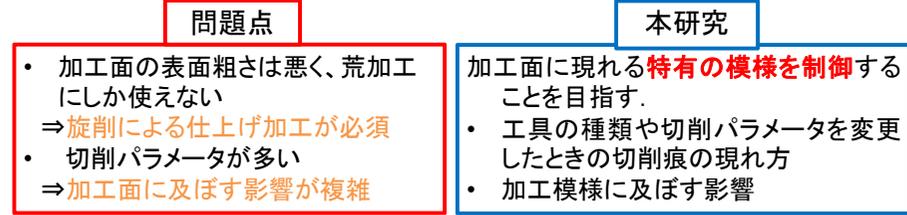
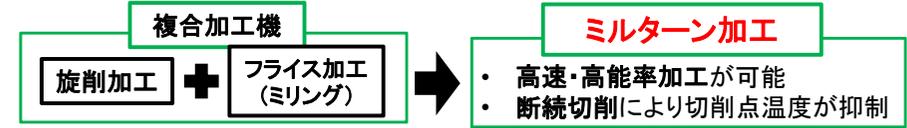


ミルターン加工による 機能的・装飾的な 表面仕上げの実現

2019.9.13

工学部 機械工学科
教授 井原 之敏

研究開発の背景

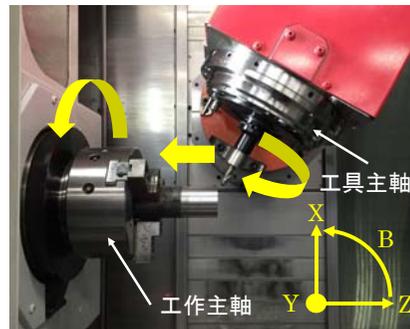


ミルターン加工

ミルターン加工・・・工具主軸と工作主軸を同時回転させながら
ミリング工具を用いて外形切削を行う加工方法

利点

- ・高速・高能率加工が可能
- ・切り屑処理性の向上
- ・工具摩耗が抑制できる
- ・切削油を使わないドライ加工が可能



ミルターン加工の外観図

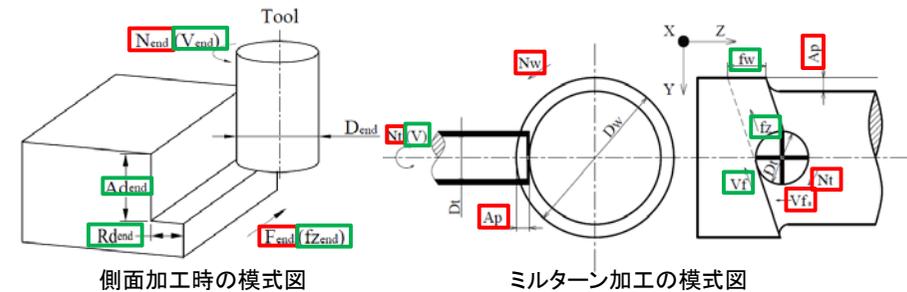
問題点

- ・加工断面が多角形状となり、特有の螺旋模様が生成される
=> 旋削による仕上げ加工が必須
- ・旋削加工とミリング加工の組み合わせた加工法であるため、切削パラメータが多い
=> 加工面に及ぼす影響が複雑

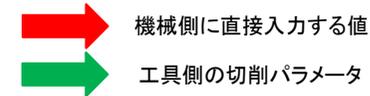


難削材の用途に代表されるジェットエンジン

多くの切削パラメータが存在する



工具直径	D_{end} [mm]
工具回転数	N_{end} [rpm]
工具の送り速度	F_{end} [mm/min]
軸方向切込み深さ	A_{dend} [mm]
半径方向切込み深さ	R_{dend} [mm]
切削速度	V_{end} [m/min]
1刃当たりの送り量	$f_{z_{end}}$ [mm/tooth]

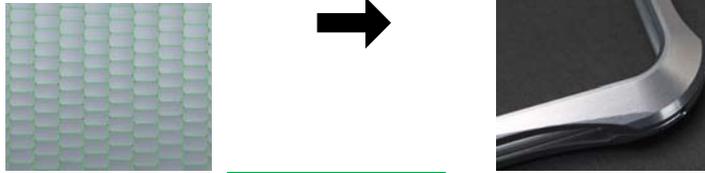
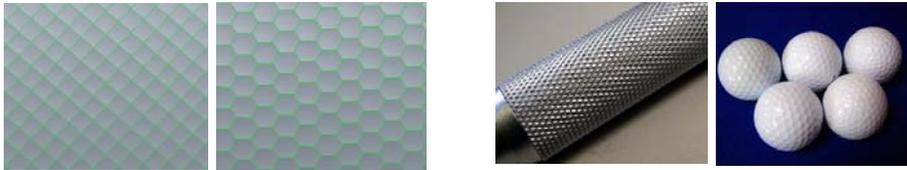


工具直径	D_t [mm]
ワーク直径	D_w [rpm]
工具回転数	N_t [rpm]
ワーク軸方向の送り速度	V_{f_a} [mm/min]
ワーク回転数	N_w [rpm]
切込み深さ	A_p [mm]
切削速度	V [m/min]
1刃当たりの送り量	f_z [mm/tooth]
ワーク1回転当たりの送り量	f_w [mm/rev]
送り速度	V_f [mm/tooth]

切削痕シミュレーション

加工模様を制御したい

滑り止めやデザイン性のある製品に応用したい

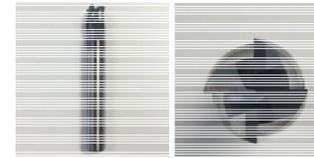


目的

- 予備実験として3次元CADを用いる
- 加工模様が生成される過程を検証する

使用工具の例

スクエアエンドミル



側面

底面

推奨切削条件 (平面加工時)

製品番号	GSX4C-1D
直径 [mm]	10
刃数 [-]	4
材種	超硬
切削速度 [m/min]	301.593
1刃あたりの送り量 [mm/tooth]	0.070
切込み深さ (軸方向) [mm]	0.1
切込み深さ (半径方向) [mm]	8.0

ボールエンドミル



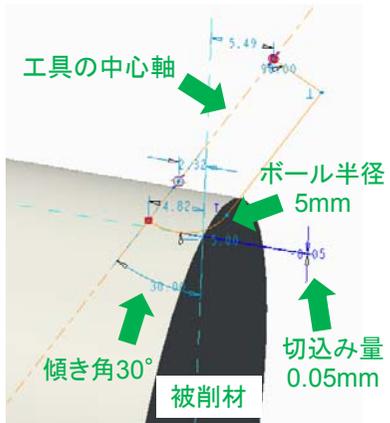
側面

底面

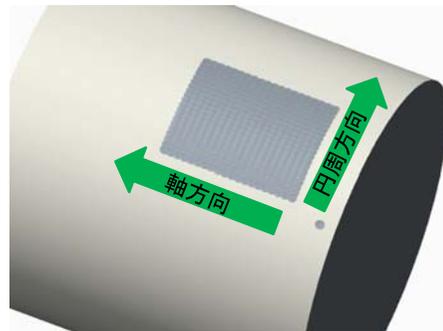
推奨切削条件 (側面加工時)

製品番号	2PLXSR5
直径 [mm]	10
刃数 [-]	2
ボール半径 [mm]	5
材種	超硬
切削速度 [m/min]	138.23
1刃あたりの送り量 [mm/tooth]	0.131
切込み深さ (軸方向) [mm]	0.5
切込み深さ (半径方向) [mm]	0.6

切削痕シミュレーション (ボールエンドミル)



シミュレーションの様子



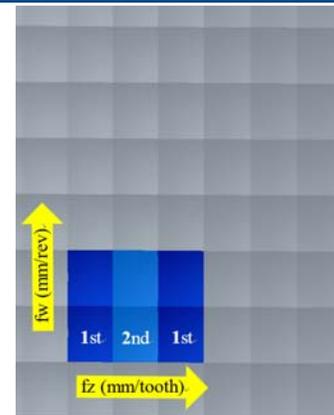
刃先形状の寸法

市販の3D CADソフトを使用

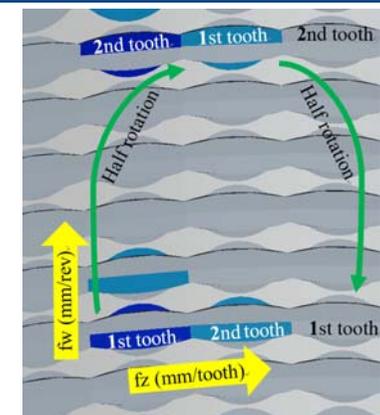
シミュレーションパラメータ

円周方向	1刃あたりの円周方向送り角度 [°]
軸方向	1刃あたりの軸方向送り量 [mm/tooth]

切削痕シミュレーション



ボールエンドミルの加工模様

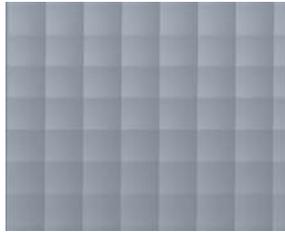


スクエアエンドミルの加工模様

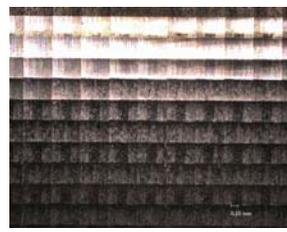
様々な加工模様が生成される過程を検証することができる

切削痕シミュレーション

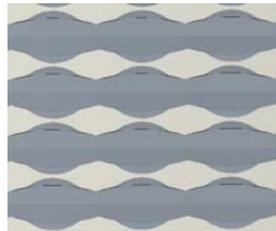
ボールエンドミル



実加工による加工模様



スクエアエンドミル

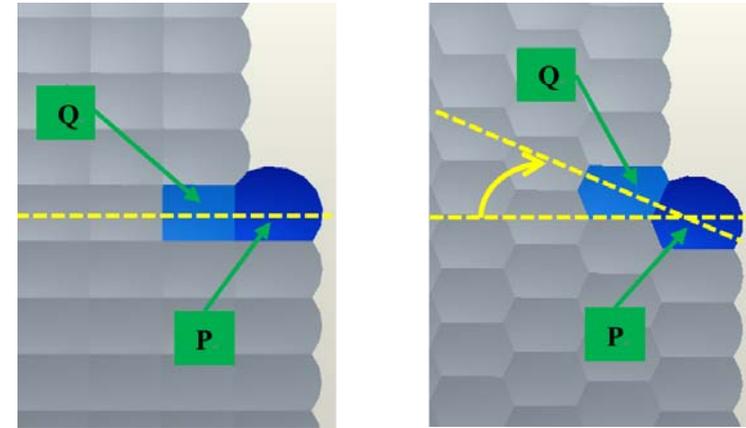


実加工による加工模様



予備実験として利用可能

主軸の回転速度と加工模様の関係



回転数比⇒整数

回転数比⇒非整数

- ・回転数比が整数の場合 ⇒ 切削痕Qがワーク軸線上に存在する
- ・回転数比が非整数の場合 ⇒ 切削痕Qがワーク軸線上からズレる

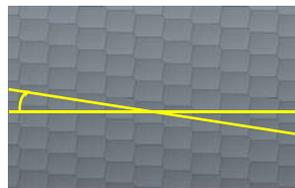


螺旋模様の傾斜角度は回転数比に依存し、回転速度の誤差が加工模様に影響する。

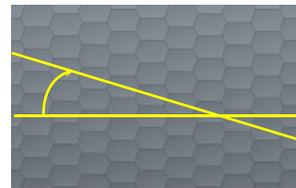
シミュレーションと実験結果の比較



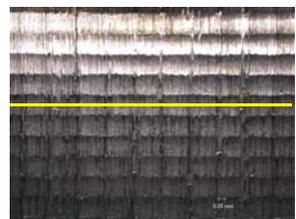
$N_z=200.0$



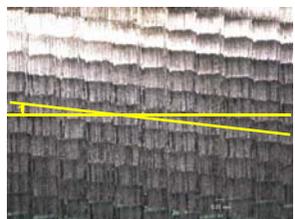
$N_z=200.2$



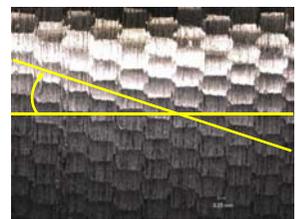
$N_z=200.4$



$N_z=200.4$



$N_z=201.6$



$N_z=200.8$

工具回転数3000~3024rpm, ワーク回転数30rpmにおいて, 切削回数0.4回分の差がある。したがって, 工具またはワーク回転数に回転速度誤差が生じている。

回転速度の測定

工具主軸側(回転計)

条件	測定日	指令値[rpm]	実効値[rpm]	指令値との差[rpm]
条件1	①5月9日(約4:30)	3000	2997.2	-2.8
	②5月10日(約2:00)		2996.4	-3.6
	③5月11日(暖機なし)		2996.4	-3.6
条件2	①5月9日(約4:30)	3003	2999.2	-3.8
	②5月10日(約2:00)		2999.4	-3.6
	③5月11日(暖機なし)		2999.8	-3.2
条件3	①5月9日(約4:30)	3006	3002.4	-3.6
	②5月10日(約2:00)		3002.6	-3.4
	③5月11日(暖機なし)		3003.4	-2.6

条件	測定日	指令値[rpm]	実効値[rpm]	指令値との差[rpm]
条件4	①5月9日(約4:30)	3012	3008.6	-3.4
	②5月10日(約2:00)		3008.2	-3.8
	③5月11日(暖機なし)		3007.8	-4.2
条件5	①5月9日(約4:30)	3018	3014.0	-4.0
	②5月10日(約2:00)		3014.0	-4.0
	③5月11日(暖機なし)		3013.4	-4.6
条件6	①5月9日(約4:30)	3024	3019.8	-4.2
	②5月10日(約2:00)		3020.2	-3.8
	③5月11日(暖機なし)		3020.0	-4.0

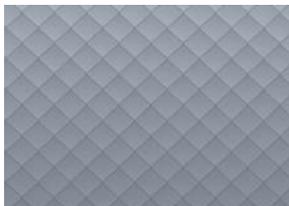
工作主軸側(回転計)

条件	回転方向	指令値[rpm]	実効値[rpm]	指令値との差[rpm]
条件1~4	時計回り	30	29.5	-0.5
	反時計回り		29.1	-0.9

再現性がよいので、補正可能

回転速度誤差を考慮した実験

切削回数: 200.5

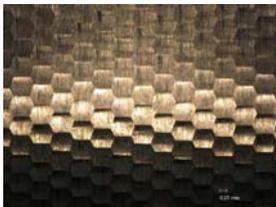


工具の送り速度
12.0mm/min
• $f_{zb}=0.767\text{mm/tooth}$
• $f_w=0.40\text{mm/rev}$

切削回数: 200.8



工具の送り速度
22.5mm/min
• $f_{zb}=0.767\text{mm/tooth}$
• $f_w=0.75\text{mm/rev}$



回転速度誤差が発生しても工具回転数で切削回数を調整し、おおよそ同様の加工模様を生成できる。

13

切削痕形状の制御

加工模様の応用

デザイン性



滑り止め

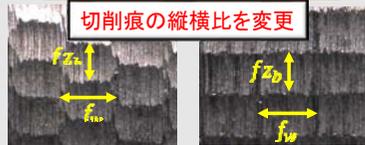


機械的特性の向上



特徴的な加工模様

切削痕の縦横比を変更



横長の六角形形状

長方形形状

切削痕の大きさ

縦方向 切削痕をさらに小さく .0mm

実験目的

- ワーク1回転当たりの送り量を変更することで特徴的な加工模様が生成できるか
- 切削痕形状を維持したまま切削痕をどれほど縮小できるか

14

様々な切削痕形状



fw=1.0



fw=0.8



fw=0.6



fw=0.4

工具回転数	N_t [rpm]	3006
ワーク回転数	N_w [mm/rev]	30
工具の送り速度	V_{fs} [mm/min]	30.0~12.0
ワーク1回転当たりの送り量	f_w [mm/rev]	1.0~0.4
1刃あたりの円周方向送り量	V_{fb} [mm/tooth]	0.768
切削回数		200.4

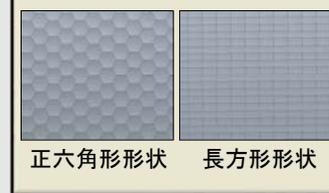
ワーク1回転当たりの送り量を小さくすると、上下の辺の長さが短くなり横長の六角形形状がひし形形状に変化する。

15

被削材直径が加工模様に及ぼす影響

実験目的

特徴的な加工模様



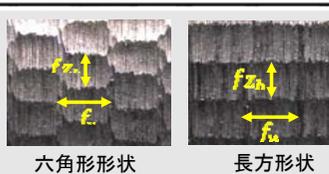
正六角形形状

長方形形状



曲率(直径)が異なる製品

滑り止め



六角形形状

長方形形状



直径100mm

直径50mm

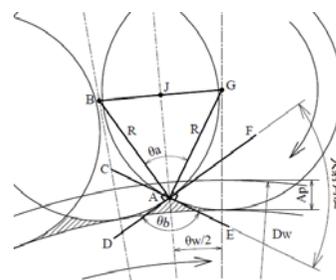
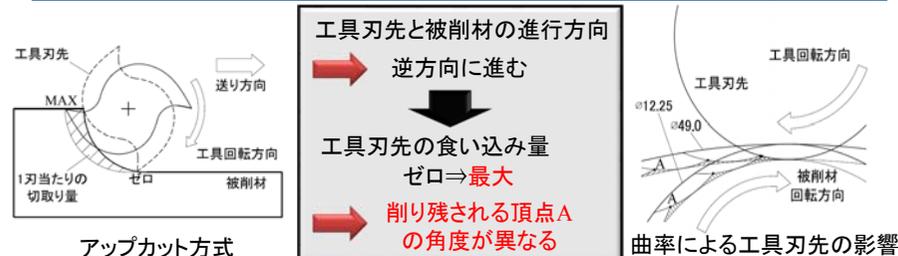
切削痕形状および大きさに影響

切削痕形状および大きさに影響

16



17 17



頂点Aにおける山の拡大図

2辺のなす角度	θ_a [°]
頂点Aにおける山の角度	θ_b [°]
1刃当たりの円周方向送り角度	θ_w [°]
ボール半径	R [mm]
軸方向切込み量	A_p [mm]
ワーク直径	D_w [mm]

$$\theta_a = \frac{f_z}{R} \times \frac{180}{\pi} \text{ (平面形状)}$$

$$\theta_a = f_z \times \left(\frac{1}{R} + \frac{2}{D_w} - \frac{2A_p}{R \times D_w} \right) \times \frac{180}{\pi} \text{ (円筒形状)}$$

$$\theta_b = 180 - \theta_a$$

18

今後の展望

いままでの成果

回転数比の影響

- 傾斜角度は、**切削回数的小数部分**に影響
- 工具回転数**で回転速度誤差の補正
- NCの表示値**を用いて、ある程度加工模様の制御が可能

切削痕形状の制御

- ワーク1回転当たりの送り量を調節することで**ひし形形状**の加工模様が生成できる (ハニカム模様の切削痕)
- 工具振れや刃先精度**などの影響を考慮

曲率の影響

- 工具の**入射角度**が**明瞭度合・表面粗さ**に影響
- 同様の切削痕形状・大きさを一様に施せない (**回転速度誤差**)
- 同様の切削痕形状を一様に施せる

ボールエンドミル



特徴的な切削痕

- 正方形形状
- 長方形形状
- ひし形形状
- 正六角形形状

今後の作業

正面フライス スクエアエンド ミル ラジラスエンドミル



刃先形状が異なるため、加工模様の応用が期待できる

- 異なる刃先形状の工具を用いて特徴的な加工模様の生成
- 製品の応用に向けて径が異なる部分に一般的な加工模様を付加
- 軸方向切込み量の値を変更 (切削痕の深さ)
- 被削材の材質を変更 (S50C以外)

さらに、

- 加工機械側の問題点を解決
 - ・ 回転速度の誤差 → 高精度な主軸を開発
- 鮮やかな模様を生成するには？
 - ・ 工具の開発が必要
 - ・ 工具主軸側の角度やオフセットなど、さまざまなパラメータ設定
- 細かい模様を生成するには？
 - ・ 小型で回転精度、特に回転数の誤差が小さい主軸を持った機械が必要
- もっと手軽に利用するには？
 - ・ 複合加工機でなく、一般のターニングセンタを使用した技術開発

ご清聴ありがとうございました

20