

機関番号：52605
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21760105
 研究課題名（和文） ボールエンドミルを用いた同時多軸制御加工による表面凹凸の配列制御
 研究課題名（英文） CONTROL OF CUTTER MARKS ARRAY BY SIMULTANEOUS MULTI-AXIS CONTROLLED MILLING USING BALL-END MILL
 研究代表者
 松田 礼（MATSUDA HIROSHI）
 東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授
 研究者番号：30469580

研究成果の概要（和文）：ボールエンドミルで同時多軸制御加工によって形成される表面凹凸の配列を制御する手法の確立を目指した。平面加工時の切削痕を球面で近似する手法を提案し、解析と実験結果が概ね一致した。円筒面への同時 3 軸、4 軸制御の螺旋加工を行ない、同時 3 軸制御では直進軸と旋回軸の速度合成値を用いれば切削痕の幅が制御できることを示した。同時 4 軸制御では送り量が比較的小さいと切削痕の幅は計算値に近づくが、一定の法則を見出すには至らなかった。パッチ分割切削法を曲面に拡張し、任意形状の三角形パッチ内に切削痕を整列する手法を考案し、有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to control the cutter marks array generated with simultaneous multi-axis controlled milling by using ball-end mill. We propose an analysis method that uses spherical approximation of cutter marks. The experimental results agree well with the analytic results of the spherical approximation of cutter marks. Next, a cylindrical surface was machined along a spiral tool path by simultaneous multi-axis controlled milling. It was found that the cutter mark width in feed direction to the simultaneous 3-axis controlled milling can be controlled by using composition velocity of rotary and translational axes. And then, the experimental results of applying a patch division milling technique to a spherical surface are described. It is shown that the inclination angle of cutter marks array against the feed direction can be controlled by the appropriate setting of feed per tooth and cross feed for an arbitrary triangle patch.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：機械工作・生産工学，表面凹凸，ボールエンドミル，多軸制御加工，マシニングセンタ，精密部品加工

1. 研究開始当初の背景

機械部品や日用製品の表面には、様々な凹凸パターンが形成されているものが数多く存在しており、表面凹凸の配列や大きさによ

って摩擦力、流体抵抗、撥水性・親水性、光反射・屈折などの機械的特性が付与されている。本研究では加工時間が短く、最も一般的な形状創成方法である、ボールエンドミルを

用いた切削加工を対象としている。切削加工による表面凹凸の生成にはボールエンドミルが広く用いられており、インペラやタービンブレードのような複雑曲面の切削には、マシニングセンタ（以下 MC）による同時多軸制御加工が行なわれる。表面に形成される凹凸を任意に生成できれば、機械産業の中核をなす自動車、航空機、金型関連企業における機械加工分野に広く応用が可能となる。また、表面の微小な凹凸模様により装飾性を高めることも可能である。したがって、表面凹凸の配列制御により様々なパターンを形成する手法を明らかにし、適用範囲を自由曲面まで拡張できれば、ボールエンドミルによる形状創成と同時に表面に装飾性や物理的機能を付与できることになり、大変有用である。

2. 研究の目的

本研究では、ボールエンドミル加工によって表面に形成される凹凸模様を対象とし、同時多軸制御加工によって形成される表面凹凸の配列を制御する手法の確立を目的とする。加工対象面は曲面とし、形状精度を保持しつつ表面凹凸の配列を制御し、表面凹凸を均一に形成するための因子を切削実験と解析によって明らかにしていく。本研究は、大きく3つのステージから構成されている。

(1) 従来、ボールエンドミル加工における表面性状や切削抵抗の解析は、工具切れ刃を点の集合として考え、各点が回転しながら並進運動をするときの軌跡を追従し、繰り返し計算をする方法が広く用いられてきた。この解析手法は、工具回転による切削領域の変化や切削抵抗変動などの時間変化を解析する場合には大変有効であるが、簡単な幾何学計算で算出できないため、多くの切削条件から最適解を導いたり、複数の切削条件との関連性を明らかにしたりすることは難しい。そこで、ボールエンドミル切れ刃が加工面を通過する軌跡を球面で近似し、球面の集合から表面凹凸の稜線を算出する方法によって、加工面に創成される表面凹凸配列の予測を試みた。

(2) 複雑な形状を加工する場合、ボールエンドミルを使用するが、工具刃先と加工面の接触位置が大きく変動するため、表面粗さを均一にすることは難しい。これまでの研究から、平面における加工では、工具傾斜角度や偏心量が切削面に創成される表面凹凸の配列に影響を及ぼす因子であることが明らかになっている。しかしながら、近年増加している多軸制御工作機械による加工部品の表面に創成される凹凸パターンを制御することは大変困難である。同時多軸制御加工で曲面を加工する場合の直進軸と回転軸の送り速度変化、及び工具傾斜角度変化を解析し、表面

凹凸に及ぼす影響を調査する。

(3) ボールエンドミル加工により規則的表面模様を形成する加工方法であるパッチ分割切削法を拡張し、曲面上に配置された任意形状、寸法の三角形パッチ内部にカットマーク列を整列させる手法を提案した。これまでの研究において、ボールエンドミルを用いて加工面に規則的な凹凸模様を形成する加工戦略としてパッチ分割切削法を提案し、パッチ内のカットマークによる模様配列の制御に成功している。さらに、自由曲面を平面の三角形パッチ群で近似し、その内部に凹凸模様を形成する手法を提案したが、この場合、同一形状の三角形パッチで自由曲面上を覆いつくすことは不可能なため、各三角形パッチの形状は様々となり、それら任意形状の三角形パッチに対し、その内部に凹凸模様を規則正しく形成するには至っていなかった。そこで、任意の形状、寸法の平面三角形パッチ内部に凹凸模様配列を直線的に整列する手法を新たに提案する。さらに、整列したカットマーク列の傾きを任意の値に制御することを可能とする加工条件の設定方法を提案する。

3. 研究の方法

(1) ボールエンドミル切削痕の球面近似による表面凹凸の配列予測

表面凹凸の解析は傾斜平面に対する一方送りの走査線加工を対象とした。主軸回転速度が1刃あたりの送り量に比べて十分大きい仕上げ加工を想定し、ボールエンドミル切れ刃の通過軌跡を球面で近似して表面凹凸を解析する。ボールエンドミル加工による表面凹凸の配列と形状は、偏心量、工具傾斜角度、工具切れ刃の位相差によって決定することが分かっており、これらのパラメータは、表面凹凸を形成する切削痕の送り方向の幅 W_L を変化させる。そこで、 W_L と工具傾斜角度 β 、偏心量 e との幾何学的な関係を明らかにするために解析を行なった。

本手法は、2刃ボールエンドミルが傾斜平面を加工するとき、1刃ごとの回転によって創成される切削痕を1つの球面で表現する。

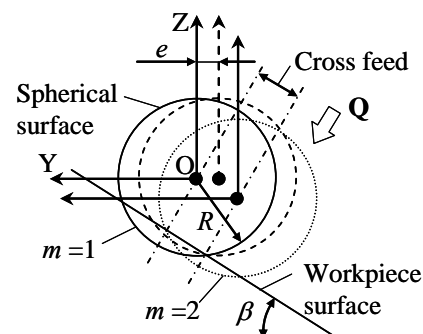


図1 球面近似の座標系定義

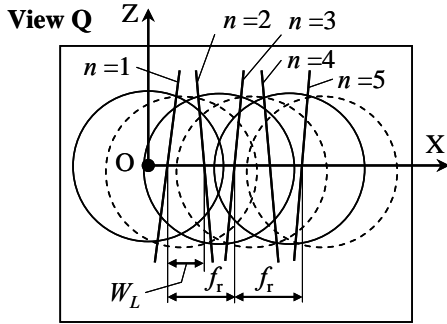


図2 球面近似における切削痕の幅の定義

図1に示すように、加工開始最初の切削痕の中心を原点Oとし、工具は回転しながらX軸方向に並進移動する。工具が e だけ偏心していると、切削痕の球面は工具の回転によりY軸方向に移動する。ここで、図2に示すような、2つの球面が重なる部分を平面の方程式で表すと、

$$\frac{F}{S}x_n - 4(-1)^n e \{y_n + (m-1)f_c \cos \beta\} - \left(\frac{F}{S}\right)^2 (2n-1) - \frac{Fh}{S}(m-1) = 0 \quad (1)$$

- F : 送り速度(mm/min)
- S : 主軸回転速度(min^{-1})
- e : 工具偏心量(mm)
- β : 工具傾斜角度($^\circ$)
- n : X軸方向の球面の重なり($n=1,2,3\dots$)
- m : m 番目のパス($m=1,2,3\dots$)
- f_c : クロスフィード量(mm)
- h : 隣接パスにおける送り方向のズレ量(mm)

となる。また、傾斜加工面の方程式は、

$$\sin \beta \cdot y_n - \cos \beta \cdot z_n - \frac{19R}{20} = 0 \quad (2)$$

となる。ここで、切り込み深さは仕上げ加工を想定して工具半径 R の $1/20$ としている。そして、式(1)と式(2)の2平面の交差による直線の方程式を求め、表面凹凸の送り方向の稜線を算出する。さらに、原点Oから傾斜平面に垂直な平面の方程式を算出し、これらの交点の x 成分を求めると W_L は、

$$W_L = x_{n+1} - x_n = \frac{19R}{20} \cdot \frac{8Se \sin \beta}{F} + \frac{F}{2S} \quad (3)$$

- ただし、 $0.5f_r \leq W_L \leq f_r$, $f_r = F/S$
- f_r : 工具1回転あたりの送り量(mm/rev)

となる。そして、式(3)を用いて W_L と e , β , R との関係について解析を行なった。

(2) 同時多軸制御加工による表面凹凸配列の解析

図3に、実験に使用した装置の概略を示す。直進3軸制御(XYZ軸)のMCのテーブル上に傾斜用ジグを介してNC円テーブルを載せ、

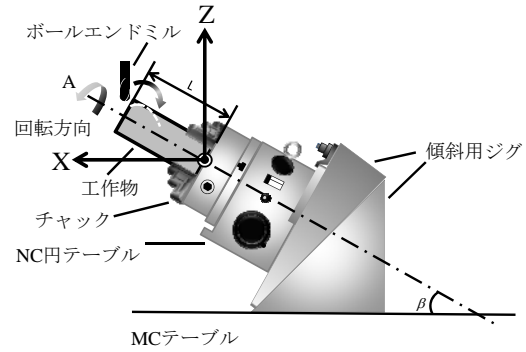


図3 同時多軸制御加工の実験装置概略図

工作物は3つ爪チャックで固定した。本研究では、同時3軸(直進2軸と旋回1軸)と同時4軸(直進3軸と旋回1軸)制御加工を行ない、解析を簡便にするため、円筒面上の螺旋経路の加工を採択した。同時3軸制御加工では工具をXZ平面上で円筒表面を直線的に移動させると同時にNC円テーブルを回転させる。同時4軸制御加工では、円筒面に沿う移動経路をY軸に対して傾斜させ、これにX, Z軸の移動量を加える。そして、工作物半径の切り込み量を考慮した補正を加えて工具経路を作成した。工具は刃先半径 $R=5\text{mm}$ の2枚刃ボールエンドミルを使用した。

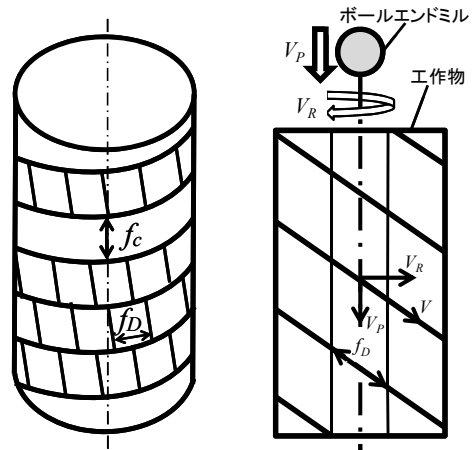


図4 同時多軸制御加工の解析パラメータと合成速度の定義

図4に、同時多軸制御加工実験における制御パラメータを示す。切削長 L は円筒面の傾斜方向に 30mm とし、円周方向に 180° の切削を螺旋間ピッチ(クロスフィード量) $f_c=0.5\text{mm}$ で行った。 f_d は螺旋経路に沿った工具1刃あたりの送り量を示している。同時3軸制御加工の場合、同図に示すように、 f_d は工具の送り速度 V_p と工作物の周速度 V_r の合成速度 V を S とボールエンドミルの刃数 N の積で割った値と考えることができる。NC円テーブル上で回転する工作物の周速度は、NC円テーブルの回転速度を $S_A[\text{min}^{-1}]$ とすると、

$$V_r = 2RS_A \pi \quad (4)$$

となり、工具1刃あたりの送り量 f_D は、

$$f_D = \frac{\sqrt{4S_A^2 R^2 \pi^2 + V_p^2}}{NS} \quad (5)$$

となる。ここで、 S と e は固定値とし、工具の送り速度 V_p と工作物の周速度 V_r を変えて f_D を決定し、実験結果との比較を行った。

(3) パッチ分割切削法による曲面への規則的表面凹凸形成

切削実験は、立て形マシニングセンタのテーブル上に、NC 傾斜円テーブルを搭載したテーブル旋回形5軸制御マシニングセンタを使用した。工具は刃先半径 $R=2\text{mm}$ で1枚刃のボールエンドミルを使用した。任意形状の三角形パッチでも cutter mark を直線上に整列させる方法を新たに提案するために、以下に導出する計算式で切削条件を決定して傾斜平面に加工した後、球面に適用した。

図5に任意の形状の三角形パッチ内を螺旋状の経路で加工する時の加工経路及び幾何学的関係を示す。 $l_1, l_2, l_3(\text{mm})$ は三角形パッチ一辺のそれぞれの長さ、 $\theta_A, \theta_B, \theta_C(\text{rad})$ は三角形パッチの内角であり、パッチ形状が定めれば決まる定数である。刃数 N の工具を選択した時、cutter mark を整列させるために調整可能な加工条件として、 $f_c(\text{mm})$ 、1刃あたりの送り量 $f_i(\text{mm/tooth})$ を変数として、cutter mark を整列させるよう決定する必要がある。

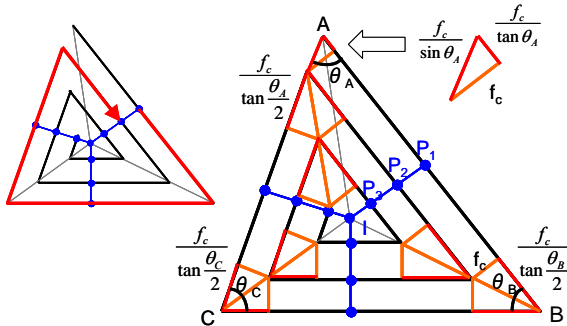


図5 螺旋経路と三角形パッチの幾何学的関係

三角形パッチの内心 I と各頂点を結んだ直線によって分割される3つの三角形を考え、 $\triangle IAB$ に着目する。 I から各辺に引いた垂線と螺旋状の工具経路との交点を外側から $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ とおく。クロスフィード量 f_c を一定とすると隣り合う点 P_n から点 P_{n+1} に至る間の加工経路上の工具移動距離 $L_{n \rightarrow n+1}(\text{mm})$ は、

$$L_{n \rightarrow n+1} = l_1 + l_2 + l_3 - \frac{f_c}{\tan \theta_A} - \frac{f_c}{\sin \theta_A} - 2f_c \left\{ \left(\tan \frac{\theta_A}{2} \right)^{-1} + \left(\tan \frac{\theta_B}{2} \right)^{-1} + \left(\tan \frac{\theta_C}{2} \right)^{-1} \right\} (n-1) \quad (6)$$

となり、点 P_n からパッチ内を一巡し、点 P_{n+1} に至るまでの工具回転角度 $\lambda_{n \rightarrow n+1}(\text{rad})$ は、

$$\lambda_{n \rightarrow n+1} = 2\pi \left[\frac{l_1 + l_2 + l_3 - f_c \left\{ \left(\tan \frac{\theta_A}{2} \right)^{-1} + \left(\sin \theta_A \right)^{-1} \right\}}{Nf_i} \right] - 2\pi \left[\frac{2f_c \left\{ \left(\tan \frac{\theta_A}{2} \right)^{-1} + \left(\tan \frac{\theta_B}{2} \right)^{-1} + \left(\tan \frac{\theta_C}{2} \right)^{-1} \right\}}{Nf_i} \right] (n-1) = d_1 + \Delta\lambda(n-1) \quad (7)$$

となる。 $d_1(\text{rad})$ 、 $\Delta\lambda(\text{rad})$ はパッチ形状、寸法、および N, f_i, f_c が決まれば定数とみなすことができる。したがって、式(7)より、 $\lambda_{n \rightarrow n+1}$ はパッチ内の螺旋状の工具経路の周回数 n に対して、初項 d_1 、公差 $\Delta\lambda$ の等差数列になると考えることができる。 $\triangle IBC, \triangle ICA$ も同様な等差数列となり、 $\Delta\lambda$ は全ての領域で同値となる。つまり、 $\Delta\lambda$ が 2π の整数倍となるように、 f_c, f_i を決定すれば、3つの領域全てにおいて直線上に整列したcutter mark列を形成できる。また、パッチ内のcutter mark配列の傾きも $3 \sim 8^\circ$ 程度のトレランスを許すことで、任意に設定することが可能になる。

4. 研究成果

(1) ボールエンドミル切削痕の球面近似による表面凹凸の配列予測

図6に、 $R=5\text{mm}$ として β を 5° から 60° まで増加させたときの W_L と e の関係を示す。同図によると、 e が増加すると W_L は増加し、工具1回転あたりの送り量 f_i に等しくなると一定になることが分かる。また、 β が大きくなると W_L の増加割合が大きくなり、 W_L が一定になる e が小さくなる。

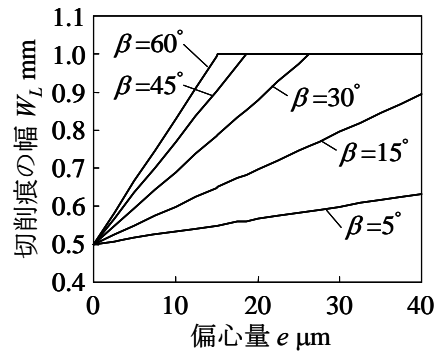


図6 偏心率と切削痕の幅の関係

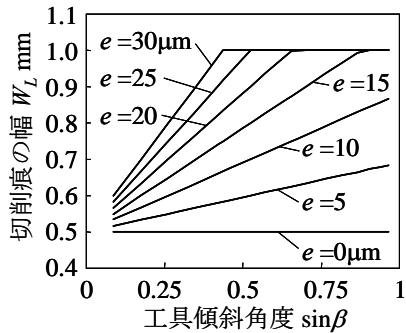


図7 工具傾斜角度と切削痕の幅の関係

図7に、 $R=5\text{mm}$ として e を0から $40\mu\text{m}$ まで

増加させたときの W_L と $\sin\beta$ の関係を示す。同図によると、図 6 と同様に、 e が大きくなると W_L の増加割合が大きくなり、 W_L が一定になる β が小さくなる。これらの結果は、 R が異なる場合でも同様の傾向を示す。これらの結果について、式(3)から検証すると、 W_L は e 、及び β の正弦成分に比例して増加し、偏心量 e が 0 のとき、 W_L は切片の値である工具 1 回転あたりの送り量 f_r の 1/2 に等しくなることが分かる。また、 $RS/F (=R/f_r)$ の値が同じであれば、 e と β の正弦成分に対する W_L の増加率は同じになる。さらに、 W_L は f_r に反比例していることから、 R を変えずに f_r を小さくすると、 e が小さい値で W_L は一定値($=f_r$)に到達する、つまり、 W_L は e の影響を受けにくくなる。

以上の解析結果をもとに、同一条件で切削実験を行ったところ、 e と β に対する W_L の増加傾向は概ね一致したことから、本研究で考案したボールエンドミルの切削痕を球面で近似する方法は、表面凹凸配列の解析に有効な手法であることが確認できた。

(2) 同時多軸制御加工による表面凹凸配列の解析

① 図 8 に、同時 3 軸制御加工で f_D の計算値を変えて実験した結果を示す。同図をみると、送り方向に大きさが異なる 2 種類の切削痕が交互に創成されていることが分かる。また、 f_D が小さくなると、2 枚の切れ刃の内、片方のみで切削している状態に近づいている。 f_D を小さくすることは f_r を小さくすることと同じであるため、この結果は、平面加工と同様、刃先半径 R が同じ場合、 f_r が小さいほど W_L は e の影響を受けにくくなることを意味する。

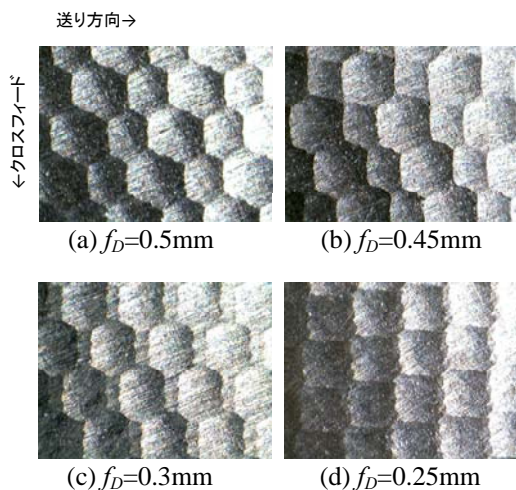


図 8 同時 3 軸制御加工による送り方向の幅と表面凹凸の変化

また、 f_D を測定した結果、計算値とよく一致した。以上の結果から、直進 2 軸+旋回 1 軸の同時 3 軸制御加工の場合、工具の送り速度と主軸回転速度を合成した速度を用いれば、

平面加工と同様の手法で切削痕の幅を予測できることが分かった。

② 図 9 に、同時 4 軸制御加工で f_D の計算値を変えて実験した結果を示す。ここで、1 つの切削条件で得られた加工面に対し、加工開始箇所付近を点 A、加工中間地点を点 B、終端付近を点 C としている。同図(a)によると、

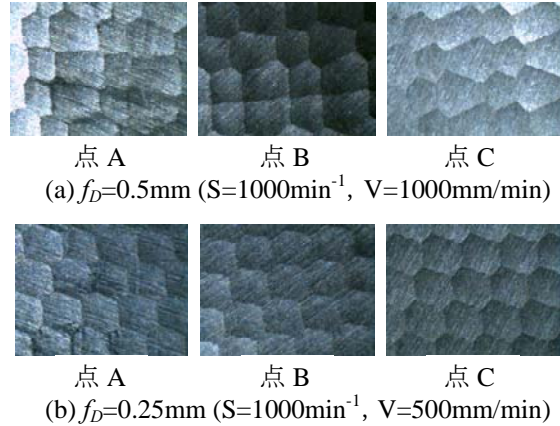


図 9 同時 4 軸制御加工による送り方向の幅と表面凹凸の変化

同時 4 軸制御加工によって創成される表面凹凸は、加工箇所により形状と配列が異なっていることが分かる。これに対し、同図(b)をみると、切削箇所による表面凹凸の形状や配列に大きな違いはみられない。これは、刃先と工作物の接触位置の変化による切り込み量の変動が原因であると考えられるが、 f_D が小さくなるとこの傾向はみられなくなり、計算値は測定値に近づく。この結果を踏まえて、 f_D を変えずに主軸回転速度 S と合成送り速度 V を調整して実験を行ったが、上述の傾向は変わらなかった。したがって、現段階では、直進 3 軸+旋回 1 軸の同時 4 軸制御加工は同時 3 軸制御加工と同様の方法で表面凹凸の配列を制御することはできないと考えられるが、詳細については今後の課題である。

(3) パッチ分割切削法による曲面上への規則的凹凸の創成

任意形状・寸法の三角形パッチ内部に Cutter マークを整列させる手法を球面上に配置した三角形パッチ群に適用し、シミュレーション及び切削実験においてその有効性を検証した。球面上の一部を 8 つのパッチに分割し、左右対称の箇所は同条件とする。各パッチ内部のそれぞれの領域の Cutter マーク列を直線上に整列させ、かつ、直線上に整列した Cutter マーク列がパッチ各辺に対して垂直になるような 1 刃当たりの送り量 f_i と対応した送り速度 F をパッチ毎に算出する。図 10(a)に左右対称の加工面の左半分の部分のシミュレーション結果を示す。また、図 10(b)に切削実験の結果の左半分の拡大図、図 10(c)

に切削実験の結果の全体図を示す。シミュレーション結果，切削実験結果共に，各パッチ内部のそれぞれの領域のカッターマーク列を直線上に整理させ，かつ，直線上に整理したカッターマーク列がパッチ各辺に対して垂直になっており，パッチ毎に切削条件を変えることで上記の手法が曲面にも十分適用できることが明らかとなった。

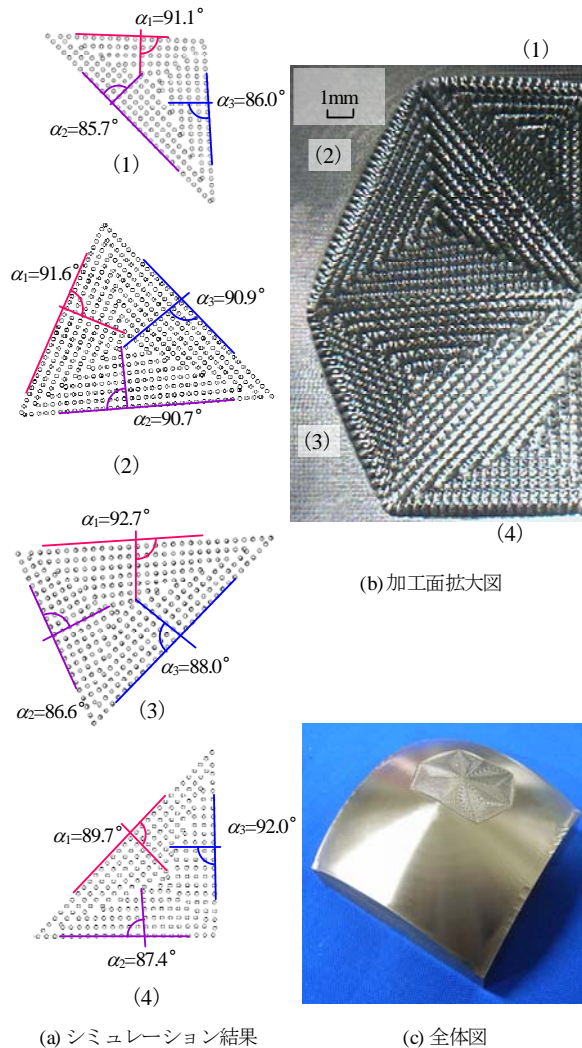


図 10 パッチ分割切削法の球面への適用と任意三角形パッチ内の配列傾斜制御 ($\alpha_1=90\pm 8^\circ, \alpha_2=90\pm 8^\circ, \alpha_3=90\pm 8^\circ$)

- (1) ($f_r=0.42\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=419.365\text{mm/min}, f_c=0.444\text{mm}$)
- (2) ($f_r=0.363\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=362.854\text{mm/min}, f_c=0.45\text{mm}$)
- (3) ($f_r=0.445\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=445.377\text{mm/min}, f_c=0.444\text{mm}$)
- (4) ($f_r=0.429\text{mm/tooth}, S=1000\text{min}^{-1}, F=429.836\text{mm/min}, f_c=0.444\text{mm}$)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 福田理明, 笹原弘之, 松田礼, 堤正臣, パッチ分割切削法による任意三角形パッチ内への規則的 surface 模様形成, 精密工学会誌, 査読有, 76 巻 1 号, 2010, pp.111-115

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 黒田耕介, 松田礼, 笹原弘之, パッチ分割切削法による二重らせん工具経路を用いた周期的凹凸表面模様形成, 型技術ワークショップ 2010, 2010-11, pp.12-13
- ② 黒田耕介, 松田礼, 笹原弘之, パッチ分割切削法による多重周期的凹凸表面模様形成, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2010-9, pp.41-42
- ③ Hiroshi Matsuda, Hiroyuki Sasahara and Masaomi Tsutsumi, Geometric Analysis of Surface Pattern by Spherical Approximation of Cutter Marks Array Generated with Ball-end Milling, International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2010, 2010-9, pp.342-345
- ④ 松田礼, 笹原弘之, 堤正臣, ボールエンドミル切削痕の球面近似による仕上げ面凹凸模様の配列予測, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2010-3, 239-240

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 礼 (MATSUDA HIROSHI)
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授
研究者番号：30469580

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

笹原 弘之 (SASAHARA HIROYUKI)
東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授
研究者番号：00205882

(4) 研究協力者

久保 俊裕 (KUBO TOSHIHIRO)
東京都立産業技術高等専門学校・創造工学専攻・専攻科
柳生 秀矩 (YAGYU HIDENORI)
東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・ロボット工学コース (現ダイキン工業株式会社)