

オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発

－ ブラシを用いた凹凸曲面での磨き加工実験 －

藤尾 三紀夫*¹

CAM System for On-Machine Polishing Based on Five-Axis Control

－ Application Results for Convex and Concave Surface －

FUJIO Mikio*¹

Abstract: Polishing requires skill and time to obtain a smooth finished surface on a die or mold. Often, to reduce the polishing time, an automated system such as a robot or an exclusive machine tool is necessary. This work aimed at developing a computer-aided manufacturing (CAM) system for on-machine polishing based on five-axis control of a ceramic-fiber abrasive brush, a rubber polishing tool, and a polycrystalline-diamond tool. In the current machining process, a ceramic-fiber abrasive brush has been used in the automated deburring and polishing of a flat surface; however, the brush was not suitable for polishing a sculptured surface. In this research, a ceramic-fiber abrasive brush is controlled to fit normal vector of a sculptured surface, thus enabling the polishing of the surface via the five-axis control of the machine tool and the path generation developed by the CAM system. We performed polishing experiments on convex and concave arc and sphere surface to verify the effectiveness of the proposed method, and the results demonstrated the suitability of our method. The tool paths to polish the surface; the contour tool path and the scanline tool path, and the polishing conditions were compared by the roughness of the polished surface

Key Words: Polishing CAM, Five-axis Control, Ceramic Fiber-Brush, Convex and Concave Surface

1. 緒言

車体用プレス金型加工やインプラント等の部品加工において、切削加工後の磨き加工は工程時間全体の15～20%を占めており、磨き加工の自動化によるコストの低減、納期の短縮、品質の安定・向上が望まれている^[1]。また磨き加工は未だに職人の技能に依存し、職人の高齢化による人材不足も懸念されている。このためロボットが利用されているがティーチング操作や専用機器が必要であり、パスの生成に汎用性がなく、磨きの自動化に十分に活用できていない^[2]。

一方、砥粒加工技術の進歩により、工作機械の主軸に取り付けて汎用工具と同様にオンマシンで磨き加工が可能な工具や手法が数社から市販され、自由曲面の磨き加工を自動化できる環境が整ってきた。図1に示すバリ取用のセラミックファイバーブラシ（ファイバーブラシ）、ラバーバンド砥石やダイヤモンド砥石を用いた機上ポリッシングツール、および多結晶ダイヤモンド焼結体（PCD）工

具がその代表例である。

CAD/CAMシステムが高度化して切削加工時間が短縮した現在、CADデータを活用してこれらの工具の磨き条件に合わせて工具経路を生成することで、磨き加工も自動化することが可能であると考えられる。そこで本研究ではこれら数種の磨き加工用工具を適切に使い分ける「オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発」による自由曲面磨き加工の自動化の実現を目的としている。

本論文では、工具例としてファイバーブラシを対象とし、5軸制御で凸型の円弧面および球面の磨きが可能であるかについて、3軸制御と比較しその有効性の検証を行った。また凹型の円弧面および球面についても磨き加工実験を行い、磨き可能であるか検証すると同時に、凹凸面での磨き加工の相違について検証を行ったので報告する。

2. オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステム

2.1 オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステム

オンマシンで磨き加工が可能な工具は材質や形、用途や使用方法が異なることから、金型などの自由曲面に対応す

*1 制御情報工学科

Department of Control and Computer Engineering



図 1 近年開発されたオンマシン磨き加工工具の例

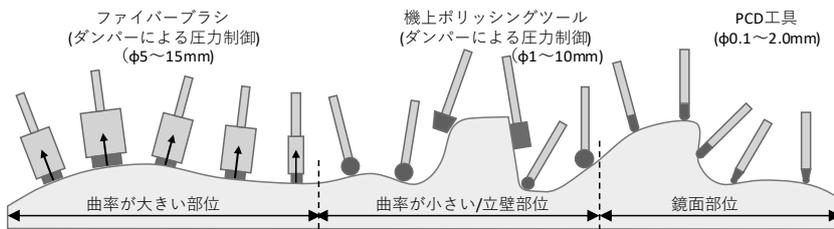


図 2 加工部位に適合する磨き加工用工具と加工方法

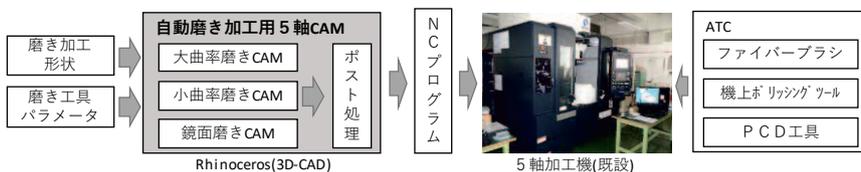


図 3 提案するオンマシン磨き加工用 5 軸 CAM システム



図 4 セラミックファイバーブラシ

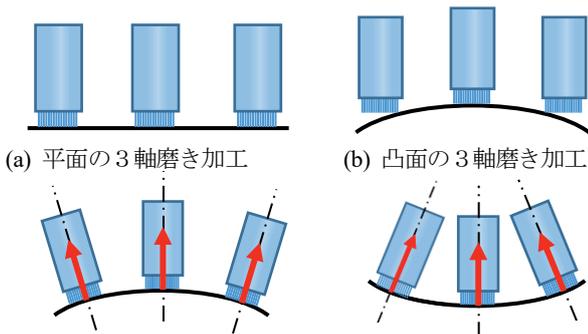


図 5 ブラシを用いた凹凸面の磨き加工手法

るためには加工部位に適合するように使い分ける必要がある。例えば図 2 に示す形状の場合には、比較的大きな面はファイバーブラシを法線方向に制御して磨き、曲率が小さい面や立壁面などは機上ポリッシングツールで、鏡面は PCD 工具というように工具を使い分けて磨き加工を行う。図 3 に示す提案システムでは、磨き加工形状と磨き工具パラメータに基づいて加工部位を選択して工具

経路を生成した後、送り速度や主軸回転数などの付加条件を追加して 5 軸制御の工具経路を生成する。5 軸制御の工具経路に基づいて、切削工具と同様に ATC に格納されている磨き加工用工具を選択して自由曲面の磨き加工をオンマシンで行うことにより、段取り替えが省略され、磨き精度や品質の安定・向上、磨き加工時間の大幅な短縮が実現できる。

本研究では 3 次元 CAD である Rhinoceros の PythonScript^[3]を用いて CL データを生成し、ポスト処理^[4]により 5 軸制御している。

2. 2 セラミックファイバーブラシと磨き加工手法

オンマシンでの磨き加工実験で使ったセラミックファイバーブラシは、図 4(a)に示すように、砥粒の代わりに研磨セラミックファイバー線材の束とスリーブで構成されている。単一の線材は、刃先として機能する 500~1000 本のセラミックファイバーで構成され、優れた切削能力を有している。本研究で用いるブラシは図 4(b)に示すように、ブラシは直径 3 [mm] の束としてブラシスリーブの外周に沿って配置され、ブラシの中央領域は空洞となっている。ファイバーブラシの外径は 5~25 [mm] で、樹脂、一般鋼、難削材など研磨を受ける材料に併せて 4 つの異なる繊維ブラシを利用することができる。本報では、ブラシ径 15 [mm] でアルミ加工用のブラシを用いる。また、このファイバーブラシは、工作機械の主軸に直接取り付け、通常の工具と同じように扱うことができる。平面を磨く際には、図 5(a)のように、このファイバーブラシが使用可能であるが、図 5(b)に示すように、曲面の場合は 3 軸制御では接触面が均一にならず、曲面を研磨ことは難しい。そこで本研究では、図 5(c), (d)に示すように、ファイバーブラシを研磨面の法線ベクトルの方向に傾けることにより、平面だけでなく凹凸曲面も研磨できるオンマシンでの磨き加工用 CAM システムを提案している。

3. 凸型円弧曲面加工における 3 軸と 5 軸制御の比較

3. 1 凸型円弧曲面での磨き処理の加工実験方法

凸型円弧面を磨くため、図 6(a)に示す X 方向に半径 120 [mm] の円弧形状で、カスプ高さが 5 [μm] になるように、アルミブロックから Y 方向に等高線加工を行った面を基

準面とする。そしてX方向磨きでは、図6(b)のように磨かない基準面、ピックアップ6[mm]の荒磨き面、ピックアップ1.5[mm]の密磨き面の3つの領域に分けて磨き加工を行った。またY方向磨きでは図6(c)に示すように基準面を残し、ピックアップ1.5[mm]の密磨き面をY方向に走査線工具経路で磨き加工を行った。そして、この円弧曲面の同じ磨き加工経路を用い、ブラシを3軸制御と5軸制御のそれぞれで磨き加工を行った。磨き加工条件は磨き回数を50, 100, 150回、主軸回転速度を4800[rpm]、主軸送り速度を1200[mm/min]とした。

図7(a)に走査線X方向に凸型円弧曲面を3軸制御で、図7(b)に5軸制御で磨き加工を行った結果を示す。また、図8(a)に走査線Y方向に凸型円弧曲面を3軸制御で、図8(b)に5軸制御で磨き加工を行った結果を示す。

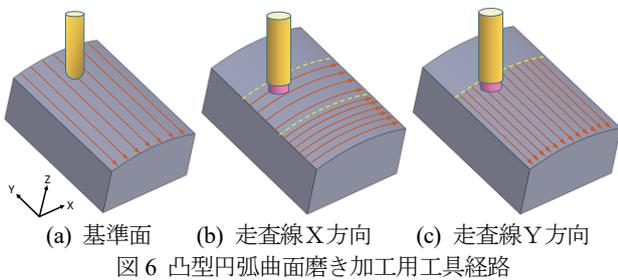


図7 凸型円弧曲面走査線X方向加工

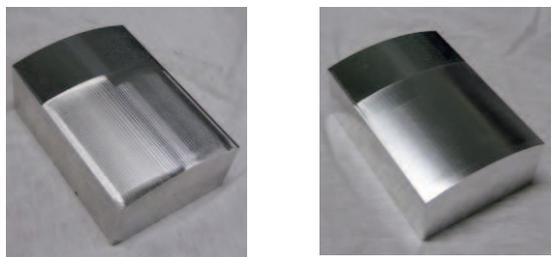
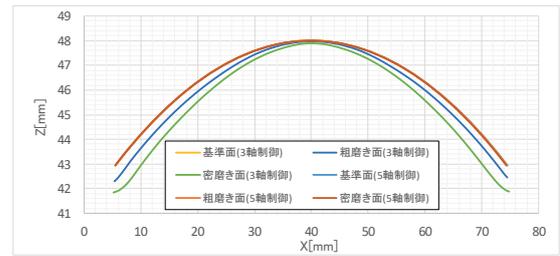
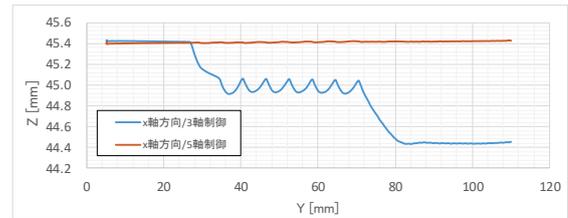


図8 凸型円弧曲面走査線Y方向加工

3. 2 凸型円弧曲面での3軸と5軸加工の加工実験結果
3軸制御と5軸制御での幾何形状への影響を確認するため、加工後の幾何形状を3次元測定機でX、Y軸方向に計測を行った。凸型円弧曲面に対し、走査線X軸方向磨き加

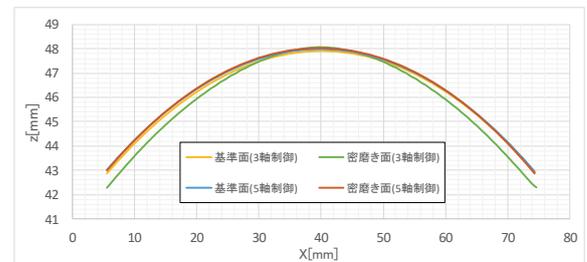


(a) 円弧曲面形状 (X方向測定)

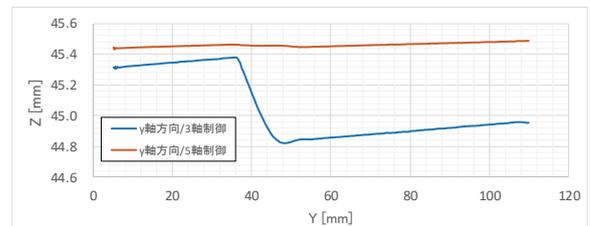


(b) 円弧曲面高さ変化 (Y方向測定)

図9 凸型円弧曲面幾何形状 (走査線X方向加工)

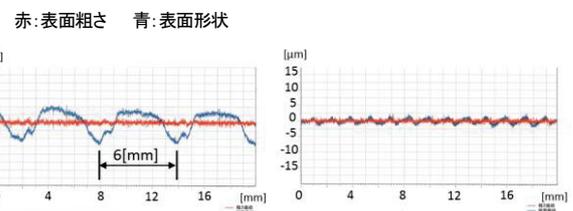


(a) 円弧曲面形状 (X方向測定)



(b) 円弧曲面高さ方向 (Y方向測定)

図10 凸型円弧曲面幾何形状 (走査線Y方向加工)



(a) 粗磨き面

(b) 密磨き面

図11 粗磨き面と密磨き面の幾何形状比較

工後の形状測定結果を図9、Y軸方向磨きの測定結果を図10に示す。X軸方向磨きにおいては、図9(a)の結果より3軸制御では磨き過ぎが生じ、図9(b)より粗磨き面では磨きすぎによる段が発生していることがわかる。Y軸方向磨きにおいては、図10(a)より3軸制御ではX軸方向の磨き

加工と同様に磨きすぎが生じ、図 10(b)から Y 軸方向に磨きすぎによる段が発生することがわかった。

また、図 6(b)のように X 軸方向に 5 軸制御して磨いた粗磨き面と密磨き面に対し、Y 軸方向に計測距離約 2.0[mm]で算術平均粗さ(Ra)の計測を行ったときの表面粗さと形状を図 11(a), (b)に示す。同図より表面粗さとは別に加工表面に粗磨き面加工時のピックフィード 6[mm]に依存する段が生じていることがわかる。これより密磨きの方が精度良く磨けることが示された。

3. 3 凸型円弧曲面加工の粗さ比較

図 6(b)に示す走査線 X 方向にファイバーブラシを 5 軸制御して磨き加工を行った場合の、磨き密度と磨き回数の表面粗さを図 12 に示す。計測は X, Y 軸方向に計測距離約 2.5[mm]で算術平均粗さの計測を行った。この結果より、基準面より粗磨き面、そして密磨き面の順に表面粗さが小さくなり、良く磨けることがわかる。また、磨き回数が多いほど良く磨けていることが明らかになった。しかし、Y 方向では大きな変化が無く、逆に磨き回数が多いと表面粗さが少し大きくなっている^[5]。

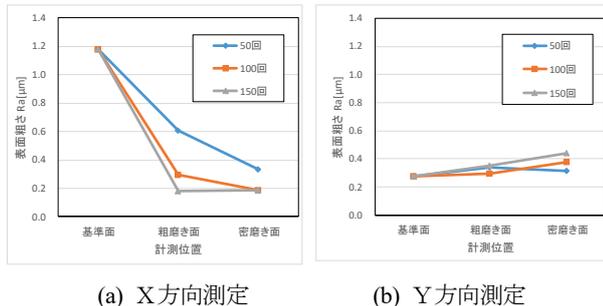


図 12 凸型円弧面の表面粗さ

4. 凸型球曲面加工の粗さ比較

4. 1 凸型球面磨き加工実験方法

提案する手法で凸型球面について磨き加工が可能かについて 5 軸制御を適用し、有効性の検証を行った。磨き加工ワークとして図 13(a)に示す加工パスにより Y 軸方向にカスプ高さ 5[μm]になるように R10[mm]のボールエンドミルで R120[mm]の球面加工を行った面を基準面とした。磨き加工では図 13(b), (c)のようにピックフィード 1.5[mm]の等高線および走査線工具経路で磨き加工を行った。図 14(a)は加工後の基準面、図 14(b)は等高線加工後、図 14(c)は走査線加工後の形状を示している。磨き条件として切り込み 0.2[mm], 磨き回数 30 回, 主軸回転数 2400[rpm], 送り速度[1200mm/min]で加工を行った。

図 15(a)は基準面、図 15(b)は切り込み 0.5[mm], 主軸回転数 1200[rpm]で磨いた表面の顕微鏡の 100 倍写真である。

さらに図 16(a), (b)は、図 15 と同じ条件で磨き加工を行った表面の表面粗さ Ra を示している。同図よりカスプ高さ 5[μm], ピックフィード 1.5[mm]の表面が磨き加工により取り除かれていることがわかる。

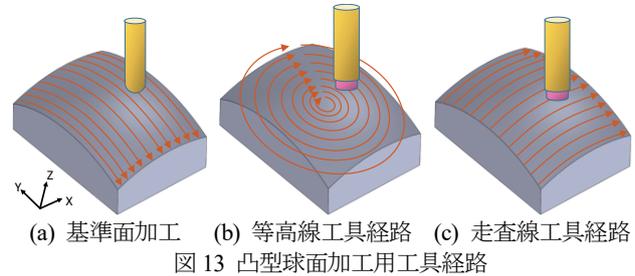


図 13 凸型球面加工用工具経路

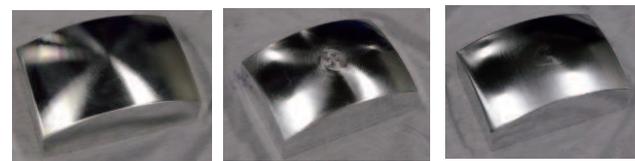


図 14 凸型球面加工後の形状

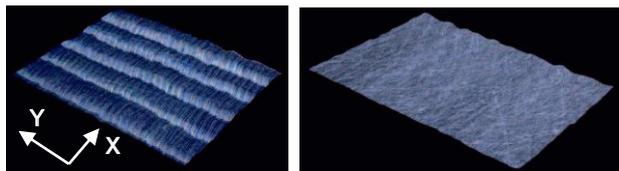


図 15 表面性状の顕微鏡計測

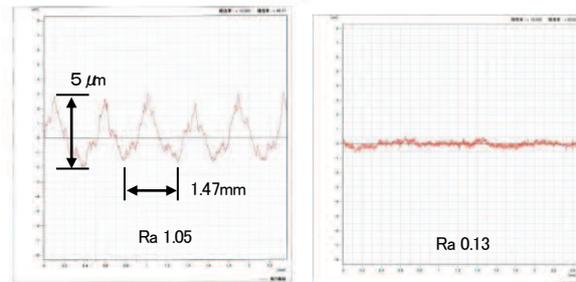


図 16 表面性状の粗さ計測

4. 2 等高線 3 軸加工との比較

等高線工具経路を対象に、切り込み 0.5[mm]で 3 軸制御と 5 軸制御することにより等高線パスで磨き加工を行い、加工後の幾何形状の比較を行った。加工条件は送り速度 1200[mm/min], 主軸回転数 4800[rpm]で 50 回磨いた。図 17(a)は工前の基準面であり、図 17(b)は 3 軸制御、図 17(c)は 5 軸制御で磨き加工を行った結果である。図 18 は、球断面を示しており、3 軸制御の場合、幾何形状が基準形状に対して劣化していることがわかる。これより、凸型球面においても、3 軸制御では磨きすぎにより基準球面形状を再現できないことが明らかになった。

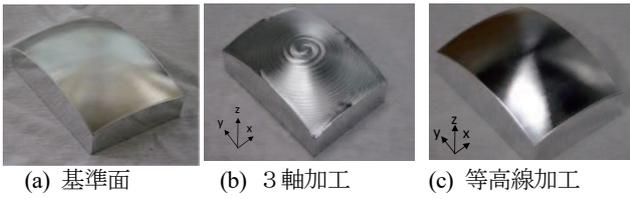


図 17 等高線 3 軸加工と 5 軸加工の結果

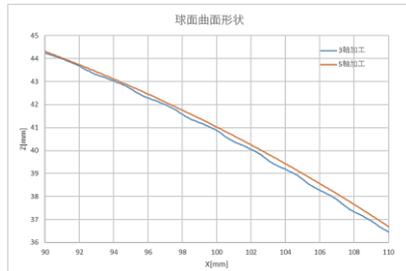


図 18 断面幾何形状の比較

4. 3 等高線での磨き回数と主軸回転数および切り込み量の影響

等高線パスでの加工後の表面粗さについて、加工条件を変えて表面粗さとの関係を求めた。加工条件として、主軸回転数を 2400,4800[rpm]、切り込みを 0.2,0.5,1.0[mm]とした。そして磨き回数を 10,30,50 回に変えて磨き加工実験を行った。この時、磨き加工時間は、10 回で 3 時間 6 分、30 回で 8 時間 46 分、50 回では 15 時間 4 分要した。

測定では、基準面でのカスプ高さが残る X 方向と、工具の加工方向である Y 方向について、測定長さ 2.5[mm]での算術平均粗さを表面粗さ計で測定した。図 19(a)は磨き加工後の X 方向、図 19(b)は Y 方向の表面粗さを示している。同図よりばらつきが認められるが切り込み量を増やすと表面粗さの値が良くなる（値が小さくなる）ことがわかる。また磨き回数も増やすことで表面粗さが向上している。全体として、切り込みが少ない場合は磨き回数に依存し、切り込みが多い場合は少ない回数でよく磨けることが明らかになった。

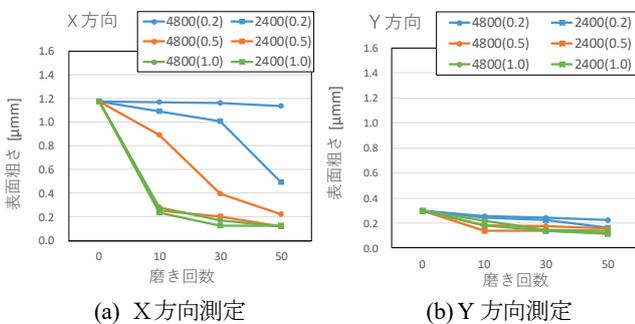


図 19 等高線での磨き加工後の表面粗さ

4. 4 主軸回転数の影響

図 20 は主軸回転数を 1200,2400,4800,6000rpm で磨き加工を行った後の X 方向の表面粗さを示している。ここで回転

数ゼロは、基準表面の粗さを示している。メーカーの資料では主軸回転数を上げるほど磨き量は増すと記載されているが、実験結果では低回転の方が磨けていることがわかる。これは曲面の場合、6000[rpm]では遠心力によりブラシの接地面積が低下し、磨けていないこと原因と考えられる。しかし切り込み量が 1.0[mm]と多い場合は、主軸回転数に比例して遠心力で浮き上がる量が少いため、磨けていると考えられる。

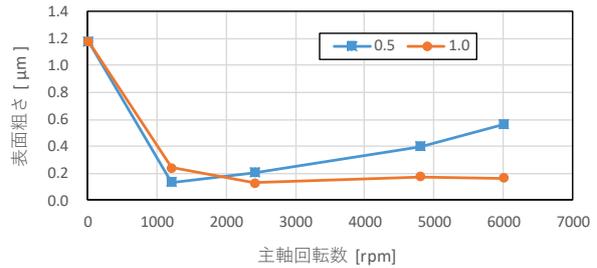


図 20 走査線での主軸回転数の影響 (X 方向測定)

4. 5 送り速度の影響

図 21 は送り速度を 600,1200,2400,3600[mm/min]に変えて磨き加工を行った後の X 方向の表面粗さを示している。速度が 1200[mm/min]を超えると速度を上げても磨きの効果は大きく変わらないことがわかる。また切り込み量が 0.5[mm]の場合は、送り速度に比例して磨き量がわずかに増えている。そして送り速度 3600[mm/min]では切り込み量 0.5[mm]の方がより滑らかに磨けていることがわかる。

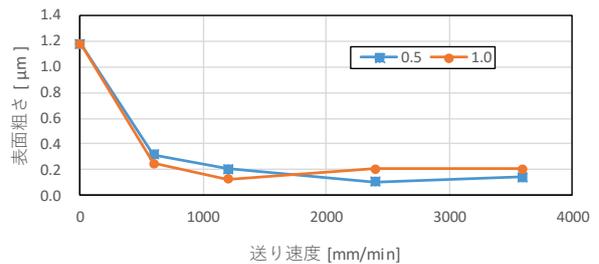
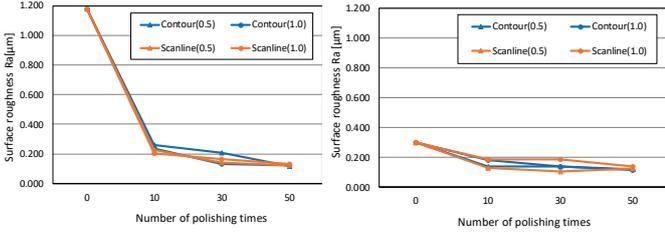


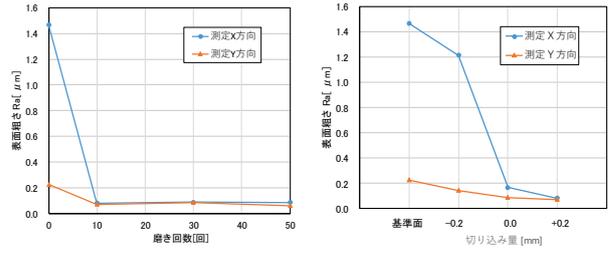
図 21 走査線での送り速度の影響 (X 方向測定)

4. 6 等高線工具経路の走査線工具経路の影響

図 13(b), (c)に示した工具経路を用いて、切り込み 0.5, 1.0[mm]、スピンドル回転数 2400 [rpm]、研磨回数 10, 30, 50 回、送り速度 1200[mm/min]で磨き加工を行った。このとき、10 回の研磨時間は 3 時間 26 分、30 回は 10 時間 21 分、50 回は 18 時間 4 分を要した。図 22(a)は X 方向、図 22(b)は Y 方向の表面粗さを示している。この図から、表面にブラシの移動跡が残っているが、走査線および等高線での表面の粗さに大きな違いが無いことがわかった。



(a) X 方向測定 (b) Y 方向測定
図 22 走査線と等高線工具経路の比較

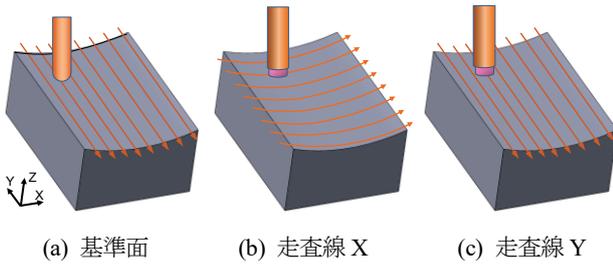


(a) 磨き回数比較 (b) 切り込み量比較
図 25 凹型円弧曲線磨き加工の表面粗さ比較結果

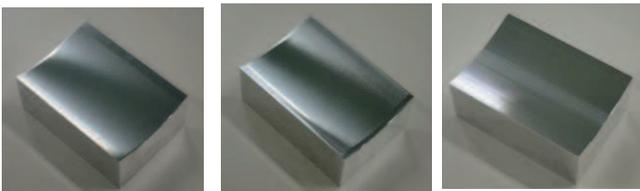
5. 凹型円弧曲面磨き加工の結果

5. 1 凹型円弧曲面磨き加工実験方法

凹型円弧面について、凸型の円弧曲面および球面の磨きと同一条件で凹型円弧面の磨き加工を行い、表面粗さ、工具経路、幾何形状について比較した。基準面は図 23(a)の X 方向にカスプ高さが $5[\mu\text{m}]$ になるように Y 方向に加工し、基準面とした。そして切込量を $0.2[\text{mm}]$ 、主軸回転数を $4800[\text{rpm}]$ 、送り速度 $1200[\text{mm}/\text{min}]$ として図 23(b), (c) の様に X, Y 方向に走査線で磨き加工を行った。図 24 は凹型円弧曲面磨き加工後の加工形状を示している。



(a) 基準面 (b) 走査線 X (c) 走査線 Y
図 23 凹型円弧曲面磨き加工実験の工具経路



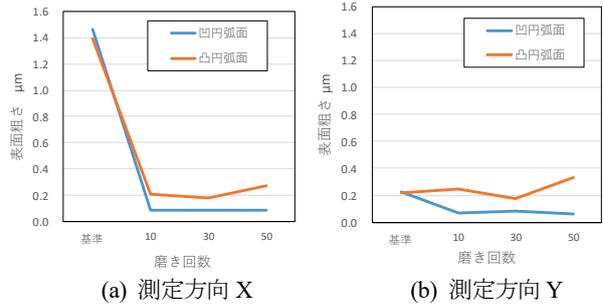
(a) 基準面 (b) 走査線 X (c) 走査線 Y
図 24 凹型円弧曲面磨き加工実験後の結果

5. 2 凹面円弧曲面磨き加工の結果

図 25(a)は切込量 0.2mm で図 23(b)に示す走査線 X 方向加工で、磨き回数を 10, 30, 50 回に変えた場合の磨き加工後の X, Y 方向測定の表面粗さを示している。図 25(b)は同じ工具経路で、切り込み量を $-0.2, \pm 0.0, +0.2[\text{mm}]$ に変えた場合の表面粗さを示している。ここで $+0.2[\text{mm}]$ は、マイナス Z 方向に $0.2[\text{mm}]$ 切り込むことを示している。同図より、凹型円弧面では、切り込み $0.2[\text{mm}]$ で 10 回磨くことで目標の $0.2[\mu\text{m}]$ の磨きが可能であり、切り込み量 $0.0[\text{mm}]$ でも充分磨けることがわかった。

5. 3 凹凸型円弧曲面磨き加工実験の表面粗さ比較

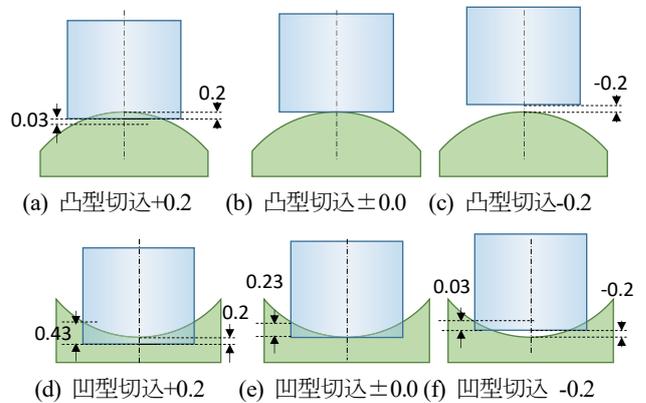
図 26 は凸型円弧面で磨くことができた切込量 0.2mm で、走査線 X 方向加工での凹型および凸型の円弧面の表面粗さを X, Y 方向に測定した結果を示している。同図より同じ切込量であれば、凹型円弧の方が良く磨け、10 回で凸型面では満たしていない、目標とする表面粗さ $Ra0.2[\mu\text{m}]$ を満たしていることがわかる。



(a) 測定方向 X (b) 測定方向 Y
図 26 凹型凸型円弧面の磨き精度

5. 4 凹凸型円弧曲面磨きにおける切り込み量の影響

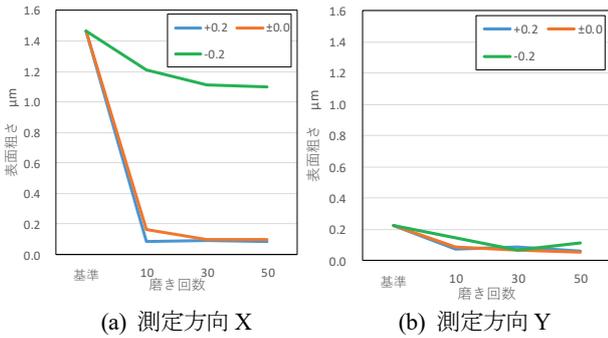
図 27 は凹凸型円弧面に $+0.2, \pm 0.0, -0.2[\text{mm}]$ の切込量を指定した場合のブラシの接触状態を示している。このように切込量 $-0.2[\text{mm}]$ の凸型円弧ではブラシが磨き面に接しないのに対し、凹面ではブラシ両端に $0.03[\text{mm}]$ の切込が生じることがわかる。



(a) 凸型切込+0.2 (b) 凸型切込±0.0 (c) 凸型切込-0.2
(d) 凹型切込+0.2 (e) 凹型切込±0.0 (f) 凹型切込 -0.2
図 27 凹型と凸型面での切込量の違い

そこで凹型円弧曲面での、この切込量および磨き回数の

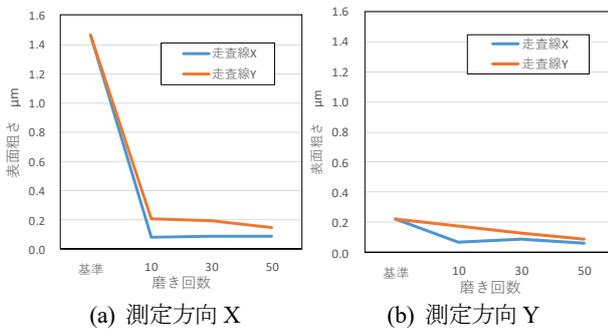
影響について磨き加工実験を行った。切込量は $-0.2, \pm 0.0, +0.2$ [mm]、磨き回数を10,30,50回として走査線X方向に加工実験を行った結果を図28に示す。同図より、磨きの効果は少ないが凹面の切込量 0.2 [mm]でも磨きが行われていることがわかる。また、切込量が ± 0.0 および $+0.2$ [mm]では磨き効果が現れ、10回の磨きで目標の 0.2 [μm]以下となり、10回磨くことで差が少なくなることがわかる。



(a) 測定方向 X (b) 測定方向 Y
図28 凹型円弧面での切込量の比較

5. 5 凹凸型円弧曲面磨きにおける工具経路の影響

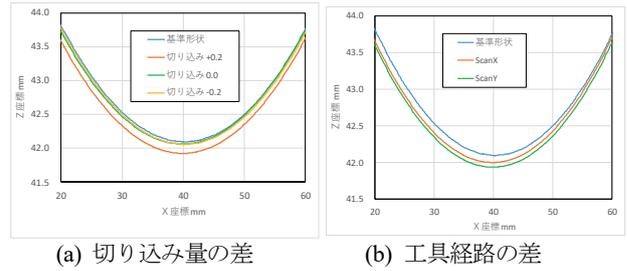
凹型磨き加工実験において図23(b), (c)に示す走査線工具経路 X, Y 方向加工での影響を調べた。図29は切込量が 0.2 [mm]の場合の、工具経路の違いによる磨き加工後の表面粗さを示している。同図より走査線では、基準面で得られた Y 方向のカस्प高さに対して直角に磨く走査線 X 方向の工具経路の方が良く磨けることがわかった。



(a) 測定方向 X (b) 測定方向 Y
図29 走査線加工方向の比較

5. 6 凹型円弧曲面磨きにおける幾何形状

凹型円弧面は凸型面より良く磨くことができるため、加工後の幾何形状を測定した。図30(a)は磨き回数10回、主軸回転数 4800 [rpm]、送り速度 1200 [mm/min]で走査線X方向に磨き加工を行った後のX方向断面を3次元測定器で測定した結果を示している。また図30(b)は同じ条件で切込量 0.2 [mm]で走査線工具経路X, Yでの断面形状を比較した結果を示している。同図より、切り込み量が $+0.2$ [mm]、走査線Y方向工具経路の方が、他に比べて磨き過ぎることが明らかになった⁶⁾。

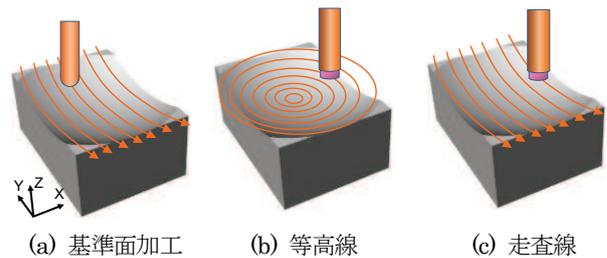


(a) 切り込み量の差 (b) 工具経路の差
図30 凹型円弧面の工具経路による幾何形状の比較

6. 凹型球面磨き加工の結果

6. 1 凹型球面磨き加工実験方法

凹型球面磨き加工実験を行うため、図31(a)に示すボールエンドミルで走査線工具経路を用いて $R120$ [mm]の半球面をカस्प高さ 5 [μm]になるように加工を行い基準面とした。そして図31(b), (c)に示す等高線および走査線工具経路を用いて球面の磨き加工を行った。磨き加工用に用いたブラシ径は 15 [mm]で、ピックフィード 1.5 [mm]で作成し、磨き検証実験を行った。図32はそれぞれの工具経路を用いて磨き加工を行った結果を示している。



(a) 基準面加工 (b) 等高線 (c) 走査線
図31 凹型球面磨き加工実験



(a) 基準面加工 (b) 等高線 (c) 走査線
図32 凹型球面磨き加工実験結果

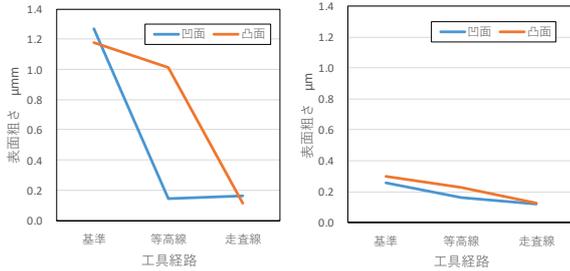
6. 2 凹型球面磨き加工実験の表面粗さ比較

図33は、磨き回数30回で切込量を 0.2 [mm]とした場合の凹型および凸型球面での工具経路による磨きの効果を示している。同図より走査線工具経路では磨きに差が無いが、等高線工具経路では凸型球面に比べ凹型球面の方が良く磨けていることがわかる。これは図27に示す切込量の差異が大きく影響していると考えられる。

6. 3 凹型球面磨き加工実験の工具経路比較

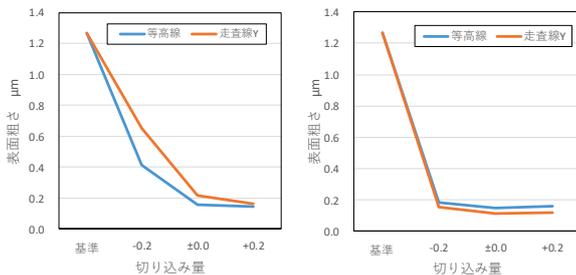
図34は等高線と走査線工具経路での切込量の違いを示している。同図より等高線、走査線経路共に切込量が増えるに従って良く磨けることがわかる。さらに同一切込量で

あれば、走査線工具経路より等高線工具経路の方が良く磨けることが明らかになった。



(a) 測定方向 X (b) 測定方向 Y

図 33 工具経路と切込量の比較

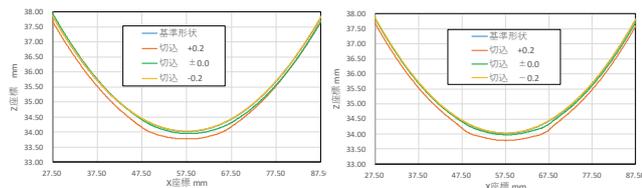


(a) 測定方向 X (b) 測定方向 Y

図 34 凹型凸型球面での工具経路の比較

6. 4 凹型球面磨きにおける幾何形状

磨き加工による幾何形状への影響を調べるため、磨き回数 30 回での凹型球面加工後の幾何形状について、3次元測定器を用いて断面形状の測定を行った。図 35 は球の磨き加工後の底面部分を拡大表示しており、同図より、工具経路に関係なく切込量が+0.2mm では磨き過ぎによる幾何形状の劣化が生じていることが明らかになった^[7]。



(a) 走査線工具経路 (b) 等高線工具経路

図 35 凹型球面の幾何形状

7. 結 言

ファイバーブラシを5軸制御することでオンマシンでの磨き加工を実現するCAMシステムの開発を目標とし、凹凸の円弧面、球面を対象に磨き加工実験を行った。その結果、3軸加工では正常に磨き加工を実現できず、幾何形状の劣化を招くことが明らかになり、提案する5軸制御の有用性が確認できた。また提案する手法により、凹凸円弧および球面の磨き加工が実現可能であることがわかった。ピックフィードについては、ブラシ束の半径である

1.5[mm]を用いて磨き加工を行い、粗磨き面よりも密磨き面で磨き加工を行う方が、表面粗さが良くなることわかった。また、送り速度や、主軸回転数はブラシメーカーの指示とは異なり、大きくしても磨きの効果は得られないことがわかった。今回の実験では、主軸回転数 1200[rpm]、送り速度 1200[mm/min]で効果が得られた。

しかし一方で、凹凸面での切込量の相違により、切り込み量±0.0[mm]においても、凹面では磨かないのに対して凹面では磨くことができ、凹凸面での切り込み量の意味が大きく異なることが明らかになった。また、同じ切り込み量では凹型面での磨き過ぎが生じるなど、同一半径形状の凹凸面においても、異なる対応をする必要がある事が示された。

今後は、凹凸を含む自由曲面に対応したCAMシステム開発および磨き過ぎないように凹凸で切り込みを制御するなど、加工条件の選定や形状に適した工具経路生成を行う必要がある。また、磨きについてブラシ以外に機上ポリッシングツールやPCD工具を用いた磨き加工への取り組みが必要となる。

参考文献

- [1] 大寄越彦：現場で役立つ射出成型金型磨き加工の勘どころ，日刊工業新聞社，2011，pp.82
- [2] 永田寅臣ほか：ボールエンド砥石のためのハイブリッド・モーシヨン力制御法の開発とペットボトル金型磨きロボットへの適用実験，精密工学会誌，70-1(2004)，pp.59-64
- [3] 三井和男：Rhino×Python コンピュータシヨナルデザイン入門，彰国社，pp.50，2017
- [4] 竹内芳美：多軸・複合加工用CAM，日刊工業新聞社，pp.41，2013
- [5] 池神奈徳美，藤尾三紀夫：ファーバーブラシの5軸制御に基づく磨き加工用CAMシステムの開発—基礎実験について—，2017年度精密工学会春季学術講演会，C66，2017
- [6] 櫻庭拓海，藤尾三紀夫：ファイバーブラシの5軸制御に基づく磨き加工用CAMシステムの開発—曲面加工における基礎実験の結果について—，2017年度精密工学会秋季学術講演会，J39，2017
- [7] 藤尾三紀夫，櫻庭拓海，中野齊可太：Development of an On-machine Polishing CAM system Based on Five-Axis Control - Application Result to Convex Surface -, Proc. of 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology, 87, 2018