えると 10 μ m L&S パターンの段差が増加することを示す。段差がいったん解消された後に再び段差が増加することは、Cu 配線内部にシニングが発生していることを示す。図 5-19(b) に Cu 膜断面のイメージ図を示す。上段は、初期段差が減少される段階のイメージ図であり、中段は段差が解消された段階のイメージ図で、この段階では Cu 研磨残りが存在している。下段は Cu 研磨残りが除去され、さらに Cu 配線部が除去される段階のイメージ図である。図 5-19(a) に示すように、非接触電極型電解セルパッドによる複合電解研磨加工では、100 μ m L&S パターンの初期段差 270 nm が Cu 除去量 300 nm で解消され、シニングが生じるまでの除去量が 385 nm であるので、加工マージン

は 85 nm であり、導電性表層を有する電解セルパッドによる平坦化加工特性[6]と比較して、良好な平坦特性が得られた。

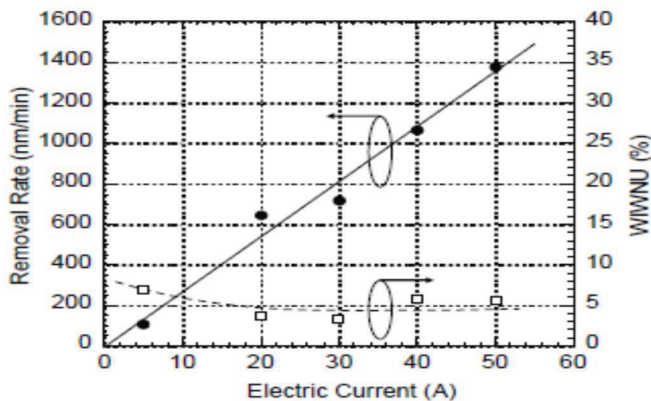


図 5-17 除去速度と面内均一性の電解電流依存性

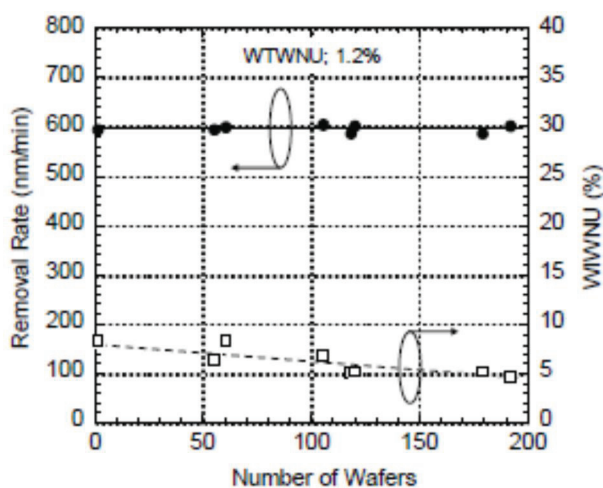
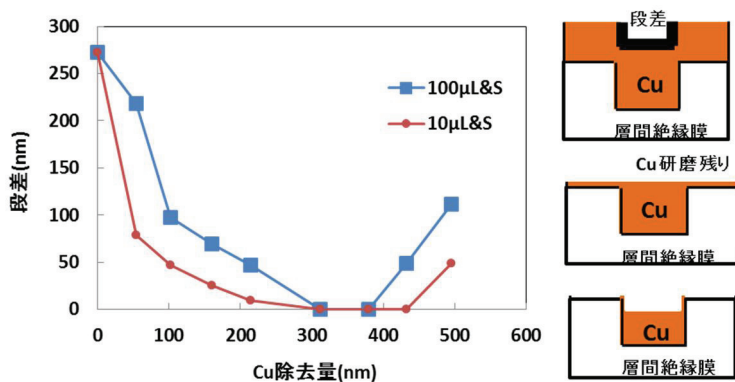


図 5-18 ウエハランニングテスト結果



(a) 段差解消性能の測定例 (b) Cu 膜断面のイメージ図

図 5-19 段差解消性能

5.5 複合電解研磨技術による高速加工条件での平坦化技術の検討

複合電解研磨 (e-CMP) 技術は、低圧で高速加工が必要な平坦化加工プロセスに適した加工技術であるが、加工対象である Cu 膜厚が不均一である場合、Cu 膜の厚い部分の加工終点と薄い部分の加工終点異なるため、薄い部分に過剰研磨が生じ、薄い部分にデッシングやシニングが発生する問題がある。また、Cu 膜厚にウエハ間のバラツキがあると、各ウエハを平坦化加工の加工マージン内で e-CMP 加工を終了させるための技術が必要となる。

本節では、ウエハレベルで LSI を積層させた 3 次元積層デバイスの TSV (Through Silicon Via) デュアルダマシンプロセスに e-CMP 加工技術を適用し、高速加工条件での平坦化加工技術について検討した。

近年、超 LSI デバイスの集積度が 1000 万個を超え、ギガスケールの LSI デバイス (素子数 10 億個) の検討も行われている。しかし、ギガスケールの LSI デバイスを超えてデザインルール 22 nm 世代以降に至ると、リソグラフィ技術の課題や電子の量子力学上の物理的課題、また開発費を含めた設備コストを回収できなくなるなどの経済的課題に直面するといわれている。このため、既存技術で製作した LSI デバイスを積層して、LSI デバイス間を配線することで、高集積化や多機能化が図れる 3 次元積層デバイスの開発に大きな期待が寄せられている。3 次元積層デバイスの開発には、上下間の LSI デバイスの位置合わせ技術や TSV 配線技術など新たな技術開発が必要であるが、3 次元積層技術を開発[20]~[24]することで、前述した課題を回避してギガスケール以降の LSI デバイスと同等の超 LSI デバイスの製造が可能となる。

3 次元積層技術には、LSI チップを積層する技術 (チップレベル積層技術) と LSI が形成されたウエハの段階で積層する技術 (ウエハレベル積層技術) が提案[25],[26]されている。ウエハレベル積層技術のうち、WoW (Wafer on Wafer) 積層法と呼ばれる積層技術では、ウエハを貼り合せた後に、TSV と再配線層 (RDL: Redistribution Layer)

をデュアルダマシン配線プロセスで形成し、上下の LSI を接続配線する方法が提案されている。

本節では、上記の WoW 積層法の Cu デュアルダマシン TSV プロセスの平坦化加工に e-CMP 技術を適用し、高速加工条件での平坦化加工技術の検討結果[27],[28]を報告する。

5.5.1 WoW 積層法の概要

図 5-20 に WoW 積層法のプロセスフローの概要を示す。WoW 積層プロセスは、ウエハの薄化 (Thinning) 工程を含むウエハ接着工程と TSV 配線工程に大別される。図 5-20(a)はウエハ接着工程(Bonding)を示すもので、LSI が形成された上部ウエハをサポートガラスに仮接着し、ウエハ下面を研削して $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 程度に薄化する。次いで、図 5-20(b)に示す工程で上部ウエハを集積回路が形成された下部ウエハに BCB (Benzocyclobutene) 接着剤を使用して接着し、図 5-20(c)で示すようにサポートガラスを取り外す。TSV 配線工程では、図 5-20(d,e)に示すように、上部ウエハの層間絶縁膜をエッチング加工により、TSV と RDL の溝を形成(TSV etching)して、図 5-20(f)の工程で Cu 膜を電気めっき法で製膜(Metal filling)し、図 5-20(g)の工程で余分な Cu 膜を平坦化加工(Planarization)により除去する。これらのウエハの接着工程と TSV 配線工程を繰り返すことによって、多層積層による 3 次元 LSI が形成される。

図 5-21 に上記の WoW 積層法により製造された 2 層積層テストウエハの配線構造の例を示す。図 5-21(a)は平坦化加工前の構造を示すもので、厚さ $20\ \mu\text{m}$ の上層のウエハ (Si#2) が下層ウエハ (Si#1) に接着され、TSV で Si#2 の Metal pad と Si#1 の Metal pad が接続された構造を示す。TSV の深さは Si#2 の厚さと同じ $20\ \mu\text{m}$ であり、Cu めっき膜の厚さは $8\sim 15\ \mu\text{m}$ である。図 5-21(b)は平坦化加工後の構造を示すもので、Cu 膜と TiN (Titanium Nitride) バリア膜が平坦化加工により除去され、Metal pad と Cu 配線が Si#2 の相関絶縁膜 (ILD)に埋

め込まれて配線形成が完成する。平坦化加工では、ウエハの接着部の剥離や剥がれを防止するため、低圧力加工が必要で、しかも高スループットで平坦化加工を実施する必要があるため、高速加工条件で高い平坦面を創出する必要がある。

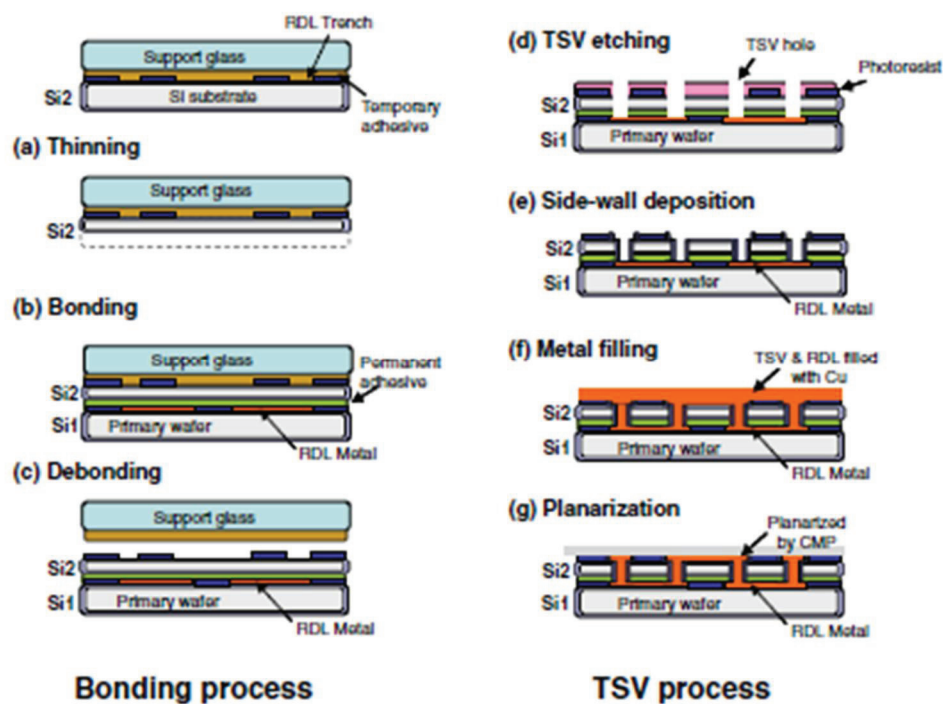
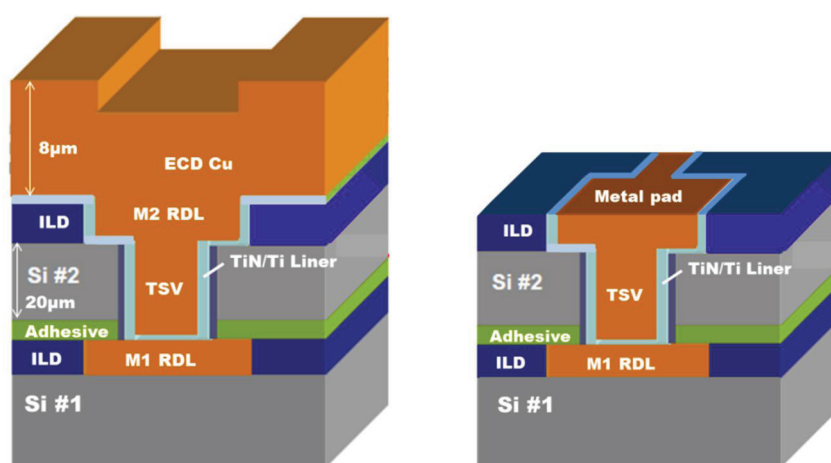


図 5.20 WoW 積層法のプロセスフロー概要図



(a) 平坦化加工前の構造 (b) 平坦化加工後の構造

図 5.21 積層テストウエハの配線構造の模式図

5.5.2 Hybrid CMP/e-CMP プロセスの検討

前節で述べたように、WoW 積層法で使用される TSV デュアルダマシン配線プロセスでは、高速加工条件で平坦化加工を実施する必要がある。また、Cu めっき膜が厚くなると、ウエハ内 Cu 膜厚の不均一性が増加し、Cu 膜の厚い部分の加工終点と薄い部分の加工終点が異なるため、平坦化加工特性の悪化が問題となる。

本節では、平坦化加工の加工マージン内で e-CMP 加工を終了させることを目的として、高速加工と低速加工の 2 段階定電流 e-CMP を検討し、低速加工の e-CMP で終点検出する方法を検討した。また、ウエハ内 Cu 膜厚の不均一性に対応するため、Cu 膜厚の薄い部分に加工終点を合わせ、平坦化加工の加工マージンの大きい Cu-CMP で研磨残りを除去する、CMP と e-CMP を複合させた Hybrid CMP/e-CMP プロセスを検討した。

図 5-22 に加工終点検出を含む Hybrid CMP/e-CMP プロセスの概要を示す。図 5-22 は、定電流 e-CMP によって Cu めっき膜を平坦化加工し、研磨終点検出 (EPD: Endpoint Detection) 後に電流を OFF とし、同一の電解セルパッドを使用して e-CMP から Cu-CMP に切り替え、Cu 残膜と TiN バリア膜を研磨加工するプロセスを図示したもので、加工時間の経過に対して、電解電流、加工圧力、除去速度の時間変化を模式的に示したものである。定電流 e-CMP では、研磨終点検出の精度を上げるため、高速加工 (電解電流 60A、除去速度 $3.5 \mu \text{ m/min}$) と低速加工 (電解電流 8A、除去速度 $0.5 \mu \text{ m/min}$) の 2 段階 e-CMP を実施し、低速加工で電解電圧の上昇点を研磨終点の検出値とした。プラテン・ロータリ研磨装置に前節で説明した非接触電極型電解セルパッドを搭載し、研磨液には、Cu-CMP に使用されるスラリーにクエン酸水溶液、BTA、導電剤及び界面活性剤を添加して調製した電解液を使用した。Cu 残膜と TiN バリア膜は、電流を OFF とした状態で一定時間研磨を継続することによって研磨加工した。

定電流 e-CMP では、Cu 膜が除去されて薄くなるに従い、Cu 膜の

電気抵抗が上昇するため、電解電圧が上昇する。図 5-23 に 2 段階定電流 e-CMP を実施したときの電源電圧の測定例を示す。図 5-23 は、電解電流を 60 A から 8 A に切り替えたときの電解電圧の変化を示すもので、電解電圧は 18 V から 5.5 V に低下し、その後 Cu 膜が除去されて薄くなるに従い徐々に上昇し、一定値 13 V に達することを示す。電解電圧が一定値に達すると、ウエハ面から気泡が観察され、電解液に含まれる水の電気分解反応が生じることが確認された。電圧上昇領域の初期の低い電圧値を終点検出の値とすると Cu 残膜が多くなり、CMP による加工時間が長くなる。また、反対に終点検出の値を高い電圧値に選定すると過剰研磨となり、配線部のデッシングやシニングが増加する。このため、実験により終点検出の値の最適化を図る必要があった。

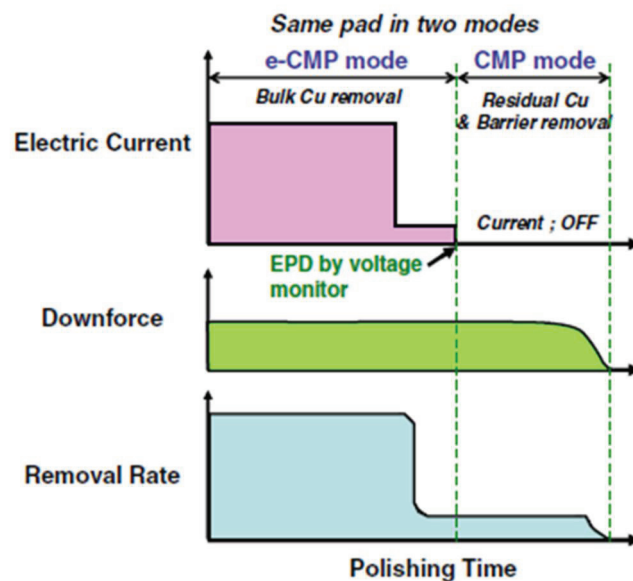


図 5-22 Hybrid CMP/e-CMP プロセスの概要

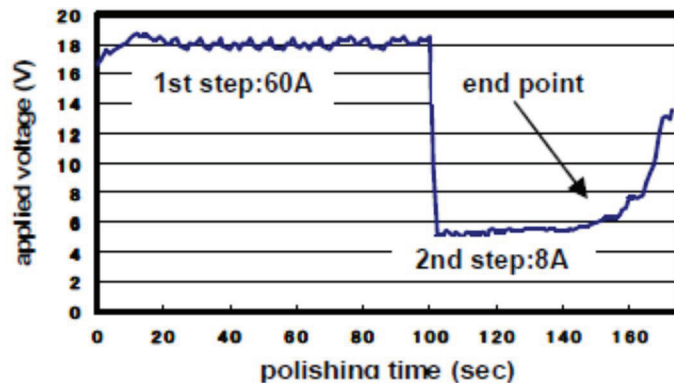


図 5-23 定電流 e-CMP による電解電圧の測定例

5.5.3 Hybrid CMP/e-CMP プロセスによる加工結果

図 5-24 に、200 mm ϕ の 3 次元積層デバイス用のテストウエハの Cu 膜の加工前と定電流 e-CMP 加工後の Cu 膜厚プロファイルを示す。図 5-24 に示す加工後の Cu 膜厚プロファイルは、研磨圧力 0.5 psi (3.45kPa) で電解電流値 60 A と 8 A の 2 段 e-CMP 加工を実施し、電解電圧 6 V を研磨終点としたときの Cu 膜厚プロファイルを測定したものである。加工前の平均 Cu 膜厚は $8 \mu\text{m}$ で、最大膜厚と最少膜厚の差は $0.6 \mu\text{m}$ であり、定電流 e-CMP 加工後の最大 Cu 残膜厚は $0.9 \mu\text{m}$ であり、ウエハ中央部では Cu 膜が除去された部分が発生した。

図 5-25 に定電流 e-CMP 加工後のテストウエハの写真を示す。図 5-25 に示すウエハ中央部の斑点状の部分が、Cu 膜が除去された部分である。この部分では Metal pad 上でデッシングが測定されなかったが、Cu 残膜 $0.9 \mu\text{m}$ を CMP で除去する工程で、ウエハ中央部の斑点状の部分が過剰研磨によるデッシングの発生が予想されるため、研磨終点検出の電解電圧値を修正する必要があることを示唆している。

図 5-26 に研磨終点の検出値を電解電圧 5.7 V に設定し、Hybrid CMP/e-CMP プロセスを用いて加工したときの、 $200 \times 200 \mu\text{m}$ 角の Metal pad 部のデッシング深さを測定した結果を示す。また、一般的に使用される Cu-CMP プロセスで研磨加工した後のデッシング深さの

測定値を比較データとして示す。図 5-26 は、初期 Cu 膜厚 $12\ \mu\text{m}$ 、最大膜厚と最少膜厚の差 $1.5\ \mu\text{m}$ の 2 層積層テストウエハを Hybrid CMP/e-CMP プロセスで加工したときと、Cu-CPM プロセスで加工したときのデッシング深さを比較したもので、Hybrid CMP/e-CMP プロセスで加工したものは、研磨圧力 $0.5\ \text{psi}$ (3.45kPa) で、電解電流値 $60\ \text{A}$ と $8\ \text{A}$ の 2 段 e-CMP 加工を実施し、その後、Cu-CMP モードで Cu 残膜を除去したものである。一般的に使用される Cu-CMP プロセスでは、研磨圧力 $3\ \text{psi}$ (20.7kPa)、Cu 除去速度 $0.7\ \mu\text{m}/\text{min}$ で、加工時間 24 分を要した。

Cu-CPM プロセスでは、ウエハ外周部でのデッシング深さが $400\sim 800\ \text{nm}$ であったのに対し、複合電解研磨プロセスでは、デッシング深さが $200\ \text{nm}$ であり、Hybrid CMP/e-CMP プロセスによる平坦化加工特性が良好であることを示す。また、Hybrid CMP/e-CMP プロセスの加工時間は、電解電流を OFF として Cu 残膜と TiN バリア膜を除去した研磨工程を含めて 6 分間であり、一般的に使用される Cu-CPM プロセスの加工時間は 24 分間に対して大幅に加工時間を短縮した。

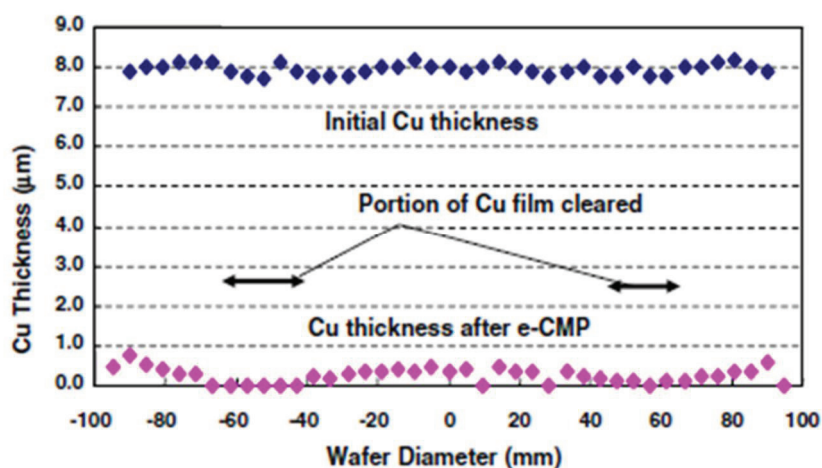


図 5-24 研磨加工前と e-CMP 加工後の Cu 膜厚プロファイル

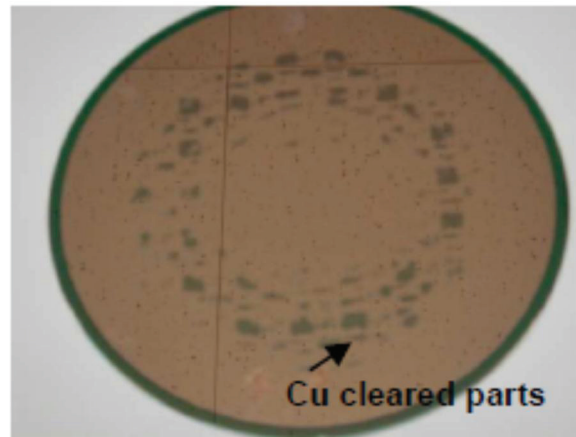


図 5-25 e-CMP 加工後のウエハの写真

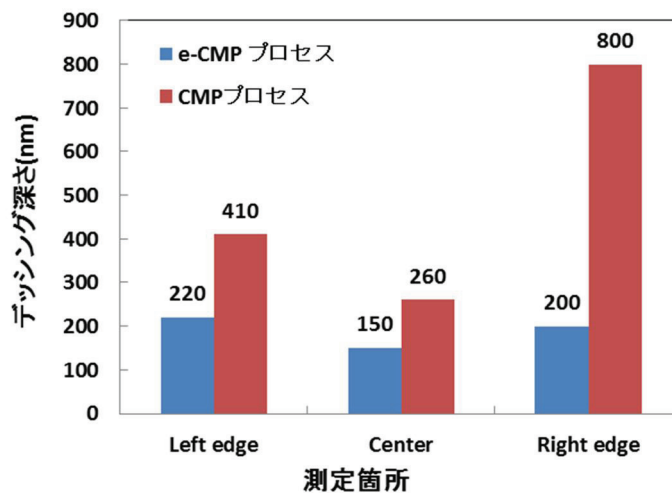


図 5-26 200 x 200 μ m 角 Metal pad 部のデッシング深さ

5.5.4 Cu デュアルダマシン TSV プロセスへの適用結果

WoW 積層法では、厚さ 20μ m の上層のウエハ (Si#2) が下層ウエハ (Si#1) に接着された後、Si#2 と BCB 接着膜が同時にドライエッチングによって、TSV 形成のための貫通孔が設置される。Metal pad 部で大きなデッシングが発生すると、メタルパッドの上部の BCB 接着膜にボイドが発生し、ボイド部で貫通孔の側面がエッチングされ、TSV の側面のバリア膜の形成 (サイドウォールカバレッジ) が不十分となることがある。また、Si#1 の Metal pad 上部で Cu 研磨残り (Residual

Cu) が発生して、Si#2 に形成された Cu 再配線が短絡する現象が発生することがある。

図 5-27 に、BCB 接着膜のボイドと Cu 研磨残りの観察例を示す。図 5-27(a)は、2 層積層ウエハを Si#2 の上から赤外線写真で撮影したもので、Si#1 の Metal pad と Si#2 の Cu 再配線の位置関係と Si#1 の Metal pad 上部のボイドの発生を観測したものであり、挿入した断面図は、ボイドの発生位置を模式的に示したものである。図 5-27(b)は、Cu 研磨残りの発生した部分の光学顕微鏡写真による観察例で、Si#2 の Cu 再配線部に Cu 研磨残りが発生して、Cu 再配線が短絡した例を示す。Si#1 の Metal pad にデッシングが発生すると、その上の BCB 接着層の体積が縮小してボイドが発生してボイド上の Si#2 基板に凹部が生じ、凹部の Cu が除去できないために、Cu 研磨残りが生じたものと考えられる。

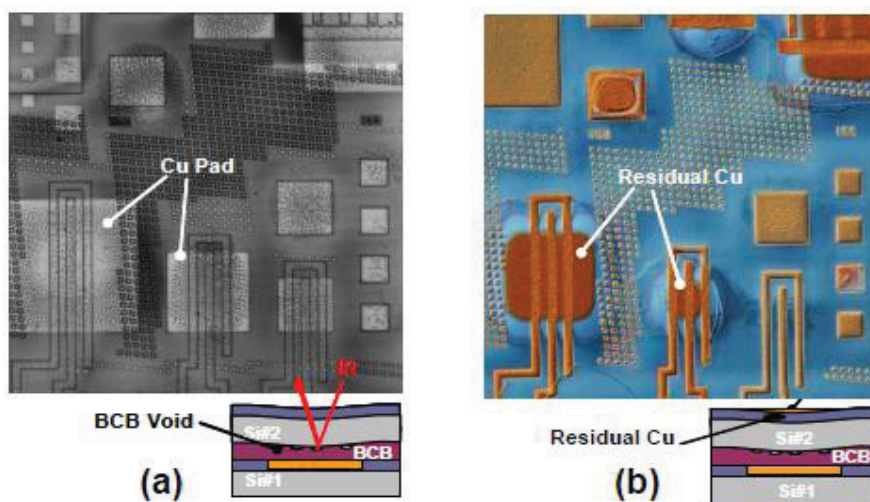


図 5-27 BCB 接着膜のボイドと Cu 研磨残りの観察例

WoW 積層法の配線欠陥に影響を及ぼすボイド発生と Metal pad 部のデッシング深さの関係を下で検討した。図 5-28 に、200 x 200 μm 角 Metal pad 部のデッシング深さとボイド面積の関係を示す。図 5-28 は、テストウエハを BCB 接着層の厚さを 2 μm として積層し、200 x 200 μm 角 Metal pad 部のデッシング深さを測定した後、サポ

ートガラスを $2\ \mu\text{m}$ 厚の BCB 接着剤で接着し、サポートガラス面から Metal pad 部を光学顕微鏡で撮影してボイドの面積を積算し Metal pad の面積の百分率で示したものである。図 5-28 の挿入写真にボイドの形状の例を示す。図 5-28 は、デッシング深さが減少するに従い、ボイド面積が直線的に減少することを示し、デッシング深さが $200\ \text{nm}$ 以下ではボイドが消滅することを示唆するものである。

図 5-29 に、Metal pad サイズとデッシング深さの関係を示す。図 5-29 は、2 層積層テストウエハを複合電解研磨プロセスによる平坦化研磨加工した後、テストウエハに形成された各種サイズの Metal pad 部のデッシング深さを測定したもので、図の挿入写真は、2 層積層テストウエハの $200 \times 200\ \mu\text{m}$ 角 Metal pad 上部の BCB 接着膜の断面の SEM 写真である。SEM 写真より、デッシング深さ $200\ \text{nm}$ 以下では BCB 接着膜のボイドが発生しないことが分る。デッシングが生じた Metal pad 上では、相対的に空隙が増加するため、BCB 接着膜の体積の縮小分をボイドで補うことによりボイドが生成されると考えられる。

このため、BCB 接着剤膜厚を増加させれば、より深いデッシング部でもボイドの発生が抑えられるが、BCB 接着剤膜厚を $2\ \mu\text{m}$ 以上にするると TSV を形成するためのエッチングプロセスや BCB 接着膜の均一性の確保が困難になる。従って、 $2\ \mu\text{m}$ の BCB 接着剤膜厚を使用する場合、Metal pad 上のデッシング深さを $200\ \text{nm}$ 以下としてボイドの生成を回避するためには、面積 $200 \times 200\ \mu\text{m}^2$ 以下の Metal pad を使用する必要があることが結論として得られた。

除去速度 $3\ \mu\text{m}/\text{min}$ 以上の Cu-CMP プロセスが TSV の平坦化加工用に提案[29]~[31]されているが、高いエッチングレートと研磨圧力のもとで長時間の過剰研磨が避けられず、面積 $200 \times 200\ \mu\text{m}^2$ の Metal pad 部でデッシング深さを $200\ \text{nm}$ 以下とする平坦化加工を実現するためには課題が多い。今回初めて、WoW 積層法の Cu デュアルダマシオン TSV プロセスの平坦化加工に、除去速度 $3.5\ \mu\text{m}/\text{min}$ の Hybrid CMP/e-CMP プロセスを適用した。平坦性とスループットを低研磨圧力の条件で大幅に改善できることができ、デッシング深さを $200\ \text{nm}$

以下に抑えて BCB 接着剤のボイドの発生を回避することで、TSV 配線不良が低減できることを示した。

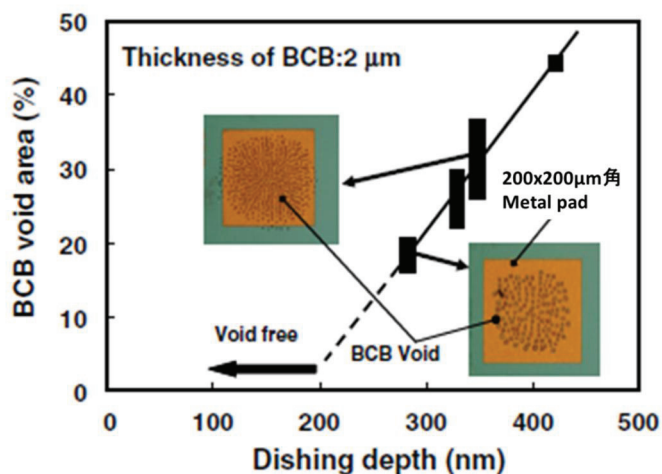


図 5-28 デッシング深さとボイド面積の関係

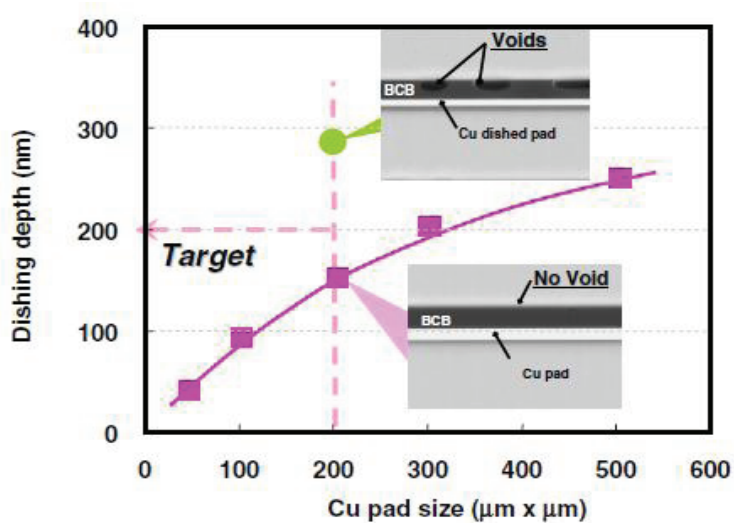


図 5-29 Metal pad のサイズとデッシング深さの関係

5.6 まとめ

Cu配線材を使用した多層配線プロセスのCu膜の平坦化加工の改善を目的として、低圧力で高速加工ができる複合電解研磨 (e-CMP) 技術を検討した。従来の e-CMP 技術では、通電電極と Cu 膜の接触によって生じる Cu 膜のダメージの問題や、Cu 膜が部分的に除去されることで生じる電解電流の通電パスの消失による Cu 研磨残りの問題があった。この対策として、非接触電極型電解セルパッドを開発し、e-CMP 技術の加工特性を改善する検討を行った。まず、電解液の循環を考慮した非接触電極型電解セルパッドの構造を検討し、ウエハ間の加工均一性の安定化を図った。次に、e-CMP の加工終点の検討と、e-CMP と Cu-CMP を複合させた Hybrid CMP/e-CMP プロセスを検討し、高速加工の条件で高平坦化特性が得られる e-CMP 技術を検討した。

5.2 節では、従来の電解研磨と複合電解研磨の平坦化の加工機構を比較し、複合電解研磨の平坦化加工機構の特徴として、Cu-BTA 錯体の挙動を説明し、Cu 膜が溶解反応により加工除去されることを示した。

5.3 節では、普及型の CMP 装置に搭載できるパッド状の反応装置として、非接触電極型電解セルパッドの概要を説明した。非接触電極型電解セルパッドは、Cu を電解するカソードセルと電解液中に含まれる水を電気分解するアノードセルの 2 種類の電気化学反応を行うセルを組合せて、Cu 膜と通電電極を物理的に接触させずに電気化学的回路を形成できるもので、Cu 膜と通電電極の物理的に接触による Cu 膜のダメージを発生させない利点があることを示した。

5.4 節では、ウエハ間の加工均一性の安定化を目的として、超 LSI デバイスの Cu 配線テストウエハを用いて、電解液の循環を考慮した非接触電極型電解セルパッドの構造を評価した。また、電解液にキレート剤として用いたクエン酸水溶液と錯化剤として用いた BTA の効果を、テストウエハの段差解消特性を測定して確認した。ウエハ間の加工均一性の安定化の評価では、200 枚ウエハランニングテストを行い、1.2%のウエハ間均一性が得られることを示し、検討した非接触電

極型電解セルパッドの構造が良好であることを示した。また、電解液の組成の評価では、比誘電率 1.8 の層間絶縁膜を使用したテストウエハの配線パターンの段差解消特性を測定し、100 μ m L&S パターンの初期段差 270 nm が Cu 除去量 300 nm で解消されることを示し、平坦化特性が良好であることを確認した。

5.5 節で、LSI デバイスの大容量化・多機能化技術として期待される 3 次元デバイスの配線形成プロセスへ適用するため、非接触電極型複合電解セルパッドを用いた Hybrid CMP/e-CMP プロセスについて検討した。Hybrid CMP/e-CMP プロセスは、高速加工で高い平坦性を維持するために、Cu 膜厚の薄い部分に加工終点を合わせて e-CMP 加工を行い、厚い部分で生じた Cu 膜の研磨残りを Cu-CMP で加工するプロセスである。Hybrid CMP/e-CMP プロセスは、Cu 膜厚が不均一である 3 次元積層 LSI デバイス用の平坦化加工に有効であることを示した。最後に、3 次元積層 LSI デバイスの配線技術である Cu デュアルダマシン TSV プロセスに Hybrid CMP/e-CMP プロセスを適用し、低圧力下で高速研磨（除去速度 3.5 μ m/min）を実施し、高平坦化加工を実現することにより TSV 配線不良が低減できることを示した。

第 5 章の参考文献

- [1] 特許庁、“LSI の多層配線技術”、平成 15 年度特許出願技術動向調査報告書、p.6 (2003)
- [2] S.Kondo, et al., Proc. International Interconnect Technology Conference (2000 IITC), p.253 (2000)
- [3] L.Economikos, et al., Proc. International Interconnect Technology Conference, (2004 IITC), p.233 (2004)
- [4] I.Noji, ADMWTA Conference 2004 14thAsian Session, p.38 (2004)
- [5] M.Mellier, et al., Proc. International Interconnect Technology Conference, (2006 IITC), p.70 (2006)
- [6] S.Kondo, S.Tominaga, A.Namiki, K.Yamada, D.Abe, K.Fukaya, M.Shimada, K.Kobayashi, Proc. International Interconnect Technology Conference, (2005 IITC), p.203 (2005)
- [7] S.Kondo, K.Fukaya, T.Miyazaki, M.Fujita, D.Abe, S.Kunisaki, T.Enomoto, S.Tominaga, Microelectronic Engineering, 84, pp.2615-2619 (2007)
- [8] 渡辺正、井上春夫、“電気化学”、丸善、p.57 (200)
- [9] J.Huo, R.Solanki, J.McAndrew, “Process in Electrochemistry Research”, Nova Science Publishers, (2005)
- [10] US patent No.US 6863797 B2, Applied Materials Inc.
- [11] M.T.Wabg, M.S.Tsai, C.Lui, W.T.Teseng, T.C.Chang, L.J.Chen, M.C.chen, Thin Solid Films, 308-309, pp.518-522 (1997)
- [12] 富永茂、土肥俊郎、埼玉大学地域共同研究センター紀要、6, pp.10-15 (2005)
- [13] 特許公報、特表 2005-516383, “電気化学的機械研磨のプロセス制御”、アプライドマテリアルズ
- [14] 特許公報、特開 2007-149949, “デバイスウエハ用の研磨パッド”、(株)ロキテクノ

- [15] 特許公報、特許第 4142554 号, “電解研磨方法及び該方法に使用する導電性研磨パッド”、(株)ロキテクノ
- [16] 特許公報、特許第 40500885 号, “デバイスウエハの研磨パッド、研磨体、研磨工具構成及び研磨方法”、(株)ロキテクノ
- [17] Planarization and CMP Technical Committee, “Planarization Technical Term Dictionary”, (2000)
- [18] S.Kondo, D.Abe, S.Tominaga, K.Yamada, S.Saito, Proc. International Interconnect Technology Conference, (2008 IITC), p.253 (2008)
- [19] 特許公報、再公表 2008-149937, “デバイスウエハの研磨パッド及び研磨方法”、(株)ロキテクノ
- [20] A.Jourdain, S.Stoukatch, P.DeMoor, W.Ruythooren, S.Pargfrieder, B.Swinnen, and E.Beyne, Proc. International Interconnect Technology Conference, (2007 IITC), p.207 (2007)
- [21] F.Lui, R.Yu, A.M.Young, J.P.Wang, L.Shi, K.N.Chen, X.Li, D.A.Dipaola, D.Brown, C.T.Ryan, J.A.Hagan, K.H.Wong, M.Lu, X.Gu, N.R.Hlymko, E.D.Perfecto, A.G.Merryman, K.A.Kelly, S.Purushothaman, S.J.Koester, R.Wisnieff, and W.Haensch, IEDM Tech. Dig., p.599 (2008)
- [22] Y.Kurita, S.Matsui, N.Takahashi, K.Soejima, M.Komuro, M.Itou, C.Takegawa, M.Kawano, Y.Egawa, Y.Saeki, H.Kikuchi, O.Kato, A.Yanagishawa, T.Mitsuhashi, M.Ishino, K.Shibata, S.Uchiyama, J.Yamada, and H.Ikeda, Proc. Electron Components and Technology Conference, p.821 (2007)
- [23] P.Leduc, F.de Croy, M.Fayolle, B.Charlet, T.Enot, M.Zussy, B.Jones, J.C.Barbe, N.Kermevez, N.Sillon, S.Maitrejean, D.Louis, and G.Passemard, Proc. International Interconnect Technology Conference, (2007 IITC), p.210 (2007)
- [24] N.Miyakawa, T.Maebashi, N.Nakamura, S.Nakayama, and S.Toyoda, Proc. 3D Architectures for Semiconductor Integration

and Packing, (2006)

[25] N.Maeda, H.Kitada, K.Fujimoto, T.Nakamura, and T.Ohba, Advanced Metallization Conference (2009 AMC), p.501 (2009)

[26] H.Kitada, N.Maeda, K.Fujimoto, K.Suzuki, K.Kawai, K.Arai, T.Nakamura, and T.Ohba, Proc. International Interconnect Technology Conference, (2009 IITC), p.107 (2009)

[27] S. Tominaga, D. Abe, T. Enomoto. S. Kondo, H.Kitada and T.Ohba, Japanese Journal of Applied Physics Vol.49, p.05FG01 (2010)

[28] S.Tominaga, T.Enomoto, D.Abe, D.Takeda, K.Tanaka, H.Kitada and T.Ohba, International Conference on Planarization/CMP Technology, (2009 ICPT) pp. 467-472 (2009)

[29] K.Benedene, A.Chabourel, D.Scevola, M.Rivoire, P.Bridger, C.Gillot, X.Buch, and T.Konne, Proc. International Conference on Planarization/CMP Technology, (2009 ICPT), p.113 (2009)

[30] J.Ammanokura, H.Ono, K.Konba, and K.Mabuchi, Proc. International Conference on Planarization/CMP Technology, (2009 ICPT), p.119 (2009)

[31] Y.Matsumura, and A Isobe, Proc. International Conference on Planarization/CMP Technology, (2009 ICPT), p.125 (2009)

第 6 章

総括

多層配線技術は、LSI デバイスの高集積化を支える基盤技術の一つである。多層配線技術の初期においては、Al 配線材を層間絶縁膜（シリコン酸化膜）に埋め込む方法が採用されていたが、近年の携帯電話やパソコンに使用される超 LSI デバイスには Cu 配線材を低誘電率材料の層間絶縁膜に埋め込む方法が採用されている。これらの多層配線技術においては、配線の層間絶縁膜や配線材の平坦化加工が行われるが、その工程は微細砥粒とケミカル成分で調合されたスラリーを合成樹脂製の研磨パッド上に供給して行われる技術、即ち平坦化 CMP 技術が利用される。本研究は、これらの配線技術に不可欠な研磨による平坦化加工技術の加工特性を向上させることを目的とし、研磨による加工量の解析手法の検討、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドによる層間絶縁膜の平坦化加工の検討、及び Cu 配線材を対象とした複合電解研磨技術の検討を行った。本論文はこれらの検討成果をまとめたものである。

本論文は 6 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の対象である超 LSI デバイスの多層配線プロセスに使用される平坦化加工技術に関する従来の CMP 技術について述べ、本研究の背景と目的を明らかにした。多層配線プロセスには Al 配線材を使用したプロセスと、超 LSI デバイスに用いられる Cu 配線材を使用したプロセスがある。Al 配線材を使用したプロセスの平坦化加工技術では、研磨による平坦化加工にともなう消耗材のコスト低減が求められ、Cu 配線材を使用したプロセスでは低圧力で高速加工ができる平坦化加工技術が求められていることを示した。また、超 LSI デバイスをさらに高容量化、多機能化する技術として、超 LSI デバイスをウエハレベルで積層する 3 次元積層デバイスの TSV 配線プロセスでは、低圧力で超高速加工が求められていることを示した。そこで、本研究では平坦化加工技術の加工特性を向上させることを目的として、研磨による加工量の解析手法とスパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドによる加工特性の改善技術、及び、複合電解研磨による低圧力、高速加工条件での平坦化加工技術に関して研究を進めることを示した。

第2章では、研磨による加工量の解析手法を検討した。平坦化加工では、工作物面内の除去速度に不均一性が生じると除去速度の速い部分で過剰研磨となり平坦性が悪化する。また、均一加工するためには、工作物の各加工点が工具面で分散性のよい研磨軌跡が得られる加工条件を選定する必要がある。そこで、均一加工の予測法として、工具と工作物の相対運動を、静止している工具の座標から見た工作物任意点の運動として記述して、工作物の任意の点が工具面上に描く軌跡から、研磨加工に関与しない工具と工作物のはみ出し領域を除外して、研磨軌跡の総長である研磨走行距離と、工具や工作物の弾性変形による加工圧力分布を結合させた加工量の解析方法を示した。そして、均一加工性が走行距離プロファイル（工作物の径方向に対する走行距離）に依存することを示した。また、各種の研磨装置ごとに、汎用表計算ソフトを使用して、研磨条件と走行距離プロファイルを例示し、加工均一性の概要を説明した。

第3章では、第2章で検討した加工量の解析手法をパッドコンディショニングによる研磨パッドの均一加工に適用し、加工による除去速度プロファイルと算出した走行距離プロファイルが一致することを示した。また、直線揺動型のパッドコンディショニングに使用される揺動関数を、走行距離プロファイルを利用して調整し、調整した揺動関数を使用することで、均一加工性が改善されることを示し、均一加工の予測法が加工改善に適用できことを示した。

第4章では、LSIデバイスのAl多層配線技術の層間絶縁膜に使用されるシリコン酸化膜の平坦化加工の改善を目的として、自己放出型固定砥粒パッドによる加工技術を検討した。自己放出型固定砥粒パッドによる加工技術は、加工にともなう消耗材のコストの大半を占めるスラリーを使用しない加工技術であり、Al多層配線プロセスのコスト低減に寄与する加工技術である。まず、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドの製造方法と使用材料の選定について述べ、スパイラル形状の自己放出型固定砥粒パッドを使用した加工技術として、ウエハとパッドの接触面積を制御する加工技術、パッド表面の水分量を制御

する加工技術、及び砥粒の強制放出による加工技術について検討した。

ウエハとパッドの接触面積を制御する加工技術に関しては、加工結果と走行距離プロファイルが一致することを示し、均一加工特性を予測して加工条件を選定する際、走行距離プロファイルの算出結果を利用できることを示した。パッド表面の水分量を制御する加工技術に関しては、パッド表面の水分量を制御する加工技術について述べ、パッド表面をセミドライ状態にしてウエハを加工することで、パッドの表面に遊離砥粒を含有する粘性被膜が形成され、除去速度の向上とデフェクトの低減に寄与することを示した。砥粒の強制放出による加工技術に関しては、パッドコンディショニングによってパッド表面の形状を制御することで、Al 多層配線用のテストウエハの $2000\ \mu\text{m}\sim 50\ \mu\text{m}$ の各種 L&S パターンを $0.2\ \mu\text{m}$ の過剰研磨で平坦化できることを示し、Al 多層配線技術へ良好に適用できることを示した。

第 5 章では、Cu 配線材を使用した多層配線プロセスの Cu 膜の高速加工と平坦化特性の改善を目的として、非接触電極型電解セルパッドを使用した複合電解研磨 (e-CMP) 技術を検討した。まず、従来の電解研磨と e-CMP の平坦化の加工機構を比較し、e-CMP の平坦化加工機構の特徴として、低圧力で高速加工が可能となる加工機構を明確にした。Cu 複合電解研磨を実施するためには、Cu 膜を機械的に研磨する装置と電気化学的に除去する反応装置を結合する必要がある。そこで、普及型の研磨装置に搭載できるパッド状の反応装置として、新たに開発した非接触電極型電解セルパッドの概要を述べた。非接触電極型電解セルパッドは、Cu を電解するカソードセルと電解液中に含まれる水を電気分解するアノードセルの 2 種類の電気化学反応を行うセルを組合せて、Cu 膜と通電電極を物理的に接触させずに電気化学的回路を形成できるもので、Cu 膜と通電電極の物理的な接触による Cu 膜のダメージを発生させない利点がある。ウエハ間の加工均一性を図るため、ウエハ加工に際して電解液を入れ替えるための電解セルの構造を検討し、電解液にキレート剤として用いたクエン酸水溶液と、錯化剤として用いた BTA の効果を評価した。評価には、超 LSI デバイスの

Cu 配線用のテストウエハを使用し、200 枚ウエハランニングテストを行い、1.2%のウエハ間均一性が得られることを示し、検討した電解セルの構造が良好であることを示した。また、電解液の組成に関する評価では、超 LSI デバイスの Cu 配線用のテストウエハの配線パターンの段差解消特性を測定し、100 μm L&S パターンの初期段差 270 nm が Cu 除去量 300 nm で解消されることを示し、平坦化特性が良好であることを確認した。

最後に、3次元デバイスの配線形成プロセスへ適用するため、非接触電極型複合電解セルパッドを用いた Hybrid CMP/e-CMP プロセスについて検討した。Hybrid CMP/e-CMP プロセスは、Cu 膜厚の薄い部分に加工終点を合わせて e-CMP 加工を行い、厚い部分で生じた Cu 膜の研磨残りを Cu-CMP で加工するプロセスである。

Hybrid CMP/e-CMP プロセスを、3次元積層デバイスの配線プロセスに適用した結果、低圧力、高速加工（除去速度 3.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ ）の条件で高平坦化加工を実現し、TSV 配線不良が低減できることを示した。

LSI の配線形成プロセスでは、配線パターンの設計やダミーパターンの配置などでチップ内平坦化加工特性が左右され、平坦化技術は LSI の設計から装置、研磨パッド、スラリー及びこれらの管理システムに至る総合技術である。本研究の成果を生産現場で利用するためには、LSI の設計や研磨装置及び管理システムなどの総合的な評価と技術の蓄積が必要である。

しかし、加工対象が変われば、平坦化加工の上記した要素の変更もあり得る。パワーデバイスに使用される SiC 基板の研磨や LED 用のサファイヤ基板の研磨では、低価格で小型の研磨システムの要求がある。特に、3次元積層デバイスが普及すると LSI デバイスの製造と 3次元積層デバイスの製造が企業分担され、各種デバイスを組合せて積層する 3次元積層デバイス化事業に新たに参入する企業が増加する可能性が高い。このために平坦化技術には、これまでの平坦化 CMP に代わる新しい低価格で小型の研磨加工システムが必要となる。本研究

の第 2 章で検討した均一研磨加工の予測法や第 5 章で検討した複合電解研磨による平坦化加工技術は、実用化に成功した例であり、新しい低価格で小型の研磨加工システムの実現に役立つものである。

本論文を構成する業績

査読付き投稿論文並びに国際学会論文

- [1] S.Tominaga, D.Abe, T.Enomoto, S.Kondo, H.Kitada and T.Ohba, "Hybrid Electrochemical Mechanical Planarization Process for Cu Dual-Damascene Through-Silicon Via Using Noncontact Electrode Pad", Japanese Journal of Applied Physics Vol.49, p. 05FG01 (2010)
- [2] S.Tominaga, T.Enomoto, D.Abe, D.Takeda, K.Tanaka, H.Kitada and T.Ohba, " Hybrid e-CMP/CMP Process for Cu Dual Damascene TSV Interconnects by Using Non-Contact Electrode e-CMP Pad", International Conference on Planarization/CMP Technology, pp. 467-472 (2009)

登録特許

- [1] 富永 茂, “導電性研磨パッド及び該研磨パッドを使用する電解研磨方法” 特許第 4142554 号

解説書

- [1] 富永 茂, “次世代 CMP パッドの開発動向”、クリーンテクノロジー, 8月号 (2003)
- [2] 富永 茂, “固定砥粒パッドによる研磨技術と電解研磨による Cu/low-k 配線形成技術”、「最新 CMP 技術と周辺部材」、技術情報協会, pp.53-71 (2008)

本論文に関するその他の業績

- [1] S.Kondo, S.Tominaga, A.Namiki, K.Yamada, D.Abe, K.Fukaya, M.Shimada, K.Kobayashi, “Novel Electro-Chemical Mechanical Planarization using Carbon Polishing Pad to Achieve Robust Ultra low-k/Cu Integration”, Proc. International Interconnect Technology Conference, (2005 IITC), p.203 (2005)
- [2] S.Kondo, K.Fukaya, T.Miyazaki, M.Fujita, D.Abe, S.Kunisaki, T.Enomoto, S.Tominaga, “Damage less Cu chemical mechanical polishing for SiOC/Cu interconnects”, Microelectronic Engineering, 84, p.2615 (2007)
- [3] S.Kondo, D.Abe, S.Tominaga, K.Yamada, S.Saito, “Hybrid e-CMP/CMP Process with Non-Contact Electrode Pad”, Proc. International Interconnect Technology Conference, (2008 IITC), p.253 (2008)
- [4] 榎本俊之、藤田努、富永茂、鈴木眞、“構造制御形固定砥粒研磨パッドの開発:光学ガラス研磨への適用”、日本機械学会論文集、C編 73(726), pp.639-644 (2007)
- [5] 藤田努、榎本俊之、富永茂、鈴木眞、“構造制御形固定砥粒研磨パッドの開発:加工特性の向上に関する検討”、日本機械学会論文集、C編 73(737), pp.219-224 (2008)
- [6] 藤田努、榎本俊之、富永茂、鈴木眞、“構造制御形砥粒研磨パッドによる高能率仕上げ加工:工作物と研磨パッド間の接触状態の改善”、日本機械学会論文集、C編 73(747), pp.2803-2808 (2008)
- [7] 高崎亮、藤田努、榎本俊之、富永茂、“高加工能率を実現する構造制御形砥粒研磨パッドの開発に関する研究”、生産加工・工作機械加工部会:生産と加工に関する学術講演会 2008(7)、pp.199-200 (2008)
- [8] 富永茂、榊原晋、土肥俊郎、“新しい CMP 固定砥粒形ポリシングパッドの開発研究”、埼玉大学地域共同研究センター紀要、2, pp.90-95 (2001)

- [9] 代田渉、榊原晋、富永茂、土肥俊郎、“新しい固定砥粒パッドによるセミドライ加工方法の研究”、埼玉大学地域共同研究センター紀要、3, pp.14-20 (2002)
- [10] 富永茂、代田渉、土肥俊郎、“Cu 配線材の電気化学的ポリッシング法の基礎的研究”、埼玉大学地域共同研究センター紀要、4, pp.7-13 (2003)
- [11] 富永茂、土肥俊郎、“Cu 配線材の電気化学的ポリッシング法の基礎的研究(2)”、埼玉大学地域共同研究センター紀要、5, pp.7-10 (2004)
- [12] 富永茂、土肥俊郎、“Cu 配線材の電気化学的ポリッシング法の基礎的研究(3)”、埼玉大学地域共同研究センター紀要、6, pp.10-15 (2005)
- [13] 阿部大輔、榎本太郎、近藤誠一、富永茂、“デバイスウエハの研磨パッド、研磨体、研磨工具構成及び研磨方法”、特許第 4500885 号

謝 辞

本研究の遂行にあたって、ご協力賜りました皆様に、心より感謝の意を表します。

本論文は、横浜国立大学大学院工学府 機能発現工学 物質とエネルギーの創生工学コース(2012年4月1日～2013年3月31日)において、横浜国立大学大学院工学研究院 機能の創生部門 羽深 等 教授のご指導の下にまとめることができたものであり、同教授より賜りました懇切なるご指導とご鞭撻に対し、深甚の謝意を表します。

横浜国立大学大学院工学研究院 機能の創生部門 松本 幹治 教授(現同部門名誉教授)には、本論文をまとめる機会をご提示していただき、その後も折に触れ、論文のまとめ方などを暖かくご指導いただきました。心からお礼申し上げます。

横浜国立大学大学院工学研究院 機能の創生部門 上之内 周 教授には、学術的見地からの論文のまとめ方に関し、懇切なご教授、ご鞭撻を頂き、深く感謝申し上げます。

横浜国立大学大学院工学研究院 機能の創生部門 中村 一穂 准教授には、研究と開発の相違からの論文のまとめ方に関し、適切なご教授、ご鞭撻を頂き、深く感謝申し上げます。

横浜国立大学大学院工学研究院 機能の創生部門 仁志 和彦 准教授には、参照文献との比較や論理的記述に関し、適切なご教授、ご鞭撻を頂き、深く感謝申し上げます。

本論文は、株式会社ロキテクノにおいて実施した、LSI デバイスの多層配線プロセスの平坦化加工に用いられる研磨パッドの形態と、その加工技術に関する研究内容をまとめたものであり、2000年から2010年までの10年間に行った内容となります。

本研究の推進にあたり、故人となってしまいました、株式会社ロキテクノ 元代表取締役社長 伊東 幹夫氏には、種々のご指導、ご助言を頂き、また、並々ならぬご支援を頂きました。深く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたって、株式会社半導体先端テクノロジーズ

近藤 誠一氏（現 日立化成工業株式会社 主任研究員）には、Cu 多層配線の平坦化複合電解研磨プロセス技術の評価実験で、種々のご指導、ご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。

東京大学大学院 工学系研究科 総合研究機構 ナノ工学センター 大場 隆之 特任教授には、3次元積層 LSI デバイスの Cu 配線技術について、種々のご指導、ご助言を頂きました。また、同センター研究員 北田 秀樹氏には、ご助言、評価データのご提示を頂きました。深く感謝申し上げます。

埼玉大学 教育学部 土肥 俊郎 教授（現 九州大学大学院工学府 機械工学 教授）には、研究の当初から、地域共同研究を通じて、研磨による平坦化技術に関してご教授頂き、種々のご指導、ご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。

大阪大学 工学研究科 機械工学専攻 榎本 俊之 教授には、自己放出型固定砥粒パッドによる加工技術に関し、種々のご指導、ご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。

自己放出型固定砥粒パッドの開発、試作で、松林工業株式会社 小山 嘉一 代表取締役社長、田畑 邦夫 開発部長にご協力頂きました。深く感謝致します。

株式会社エム・エー・ティ 中原 司代表取締役、技術統括部 田中 克典氏、武田 大氏には、複合電解研磨の各種試験でご協力頂き、深く感謝致します。

株式会社日立ハイテクソリューションズ 神野 進 営業 2 部 部長、砂澤 満 事業企画部 部長代理には、半導体デバイスメーカーや研磨装置メーカーを紹介いただき、自己放出型固定砥粒パッドがカスタマーで如何に扱われるかなどの調査にご協力頂き、深く感謝致します。

株式会社ロキテクノ 田辺 一成 取締役副社長、鈴木 眞 開発部長（現 株式会社ケー・エス・ティー 取締役）、開発部の阿部 大輔氏（現 篠原小宮国際特許事務所 弁理士）、及び榎本 太郎氏の皆様には、研究及び仕事の両面で協力頂きました。深く感謝致します。

最後に、本論文の作成を陰から支え励ましてくれた、最愛の妻 洋子

に感謝致します。

2013年1月吉日

富永 茂

參考資料

研磨軌跡

1. プラテン・ロータリー型研磨装置の研磨軌跡

参図 1-1～参図 1-6 の解析条件

x方向の揺動長さ	a(cm)	3
y方向の揺動長さ	b(cm)	0
初期位置のy座標	Ly(cm)	0
初期位置のx座標	Lx(cm)	19
揺動回転数	m(1/min)	5
工作物回転数	nw(rpm)	parameter
工具回転数	np(rpm)	40
工作物解析位置	r(cm)	14

参図 1-7～参図 1-12 の解析条件

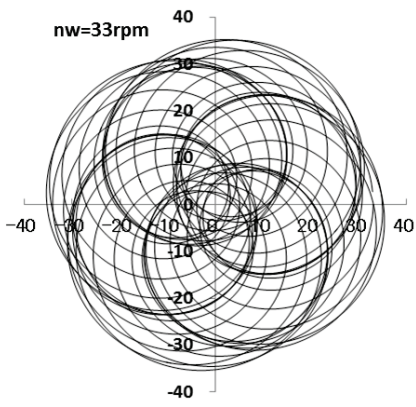
x方向の揺動長さ	a(cm)	3
y方向の揺動長さ	b(cm)	0
初期位置のy座標	Ly(cm)	0
初期位置のx座標	Lx(cm)	19
揺動回転数	m(1/min)	parameter
工作物回転数	nw(rpm)	37
工具回転数	np(rpm)	40
工作物解析位置	r(cm)	14

参図 1-13～参図 1-18 の解析条件

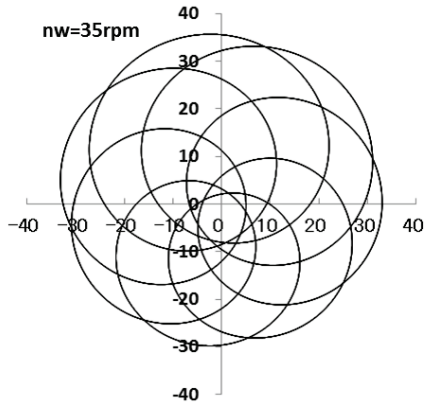
x方向の揺動長さ	a(cm)	3
y方向の揺動長さ	b(cm)	0
初期位置のy座標	Ly(cm)	0
初期位置のx座標	Lx(cm)	19
揺動回転数	m(1/min)	5
工作物回転数	nw(rpm)	37
工具回転数	np(rpm)	40
工作物解析位置	r(cm)	parameter

参図 1-19～参図 1-24 の解析条件

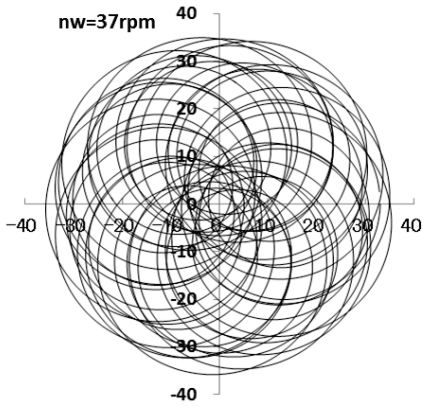
x方向の揺動長さ	a(cm)	3
y方向の揺動長さ	b(cm)	0
初期位置のy座標	Ly(cm)	0
初期位置のx座標	Lx(cm)	19
揺動回転数	m(1/min)	5
工作物回転数	nw(rpm)	37
工具回転数	np(rpm)	40
工作物解析位置	r(cm)	15
研磨時間	T(sec)	parameter



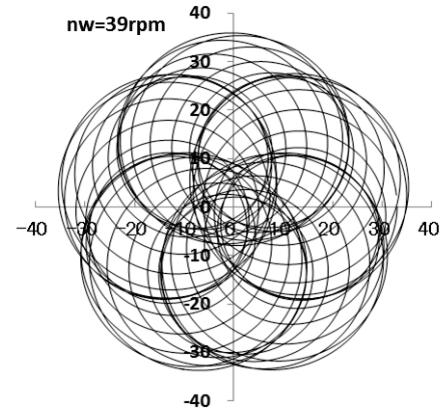
参图 1-1



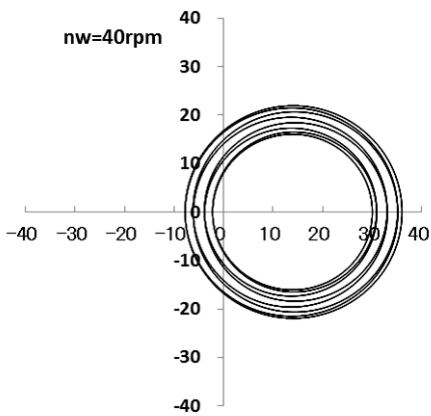
参图 1-2



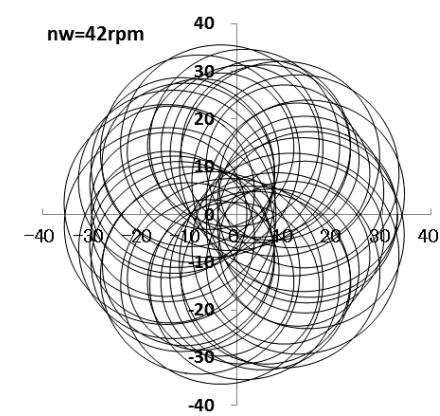
参图 1-3



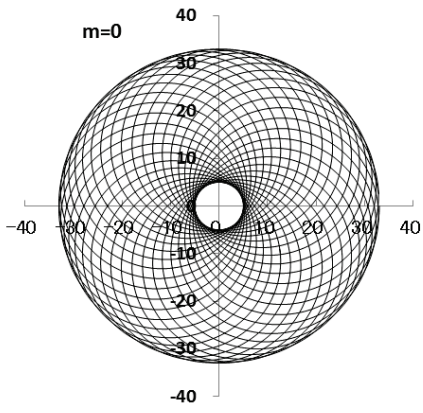
参图 1-4



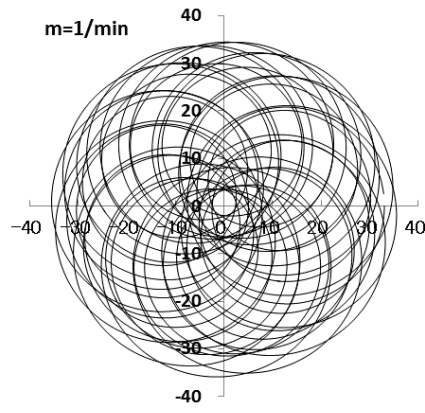
参图 1-5



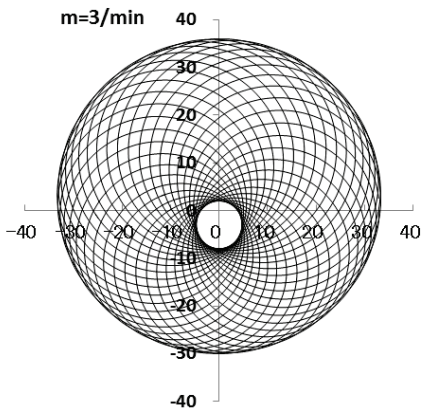
参图 1-6



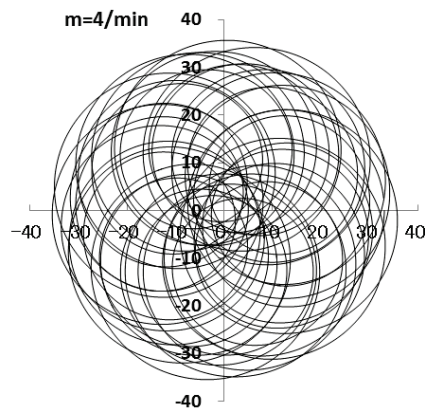
参图 1-7



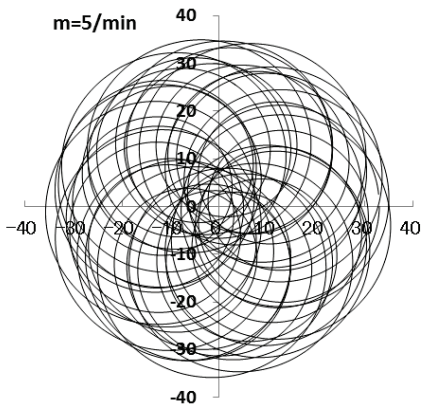
参图 1-8



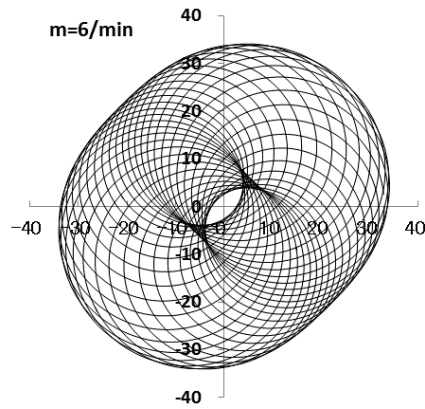
参图 1-9



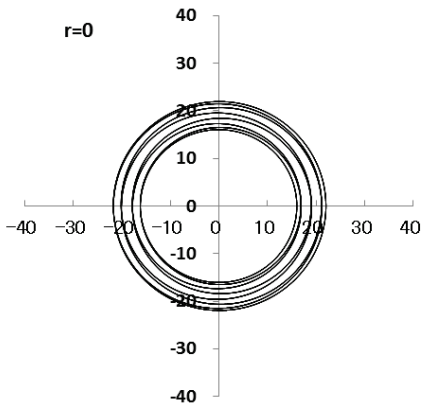
参图 1-10



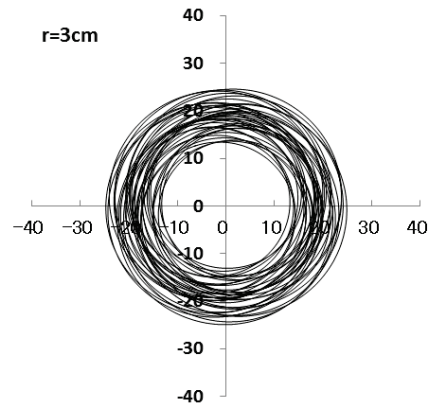
参图 1-11



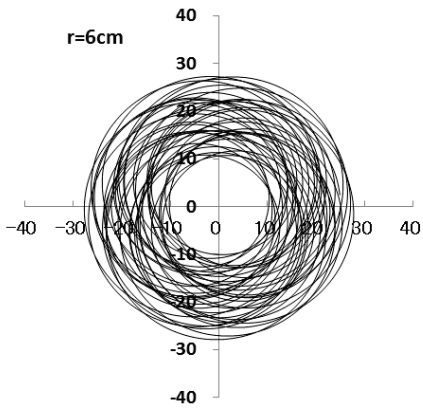
参图 1-12



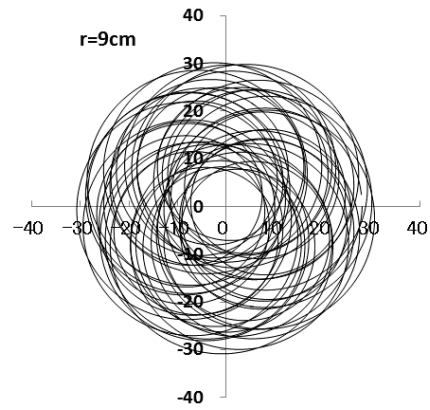
参图 1-13



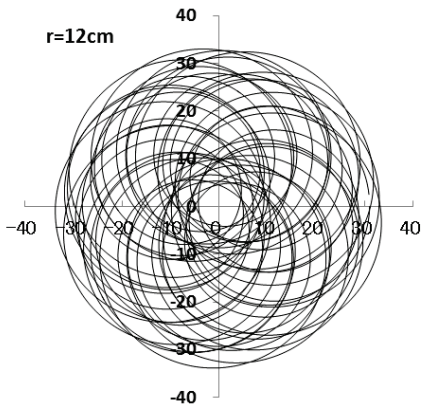
参图 1-14



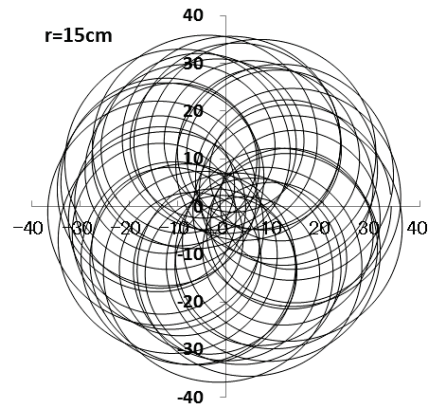
参图 1-15



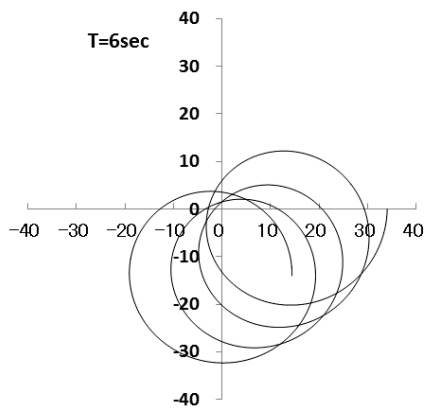
参图 1-16



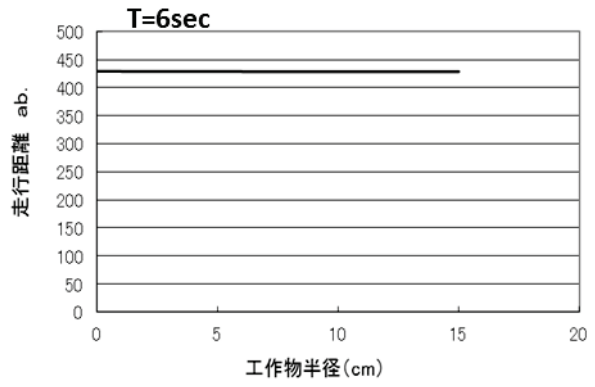
参图 1-17



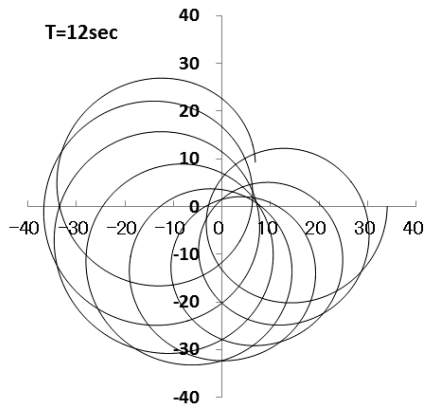
参图 1-18



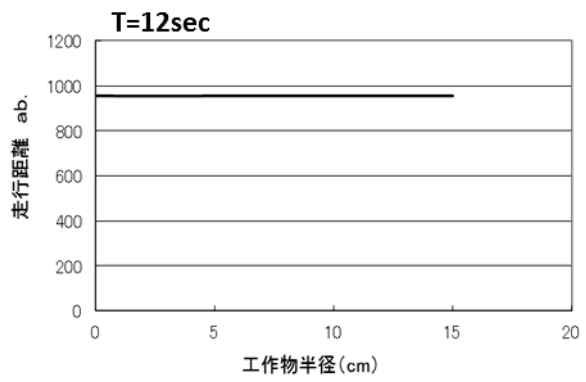
参图 1-19



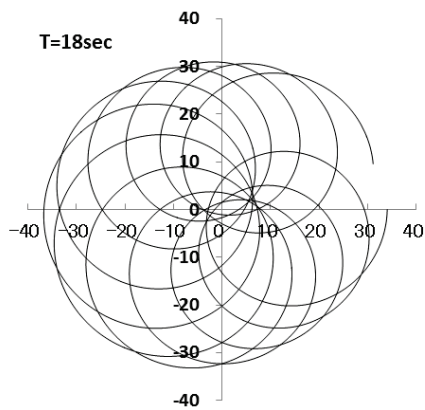
参图 1-20



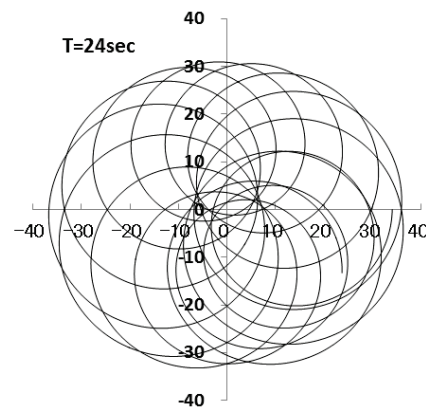
参图 1-21



参图 1-22



参图 1-23



参图 1-24

2. 同径工具による揺動速度制御型研磨装置の研磨軌跡

参図 2-1～参図 2-6 の解析条件

工具回転数	np (rpm)	40
工作物回転数	nw (rpm)	parameter
揺動回数	m (rpm)	4
X軸初期位置	Lx (cm)	0
X 軸揺動半径	a (cm)	12.5
工具外半径	Rb (cm)	15
工作物解析位置	r (cm)	6

参図 2-7～参図 2-12 の解析条件

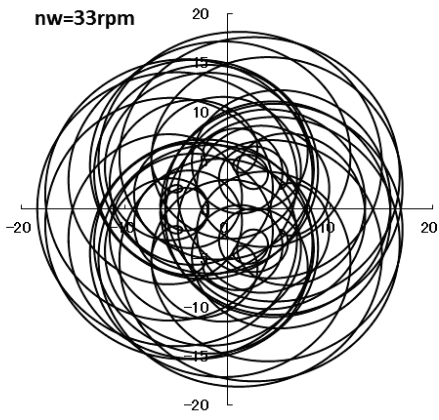
工具回転数	np (rpm)	40
工作物回転数	nw (rpm)	37
揺動回数	m (/min)	parameter
X軸初期位置	Lx (cm)	0
X 軸揺動半径	a (cm)	12.5
工具外半径	Rb (cm)	15
工作物解析位置	r (cm)	6

参図 2-13～参図 2-18 の解析条件

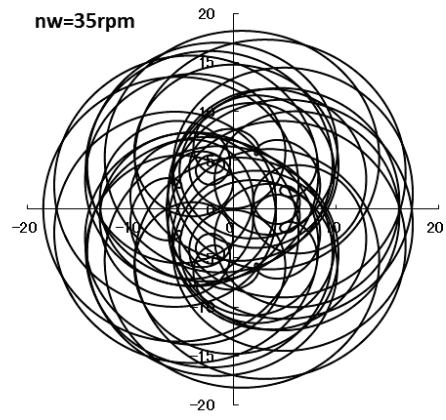
工具回転数	np (rpm)	40
工作物回転数	nw (rpm)	37
揺動回数	m (rpm)	5
X軸初期位置	Lx (cm)	0
X 軸揺動半径	a (cm)	12.5
工具外半径	Rb (cm)	15
工作物解析位置	r (cm)	parameter

参図 2-19～参図 2-24 の解析条件

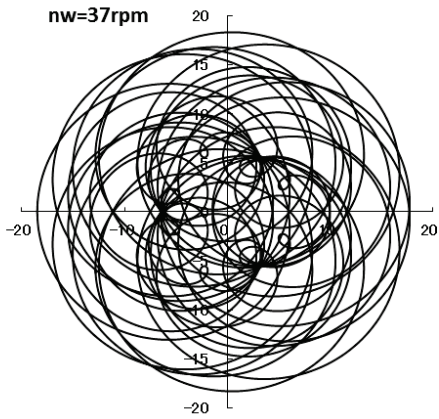
工具回転数	np (rpm)	40
工作物回転数	nw (rpm)	37
揺動回数	m (rpm)	5
X軸初期位置	Lx (cm)	0
X 軸揺動半径	a (cm)	12.5
工具外半径	Rb (cm)	15
研磨時間	T (sec)	parameter
工作物解析位置	r (cm)	14



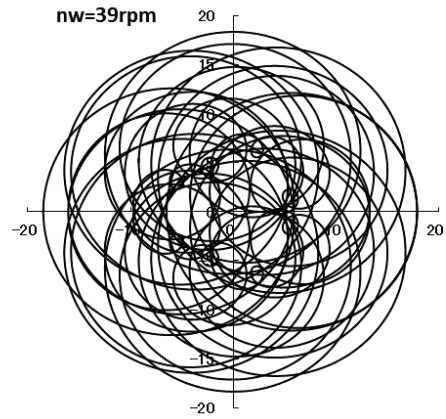
参图 2-1



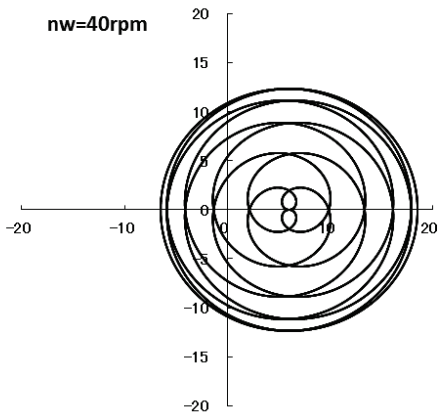
参图 2-2



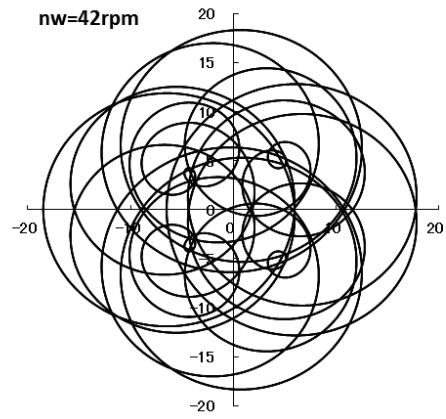
参图 2-3



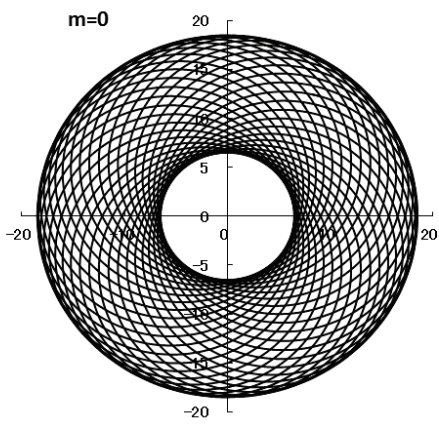
参图 2-4



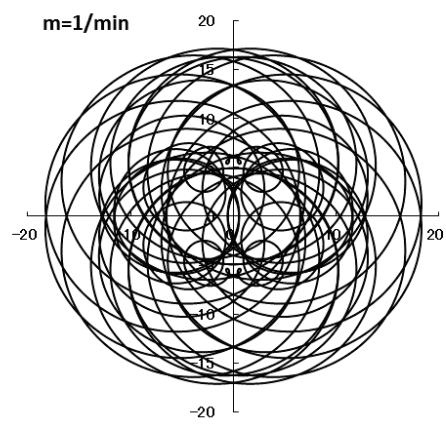
参图 2-5



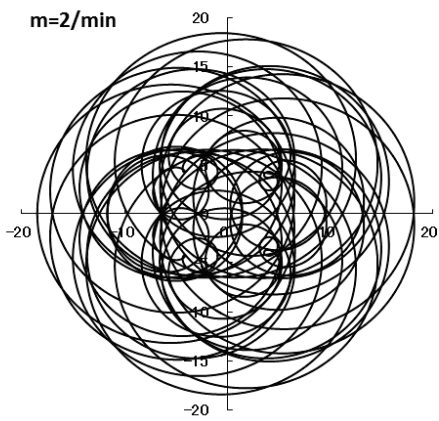
参图 2-6



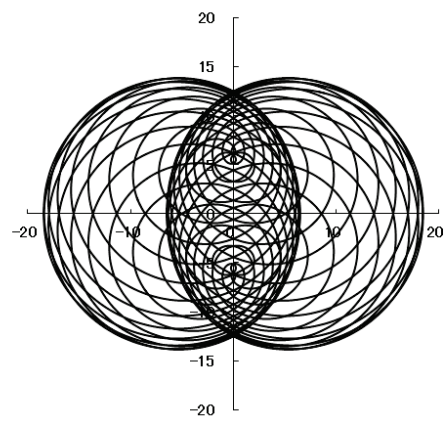
参图 2-7



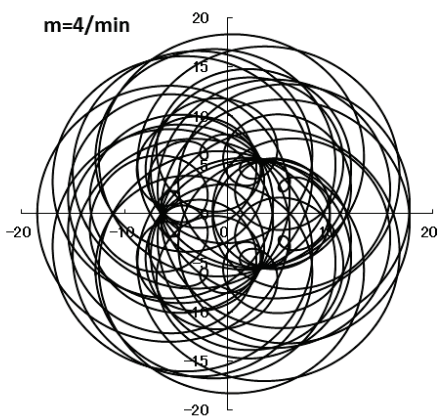
参图 2-8



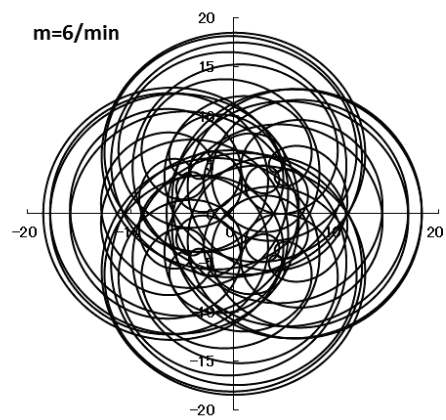
参图 2-9



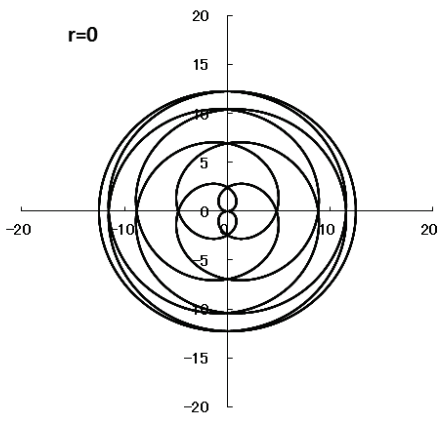
参图 2-10



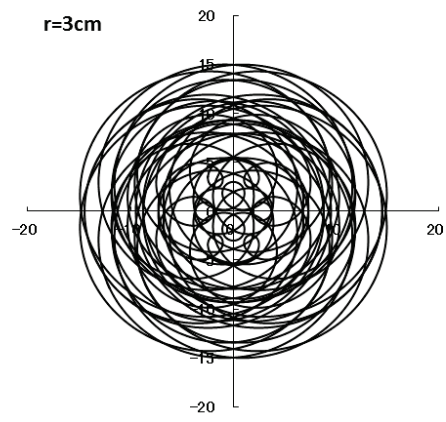
参图 2-11



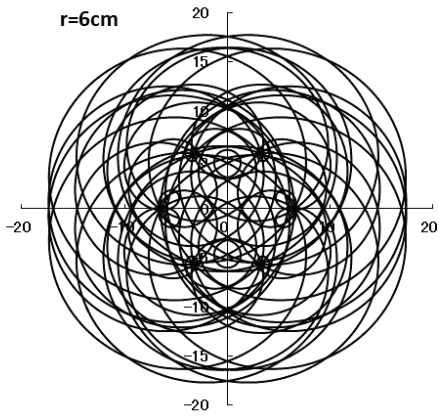
参图 2-12



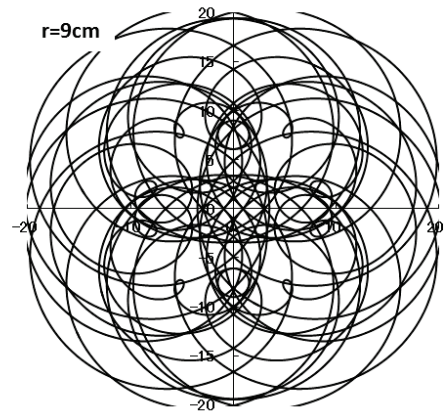
参图 2-13



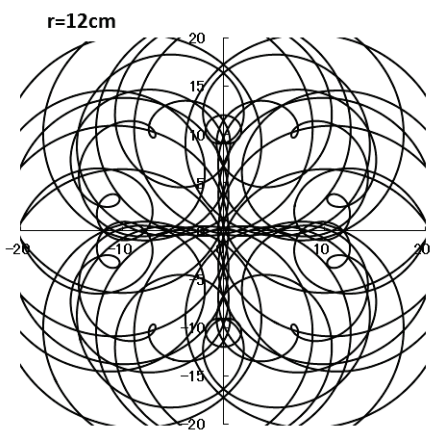
参图 2-14



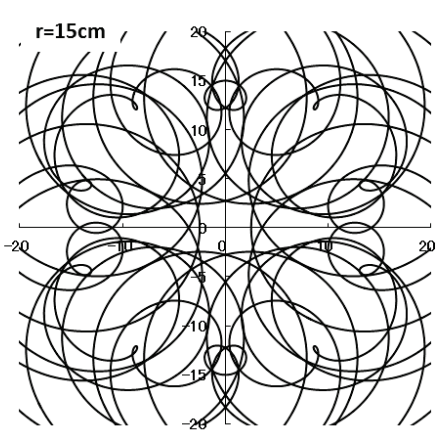
参图 2-15



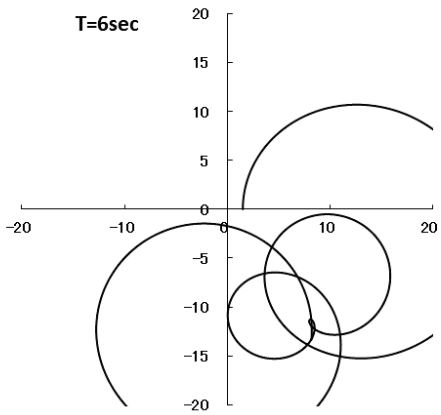
参图 2-16



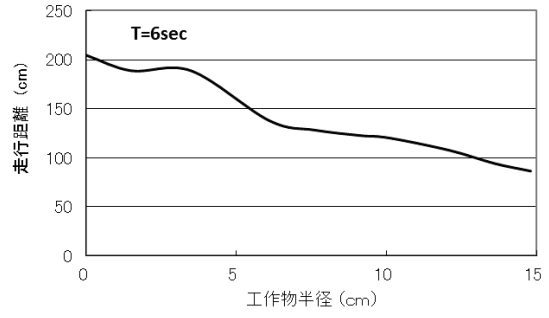
参图 2-17



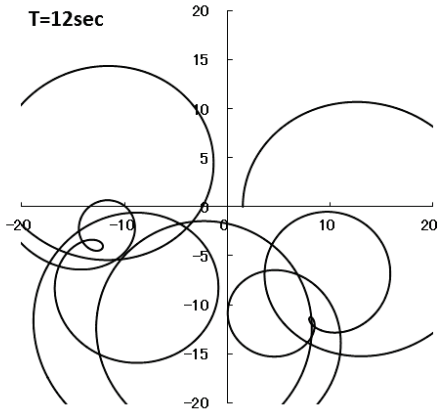
参图 2-18



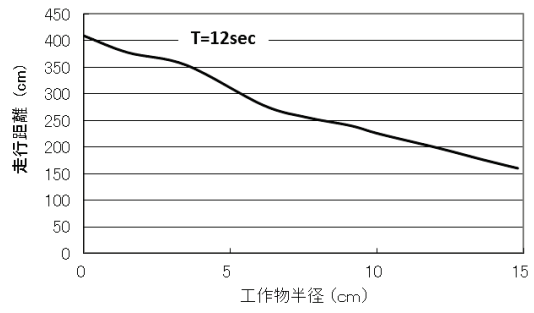
参图 2-19



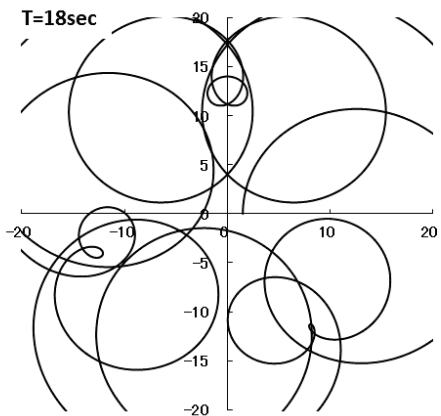
参图 2-20



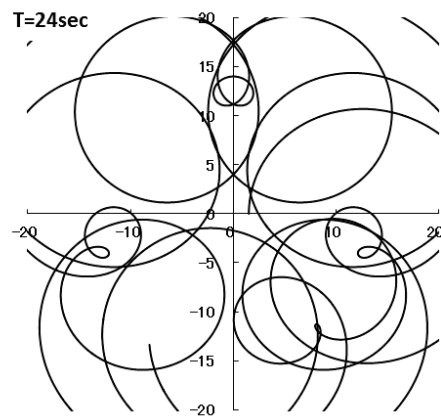
参图 2-21



参图 2-22



参图 2-23



参图 2-24

