

オンマシン自動磨き加工用5軸CAMシステムの開発

櫻庭拓海^{*1}, 藤尾三紀夫^{*2}

Development of an On-machine Polishing CAM System Based on Five-Axis Control
Takumi Sakuraba^{*1}, Mikio Fujio^{*2}

The polishing process requires skillful work and a long time to obtain a finished smooth surface of a die or mold. To reduce the polishing time, it is necessary to use an automated system such as a robot or an exclusive machine tool. Therefore, this work aims to develop an on-machine polishing CAM system based on five-axis control of a ceramic fiber abrasive brush, rubber polishing tool and PCD tool. Although the use of such brush has been shown to enable the automation of deburring and polishing of a flat surface, the brush was previously not suitable for the polishing a sculptured surface. In this research, the ceramic fiber abrasive brush is applying to an experiment as an example. The brush is controlled to fit the normal vector of a sculptured surface, thus enabling the polishing of the surface based on five-axis control of the machine tool and path generation CAM. To verify the effectiveness of the proposed method, we perform polishing experiments for convex surface and concave surface and provide results that demonstrate the suitability of our method. We compared roughness of the surface on these polishing surfaces.

Key Words: Ceramic Fiber Abrasive Brush, Polishing CAM, Five-axis Machine Tool, Five-axis Control

1. 諸言

ボールエンドミルを用いて切削加工を行うと、カッターマークに代表されるように加工表面に凹凸が生じる。そこで現在は主に磨き職人による手作業で凹凸をなくし、滑らかな面に仕上げている。この磨き処理は熟練の技を要すると同時に、金型製造工程の30%から40%程度の工程を占めるため、自動化と短縮化が要求されている[1]。そのため、磨き加工代替手法による自動化が切望され、ロボットの適用が研究されている。しかし、ティーチングが必要なため、金型の磨き加工においては、汎用性が低いのが現状である[2]。

そのため本研究では、5軸加工機に図1(a)に示す外形で、図1(b)の断面を持つセラミックファイバーブラシを用いたオンマシンでの磨き手法を提案する。このセラミックファイバーブラシは、主にバリの除去や平面の磨きに用いられ実績を挙げているが、ブラシの先端形状がフラットなため、現存のCAMでは自由曲面加工用パスの作成はできない。

そこで、本研究ではこのブラシを主軸に取り付け、NC

^{*1}専攻科

Advanced Course

^{*2}制御情報工学科

Department of Control & Computer Engineering

コードにより凸面と凹面によって構成される自由曲面の磨き加工が可能な汎用CAMシステムの開発を本研究の目的としている。この手法の利点は、既存の5軸加工機において汎用工具と同様にオンマシンで磨き加工が可能となり、コストを削減でき、導入が容易なことである。



(a)セラミックファイバーブラシ (b)ブラシ断面

図1 磨き用ブラシ

2. 磨き処理の提案手法

ファイバーブラシは、セラミックファイバーライン材を円筒形に束ねて砥石を構成している。このセラミックファイバーライン材の束の一つは半径1.5[mm]で、それらが図1のようにならってブラシの外周に沿って配置されており、ファイバーブラシの中心部分は図1(b)のように空洞になっている。ファイバーブラシ外径は5[mm]から25[mm]まであり、対応材料も樹脂から鋳物まで幅広い用途に対応している。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て用いることが可能であり、ATCを用いて汎用工具と同じ取り扱いができる。

本研究では、5軸制御によってファイバーブラシの向きを加工対象曲面の法線方向に傾けることで、様々な形状の自由曲面に対応する磨き加工CAMシステムを提案している。具体的には、図2に示すように、凹凸面共に加工面の法線ベクトル方向にファイバーブラシを傾けるように5軸制御することによって、ブラシの接地面積を増やし、ファイバーブラシを用いた曲面の磨き加工を実現する。

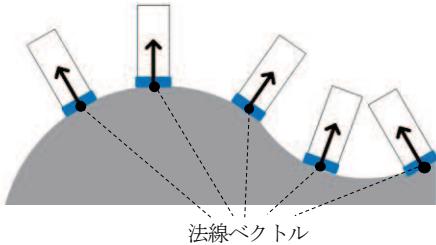


図2 自由曲面への対応

3. 磨き加工実験

3. 1 平面での磨き処理の加工実験

3. 1. 1 平面での磨き処理の加工実験方法

曲面加工を行う前に、まずはファイバーブラシで実際に平面の磨きが可能か検証するため3軸加工平面での磨き加工実験を行った。X80*Y115*Z50[mm]のアルミブロック(A5052)に対し、ピックフィード(pf)1.0[mm]としてφ10のボールエンドミルで全表面をY軸方向に切削加工した。この加工により得られる面はFPコンセプトに基づいた加工であり、理論上のカッスル高さは25[μm]となっている。

磨き加工実験ではこの加工表面を基準面とし、図3に示すように磨き領域を3つに区分し磨き加工を行った。一つ目は磨き加工を行わない基準面、二つ目はφ15のファイバーブラシでY方向のピックフィードを6.5[mm]でX軸方向に磨き加工を行った粗磨き面である。そして三つ目はピックフィードを1.5[mm]にした密磨き面である。また磨き領域の磨き回数を50回、100回、150回、主軸回転速度を4800[rpm]、主軸送り速度を1200[mm/min]とし、磨きの回数による表面性状の変化を確認した。

3. 1. 2 平面での磨き処理の加工実験結果

加工後に、図3に記した6つの計測点についてX軸方向に表面粗さを表面粗さ計で測定した。計測距離は測定箇所01, 02, 03, 11, 12, 13については約2.5[mm], 21, 22, 23については約10[mm]である。図4に6箇所(01~03, 11~13)の計測距離2.5[mm]での表面粗さ(Ra)を示す。また図5は、3箇所(21~23)の計測距離10[mm]での表面粗さ(Ra)を示している。

図4においては加工条件が同じであっても、基準となるべき切削加工後の基準表面粗さにすでにばらつきが生じ

ていることがわかる。同時に磨き加工後の表面粗さにも同様に測定位置によるばらつきが見られる。例えば測定点13では150回磨いた結果が最も表面粗さが大きくなってしまっている。

一方、図5のように測定点のみに着目した場合はばらつきがあるが、ファイバーブラシによる磨き処理を行うことで磨き処理を行わなかった基準面より表面粗さの値が小さくなっていることがわかる。また、磨きの回数が多い方が基準面に対してより粗さが小さくなっていることから平面における磨き処理でのファイバーブラシの有効性を確認することができた。

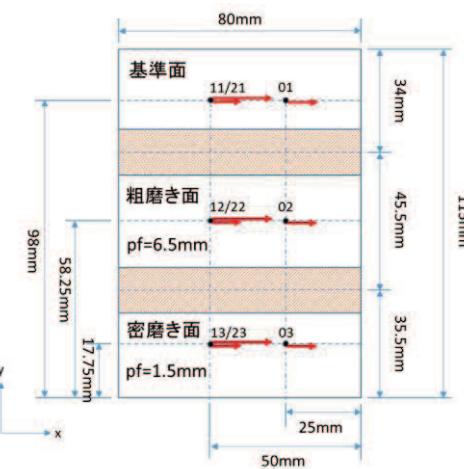


図3 加工領域

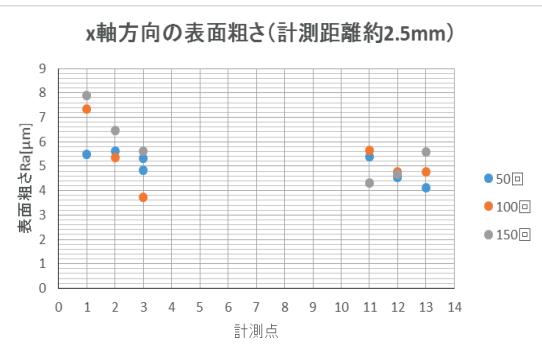


図4 計測距離約2.5[mm]の表面粗さ

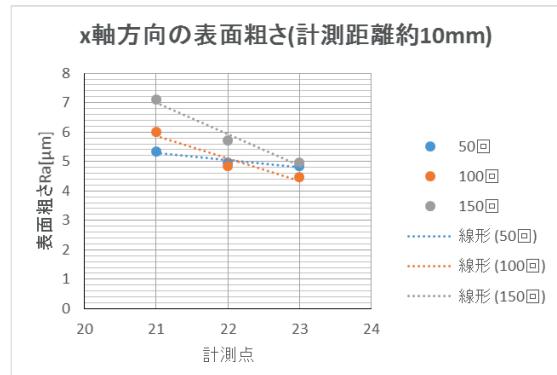


図5 計測距離約10[mm]の表面粗さ

3. 2 凸型円弧曲面での3軸と5軸制御磨き処理の加工実験

3. 2. 1 凸型円弧曲面での磨き処理の加工実験方法

平面でのブラシによる磨き加工が可能であることを確認できたため、凸型円弧曲面に3軸と5軸制御を適用し、効果が出るか検証を行った。磨き加工条件は磨き回数を50回、100回、150回、主軸回転速度を4800[rpm]、主軸送り速度を1200[mm/min]として、R120の凸型円弧のアルミブロックを基準形状としてX軸方向、Y軸方向それぞれに走査線工具経路で磨いた場合の加工実験を行った。

X軸方向磨きでは、図6に示すように平面の磨き実験と同様に、磨かない基準面、ピックフィード6[mm]の荒磨き面、ピックフィード1.5[mm]の密磨き面の3つの領域にわけ磨き加工を行った。そして、この円弧曲面に対しブラシを3軸制御と5軸制御のそれぞれで磨き加工を行った。磨き経路は同じものを使用し、5軸制御ではブラシを円弧曲面に垂直になるよう制御して、3軸では制御せずに磨き加工を行った。Y軸方向磨きでは図7に示すように、円弧曲面に対しブラシをY軸方向に3軸制御と5軸制御のそれぞれで磨き加工を行った。また磨き加工領域はX軸方向磨きとは異なり、密磨き面のみとした。

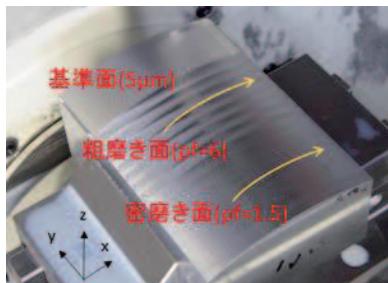


図6 凸型円弧曲面X軸方向磨き

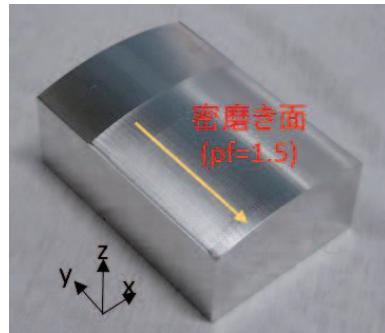


図7 凸型円弧曲面Y軸方向磨き

3. 2. 2 凸型円弧曲面での3軸と5軸制御による磨き処理の加工実験結果

加工後の表面について、3次元測定機でX軸方向とY軸方向に幾何形状の計測を行った。X軸方向磨きの結果を図8、Y軸方向磨きの結果を図9に示す。

X軸方向磨きにおいては、図8(a)の結果より3軸制御では磨きによって円弧曲面に仕上がらないことがわかる。ま

た、図8(b)より3軸制御ではY軸方向に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9(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により円弧曲面に仕上がらない。また、図9(b)の結果もX軸方向磨きと同様にY軸方向に磨きすぎによる段が発生していることがわかった。

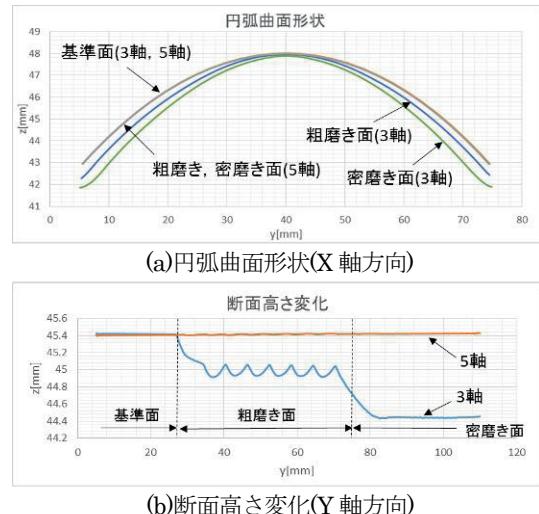


図8 3次元測定機による計測結果(X軸方向磨き)

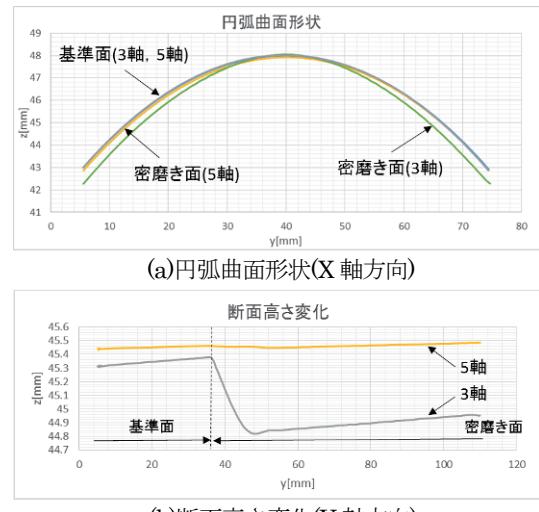


図9 3次元測定機による計測結果(Y軸方向磨き)

X軸方向とY軸方向それぞれにブラシを3軸制御、5軸制御して磨き加工を行った結果、3軸制御では削りすぎてしまい基準曲面形状を再現できないことが明らかになった。また、それぞれ加工表面をX軸方向に表面粗さ計で計測した結果を表1に示す。これより5軸制御した方が表面粗さの値が小さくなることがわかる。

表1 凸型円弧曲面におけるX軸方向の表面粗さ

	基準面	粗磨き面	密磨き面
X軸方向/3軸制御	1.3685	0.5068	0.5182
X軸方向/5軸制御	1.2020	0.6095	0.3312
Y軸方向/3軸制御	1.2952		0.8017
Y軸方向/5軸制御	1.1829		0.2645

また、粗磨き面と密磨き面に対し、Y軸方向に計測した表面粗さ（赤線）と表面形状（青線）を図10に示す。図10(a)より表面粗さとは別に加工表面にピックフィード6[mm]に依存する段が生じており、密磨きの方が精度良く磨けることが示された。

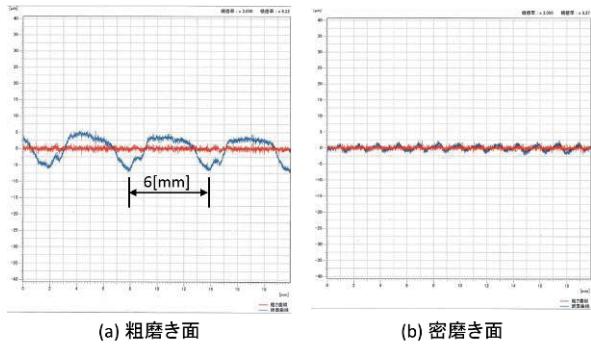


図10 Y軸方向の表面粗さと表面形状

以上より、曲面形状において5軸制御にてブラシを曲面に垂直になるように制御することで、幾何形状を劣化させずに磨き加工を行うことが可能であることが示された。また、粗磨き面よりも密磨き面の方が基準面の表面粗さが良くなることわかった。

3.3 凸型球面での磨き処理の加工実験

3.3.1 凸型球面での磨き処理の加工実験方法

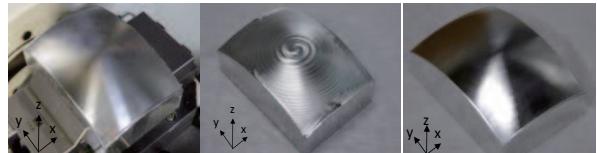
提案する5軸制御による磨き手法で3次元曲面加工ができるかを確認するため、凸型球面について3軸と5軸制御を適用し、有効性の検証を行った。基準形状はY軸方向にカプス高さ5[μm]になるようにボールエンドミルで切削加工されたR120の凸型球面のアルミブロックとした。磨き加工ではピークフィード1.5[mm]の等高線と走査線での磨き加工を全面に行った。

3.3.2 3軸制御加工と5軸制御加工の比較

基準形状の球面に対し、切り込み量0.2[mm]でファイバーブラシを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、形状の比較を行った。磨き経路は同じであり、5軸制御では直径15[mm]のファイバーブラシを球面に垂直になるように制御した。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11(a)は、磨き加工前の基準面であり、図11(b)は3軸制御による磨き加工後の形状である。そして、図11(c)は同じ工具先端位置で表面の法線方向にブラシを傾けた5軸制御での磨き加工後の形状の結果である。同図より、3軸制御の場合、明らかに段が発生し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、3軸制御では磨きすぎにより基準球面幾何形状を再現できないことが明らかになった。一方、5軸制御の場合の加工表面については幾何形状の劣化が生じていない。このことから、球面に

対しファイバーブラシを垂直になるように5軸制御することで、球面の磨き加工が可能であることを確認した。



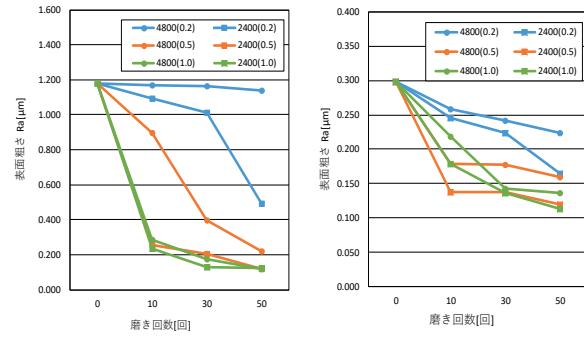
(a)基準面 (b)3軸制御磨き (c)5軸制御磨き

図11 基準面と磨き加工後の加工表面

3.3.3 等高線パスでの5軸制御磨き加工

5軸制御により球面の磨き処理が可能であることが確認できたため、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。メーカカタログでは主軸回転数が高く、切り込みが多いほど研削力は大きいとされている。そのため、加工条件として、主軸回転数を2400, 4800[rpm]に、切り込み量を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。

測定では、基準面でのカプス高さが残る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12(a)は5軸による磨き処理後のX方向の表面粗さを示しており、図12(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。しかし、主軸回転数についてはメーカーの指標とは逆に下げるほど表面粗さが良くなっていることがわかった。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。



(a)X方向の測定結果

(b)Y方向の測定結果

図12 等高線パス磨きにおける表面粗さ

加工後の表面形状を図13に示す。図13(a)はカプス高さが5[μm]の基準面である。図13(b)は切り込み0.5[mm]で主軸回転数4800[rpm]の50回磨き加工を行った加工表面であり、図13(c)は切り込み0.5[mm]で主軸回転数2400[rpm]の50回磨き加工を行った加工表面である。同図より、磨き面が表面粗さの値が示すように滑らかになつ

ていることがわかる。

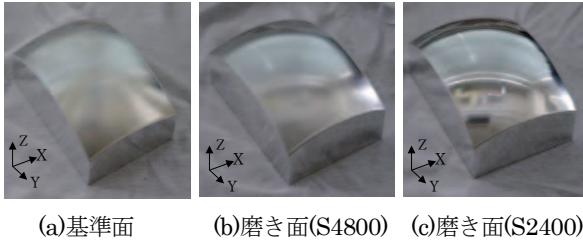
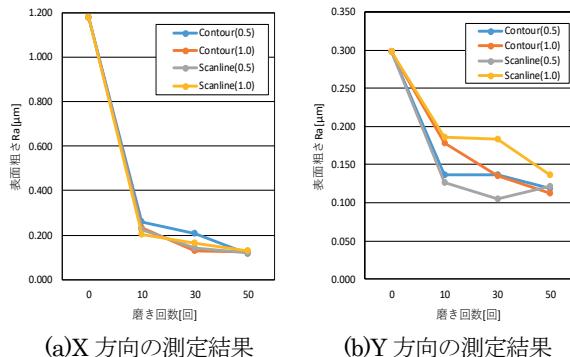


図 13 基準面と 50 回加工後の表面の比較

3. 3. 4 走査線パスでの 5 軸制御磨き加工

等高線パスと走査線パスを比較するため、等高線とは同じ球面を対象に X 方向への走査線パスでもピックフィード 1.5[mm]にして加工実験を行った。等高線での磨き精度と比較のため、加工条件は主軸回転数を 2400[rpm]に、切り込み量を 0.5, 1.0[mm]とし、10, 30, 50 回それぞれで磨き加工実験を行った。図 14(a)は磨き処理後の X 方向の表面粗さを示しており、図 14(b)は Y 方向の表面粗さを示している。グラフには等高線加工と走査線加工による結果を示している。同図より、等高線パスと同様に磨き回数による加工精度の違いはほとんど見られなかった。



(a) X 方向の測定結果 (b) Y 方向の測定結果

図 14 走査線磨きにおける表面粗さ

3. 4 凹型円弧曲面での磨き処理の加工実験

3. 4. 1 凹型円弧曲面での磨き処理の加工実験方法

提案する手法で凹型曲面加工もできるかを確認するため、凹型円弧曲面について 5 軸制御を適用し、有効性の検証を行った。走査線加工パスにより X 軸方向にカスプ高さ 5[μm]になるようにボールエンドミルで切削加工された半径 R120 の凹型円弧曲面のアルミブロックを基準面とした。磨き加工ではピックフィードを 1.5[mm]とした X 方向への走査線パスでの磨き加工を全面に行った。加工条件は切り込み量を -0.2, 0.0, +0.2[mm], 送り速度 1200[mm/min], 主軸回転数 4800[rpm]に設定し、磨き回数を 10, 30, 50 に変えて比較を行った。

3. 4. 2 凹型円弧曲面での磨き処理の加工実験結果

図 15(a)は磨き加工前(基準面)であり、図 15(b)は切り込み量 0.2[mm]で 10 回、図 15(c)は切り込み量 0.2[mm]で 30 回、図 15(d)は切り込み量 0.2[mm]で 50 回走査線磨き

加工後の形状を示している。基準面では、工具経路である Y 軸方向にカッターマークが見受けられたが磨き加工を行うことにより、マークが除去されていることが確認できた。また 10 回と 30 回の走査線磨き加工後は走査線方向のブラシによる加工跡が残ったが、50 回の走査線磨き加工後は加工跡が残らなかつたことから磨き回数が少ないとブラシの加工跡が残りやすいことが確認できた。

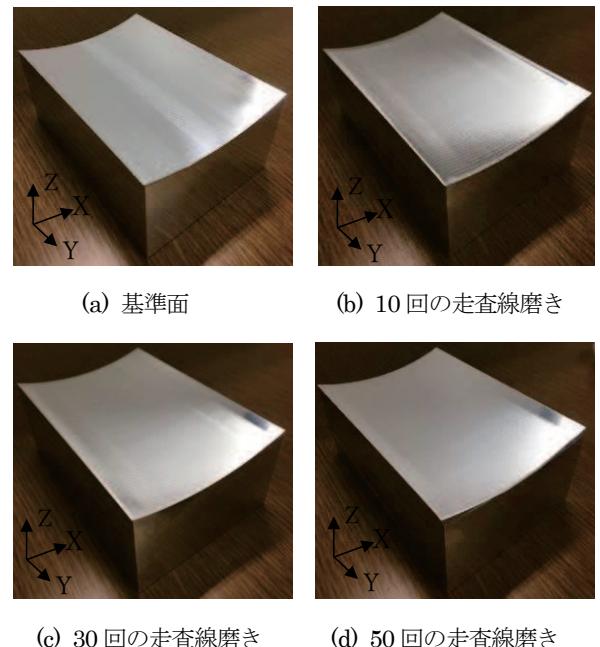


図 15 基準面と磨き加工面

磨き加工の効果を確認するため、基準面と走査線磨き加工後の表面を表面粗さ計によって測定した。加工面の表面粗さは X 方向 Y 方向それぞれ 2.5mm の測定長で加工面を測定した。表面粗さ計によって測定した基準面の X 軸方向の表面粗さ(Ra)を図 16 に、10 回磨きの X 軸方向の表面粗さ(Ra)を図 17 にそれぞれ示す。図 16 より、基準面の加工面の X 方向には、加工に用いたピックフィード 0.45[mm]の間隔があり、カスプ高さ 6[μm]が発生していることが確認できる。一方、図 17 から磨き加工によって、X 軸方向のカスプ高さが除去されていることが明らかになった。

基準面と磨き回数 10, 30, 50 の時の磨き加工面の X, Y 軸方向の表面粗さのグラフを図 18 に示す。同図から、カスプ高さが影響する X 軸方向の表面粗さは、わずか 10 回の磨き加工によって大幅に小さくなり、Y 軸方向も小さくなっていることがわかる。このことから、提案手法によって、ボールエンドミルによって生じるカスプ高さやカッターマークのような加工表面の凹凸を除去できることが確認できた。

次に同じ条件で磨き加工を行った凸型円弧曲面との表面粗さの測定結果[3]と比較を行った結果を表 2 に示す。この結果から同じ切り込み量であれば凹型円弧曲面の方が、

磨き量が多いことがわかる。これは、R120 の円弧に対して図 19(a)に示す凹面での切り込み量 0.2[mm]と図 19(b)の凸面の切り込み量 0.2[mm]において、最大切り込み量が凹面で 0.43[mm]、凸面で 0.2[mm]であり大きい差が存在することが原因である。

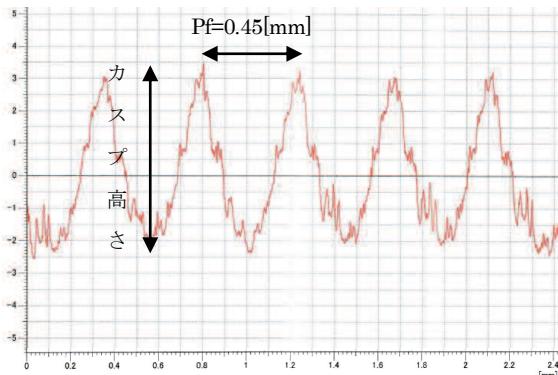


図 16 基準面の X 方向測定結果

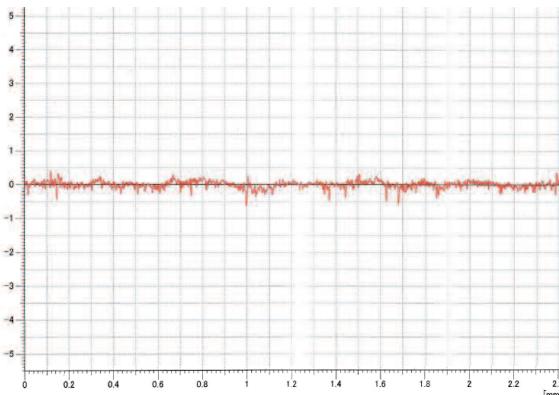


図 17 10 回の走査線磨きの X 方向測定結果

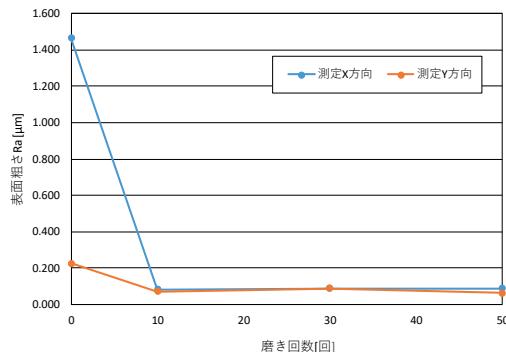
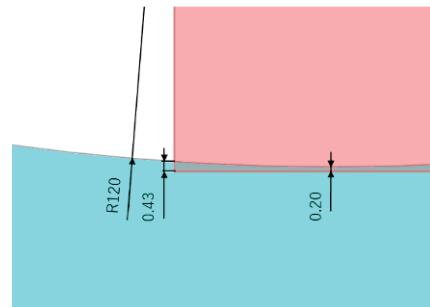


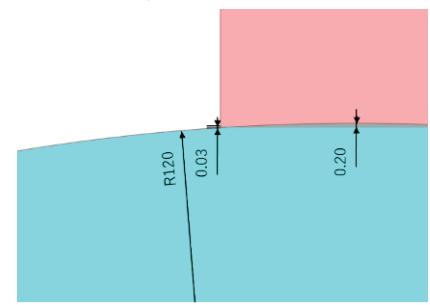
図 18 測定結果

表 2 凹と凸型円弧曲面の比較

	凹面		凸面	
	測定方向		測定方向	
回数	X	Y	X	Y
0	1.4652	0.2254	1.3885	0.2151
10	0.0816	0.0712	0.2107	0.2491
30	0.0876	0.0859	0.1763	0.1791
50	0.087	0.0608	0.2741	0.33



(a) 凹面の切り込み量



(b) 凸面の切り込み量

図 19 切り込み量(0.2mm)の比較

4. 結言

本研究では、ファイバーブラシを 5 軸制御し、工作機械上で様々な自由曲面に対応した磨きを自動的に行う磨き加工用 CAM システムを提案した。そして実際にファイバーブラシを曲面に垂直になるように 5 軸制御することで凸型、凹型円弧曲面と凸型球面について磨き加工が可能であることを検証し、その有効性を確認した。

また、凸面と凹面の磨き実験と比較し、ブラシの切り込み量の意味がそれぞれで違うことが確認できた。そのため自由曲面を同じ切り込み量で磨き加工を行うと表面粗さの値が凹面と凸面の箇所で変化すると考えられる。このため凹面と凸面での切り込み量を変化させた CAM システムを開発する必要がある。

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・モーショ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] 池神奈穂美, 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