論文

磁性スラリーによる硬ぜい性材料の精密研磨（FFF）*

——磁場可変の効果——

黒部利次**　山下勝久***　坂谷勝明†

Development of Flexible Polishing Method Using Magnetic Slurry
— Effect of Movable Parmanent Magnet on Polishing Characteristics —

Toshiji KUROBE, Katsuhisa YAMASHITA and Katsuaki SAKAYA

Magnetic field-assisted fine polishing method has been proposed, which uses a magnetic slurry mixed non-ferrous abrasives into a magnetic fluid. Polishing machine has newly been developed which is consisted both of copper rotary disc set a strong permanent magnet and a rotary shaft set similar one, it is mounted a specimen to be polished. Magnetic field strength controlled by moving their magnets is responsible for yielding superior surface quality. It is found that polishing machine has high performance finishing ability and the usage of a variety of magnetic fluid is proposed versatile polishing characteristics. Experiments show that kerosene based magnetic fluid has very high polishing performance compared with water based one. The usage of coarse grain gives rise to increase the surface roughnes, and larger clearance between specimen and copper rotary disc lowers finishing rate of wafer in kerosene based magnetic fluid especially. Movement of permanent magnet in copper rotary disc is very effective for finishing of wafer.

Key words : magnetic slurry, strong parmanent magnet, silicon wafer, polishing characteristic

1．緒　言

情報機器や精密機器が高性能化，小型化するに伴って，それに搭載されている電子・光学部品の加工精度に対する要求が一段と厳しくなってきている．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．電磁気的・光学的機能を有するこれらの機能性素子は，一般に硬ぜい性材料である場合が多い．

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ている．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)[1] と呼ばれる加工法がある．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気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応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．

前報[4] では，磁性流体を利用したＧＬＰ(Grinding-Like Polishing) 加工法について，その加工原理と若干の実験結果について報告した．しかし，①加工物側磁石の強度がポリシャ側磁石の強度に比べ非常に小さく，その影響が明確に現れない，②ポリシャ側磁石による磁場分布を変えることができない，などの課題が残されている．そこで，加工物側磁石の強度をポリシャ側磁石の強度と同程度にし，ポリシャ側磁石を可動式にした研磨装置を設計・製作し直し，シリコンウエハについて実験的検討を行った．

2．加　工　原　理

本加工法は，磁性流体を利用した比重差選別法に着想を得て開発したものである．以下にその加工原理を簡潔に記す．

図１に示す容器には，磁性流体中に砥粒を懸濁させた機能性流体（磁性スラリーと名称）が入れられている．容器と砥粒はいずれも非磁性材である．容器下部には電磁石が取り付けられている．いま，電磁石のコイルに電流を流すと磁性流体は電磁石に引きつけられ，磁性流体の見かけの比重が増加することになる．このため，磁性流体中に懸濁している砥粒には，次式で表される力Fが作用する[5]．

$$F=\{(\rho_l-\rho_k)\ g-\mu_0 M\nabla H\}\ \frac{1}{6}\pi d^3 \qquad (1)$$

ここで，ρ_l，ρ_kはそれぞれ磁性流体と砥粒の密度，μ_0 は真空中の透磁率，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，gは重力加速度である．式(1) から，砥粒は磁場の弱

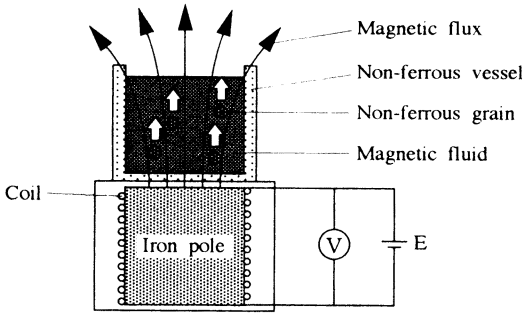


Fig.1 Principle of grain exclusion

* 原稿受付　平成８年１１月１１日
** 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
† 正会員　石川県工業試験場（金沢市戸水町ロ－１）

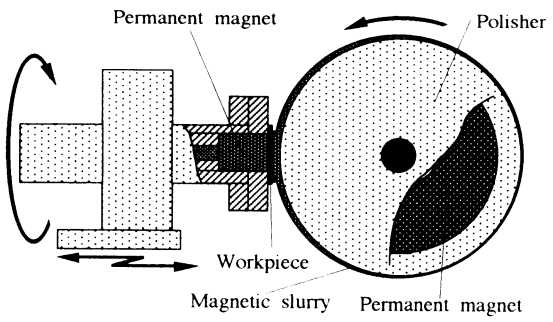


Fig.2 Principle of polishing

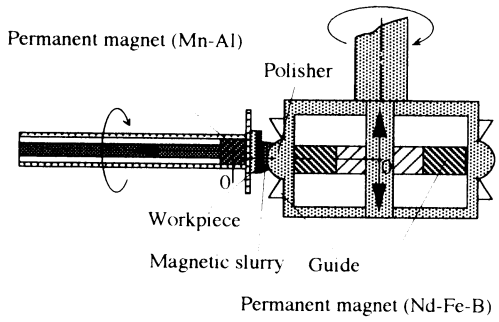


Fig.3 Schematic view of polishing setup

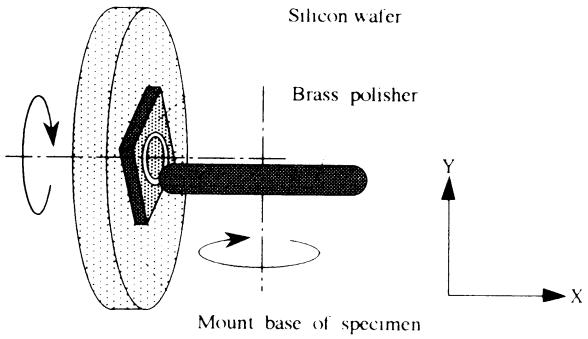
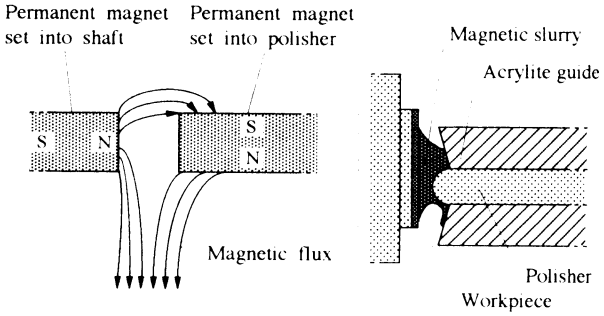


Fig.4 Polishing method



(a) Magnetic field (b) Suspended mode of magnetic slurry

Fig.5 Configuration of magnetic field and suspended mode of magnetic slurry

い方（上方）へと排斥される．

加工原理を図２に示す．図１に示す電磁石を円盤状の永久磁石に置き換え，それを銅製のポリシャ内に包含させ加工工具を形成する．工具は回転軸（紙面に垂直な方向）に固定され任意の速度で駆動される．実験に際し，所定量の磁性スラリーを回転工具外周面に注ぐ．スラリーは重力の作用を受けるが磁石の吸引力が強いため流れ落ちることはない．被加工物は磁性流体に対置して配置され，研磨作用が営まれる．

3．実　験　方　法

3.1　実験装置

図３に，新しく開発した磁場可変型磁気研磨装置の概略図を示す．図３は装置を上方から見たものである．装置は，回転工具ポリシャと被研磨試料（以後，加工物と称す）を貼付した回転軸の２つの構成要素から成っている．回転工具ポリシャ（以後，ポリシャと称す）は非磁性の黄銅で作製されており，その内部にはネオジ（Nd-Fe-B）製の永久磁石が組み込まれている．ポリシャ内部に装着した永久磁石は，回転軸に沿って移動可能な構造となっている．磁石を動かすことによって磁場の強さ及び磁気勾配を変化させる．

加工物はホルダに貼付して回転軸に取り付けられる．回転軸は中空のパイプであり非磁性材で作製されている．回転軸にはマンガン・アルミニウム（Mn-Al）製の永久磁石が組み込まれており，それは中心軸（心棒）に沿って動かせる構造となっている．それによって磁場の強さを任意の値に制御する．回転軸はポリシャに対して左側に配置される．回転軸はXテーブル上に載置されている．ポリシャと加工物との間のすきま（クリアランス）は，マイクロメータヘッドを用いてXテーブルを左右に動かすことによって調整される．図４に加工の様子を示す．

ここで，磁性流体の磁石への付着状態について考える．図５(a)に，ポリシャに搭載の永久磁石のＮＳ極と，試料側の回転軸に内包の磁石のＮＳ極の位置関係を示す．磁性流体は双方の磁極から力を受けるので，磁性流体の付着状態は図５(b)に示すようなものになると考えられる．しかし，加工時には磁性流体に遠心力が働くので図５(b)に示す状態から幾分変化した様態になる．磁性流体中に懸濁している非磁性砥粒は，これら両磁石から力を受けて最も弱い磁場の位置に滞留するものと考えられる．実験は，加工物側の回転軸に内包の磁石及びポリシャに内蔵された磁石の位置を変えることによって行った．

Table 1　Magnetic fluid

Magnetic fluid	W-40	HC-50	PA-40	LS-40
Solvent	Water	Kerosene	Poly-α-olefin	Icosil naphthalene
Viscosity mPa·s (25℃)	22±5	25±7	190±50	450±150
Density g/cm^3 (25℃)	1.40	1.39	1.24	1.32
Saturation magnetization T	0.038	0.048	0.029	0.031

3.2　実験条件

表１に，実験に使用した磁性流体（タイホー工業製）とその粘度を示す．表１から，HC-50とW-40 の粘度はほぼ同じ値であり，一方，PA-40とLS-40の値は前２者に比して極めて高い値であることがわかる．４種類の磁性流体は溶媒がそれぞれ異なる．実験は，研磨の研究によく使用される水ベース（W-40）とケロシンベース（HC-50）の磁性流体について行った．ポリアルファオレフィンベース（PA-40）とアイコシルナフタリンベース（LS-40）については比較実験のために使用した．

加工条件を表２に示す．加工物は，厚さ0.6mm のシリコン単結晶ウエハでその面方位は(100)である．実験に際し，6インチウエハからダイヤモンドスクライバを用いて20mm角の試験片を

Table 2 Experimental condition

Workpiece	Siwafer(100) 20mm×20mm×0.6mm
Grain Diameter Concentration	Al_2O_3 0.06, 0.3, 1.0, 3.0μm 1, 2vol%
Magnetic fluid	W-40 HC-50 PA-40 LS-40
Clearance	10-30μm
Polishing time	30min
Permanent magnet Polisher side Work side	 Nd-Fe-B φ76×φ42×6mm Mn-Al φ12×14mm
Revolution number of polisher	40-116rpm
Revolution number of work	70rpm
Radius of polishing track	2.5mm

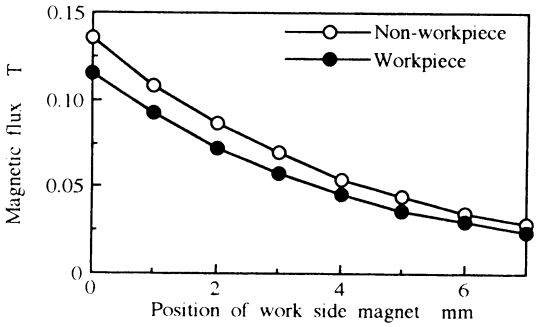


Fig.6 Relationship between position of work side magnet and magnetic flux

切り出し十分洗浄した．研磨用砥粒としてアルミナ（Al_2O_3）を用い，砥粒粒度を，0.06，0.3，1，3μmと微粒から粗粒まで4種類変えて実験を行った．

加工実験は，図4に示すように試料の回転中心から半径 2.5mmの位置で，円形の溝加工が行える形で行った．本研究は，磁場可変型磁気研磨法の有効性を確かめることを主目的としているので，あえて面研磨は行わなかった．

加工した溝の形状測定には触針式表面粗さ計(Taylor Hobson社製，触針先端半径2μm，荷重1mN）を用い，また，表面微細形状測定には触針式超精密表面粗さ測定機（Taylor Hobson 社製，触針先端0.2μm角，荷重0.01mN）を用いた．

4．実験結果及び考察

4.1 磁束密度の測定

磁束密度の測定は，ホール素子を用いたガウスメータ（歓業電気製）により行った．磁束密度は，ホール素子を試料面上に置いて測定した．測定の基準値としては，試料裏面に磁石を置いた所の値とし，その位置から遠ざかる方向に磁石を動かして測定を行った．図6に磁束密度の測定結果を示す．図6から，磁束密度は磁石の位置が試料から離れるにつれてなだらかに減少することがわかる．試料がある場合は無い場合に比して磁束密度は小さい．両者の値の差は磁石の位置が遠く離れるにつれて次第に小さくなっていく．ポリシャ面上での磁束密度の測定は，形状が複雑なため困難であったが約0.03Tであった．

4.2 加工量の測定

図7に加工量の測定結果を示す．図7は研磨時間と研磨溝深さの関係を示している．加工量は研磨深さで評価した．実験は，ケロシンベースと水ベースの2種類の磁性流体を用いて行った．砥粒はアルミナ砥粒（粒径1μm:1vol%）を使用し，クリアランスを10μm，研磨半径を2.5mm，ポリシャ回転速度を116rpmに設定して実験を行った．その際，加工物側の磁石を試料裏面に接して置いた．以後の実験は特に断らない限り同一の条件の下で行った．図7から，研磨時間が増すにつれていずれの磁性流体の場合も研磨溝深さが次第に増加することがわかる．しかし，ケロシンベースの場合は特に増加の度合いが著しい．また，加工量の絶対値もケロシンベースの方が極めて大きい．このように，ケロシンベースの磁性流体の場合に加工溝深さが大きくなったのは，次の理由によるものと思われる．

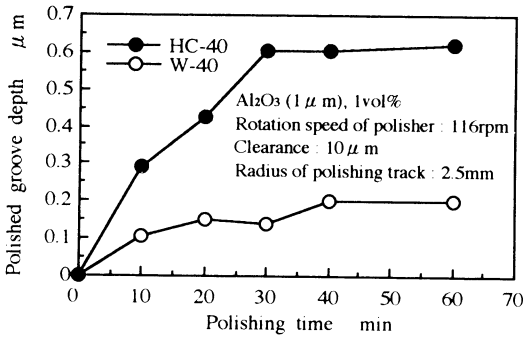


Fig.7 Relationship between polishing time and polished groove depth

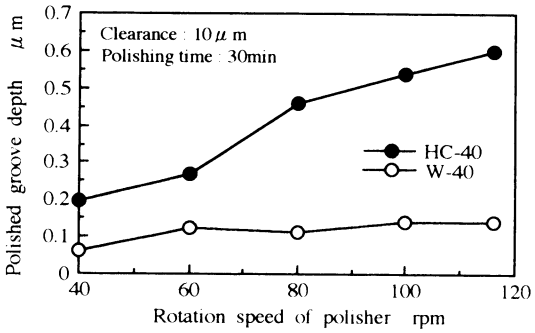


Fig.8 Relationship rotation speed of polisher and polished groove depth

アルミナ砥粒（1μm）を容器に所定量（約0.2g）入れ，それに磁性流体を注ぐと砥粒は一旦浮き上がる．しかし，その後徐々に沈降していく．この沈降し始める時間が，ケロシンベースの磁性流体と水ベースの磁性流体では異なる．ケロシンベースの磁性流体の方が速く沈降する．大体，5～10秒の差がある．これは，ケロシンベースの磁性流体の方が水ベースの磁性流体よりもアルミナ砥粒に対する親和性が大きいことを物語っている．このことから，砥粒は水ベースよりもケロシンベースの磁性流体中で動きやすいものと思われる．このため砥粒の研磨作用は，水ベースの磁性流体よりもスムーズに行われると推察され，加工量も増加したものと思われる．

図8に，ポリシャの回転速度と加工溝深さの関係を示す．実験は，研磨時間を30min，加工物側回転軸の回転数を70rpmとして行った．図8から，水ベースの場合にはポリシャの回転速度が増加しても加工量はほとんど増えない様子がわかる．一方，ケロシンベースの場合にはポリシャの回転速度が増すにつれて次第に加工溝深さが増加する．これは，砥粒の磁性流体に対する親和性が影響して，ケロシンベースの場合には加工物表面へ砥粒が集まりやすくなる傾向にあるためと考えられる．

図9に砥粒径と加工溝深さの関係を示す．図9から，砥粒径が 0.3μm 以上になると急に加工溝深さが増大することがわかる．増大の程度はケロシンベースの方が著しく大きい．これは

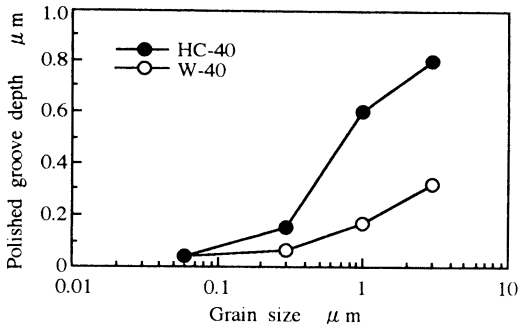


Fig.9 Relationship between grain size and polished groove depth

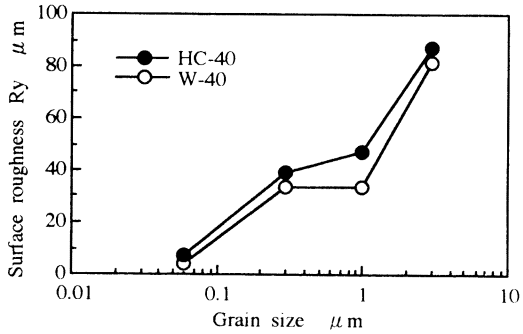


Fig.10 Relationship between grain size and surface roughness

次の理由によるものと思われる．砥粒径が大きくなると，加工工具の回転に伴って生じる遠心力も大きくなり，砥粒は試料表面により集まりやすくなる．このため，研磨を営む砥粒数も増加し，加工溝深さが大きくなったものと考えられる．ケロシンベースの方が加工溝深さが大きいのは，砥粒に対する親和性が影響し，水ベースの場合よりも砥粒が加工面へ集まりやすくなったためと推察される．

図10に砥粒径と表面粗さの関係を示す．図10から，砥粒径が増すにつれて表面粗さが次第に増加する様子がわかる．ケロシンベースと水ベースでは表面粗さに大きな違いは見られない．これは，砥粒が同一の大きさであると，溶媒の磁性流体がどのような種類であっても，研磨を営む砥粒の作用領域は同じであり，ただ砥粒を保持する状態が流体によって違うだけであると考えられる．表面粗さに大きな違いが見られなかったのはこれが原因と思われる．

図11にクリアランスと加工溝深さの関係を示す．水ベースの場合，クリアランスが増すとわずかではあるが溝深さが減少する．しかし，ケロシンベースの場合にはクリアランスが 10μm から 20μmへと増加するにつれて，加工溝深さの値が急激に減少することがわかる．このように，水ベースとケロシンベースで著しい違いが見られるのは，次の理由によると考えられる．

加工工具のポリシャの回転速度が一定であると仮定すると，加工物とポリシャの間のクリアランスが狭くなるとそこを流れる磁性流体の流速は大きくなる．一方，クリアランスが広くなると逆に流速は小さくなる．加工量は流体の流速に比例すると考えられており，ケロシンベースの場合，クリアランスが増すにつれて加工溝深さの値が減少したのはこれが原因と思われる．水ベースの場合，あまり大きな変化が見られなかったのは，加工物表面に滞留する砥粒数がケロシンベースの場合に比して極めて少ないことが影響していると考えられる．

次に，磁性流体の粘性が加工にどのような影響を及ぼすか検討した．粘度の異なる４種類の磁性流体（HC-50, W-40, PA-40, LS-40）を用いて実験を行った．実験結果を図12に示す．図12から，HC-50, PA-40, LS-40, W-40 の順に溝深さが小さくなる様子がわかる．磁性流体の粘度は表１に示すように，LS-40：450, PA-40：190, W-40：25, HC-50：22mPa･s となっており，加工量と粘度との間に必ずしもに相関関係があるとは言えないようである．しかし，水ベース（W-40）の結果を除外すれば，粘度と加工量間に相関関係は認められる．水ベースの磁性流体が，何か特異な性質を持った流体であるのかどうかは今のところわからない．

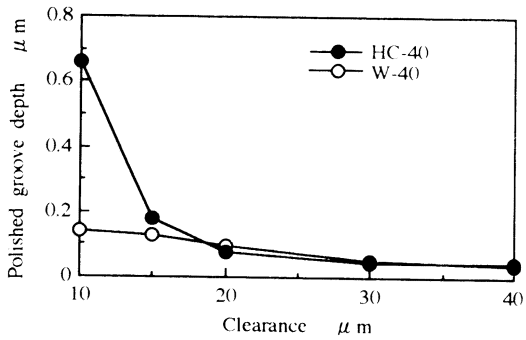


Fig.11 Relationship between clearance and polished groove depth

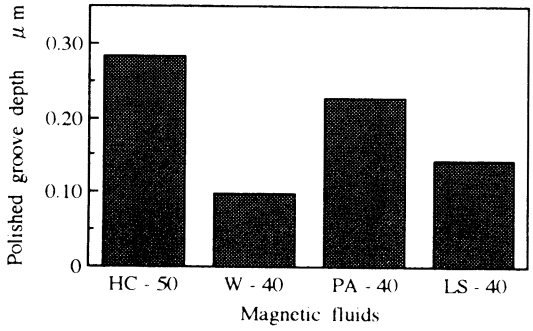


Fig.12 Relationship between magnetic fluid and polished groove depth

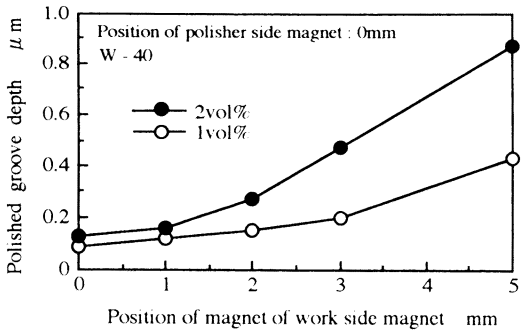


Fig.13 Relationship between position of work side magnet and polished groove depth

しかし，水ベース以外の磁性流体は砥粒に対する親和性が良く，砥粒に付着する磁性流体のフェライト微粉末の量も多くなると思われる．そのため，磁場が強い方に砥粒が引きつけられやすいといった現象も惹起する．一方，水ベースの場合はそれとは逆に砥粒に対する親和性が小さいため，他の磁性流体の場合のような現象は現れないと考えられる．このことが原因して図12に示すような結果が得られたものと推察される．

図13に，砥粒濃度を1vol%, 2vol%と変化させた場合の実験結果を示す．図13から，磁石の位置が試料裏面から遠ざかるにつれて加工溝深さは次第に増加することがわかる．砥粒濃度が

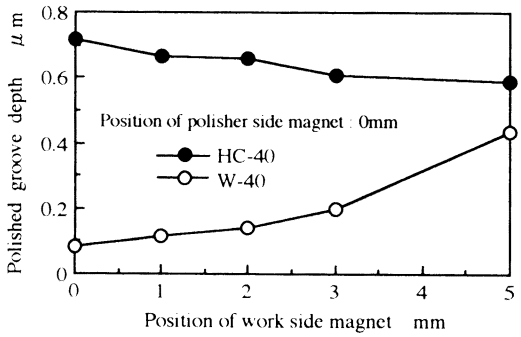


Fig.14 Relationship between position of work side magnet and polished groove depth

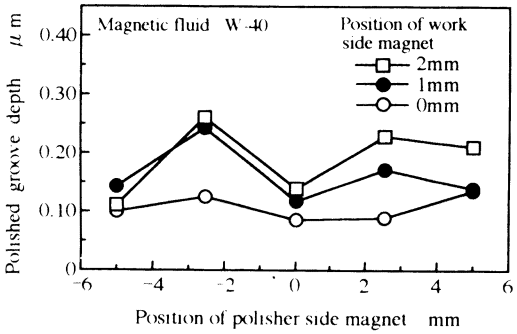


Fig.15 Relationship between position of polisher side magnet and polished groove depth

2vol% の場合のほうが増加の度合いが大きい．磁石の位置が遠くなるにつれて砥粒は磁場の弱い試料面側へと集まる（排出される）ようになり，研磨に関与する砥粒数も増えると予想される．砥粒濃度が 2vol%と多い場合には，研磨に関与する砥粒数も多くなり，それだけ増加の度合いも大きくなったものと考えられる．

図14に，加工物側の磁石の位置を変化させた場合の加工溝深さの測定結果を示す．図14から，水ベースの場合には磁石の位置が遠ざかるにつれて加工溝深さが次第に増えていく様子が知れる．一方，ケロシンベースの場合は逆に加工溝深さが徐々に減少していく．

水ベースの磁性流体は，油ベースの磁性流体に比べて砥粒に対する親和性が良くないので，砥粒表面に付着するフェライト微粒子の量も少なくなると思われる．このため，砥粒がポリシャ側の磁石に引き付けられる力も弱くなる．このため，加工物表面に滞留する砥粒数が多くなり加工量が多くなったものと考えられる．一方，油ベース磁性流体の場合には，砥粒との親和性が良いのでフェライト粒子が多く砥粒表面に付着し，ポリシャ側磁石に引き付けられる力も大きくなる．このため，加工物表面に集まる砥粒数は，加工物側の磁石が遠ざかるにつれて次第に減少していくことが予想される．図14に見られる現象は，これらのことが原因して生じたものと考えられる．

次に，ポリシャ側の磁石を 0mmの位置に固定し，加工物側の磁石を中心位置から前後にずらした場合の実験結果について述べる．図15に実験結果を示す．図15から，磁石の位置を，中央の位置（0mm）から±2mmの位置までずらしていくと，研磨溝深さが次第に増加することがわかる．しかし，それ以上の距離に磁石を離すと逆に減少する．図15から，増加・減少のパターンは 0mmの中央位置に関して左右対称な形になっていることがわかる．しかし，仔細に見ると幾分異なってもいる．図5(a)に示すように，NS極に対してどの方向に移動したかが影響して

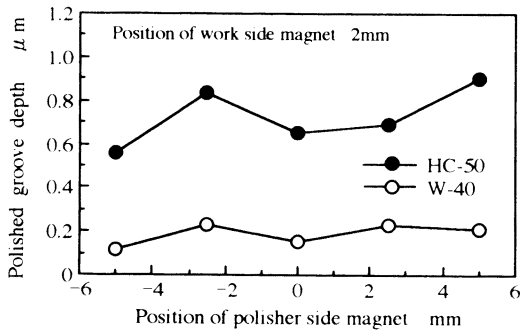


Fig.16 Relationship between position of polisher side magnet and polished groove depth

いるものと思われる．

また，図15から加工物側磁石の位置が 0，1，2mmとその値が増えるにつれて，溝深さが次第に増加することがわかる．これは，加工物側の磁石が基準位置（0mm）から離れるにつれて，弱い磁場の部位が加工物側に近寄ることが原因していると思われる．砥粒は磁場の弱い所に排除されるので，加工物面に集まる作用砥粒数も多くなったものと考えられる．

次に，ケロシンベースの磁性流体についても水ベースの場合と同様の実験を行った．実験結果を図16に示す．図16から，ケロシンベースの加工溝深さの変化様態は，水ベースと同様の様態を示すことがわかる．しかし，加工溝深さの値はケロシンベースの方が水ベースよりもかなり大きい．これは，砥粒の各磁性流体に対する親和性が影響しているものと考えられる．

5．結　　論

磁性流体中に非磁性砥粒を懸濁させた磁性スラリーを用いて，硬ぜい性材料の研磨を行うため，新たに磁場可変型研磨装置を設計・製作し，シリコンウエハの平面研磨実験を行った．その結果，以下のような結論が得られた．

(1) 磁場可変型研磨装置は所期の性能を有することを確認した．本研磨法は，一種の流体砥石によるフレキシブルな研磨法であるといえる．

(2) ポリシャと加工物との間のクリアランス）が大きくなると，ケロシンベースの磁性流体の場合，研磨溝深さは急激に減少する．

(3) 研磨溝深さは，ケロシンベース，ポリアルファオレフィンベース，アイコシルナフタリンベース，水ベースの磁性流体の順に小さくなる．

(4) ポリシャ側の磁石の位置をずらすことも研磨に効果がある．しかし，限度を越えてずらすと逆効果となる．

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, 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) 坂谷勝明，黒部利次，鈴木繁成，広崎憲一：磁性流体を利用したＧＬＰ(Grinding-Like Polishing)の研究（ＦＦＦ），精密工学会誌，61，11 (1995) 1555.

5) 神山新一：磁性流体入門，産業図書，(1989) 63.