

学位論文 博士(工学)

樹脂パッドと電界砥粒制御技術を適用した
先進結晶材基板の低ダメージ機械研磨技術に関する研究

2019年12月

秋田大学大学院理工学研究科

千葉 翔悟

目次

第1章 緒論	4
1.1 研究の背景	4
1.1.1 省電力化を実現するワイドバンドギャップ半導体の特性	4
1.1.2 ワイドバンドギャップ半導体結晶の製造方法とベース基板に求められる表面品位	7
1.2 従来の加工プロセスと関連する研究	8
1.2.1 従来の基板加工プロセスとダイヤモンドラップ工程の位置づけ	8
1.2.2 従来の研究	12
1.3 研究の目的と本論文の構成	13
参考文献	16
第2章 砥粒径が研磨界面の挙動に及ぼす影響	19
2.1 緒言	19
2.2 実験装置・試験片及び実験条件	20
2.2.1 蛍光発光粒子その場観察摩擦試験機 (iFLAT)	20
2.2.2 蛍光染色及びフィルタ	23
2.2.3 摩擦試験条件及び潤滑条件	25
2.3 実験結果及び考察	27
2.3.1 観察面内へのダイヤモンド砥粒侵入	27
2.3.2 観察面内への2及び3 μm ダイヤモンド砥粒侵入	29
2.4 結言	31
参考文献	32
第3章 研磨界面における砥粒の振る舞いに及ぼす金属定盤及び樹脂パッドの影響	33
3.1 緒言	33
3.2 静的押込み条件下における銅板及び樹脂パッド上の砥粒挙動に関する検討	34
3.2.1 実験方法及び評価手法	34
3.2.2 実験結果	38

3.3	しゅう動条件下における銅板及び樹脂パッド上の砥粒挙動に関する 検 討	41
3.3.1	実験方法及び評価手法	41
3.3.2	実験結果	43
3.4	銅板及び樹脂パッド上の砥粒挙動に関する考察	45
3.5	結 言	46
	参考文献	47
第 4 章	研磨加工特性に及ぼす金属定盤及び樹脂パッドの影響	48
4.1	緒 言	48
4.2	銅定盤及び樹脂パッドの研磨加工特性に関する比較検討	49
4.2.1	実験装置及び実験方法	49
4.2.2	研磨実験結果	52
4.3	銅定盤及び樹脂パッドが加工変質層深さに及ぼす影響	55
4.3.1	実験装置及び実験方法	55
4.3.2	加工変質層深さ評価実験結果	57
4.4	樹脂パッドによるダメージ低減効果に関する考察と有効性の検討	59
4.5	結 言	61
	参考文献	62
第 5 章	SiC 基板の研磨加工へ及ぼす樹脂パッドの影響	63
5.1	緒 言	63
5.2	樹脂パッドによる SiC 基板の研磨加工特性に関する基礎評価 ...	64
5.2.1	実験装置及び実験方法	64
5.2.2	研磨実験結果	65
5.2.3	SiC 基板の研磨加工に関する考察	66
5.3	結 言	68
	参考文献	69
第 6 章	樹脂パッドによる機械研磨に及ぼす電界砥粒制御技術の影響	70
6.1	緒 言	70
6.2	電界砥粒制御技術	71
6.3	小型研磨装置を用いた電界砥粒制御技術の適用に関する基礎検討	72

6.3.1 多結晶ダイヤモンド砥粒挙動に及ぼす電界の影響	72
6.3.2 小型研磨装置における電界が研磨特性に及ぼす影響	75
6.4 大型研磨装置における電界が研磨特性に及ぼす影響	78
6.4.1 大型電界研磨装置	78
6.4.2 大型装置における電界印加周波数が研磨レートに及ぼす影響	80
6.4.3 大型装置における電界ダイヤモンドポリッシングの有効性に関する検討	82
6.5 樹脂パッド及び電界砥粒制御技術を用いた加工の有効性に対する比較検討	86
6.6 結 言	87
参考文献	88
第7章 結 論	89
謝 辞	92

第1章 緒論

1.1 研究の背景

1.1.1 省電力化を実現するワイドバンドギャップ半導体の特性

近年、世界的に情報通信機器の普及ならびに高度化が進展している。わが国においても、目指すべき国の姿として Society 5.0 が提唱され、IoT や AI、ロボットや自動走行車などの技術により、経済発展と社会的課題の解決を両立することが目標として掲げられている[1]。このような背景を受けて、図 1-1 に示すように世界の情報量 (IP トラフィック) は増加し[2]、2050 年には 2016 年の 4,000 倍に達すると予想され、今後、省エネルギー対策がなされないと仮定した場合、この時の世界の電力消費量は 5000 PWh (5×10^{15} Wh) に達すると予測されている。この値は現在の世界における消費電力量約 24 PWh を大幅に上回っている[3]。すなわち、人類の持続的な発展において、電力エネルギー問題は避けて通ることのできない課題である。

本課題の解決手段の一つとして、パワーデバイスの高性能化が挙げられる。パワーデバイスとは、インバーター及びコンバーターなどの電力変換器に用いられる半導体素子であり、現在は Si 基板を用いた MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) や IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が主流となっている。しかし、これらの Si パワーデバイスは Si の物性限界に直面し始めており、高効率化及び電力損失の低減には限界があると考えられている[4]。これを受けて、高効率化を実現する新たな材料として、SiC、GaN 基板などのワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスが注目を集めている。このワイドバンドギャップ半導体はその名のとおり、幅広い禁制帯幅を持つ材料である。Si と SiC 及び GaN の主な物性値の比較を表 1-1 に示す。SiC 及び GaN の絶縁破壊電界は Si の 8~10 倍であり、たとえば 3.3 kV 耐圧の MOS デバイスを作った場合、SiC ではオン電圧 (小さいほど電力損失が小さい) が Si の約 200 分の 1 となる[5]。

また、ワイドバンドギャップ半導体を用いた省電力な光デバイスとして、LED(Light Emitting Diode)が挙げられる。1980年代後半から90年代初めにGaNを用いた青色LEDが発明されたことで、白色光を作ることが可能となり、現在は液晶のバックライトや一般家庭における照明分野で採用が進んでいる。LEDと電球型蛍光灯、白熱灯照明の消費電力及び寿命を表1-2に示す。LEDと白熱電球を比べると同じ明るさを作るのに必要な電力は8分の1程度となる[6]。

これらより、ワイドバンドギャップ半導体は、今後人類が直面する電力エネルギー問題の解決に貢献する先進材料であり、速やかな普及拡大が望まれる。しかし、現状は高い製造コストや低い生産性が課題となっており、普及には品質を落とさずに高生産性化を達成できる製造技術の開発が必須である[7]。

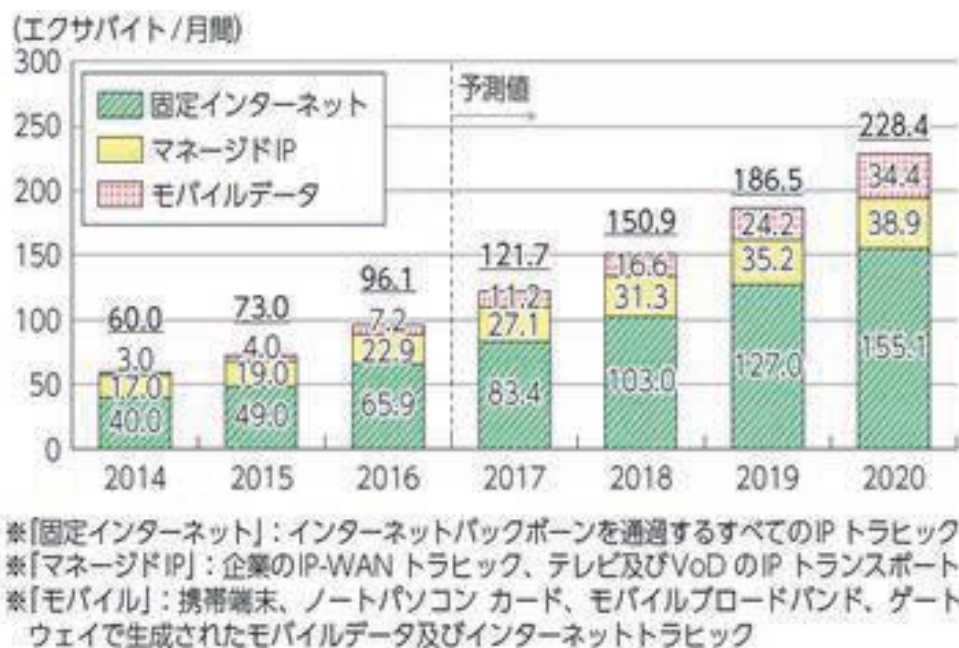


図 1-1 世界のトラフィック推移[2]

表 1-1 Si, SiC, GaN の物性比較[5]

	Si	SiC(4H)	GaN
バンドギャップ(eV)	1.12	3.2	3.4
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.3	2.8	3.0
電子移動度(cm/Vs)	1450	1000	1500
熱伝導率(W/cm・°C)	1.5	5.0	1.5

表 1-2 各電球型照明の特徴 [6]

	LED 電球	電球型蛍光灯	白熱灯
消費電力(W)	7	12	54
寿命(時間)	40000	6000	1000

1.1.2 ワイドバンドギャップ半導体結晶の製造方法とベース基板に求められる表面品位

物質は通常、構成する元素の原子番号の合計が小さくなるほど格子定数が小さく、結合が強く、融点が高く、バンドギャップが大きくなる。このため、SiC 及び GaN は結合の強さに起因した結晶成長温度の高さ、構成元素の解離圧の高さなどの理由から、通常の融液成長が困難である。したがって、大口径の高品質バルク結晶の成長が困難であり、一般に異種基板上にエピタキシャル成長させる手法が行われている[8].

一般的に SiC は、初めに昇華再結晶法（改良レイリー法）などによってバルク結晶を得る。前述のとおり、現状、この手法によって得られたバルク結晶は、マイクロパイプなどの結晶欠陥が存在し、結晶品質面で課題を有する。したがって、このままではパワーデバイスとして用いることが難しいため、得られた SiC 基板上にさらに化学気相堆積法(CVD)などにより高品位エピタキシャル成長層を形成させる[9][10][11].

また、GaN の結晶成長手法としては、分子線エピタキシー法(MBE)、有機金属化合物気相成長 (MOVPE) 及び有機金属化学気相成長 (MOCVD) 法などが挙げられる。いずれの成長手法においても、一般にサファイア基板上への成長がなされる。しかし、GaN とサファイアの間には 13.8%の格子定数差や 25.5%の熱膨張係数差が存在するため、良質のエピタキシャル成長層を得ることは難しい。そこで、サファイア基板上に AlN あるいは GaN の低温バッファ層を成長させ、そののちに GaN の高温エピタキシャル成長を行う方法が採用されている[12][13][14].

これらの手法において、成長のベースとなる SiC、サファイア基板の表面に格子欠陥や加工に起因する結晶ひずみなどの加工変質層が存在する場合、エピタキシャル層にも欠陥や転移が引き継がれ、影響を及ぼす。この欠陥はデバイス特性に影響を及ぼし、故障の要因ともなりうる。したがって、ベース基板表面には原子レベルで欠陥や結晶ひずみのない表面が求められている[15][16].

1.2 従来の加工プロセスと関連する研究

1.2.1 従来の基板加工プロセスとダイヤモンドラップ工程の位置づけ

パワーデバイスのベース基板として用いられる SiC、サファイア基板は硬さと脆さの性質を併せもつ硬脆材料である。硬さを表す指標の一つに修正モース硬度があるが、本指標において SiC は 13、サファイアは 12 であり、ダイヤモンド(15)、炭化ホウ素(14)に次ぐ硬度を有する。さらに、いずれの材料も高い化学安定性を有することから難加工材料として知られている。

SiC、サファイアの一般的な加工プロセスの一例を図 1-2 に示す。初めに、円柱状の結晶インゴットに対し、砥石を用いた外径研削加工がなされ、外径寸法の決定及び結晶方位識別用のオリエンテーションフラットを形成する。次に固定砥粒ワイヤーとマルチワイヤーソーを用いた切断加工により、所定の厚さの自立基板を同時に多数枚取得する。ここで得られた基板は、一般に切断によって発生する反りや厚みのばらつきを有している。そこで、次工程では粒子径数十 μm 程度の緑色炭化ケイ素 (GC) などの砥粒と鋳鉄定盤を用いた両面ラッピングがなされ、反りを除去し、厚み精度及び平坦性を整える。このラッピング工程は、基板への砥粒の押込みによる脆性破壊を主とした加工であるため、基板の表面には砥粒の硬さ、粒子径及び定盤の硬さなどに応じ、クラックなどの加工変質層が形成される[17]。次のダイヤモンドラッピング工程は加工変質層の緩和を主たる目的とする工程である。銅及び錫などの軟質金属定盤と粒子径 10 μm 以下程度のダイヤモンド砥粒を用い、両面ラッピングにおいて形成された加工変質層深さを低減する。しかし、このダイヤモンドラッピング工程においても加工変質層が形成される。最終工程はポリウレタン樹脂や不織布、またはスウェード製の研磨パッドと粒子径 100 nm 以下程度のコロイダルシリカスラリーなどを用いた化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing ; CMP) が行われる。CMP は、砥粒などによって加えられた機械的エネルギーにより、基板と研磨スラリーとの固液相反応を誘起・活性化し、加工を促進させる技術である。これより、無ひずみの高品質加工面を得ることが可能とされる[18]。最終的にこの CMP 工程におい

て、前工程までに形成された加工変質層を完全に除去し、エピタキシャル成長に供与可能な表面を創製する。

先述の加工プロセスにおいて、両面ラッピング、ダイヤモンドラッピング、及び CMP は遊離砥粒を用いた遊離砥粒研磨加工である。図 1-3 に遊離砥粒研磨加工法の模式図を示す。本加工法は工具と工作物（ワーク）に砥粒を挟み込み、一定の圧力条件下において工具とワークを相対運動させ、砥粒の切れ刃により、ワークをごく微量ずつ削り取って精密に仕上げる加工法である。この遊離砥粒研磨加工において、鋳鉄、銅、錫などの金属定盤やセラミックスなどの硬質工具（ラップ）を用いる場合はラッピング、ピッチや研磨パッドなどの軟質工具（ポリッシャ）を用いる場合はポリッシングと定義されている[19]。本加工法においては、一般に高硬質工具と高硬度及び大径砥粒を用いるほど研磨効率は高くなり、それと比例してワークには深い加工ダメージが形成される。したがって、後工程になるほど研磨効率は低下し、加工時間は長時間化する。特に表 1-3 に示すように、SiC やサファイアの CMP 工程における研磨効率は低く、Si の研磨効率と比べると、サファイアは 1/40 倍、SiC は 1/5000 倍となる[20]。これより、CMP 工程に係る加工時間及び加工コストは、全加工プロセスの中でも大きな比重を占めており、基板コストの押し上げ要因となっている。CMP 工程の高効率化を目的とし、紫外光を援用した加工法[21]や活性ガス内包ナノバブルを援用した加工法[22]、電解による陽極酸化を援用した加工法[23]など種々の複合加工が検討されている。しかし、CMP 工程単独の高効率化には限界がある。したがって、基板加工コストの低減には前工程であるダイヤモンドラッピング工程で形成される加工変質層深さの抑制は必須であるといえる。

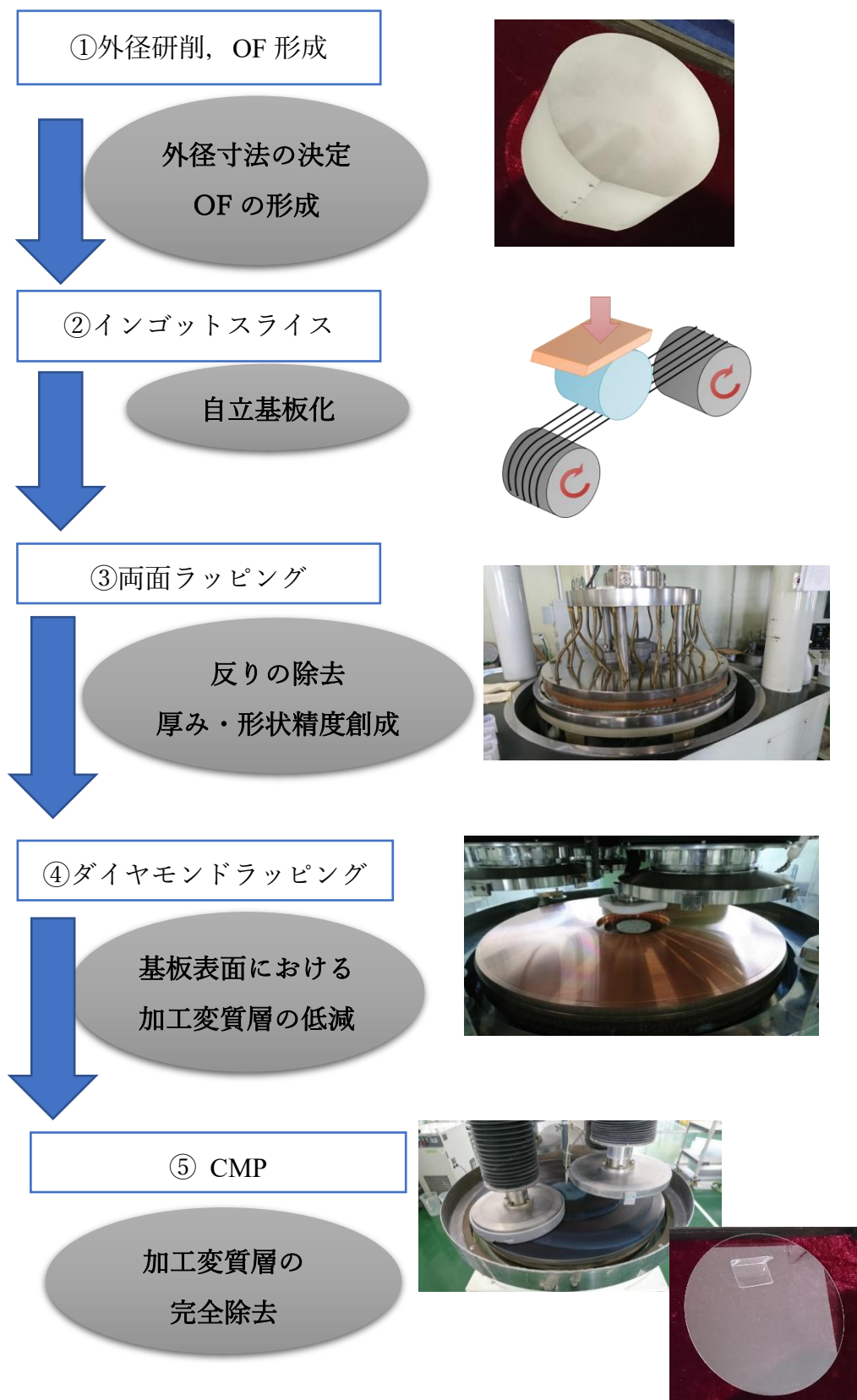


図 1-2 SiC, サファイアの加工プロセス

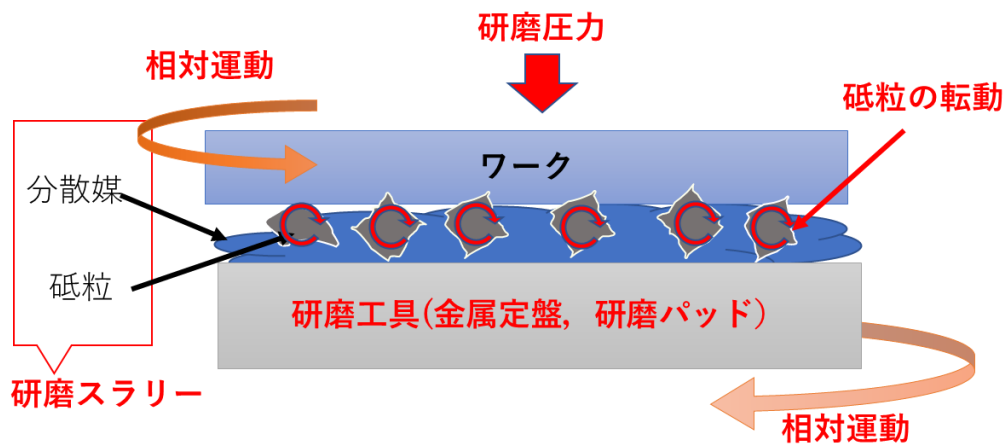


図 1-3 遊離砥粒研磨加工模式図

表 1-3 各種基板の研磨速度 [20]

	Si	サファイア	GaN	SiC
シリカ研磨剤による 研磨速度(pH11) $\mu\text{m}/\text{min}$	1	0.03	0.005	0.0002

1.2.2 従来の研究

サファイアや SiC などのダイヤモンドラッピング加工に代替する技術として、固定砥粒すなわち砥石を用いた研削加工が検討されている。山口らは #200 のメタルボンドダイヤモンドホイールを用いた定圧研削により、SiC の研削加工において Ra 0.73 nm の超平滑研削面が得られることを報告している [24]。しかし、一般に研削加工は枚葉処理であるため、バッチ処理の研磨加工と比べ生産効率が低い。また、研削加工は装置の機械精度及び剛性がそのまま基板の形状精度に反映されるため、研磨装置と比較して、その装置価格は高価となる。また、サファイアは微細砥粒領域での研削が困難であることが知られており [25]、材料によっては適用することができない。

他方、土肥らはダイラタンシー効果に着目し、特殊フィラーを高濃度に混練した粘弾性材料を創製し、これを研磨パッドに埋め込むことでダイラタンシー現象を発現可能なダイラタンシーパッドを開発した。本パッドは高速・高研磨圧条件下において優れた研磨特性を発現し、SiC 基板の加工において、従来の金属定盤を用いたダイヤモンドラッピングと比較して、研磨レートは 10 倍、加工変質層深さは 1/10 倍と高効率かつ低ダメージとなる加工を実現している [26]。しかし、この高速・高研磨圧加工は市販の汎用的な研磨装置では困難であり、専用の高剛性研磨装置を導入する必要がある。また、高速・高圧環境下においては高い研磨熱が発生すると考えられ、基板の保持や連続加工の観点では課題を有すると考えられるが、これらの点については述べられていない。

これらより、バッチ処理が可能かつ従来の装置に適用可能なダイヤモンドラッピング代替技術の創出は非常に大きな意義がある。

1.3 研究の目的と本論文の構成

本研究は、第一に従来のダイヤモンドラッピング工程における金属製定盤をポリウレタン樹脂製のパッド(樹脂パッド)に代替し、加工変質層の低減を達成する。更に砥粒の配置制御技術である電界砥粒制御技術を導入し、研磨効率向上を実現する。これらより、低加工ダメージと高効率を両立する新たな機械研磨技術を提案し、ワイドバンドギャップ半導体の製造コスト低減に寄与することを目的とする。

本論文は図 1-4 に示すように本章を含む 7 章より構成される。

第 1 章の「緒論」では、本研究の背景と基板加工プロセスにおけるラップ加工の位置づけ及び従来ラップ技術に関する概要と課題をまとめ、本研究の目的及び意義を明らかにする。

第 2 章の「砥粒径が研磨界面の挙動に及ぼす影響」では従来ラップ加工における研磨界面への砥粒侵入挙動及び摩耗状態等を明らかにする。具体的には、高感度 EMCCD(Electron Multiplying Charge-Coupled Device)カメラを用いたその場観察摩擦試験機を構築し、暗視野による観察及び蛍光染色したダイヤモンド砥粒の蛍光発光法 (intelligent Fluorescent Light Assisted Tribometer: iFLAT) を用いた粒子挙動の観察可能性について明らかにし、ダイヤモンド砥粒の摩擦面への侵入について述べる。

第 3 章の「研磨界面における砥粒の振る舞いに及ぼす金属定盤及び樹脂パッドの影響」では、白色干渉顕微鏡を用いた銅板及び樹脂パッド上の砥粒観察手法について述べる。また、本評価手法を用い、砥粒押し込み実験及びサファイア基板とのしゅう動実験を行い、金属定盤と樹脂パッド上の砥粒の振る舞いについて明らかにする。

第 4 章の「研磨加工特性に及ぼす金属定盤及び樹脂パッドの影響」では、サファイア基板をワークとして用いた従来金属定盤と樹脂パッドの研磨特性に関する比較検討結果について述べる。定盤直径 $\phi 380$ mm の小型片面研磨装置を用いた研磨実験を行い、銅定盤と樹脂パッドの研磨レート、表面粗さについて比較評価した結果について述べる。また、研磨実験により得られた基板に対し、段階的に除去量を設定した CMP を行い、それぞれに形成さ

れた加工変質層深さを評価し、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングによるダメージ低減効果について明らかにする。

第 5 章の「SiC 基板の研磨加工へ及ぼす樹脂パッドの影響」では SiC 基板へのダイヤモンドポリッシング適用可能性を明らかにする。具体的には SiC 基板をワークとした研磨評価を行い、表面品位に対する樹脂パッドの効果について明らかにし、従来の多段ダイヤモンドラッピング工程の単一工程化の可能性について述べる。

第 6 章の「樹脂パッドによる機械研磨に及ぼす電界砥粒制御技術の影響」では、第 4 章及び第 5 章の結果から、ダイヤモンドポリッシング技術における研磨レート向上の可能性について明らかにする。具体的には、研磨界面における作用砥粒数に着目し、砥粒の配置制御技術である電界砥粒制御技術を導入した高効率化について述べる。市販装置をベースとした電界研磨装置を構築し、本装置を用いた研磨実験により最適な電界印加条件を導出する。さらに、電界によるダイヤモンドポリッシングの有効性を明らかにする。

最後に、第 7 章では本論文の総括として本研究の結論についてまとめる。

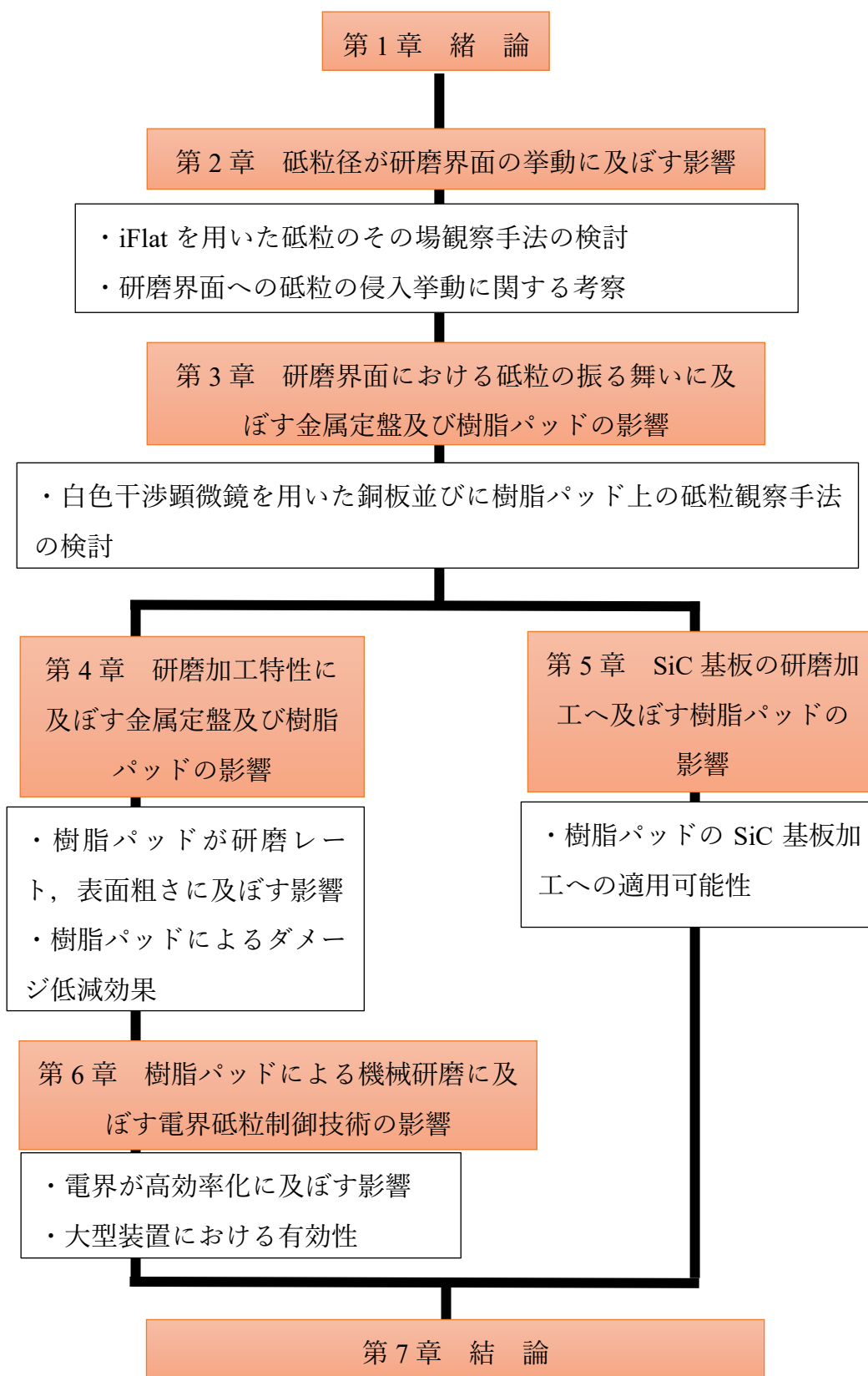


図 1-4 本論文の構成

参考文献

- [1] 内閣府, "科学技術基本計画" (2016) .
- [2] Cisco, "Cisco Global Cloud Index:予測と方法論、2014~2019" (2019).
- [3] 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, "低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 技術普及編 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) " (2019) .
- [4] 菅原 良孝, "大電力変換用 SiC パワーデバイス", 応用物理 第 70 巻 第 5 号(2001)532-535.
- [5] 荒井和雄, 樋口登, "新規半導体(SiC, GaN)のパワーエレクトロニクスへの展開", エネルギー総合工学, vol. 29, No. 3(2006)51-58.
- [6] 末広茂, 柴田善朗, "LED 照明による省電力ポテンシャルと費用対効果の資試算", エネルギー経済(2011).
- [7] 加藤智久, "NEDO プロ「低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト」での大口径 SiC ウェハ加工技術開発", 精密工学会誌, Vol.80, No.1(2014)18-22.
- [8] 高橋清(監修), 長谷川文夫, 吉川明彦(編著), "ワイドバンドギャップ半導体光・電子デバイス", 北森出版(2006).
- [9] 金谷正敏, 大谷昇, 高橋淳, 西川猛, 勝野正和, "ワイドギャップ半導体シリコンカーバイドのバルク単結晶成長", 応用物理, 第 64 巻, 第 7 号(1995)642-652.

- [10] 夫馬弘雄, 村田年生, 三浦篤志, 杉山尚宏, 岡本篤人, 谷俊彦, 加納浩之, "SiC 半導体", 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.30, No.2(1995)57-67
- [11] 和田圭司, 寺尾岳見, 宮瀬貴也, 堀勉, 土井秀之, 古米正樹, "低欠陥 6 インチ SiC エピタキシャル基板"EpiEra", SEI テクニカルレビュー, 第 193 号(2018)53-57.
- [12] 平松和政, 天野浩, 小出克典, 赤崎勇, "MOVPE 法によるサファイヤ基板上への GaN 結晶成長によるバッファ層の効果", 日本結晶成長学会誌, 15 巻, 3-4 号(1989)334-342.
- [13] 中村修二, "GaN 系発光素子の現状と将来", 応用物理, 第 65 巻, 第 7 号(1996)676-686.
- [14] 天野浩, "照明用 LED の現状と将来展望", 電子情報通信学会誌, Vol 93, No.11 (2010) 954-957.
- [15] 河西敏雄, "新電子部品材料の研磨加工についての総論", 砥粒加工学会誌, 第 56 巻 9 号(2012)580-583.
- [16] 佐野泰久, "次世代パワーデバイス用 SiC 基板の研磨技術", 精密工学会誌, Vol.84, No.3(2018)218-220.
- [17] 安永暢雄, "はじめての研磨加工", 東京電機大学大学出版局, (2011).
- [18] 砥粒加工学会編, "砥粒加工技術のすべて", 森北出版(2011).
- [19] 奥山繁樹, 宇根篤暢, 由井明紀, 鈴木浩文, "機械加工学の基礎", コロナ社(2013).

- [20] 玉井一誠, 森永均, "Si, サファイア, SiC, GaN の研磨とそのメカニズム", 日本学術振興会「結晶加工と評価技術」145 委員会 第 127 回研究会 (2011).
- [21] 栗田恒雄, 三宅晃司, 河田研治, 芦田極, 加藤智久, "単結晶 SiC の複合研磨法の開発", 砥粒加工学会誌, 第 58 巻 1 号(2014)30-35.
- [22] 木内伸哉, 畝田道雄, 澁谷和孝, 中村由夫, 市川大造, 石川憲一, "活性ガス内包ナノバブル添加スラリー供給装置の開発とそれによる SiC 基板の高効率 CMP の試み", 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2017)11-12
- [23] 長友大樹, 合田和樹, 村田順二, "SiC の電解援用砥粒フリー研磨法における電解条件の検討", 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2018)301-302
- [24] 山口桂司, 峠睦, 久保田章亀, 中野貴之, 渡邊純二, "単結晶 SiC 基板の高効率鏡面仕上げ技術に関する研究", 精密工学会誌, Vol.77, No.1(2011)116-120.
- [25] 滝修, "サファイア・SiC 基板と MEMS ウエハの研削・研磨技術", Chemical Times, 2013 No.1 (2013) 4-7
- [26] Toshiro K. Doi, Kiyoshi Seshimo, Tsutom Yamazaki, Masanori Ohtsubo, Daizo Ichikawa, Tadakazu Miyashita, Masataka Takagi, Taku Saeki and Hideo Aida, "Smart Polishing of Hard-to-Machine Materials with an Innovative Dilatancy Pad under High pressure, High-Speed, Immersed Condition" ECS Journal of Solid State Science and Technology, 5(10)(2016)598-607

第2章 砥粒径が研磨界面の挙動に及ぼす影響

2.1 緒言

一般に遊離砥粒研磨加工において，その研磨量 RA は研磨圧力 P ，研磨定盤とワークの相対速度 V ，研磨時間 t に比例することが知られており，プレストンの経験則[1]として式(2-1)で表される．ここで， k はプレストン係数である．

$$RA = k \cdot P \cdot V \cdot t \cdot \dots \dots \dots \text{式(2-1)}$$

このプレストン係数 k には砥粒の作用数，砥粒の滞在時間，砥粒の破碎に伴う微小化などの形状効果もしくは砥粒の凝集に伴う粒径の増大などが含まれている．研磨面内における砥粒の挙動観察には白色光を用いた観察[2]や，赤外光センサを用いて研磨熱を計測し，研磨効率の分布をその場観察する検討[3]が行われているが，マイクロメートルからサブマイクロメートルサイズの砥粒観察をその場で行った例は少ない．プレストン係数 k に含まれる砥粒作用数や砥粒の振る舞いを明らかにするためには可視光（光学限界）以下の砥粒の挙動を観察できる手法が必要である．そこで，上述の光学限界以下の砥粒観察の可能性を明らかにするため，砥粒自体を発光させ，観察視野内を通過するか否かにより判定を行う方式を検討した．代表的な砥粒としてダイヤモンド砥粒を用い，蛍光染色剤にて予め染色し，高感度 EMCCD(Electron Multiplying Charge-Coupled Device)カメラにより発光砥粒の撮影が可能な装置を作製した．また，実験では接触面間に負荷する荷重を大きくし，二面間の直接接触が起こる境界潤滑条件にてしゅう動試験を行い，ヘルツ接触面内への砥粒侵入の可能性とその挙動観察を行った．

2.2 実験装置・試験片及び実験条件

2.2.1 蛍光発光粒子その場観察摩擦試験機 (iFLAT)

本研究で用いた蛍光発光粒子その場観察摩擦試験機 (iFLAT: intelligent Fluorescent Light Assisted Tribometer) の概略図を図 2-1 に示す。オリンパス製倒立顕微鏡 IF-70 に摩擦試験用ステージが対物レンズの直上に設置されている(図 2-2)。対物レンズには長焦点型の SLNPLN50X (焦点距離約 18 mm, N.A. 0.35) を用いた。摩擦面内を観察可能とするため、厚さ約 1 mm の石英基板 (直径約 50 mm, 表面粗さ約 Ra 7 nm) を設置可能なカップ型ホルダに O リング及び固定治具を用いて固定し、相手材料に軸受鋼球 (直径約 8 mm, 表面粗さ約 Ra 24 nm) を使用した。石英ガラス試験片を固定しているカップ型ホルダの外側にプーリを固定し、ベルトを介してモータによって駆動する。このカップ型ホルダはジェイテクト製深溝玉軸受を 2 段使用し、観察点における焦点深度方向への観察面の変動を $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下となるように調節されている。摩擦面内には日本分光製 CT-TR25 (220-600 nm までグレーティングミラー使用により波長変更可能, 波長分解能 1 nm, ハロゲンランプ光源 500 W) から出射された入射光がライトガイドを通して入射される。摩擦面内で反射された反射光はハーフミラー及びフィルタを通して観察用 EMCCD カメラ (浜松ホトニクス製 ORCA Flash4.0) に導入される。撮影速度 (100~200 ms/frame) 及び撮影感度 (最大約 65000) は適宜調整して撮影を行った。蛍光染色した粒子が対物レンズ及び相手球との間に挟み込まれた状況の模式図を図 2-3 に示す。蛍光染色された粒子は相手材料とガラス面内に入り込むと、入射光により励起され、蛍光を発光する。蛍光及び弾性反射した入射光はフィルタに到達すると、蛍光のみがフィルタを通過して CCD カメラへと導入される機構である。

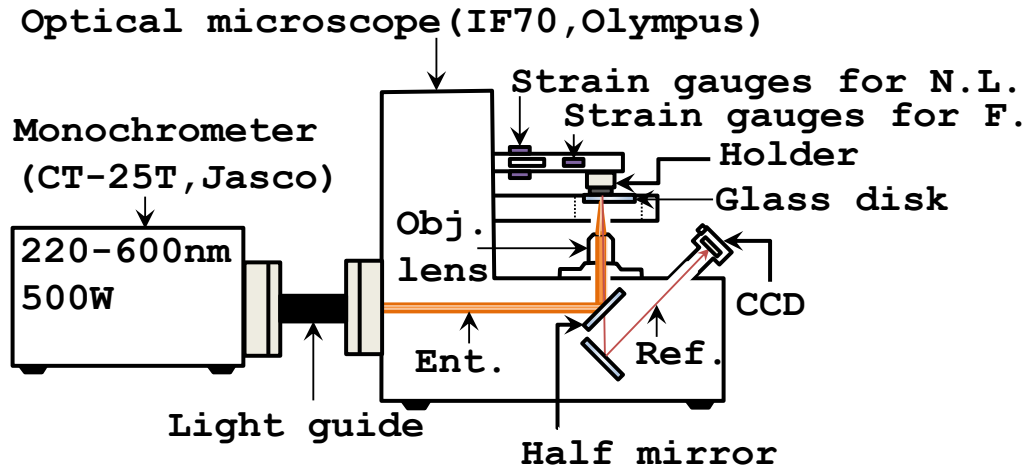


図 2-1 iFlat 概略図

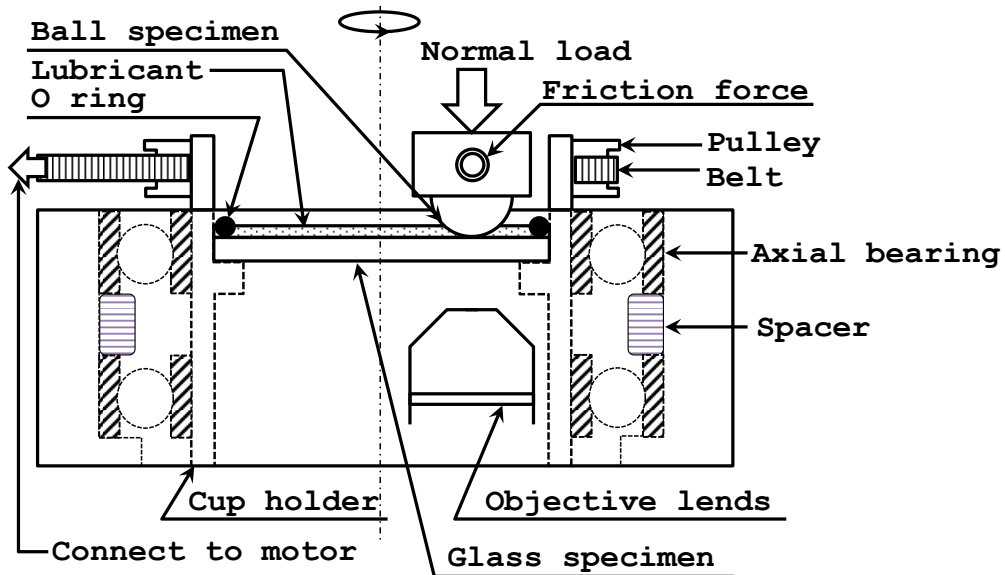


図 2-2 対物レンズ上部に配置された摩擦試験機構の概略図

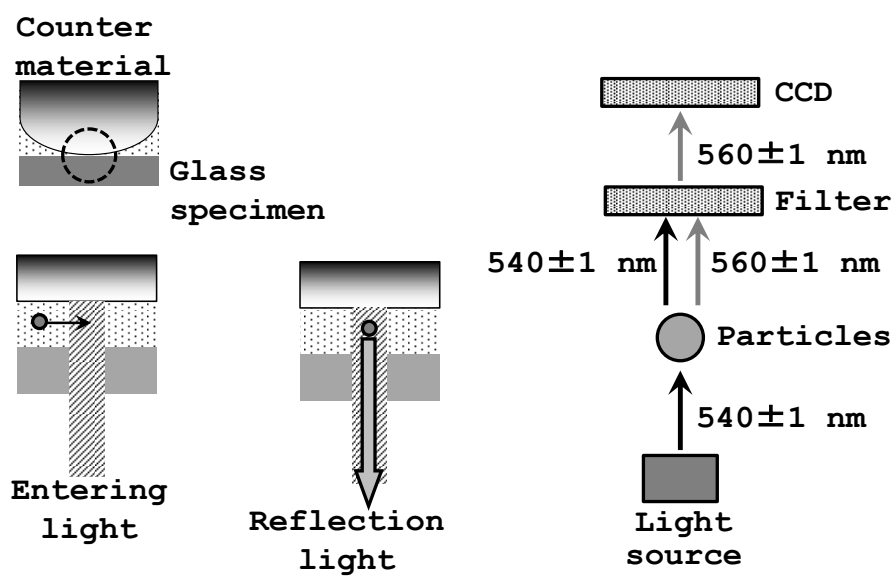


図 2-3 蛍光染色された粒子がガラス及び相手球に挟み込まれた状況の模式図

2.2.2 蛍光染色及びフィルタ

蛍光染色剤にはローダミン b を用いた。イソプロピルアルコールまたはエタノールに砥粒及びローダミンを分散させて攪はんし、染色された砥粒をスポイトにて回収して潤滑油中に導入した。ローダミン b は親水性物質であるため、潤滑油中に導入した場合、砥粒表面から脱離して油中に分散することは無い。ローダミン b は 540 nm の光を吸収し 560 nm の光を放出する。そこで、オリンパス製光学フィルタ WIB (550~560 nm 波長バンドパスフィルタ) を用い、余分な光を除いて摩擦面内を観察した。

砥粒には研磨に使用されるダイヤモンド砥粒 (トウメイダイヤモンド平均粒径 1 μm) を用いた。砥粒の SEM 写真を図 2-4 に示す。また砥粒が球形であると仮定して粒系分布を測定した結果を図 2-5 に示す。SEM (SEM: Scanning Electron Microscope) 写真内の砥粒の直径をそれぞれ 0.7, 0.85, 1.0, 1.15, 1.3, 1.45 \pm 0.075 μm として個数を測定した。砥粒の形状は球形に近いものから直方体のような形状まで様々であるため、SEM 写真上の一つ一つの砥粒が内接する円の直径を SEM 写真上で測定し、砥粒直径を決定した。観察の結果 1.0 \pm 0.075 μm が最も多かった。全体の平均粒径は約 1.06 μm と算出された。砥粒はそれぞれ分散されていることが SEM 観察から明らかである。

また、異なる大きさの砥粒として平均粒径 2.0 及び 3.0 μm のダイヤモンド砥粒を別途準備し、境界潤滑環境下への砥粒の侵入可能性についても明らかにした。実験は繰り返し行い、ガラスディスクにアブレイブ痕が形成された場合は新品に交換して撮影を行った。

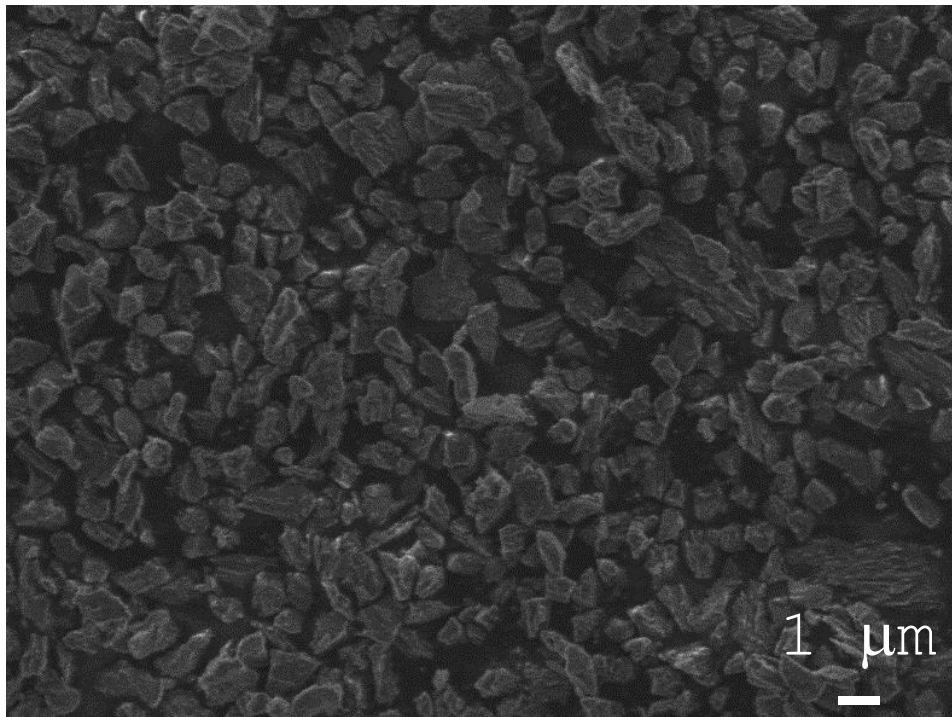


図 2-4 ダイヤモンド砥粒の SEM 観察像

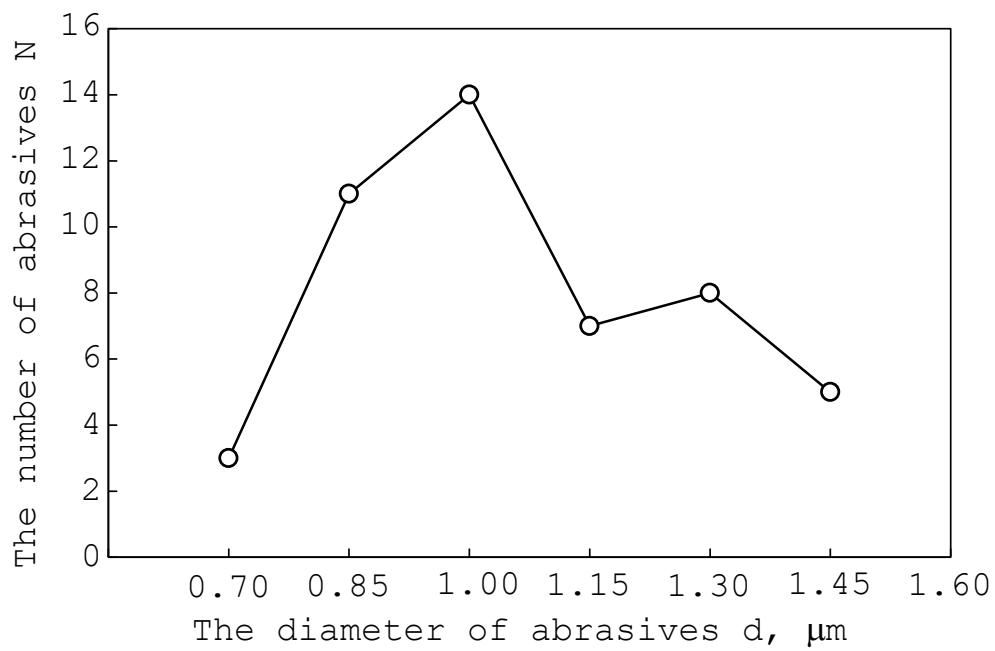


図 2-5 SEM 像より得られたダイヤモンド砥粒の粒度分布

$$\Lambda = h / \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \cdots \cdots \text{式(2-8)}$$

すべり速度，垂直荷重及び潤滑油粘度から算出される最小油膜厚さは約 20 nm であった．使用した SUJ2 球及びガラスディスクの合成表面粗さとの比（ Λ 値）は，式（2-8）から約 0.8 と算出され，図 2-6 に示すストライベック線図における境界潤滑条件（B.L.: Boundary lubrication）にて摩擦試験を実施できている．

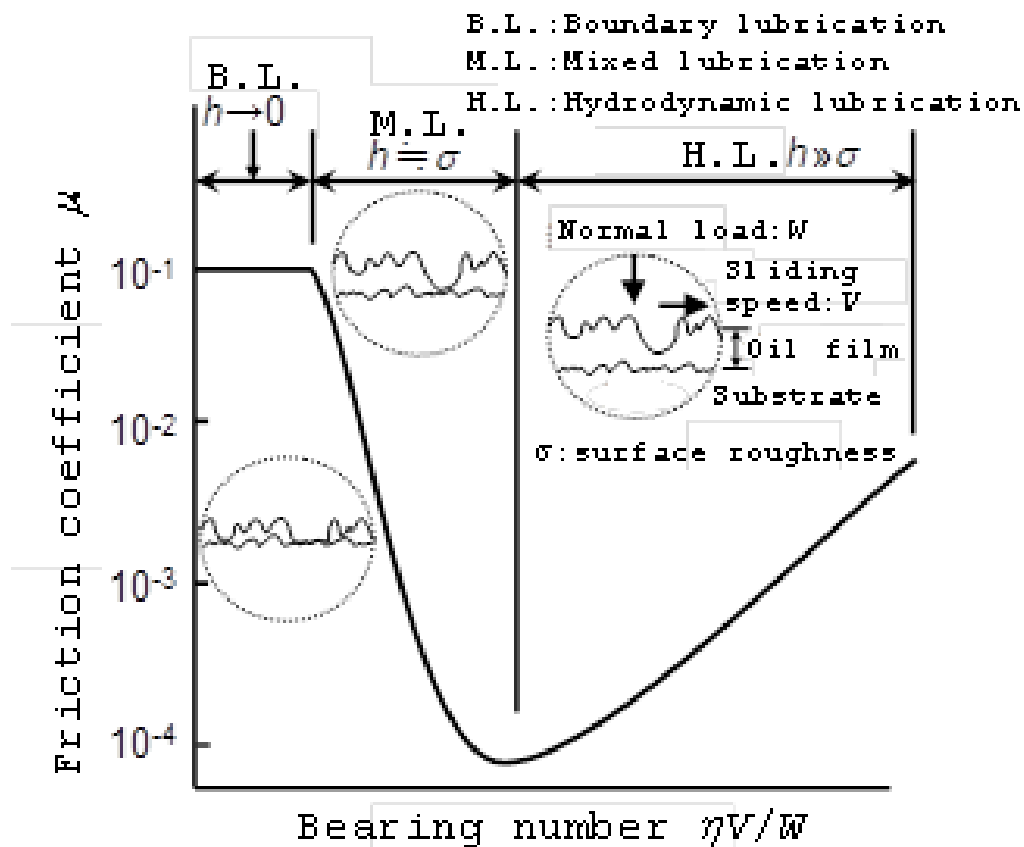


図 2-6 境界潤滑条件模式図

2.3 実験結果及び考察

2.3.1 観察面内へのダイヤモンド砥粒侵入

摩擦面内へのダイヤモンド砥粒侵入の様子を観察した結果を図 2-7 に示す。図中に示す模式図は SUJ2 球とガラスディスクの接触及び潤滑油中での摩擦時に垂直荷重が加えられている様子で、観察開始 0 s から 5.05 s までの特徴的な静止画を抽出したものである。図中の数値及び矢印は各ニュートンリング位置を意味しており、それぞれのニュートンリング位置から SUJ2 球とガラスディスク間の距離が算出可能である。しゅう動開始前 (0 s) には第一明ニュートンリングが観察されており、透過するフィルタ性能 (560 nm) の 1/4 波長から 140 nm のすき間が SUJ2 球とガラスディスクの間に形成されているものと推測される。しゅう動開始直後(1.83 s)から第二暗ニュートンリングの直径が減少し、1/2 波長である 280 nm のすき間が形成されているものと推測される。最終的に第 3 暗ニュートンリングの直径が減少して中央付近にとどまり(5.05 s), この際の相手面とのすき間は 1 波長分の 560 nm と考えられる。

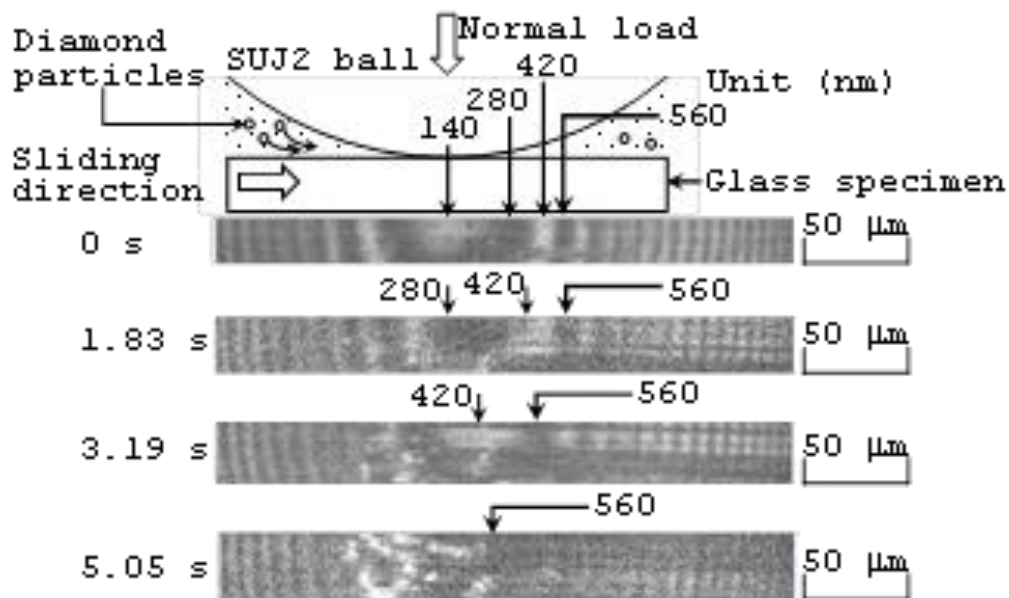


図 2-7 摩擦面内へのダイヤモンド砥粒の侵入と各摩擦時間におけるニュートンリングの変化

本実験ではガラスディスクが回転しているため、SUJ2 球の位置は変わらない。このため、画面内に留まって観察されるダイヤモンド砥粒は、相手の SUJ2 球表面に強く付着あるいは球表面に突き刺さっているものと推測される。ガラスディスクの回転に伴って、潤滑油とガラスディスクの界面では、ガラスディスク表面に吸着している潤滑油が摩擦面内へと導入されるのと同時にダイヤモンド砥粒も摩擦面内へと導入されるものと推測されるが、平均粒径 $1\ \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒は摩擦面の前面部分に集中していく様子が観察されていた。最終的に摩擦面内の中央にダイヤモンド砥粒は到達していることが観察されているが、平均粒径 $1\ \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒が接触面内に入り込んでいるにも関わらず形成油膜厚さが約 $560\ \text{nm}$ であり、測定結果とダイヤモンド砥粒の大きさに不一致が起こっている。この原因として、相手球及びガラスディスクの弾性変形またはダイヤモンド砥粒の相手表面への埋没などが考えられる。

2.3.2 観察面内への2及び3 μm ダイヤモンド砥粒侵入

上述の砥粒観察と同様の実験条件において平均粒径2.0及び3.0 μm のダイヤモンド砥粒を用いて観察した結果を図2-8及び図2-9に示す。いずれの平均粒径の砥粒においても、接触面内に砥粒が入り込んでいる様子が観察されている。砥粒の大きさには分布があることから、平均粒径以下の小さな砥粒が接触面内に入り込んだ可能性も考えられる。しかし、いずれの実験でも境界潤滑条件において砥粒は接触点内に入り込んでいること、及び実験開始から数秒で接触点内に砥粒が入り込むことから、相手球の表面がアブレシブ摩耗して平らに変化したとは考えられず、接触状態は境界潤滑条件を維持しているものと推測される。以上の点から、境界潤滑環境下において、接触面内に形成される油膜厚さをはるかに超えた大きさの砥粒が侵入できる可能性が示唆され、また、観察の可能性が明らかにされた。

研磨に用いる砥粒は砥粒種に応じた粒度分布を有しており、たとえば平均粒径3.0 μm の市販ダイヤモンド砥粒の場合、2.0 μm から4.0 μm の範囲で砥粒が混在している。また、研磨中に砥粒の凝集等により見かけ状粒径が粗大化する場合もある。実験結果より、これらの大径砥粒も金属定盤とワーク間の研磨界面に侵入することが示唆され、深いスクラッチなどのダメージ形成の大きな要因になりうると考えられる。

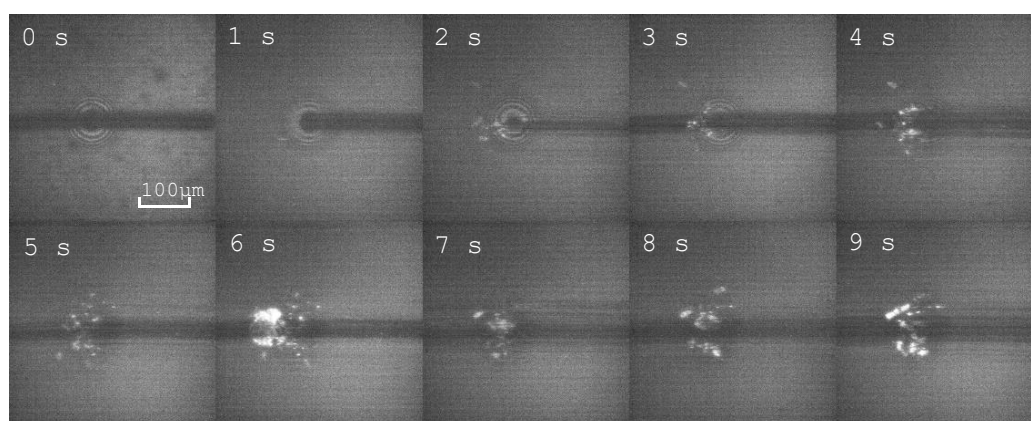


図2-8 摩擦面内への2.0 μm ダイヤモンド砥粒の侵入

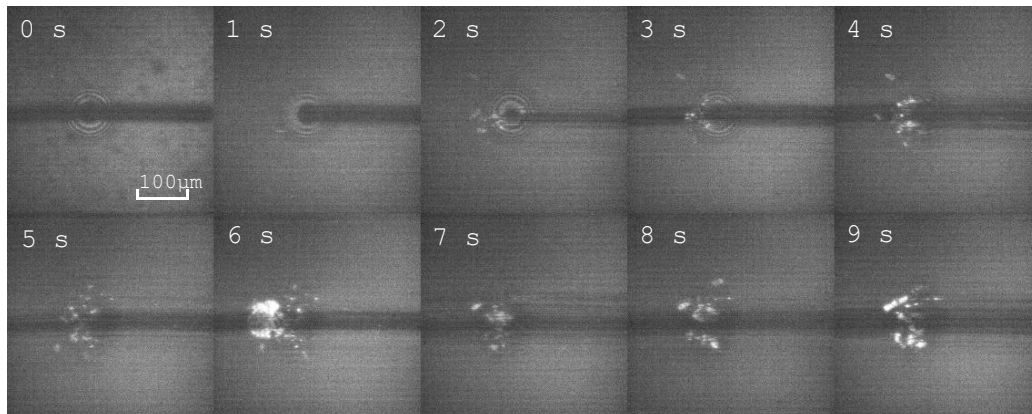


図 2-9 摩擦面内への 3.0 μm ダイヤモンド砥粒の侵入

2.4 結 言

境界潤滑環境下において砥粒として使用したダイヤモンド砥粒が摩擦面内へ侵入する可能性について明らかにするため、暗視野による観察及び蛍光染色したダイヤモンド砥粒の蛍光発光を用い、砥粒挙動の観察可能性について明らかにした。以下に結果をまとめる。

- (1) λ 値約 0.8 の境界潤滑条件において、平均粒径 1 μm のダイヤモンド砥粒が摩擦面内へ侵入する様子が確認された。
- (2) 境界潤滑下において形成される油膜厚さは約 20 nm と推測されているが、初期形成油膜厚さが約 140 nm、しゅう動開始とともにダイヤモンド砥粒が摩擦面前面部に集積し、徐々に摩擦面内へ砥粒が侵入する様子が確認された。
- (3) 実験開始からニュートンリングの直径が収縮する様子が観察され、接触する二面間の距離が離れ、約 560 nm まで隙間が大きくなる様子が明らかにされた。これより、研磨界面において粗大砥粒が侵入する可能性が示唆された。

参考文献

- [1] F. W. Preston, "The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines", *J. soc. Glass Tech*, 11(1927)214.
- [2] 川波多裕司, 桐野宙治, 張宇, 谷泰弘, "砥粒挙動の観察によるラッピング特性の解明", 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2017)627-628.
- [3] 鈴木教和, 御園生博隆, 社本英二, 後藤伸太郎, 安田穂積, 望月宣宏, "赤外光センサを用いた局所的な研磨効率のその場観察", 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2018)299-300.
- [4] B.J. Hamrock and D. Dowson, "Transaction of ASME", *Journal of Lubrication Technology*, Vol.98, No. 3(1976) 375.
- [5] 村木正芳, "粘土一圧力特性", *トライボロジスト*, Vol. 33, 1号(1988)36

第 3 章 研磨界面における砥粒の振る舞いに及ぼす金属定盤及び

樹脂パッドの影響

3.1 緒 言

一般に研磨パッドは高分子材料であり、粘弾性体である[1]。この粘弾性特性は、特に、基板の全体的な形状精度やロールオフと呼ばれる基板外周のだれについて検討する際に注目される[2][3]。一方で、この特性は研磨界面における砥粒の振る舞いにも影響を与えるものと推測でき、砥粒が基板へと押し込まれる力などに影響を及ぼすと考えられる。他方、金属定盤を用いた硬脆材料のラッピング加工においては、砥粒の破碎が起こることが示されている[4][5]。したがって、加工中に砥粒径が変動するものと考えられ、砥粒の基板への切り込み深さに影響を与えるものと推測できる。

これらはいずれも基板に形成されるダメージ深さに影響を与えると考えられるため、加圧下における銅板及び樹脂パッド上の砥粒の振る舞いについて明らかにする。砥粒に負荷される圧力について検討するため、サファイア基板を介した静的な砥粒の押し込み実験を行い、さらに研磨加工時の砥粒の摩耗・磨滅状態について明らかにするため、サファイア基板を用いたしゅう動実験を試みた。

3.2 静的押込み条件下における銅板及び樹脂パッド上の砥粒挙動に関する検討

3.2.1 実験方法及び評価手法

3.2.1.1 樹脂パッドの硬度

本研究に用いる樹脂パッドは、硬質ポリウレタン樹脂製の研磨パッドである。本樹脂パッド及び市販のCMP用硬質ポリウレタンパッド（ニッタハース製：IC-1000）のデュロメーター硬度（HDD）を比較した。硬度の評価には図3-1に示すデュロメーター硬度計を用いた。硬度の比較結果を図3-2に示す。樹脂パッドの硬度はHDD82であり、市販のCMP用パッドはHDD62である。したがって、本樹脂パッドは市販の一般的な研磨パッドと比較して高硬度であり、金属定盤の代替が期待できる。



図3-1 デュロメーター
硬度計

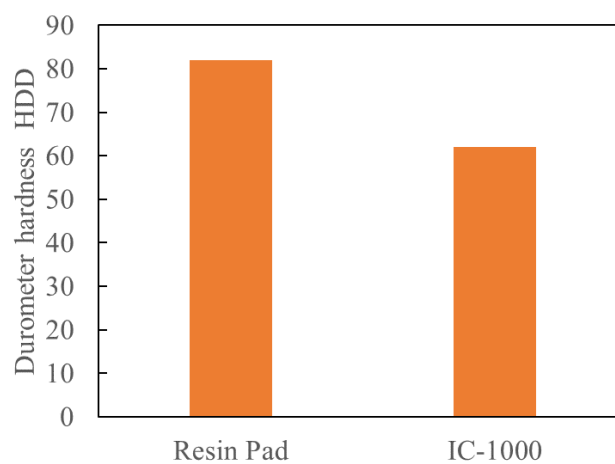


図3-2 デュロメーター硬度比較結果

3.2.1.2 押し込み実験条件及び評価手法

砥粒には公称値で平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ の多結晶ダイヤモンド砥粒を用いた。本砥粒の電子顕微鏡(日立製作所製：S4500)画像を図 3-3 に示す。用いたダイヤモンド砥粒は長径約 $3\ \mu\text{m}$ 、短径約 $2\ \mu\text{m}$ の楕円形状であることを確認した。

押し込み実験の模式図を図 3-4 に、実験条件を表 3-1 に示す。銅板及び樹脂パッドをグラナイト製の定盤に貼り付け、それぞれにダイヤモンド砥粒を分散させた研磨スラリーを $600\ \mu\text{l}$ 滴下した。次にサファイア基板を 34 及び $68\ \text{kPa}$ の圧力にて押しつけ 5 分間保持した。 5 分経過後、除荷し純水を用いて表面を流水洗浄し、更にエアブローにより乾燥させた。

銅板及び樹脂パッド表面の評価には図 3-5 に示す走査型白色干渉顕微鏡(ZYGO 製：NEWVIEW6300)を用い、同装置の解析モジュール(Advanced Texture Application)にて銅板及び樹脂パッド上の高さ情報を解析した。解析は、初めに測定されたデータに対しおよそ $14\ \mu\text{m}$ の波長のハイパスフィルターを適用し、銅板及び樹脂パッド自体のうねり成分を除去した。更に高さ $0.4\ \mu\text{m}$ 以上の突起を抽出し、そのヒストグラムを出力した。

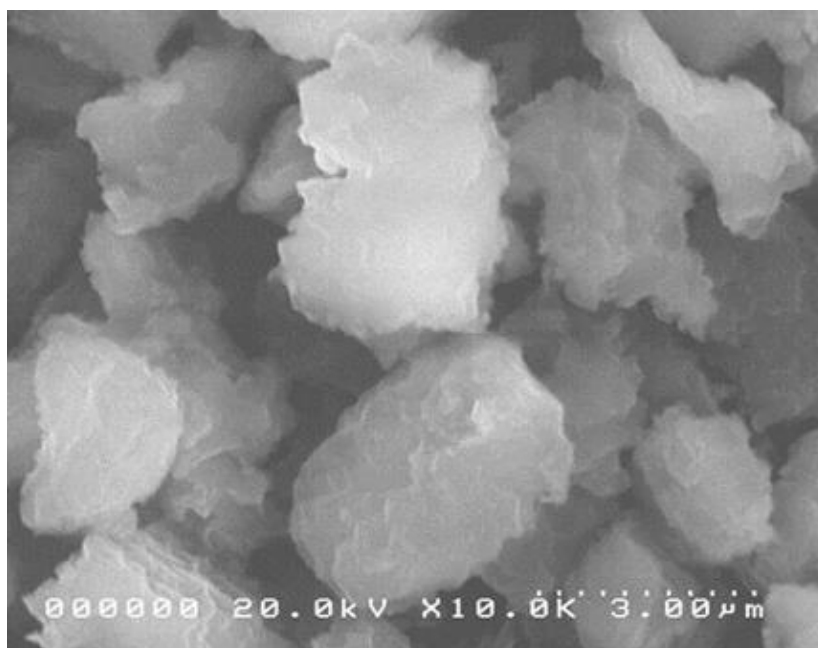


図 3-3 ダイヤモンド砥粒の SEM 画像

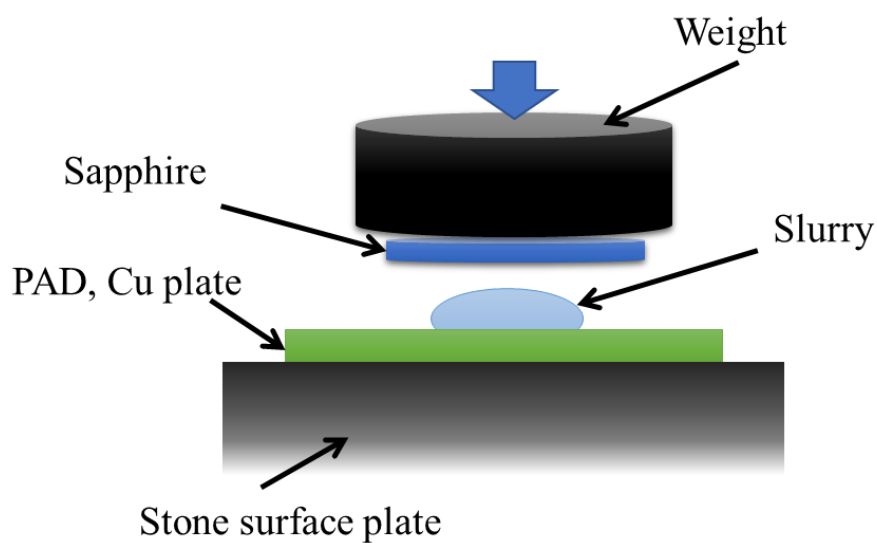


図 3-4 砥粒押し込み実験模式図

表 3-1 砥粒押し込み実験条件

試料	ポリウレタン樹脂パッド,無酸素銅 t=1 mm	
スラリー	砥粒	ダイヤモンド砥粒 中心 粒径 3 μm
	分散媒	純水
	砥粒濃度	2 wt. %
	供給量	600 μl
印加圧力	34 及び 68 kPa	
加圧時間	5 min	



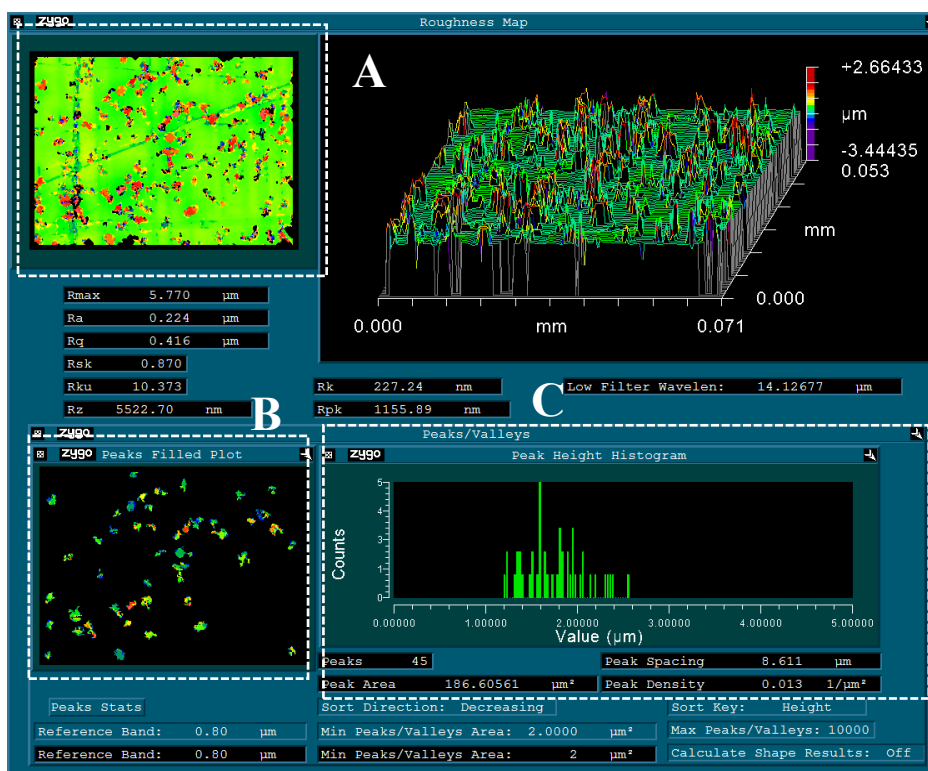
図 3-5 白色干渉顕微鏡 New View 6300

3.2.2 実験結果

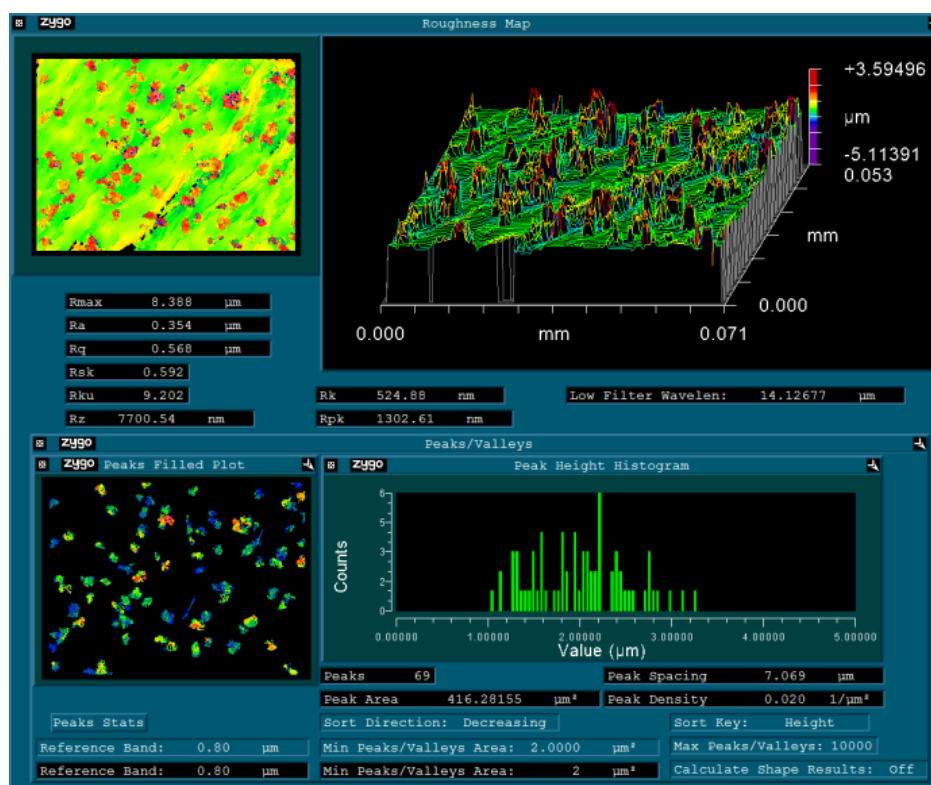
無負荷時の銅板表面の解析結果を図 3-6(a)に、同様に樹脂パッド表面の解析結果を図 3-6(b)に示す。ここで、図 3-6 内 A は表面の二次元画像を示し、B は二次元画像から抽出された突起を、C はその突起高さのヒストグラムを表す。本解析により銅板及び樹脂パッド表面において高さ 1~3 μm 程度の突起を抽出することができた。本突起の平面上の大きさは、二次元画像より直径 3~4 μm 程度である。これは砥粒の楕円形上に起因すると考えられ、各表面において砥粒は短径側を鉛直方向として保持されたと推測できる。以上の計測手法により各表面に存在する砥粒高さを抽出できる。

次に、押し込み実験後の測定により得られた突起数約 1000 個のヒストグラムから導いた平均突起高さとの荷重の関係を図 3-7 に示す。押しつけ圧力 34 kPa の条件において得られた突起高さは、樹脂パッド、銅板上のいずれも 2 μm 程度で有り、無負荷時と同程度であった。一方、68 kPa の条件では、樹脂パッド上の突起高さは 2 μm と変化が認められなかったが、銅板上の突起高さは約 1.79 μm へと減少した。この時、銅板上の白色干渉顕微鏡像には砥粒の破碎を示すような小片の砥粒は観察されなかった。したがって、砥粒の破壊強度を超える荷重は負荷されていないといえる。これより、この突起高さの減少は、銅の圧縮降伏応力をを超える力による砥粒の銅板への不可逆的な埋め込みによるものと考えられる。この埋め込み量は砥粒径に対し 10%程度であり、銅板の押し込み部では加工硬化によってダイヤモンド砥粒は銅板上で半固定砥粒のような状態で保持されていると推測される。

一方、銅と比較して軟質なポリウレタン製の樹脂パッドでは、除荷後の砥粒高さが無負荷時と同程度である。加工中の樹脂パッドでは、粘弾性変形により砥粒の埋め込みが発生するものと考えられるが、除荷後に十分に時間が経過した本実験においては、押し込まれた砥粒が樹脂パッドに一時的に沈み込んだのち、樹脂の弾性回復によって元の高さに復帰していることが示唆された。



(a)銅板上の突起高さ



(b)樹脂パッド上の突起高さ

図 3-6 無負荷時における突起高さ解析結果

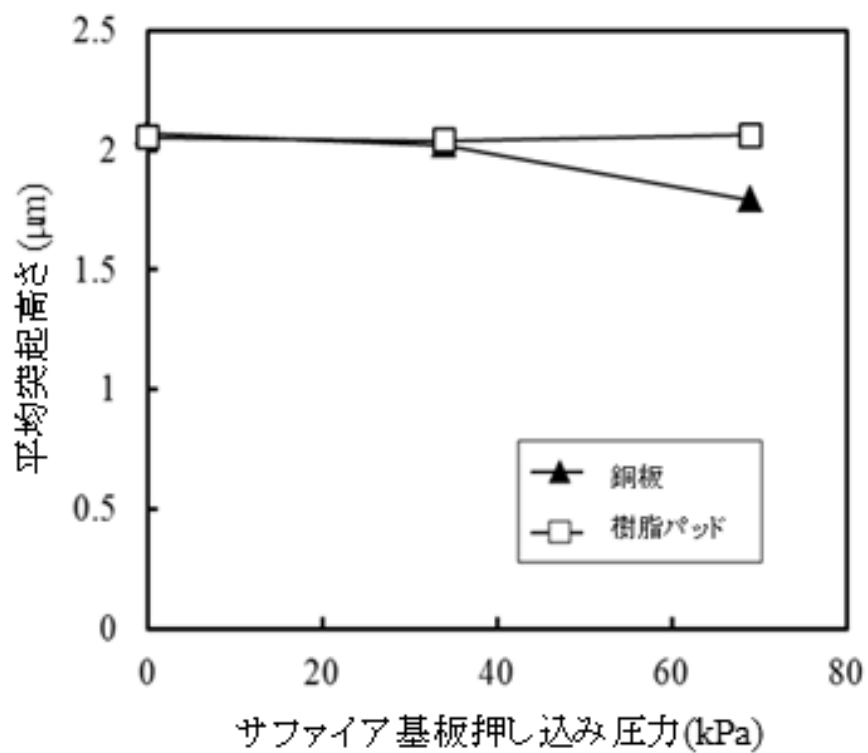


図 3-7 銅板および樹脂パッド上の平均突起高さに及ぼす圧力の影響

3.3 しゅう動条件下における銅板及び樹脂パッド上の砥粒挙動に関する検討

3.3.1 実験方法及び評価手法

実際の研磨加工時には垂直方向への押し込みだけではなく、せん断方向へのしゅう動がなされる。そこで、研磨中の各表面における砥粒の振る舞いを検討するため、しゅう動実験を行った。図 3-8 に示す定盤径 $\phi 180$ mm の卓上片面研磨装置（BUEHLER 製：Ecomet3000）の定盤に、銅板、樹脂パッドを貼り付け、電着ダイヤモンドドレッサーを用いて、それぞれの形状修正を行った。その後、表 3-2 に示す条件にてしゅう動実験を試みた。研磨スラリーは 3-2 節の押し込み実験同様とし、このスラリーを 1 ml/min の流量で滴下しながら、圧力 16 kPa、定盤回転数 100 rpm の条件にて、6 分間ファイア基板としゅう動させた。加工後、銅板及び樹脂パッドを取り外し、流水洗浄を行った。各試料表面の評価は 3.2 節の押し込み実験で用いた白色干渉顕微鏡によって $70 \times 53 \mu\text{m}$ の視野にて表面を観察した。



図 3-8 しゅう動実験に用いた卓上研磨装置

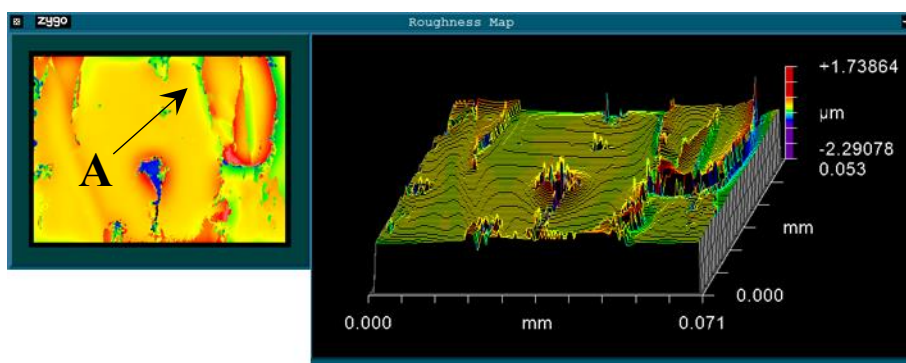
表 3-2 しゅう動実験条件

ワーク	ϕ 2 インチサファイア(0001 面)基板	
スラリー	砥粒	多結晶ダイヤモンド (平均粒径 3 μ m)
	分散媒	純水
	砥粒濃度	2 wt.%
	流量	1 ml/min
印加圧力	16 kPa	
定盤回転数	100 rpm	
しゅう動時間	6 min	

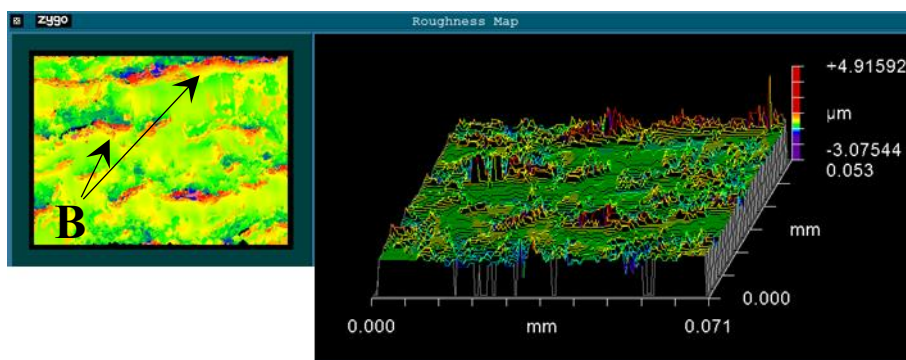
3.3.2 実験結果

白色干渉顕微鏡によって得られたしゅう動実験前後の銅板及び樹脂パッド表面を図 3-9 に示す。しゅう動実験前の銅板及び樹脂パッド表面には、図 3-9(a)内の矢印 A 及び図 3-9(b)内の矢印 B に示すような筋状の形状が認められた。これはしゅう動前のドレスによって形成されたものであると考えられる。また、しゅう動実験後の銅定盤表面には、多数の細かな突起が観察された。これは破碎されたダイヤモンド砥粒であると考えられる。3.2 節の押し込み実験においては、68 kPa の条件下で破碎が認められなかったため、この破碎は主としてしゅう動によって引き起こされたものであると推測される。一方、しゅう動実験後の樹脂パッド上では、図 3-9(d)内の矢印 C に示すようにしゅう動前と同様の筋形状が認められる。また、本表面には図 3-9(d)内の矢印 D に示すように供給したダイヤモンド砥粒と合致するサイズの突起が認められた。

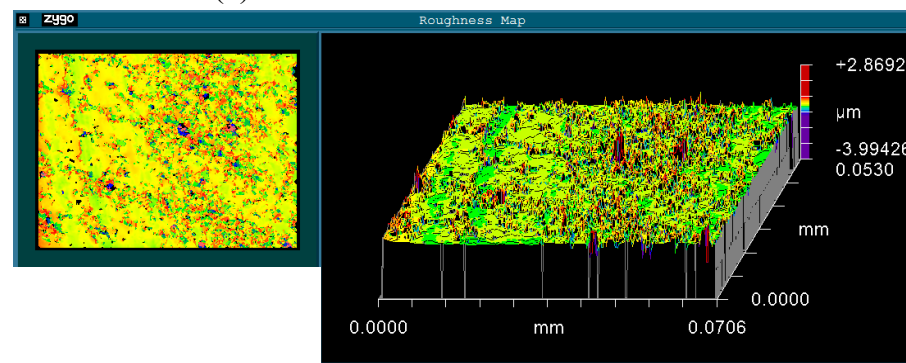
以上より、銅板を用いた加工においては、研磨界面においてサファイアとの接触によりダイヤモンド砥粒は破碎するが、樹脂パッドを用いた加工では、ダイヤモンド砥粒は初期砥粒径を維持して残存可能であることを確認した。これは軟質な樹脂の粘弾性及び樹脂パッド表面における筋形状等により、一個当たりの砥粒に負荷される圧力が抑制されたためであると考えられる。



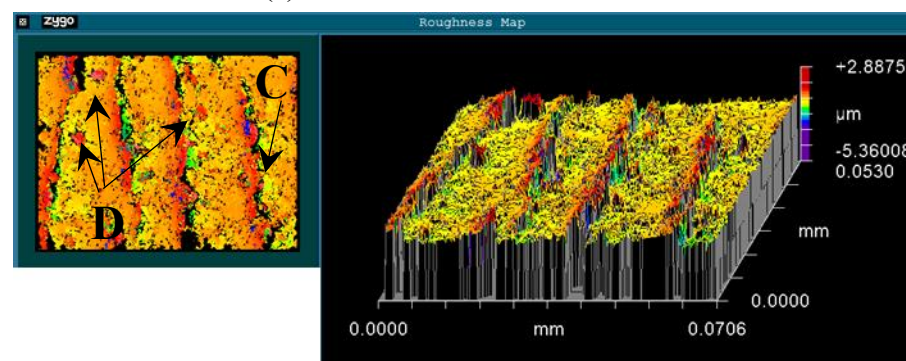
(a) しゅう動実験前 銅板表面



(b) しゅう動実験前 樹脂パッド表面



(c) しゅう動実験後 銅板表面



(d) しゅう動実験後 樹脂パッド板表面

図 3-9 しゅう動実験後の試料表面 (70×53 μm 視野)

3.4 銅板及び樹脂パッド上の砥粒挙動に関する考察

銅板を用いた加工においては、供給された砥粒には銅板への微小な埋め込みと破砕が生じることがわかった。すなわち、銅の圧縮降伏応力を超え、銅板上に固定されたダイヤモンド砥粒が破砕する程度の力が個々の砥粒に負荷されていることが示唆された。したがって、サファイアへの加工力が大きくなり、研磨レートは大きくなるが、切込みは深く、加工ダメージも大きくなると考えられる。対して、樹脂パッドを用いた加工においては、樹脂の粘弾性及びパッド上に形成された筋形状などが荷重を支えることなどにより、個々の砥粒に負荷される力は抑えられ、サファイアへの切込みが小さくなり、ダメージは低減可能となると推測できる。これより、樹脂パッドによる加工ダメージ低減効果が期待できる。ただし、研磨レートの低下は否めないため、本工程の加工時間と、次の CMP 工程の加工時間の総加工時間への影響について明らかにする必要がある。

3.5 結 言

金属定盤による従来のダイヤモンドラッピングと樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングにおける研磨界面の砥粒の振る舞いについて検討し、砥粒に負荷される力及び樹脂パッドによる加工ダメージの抑制可能性について検討した。サファイア基板を介した静的な砥粒の押し込み実験及びしゅう動実験により以下を明らかにした。

- (1) 銅板を用いた押し込み実験において、68 kPaの圧力条件下でダイヤモンド砥粒は銅板上に粒子径の10%程度の深さまで埋め込まれ、半固定砥粒のような状態で保持されていることが示唆された。
- (2) 樹脂パッドを用いた押し込み実験において、砥粒高さの減少は認められず、押し込まれた砥粒が樹脂パッドに一時的に沈み込んだのち、樹脂の弾性回復によって元の高さに復帰していることが示唆された。
- (3) しゅう動実験により、銅板上の砥粒には破砕が発生するほどの力が負荷されていることが明らかとなった。
- (4) 樹脂パッドを用いたしゅう動実験ではダイヤモンド砥粒の破砕は認められず、樹脂の粘弾性変形やパッド上に形成された筋形状による荷重分散により、砥粒の摩滅は抑制されることを示した。

参考文献

- [1] 千葉亜紀雄, 小泉浩二, 岩崎拓浩, 池田正幸, “ポリシングパッドの粘弾性とポリシング機構の解析”, 精密工学会誌, Vol.65, No.2(1999)219-223
- [2] 三宅貴大, 榎本俊之, 田畑憲一, “シリコンウェーハ・エッジの高平坦仕上げを実現する研磨パッドの開発”, 日本機械学会論文集(C編), 76巻, 764号(2010)981-986
- [3] 左光大和, 安永暢男, 吉田隆文, 大本隆, 堀江定, “シリコンウェーハのポリシング用研磨布の評価と平坦度の向上”, 精密工学会誌, Vol.58, No.7(1992)118-1189
- [4] 吉岡正人, “ラッピングにおける砥粒径分布推移のシミュレーション”, 精密工学会誌, Vol.60, No.10(1994)1439-1443

第4章 研磨加工特性に及ぼす金属定盤及び樹脂パッドの影響

4.1 緒言

硬脆材料のラッピングにおける砥粒のワークに対する挙動には、押し付け、転動及び引っかきがある。砥粒の機械的な作用を受けて、ワーク表面から内部に向けて微細な割れが生じ、切り屑はその割れが交差することで作り出される。この切り屑が積み重なることで加工除去量が得られ、切り屑が離脱した跡が表面粗さとなり、その下に残る微細な割れが加工変質層深さに相当すると考えられている[1]。すなわち砥粒のワークへの切込み量が研磨レート及び加工変質層深さに影響を与えると考えられる。3.4節で述べたとおり、金属定盤を用いた加工では1個あたりの砥粒に負荷される力は大きく、すなわちワークに対する切込みは深いものと思われる。これに対し、樹脂パッドを用いた加工においては砥粒に負荷される力が抑制され、ワークへの切り込みは抑制され、加工変質層深さは低減されると推測できる。これらを明らかにするため、銅定盤と樹脂パッドを用いた比較研磨実験を行い、研磨レート、表面粗さ及びワークに形成される表面ダメージの比較検討を実施し、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングによるダメージ低減効果を明らかにする。

4.2 銅定盤及び樹脂パッドの研磨加工特性に関する比較検討

4.2.1 実験装置及び実験方法

表 4-1 に研磨実験条件を示す。研磨装置は図 4-1 に示す定盤径 $\phi 380$ mm のデッドウエイト方式片面研磨装置(日本エングス製：EJW-460-IFL)を用いた。本実験においては、加工中の研磨スラリー流れを考慮し、樹脂パッド及び銅定盤の表面には幅 2 mm, ピッチ 2 mm のらせん溝加工を施した。被研磨試料には $\phi 2$ インチのサファイア(0001 面)基板を用い、シフトワックスを用いてアルミナセラミックス製の支持プレートに貼り付けた。砥粒には 3.2 節で用いた平均粒径 3 μm のダイヤモンド砥粒を用い、エチレングリコールベースのラッピング用ルブリカントに 1 wt.%の濃度となるように懸濁させ、研磨スラリーとした。研磨圧力は 20, 30 及び 40 kPa の 3 水準とし、定盤の回転数は 60 rpm, 加工時間は 30 分とした。研磨レートは研磨前後の基板厚さを図 4-2 に示す接触式測長機(ニコン製：デジマイクロ)によって測定し、単位時間当たりの除去厚さより算出した。表面性状の評価には図 4-3 に示す AFM(BRUKER 製：Dimension Icon)を用い、観察エリアを $20 \times 20 \mu\text{m}$ として、表面観察及び表面粗さの解析を行った。

表 4-1 研磨特性評価実験条件

ワーク	$\phi 2$ インチサファイア(0001 面)基板	
スラリー	砥粒	多結晶ダイヤモンド (平均粒径 3 μm)
	分散媒	ラッピング用ルブリカント
	砥粒濃度	1 wt.%
	流量	5 ml/min
研磨圧力	20, 30 及び 40 kPa	
定盤回転数	60 rpm	
研磨時間	30 min	

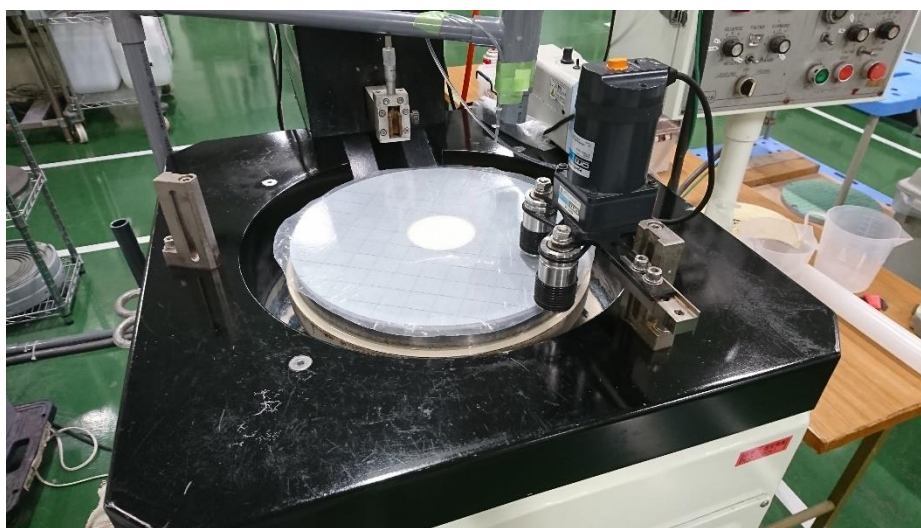


図 4-1 定盤径 $\phi 380$ mm 片面研磨装置

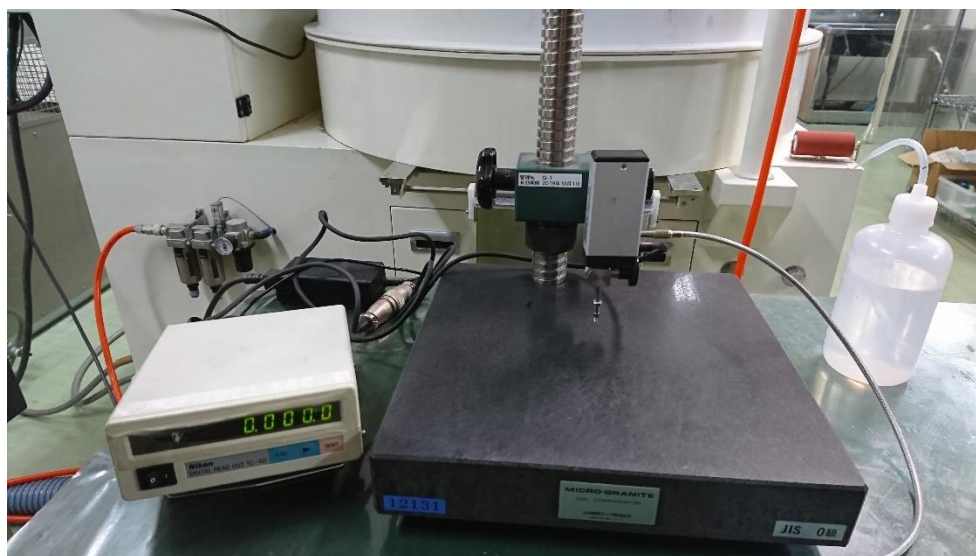


図 4-2 接触式測長機

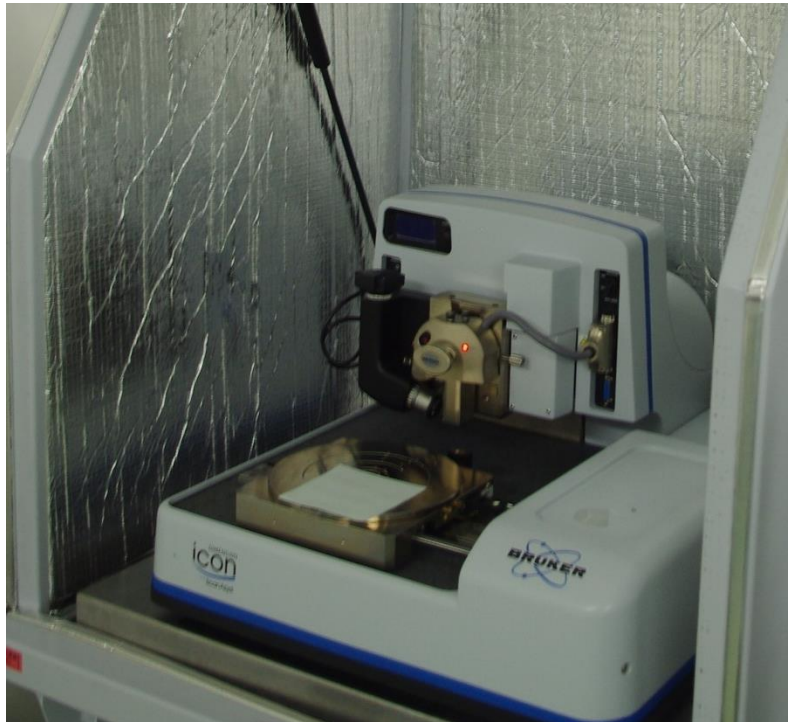


図 4-3 原子間力顕微鏡

4.2.2 研磨実験結果

銅定盤及び樹脂定盤に遊離砥粒を用いてサファイア基板を研磨した場合の研磨レートに及ぼす研磨圧力の影響を図 4-4 に、研磨圧力と表面粗さの関係を図 4-5 に示す。樹脂パッドを用いた条件における研磨レートは、20、30 及び 40 kPa 時にそれぞれ、39、63 及び 76 nm/min であり、研磨圧力と研磨レートには良好な比例関係が認められた。本結果は、2-1 節で述べたプレストンの経験則と合致している。また、表面粗さについては圧力の変化にかかわらず、Ra 0.8 nm 近傍で安定している。軟質な樹脂により、一個あたりの砥粒にかかる力が分散、抑制され、切込み深さが安定化しているためであると推測される。対して、銅定盤における研磨レートは、それぞれ 235、266 及び 265 nm/min であり、樹脂パッドと比較して 3 倍以上高い傾向であった。しかし、30 及び 40 kPa の各条件において研磨レートはほぼ同程度の 266 及び 265 nm/min であり、前述の経験則と整合しない結果となった。また、表面粗さは研磨レート同様 30 及び 40 kPa の条件で Ra 8.0 nm 程度と一定の値となった。これは、30 kPa 以上の圧力において、砥粒の破碎などにより、サファイア基板への切込み深さが一定化したためであると推測される。

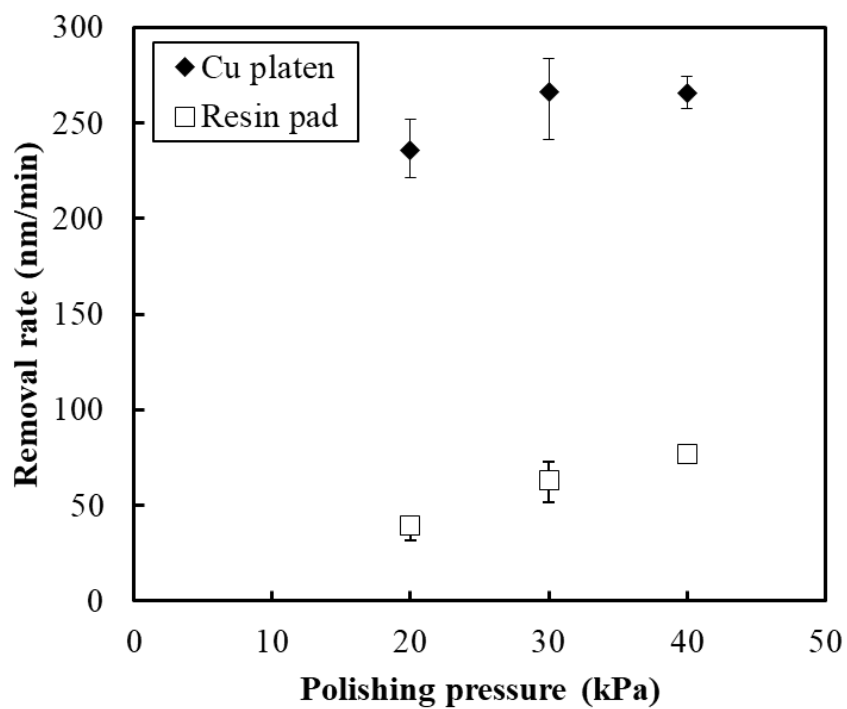


図 4-4 研磨レートに及ぼす銅定盤と樹脂パッドの影響

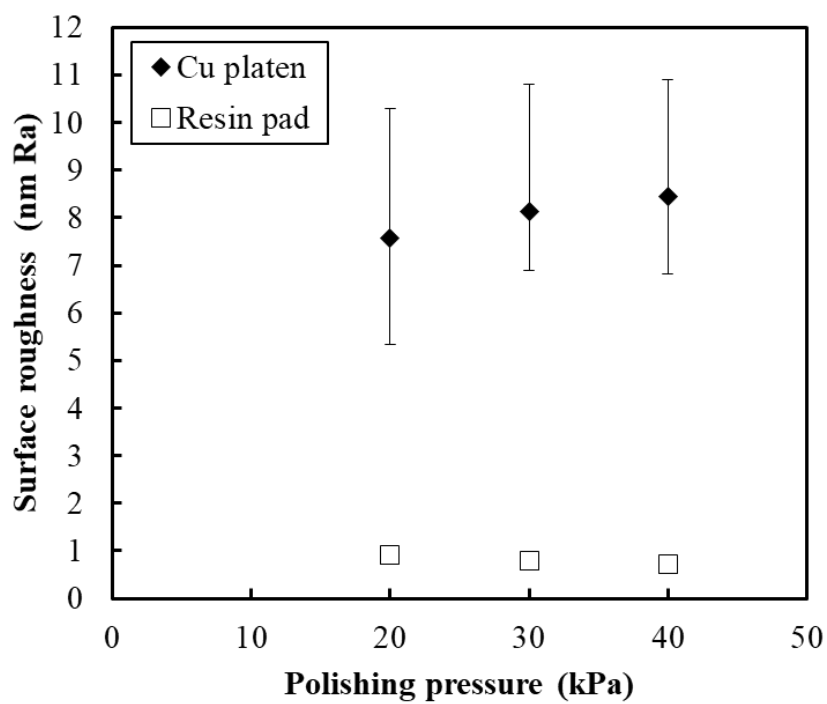


図 4-5 算術平均表面粗さに及ぼす銅定盤と樹脂パッドの影響

AFM 像の比較結果を図 4-6 に示す。図 4-6(a)に示す銅定盤を用いて加工した基板表面においては、いずれの圧力条件においても幅 300~800 nm 深さ 20~40 nm 程度のスクラッチ痕が多数認められた。対して、図 4-6(b)に示す樹脂パッドによる加工表面においては、スクラッチ痕は認められるものの、その幅は概ね 400 nm 以下、深さは 1~3 nm 程度である。本評価にて得られたスクラッチ痕深さは銅定盤を用いた加工と比較して約 1/10 倍以下であり、大幅に低減されていることがわかった。

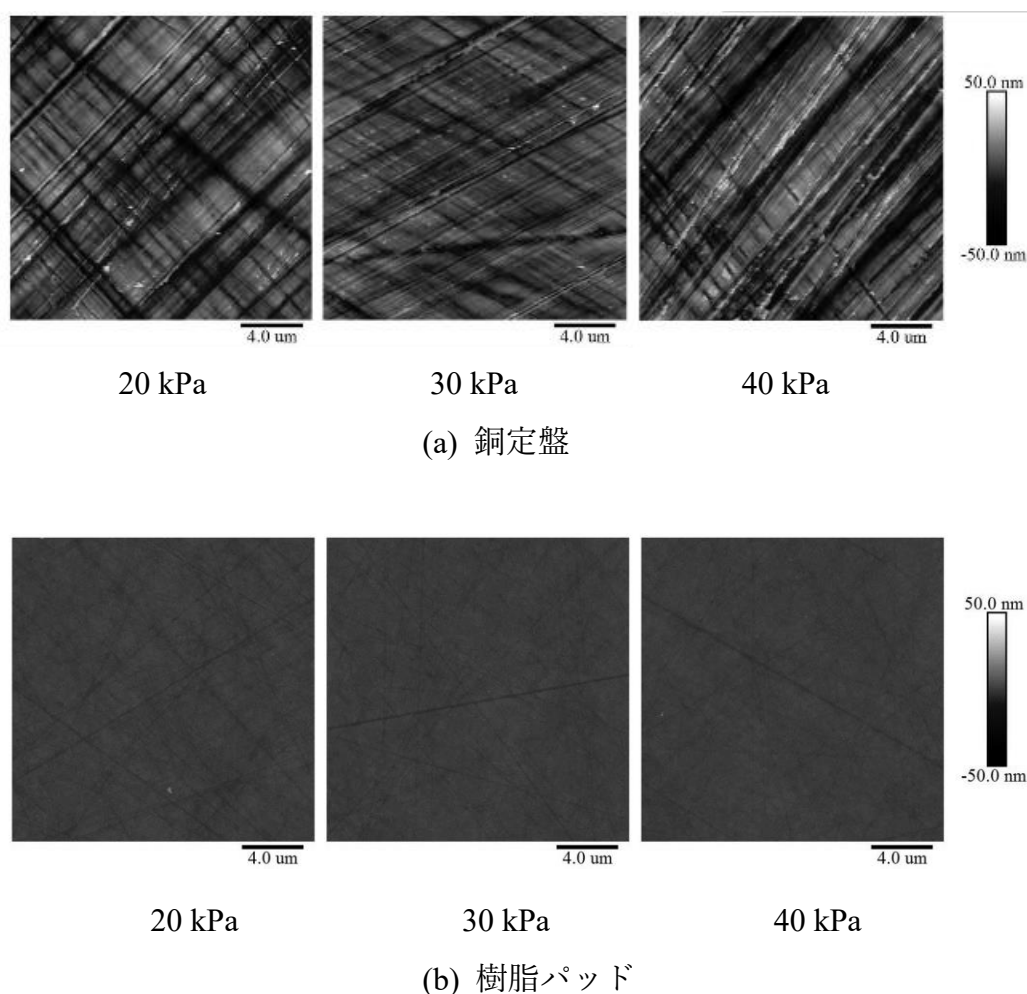


図 4-6 異なる研磨圧力下の銅定盤及び樹脂パッドによる研磨後サファイア表面の AFM 画像

4.3 銅定盤及び樹脂パッドが加工変質層深さに及ぼす影響

4.3.1 実験装置及び実験方法

加工によって形成される加工変質層深さの評価手法は、一般に透過型電子顕微鏡(TEM)による断面観察手法やラマン分光法を用いた手法[2]などが知られている。本研究では、CMP 工程において要する加工時間についても明らかにすること目的とし、銅定盤及び樹脂パッドにより加工された後の基板に対して、CMP 加工を試み、その表面に残存するダメージを観察評価する手法を採用した。CMP 条件を表 4-2 に示す。ワークには 4.2 節の研磨実験において、40 kPa の条件で加工を行ったあとのサファイア基板を用いた。研磨装置は 4.2 節同様の片面研磨装置を用い、研磨スラリーはコロイダルシリカスラリー(平均粒子径 80 nm)とし、研磨パッドには不織布パッドを用いた。研磨圧力は 40 kPa、定盤回転数は 60 rpm と設定した。短時間の CMP 加工を繰り返し行い、各除去量段階における表面を、図 4-7 に示す半導体検査顕微鏡(OLYMPUS 製:MX61)の微分干渉機能を用いて観察し、スクラッチ痕等のダメージの残存有無により加工変質層深さを評価した。

表 4-2 CMP 条件

ワーク	φ2 インチサファイア研磨実験使用基板
スラリー	コロイダルシリカスラリー (平均粒子径 80 nm)
研磨パッド	不織布パッド
研磨圧力	40 kPa
定盤回転数	60 rpm

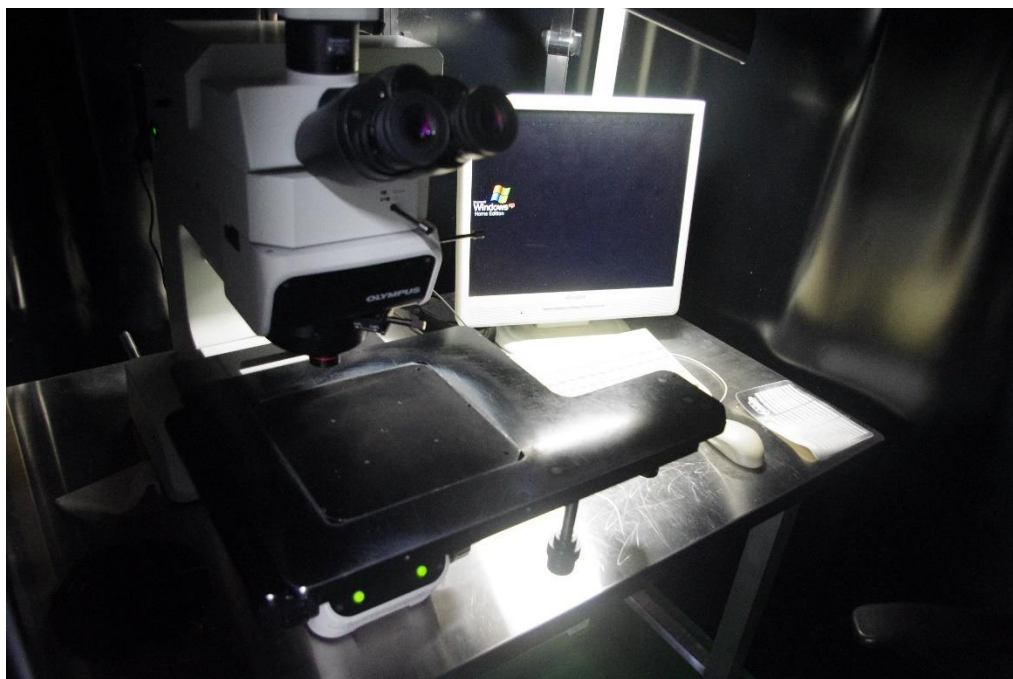
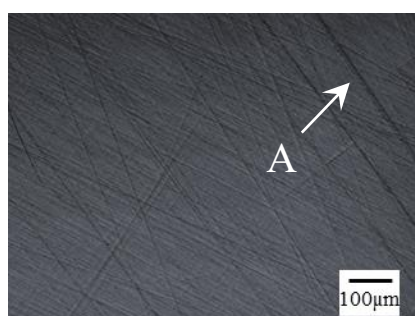


図 4-7 半導体検査顕微鏡

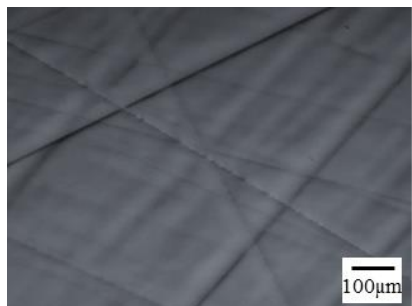
4.3.2 加工変質層深さ評価実験結果

CMP 評価により得られた銅定盤加工面の CMP 深さに伴う表面の推移を図 4-8 に、同様に樹脂パッド加工面の推移を図 4-9 に示す。CMP 前の初期表面について、銅定盤で加工を行った基板表面には図 4-8(a)内の矢印 A に示すような線状のスクラッチ痕が多数確認できる。対して、樹脂パッドによって加工がなされた基板表面は、微細な凹凸は認められるものの、銅定盤加工面のようなスクラッチ痕は認められない。その後、CMP によって 0.5 μm 除去した段階で、樹脂パッドを用いて加工がなされた基板の表面には図 4-9(b)内の矢印 B に示すような線状の欠陥が視認された。これは CMP によって、基板表面近傍に内在していた潜傷と呼ばれる加工起因の結晶歪みが顕在化したためと考えられる。

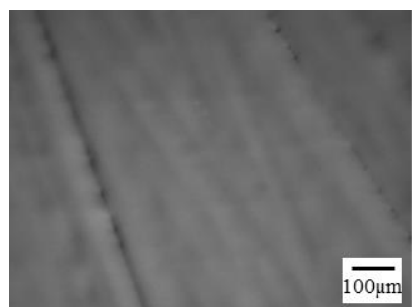
観察結果より、銅定盤を用いた加工法においては、9 μm 除去時点でスクラッチなどの加工ダメージは除去され平滑な表面が得られた。これに対して、樹脂パッドを用いた加工法においては、1.5 μm 除去時点で完全なダメージ除去が確認できた。また、本評価における CMP の研磨レートは 20 nm/min 程度である。したがって、ダメージを完全に除去するまでに CMP に要した加工時間は、銅定盤を用いた従来のダイヤモンドラッピング加工を施した基板は 450 分、同様に樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシングによって加工を施した基板は 75 分であった。以上より、樹脂パッドを用いることで、従来加工技術と比較して加工変質層深さ及び CMP における加工時間を約 0.16 倍に低減可能であることを明らかにした。



(a)初期面



(b)CMP 1.5 µm 除去



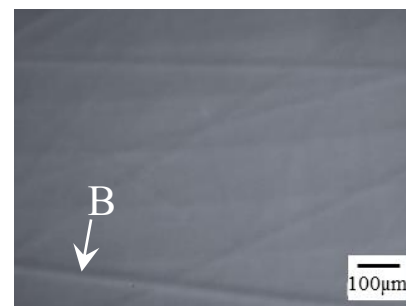
(c)CMP 6.0 µm 除去



(d)CMP 9.0 µm 除去



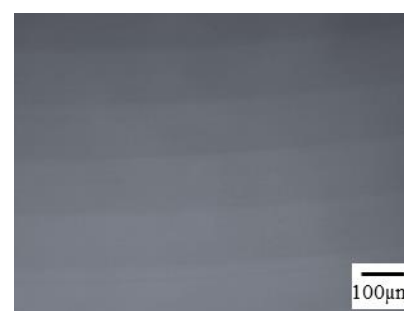
(a)初期面



(b) CMP 0.5 µm 除去



(c)CMP 1.0 µm 除去



(d)CMP 1.5 µm 除去

図 4-8 銅定盤加工表面からの CMP 深さに伴う表面観察像

図 4-9 樹脂パッド加工表面からの CMP 深さに伴う表面観察像

4.4 樹脂パッドによるダメージ低減効果に関する考察と有効性の検討

4.2 節、図 4-4 より、樹脂パッドを用いた加工の研磨レートは研磨圧力 40 kPa の条件下にて 76 nm/min であるのに対し、銅定盤を用いた加工では 265 nm/min であり、樹脂パッドを用いることで研磨レートは約 0.28 倍に低下している。一方、表面のダメージ深さは、4.3 節、図 4-8 及び図 4-9 より、樹脂パッドを用いることで約 0.16 倍に減少している。4.1 節で述べた通り、研磨レート、加工変質層深さはいずれも基板への砥粒の切込み深さに依存すると考えられるが、本実験結果においては研磨レートの低下率約 0.28 倍に対し、表面ダメージの低減率は約 0.16 倍と差異が認められる。3 章の押し込み及びしゅう動実験結果より、銅定盤を用いた加工では、供給された砥粒は、研磨界面において銅板上に固定され、基板への切込みを行うとともに破碎し、砥粒の切れ刃としての高さが減少し、加工能力は低下すると考えられる。ここに新たな砥粒が供給されることで、再び深い切込みがなされ加工が進展すると推測できる。このとき、ダメージ深さは供給された直後の最も粒子径の大きい状態の砥粒の影響を受けると考えられ、研磨レートは供給直後の砥粒と破碎などにより小径化した砥粒との複合的な除去効率によって決まると考えられる。対して樹脂パッドを用いた加工においては、樹脂の粘弾性により、砥粒に負荷される力は分散、抑制され、切込み深さは安定化し、形成されるダメージ深さは抑制されると考えられる。この時、砥粒には破碎が発生しにくいことから、銅定盤と比較して多くの作用砥粒数が得られ、研磨レートに寄与するものと推測される。これらにより、研磨レートの低下率に対して大きなダメージ深さの低減率が得られたものと考えられる。

また、実験結果より、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングを適用した場合の CMP も含んだ加工時間は表 4-3 のように推定できる。ここで、ダイヤモンドラッピング工程における必要除去量はさらにその前工程の加工法により変動する。ここでは、サファイアの一般的な粗ラップ加工を前工程とした場合の必要除去量 30 μm と仮定した。表より、樹脂パッドを適用することにより、ダイヤモンドラッピング工程で要する加工時間は

およそ 3.48 倍に増加するが、CMP に要する加工時間は約 0.16 倍に低減できる。これらを合わせた総加工時間は、従来ダイヤモンドラッピングを適用した場合は 563 分であり、ダイヤモンドポリッシングを適用した場合は 469 分となる。したがって、総加工時間は約 0.83 倍に低減できると考えられ、ダイヤモンドポリッシングの有効性が示唆された。

表 4-3 従来ダイヤモンドラッピング技術と樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングによる加工プロセス時間の推定

	従来ダイヤモンドラッピング	樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシング
ダイヤモンドラッピング加工時間	113 分	394 分
CMP 加工時間 (研磨レート 20nm/min)	450 分	75 分
総加工時間	563 分	469 分

4.5 結 言

樹脂パッドによる研磨加工特性及び加工変質層低減効果を明らかにすることを目的とした研磨実験を実施した。定盤径 ϕ 380mmの研磨装置において、銅定盤及び樹脂パッドによるサファイア基板の研磨特性を比較し、さらに研磨実験により得られた基板に対し、CMPを施すことで、それぞれの加工法で形成される加工変質層深さを評価した。得られた結果を以下に述べる。

- (1) 樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングにおけるサファイア基板の研磨レートは研磨圧力 40kPa の条件において 76 nm/min であり、従来の銅定盤を用いたダイヤモンドラッピングの同条件における研磨レート 265 nm/min と比較して約 0.28 倍に低下することが明らかとなった。
- (2) AFM により得られた表面粗さは、研磨圧力 40kPa の条件においてダイヤモンドポリッシングは Ra 0.8 nm、ダイヤモンドラッピングは Ra 8.0 nm であり、約 0.1 倍に低減され、樹脂パッドを適用することで良好な表面品位が得られた。
- (3) 基板表面に形成されるダメージ深さは、ダイヤモンドポリッシング適用した場合が 1.5 μ m であり、従来ダイヤモンドラッピングのダメージ深さ 9 μ m と比して、約 0.16 倍に低減することを得た。これより、樹脂パッドを用いた加工による加工ダメージ抑制効果を明らかにした。

参考文献

- [1] 河西敏雄, “研磨加工技術”, 表面技術, 57(11)(2006)744-751
- [2] 飯塚保, 山口誠, 藤塚将行, 上野滋, 江利川亘, 三浦一郎, “共焦点顕微鏡・ラマン分光複合装置による加工面評価に関する研究”, 2007年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2007) 563-564

第5章 SiC 基板の研磨加工へ及ぼす樹脂パッドの影響

5.1 緒言

SiC はサファイアと比較して、さらに高い硬度を有する材料であり、CMP における研磨レートは極めて低い。したがって、CMP 工程における必要除去量、すなわち前工程で形成される加工変質層深さを極力低減する必要がある。しかし、一般に研磨レートと研磨品位はトレードオフの関係にあり、特に高硬度な SiC 基板においては、小径のダイヤモンド砥粒を用いた場合、研磨レートは著しく低下する。これらより、SiC 基板の一般的なダイヤモンドラッピング工程は、使用するダイヤモンド砥粒の粒子径を段階的に小さくするなどの多段工程が採用されている[1]。この時、異なる粒子径のダイヤモンド砥粒を同一の装置で使用することは困難であるため、必要となる研磨装置台数は増加する。また、工程間では大径砥粒の持ち込み防ぐために洗浄が行われることから、加工プロセスは長大化する。一方、固定砥粒を用いた研削においても同様に粗研削の後に仕上研削を行う多段処理が必要となる[2]。

これらの課題を解決することを目的とし、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシング適用による工程単一化の実現可能性について検討する。具体的には樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングと従来の多段工程の研磨レート及び表面品位を比較し、その有効性を明らかにする。

5.2 樹脂パッドによる SiC 基板の研磨加工特性に関する基礎評価

5.2.1 実験装置及び実験方法

SiC 基板に対する樹脂パッドの有効性を評価するため、小型の装置を用いた研磨実験を実施した。研磨装置には 4 章の研磨実験で用いた定盤径 $\phi 380$ mm の片面研磨装置を適用し、表 5-1 に示す条件で銅定盤との比較研磨加工を試みた。樹脂パッド及び銅定盤の表面には 4.2 節同様、幅 2 mm、ピッチ 2 mm のらせん溝加工を施した。ワークには $\phi 2$ インチの 4H-SiC 基板を用い、研磨面は Si 面とした。ワークはシフトワックスによって、アルミナセラミックス製の支持プレートに貼り付けた。砥粒には 3.2 節で用いた平均粒径 $3 \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒と、さらに多段処理の単一化を検討するため、仕上ラッピングに用いられる平均粒子径 $1 \mu\text{m}$ のダイヤモンド砥粒を用いた。これらのダイヤモンド砥粒をそれぞれエチレングリコールベースのラッピング用ルブリカントに 0.5 wt.% の濃度となるように分散させ、研磨スラリーとした。研磨圧力は 20 kPa とし、定盤の回転数は 35 rpm、加工時間は 60 分とした。研磨レートの評価は 4.2 節と同手法とし、表面性状の評価には 3 章で用いた白色干渉顕微鏡を用い、観察エリアを $360 \times 250 \mu\text{m}$ として、表面粗さの解析を行った。

表 5-1 研磨特性評価実験条件

ワーク	$\phi 2$ インチ SiC 基板 (Si 面)	
スラリー	砥粒	多結晶ダイヤモンド 平均粒径 $1 \mu\text{m}$ 及び $3 \mu\text{m}$
	分散媒	ラッピング用ルブリカント
	砥粒濃度	0.5 wt. %
研磨圧力	20 kPa	
定盤回転数	35 rpm	
研磨時間	60 min	

5.2.2 研磨実験結果

研磨実験により得られた研磨レート及び表面粗さを図 5-1 に示す。銅定盤を用いた従来のダイヤモンドラッピングにおける研磨レート及び表面粗さは、粒子径 3 μm のダイヤモンド砥粒を用いた条件において 41.6 nm/min 及び Ra 2.46 nm であり、同様に 1 μm の条件では、10 nm/min 及び Ra 2.08 nm であった。

対して、樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシングで得られた研磨レート及び表面粗さは、粒子径 3 μm の条件下でそれぞれ 28.3 nm/min 及び Ra 1.75 nm であり、1 μm の砥粒を用いた条件においては 12.1 nm/min 及び Ra 1.07 nm である。

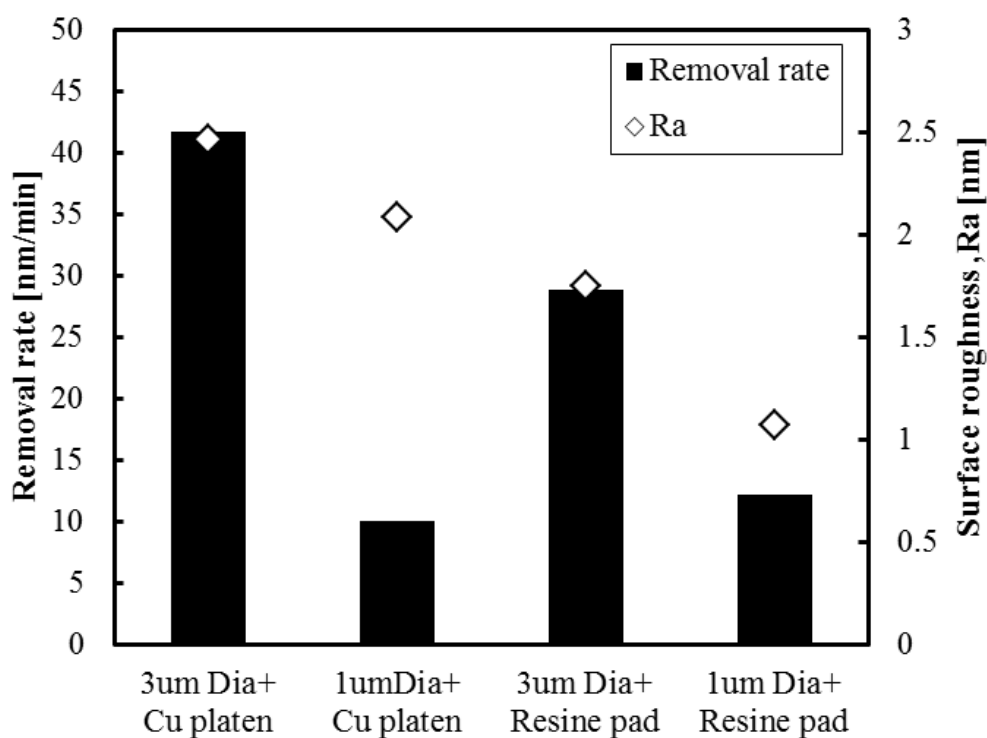


図 5-1 樹脂パッド及び銅定盤による SiC 基板の研磨レート及び表面粗さ比較

5.2.3 SiC 基板の研磨加工に関する考察

銅定盤を用いたダイヤモンドラッピングにおいては、粒子径を $3\ \mu\text{m}$ から $1\ \mu\text{m}$ に小さくすることで、研磨レートは $41.6\ \text{nm}/\text{min}$ から $10\ \text{nm}/\text{min}$ へと約 0.25 倍に低下するのに対し、表面粗さは $Ra\ 2.46\ \text{nm}$ から $Ra\ 2.08\ \text{nm}$ と約 0.84 倍の低減にとどまった。ラッピングのメカニズムについては、4.2 節でも述べたとおり、①砥粒の機械的作用により、基板表面に微細な割れが発生し、②この割れの交差により切り屑が発生し、③これが積み重なることで加工除去量が得られる。すなわち、 $1\ \mu\text{m}$ のダイヤモンド粒子で研磨を行った条件では、 $3\ \mu\text{m}$ の場合と比較して、割れの深さに対し、その頻度が少ないといえる。これは粒子径が小さくなったことにより、平均的な切り込み深さは低減するが、局所的に発生する凝集粒子等の粗大粒子の影響を受けやすくなったためであると推測できる。

一方、樹脂パッドを用いた加工では、研磨レートは $28.3\ \text{nm}/\text{min}$ から $12.1\ \text{nm}/\text{min}$ へと 0.42 倍に低下し、表面粗さは $Ra\ 1.75\ \text{nm}$ から $Ra\ 1.07\ \text{nm}$ へと 0.61 倍低減している。研磨レートの低下率と表面粗さの低減率を比較すると、銅を用いた場合と比べ差異が小さい。これはサファイアを用いた 4.2 節の研磨実験同様、樹脂の粘弾性により、砥粒にかかる圧力が分散及び抑制され、粒径に応じた安定的な切り込みがなされているためであると考えられる。

ここで、銅定盤による $3\ \mu\text{m}$ 及び $1\ \mu\text{m}$ 粒子径のダイヤモンドラッピングと樹脂パッドによる $3\ \mu\text{m}$ 粒子径のダイヤモンドポリッシングの研磨特性を較した。樹脂パッドを用いることで、同じ $3\ \mu\text{m}$ 粒子の条件では、研磨レートは銅定盤と比較して約 0.68 倍に低下するが、表面粗さも約 0.71 倍と同程度に低減可能である。また、その表面粗さは、銅定盤における $1\ \mu\text{m}$ 粒子径で加工した表面よりも高品位である。したがって、樹脂パッドを用いた場合、仕上げ加工は不要となる。これらを基に、従来の多段工程と樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシングを用いた単一工程に要する時間を推定及び比較した結果を表 5-2 に示す。ここで、ダイヤモンドラッピング工程における総必要除去量は、一般的な SiC 基板の粗ラップ加工を前工程とした

場合の必要除去量 $20\ \mu\text{m}$ と仮定し、粗仕上げ・精密仕上の除去配分についても、一般的な SiC 基板の除去配分より仮定した。表より、ダイヤモンドラッピング工程の総加工時間は、樹脂パッド単一工程を採用することで、従来多段工程と比較して、約 0.90 倍に低減できることが示唆された。また、多段工程における段取り替えなどの付帯作業や、工程間の洗浄が不要となることから、さらに大きな加工プロセス時間の低減につながると期待される。

表 5-2 SiC 基板に対する従来技術と提案技術による加工プロセス時間の推定

	従来多段工程	樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシング
粗仕上げダイヤモンドラッピング ($16\ \mu\text{m}$ 除去)	384 分	706 分
精密仕上げダイヤモンドラッピング ($4\ \mu\text{m}$ 除去)	400 分	
総加工時間	784 分	706 分

5.3 結 言

SiC 基板のダイヤモンドラッピング工程において、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシング適用による効果及び工程単一化の実現可能性について検討した。平均粒子径 3 及び 1 μm のダイヤモンド砥粒を用いて、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングと従来の多段ダイヤモンドラッピング工程の研磨レート及び表面品位を比較し、その有効性について検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 銅定盤を用いたダイヤモンドラッピングにおいては、粒子径を 3 μm から 1 μm に小さくすることで、研磨レートは 41.6 nm/min から 10 nm/min へと約 0.25 倍に低下するのに対し、その表面粗さは Ra 2.46 nm から Ra 2.08 nm であり、およそ 0.84 倍の低減にとどまった。
- (2) 樹脂パッドを用いた加工では、粒子径を 3 μm から 1 μm に小さくすることで、研磨レートは 28.3 nm/min から 12.1 nm/min へと約 0.42 倍に低下し、その表面粗さは Ra 1.75 nm から Ra 1.07 nm へとおよそ 0.61 倍低減した。研磨レートの低下率と表面粗さの低減率を比較すると、銅を用いた場合と比べ差異が小さく、研磨レートの値に対し良好な表面品位が得られることを明らかにした。
- (3) ダイヤモンドラッピング工程の総加工時間は樹脂パッド単一工程を採用することで、従来多段工程と比較して、およそ 0.90 倍に低減できることが示唆された。

参考文献

- [1] 浜本伸二, 土肥俊郎, 尾形謙次郎, ”SiC 基板のダイヤモンドスラリーによる加工特性 (第3報)”埼玉大学地域共同研究センター紀要, (7)(2007)5-6
- [2] 長屋正武, 貴堂高德, 河田研治, 平野真也, 加藤智久, “SiC 半導体ウエハの加工技術”, デンソーテクニカルレビュー Vol.20(2015)222-228

第 6 章 樹脂パッドによる機械研磨に及ぼす電界砥粒制御技術の影響

6.1 緒言

4章及び5章において、樹脂パッドを用いることで従来のダイヤモンドドラッピングと比較して基板表面のダメージは低減されるが、その研磨レートは低下することが分かった。そこで、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングの高効率化について検討する。遊離砥粒研磨加工においては、図6-1に示すように砥粒に遠心力が作用し、研磨領域から散逸し、研磨レートが低下することが知られている[1]。すなわち、砥粒の飛散を抑制し、研磨界面における作用砥粒数を増加させることで研磨効率を向上させることが可能となると考えられる。そこで、砥粒の配置制御技術である電界砥粒制御技術[2]を導入し、砥粒の飛散抑制による高効率化について実験的に検討した。初めに研磨加工に用いる多結晶ダイヤモンド砥粒に対して電界が及ぼす影響について基礎的に検討するため、電界下における砥粒挙動の観察を行った。次に樹脂パッドを用いたダイヤモンドドラッピングにおける基礎的な研磨レート向上効果について卓上の小型研磨装置を用いて確認した。さらに、実際の生産に供与可能な装置サイズでの最適電界印加条件の検討及び本技術の適用の有効性について実証実験を実施した。

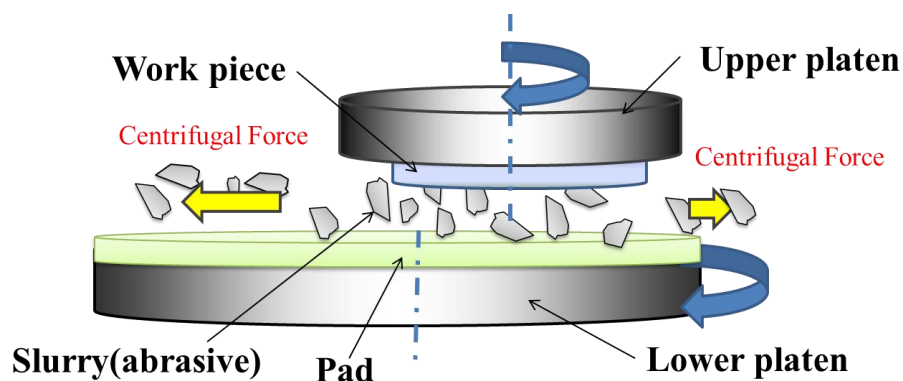


図 6-1 遊離砥粒研磨法における砥粒散逸の模式図

6.2 電界砥粒制御技術

電界砥粒制御技術とは絶縁性の分散媒に砥粒を分散させたスラリーに対し、低周波交流電界を印加し、スラリー中の砥粒を配置制御することで超硬合金を迅速に仕上げる技術として赤上らによって開発された[3].

赤上らは、比誘電率 $\epsilon_s=2.7$ のシリコンオイルに比誘電率 $\epsilon_p=6.0$ の単結晶ダイヤモンド砥粒を分散させたスラリーに電界を印加し、これらの比誘電率の差 ($\epsilon_s < \epsilon_p$) によりダイヤモンド砥粒は電氣的に分極し、図 6-2 に示すように研磨面に引き込まれることを明らかにした[4]. 本技術はボールエンドミルの刃先仕上げ技術として実用化されている[5]. また、久住らは、小型研磨装置に電界砥粒制御技術を導入し、GC 砥粒とシリコンオイルから構成される研磨スラリーと市販のポリウレタン研磨パッドを用いて、SiC 基板の研磨効率向上が可能であることを明らかにしている[6]. これらより、電界砥粒制御技術は、遊離砥粒研磨法における砥粒の飛散を抑制し、研磨界面における作用砥粒数を向上させることが可能であり、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングに導入することで研磨効率の向上が期待される.

しかし、先行研究においては、多結晶ダイヤモンドを砥粒に用いた検討や生産レベルの大規模領域における電界による研磨効率向上効果の検討はなされていない. そこで、本研究では多結晶ダイヤモンドに対する電界効果並びに大型装置における電界砥粒制御技術の有効性について検討する.

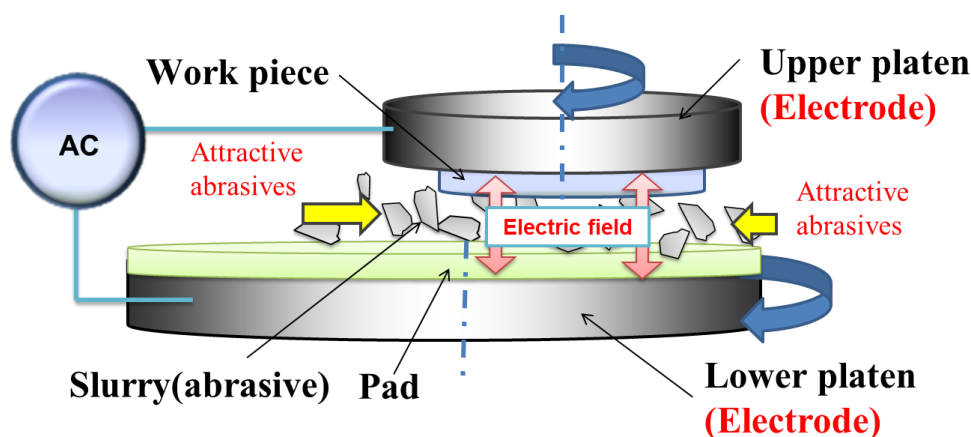


図 6-2 電界砥粒制御技術による研磨界面への砥粒の引き込み

6.3 小型研磨装置を用いた電界砥粒制御技術の適用に関する基礎検討

6.3.1 多結晶ダイヤモンド砥粒挙動に及ぼす電界の影響

6.3.1.1 電界印加装置

電界の印加装置を図 6-3 に示す。その構成はファンクションジェネレータ (NF 回路製：WF1974) にて基礎信号を発生させ、利得 1000 の高電圧アンプ (TREK 製：609E - 6) にて昇圧し電極に供給した。信号の観測にはデジタルオシロスコープ (Agilent Technologies 製：DSO-X2014A) を使用した。

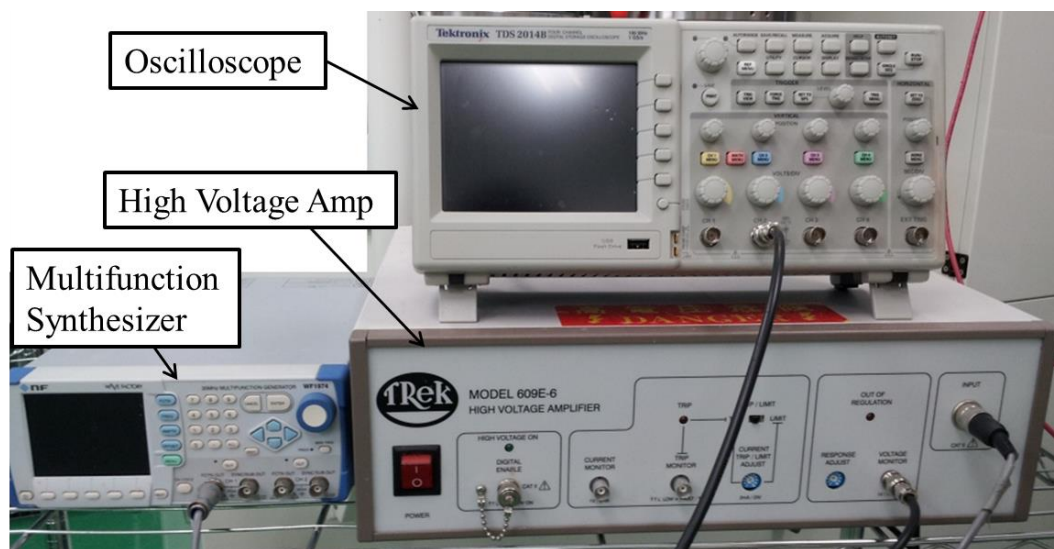


図 6-3 電界供給装置

6.3.1.2 砥粒挙動観察実験方法

電界下における砥粒挙動を観察するため、図 6-4 に示す観察装置を構築した。上下電極間の距離は 1 mm とし、各電極には 6.3.1.1 に示した電界印加装置を接続した。観察に用いたスラリーは、動粘度 5 cst のシリコンオイルに第 3 章及び第 4 章で用いた平均粒子径 3 μm の多結晶ダイヤモンド砥粒を 10 wt.% の濃度にて分散させた。このスラリーを電極間に 5 ml 配置した。挙動の観察にはズームレンズを適用した CCD カメラを用いた。電界印加条件は、久住らの先行研究[7]より、波形を矩形波とし、電界強度が 1 kV/mm となるように設定した。印加周波数は 0.3 Hz から 2 Hz の間で 0.1 Hz ごとに高め、それぞれの周波数における砥粒挙動の推移を観察した。

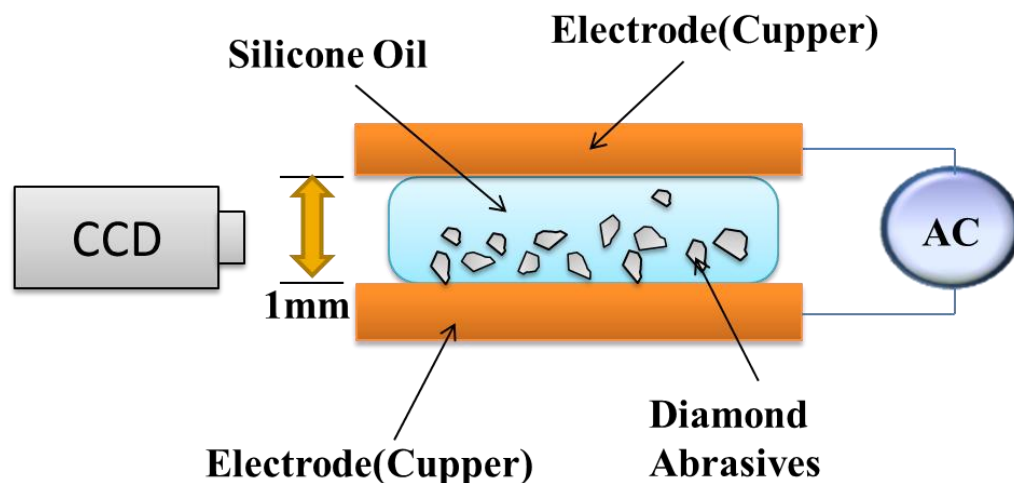


図 6-4 砥粒挙動観察装置模式図

6.3.1.3 砥粒挙動観察実験結果

電界下における挙動観察結果を図6-5に示す。図6-5(b)に示す周波数0.3~0.5 Hzにおいては、砥粒は電極間で緩やかな攪拌挙動を示した。さらに1 Hz程度の周波数帯においては、その挙動は徐々に直線的な往復運動へと変化し(図6-5(c)), さらに2 Hzでは図6-5(d)に示すように柱上のクラスターを形成した。これは周波数2 Hzにおいて、往復運動の周波数への追従が困難になったためであると考えられる。本観察実験より、多結晶ダイヤモンド砥粒においても単結晶ダイヤモンドと同様に電界砥粒制御技術による砥粒の配置制御が可能であり、またその挙動についても単結晶ダイヤモンドと同様に周波数依存性を有することを明らかにした。

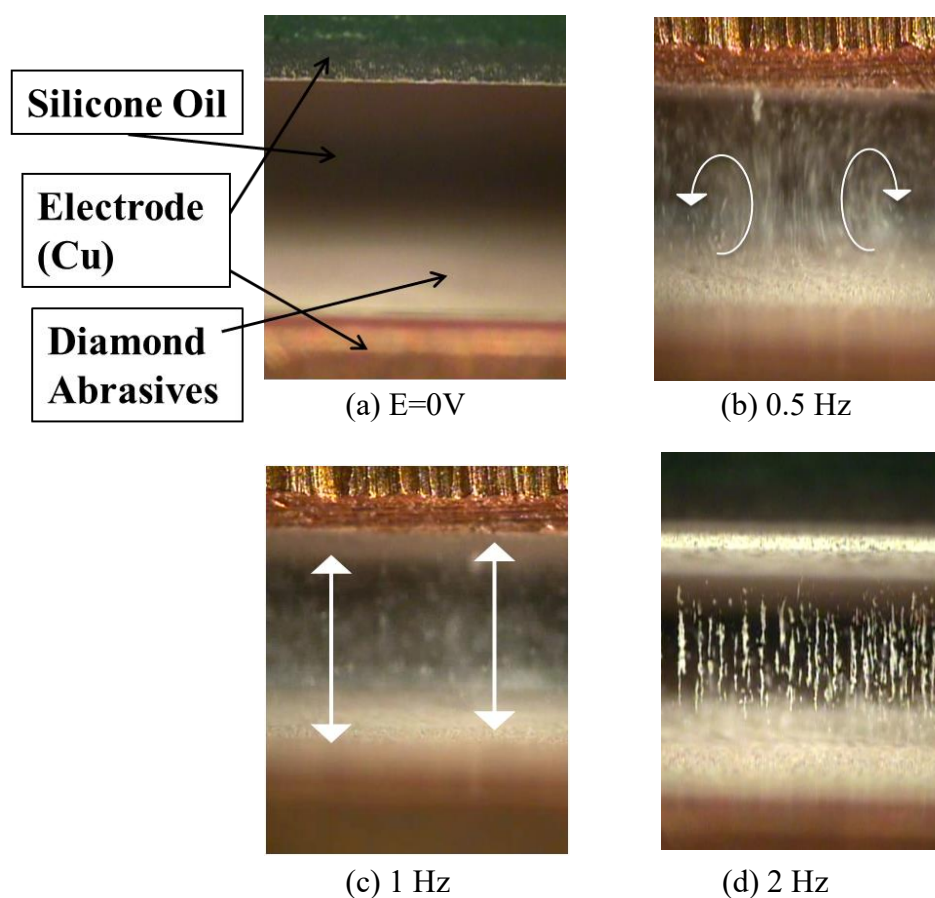


図 6-5 砥粒挙動観察装置模式図

6.3.2 小型研磨装置における電界が研磨特性に及ぼす影響

6.3.2.1 実験装置及び実験方法

樹脂パッドと多結晶ダイヤモンドを用いたダイヤモンドポリッシングにおける基礎的な電界効果を検討するため、3.1 節においてしゅう動実験に用いた卓上研磨装置を用いて電界研磨実験を実施した。本装置の研磨領域詳細図を図 6-6 に示す。本装置は電界を印加するため、研磨ヘッド及び下定盤を電極とする。研磨ヘッド上部にはポリアセタール樹脂製のプレートが、下定盤下部にはガラスエポキシ樹脂製のプレートがそれぞれ配置され、装置本体との絶縁を図っている。また、研磨ヘッド、下定盤への電界の供給は給電ブラシを介して行う方式である。

本装置下定盤に樹脂パッドを搭載し、表 6-1 に示す条件にて試みた。ワークは $10 \times 10 \text{ mm}$ 、 $t=0.5 \text{ mm}$ のサファイア基板（0001 面）を用い、ワックスを用いて研磨ヘッドに貼付けた。研磨スラリーは 6.3.1.2 目の挙動観察に実験に用いたダイヤモンド砥粒及びシリコンオイルを用い、砥粒濃度 0.5 wt.% となるよう調整した。研磨ヘッド回転数、下定盤回転数はそれぞれ 60 rpm 及び 400 rpm と設定し、研磨圧力は 40 kPa とした。研磨時間は 60 分一定とした。電界印加条件は、波形を矩形波とし、電界強度 1 kV/mm となるよう設定した。ここで、印加周波数は、異なる砥粒挙動における電界効果の差異を検討するため、1 Hz 及び 2 Hz とした。評価指標は研磨レートとし、接触式側長機を用いて研磨前後の厚さを取得し、無電界時との比較を行った。

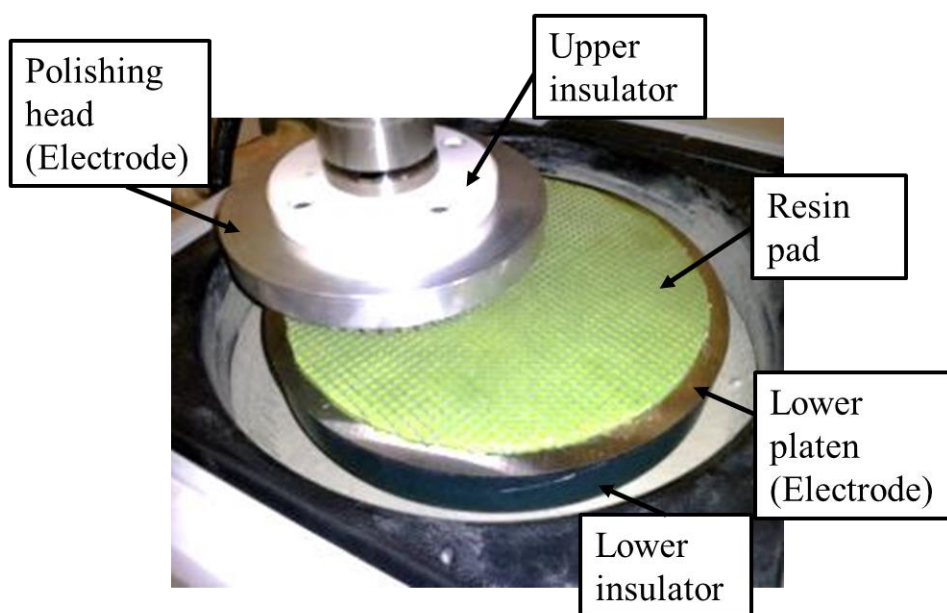


図 6-6 電界小型研磨装置の研磨領域

表 6-1 小型装置を用いた電界研磨実験条件

研磨試料	サファイア(0001面)基板 10×10 mm t=0.5 mm	
スラリー	砥粒	多結晶ダイヤモンド (2-4 μm)
	分散媒	シリコンオイル(5 cSt)
	砥粒濃度	0.5 wt.%
研磨圧力	40 kPa	
研磨ヘッド/定盤回転数	60 / 400 rpm	
研磨時間	60 min	
電界印加条件	波形	矩形波
	電界強度	E=0V 及び 1 kV/mm,
	周波数	1 及び 2 Hz,

6.3.2.2 小型装置における電界効果

小型電界研磨装置を用いた各条件における研磨レートを図 6-7 に示す。電界を印加しない条件における研磨レートは 36.5 nm/min であり、周波数 1 Hz 及び 2 Hz の電界を印加した条件においては、それぞれ 48.8 nm/min 及び 69.3 nm/min であった。電界を印加することで、いずれの周波数においても研磨レートの向上効果は得られたが、その効果は周波数 1 Hz 時が約 1.33 倍であり、2 Hz の条件では約 1.89 倍と 2 Hz の条件の方が高い。これは、周波数によって砥粒の引き込み挙動が変化することに起因するものと考えられる。赤上らの先行研究[8]においては、周波数 1 Hz 近傍において最も高い電界による研磨特性の向上が得られると報告されている。しかし、本実験においては、周波数 2 Hz の条件下にて良好な特性が得られている。赤上らの先行研究においては、研磨工具の直系が $\phi 20$ mm であることから、本実験に用いた定盤径の 1/10 倍程度である。これらより、最適周波数は定盤サイズや相對運動速度などにより変動する可能性が示唆された。

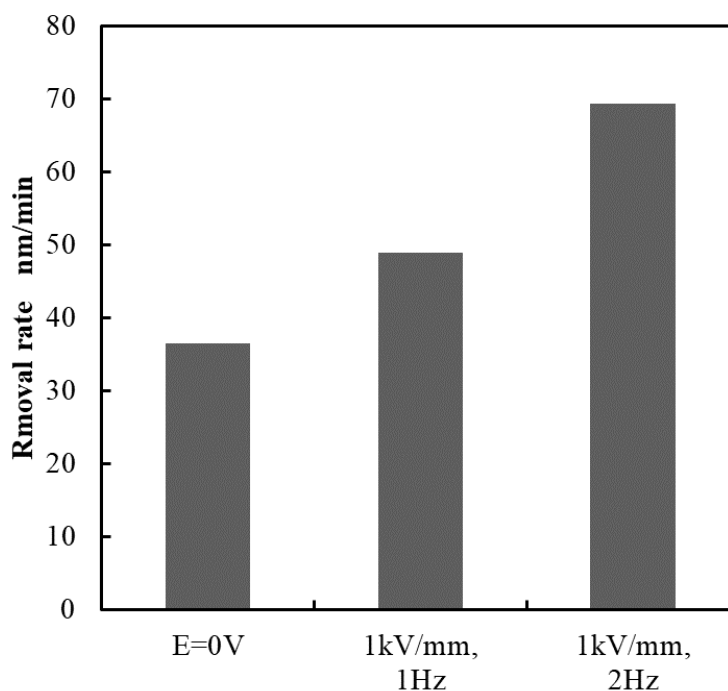


図 6-7 小型装置における電界が研磨レートに及ぼす影響

6.4 大型研磨装置における電界が研磨特性に及ぼす影響

6.4.1 大型電界研磨装置

生産レベルの装置サイズにおける電界ダイヤモンドポリッシング技術の有効性について検討するため、定盤径 $\phi 910$ mmの片面研磨装置を用いて大型電界研磨装置を構築した。図 6-8 に装置の全体図及びワーク貼付け用の基板保持プレートを示す。本装置においては下定盤と保持プレートを電極とする。下定盤はポリアセタール樹脂製絶縁層を介して装置回転主軸と連結されている。また、本装置において、保持プレートは研磨ヘッドにより加圧・保持されるため、研磨ヘッドと接触する上部にはガラスエポキシ樹脂製の絶縁プレートを配した。保持プレートへの電界供給経路を図 6-9 に、研磨時の模式図を図 6-10 に示す。研磨ヘッド内部に樹脂によって絶縁された経路を設け、そこに銅線を通し、研磨ヘッド下部にて SUS 製のスプリングと連結している。このスプリングが保持プレート上部の銅と接触することで回転する保持プレートへの電界供給を可能とする。下定盤への電界の供給は、給電ブラシを用いた。

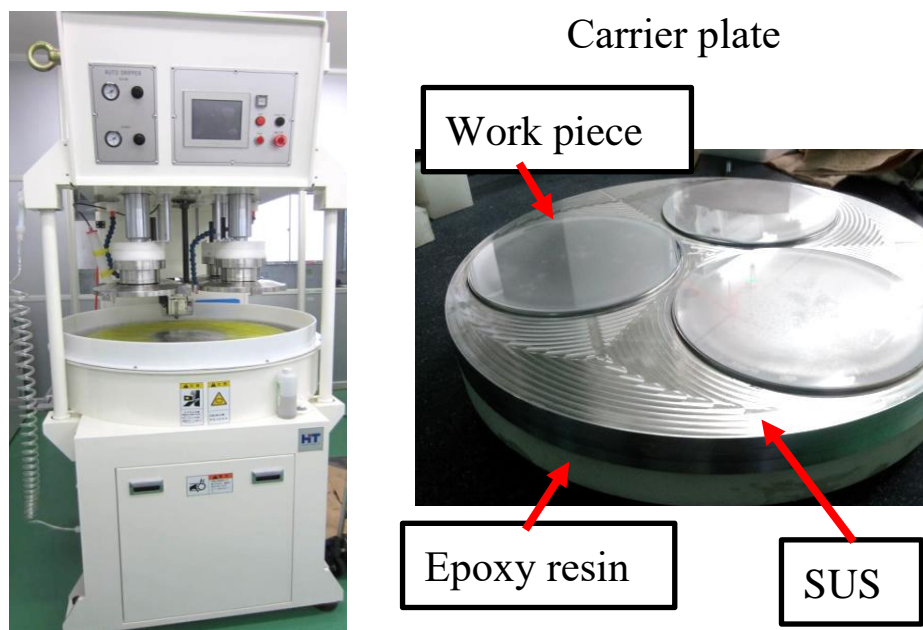


図 6-8 大型電界片面研磨装置

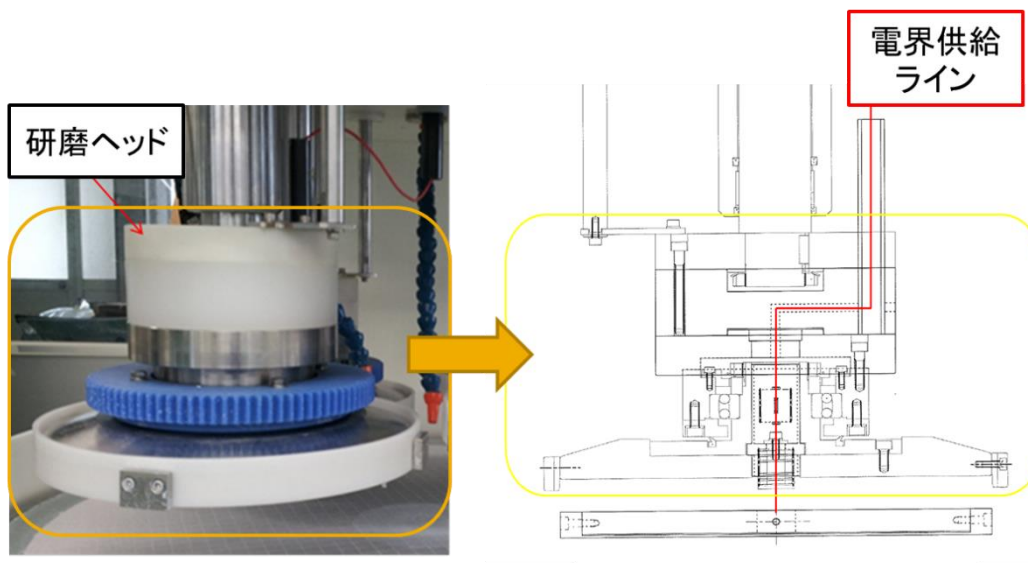


図 6-9 研磨ヘッドと電界供給経路

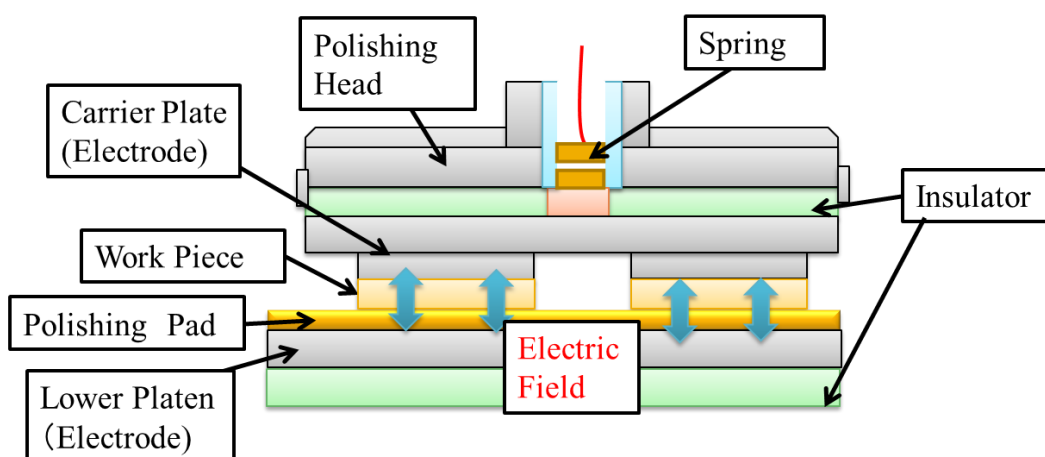


図 6-10 電界研磨装置を用いた研磨時における模式図

6.4.2 大型装置における電界印加周波数が研磨レートに及ぼす影響

6.4.2.1 実験方法

電界研磨実験装置を用い、本装置における最適印加周波数を導出するため、周波数が研磨レートに及ぼす影響について検討した。表 6-2 に研磨実験条件を示す。ワークはφ6 インチの大径サファイア基板(0001 面)とした。研磨スラリーは 6.3.2 項で用いたスラリーと同様の構成とした。研磨圧力は 30 kPa, 定盤の回転数は 50 rpm とし、樹脂パッドには装置に付帯する溝切機構を用いて、らせん溝を付与した。

電界印加条件は、電界強度 1 kV/mm, 波形を矩形波とした。周波数は 0.5~12 Hz の間にて 10 水準の値を設定し比較した。研磨レートは、接触式測長機によって評価した。

表 6-2 大型装置における最適周波数に検討研磨実験条件

研磨試料	φ6 インチサファイア基板(0001 面)	
スラリー	砥粒	多結晶ダイヤモンド (2-4 μm)
	分散媒	シリコンオイル(10 cSt)
	砥粒濃度	0.5 wt.%
研磨圧力	30 kPa	
定盤回転数	50 rpm	
研磨時間	30 min	
電界印加条件	波形	矩形波
	電界強度	1 kV/mm,
	周波数	1, 0.5, 1, 2, 5, 5.5, 6, 6.5, 8,10 及び 12 Hz,

6.4.2.2 大型装置を用いた周波数依存性に関する検討実験結果

各印加周波数において得られた研磨レートを図 6-11 に示す。0.5~5 Hz 及び 6 Hz~12Hz の周波数領域においては、研磨レートは周波数の変化に応じて 180~210 nm/min の間で緩やかに向上及び低下している。一方、5.5 Hz の条件における研磨レートは 281nm/min であり、特異的に高い向上効果が認められた。この周波数は、6.3.2.2 目で述べた赤上らの先行研究や小型装置において高い向上効果が得られた周波数と比較して高周波である。電界砥粒制御技術における周波数と研磨レートの向上効果の関係には、使用する装置の定盤サイズも含めた様々な要素が複合的に影響を与えられと推測される。特にこれまでの実験より、研磨領域の大きさは重要な影響を及ぼすと推測される。本メカニズムの解明は今後の課題としたい。

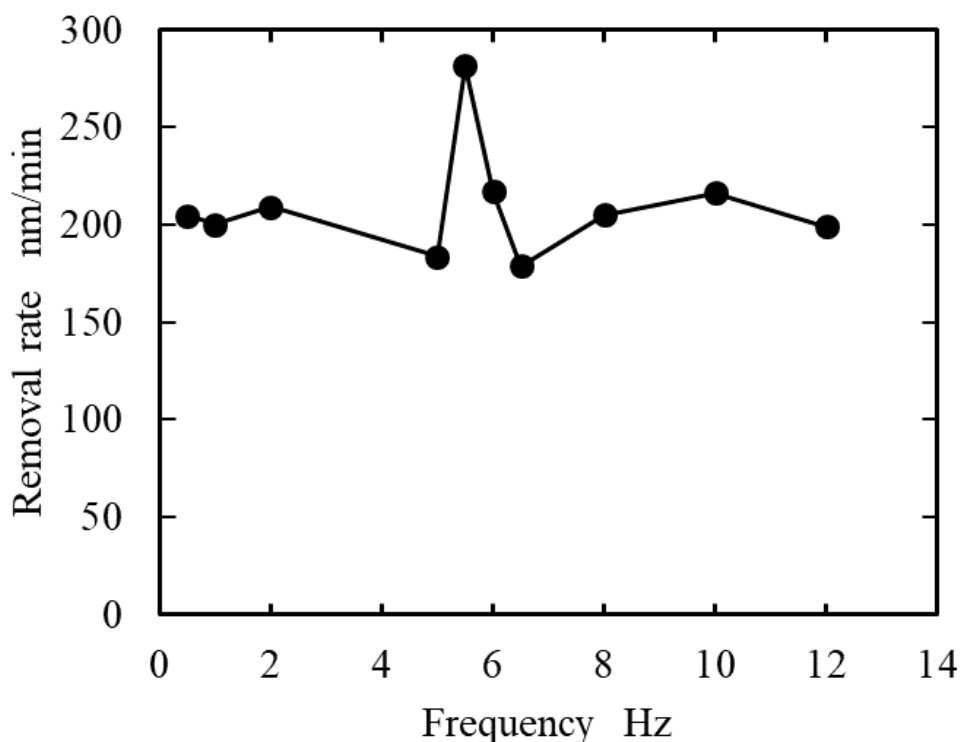


図 6-11 大型装置における電界印加周波数が研磨レートに及ぼす影響

6.4.3 大型装置における電界ダイヤモンドポリッシングの有効性に関する検討

6.4.3.1 実験方法

電界砥粒制御技術と樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングの有効性について、実際の生産に供与可能な装置サイズにおいて検証するため、従来の銅定盤によるダイヤモンドラッピングとの比較研磨実験を行った。研磨スラリー及び研磨条件は、6.4.2 項の研磨実験と同様とし、無電界下における銅定盤、樹脂パッド及び電界印加時の樹脂パッドの3条件における研磨レートと表面粗さを比較した。また、銅定盤及び樹脂パッドは、らせん溝を付与したものをを用いた。電界印加条件は電界強度 1 kV/mm、波形を矩形波とし、周波数は 6.4.2 項の実験において最も高いレート向上効果が得られた 5.5 Hz を採用した。研磨レートは、接触式測長機によって評価し、表面品位は白色干渉顕微鏡を用い、観察エリアを $140 \times 110 \mu\text{m}$ として表面粗さの解析を行った。また、基板の平坦性を図 6-12 に示す斜入射干渉計(Nidek 製：FT900)を用いて評価した。



図 6-12 斜入射干渉計

6.4.3.2 電界研磨実験結果

実験により得られた研磨レート及び表面粗さを図 6-13 に示す。銅定盤の研磨レート及び表面粗さは、それぞれ 188 nm/min 及び Ra 2.14 nm、樹脂パッドは 122 nm/min、Ra 1.60 nm であり、4.2 節の実験同様、良好な表面品位が得られるが、研磨レートは低下する傾向が認められた。対して樹脂パッドに電界を印加した条件における研磨レートは 283 nm/min であり、その表面粗さは Ra 1.48 nm であった。電界を印加することで、表面粗さは維持したまま、研磨レートは約 2.3 倍に向上し、銅定盤を用いた加工と比べても約 1.5 倍向上する結果を得た。これより、電界砥粒制御技術を適用することで、定盤径 $\phi 910$ mm の大型装置においても研磨レートの向上効果が得られることを明らかにした。

また、樹脂パッド及び電界砥粒制御技術を適用し加工を行った基板の斜入射干渉計評価結果を図 6-14 に示す。裏面基準の厚みばらつきを示す指標である GBIR(Global Backside Ideal Range)は $\phi 6$ インチ基板において $2.73 \mu\text{m}$ である。一般的な $\phi 6$ インチの市販サファイア基板の GBIR は $\leq 5.0 \mu\text{m}$ 程度であることから、良好な形状精度が得られているといえる。

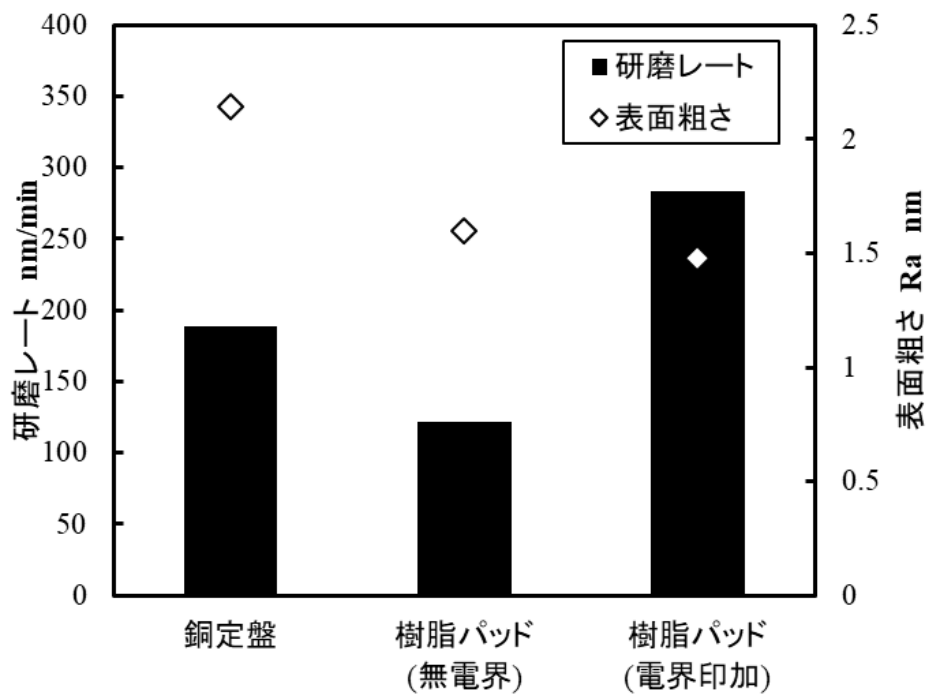


図 6-13 大型装置を用いた電界印加研磨実験結果

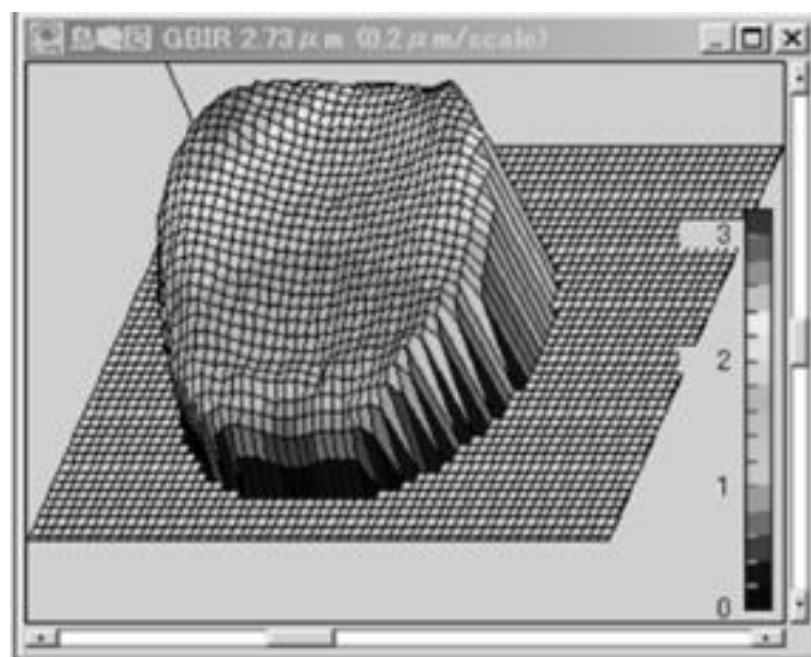
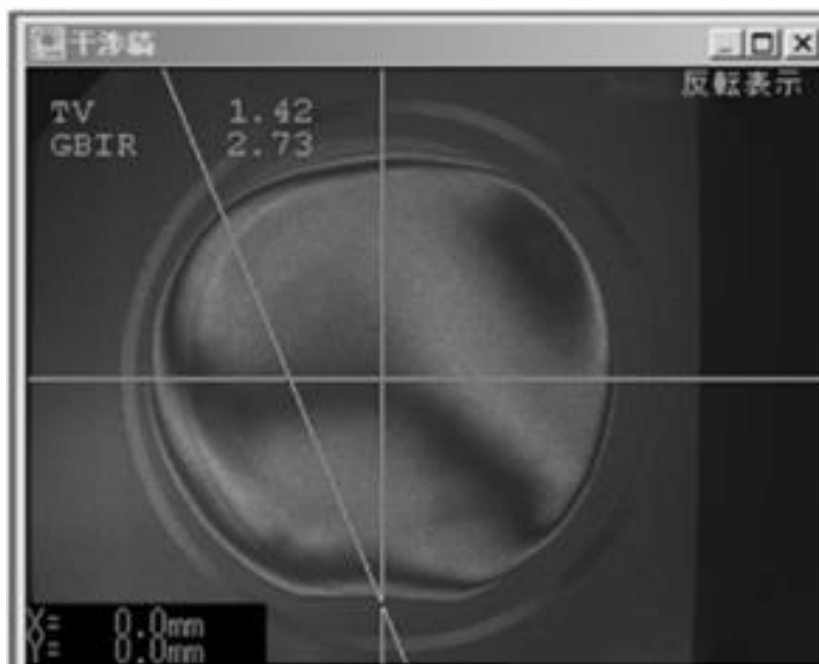


図 6-14 樹脂パッドと電界砥粒制御技術を適用した研磨加工基板の平坦性

6.5 樹脂パッド及び電界砥粒制御技術を用いた加工の有効性に対する比較検討

樹脂パッド及び電界砥粒制御技術を用いたダイヤモンドポリッシングの有効性について考察する。樹脂パッドによるダメージ低減効果ならびに電界砥粒制御技術による研磨レート向上効果より、本加工法を導入した場合のCMPを含む加工プロセス時間は表6-3のように推定できる。ダイヤモンドラッピング工程における必要除去量は4.4節同様、 $30\ \mu\text{m}$ と仮定した。表より、本加工法を導入することで、従来のラップ技術と比較して加工時間を約0.29倍に短縮可能であることが示唆され、先進結晶基板の加工プロセス時間を大幅に短縮することができると考えられる。

表 6-3 従来技術と提案技術による加工プロセス時間の推定

	従来ラップ技術	提案技術
ダイヤモンドラッピング加工時間	160 分	106 分
CMP 加工時間	450 分	75 分
総加工時間	610 分	181 分

6.6 結 言

樹脂パッドによるメカニカルポリッシングの研磨効率向上を目的とし、電界砥粒制御技術の導入について検討を行った。小型研磨装置を用いた基礎実験により樹脂パッドと多結晶ダイヤモンドを用いた研磨加工における電界効果について検討した。さらに定盤径 $\phi 910$ mm の大型研磨装置を構築し、 $\phi 910$ mm の研磨領域における最適な電界印加周波数の検討を行った。また、本大型装置における電界ダイヤモンドポリッシングの有効性について実証実験を実施した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 定盤径 $\phi 180$ mm の小型研磨装置を用いた電界研磨実験により、樹脂パッドと多結晶ダイヤモンドを用いた条件においても電界による研磨レート向上効果が得られ、その研磨レートは印加周波数 2 Hz のとき、無電界時と比較して約 1.89 倍となることを明らかにした。
- (2) 定盤径 $\phi 910$ mm の大型研磨装置を用いて、最適な電界印加周波数の検討を行い、周波数 5.5 Hz の条件において最も高い向上効果が得られることを示した。
- (3) 定盤径 $\phi 910$ mm の大型装置において、電界砥粒制御技術を導入することで、表面粗さは維持したまま、研磨レートは無電界時と比較して、約 2.3 倍に向上し、銅定盤を用いた従来のダイヤモンドラップと比べても約 1.5 倍向上する結果を得た。また、電界ダイヤモンドポリッシングにより得られた基板の平坦性は GBIR 2.73 μm であり、良好な形状精度が得られることを確認した。これより、電界砥粒制御技術と樹脂パッドを用いた加工法の有効性を明らかにした。

参考文献

- [1] 谷泰弘, 河田研治, "液体ボンド砥石を用いた高能率研磨法の開発"日本機械学会 論文集 C 編, Vol.51,No.471(1985) 3145-3148.
- [2] 赤上陽一, "粒子分散型誘電流体を用いた加工法", 特許第 3595219 号 (2004)
- [3] 赤上陽一, 浅利孝一, 藤田豊久, B. ジャヤデワン, 梅原徳次, "粒子分散型機能性流体を用いた研磨方法の開発", 日本機械学会論文集(C 編), 66 巻, 649 号(2000)3168-3173
- [4] Y. Akagami and T. Umehara, "Development of electrically controlled polishing with dispersion type ER fluid under AC electric field", *Wear*, Vol.260(2006)345-350
- [5] Y. Akagami and T. Umehara, "Development of Processing Method of a Novel Long Life Ball-end Mill", Proceedings of the 1st International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(2005) CD-ROM.
- [6] 久住孝幸, 佐藤安弘, 池田洋, 赤上洋一, 梅原徳次, "炭化ケイ素基板研磨のための電界砥粒分布制御研磨に関する研究", 精密工学会誌, Vol.79, No.1(2013)87-92.
- [7] 久住孝幸, 佐藤安弘, 赤上陽一, 梅原徳次, "高効率 SiC 基板研磨のための電界砥粒制御技術の開発", 日本機械学会第 8 回生産加工・工作機械部門後援会講演論文集(2010)145-146.
- [8] 赤上陽一, "交流電界における機能性流体の挙動を用いた表面仕上げ方法の創生に関する研究" 秋田大学学位論文(2001)

第7章 結 論

近年、世界的な情報通信機器の普及ならびに高度化により、電力エネルギーの消費量増大が喫緊の課題となっている。これを解決するため、省エネルギー化に寄与するワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイス及び光デバイスの速やかな普及拡大が望まれている。しかし、現状は高い製造コストや低い生産性が課題となっており、普及には品質を落とさずに高生産性を達成できる製造技術の開発が必須である。

そこで、本研究では、パワーデバイスのベース基板として用いられる SiC 及びサファイア基板の加工プロセスにおいて、従来のダイヤモンドラッピング技術に代替する技術として、低加工ダメージと高い加工効率を両立する機械研磨技術の開発を行った。具体的には、従来のダイヤモンドラッピング工程における金属製定盤を樹脂パッドへと代替し、加工変質層の低減可能性について検討した。さらに本加工法に電界砥粒制御技術を適用し、研磨効率の向上効果について検討を行った。

第1章では、本研究の背景と基板加工プロセスにおけるラップ加工の位置づけ及び従来ラップ技術に関する概要と課題をまとめ、本研究の目的及び意義を明らかにした。

第2章では、従来のダイヤモンドラッピングにおける研磨界面への砥粒の侵入挙動及び摩耗状態等を明らかにするため、高感度 MCCD カメラを用いたその場観察摩擦試験機を構築し、暗視野による観察及び蛍光染色したダイヤモンド砥粒の蛍光発光法 (iFLAT) を用いた粒子挙動の観察可能性について明らかにした。また、本手法を用いたしゅう動実験により、ダイヤモンド砥粒が摩擦面前面部に集積し、徐々に摩擦面内へと侵入する様子を明らかにした。さらにしゅう動開始から、接触する二面間の距離が離れ、約 560 nm まで隙間が大きくなる様子を明らかにした。これより、研磨界面において粗大粒子が侵入する可能性を示した。

第3章では、樹脂パッドによる加工変質層低減の可能性について明らかにするため、加圧下における銅板及び樹脂パッド上の砥粒の振る舞いにつ

いて検討した。初めに白色干渉顕微鏡を用いた銅板及び樹脂パッド上の砥粒観察手法を構築し、銅板及び樹脂パッド上の砥粒状態が評価可能であることを明らかにした。本評価手法を用いて、銅板及び樹脂パッドに対する砥粒の押し込み実験を行い、銅板上におけるダイヤモンド砥粒は、68 kPaの圧力条件下で粒子径の10%程度の深さまで埋め込まれ、半固定砥粒のような状態で保持されていることが示唆された。一方、樹脂パッドにおいては、押し込まれた砥粒が樹脂パッドに一時的に沈み込んだのち、樹脂の弾性回復によって元の高さに復帰していることが示唆された。さらに、しゅう動実験により、銅板上の砥粒には破碎が発生するほどの力が負荷されていることを明らかにした。また、樹脂パッドにおいては、砥粒の破碎は認められず、樹脂の粘弾性変形やパッド上に形成された筋形状による荷重分散により、砥粒の摩滅は抑制されることを示した。

第4章では、樹脂パッドによる研磨加工特性及び加工変質層低減効果を明らかにすることを目的とし、定盤径 ϕ 380mmの研磨装置を用いて、銅定盤及び樹脂パッドによるサファイア基板の研磨特性を比較した。研磨圧力40kPaの条件において、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングにおける研磨レートは、従来のダイヤモンドラッピングにおける研磨レートと比較しておよそ0.28倍に低下するが、その表面粗さは、約0.10倍に低減されることを明らかにした。さらに加工後の基板に対してCMP加工を施し、加工変質層深さを評価した。基板表面に形成される加工変質層深さは、ダイヤモンドポリッシングを適用した場合は1.5 μm であり、従来のダイヤモンドラッピングの条件における深さ9 μm と比較して、約0.16倍に低減することを明らかにし、樹脂パッドを用いた加工による加工変質層低減効果を明らかにした。

第5章では、SiC基板のダイヤモンドラッピング工程における樹脂パッドの適用可能性について検討し、工程単一化の実現可能性についての検討を試みた。具体的には、平均粒子径3及び1 μm のダイヤモンド砥粒を用いて、樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングと従来のダイヤモンドラッピングの研磨レート及び表面品位を比較し、その有効性について検討した。銅定盤を用いたダイヤモンドラッピングにおいては、ダイヤモンド

粒子径を $3\ \mu\text{m}$ から $1\ \mu\text{m}$ に小さくすることで、研磨レートは約 0.25 倍に低下するのに対し、その表面粗さは約 0.84 倍の低減にとどまった。樹脂パッドによるダイヤモンドポリッシングでは、同様に粒子径を $3\ \mu\text{m}$ と $1\ \mu\text{m}$ を比較すると、研磨レートは約 0.42 倍に低下し、表面粗さは約 0.61 倍低減することを明らかにした。ダイヤモンドラッピング工程の総加工時間は樹脂パッド単一工程を採用することで、従来多段工程と比較して、およそ 0.90 倍に低減できることを示し、SiC 基板に対する樹脂パッドを用いたダイヤモンドポリッシングの有効性を示した。

第 6 章では、4 章及び 5 章の結果より、電界砥粒制御技術導入によるダイヤモンドポリッシングの研磨効率向上の可能性について検討した。初めに小型研磨装置を用いた基礎実験により樹脂パッドと多結晶ダイヤモンドを用いた研磨加工における電界効果について検討を行った。樹脂パッドと多結晶ダイヤモンドを用いた条件においても電界による研磨レート向上効果が得られ、その研磨レートは印加周波数 $2\ \text{Hz}$ のとき、無電界時と比較して約 1.89 倍となることを明らかにした。さらに定盤径 $\phi 910\ \text{mm}$ の大型電界研磨装置を構築し、 $\phi 910\ \text{mm}$ の研磨領域における最適な電界印加周波数の検討を行い、周波数 $5.5\ \text{Hz}$ の条件において、最も高い向上効果が得られることを示した。最後に、定盤径 $\phi 910\ \text{mm}$ の大型装置において、電界砥粒制御技術を導入することで、表面粗さは維持したまま、研磨レートは無電界時と比較して、約 2.3 倍に向上し、銅定盤を用いた従来のダイヤモンドラップと比べても約 1.5 倍向上することを明らかにした。また、電界ダイヤモンドポリッシングにより得られた基板の平坦性は GBIR $2.73\ \mu\text{m}$ であり、良好な形状精度が得られることを確認した。

以上のことから、本論文において、樹脂パッドをダイヤモンドラッピング工程に導入することで加工変質層の抑制が可能となり、さらに電界砥粒制御技術を導入することで、生産レベルの装置においても高い研磨効率を得られることを示し、電界ダイヤモンドポリッシングの有効性を明らかにした。本技術はワイドバンドギャップ半導体の製造コスト低減につながる技術であることから、電力エネルギー問題の解決に貢献できると考えられる。

謝 辞

本研究は，秋田大学大学院 理工学研究科 総合理工学専攻の博士課程において行われたものであり，秋田大学大学院 理工学研究科 システムデザイン工学専攻 機械工学コース 村岡幹夫教授には，本研究および大学院入学のきっかけを与えて頂き，また，本研究および論文をまとめるにあたり終始懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

また，秋田大学大学院 理工学研究科 システムデザイン工学専攻 機械工学コース 渋谷嗣教授，奥山栄樹教授，山口誠准教授には，本論文の執筆にあたり，詳細に渡り有意義かつ的確なご指導とご助言をいただきました。ここに，厚く御礼を申し上げます。

秋田県産業技術センター 所長 赤上陽一博士には，研究の道に導いていただき，また，本博士課程を進めるにあたり，終始多大なるサポート，及び数々の貴重なご意見をいただきました。ここに，厚く御礼申し上げます。

また，秋田県産業技術センター 先端加工グループ 主任研究員 久住孝幸博士には本博士課程を進めるにあたって，多大なるご協力と折に触れて励ましの言葉をいただきました。ここに感謝の意を表します。

名古屋大学大学院工学研究科 マイクロ・ナノ機械理工学専攻 マイクロ・ナノ機械科学講座 野老山貴行准教授には，学会誌への研究論文を投稿するにあたり，共著者として多大なるご協力と詳細に渡る有意義かつ的確なご指導をいただきました。深く感謝申し上げます。

また、名古屋大学大学院工学研究科 マイクロ・ナノ機械理工学専攻生産プロセス工学講座梅原研究室 伊神太一さん、嶽野広明さんには研究装置の使用からデータ取得、試験結果の考察など大変協力頂きました。ここに謝意を表します。

本研究は所属する株式会社齊藤光学製作所より機会を与えて頂いたものであります。このような機会を与えて頂き、終始多大なるご協力をいただきました株式会社齊藤光学製作所 代表取締役社長 齊藤伸英氏に深く感謝いたします。

最後に私事ではありますが、妻、子供達にはこの間多くの心配と負担をかけました。本博士課程進学に理解を示し、精神的、物理的なサポートがあったからこそ、本研究が成し得たものと考えます。改めて家族一人一人に心から感謝します。

2019年12月

千葉 翔悟