

磁気研磨用砥粒の新製造技術とその研磨特性

Development of Magnetic Abrasives and It's Finishing Characteristics

安 斎 正 博*・須 藤 亨*・中 川 威 雄**

Masahiro ANZAI, Toru SUDO and Takeo NAKAGAWA

型技術は工業を支えている基盤産業の一つであり我国の機械工業の将来を担っている。最近ではCAD/CAMやNC工作機械の普及に伴い金型製作工程の多くが機械化されている。この中にあって金型の最終仕上げ工程いわゆる金型みがきは機械化がほかに比して極端に遅れている。人手不足も深刻な昨今では、金型みがきの自動化・無人化は早急の課題である。著者らはこの課題を解決する一つの方法として磁気研磨法による金型みがきの自動化に取り組んでいる。ここでは当研究室で開発された磁気研磨用砥粒とその研磨特性について解説する。

1. はじめに

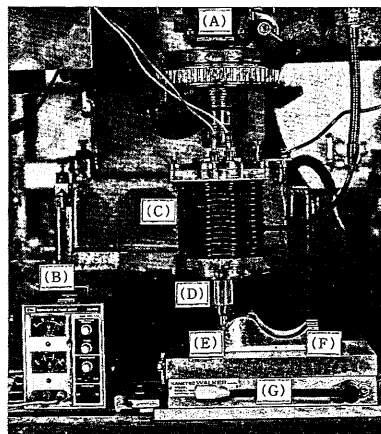
型技術は電気機器や自動車などの工業を支えている基盤産業の一つで、機械工業の将来を担っていると言っても過言ではない。我々の身の回りにある工業製品は金型の善し悪しによって随分と変わってくる。この金型は一品生産であり、これまでは町工場のような零細企業において金型熟練工なる人達によって作られてきた。しかし、最近の電気機器や自動車などの需要構造の変化（頻繁に行われるモデルチェンジや製品需要の多様化）に対応してその生産方式が大きく変化してきている。それは、従来のならい工作機械、汎用放電加工機とその手仕上加工による技能生産形式から数値制御とコンピュータを駆使した高度装置生産形式への変換である。このように高度に機械化、自動化されてきた金型生産工程の中で出遅れている分野がある。それが平滑加工、鏡面仕上加工などの仕上加工あるいは磨き加工と呼ばれる分野で、通常の機械加工部品に比して手仕上げが大きな比重を占める特異な分野である。手作業で鏡面に仕上げていく過程はきわめて熟練を要する作業で、この作業工程は人間の感に頼るところが非常に大きい。特に触感や視感のフィードバックによって磨いてゆく工程を機械化によって無人化するのは非常に困難であるが、最近磨き専用機もいくつかでてきている^{1)~3)}。また、新卒者の製造業離れが著しい昨今では、特に3K業種の典型的な金型産業では人材の確保が困難で金型のエキスパートを育成するのもままならず、早急に自動化、無人化が必要な分野でもある。

このような背景から、東大生研中川研究室では、1989年度から磁気を利用した研磨（磁気研磨）法による金型

磨きの自動化について検討している。この研究の過程で多くの研磨用砥粒と新たな研磨法を開発してきた。ここでは、磁気研磨法と新たに開発した研磨用砥粒の研磨特性と実際に3次元形状を研磨した際の結果と磁気研磨法のそれ以外の応用例について詳解する。

2. 磁気研磨法

磁気研磨法についてはソ連、ブルガリヤ⁴⁾における研究や特許があるが、我国には昭和56年に東洋研磨材工業(株)によって導入された技術である。基本的には磁石と磁性砥粒（磁石に吸引されかつワークを研磨することができる粉体）とこれを回転させて周速を付与する工作機械（フライス盤、旋盤など）から構成されている。図1に当



(A): NC milling machine (B): D.C. electric source
(C): Coil (D): Steel rod (E): Magnetic abrasive
(F): Workpiece (G): Magnet chuck

Fig. 1 External appearance of magnetic finishing apparatus

*東京大学生産技術研究所 第2部

**東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

研究室で使用している磁気研磨装置の外観を示す。磁石は $\phi 1$ mmの樹脂被覆銅線を3500巻したもので、コイル中の鉄芯 (S45C) が回転するようになっており、ワークは固定してある。研磨工具である鉄芯をNCフライス盤やマシニングセンタにセットすることによって精度良く移動できる利点があり、複雑形状の研磨も可能となる。逆にワークを回転させて、工具を固定する方法⁵⁾もあるが、これだとワークは円柱形状からそれと類似の形状に限定される。図1中の鉄芯とワーク間には数mmの間隙(ギャップ)が許されており、この間隙に磁性砥粒が充填される。砥粒は磁化されて鉄芯先端からワークへとブラシ状に整列する。この際ワークが鉄などの強磁性体の場合、ワーク自身も磁化されて磁石となって砥粒を吸引する。これが研磨の加工圧となってワークは研磨される。数mmのギャップがあるので表面に多少の凹凸があっても砥粒がこの形状に追従して形を変えて研磨することができる。したがって、ワークが自由曲面であってもある程度ラフな制御で研磨できるという利点があり、多少複雑な形状の金型でも研磨が可能である。

3. 磁気研磨用砥粒の新製造技術

磁性砥粒は磁化されて磁石に吸引され、かつワークを研磨する能力を兼ね備えたものでなければならない。したがって、基本的には強磁性体と研磨材の複合材でなければならない。実際には、鉄と Al_2O_3 をホットプレスしたものを粉碎したもの⁶⁾、あるいは化学的に強磁性体と Al_2O_3 の複合体を作るものや強磁性体にダイヤモンド砥粒をコーティングした砥粒などが作られている⁷⁾。しかし、これらの砥粒では寿命が短いのが問題である⁸⁾。短寿命はマトリックス(ほとんどは鉄マトリックス)と研磨材との界面が良好に形成されていないためで、その場合、

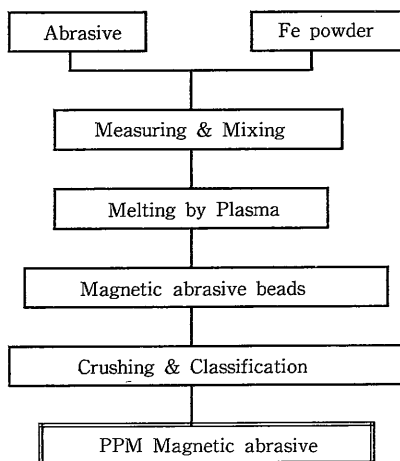


Fig. 2 Fabrication process of magnetic abrasive using PPM

コーティング層は容易にはく離するであろうし、焼結体では容易に研磨材が脱落することが推察される。したがって、長寿命の磁性砥粒は研磨材と鉄マトリックス間の良好な界面が生成するような製造技術が必要である。

3.1 プラズマ粉末溶融法による砥粒の製造

長寿命の磁性砥粒を得るには、鉄をマトリックスとして研磨材を均一に分散した界面が良好な複合材を作製すれば良い。著者らはプラズマ粉末溶融法によって金属-セラミックス複合材の開発研究を行ってきたが^{9)~13)}、NbC-Fe系複合材の作製において鉄マトリックス中にNbCが均一に分散したマトリックス単体よりも高強度の複合材を得ることができた。これは磁性砥粒の具備すべき条件と合致しており、ここからプラズマ粉末溶融法による磁性砥粒作製の詳細な検討が開始された。

図2にプラズマ粉末溶融法による砥粒作製工程を示す。ホッパーに所望の混合比の鉄粉と研磨材の混合粉を供給する。ホッパーから供給された混合粉はプラズマアーク中で落下中に溶融し、これを随時積層して芋虫状のビードを得る。それを機械的に粉碎した後分級して磁性砥粒が作製される。この方法によって磁性砥粒を作製する場合、複合化する研磨材とし Al_2O_3 、cBN、 Cr_3C_2 、ダイヤモンド、NbC、SiC、WCなどを検討した結果、NbCが鉄と密度差がほとんどないため均一に分散することができ、プラズマアークによって鉄が溶融しているために界面性状の良好な磁性砥粒が作製できた¹⁴⁾。

図3にプラズマ粉末溶融法により作製したNbC-Fe系磁性砥粒を用いて図中の条件で研磨した際の研磨量と研磨時間の関係を示す。研磨時間の増大に伴い砥粒の研磨効率は若干低下しているが、この磁性砥粒は数時間の研磨に耐えることができる。また、この砥粒を用いてS55C材を研磨した場合、研磨前 $R_{max}13\mu m$ 、 $R_a2.4\mu m$ が研磨後 $R_{max}0.4\mu m$ 、 $R_a0.08\mu m$ の表面粗さが得られた¹⁵⁾。さらに、この砥粒では酸洗ドレッシングによる研磨効率の向

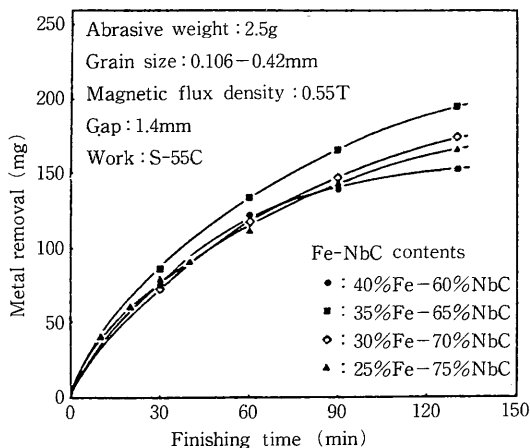


Fig. 3 Effect of NbC contents on removal characteristics

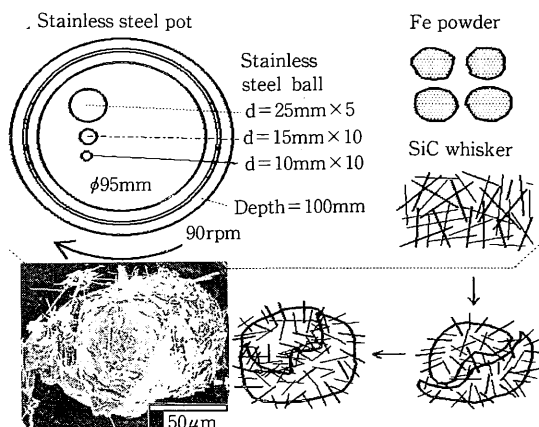


Fig. 4 Fabrication process of SiC whisker-Fe magnetic abrasive by mechanical alloying

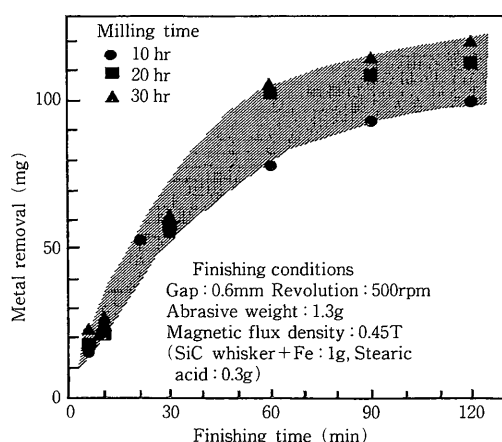


Fig. 5 Effect of finishing time on metal removal

上とマトリックス鉄中の炭素量調整による弾性率増加に伴う研磨効率の向上が確認されている^{16), 17)}。

3.2 メカニカルアロイングによる砥粒の製造

プラズマ粉末溶融法により作製した磁性砥粒は良好な研磨特性を示したが、機械的に粉碎しているために砥粒自身に欠陥が導入されやすく、それが寿命を短くする原因になっており、所望の粒径の砥粒が得にくく歩留りが悪い。また、パウダー搬送上の理由(100~200 μ mの粒径が最適)から微細砥粒の作製も困難である。そこで、砥粒の作製工程をより簡易にするためにメカニカルアロイングを応用した砥粒作製法を試みた。図4にメカニカルアロイング法による砥粒作製工程を示す。作製工程は非常に簡単で鉄粉と研磨材をステンレス製のポットに入れ、さらにステンレスボールを入れてミリングするだけである。なお、研磨材としては Al_2O_3 、SiC、 Cr_2O_3 、ダイヤモンド、NbC、SiC whiskerなどを供したがこの中ではSiC whiskerが最も研磨特性が優れていた¹⁸⁾。

図5にSiC whiskerと鉄粉を各時間ミリングした砥粒

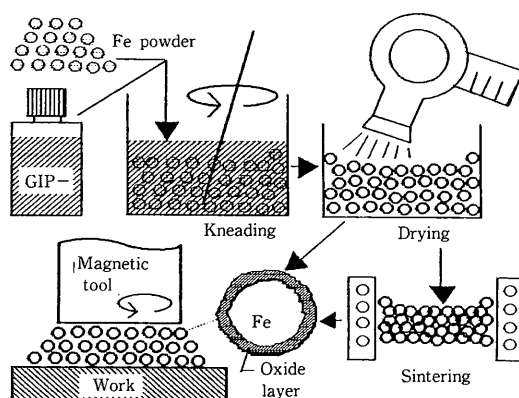


Fig. 6 Fabrication process of oxide coating magnetic abrasive

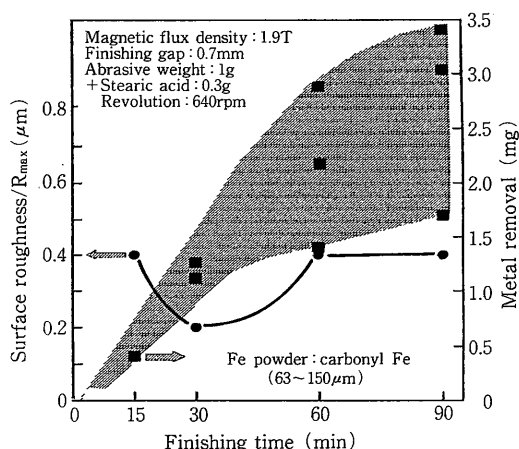


Fig. 7 Surface roughness and metal removal in dependence on finishing time using Fe powder coated with Al_2O_3 heat-treated at 200°C for 10 min

を用いて図中の条件下で研磨した際の研磨時間と研磨量の関係を示す。1 hr以上の研磨時間で研磨効率が極端に低下しており、プラズマ粉末溶融法で作製した砥粒に比べて寿命が短く、得られる研磨量も少ない。しかし、この製造方法は非常に簡易で、この砥粒を用いてS55Cを研磨した場合、研磨前 $R_{max}2.5\mu m$ 、 $R_a0.2\mu m$ が研磨後に $R_{max}0.2\mu m$ 、 $R_a0.06\mu m$ の表面粗さが得られ、プラズマ粉末溶融法で作製した砥粒より良好な表面粗さが得られる。

3.3 酸化物コーティング法による砥粒の製造

この砥粒製造方法は、微細鉄粉に酸化物膜形成剤を塗布し、溶剤を加熱除去して金属酸化物をコーティングした微細砥粒の作製を意図したもので、研磨量よりもむしろ表面粗さの向上を目指したものである。図6にこの方法による砥粒作製工程を示す。酸化物膜形成剤は主にガラスなどのフィルターとして利用されるアルコール溶媒

中に各種酸化物が分散したアルコ・ゾルである。酸化物としては Al_2O_3 、 CeO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2 を供したが、 Al_2O_3 が最も優れた研磨特性を示した¹⁹⁾。

図7に Al_2O_3 膜形成剤を鉄粉に塗布し、 200°C で10min熱処理した砥粒を用いて図中の条件で研磨した際の表面粗さ、研磨量と研磨時間の関係を示す。研磨量は前述した2種類の砥粒に比して極端に低いが、得られる表面粗さは $R_{\max}0.2\mu\text{m}$ で最終仕上用としては使用可能である。

3.4 SiC whisker—鉄粉混合磁性砥粒

磁性砥粒の作製工程をできるだけ簡単にしようとしたのがこの混合法である。この砥粒は上述した各砥粒と異なり単なる混合体であり、鉄粉と研磨材間には接触している部分以外には界面が存在していない。この方法の研磨原理を図8に示す。鉄粉は磁化されて強固に接触している。鉄粉を球と仮定した場合、最も密に積層しても30%程度の空隙が存在する。この空隙中に研磨材が充填されると鉄粉同士が強固に接触しているために、高速でこれを回転させても研磨材が飛散しない。また、ワークが鋼などの強磁性体ではワークも磁化されて磁石になるので鉄粉がワーク側に吸引され空隙中に充填された研磨材を押えつける力が発生し、これが加工圧となって研磨でき

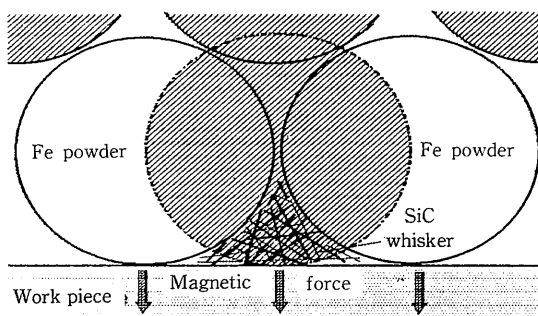


Fig. 8 Scheme of principle of magnetic finishing using mixing magnetic abrasive

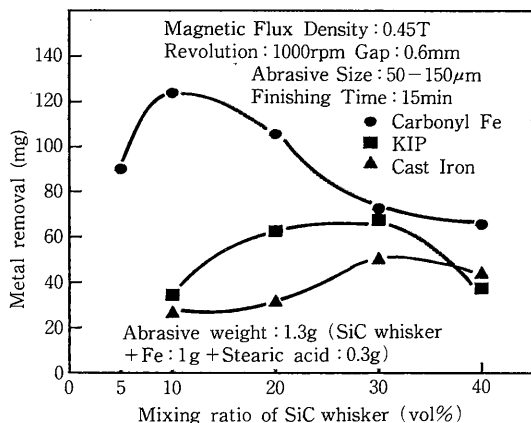


Fig. 9 Metal removal in dependence on mixing ratio of SiC whisker

る。研磨材としてはダイヤモンド、 Al_2O_3 、SiCなどの通常使用されている研磨材でも研磨可能であるが、SiC whiskerが最も研磨特性が優れている²⁰⁾。

図9にカーボニル鉄粉、KIP粉、鋳鉄粉の3種類の鉄粉とSiC whiskerを混合した砥粒を用いて図中の条件で研磨した際のSiC whisker容積率と研磨量の関係を示す。カーボニル鉄粉を用いて10vol.%のwhiskerを混合した場合にプラズマ粉末溶融法で作製した磁性砥粒に匹敵する研磨量が得られており、混合体でも十分研磨できる。混合砥粒でS55C材を研磨して得られる表面粗さは最も良く $R_{\max}0.5\mu\text{m}$ で外の砥粒に比して悪い。したがって、この種の砥粒は研磨量を得る目的に適していると言える。

3.5 市販液状研磨材を用いた研磨

混合砥粒によって複合体でなくても研磨できることが確認された。whiskerの代替として液状の研磨材を使用することができれば、液体を随時循環供給することによって寿命がない砥粒を作製することが可能であろう。この考えに基づいた研磨法が図10に示す研磨法である。この方法では、ワークが液状研磨材によって浸漬されており、磁極鉄芯に鉄粉を吸引させてブラシを形成させてこれを回転させるだけである。市販の液状研磨材の中ではPIKAL METAL POLISHの研磨特性が最も優れている²¹⁾。

図11にPIKAL METAL POLISHとカーボニル鉄粉を用いて図中の条件でS55Cを研磨した際の研磨量、表面粗さと回転数の関係を示す。複合体でないために固体砥粒を用いて研磨した際の約1/2の研磨量しか得られない。表面粗さは $R_{\max}0.4\mu\text{m}$ を得たが、これはワークを固定しているためで、ワークを移動した場合には $R_{\max}0.1\sim0.2\mu\text{m}$ の表面粗さが得られた。これまでの磁性砥粒では複合体である固体砥粒が利用されてきたが、固体砥粒では必ず寿命があるために随時砥粒を補給しなければならない。一方、液状研磨材では研磨量が固体砥粒よりもやや劣るものの得られる表面粗さは良好であり、切削におけ

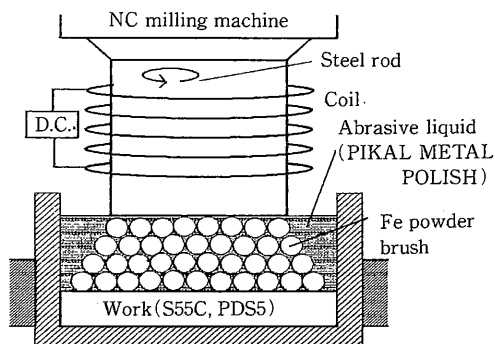


Fig. 10 Scheme of principle of magnetic finishing using liquid abrasive

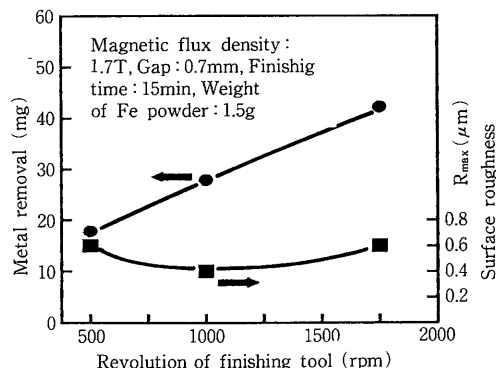


Fig. 11 Effect of revolution on metal removal and surface roughness

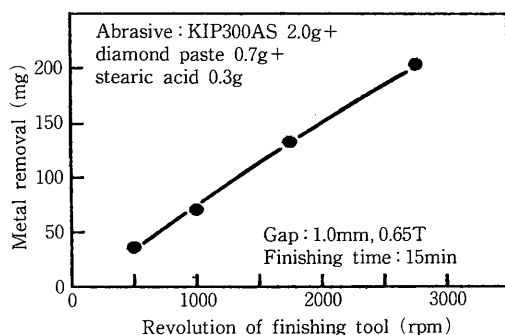


Fig. 12 Effect of revolution on metal removal with diamond paste (work: WC-Co alloy)

る切削油や研削における研削油のように常に循環供給すれば砥粒の寿命を考えなくてよい研磨加工が可能である。

3.6 ダイヤモンドペーストを用いた研磨

3.5 項において液状研磨材を用いて研磨できることが確認された。この際用いた液状研磨材は主に Al_2O_3 などの研磨材 (20%) と脂肪酸、有機溶剤を主成分とするもので、鋼などを研磨するには十分な硬度を有している。しかし、超硬などの硬い材質を研磨する場合には効率が極端に悪い。この研磨効率を向上させるために、液状研磨材の代替としてダイヤモンドペーストを用いたのがこの研磨法である。研磨原理は液状研磨材の場合と同様であるが、研磨材中で最高の硬度を有するダイヤモンドを用いているために鋼以外の材質、たとえば超硬、Al、Cu、ガラス、Siウエハなどの研磨にも有望である^{22),23)}。

図12に希釈したダイヤモンドペースト (#14000) と鉄粉の混合体を用いて図中の条件で超硬3種を研磨した際の回転数と研磨量の関係を示す。2750rpmで得られる研磨量は200mgを越えており、SC材などに比して効率良く研磨できるのがわかる。また、研磨後の表面粗さは R_{max} 0.1 μm 以下で良好な表面性状が得られる。

図13に図12の場合と同様の研磨材を用いて図中の条件

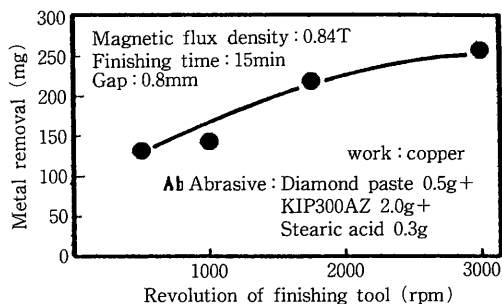


Fig. 13 Effect of revolution on metal removal with diamond paste (work: copper)

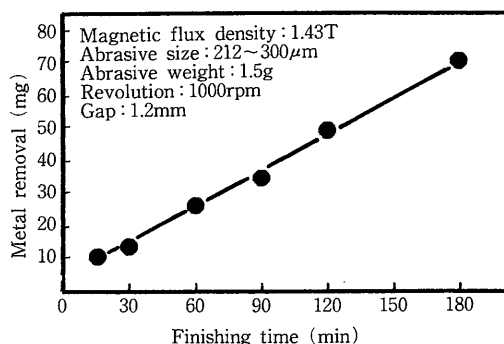


Fig. 14 Metal removal in dependence on finishing time using sintered diamond-Fe abrasive

でCuを研磨した際の回転数と研磨量の関係を示す。ただし、Cuは非磁性材なので研磨する場合はワーク下方にSm-Co永久磁石を置いて加工圧を発生させている。ここでも2750rpmで250mg以上の研磨量が得られ、SC材やSS材に比して効率良く研磨することができる。しかし、ペーストと鉄との混合体であるから砥粒の寿命に問題がある。もちろんワークをダイヤモンドペーストでどぶ付けするか希釈したペーストを循環すれば問題は解決できる。

3.7 メタルボンドダイヤモンド砥粒

3.6 項からもわかるようにダイヤモンドは高い硬度を有するために研磨材としては優れた特性を持つ。ペーストを用いた場合は寿命に問題がある。したがって、ダイヤモンドを研磨材に用いた長寿命の磁性砥粒を作製するには鉄中にダイヤモンドが均一に分散した複合体を作れば良い。東大生研中川研究室では研削用のメタルボンドダイヤモンド砥石の工業化に成功しており²⁴⁾、この砥石を粉砕すれば上述した要求を満足する磁性砥粒を作製できる可能性がある。ただし、ダイヤモンド磁性砥粒は粉砕して作製するので、ある程度脆くするために砥石よりもダイヤモンドの集中度を上げなければならない。

図14に、焼結して作製した#60000の合成ダイヤモンドを用いた鉄マトリックスの集中度150の砥粒を用いて図中の条件下でS55Cを研磨した際の研磨時間と研磨量の関

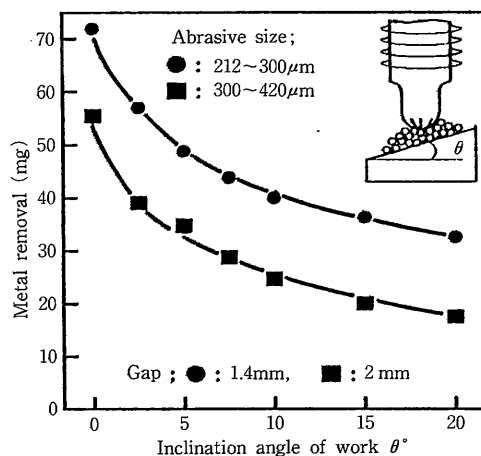
係を示す。3 hrの研磨時間にもかかわらず研磨量は直線的に増加しており、他の固体砥粒で見られた研磨効率の低下が認められなかった²⁵⁾。研磨量はプラズマ粉末溶融法で作製したNbC-Fe系砥粒より劣ったが、これはダイヤモンドの容積率がNbC-Fe系砥粒の1/2以下であったことと粒径が小さかった(NbC: Diamond: 50: 1)ためである。得られた表面粗さは $R_{max}0.2\mu m$ で、#6000の砥石で研削した場合とほぼ同様の値であった。したがって、用いる砥粒径によって研削で得られる表面粗さを参考にして磁気研磨によって得られる表面粗さが推定でき、所望の表面粗さが得られる砥粒を設計することが可能になる。

表1に上述した各砥粒の研磨特性比較を定性的にまとめた。混合、液状コンパウンド、ダイヤモンドペーストを用いた研磨法では素材をそのまま使用、あるいは市販品をそのまま使用できるので作製工程がないに等しい。いずれの砥粒を用いてもほとんどの材料は研磨できるが、砥粒の種類と被研磨材によって研磨効率に大きな差がでてくる。たとえば、FCやFCDを研磨するには、プラズマ粉末溶融法で作製したNbC-Fe系砥粒が、Tiの場合はメカニカルアロイングで作製したSiC whisker-Fe系砥粒が非磁性材、超硬、ガラスなどの硬い材質ではダイヤモンドペーストを用いた場合が研磨量、表面粗さの面から見て最も優れている。寿命の面からは液状コンパウンド、次いで焼結ダイヤモンド砥粒が優れており、あらゆる面で優れている磁気研磨用砥粒は今のところ作られていない。したがって、研磨量が優れた長寿命の砥粒を用いて $R_{max}0.5\mu m$ 程度まで研磨した後、良好な表面性状が得られる砥粒によって $R_{max}0.1\mu m$ 以下に仕上げるといった2段階の砥粒使用によって研磨するのが効率良い方法である。当然要求される面粗さが $R_{max}1\sim2\mu m$ 程度の金型の場合は1種類の砥粒で十分研磨できる。

4. 実際の研磨例

4.1 3次元金型モデルの研磨

3章で述べた砥粒の研磨特性はすべて平板を研磨した際の結果であるが、実際の金型では平面より曲面の方が多く、曲面を研磨した場合の研磨特性は平面の場合のそれと異なる。その一例を図15と図16に示す²⁵⁾。図15はワークを傾斜させた場合の傾斜角と研磨量の関係を図16は曲率を付与したワークを研磨した際の曲率半径と研磨量の関係をそれぞれ示している。傾斜角が大きくなった場合と曲率半径が小さくなった場合に平面の場合に比して研磨量が低下している。これは図17に示すように、砥粒の回転中心軸と磁束密度の最も高い箇所が一致しないために砥粒が効率良く運動しないためで、極端な場合は砥粒が磁束密度の最も高い箇所にとどまって回転しない。この解



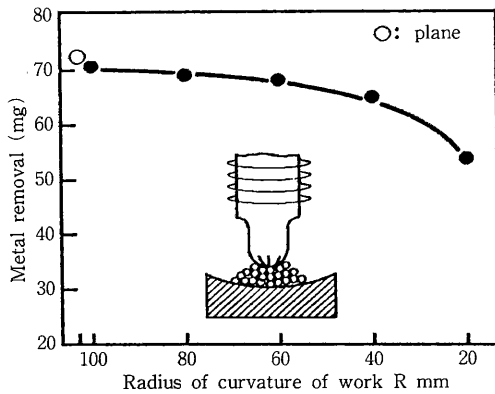
Finishing conditions: revolution: 1350rpm, finishing time: 30min, magnetic flux density: 0.5T, abrasive weight: 2.5g

Fig. 15 Metal removal in dependence on inclination angle of work

Table 1 Characteristics of magnetic abrasives

Item→ Kinds of abrasive ↓	Difficulty of fabrication*4	Suitability (work)	Cost (¥/g)	Metal removal	Roughness R_{max} (μm)
NbC-Fe by PPM*1	☆☆☆☆	SC, FC, FCD	50	☆☆☆☆	0.4(S55C)
SiC whisker-Fe by MA*2	☆☆☆	SC, Ti, PDS	150	☆☆☆	0.2(S55C)
Fe coated with Al_2O_3	☆☆	SC	100	☆	0.2(S55C)
SiC whisker-Fe by mixing	☆	SC, FC	200	☆☆☆☆	0.5(S55C)
PIKAL METAL POLISH*3	☆	SC, SS, PDS	3	☆☆☆	0.1(S55C)
Diamond paste+Fe	☆	WC-Co, Si, Cu, Al	800	☆☆☆☆☆	>0.1(WC-Co)
Diamond-Fe by sintering	☆☆☆	SC, PDS	1000	☆☆☆	0.2(S55C)

*1: Plasma powder melting, *2: Mechanical alloying, *3: Liquid abrasive, *4: ☆☆☆☆☆difficulty ☆ easy fabrication process



Finishing conditions: revolution: 1350rpm, finishing time: 30min, magnetic flux density: 0.5T, gap: 1.4mm, abrasive weight: 2.5g, abrasive size: 212~300 μ m

Fig. 16 Metal removal in dependence on radius of curvature of work

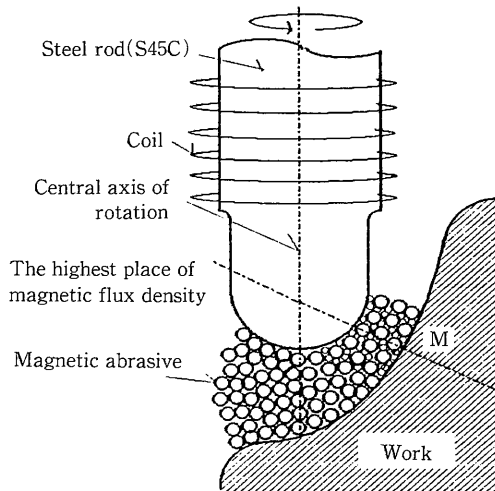


Fig. 17 The model of magnetic finishing of work with curvature

決法としては、円弧の法線方向と回転軸中心を一致するように研磨し、Rの小さい部分ではそのRに応じた小さなRを有する研磨工具を使用して研磨すれば良い。これは5軸のマシニングセンタやロボットを使用すれば可能である。

図18に切削加工により創製した3次元曲面の形状とその研磨後の外観および各部の表面粗さを示すが、形状は35Rの曲率を凹凸に組み合わせてこれを2段とし、段差部分は10Rとした。材質はPDS-5(プラスチックの射出成形用の金型として使用されている)の鏡面仕上用でSC材に比してかなり硬い。なお、実際の研磨では3軸制御のNCフライス盤を用いたので、ワーク下方に治具をセットしてできるだけ法線方向と回転軸中心が一致するよう

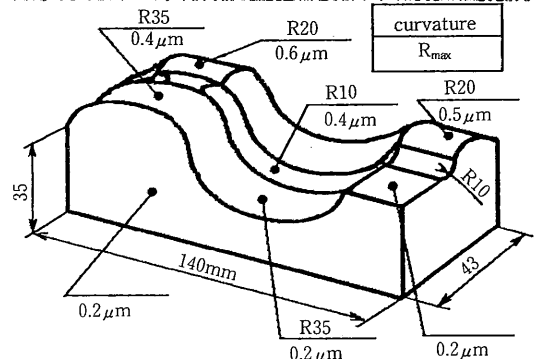
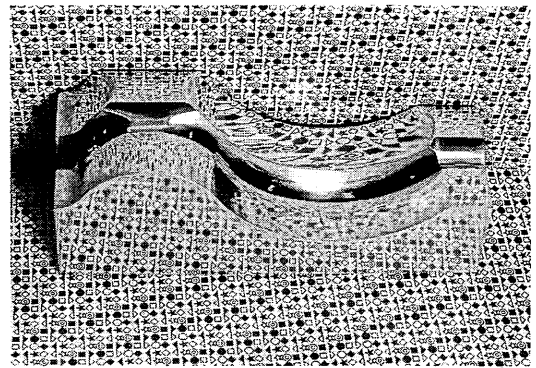


Fig. 18 External appearance of finished 3-D mold model and its surface roughness

に研磨した²⁷⁾。主な研磨条件は磁束密度: 0.5T, 研磨工具の回転数: 1750rpm, 加工間隙: 1.4~2.0mm, 送り速度: 10mm/min, ピッチ: 0.2mmでプラズマ粉末溶融法によるNbC-Fe系砥粒を用いて研磨した後、メカニカルアロイングで作製したSiC whisker-Fe系砥粒を用いて仕上研磨した。各部分の表面粗さは平面で $R_{max}0.2\mu$ m, 20R部分で $R_{max}0.5\mu$ m, 35R部分で $R_{max}0.2\mu$ m, 段差の10R部分で $R_{max}0.4\mu$ mがそれぞれ得られた。研磨に要した時間は約15hrで、SC材に比して時間を要したが³⁾、硬さの影響によるものであろう。以上の結果は、さらに研磨効率の向上を図れば自由曲面形状の金型の最終仕上として磁気研磨法が有用であることを示唆していると思われる。

4.2 プレス用金型材の研磨

プレス用金型では上述したような表面粗さを必要としない場合がある。たとえば自動車用ルーフ金型では深く絞り込むところ以外は $R_z 1 \sim 3\mu$ mで使用できると言われている。また、ルーフはRがそれほど小さくないので比較的効率良く研磨できることが期待でき、磁気研磨法が応用しやすい金型形状でもある。プレス用金型に使用される材質はFCやFCDが多い。ボールエンドミルで切削した面を各送り速度で図中の条件により研磨したFCD55とFC25の外観を図19, 20にそれぞれ示す^{28), 29)}。この種の材質ではSC材と異なり砥粒直径が大きいほど研

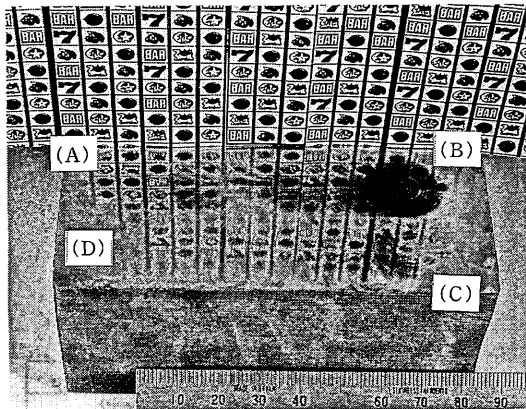


Fig. 19 External appearance of finished FCD55 with various feed speed Finishing conditions; abrasive: 65vol.% NbC-Fe by PPM (600-780 μ m), revolution: 1750rpm, gap: 1.4mm, weight: 2g, magnetic flux density: 1.3T, feed speed; (A): 3mm/min, (B): 6mm/min, (C): 9mm/min, (D): 12mm/min (1 pass), roughness (R_{max} , μ m); original: 11.2, (A): 0.8, (B): 1.0, (C): 1.2, (D): 1.6

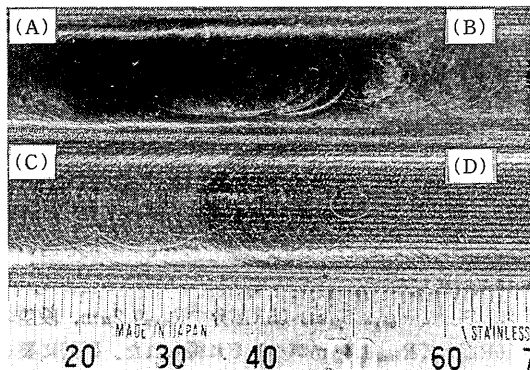


Fig. 20 External appearance of finished FC25 with various feed speed Finishing conditions; abrasive: 65vol.% NbC-Fe by PPM (600-780 μ m), revolution; 2750rpm, gap: 1.3 mm, weight: 2g, magnetic flux density: 1.3T, feed speed; (A): 1mm/min, (B): 3mm/min, (C): 5mm/min, (D): 10mm/min (1 pass), roughness (R_{max} , μ m); original: 15.2, (A): 0.8, (B): 1.0, (C): 1.5, (D): 1.8

磨量が得られ、最大研磨量はSC材に比してかなり多い。20mm/minの送り速度で研磨した際に R_z 3 μ m以下をクリアしており、 $\phi 20$ の研磨工具を用いて10mmピッチで研磨したとすれば、1 m^2 辺り2~3日程度で研磨できる計算になる。もちろん工具の大型化を図ればさらに日数は短縮できる。現在、某自動車メーカーでロボットと磁気研磨法を併用した金型磨きを検討しており、磁気研磨法による金型磨きの自動化・無人化が大いに期待できる。

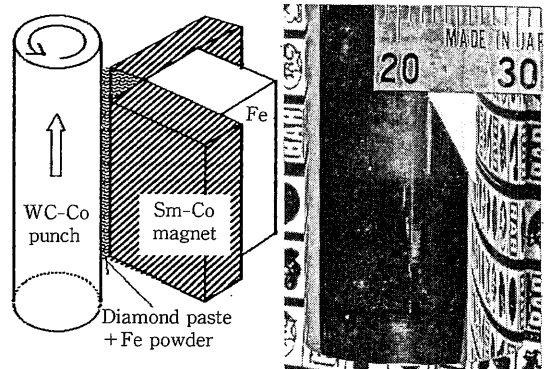


Fig. 21 Outline of magnetic finishing apparatus for WC-Co alloy using Sm-Co magnet and finished punch

4.3 超硬パンチの磁気研磨

図21に超硬パンチを研磨した例とその研磨方式の概略を示す³⁰⁾。2枚のSm-Co永久磁石の間に鉄板を挟んで90°の角度を付け、これとパンチとの間隙(約1mm)に希釈したダイヤモンドペーストと鉄粉(KIP300AS)の混合体を充填する。その後パンチを1000rpmで回転させて上方へ一定速度で移動させる。永久磁石を用いているので電磁石に比して磁束密度は0.3T程度に低下するが、良好に研磨することができ(R_{max} 0.1 μ m以下)研磨装置は非常に簡易である。超硬製のダイスはパンチほど簡単には研磨できないであろうが、研磨工具や磁石を工夫することでパンチの場合と同様に研磨することが可能であると思われる。

4.4 非磁性材の磁気研磨

銅などの強磁性材ではそれ自身が磁化されて磁石になるために、砥粒を吸引して加工圧を発生して研磨することができるが、非磁性材では加工圧が発生しないために研磨効率は強磁性材を研磨する場合に比して極端に低下する。しかし、ワークが薄い場合はワーク下方に鉄板を置き、厚みがあるワークではワーク下方に磁石を置くことで研磨可能になる。図22にCu, Al, ガラスおよびSiウエハの研磨後の外観を示す³¹⁾。いずれもダイヤモンドペーストと鉄粉のコンパウンドを用いたが、CuとAlは下方にSm-Co磁石を置き、ガラスとSiウエハでは下方に鉄板を置いて研磨している。CuとAlで R_{max} 0.2 μ m, ガラスとSiウエハで R_{max} 0.1 μ m以下の表面粗さがそれぞれ得られた。また、Ti板も下方に鉄板を置いてメカニカルアロイングによるSiC whisker-Fe系砥粒を用いて R_{max} 0.3 μ mに研磨できることが確認されている³²⁾。したがって、非磁性材のワークであっても厚みが比較的薄ければ(数cm), 各種非磁性材の非球面形状をNC工作機械やロボットと併用することによって十分研磨可能であろう。

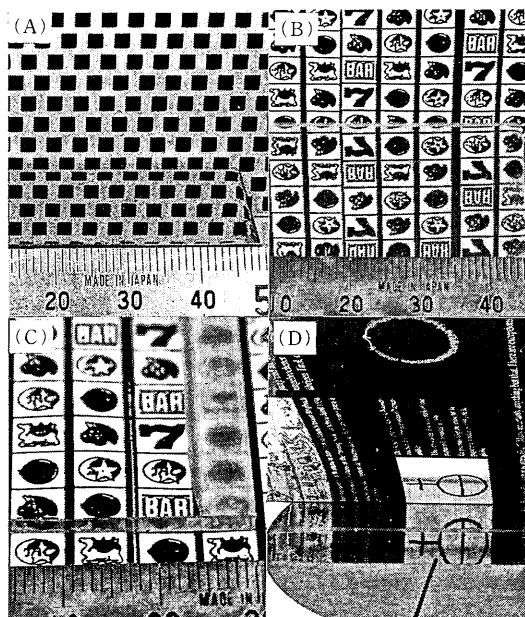


Fig. 22 External appearance of finished samples (A): copper, (B): aluminum, (C): glass, (D): Si wafer Finishing conditions; abrasive: diamond paste + Fe powder + stearic acid, gap: 0.8mm, feed speed: 10mm/min, magnetic flux density; (A) (B): 0.85T, (C) (D): 0.5T, revolution; (A) (B): 500rpm, (C) (D): 2750rpm

5. お わ り に

磁気研磨法について、研磨用砥粒の開発とその研磨特性を中心に述べた。どのような磁気回路や研磨用工具が開発されても、最終的には用いる研磨用砥粒の性能によって研磨特性が左右される。磁気研磨法は非常にユニークな研磨加工法であるが、工業的には小さな機械部品やバリ取り以外あまり応用されていない^{33),34)}。基本的には研磨する材質に応じた適切な砥粒を供給していないこと、機械に汎用性がないことなどが原因であると思われる。さらにコマーシャル不足も2次的な要因として考えられる。ある部品専用の磨き機を作るのではなく、あまり稼働率の良くない既存のNC工作機械やロボットと磁気研磨法を併用することで人手に頼る作業の多くを自動化することが可能であろう。最近2, 3の企業から磁気研磨の問い合わせがあり、実際にこれを製品の最終仕上に利用しようと検討し始めている。現状の砥粒で満足することなくさらに高効率の研磨用砥粒と研磨技術の開発を行うことで、本研究が来たるべき人手不足解消と金型みがき技術向上への一助になれば幸いである。

(1991年8月9日受理)

参 考 文 献

- 1) たとえば鋼クラタ産業カタログ：金型自動表面みがき機KM651-I型 (1989)
- 2) ダイキン工業鋼カタログ：金型自動みがき装置インテリジェント ポリシャー (1989)
- 3) 大阪機工(株)セールスマニュアル：小形金型研磨 (みがき) 装置PGM350 (1989)
- 4) たとえばB.G. Makedonski, A.D. Kotschemidov: *Fertigungstech. u. Bb.*, 24, 4 (1974), 230
- 5) たとえば進村武男：磁気研磨法とその応用, 40, 10 (1988) 1115
- 6) 波田野栄十, 進村武男：磁気研磨による表面仕上げ, 機械と工具, 9 (1987) 104
- 7) 6)に同じp. 105
- 8) 河西敏雄：砥粒加工基礎学最前線IV遊離砥粒加工学, 砥粒加工学会誌, 34, 2 (1990) 3
- 9) 安斎正博, 中川威雄：プラズマパウダーメルティング法によるNi-Cr₃C₂複合材料の作製とその特性, 生産研究, 41, 7 (1989) 33~36
- 10) 安斎正博, 中川威雄：プラズマパウダーメルティング法によるNi-NbC複合材料の作製とその特性, 生産研究, 41, 8 (1989) 17~20
- 11) 安斎正博, 中川威雄：プラズマパウダーメルティング法によるFe-炭化物複合材料の作製とその特性, 鉄と鋼76, 1 (1990) 57~64
- 12) 安斎正博, 中川威雄：プラズマ溶融法により作製した炭化物-ゴバルト系合金複合材料の特性とそれによる立体物の創製, 鉄と鋼, 76, 3 (1990) 93~99
- 13) 安斎正博, 中川威雄：プラズマ粉末溶融法による金属-炭化物複合材の作製とその特性, 粉体および粉末冶金, 37, 3 (1990) 36~42
- 14) 安斎正博, 真崎浩一, 中川威雄：プラズマ利用プロセスにより作製した磁性砥粒, 砥粒加工学会誌, 33, 4 (1989) 36
- 15) 真崎浩一, 安斎正博, 中川威雄：プラズマ粉末溶融法により作製した磁性砥粒を用いた磁気研磨：精密工学会誌56, 5 (1990) 163
- 16) 安斎正博, 真崎浩一, 遠藤博司, 須藤 亨, 中川威雄：酸洗処理によるPPM磁性砥粒のドレッシング効果, 砥粒加工学会誌, 35, 3 (1991) 22~26
- 17) 安斎正博, 真崎浩一, 中川威雄：プラズマ粉末溶融法による磁性砥粒の製造-マトリックスの影響一, 粉体および粉末冶金, 38, 4 (1991) 20~24
- 18) 安斎正博, 須藤 亨, 遠藤博司, 中川威雄, 大滝久規：メカニカルアロイングによる磁性砥粒の作製とその研磨特性, 粉体および粉末冶金, 38, 1 (1991) 56
- 19) 安斎正博, 須藤 亨, 中川威雄：酸化物コーティング鉄粉の研磨特性, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1991) 862
- 20) 安斎正博, 須藤 亨, 大滝久規, 中川威雄：SiC whisker-Fe混合磁性砥粒による金型材の磁気研磨, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1991) 860
- 21) 安斎正博, 須藤 亨, 大滝久規, 中川威雄：液状研磨材と鉄粉ブラシによる金型材の鏡面仕上げ, 型技術, 6, 8 (1991) 76
- 22) 安斎正博, 須藤 亨, 中川威雄：磁気を利用したダイ

- ヤモンドペーストによる超硬の鏡面研磨, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1991) 231
- 23) 安斎正博, 須藤 亨, 中川威雄: ダイヤモンドペーストを用いた非磁性材の磁気研磨, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1991) 233
 - 24) 日経ニューマテリアル (日刊工業新聞社), 7 (1990) 129
 - 25) 安斎正博, 須藤 亨, 中川威雄: ダイヤモンド磁性砥粒による磁気研磨, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1991) 227
 - 26) 須藤 亨, 安斎正博, 大滝久規, 中川威雄: 磁気研磨による自由曲面のみがき, 型技術, 6, 8 (1991) 66
 - 27) 安斎正博, 須藤 亨, 真崎浩一, 大滝久規, 中川威雄: 磁気を利用した金型曲面の表面仕上げ, 精密工学会誌 掲載予定
 - 28) 安斎正博, 須藤 亨, 中川威雄: プレス用金型材 (FCD) の磁気研磨, 型技術, 6, 8 (1991) 65
 - 29) 安斎正博, 須藤 亨, 大滝久規, 中川威雄: プレス用金型材FC25磁気研磨, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1991) 235
 - 30) 22) に同じ
 - 31) 23) に同じ
 - 32) 安斎正博, 遠藤博司, 中川威雄: 磁気を利用したチタン薄板の鏡面研磨, 材料とプロセス, 4, 2 (1991) 745
 - 33) 6) に同じ p. 107~110
 - 34) 進村武男: 磁気研磨法によるバリ取り技術, 機械技術, 36, 9 (1985) 13