

樹脂材料の適正な切削条件に関する研究

田中 等幸 横山 哲也

Examination on Cutting Condition for Resin Material

Tomoyuki TANAKA Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 本研究所は自動切削加工機（modeling R社製 MDX-5000R）を導入し、試験的に県内企業に開放したところ、利用者から切削条件に関する相談が複数寄せられた。そこで本研究では、樹脂材料の中でも比較的安価で、被削性が良いABS樹脂を対象とし、切削条件の違いによる表面粗さへの影響と、作業効率を考慮した適正な切削条件について検討を行った。具体的には、40×40×100mmのABS樹脂に対して 6mmエンドミルによる側面切削加工を行い、加工面の表面の測定・解析及び切屑の観察を行った。その結果、送り速度が表面粗さに強く影響を及ぼし、高回転・低送りの条件が加工面の表面粗さを良好にする知見が得られた。また、表面粗さと切削条件の関係を示す重回帰直線を導き、表面粗さ1 μ m未満を条件とする効率的な切削条件は、回転数8000rpm、送り速度2000mm/min、切込み幅1mm及び切込み量0.7mmであることを実験的に確認した。

キーワード ABS樹脂, 切削条件, 切削加工

1. はじめに

岐阜県では県内企業の支援策として、開発助成や補助金など資金的な支援を行っている。本研究所では、各種研修会やセミナーの開催や企業が抱かえる固有の問題などに対する技術相談や受託研究を実施し、技術的な側面から支援を行っている。県内企業においては、多種多様な顧客ニーズに対して、短時間で具現化するための効率的な技術開発が求められており、これに関連する技術相談や期待が寄せられていた。その支援策の一環として、本研究所では財団法人日本自動車振興会の自転車等機械工業振興補助事業を受け、新たに自動切削加工機（modeling R社製 MDX-5000R）を導入した。今年度、この切削加工機を試験的に開放し、利用頻度、加工時間及び使用材料などのデータの蓄積を図ったが、利用者から切削条件に関する相談が複数あった。一般に切削条件は材料、工具、加工機の剛性など多くの要因によって決定され、それは切削加工のノウハウとして一意に決定されるものではない。しかしながら、本切削加工機を開放試験機として広く利用されることを視野に入れた場合、樹脂材料ごとに切削条件と切削加工面の表面粗さの関係や効率的に切削するための条件を明らかにし、利便性の向上を図る必要がある。

そこで本研究では、樹脂材料の中でも比較的安価で、被削性が良いABS樹脂を対象とし、切削実験を行い、測定・解析によって切削条件による切削加工面の表面粗さへの影響を検討する。また、できるだけ切削時間を短縮するための適正な切削条件についても検討する。

2. 実験方法

実験に使用する材料、工具及び加工機を表1に示す。工具は日進工具社製樹脂用エンドミル（6mm、超硬ソリッド、2枚刃、ねじれ角30°）を使用した。切削方法は図1に示すように、側面の1パス加工とし、加工方向はY軸方向への一軸送りとした。表2に切削条件を示す。回転数[rpm]、送り速度[mm/min]、切込み速度[mm/min]、切込み幅[mm]及び切込み量[mm]はCAM（CNC社製 Mastercam）で設定可能なパラメータであり、これらの諸因子が切削加工面の仕上がりや加工時間に影響を及ぼす。また水準値はメーカ推奨値を含む上下限值とした。表2に示す条件の場合、4つの因子における各水準の組み合わせを全て作成すると16通りあるが、実験に要する時間を短縮するため、直交配列表に基づく実験計画法^[3]を利用

表1 実験材料・設備

材料	ABS樹脂（40×40×100mm）
加工機	modeling R社製 MDX-5000R
工具	日進工具社製 RSE230φ6mm
潤滑・冷却	エアブロー

表2 切削条件

因子		水準1	水準2
A	回転数 [rpm]	8000	4000
B	送速度 [mm/min]	2500	1250
C	切込み幅 [mm]	3.0	1.5
D	切込み量 [mm]	0.5	0.25

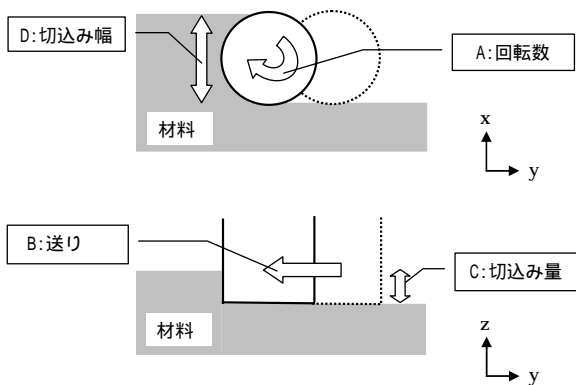


図1 切削機構図（上段：上面図 下段：側面図）

表3 実験リスト

実験番号	回転数 [rpm]	送り速度 [mm/min]	切込み幅 [mm]	切込み量 [mm]
1	8000	2500	3.0	0.50
2	8000	2500	1.5	0.25
3	8000	1250	3.0	0.25
4	8000	1250	1.5	0.50
5	4000	2500	3.0	0.25
6	4000	2500	1.5	0.50
7	4000	1250	3.0	0.50
8	4000	1250	1.5	0.25

し、表3に示す8通りの実験リストを作成した。なお、切込み速度はメーカーの推奨値である1440mm/minとした。

実験後は表面粗さ測定機（Taylor Hobson社製）を用いて、算術平均表面粗さ（以下、Ra）を測定した（JIS規格カットオフ0.8mm，評価の長さ4mm）。測定箇所は切削片の中央付近の4箇所とし、測定方向は工具の送り方向とした。また、電子顕微鏡による切屑の観察を行い、マイクロメータで厚みを測定した。

3. 結果及び考察

3.1 切削加工面の表面粗さ

図2は実験ごとに4箇所の表面粗さの平均と分散をプロットしたものである。実験3、実験4、実験7及び実験8の順にRaが良好な粗さとなった。これらの条件に共通することは、いずれも送り速度が1250mm/minであることから、表面粗さは送り速度に起因しているものと予想される。図3は横軸に送り速度、縦軸に表面粗さの平均値としてプロットしたものである。工具回転数が4000rpm、8000rpmともに送り速度が小さい（1250mm/min）と表面粗さが良好となる傾向にあるが、この傾向は8000rpmで顕著であり交互作用が確認された。これは実験による誤差によるものであるかを調べるため、回転数と送り速度の交互作用を含めた分散分析を行った。表4の結果から送り速度と交互作用が有意水準1%で有意となり、表面粗さは送り速度の影響を強く受けるが、その影響は特定の回転数で著し

表4 分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	分散比	判定
回転数	0.000	1	0.000	0.0	
送り速度	2.385	1	2.385	111.0	**
切込み幅	0.026	1	0.026	1.2	
切込み量	0.028	1	0.028	1.3	
交互作用	0.274	1	0.274	12.7	**
誤差	0.559	26	0.021		
計	3.272	31			

**有意水準1%

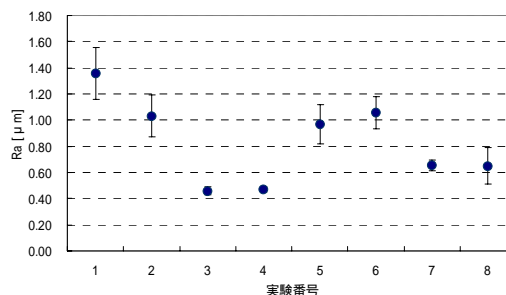


図2 切削加工面の表面粗さ

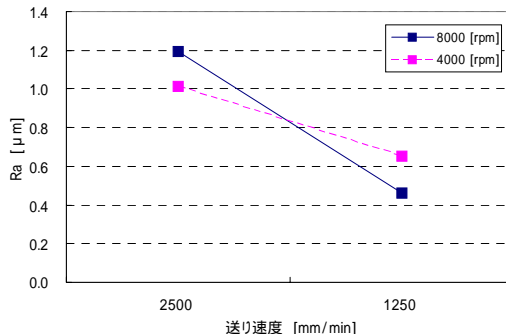


図3 回転数・送り速度別の表面粗さ

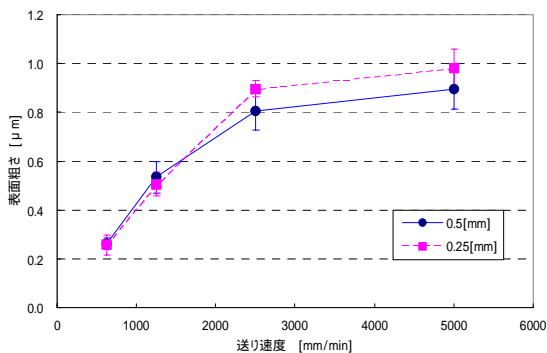


図4 表面粗さと送り速度

い現象であると言える。次に、表面粗さが最も小さかった実験3と、最も大きかった実験1の切削条件を対象として、送り速度の違いによるRaを測定した。なお、実験1と実験3の条件の違いは切込み量である。図4は送り速度を625, 1250, 2500,及び5000 mm/minに変化させたときの表面粗さと送り速度との関係を示している。送り速度を小さくするに従ってRaは良好になるが、1250mm/minより小さくすると切削条件による差はなかった。

3.2 切屑の形態観察

一般に、切削状態の診断には切屑の形態を調べることが有効であることが知られている^[1,2]。形態は表面がなめらかで連続した流れ形、周期的に深いクラックがある激しい形態の剪断形及び、バラバラな小片に分断した亀裂形の3種類に大別される。図5は切屑を電子顕微鏡によって撮影したものである。大きさの違いは単位時間当たりの切削体積（送り速度×切込み幅×切込み量）が作用したものであると考えられるが、いずれの切屑もカールした流れ形であり、形態から切削の状0態を判断するのは難しい。また、幅方向のひろがりを見れば、切削比は切削の良否の指標であり、厚さhの部分で削ってきた切屑の厚さをhcとすると、切削比Chは式(1)で定義される。

この式はChの値が小さいほど、切屑は大きなひずみを受けており、切削抵抗が大きいことを示している。マイクロメータを使用して切屑10片の厚みを測定し、平均値と切込み量から切削比を求めた。表5の結果から、切屑の厚みと切込み量から推測される関係は認められず、むしろ回転数と送り速度との組み合わせが切屑の厚みと関係があると予想された。つまり、高回転・低送りの条件である実験3,4の切削条件のとき、切削比は大きい値を示し、逆に低回転・高送りの条件である実験5,6の時、切削比は小さい値を示す傾向にあると言える。

$$C_h = \frac{h}{h_c} \tag{1}$$

表5 切削比

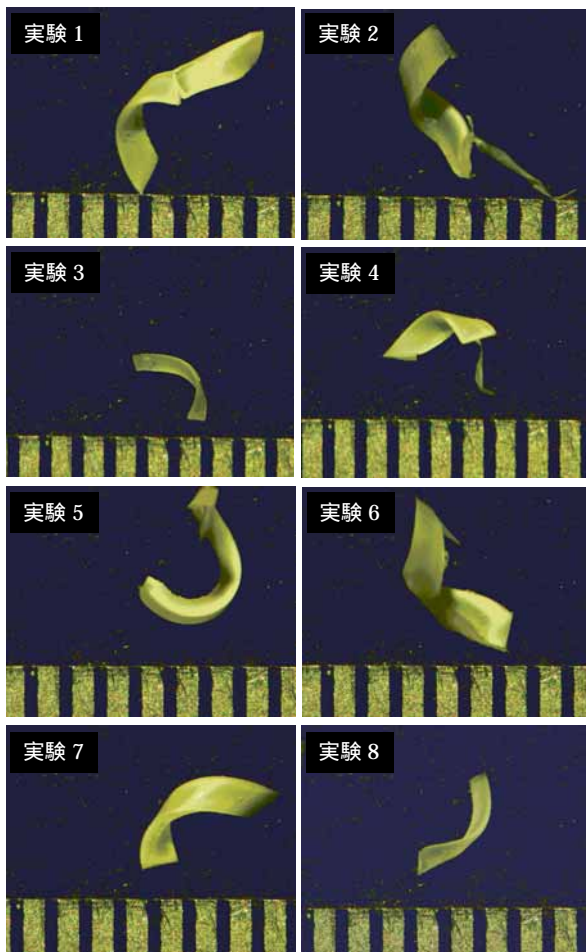
実番号	1	2	3	4	5	6	7	8
切削比	3.01	1.11	2.16	3.97	0.71	1.15	1.85	1.61

3.3 切削条件の最適化

Raと回転数、送り速度、切込み幅及び切込み量の4つの条件因子との関係を式(2)に示す1次式で近似する。なお、RをRa、Aを回転数、Bを送り速度、Cを切込み幅そしてDを切込み量とし、a、b、c、d及びeを未知係数とする。

$$R = aA + bB + cC + dD + e \tag{2}$$

図2で示した実験結果から最小二乗法によって回帰式を求めた(式(4))。表6は偏回帰係数を標準化偏回帰係数として示したものである。この係数からも、Raに関しては送り速度が著しく影響することが分る。これまでの解析によって、送り速度を小さく設定するとRaは良好になる知見が得られたが、実際の作業においては、目標とするRaの値以下に抑え、可能な限り効率良く加工することが求められる。そのため、式(4)の制約条件の下で、式(3)に示す単位時間当たりの切削体積を目的関数とする最適な切削条件を求める。式(4)は式(2)に回帰係数を当てはめたRaと切削条件の関係式、及びそれぞれの条件の使用範囲を示している。したがって、指定されたRを満足し、単位時間当たりの切削体積Zを最大化するときの切削条件が最適解となる。最適解の計算は、回転数は1000-8000rpmまでの1000rpm刻み、送り速度は1000-5000 mm/minまでの1000 mm/min刻み、切込み幅と切込み量は0.1-1.0 mmまでの0.1mm刻みとしてRaが1 μm未満を満足するときの切削条件の組み合わせを総当り方式で求めた。その結果、単位時間当たりの切削体積を1400mm³/minとする8通りの最適解が求められたが、高回転・低送り最もRaが良好であることを考慮すると、6mmエンドミル使用時のABS樹脂の側面加工における最も効率的な切



スケールサイズ0.5mm

図5 切屑の形態

削条件は、回転数8000rpm，送り速度2000mm/min，切込み幅1.0mm及び切込み量0.7mmが最適な切削条件であると考えられる．求めた最適条件によるRaの誤差を確認するため，実際に側面切削加工を行い，表面粗さを測定した．その結果，推定値と実測値とのRaの誤差平均（n=6）は0.248 μm，誤差分散0.00467 μm²となり，回帰式が実験値とほぼ一致することを確認した．

目的関数：

$$Z = B \times C \times D \quad (3)$$

制約条件：

$$\begin{cases} R = -5.16 \times 10^{-7} A + 0.000437 B + 0.0382 C + 0.427 D - 0.232 \\ 1000 \leq A \leq 8000 \\ 1000 \leq B \leq 5000 \\ 0.1 \leq C \leq 1.0 \\ 0.1 \leq D \leq 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

表6 標準化偏回帰係数

変数名	係数
回転数 A	-0.003
送り速度 B	0.909
切込み幅 C	0.095
切込み量 D	0.178

4. まとめ

ABS樹脂を対象とし，切削実験を行い，測定・解析によって切削条件による切削加工面の表面粗さへの影響と作業効率を考慮した適正な切削条件について検討を行った．具体的には，直交配列表に基づく実験計画法によって実験リストを作成し，6mmエンドミルを用いて側面切削加工を行い，表面粗さを測定した．測定データの統計的解析と切屑の観察から，加工表面に影響を及ぼす要因について検討した．その結果，送り速度が仕上がり面の表面粗さに最も影響を及ぼし，高回転・低送りの条件が表面粗さを良好にすると知見が得られた．次に，重回帰分析によって切削条件と表面粗さとの関係式を導き，Raが1 μm未満で最も作業効率的のよい切削条件は回転数8000rpm，送り速度2000mm/min，切込み幅1.0mm及び切込み量0.7mmであることが推定された（6mmエンドミル使用時）．この切削条件を用いて実際に切削加工したところ，推定値が実験値とほぼ同様な結果が得られることを確認した．

今後はさらに切削条件とRaとの関係式の精度を高めるとともに，他の樹脂材料やエンドミルの違いによる適正な切削条件を蓄積し，自動切削加工機の利便性を図ることで，企業の試作加工の一助となることを考えている．

謝 辞

本研究の表面粗さ測定は岐阜県機械材料研究所で行いました．測定器の準備と測定中の多大なる協力に深く感謝いたします．

文 献

- [1] 嵯峨常生，中西佑二他，“機械工作2”，実教出版，pp.23-47，2003.
- [2] 本田巨範，“旋盤加工マニュアル”，大河出版，pp.62-79，2003.
- [3] 森口繁一，“統計的方法”，日本規格協会，pp.179-198，1993.
- [4] 赤羽輝夫，柏崎親彦，大橋利仙，“難削材の高速切削加工技術”，栃木県産業技術センター 研究報告，No.4，pp.105-109，2007.
- [5] 米山陽，石黒輝雄，寺澤章裕，“高硬度材料の切削加工に関する研究（第2報）”，山梨県工業技術センター 研究報告，No.21，pp.79-83，2007.
- [6] 吉村千秋，西村通喜，岩崎智彦，藤原和徳，中西廣行，“ABS樹脂の適正旋削加工条件の確立”，山梨県工業技術センター 研究報告，No.15，pp.123-125，2001.