



磁性流体を利用した GLP (Grinding-like Polishing) の研究 (FFF)*

—シリコンウエハの平面研磨特性—

坂谷勝明** 黒部利次*** 鈴木繁成† 廣崎憲一**

Study on GLP (Grinding-like Polishing) Using Magnetic Fluid (FFF)
—Surface Polishing Characteristics of Si-wafer—

Katsuaki SAKAYA, Toshiji KUROBE, Shigenari SUZUKI and Kenichi HIROSAKI

A new type of field-assisted fine polishing method for brittle materials has been proposed, which is developed for applying to the polishing on NC grinding machine without the vessel for polishing compound. In this method, the non-contact type polishing is realized with fluid grinding wheel which is covered with thick magnetic fluid film holding the abrasive grain. In this report, the surface polishing experiments are conducted on silicon wafers and the polishing characteristics are examined. The following results are obtained: (1)When the clearance between the polisher and the work surface exceeds the definite value, the polishing rate decreases extremely. (2)The use of water based magnetic fluid yields lower polishing rate but smoother surface in comparison with kerosene based magnetic fluid. (3)The surface roughness of polished surface basically depends on grain size and the roughness of the order of nanometers is obtained with fine abrasive grain.

Key words: field-assisted fine polishing, grinding-like polishing, magnetic fluid, silicon wafer, polished depth, AFM, surface roughness

1. 緒 言

最近、情報機器や精密機器が高性能化、高機能化、小型化するのにもなると、それらを構成する硬ぜい性材料部品には、安価で高能率な加工法が求められるようになり、NC研削加工機械による量産化が進められてきている。しかし、一方ではこれらの部品に対して要求される形状精度や表面粗さも一段と厳しくなり、ナノメートルオーダーの加工精度が求められることも多くなっている。また、形状精度や表面粗さなどの幾何学的精度の完全性だけでなく、結晶学的にも完全に近い面を創成することが求められている。

通常、このような硬ぜい性材料部品の加工では、まず研削加工により形状創成を行い、その後に研磨により形状修正と表面粗さの仕上げを行う方法が採られる。現在、硬ぜい性材料の仕上げ加工法として提案、開発されている研磨法の中に、FFF (Field-assisted Fine Finishing) と呼ばれる加工法がある¹⁾。これは電場や磁場などにより微粒粉末砥粒に力を与えてその運動を制御して表面研磨を行う方法で、加工能率などを電磁的に制御することが可能である点や自由曲面の研磨加工にもある程度利用可能である点などから注目されている。このFFF加工の1つに、磁性流体を利用した研磨法がある^{2) 3)}。この研磨法は、磁性流体が磁気に感應する性質と普通の流体と同じ流動性を合わせもつことを利用して、制御可能でファインな流体研磨を実現しようとするものである。

しかし、これまで提案、開発された方法は、研削加工機械と

は別の加工機械を用いて、ポリシ加工を行うことを前提としており、加工能率や形状精度の低下の要因となっている。

本研究は、磁性流体を利用することにより、加工液を溜めるための研磨液槽や加工物の移し変えを必要としない、研削加工型の新しい最終仕上げ研磨法を開発し、研削加工と最終仕上げ研磨加工の一体化をめざすものである。

本報では、提案した磁性流体利用によるGLP (Grinding-like Polishing) について、永久磁石を内蔵した金属製の回転ポリシを有する非接触定切込み型の表面研磨装置を試作し、シリコンウエハの平面研磨実験によりその基本的な研磨特性などを調べた結果から、本方法の可能性について明らかにする。

2. 加工原理

一般に、磁場の作用下でゆっくり動く磁性流体は粘性および圧縮性のない理想流体とみなせるため、次のベルヌーイの式が適用できる⁴⁾。

$$\frac{1}{2} \rho_1 u^2 + \rho_1 g h + p - \int_0^H M dH = \text{一定} \quad (1)$$

ここで、 ρ_1 は磁性流体の密度、 u は磁性流体の速度、 g は重力加速度、 h はある基準点からの高さ、 p は圧力、 M は磁化、 H は磁場を表す。

従来の磁性流体を利用した磁気研磨法は、式(1)で表される磁気力による圧力変化を利用し、砥粒に作用する研磨圧などを制御して加工を行う方法である。

本研究では、この作用を応用することにより一種の流体砥石を形成するものである。すなわち、式(1)の第2項で表される位置エネルギーに相当するエネルギーを第4項の磁気エネルギーにより発生させることにより、磁性流体をポリシ表面に保持する。また、ポリシと磁性流体が回転している状態では第

* 原稿受付 平成7年2月24日

** 正会員 石川県工業試験場 (金沢市戸水町口-1)

*** 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)

+ 金沢大学工学部

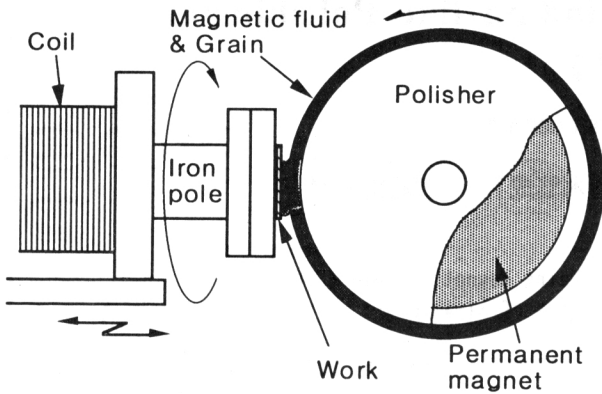


Fig.1 Schematic principle of polishing method

1項の運動エネルギーが生じるため、これに相当する磁気エネルギーを発生させれば、磁性流体をポリシャ表面から飛散させることなく回転を持続できる。本研究で試作した研磨装置では、この流体砥石の形成をポリシャの内部に強力な永久磁石を組み込むことにより実現している。その加工原理を図1に示す。ポリシャ内に組み込まれた永久磁石の磁気力により、砥粒が混入された磁性流体はポリシャ外周部に保持される。また、磁性流体中に混入した砥粒は、磁性流体のもつ粘性や表面張力により流体内部に保持されるため、ポリシャを回転させると、砥粒は磁性流体とともに回転して、砥石の砥粒のように加工面に作用する。このときポリシャは加工面に対して非接触状態にあるため、加工面への垂直方向の力がほとんど作用しない非接触型の流体研磨となる。

さらに、磁性流体に非一様磁場が作用する場合には式(1)から、磁気圧分の圧力差が発生することがわかっている。このような非一様な圧力分布が形成されると、その中にある非磁性体砥粒には次式で表される力Fが作用する⁵⁾。

$$F = \{ (\rho_1 - \rho_0) g - \mu_0 \bar{M} \nabla H \} \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (2)$$

ここで ρ_0 は砥粒の密度、 μ_0 は真空の透磁率、 \bar{M} は砥粒位置における磁性流体の磁化の強さの平均値、 ∇H は砥粒まわりのせまい領域での磁場勾配、 d は砥粒径である。したがって、強い磁場の作用する位置では磁性流体の圧力が高くなるため、磁場の弱い位置に砥粒が集まることになる。したがって、磁場勾配を変えることにより、砥粒の分布する位置を制御することができる。本研究の研磨装置では、加工試料側の回転軸が鉄心となり、その周囲に巻かれたコイルに流れる電流値を変えることにより、加工点付近の磁気勾配を変化させて、電流値によるポリシャ加工面間の砥粒分布の制御を試みている。

3. 実験装置および方法

実験装置の上方からの概観を図2に示す。装置は2つの回転軸から構成され、一方の軸の先端には、外径86mm、軸方向の曲率半径5mmの銅製のポリシャが固定されている。ポリシャの内部にはリング状の永久磁石(Nd-Fe-B製、外径：76mm、内径：42mm、厚さ：4mm、残留磁束密度：1.1T)が組み込まれており、ポリシャ外周の両側のカバーによって、磁性流体が常にポリシャ外周面に吸着するようになっている。もう一方の軸の先端には加工試料を固定するためのワークステージが取り付けられ、軸自体が鉄芯(S55C製、直径：17mm)となって、周囲に巻かれ

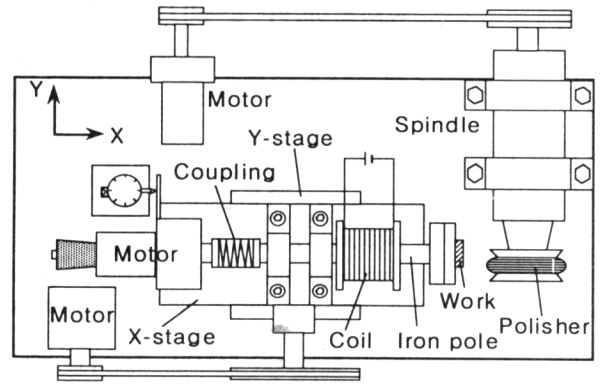


Fig.2 Polishing set-up

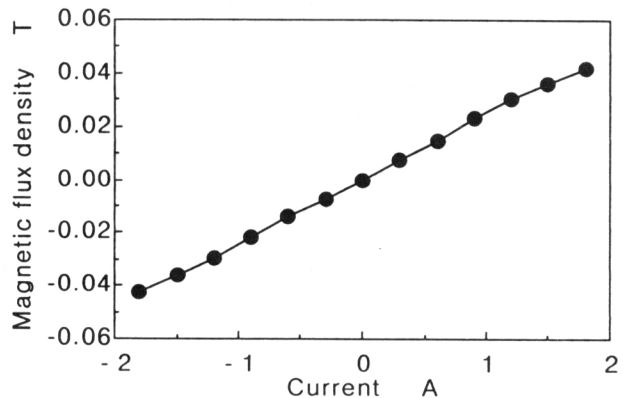


Fig.3 Relation between magnetic flux density and current

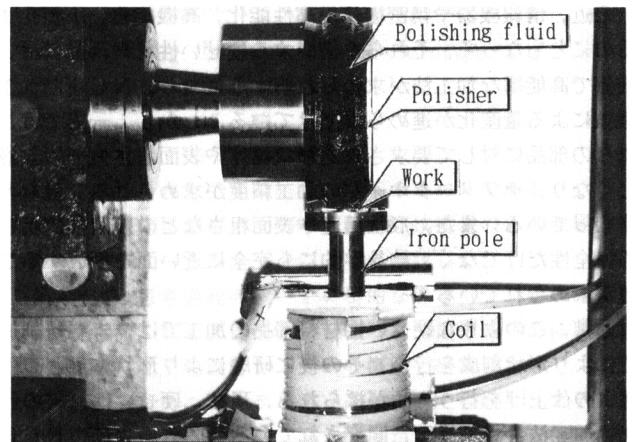


Fig.4 View of polisher with magnetic fluid

たコイル(銅製、直径：0.6mm、巻数：800回)に電流を流すことにより磁化する。ポリシャを取り外した状態でコイル電流を変化させ、ワークステージ上の鉄芯軸方向の磁束密度をホール素子を用いたガウスメータ(欽業電気製)により測定した結果を図3に示す。ワークステージ側の回転軸はXYステージ上に固定され、マイクロメータヘッドにより各方向に移動できるようになっている。ポリシャと加工面間のクリアランスの検出、調整はダイヤルゲージとマイクロメータヘッドにより行い、ポリシャの加工面への接触状態は、ワークステージに取り付けた加速度ピックアップからの信号により確認した。加工液には、水ベースとケロシンベースの2種類の磁性流体(タイホー工業、フェリコロイド、W-40、HC-50)を使用して、 Al_2O_3 砥粒(粒径：0.06, 1, 12.5 μ m)を1.6vol%混入し、1回の研磨ごとに10

Table 1 Characteristics of magnetic fluid

Magnetic fluid	M. F. (A)	M. F. (B)
Solvent	Water	Kerosene
Density(25°C) g/cm ³	1.402	1.390
Viscosity(25°C) Pa·s	0.023	0.016
Saturation magnetization T	0.031	0.038

Table 2 Polishing conditions

Work	Si-wafer(100) 20mm×20mm×0.6mm Float glass 10mm×10mm×1.3mm
Grain	Al ₂ O ₃
Diameter	0.06, 1, 12.5 μm
Concentration	1.6vol%
Magnetic fluid	M. F. (A):Water M. F. (B):Kerosene
Clearance	10-60 μm
Polishing time	10-120min
Current to coil	-1.8-+1.8A
Rotating speed of polisher	234rpm
Rotating speed of work	145rpm

mlずつポリシャ外周面に吸着させた。加工液がポリシャ外周面上に吸着している様子を図4に示す。また、実験に使用した磁性流体の特性を表1に示す。加工試料は、ポリシまたはラップ加工された20mm角のSi単結晶ウエハ((100)面) およびフロートガラスを用いた。Siウエハのポリシ面およびフロートガラス表面はともにRy値で1nm以下の表面粗さになっている。加工条件を表2に示す。

加工実験は、試料回転軸の直線移動を行わずに試料回転中心から半径2.6mmの位置で円形の溝加工を行う溝研磨と、約4.8 μm/sで回転中心から半径1.5~6.5mmの範囲を移動させる面研磨の2種類で行った。

加工した溝の形状測定には触針式表面粗さ計 (Rank Taylor Hobson社製, 触針先端半径2 μm, 荷重1mN) を用い, 表面微細形状測定には触針式超精密表面粗さ測定機 (Rank Taylor Hobson社製, 触針先端0.2 μm角, 荷重0.01mN)およびAFM (Digital Instruments社製)を用いた。また, 加工液粘性係数はストレス制御式レオメーター (Carri-Med社製)により測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 研磨能率への影響

ここでは, Al₂O₃ 砥粒 (粒径1 μm) を使用してSiウエハのポリシ加工面の溝研磨を行い, 溝の最大深さを測定して研磨深さとした。実験は同一条件で3回繰り返して行い, 各条件での研磨深さのばらつきは標準偏差で10%以内であった。

図5は, 水ベースの磁性流体により, コイル電流値1.0Aで, 30分間研磨したときの, ポリシャと加工面間のクリアランスと研磨深さの関係を示す。ただし, クリアランスが50および60

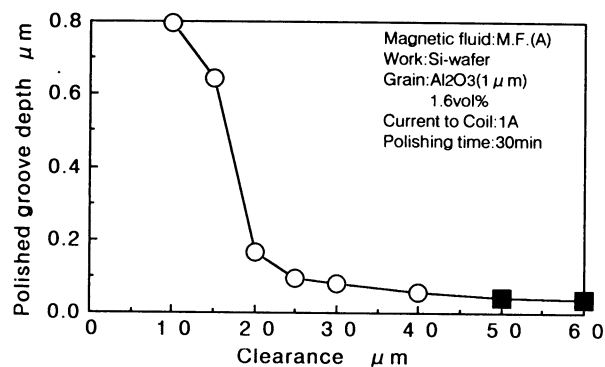


Fig. 5 Relation between polished groove depth and clearance

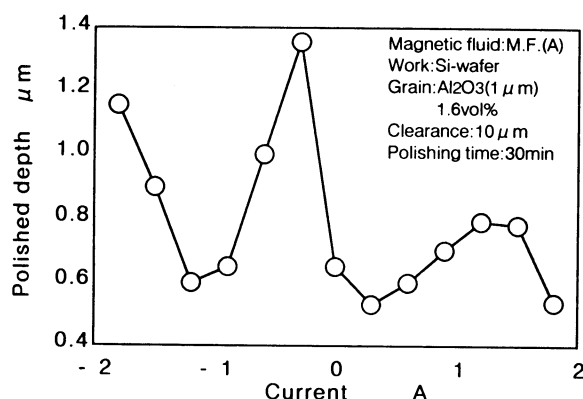


Fig. 6 Influence of current flowing in coil on polished groove depth

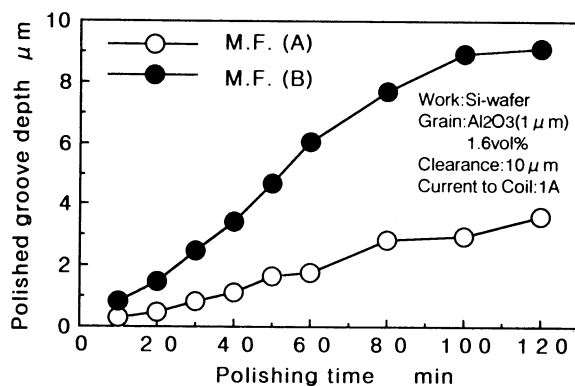


Fig. 7 Change in polished groove depth with polishing time

μm の場合については, 肉眼による加工痕の観察はできるが, 粗さ計による測定では表面うねりとの識別が不可能であったため■印で示した。図から, クリアランスが15 μm を超えると加工能率が極端に減少することがわかる。これは, クリアランスが砥粒径に比べ著しく大きくなると, 加工面上の砥粒の加工面に対する相対速度が小さくなり, 加工作用がほとんど進行しなくなるためと考えられる。

図6は, 水ベース磁性流体により, クリアランス10 μm で30分間研磨したときの, コイル電流と研磨深さの関係を示す。研磨深さが電流値に対して複雑に推移している原因は, 本装置の場合永久磁石と電磁石の間で磁気回路が形成されない構造になっており, 電磁石強度により加工点付近の局所的な磁場分布が複雑に変化し, それにより砥粒の分布する位置や範囲が変わる

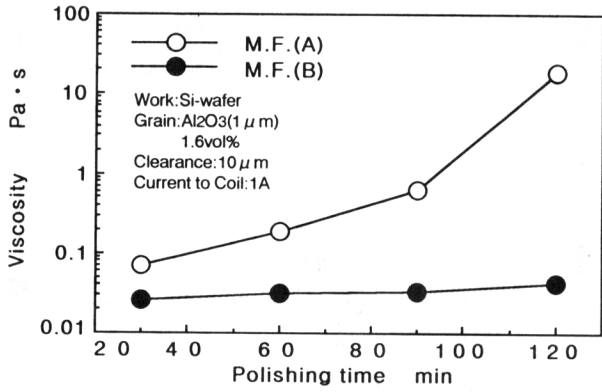


Fig. 8 Change in viscosity of magnetic fluid with machining time

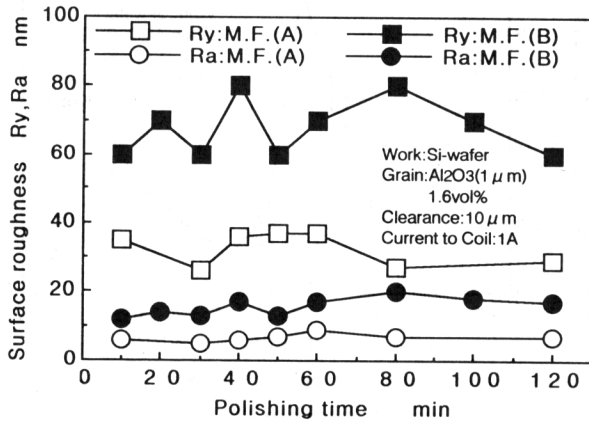


Fig. 9 Change in surface roughness with polishing time

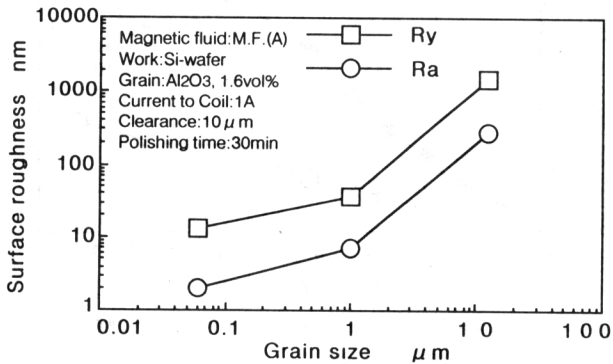
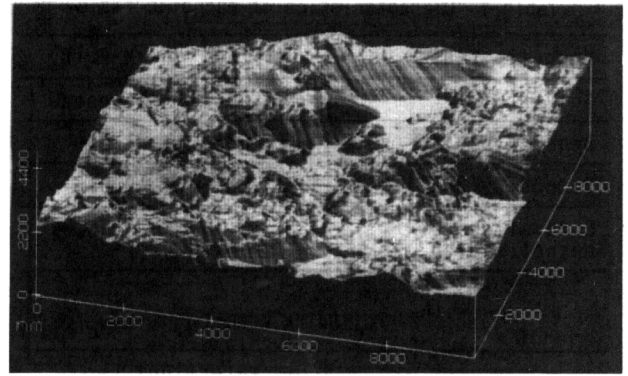


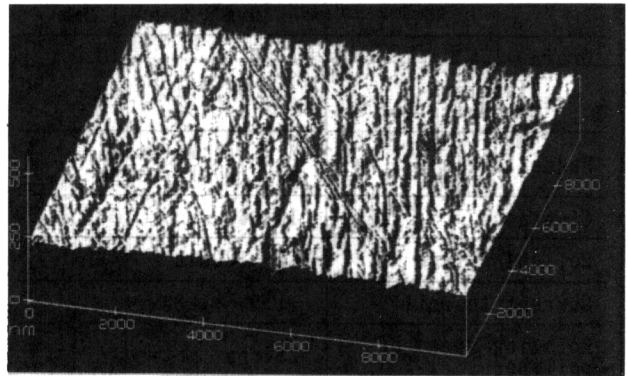
Fig. 10 Relation between surface roughness and grain size

ためと考えられる。したがって、最適加工条件を求めるには、より詳細な実験によりコイル電流と加工量の関係を調べる必要があると思われる。

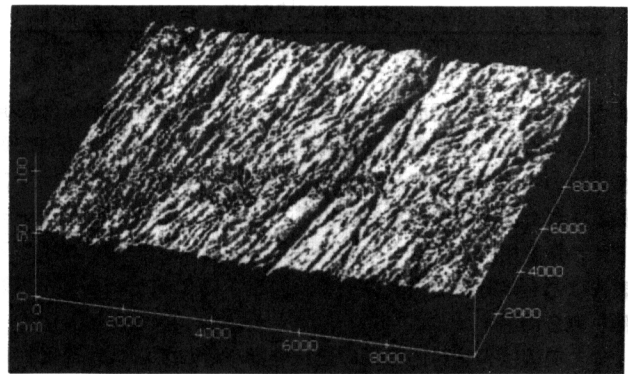
図7は、磁性流体の種類の違いによる研磨特性について、研磨時間と研磨深さの関係を調べた結果である。実験はクリアランス10μm、コイル電流1.0Aで行った。水ベースの磁性流体に比べ、ケロシンベースの磁性流体の方が研磨能率が高くなっている。この原因は、水ベースの磁性流体は溶媒である水が蒸発しやすく、加工時間とともに磁性流体の粘度が増大して、遠心力によるポリシャの半径方向への砥粒の運動が起りにくくなり、加工点への砥粒の供給量が減少するためと考えられる。ま



(a) with Al₂O₃, 12.5 μm



(b) with Al₂O₃, 1 μm



(c) with Al₂O₃, 0.06 μm

Fig. 11 Microtopography of polished surface measured by AFM (float glass)

た、加工量の増加率が徐々に小さくなる傾向にあるのは、破碎等による砥粒の劣化やクリアランスの増大が原因していると考えられ、ケロシンベースの磁性流体の方が減少傾向が大きいのは、クリアランスの増大が早く進行するためと考えられる。

図8は、上述の研磨実験に使用した加工液の20℃における粘度を測定した結果である。ケロシンベースの磁性流体を用いた加工液は、研磨時間が経過しても粘度の増大は小さいが、水ベースの方は加工時間とともに指数関数的に粘度が増大している。このことから、水ベースの磁性流体はケロシンベースに比べ溶媒の蒸発が急速に進行することがわかる。

4.2 表面粗さへの影響

図9は、Siウエハの溝研磨での磁性流体の種類の違いによる表面粗さへの影響を調べた結果である。研磨時間に対する表面粗さの値はほぼ一定値を示しているが、ケロシンベースの磁性流体に比べ、水ベースの磁性流体の方がRa, Ryともに小さくなっている。この原因は、水ベースの磁性流体の方が粘度が高く、

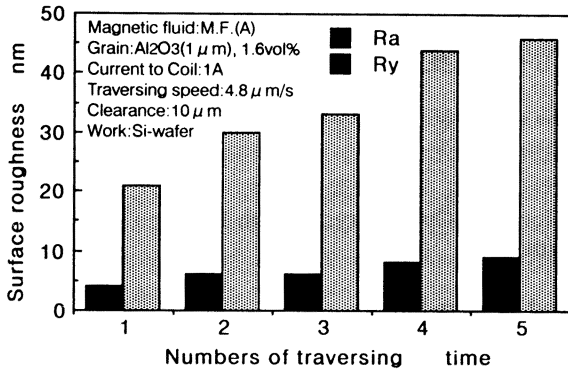


Fig. 12 Change in surface roughness with numbers of traversing of polisher (polished surface)

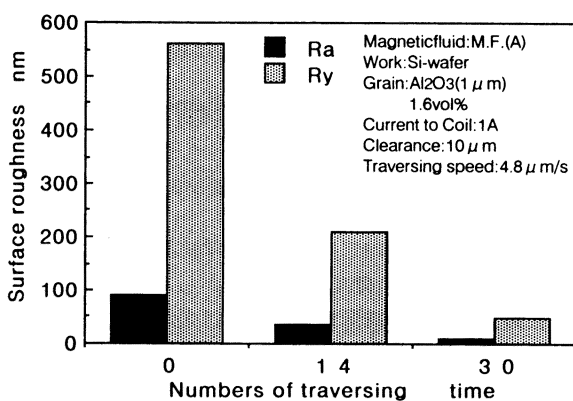


Fig. 13 Change in surface roughness with numbers of traversing of polisher (lapped surface)

遠心力などによる砥粒の加工面に垂直な方向の運動が抑制されるためと考えられる。

図10に、水ベース磁性流体を用いて、3種類の粒径の Al_2O_3 砥粒により、コイル電流値1.0A、クリアランス $10\mu m$ で30分間溝研磨したSiウエハ表面の粗さ測定結果を示す。表面粗さは砥粒径に大きく依存することがわかる。

また、図11は3種類の粒径の砥粒により溝研磨したフロートガラス表面の $10\mu m$ 角の範囲のAFM観察像である。ここでフロートガラスを用いた理由は、Siウエハでは表面吸着層の影響などによりAFMによる観察ができず、また、フロートガラスの場合も表面粗さの値は図10と同様の結果が得られたためである。図において、粒径 $12.5\mu m$ の砥粒で研磨した加工面の状態はへき開したようになっており、目視ではラップ加工した面のように観察される。これは、ポリシャと加工面の間のすき間が砥粒径と同程度になっており、加工点付近に集まる砥粒を介してポリシャの圧力が直接加工面に作用する場合があるためと考えられる。粒径1および $0.06\mu m$ の砥粒の場合は、ポリシャの回転方向にほぼ一様にそろった、ポリシ加工特有の筋状の加工痕が観察でき、粒径 $0.06\mu m$ の砥粒では加工痕の深さはナノメー

タオーダーになっていることが確認できる。

次に、水ベース磁性流体と粒径 $1\mu m$ の Al_2O_3 砥粒を使用して、コイル電流1.0A、クリアランス $10\mu m$ でSiウエハのポリシ面を面研磨した。図12にポリシャのトラバース回数と表面粗さの関係を示す。トラバース回数が増加するにしたがって表面粗さが悪化している原因は長波長成分の増大によるもので、ポリシャの直線移動の真直度誤差により生じたものと考えられる。

以上の実験では、前加工面として理想的な平面に近いポリシ加工面を用いたが、実際の研磨では仕上げ面より粗い面を研磨する。そこで、ケロシンベース磁性流体と粒径 $1\mu m$ の砥粒により、コイル電流1.0A、クリアランス $10\mu m$ でラップ加工された表面の面研磨を行い、ポリシャのトラバース回数にともなう表面粗さの変化を調べた。図13に前加工面および研磨面の表面粗さを示す。ポリシャのトラバース回数が増加するにしたがって表面粗さは小さくなり、トラバース回数30回でポリシ加工面を面研磨した場合と同程度の表面粗さが得られている。

5. 結 言

硬ぜい性材料の最終仕上げ加工に適用するための磁性流体を利用したGLP (Grinding-like Polishing) 加工法を提唱し、その可能性について検討するため、永久磁石を銅製の円盤状ポリシャに内蔵した研磨装置を試作し、シリコンウエハの平面研磨実験を行って、以下のような結論を得た。

- (1) 試作したGLP研磨装置は、所期の機能を有し、磁性流体による流体砥石の形成が可能であることを確認した。
- (2) 加工能率は、ポリシャと加工面間のクリアランスが一定以上になると急激に低下する。
- (3) 加工点付近の磁場強度分布が変わると、加工能率が変化することが確認できた。
- (4) 加工面の表面粗さは、基本的には使用する砥粒径に依存し、微細な砥粒を使用すれば、ナノメートルオーダーの表面粗さを得ることも可能である。
- (5) 水ベースとケロシンベースの磁性流体を比較した場合、水ベースの磁性流体を用いた方が研磨能率は低い、表面粗さが小さくなる傾向にある。

参 考 文 献

- 1) 黒部利次：FFF加工，光技術コンタクト，32，2 (1994) 115.
- 2) T. Kurobe and O. Imanaka：Magnetic Field-Assisted Fine Finishing, Prec. Eng., 6, 3 (1984) 119.
- 3) 黒部利次，示野和弘，今中 治：磁性流体利用の作用砥粒数制御研磨，精密工学会誌，54，8 (1988) 1525.
- 4) 武富 荒，近角聡信：磁性流体—基礎と応用—，日刊工業新聞社，(1988) 209.
- 5) 神山新一：磁性流体入門，産業図書，(1989) 63.