磁性加工ジグを用いた磁気援用加工法に関する研究*

鄒 艶 華^{*1}, 進 村 武 男^{*2}Development of Magnetic Field Assisted Machining Process
Using Magnetic Machining JigYanhua ZOU and Takeo SHINMURA^{*3}^{*3} Graduate School of Engineering, Utsunomiya University,
7-1-2 Yoto, Utsunomiya-shi, Tochigi, 321-8585 Japan

Conventional magnetic abrasives have been used in magnetic field assisted machining process for internal precise finishing. However, it is difficult to machine internal surface of large diameter or thick container, joint of circular pipe and gas bomb head. In this paper, a kind of new magnetic field-assisted machining process using magnetic machining jig was proposed. The magnetic machining jig consisting of steel or permanent magnet wrapped with abrasive paper, as a tool instead of the magnetic abrasives. In contrast to the magnetic field-assisted machining process, the magnetic machining jig can generate higher magnetic force than magnetic abrasives because of higher material susceptibility, achieving the higher finishing efficiency. The advantage of using magnetic machining jig was clarified. Then, a kind of new machining jig used a pair of magnets was proposed, the high-efficient machining and stability was realized. Moreover, the model experiments are completed and the possibility of internal surface machining for thick container is confirmed. The processing principle and the machining characteristics were discussed.

Key Words: Magnetic Abrasive Machining, Magnetic Machining Jig, Internal Machining, Processing Principle, Surface Roughness, Material Removal, Machining Resistance, Machining Performance

1. 緒 言

磁気援用加工法は通常の工具や人手が入りにくい加工困難な部品箇所の精密仕上げに適用できる有効な加工法である^{1) 2) 3)}。筆者の一人は、高能率・高精度で広範囲に適用できる磁気援用加工技術の創出に応えるために、とくに厚肉円管や円管内面の溶接継ぎ目部、クリーンガスボンベ頭部などの内面加工に対応できる磁性剛体(磁性加工ジグ)利用法を提案し、検討している。

当初は、永久磁石を加工工具とした磁気援用加工法の実現性について確かめ、薄肉非磁性円管内面の研磨性能を明らかにした^{4) 5)}。しかし、磁性加工ジグを用いた磁気援用加工法の詳細については不明な点が多く、とくに厚肉工作物内面に対する加工ジグと工作物間の相対運動の発生条件、磁気回路の構成、加工特性及び加工機構などについては解明されていない。

本報は、磁性剛体(磁性加工ジグ)を利用する磁気

援用加工法を発展させるために、最初に、磁性粒子利用法と磁性加工ジグ利用法のそれぞれの特徴を整理し、両者のメリットとデメリットを明らかにするとともに、加工ジグ利用法の特長を明確にした。

次に、加工ジグの加工力と運動力の発生機構を明らかにし、加工ジグによる研磨加工を実現させるために求められる条件を明らかにした。最後に、高能率加工を実現するために閉磁気回路を構成させた永久磁石内蔵型の加工ジグを開発し、加工性能を明らかにした。

2. 磁性粒子利用法と磁性加工ジグ利用法の比較

2.1 磁性加工ジグ利用法の提案理由 従来から使用されている磁性粒子利用法²⁾は、図1(a)に示すように、磁性粒子群が工作物に対して反対側に設置された磁気発生源[永久磁石(磁極)]側に磁気吸引力を受けて工作物表面に研磨圧力(加工力)を発生させる。次に、永久磁石(磁極)の移動によって磁性粒子群を工作物表面に沿って移動させると、工作物表面との間に相対運動が発生し、表面が精密研磨される。この磁性粒子利用法の特徴は、工作物表面の形状に沿って粒子群はフレキシブルな挙動をしながら加工に関与する

* 原稿受付 2001年10月9日。

^{*1} 宇都宮大学大学院(〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)。^{*2} 正員, フェロー, 宇都宮大学大学院工学研究科。

E-mail: shinmura@cc.utsunomiya-u.ac.jp

Fig.1 Comparison using magnetic abrasives with using magnetic machining jig

ため、工作物の形状精度を維持しながら、面精度を向上できる利点をもっている³⁾⁶⁾。

しかし、磁性粒子利用法においては一個一個の磁性粒子が高い磁化率をもっていながら、粒子群は多数の空隙を有するため、全体としての磁化率は極端に低くなり、磁性粒子群全体の比透磁率は2~4といわれ⁷⁾⁸⁾、鋼材の値(実測値 500~700)に比べて著しく小さい。したがって粒子群を一つの加工工具として捉えた場合の研磨圧力はかなり低い値になる。このことは、前節で述べたように、厚肉容器内面、ガスボンベ頭部内面、あるいは円管内面の溶接継ぎ目部などの精密仕上げ加工には加工力不足のために極めて長時間の加工を要するか、場合によっては加工不能の状態に陥らせる。

そこで、図1(b)に示すような磁性剛体から成る磁性加工ジグを用いた加工法を提案した。磁性加工ジグ利用法の特徴は、工具の磁化率は磁性体そのものの高い値をもつため、高い加工圧力と運動力の発生が期待できる点にある。しかし、磁性加工ジグは剛体を使用するために粒子群がもつフレキシブルな挙動をもたない欠点もある。

2.2 磁場強度及び作用磁力の比較 図2(a)に磁束密度及び磁力の測定装置の模式図を、図2(b)に測定装置の外観写真を示す。加工工具端面と磁極上面間の距離 Z を2~10mmに変化させ、テスラメータのホール素子を工具端面の中心位置に設置して磁束密度を測定した。レアアース永久磁石($\text{Fe} \cdot \text{B} \cdot \text{Nd}$ 磁石, $18 \times 12 \times 10 \text{ mm}$)を磁極とし、図示のようにアルミニウム合金ベース上に設置した。加工工具として磁性粒子(平均粒径 $510 \mu\text{m}$ の電解鉄粉)を $18 \times 12 \times 10 \text{ mm}$ (内側寸法)の亚克力容器に十分な量を充填して測定した。また、これと同じ寸法の一般圧延鋼材(SS400)を用い、両者の磁束密度と磁力を比較した。磁力は黄銅板ばね(厚さ1mm)に貼り付けたひずみゲージにより検出した。図3に測定条件を示す。

図3に磁束密度と z 方向の磁力 F_z の関係を示す。磁性剛体(SS400)を用いた場合の磁束密度は磁性粒子(鉄粉)を用いたときの値よりも大きい。例えば、間隙2mmときのSS400剛体中心部の磁束密度は磁性粒子群の磁束密度の1.6倍に高くなる。工具材質によって加工部近傍の磁場強度が影響を受けることを意味

(a) Schematic of measuring setup for magnetic flux density and magnetic force

(b) External view of measuring setup for magnetic flux density and magnetic force

Fig.2 Schematic and external view of measuring setup for magnetic flux density and magnetic force

Fig.3 Comparison of rooled steel and iron particles in magnetic flux density and magnetic force F_z [Conditions] Magnetic machining jig: Rooled steel SS400($18 \times 12 \times 10 \text{ mm}$); Iron particle diameter: $510 \mu\text{m}$ (container volume: $18 \times 12 \times 10 \text{ mm}$); Pole: Nd-Fe-B rare earth permanent ($18 \times 12 \times 10 \text{ mm}$);

している。

一方、磁力 F_z は間隙 2mm のとき、SS400 剛体の値は磁性粒子群の値より 1.8 倍高くなっている。工具材質によって加工部近傍の磁場強度が影響を受け、それに対応して加工工具に働く磁力が左右されることを明らかにできた。

3. 単一永久磁石内蔵型加工ジグの提案

3.1 単一永久磁石内蔵型加工ジグの考え方 前述したように、磁性加工ジグを用いた加工法の特徴は、高い加工圧力を発生できる点にある。しかし、SS400 材加工ジグは粒子利用法に比べて格段に大きな磁力が得られるわけではなく、間隙 z が 8mm 程度と大きくなると作用磁力は著しく低くなり、大きな増圧効果は得られない。より高い加工圧力を得るために、単一永久磁石内蔵型の新しい加工ジグを提案した。単一永久磁石内蔵型の加工ジグを工具として用いる場合には、例えば、SS400 鋼板上に永久磁石を貼りつけ、SS400 鋼板下に研磨用の研磨紙を貼りつけて使用することが考えられる。

3.2 単一永久磁石内蔵型加工ジグの磁力 加工特性は加工圧力と工具の相対運動に関係して決まる。最初に、SS400 材そのものと永久磁石そのものを用いて、磁力の 2 分力を測定し比較した。図 4 に測定装置の外観写真と検出部の模式図を示す。ダイヤルゲージ式ハイトゲージ測定子の先端を取り外し、2 分力測定

Fig.4 Schematic and external views of measuring setup

[Conditions] Magnetic machining jig: Rooled steel (SS400) and permanent magnet(18×12×10mm); Yoke:C3601 brass; Pole: 18×12×10mm,Nd-Fe-B ; Displacement in x direction:0~30mm.Clearance:8mm.

用 L 形レバーを設置した。図示のように磁極（永久磁石）を SS400 材のヨーク上に固定し、ハイトゲージによりレバーを上下方向（間隙変化、 z 方向）に、スライドテーブルにより検出器全体を左右方向（移動距離変化、 x 方向）に移動できるようにした。L 形レバー表面に 2 分力（運動方向力 F_x と加工力 F_z ）測定用歪みゲージを貼りつけて測定した。加工工具と磁極端面間の間隙を 8mm と大きく設定し、工具を x 方向に移動して（移動距離 L ），工具に作用する 2 分力を測定した。

図 5 (a) に測定結果を示す。磁性加工ジグの材質（永久磁石と SS400 材）をパラメータとして、2 分力 F_x 、 F_z と磁極の x 方向移動距離 L の関係を示している。永久磁石を用いた場合の加工力 F_z は SS400 材を用いた場合の値より最大 6.5 倍、運動方向の磁力 F_x は最大 9 倍高くなることを明らかにすることができた。

2 分力 F_x と F_z の比を K ($=F_x/F_z$) として、 K と距離 L の関係を図 5 (b) に示す。永久磁石の K 値は SS400 材及び磁性砥粒（鉄粉）を用いた場合の K 値より数倍高くなっており、最大 8 倍に達することを明らかにした。この K 値は加工工具の加工力に対する運動力の大きさを示しており、 K 値が大きくなるほど工具は接線研磨抵抗に打ち勝って工作物表面と相対運動し

(a) Relationship between F_x , F_z and L

(b) Relationship between K and L

Fig.5 Effects of L on F_x , F_z and K

やすくなることを意味している。

4. 2対永久磁石内蔵型加工ジグの提案

4.1 2対永久磁石内蔵型加工ジグの考え方 筆者らの実験によれば、単一永久磁石内蔵型の加工ジグを用いた実験では、加工中のジグは回転し、不安定な運動状態になることがわかっている⁹⁾。このため、高い加工力と運動力を発生できる新しいタイプの2対N-S永久磁石内蔵型の磁性加工ジグを提案した。

図6に、2対永久磁石内蔵型加工ジグの模式図を示す。2個のレアアース永久磁石をSS400材ヨーク両端に固定し、閉磁気回路を形成させる。SS400材の透磁率が高いため、閉磁気回路の磁気抵抗は著しく減少し、磁気回路に流れる磁束が増大する。結果として加工域間隙の磁束密度が大きくなり、磁気吸引力が著しく増大することが期待される。

Fig.6 Schematic of magnetic machining jig with a pair of magnets

4.2 磁力の測定方法及び考察 図7に磁力測定装置の外観写真を示す。磁力 F_x は図7(a)により、 F_z は図7(b)によりそれぞれ測定した。測定装置には図4で用いたダイヤル式ハイトゲージを用いた。ヨーク材にはSS400材(底辺 $12 \times 12 \times 65\text{mm}$, 両端 $12 \times 12 \times 55\text{mm}$)を用いた。黄銅板ばね(厚さ 1mm)に貼り付けたひずみゲージにより磁力を測定した。

加工ジグと磁極端面間の鉛直方向距離を 10mm に大きく設定した。磁極を水平方向に移動し(移動距離 L)、2対永久磁石内蔵型加工ジグと単一永久磁石内蔵型加工ジグのそれぞれについて、磁力の2分力 F_x , F_z を測定した。なお、単一型加工ジグの永久磁石の寸法は2対型加工ジグと同じである。

図8(a)に、2分力 F_x , F_z と移動距離 L の関係を示す。例えば $L=0$ について、2対永久磁石内蔵型加工ジグを用いた場合、永久磁石を2倍としたにもかかわらず、単一永久磁石内蔵型の場合に比べて約4倍高い

(a) Measuring set up for F_x

(b) Measuring set up for F_z

Fig.7 External view of measuring setup for magnetic force F_x , F_z

[Conditions] Yoke: Rooled steel(SS400); Pole: $18 \times 12 \times 10\text{mm}$, Nd-Fe-B rare earth permanent; Displacement in x direction: $0 \sim 30\text{mm}$; Clearance: 10mm .

磁力を得られる利点をもつことがわかる。

図8(b)に、2分力比 $K (=F_x/F_z)$ と移動距離 L の関係を示す。単一永久磁石内蔵型の場合の K 値は2対永久磁石内蔵型の K 値に比べて高くなるが、2対型加工ジグの加工力は単一型に比べて著しく高くなるのが特徴的である。この理由は、下記の磁気回路によって説明できるものと考えられる。

(a) Relationship between F_x , F_z and L

(b) Relationship between K and L

Fig.8. Effects of L on F_x , F_z and K

単一型と2対型の磁気回路はそれぞれ図9 (a), (b) に示す等価電気回路で表わすことができる。ここに、 E , I , R は磁気回路の起磁力, 磁束, 磁気抵抗にそれぞれ対応する¹⁰⁾。

Fig.9 Equivalent electric circuits of magnetic circuit

単一永久磁石内蔵型加工ジグの磁束 I_a は式 (1) で与えられる。

$$I_a = 2E / (R + R_i) \quad (1)$$

磁気抵抗 R は磁石の N 極から対向磁石の S 極までの磁気抵抗であり, R_i は N 極の外側から三次元空間を経て S 極までの間の広範囲にわたる全磁気抵抗である。

一方, 2 対永久磁石内蔵型加工ジグの磁束 I_b は式 (2) で与えられる。

$$I_b = 4E / 2R = 2E / R \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) から, I_a と I_b の差違は R と R_i だけに依存し, $I_b / I_a = 1 + R_i / R$ で表わされる。

磁束の漏洩は三次元空間的に複雑な分布形となっており, 漏洩回路の磁気抵抗の厳密な計算は困難である。そのため, 簡便なパーミアンス法 (仮定磁路法) が用いられており¹⁰⁾, 近似値を求めることができる。

磁極の断面寸法を a , b , 磁極間距離 (空隙) を g , 空気の透磁率を μ_0 , 磁極側面からの半中空円柱漏れ磁路における仮定長さを x_a (磁極断面寸法 a について), x_b (磁極断面寸法 b について) とすれば, 図9の磁気抵抗 R の逆数, すなわち磁極側面間の全漏れパーミアンスと磁極間のパーミアンスの和で表される全パーミアンス P は, 次式となる¹⁰⁾。

$$P = \mu_0 [0.528(a+b) + (a/\pi) \ln(1+2x_a/g) + (b/\pi) \ln(1+2x_b/g) + 0.308g + (x_a+x_b)/2] + \mu_0(ab/g) \quad (3)$$

式 (3) において, 磁極の断面寸法 $a=12\text{mm}$, $b=18\text{mm}$, 空隙 $g=10\text{mm}$, 磁極側面の仮定長さ $x_a=5\text{mm}$, $x_b=5\text{mm}$ とすれば, $P=52.1\mu_0$ が得られる。

一方, 図9 (a) の磁気抵抗 R_i に関係するパーミアンス P_i は, 式 (3) のうち, 磁極間の角柱のパーミアンスを差し引き, 仮想磁極を設定することによって近似的に式 (4) により求められる。ここで, P は式 (3) で求められるパーミアンスである。

$$P_i = P - \mu_0(ab/g) \quad (4)$$

式 (4) において, 磁極の断面寸法は式 (3) の場合と同じく $a=12\text{mm}$, $b=18\text{mm}$ であり, 空隙は上下2個の永久磁石の厚さを加えた値となるため $g=30\text{mm}$, さらに, 磁極側面の仮定長さは磁石の断面をそれぞれ仮想磁極側面に展開したものとなるため a 辺寸法については b 寸法の $1/2$ となり $x_a=9\text{mm}$, b 辺寸法については a 寸法の $1/2$ となり $x_b=6\text{mm}$ となる。したがって, 式 (4) の全パーミアンス $P_i=36.6\mu_0$ が得られる。

図9 (a), (b) について,

$$I_b/I_a = 1 + R_i/R = 1 + P/P_i = 2.43 \quad (5)$$

すなわち, 磁性材ヨークを用いた2対永久磁石内蔵型の磁束 (磁束密度) は単一型に比べて2.43倍高くなり, 空隙の磁束密度のほぼ2乗に比例して決まる磁気吸引力は5.9倍大きくなるのが分かる。前述の測定結果はこの計算結果と近似しているといえる。磁気回路を検討することによって, 磁力の大きさを定量的に把握することができることを明らかにした。

以上のように, 2 対永久磁石内蔵型加工ジグ利用法の利点として, 加工力を著しく高くすることができるばかりでなく, 2 点支持加工を実現できるため, 高安定加工が可能となる点があげられる。高圧力加工を実現するには磁気回路の吟味が必要であることを示した。

5. 2対永久磁石内蔵型磁性加工ジグを利用した研磨実験

5.1 加工ジグに作用する研磨力

磁性加工ジグに圧力をかけて, 平面状工作物表面を滑らせたときの加工ジグに作用する力を図10に示す。研磨力 P (工具の自重と磁力の和) のほかに, 相対運動を起こさせるための磁力 F_x が作用し, F_x と反対方向の接線研磨抵抗 f が働く。運動方向の磁力 F_x が接線研磨抵抗 f より大きいときに加工が可能となる。磁性加工ジグの自重を無視すれば, 運動力と加工力の比は前述した磁力の2分力比 K と同じ値となる。一般的に研削加工の場合の接線研削抵抗と砥石の法線方向力の比は0.5といわれる

Fig.10 Forces F_x , f , P acting on magnetic machining jig

11). しかし、研磨加工の場合の研磨力と接線研磨抵抗の関係は明らかにされておらず、実験的に求める必要がある。

5.2 接線研磨抵抗の測定 接線研磨抵抗と研磨力（加工面に垂直方向の作用力）の比を λ （これを研磨係数と呼ぶことにする）とすると次式が成立する。

$$\lambda = f/P \quad (5)$$

図11に接線研磨抵抗測定装置の模式図を示す。加工ジグの底面（研磨面）に研磨紙を貼りつけ、それぞれ各種の値の表面粗さをもつ工作物上を滑らせ、接線研磨抵抗を測定した。接線研磨抵抗は板ばねに貼りつけた歪みゲージで測定した。また、研磨力は加工ジグに搭載する分銅を変化させることによって調整した。加工ジグの移動は精密ボールねじと精密ガイドおよび低速送り用モータを用いて行った。

加工ジグ底面に貼りつける研磨紙をエメリーE#60, E#240, E#1200, E#2000の4種類に変化させ、研磨力を変えるための分銅を100gから800gまで変化させて実験した。加工ジグが静止状態から移動し始めるときの接線研磨抵抗の最大値を採用した。

Fig.11 Schematic of measuring setup for machining resistance

[Conditions] Workpiece: C3601 brass; Abrasive grain mesh number of abrasive paper: #60, #240, #400, #1200, #2000. Feeding rate of machining jig: 195mm/min, dry condition.

図12(a), (b)に測定結果を示す。図12(a)は加工ジグに貼り付けた研磨紙の研磨材粒度と研磨力が研磨係数 λ に及ぼす影響を示している。研磨係数の値は0.18~0.65の範囲で変化することがわかる。図12(b)は、E#400（平均粒径75 μ m）の研磨紙を使用し、工作物の表面粗さを6 μ m R_y 一定として、工作物材質を変化させたときの結果である。 λ は0.5~0.65の値をとることがわかる。図12から、研磨係数 λ は研磨紙に付けた研磨材の粒度と工作物の材質に影響を受けるが、研磨力には大きな影響を受けないことが分かる。この理由は摩擦作用の他に砥粒切れ刃による切削作用が加味されるためと考えられる。本実験条件の範

(a) Effect of machining resistance λ on abrasive grain size and weight

(b) Effect of weight on λ

Fig.12 Effect of abrasive grain size and weight on machining resistance λ

囲では、 $\lambda = 0.18 \sim 0.65$ であった。

5.3 磁性加工ジグ利用法の加工可能条件 磁力の2分力比 K の最大値 K_m が λ より大きいとき、多種多様な加工条件下においても、加工ジグを工作物表面上を移動しながら研磨作業に関与させることができることになる。図5に示すように、磁性粒子を用いた場合の K_m は0.5以下になるため、研磨加工は不可能となる。SS400鋼材の場合の K_m は0.8であるため、研磨加工ができる場合とできない場合が存在する。一方、図8(b)に示すように、単一永久磁石内蔵型と2対永久磁石内蔵型の加工ジグを用いた場合の K_m は1以上となるため、特別な条件以外は研磨加工が容易に実現できることがわかる。

5.4 加工実験による確認 図13に2対永久磁石内蔵型磁性加工ジグを用いた加工装置の外観写真を示す。磁極と工作物の両者をそれぞれ回転させる平面磁気研磨実験を行った。実験装置は2本の回転軸から構成されている。一つはモータの回転駆動軸上に永久磁石を配置したもので、図13の磁極（永久磁石）を回転

Fig. 13 External view of experimental setup

[Conditions] Distance between magnetic machining jig and magnetic pole: 10mm; Workpiece: C2801, brass ($\phi 140 \times 2$ mm); Revolution: 208 min^{-1} ; Abrasive paper: #120 (grain material: emery; mean diameter: $180 \mu\text{m}$), dry machining.

させる軸である。他の軸は円板状の工作物回転用である。アルミニウム合金薄板（厚さ 2mm）の上に 2 対永久磁石内蔵型加工ジグを取り付け、アルミニウム合金薄板の下には研磨紙を貼りつけたものを使用した。磁性加工ジグと磁極間距離を 10mm と大きくして実験した。実験条件を図 13 に示す。

図 14 に加工面の顕微鏡写真と表面粗さプロフィールを示す。加工ジグの加工挙動が不安定な単一永久磁石内蔵型よりもはるかに安定した加工が得られ、加工時間も縮短されることがわかった。2 対永久磁石内蔵型加工法は、厚さ 10mm 程度の厚肉容器内面仕上げに適用できることを明らかにした。なお、磁性粒子利用法では研磨圧力が低く、全く研磨加工はできず、SS400 材工具では極めて長時間の加工を要した。

Fig. 14 Photographs and surface roughness profiles of finished surface

6. 結 言

本研究は、磁気援用加工法において従来から使用されている粒子状の磁性砥粒に代わって、厚肉容器内面の精密研磨に対応できる磁性剛体あるいは磁性体と

永久磁石から構成される磁性加工ジグ利用法を提案し、その特徴と有用性及び加工性能について述べている。得られた成果を要約すると次のようになる。

(1) 粒子状の磁性砥粒利用法と磁性加工ジグ利用法の磁場分布と磁力を実測して比較した結果、加工工具として SS400 鋼材を用いた場合の磁力は 1.8 倍高く発生できることを示した。

(2) 永久磁石を内蔵した新しい磁性加工ジグを提案した。永久磁石と SS400 鋼材を用いて、間隙 8mm と大きい場合について、磁力の 2 分力測定実験を行った結果、単一永久磁石内蔵型加工ジグを用いた場合は SS400 材工具の約 6.5 倍の高い加工力を発生できることを明らかにした。

(3) 加工ジグが工作物表面を押しつける磁力と相對運動のための磁力の 2 分力比の最大値 K_m が研磨係数 λ より大きいことが必要とされる。研磨紙の粒度、工作物材質、研磨力を変化させて実験した結果、本実験条件の範囲内では、すべての条件において $K_m > \lambda$ であることを示した。

(4) 永久磁石 2 個とヨークにより閉磁気回路を構成させた 2 対永久磁石内蔵型加工ジグを提案し、10mm の大きな間隙をもつ場合においても高能率・高安定加工が実現できることを明らかにした。また、この 2 対型加工ジグは単一型加工ジグに比べて 4 倍の研磨力を発生でき、適切な閉磁気回路を構成させることによって実現できることを示した。

今後は、曲面研磨に対応できる永久磁石内蔵型の加工ジグの開発等について検討していく予定である。

最後に、実験にご協力頂いた宇都宮大学工学部技術専門職員会沢利夫氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 精密工学会編, 精密加工実用便覧, 日刊工業新聞社, (2000), 559-561.
- 2) 山口ひとみ・進村武男, 砥粒加工学会誌, 44-1(2000), 7-10.
- 3) 山口ひとみ・進村武男, 精密工学会誌, 62-11(1996), 1617-1621.
- 4) 進村武男, 精密工学会誌, 56-6(1990), 1027-1032.
- 5) 進村武男・ほか 2 名, 精密工学会誌, 59-1(1993), 161-166.
- 6) 進村武男・山口ひとみ, 機論, 59-560, C(1993), 1261-1267.
- 7) 進村武男・ほか 2 名, 精密工学会誌, 52-5(1986), 851-857.
- 8) 山口ひとみ・進村武男, 機論, 60-578, C(1994), 3539-3545.
- 9) 進村武男・鄒艶華・ほか 1 名, 東北支部第 36 期総会機講論(2001), 188-189.
- 10) 山川和郎・ほか 2 名, 永久磁石磁気回路の設計と応用, 総合電子出版(1979), 74-80.
- 11) 小野浩二, 研削仕上, 槇書店, (1962), 14-19.