

## エンドミルによる焼入鋼切削条件の選定方法\*

和合 健\*\*、若槻 正明\*\*、堀田 昌宏\*\*、  
飯村 崇\*\*、多田 三郎\*\*\*

切削加工において加工精度、工具寿命、加工能率のすべてを同時に最適化することは難しい。このため、作業者が作業毎に加工目的に応じて加工条件を調整することが重要である。本研究では、二段階設計法を応用した異なる二回の実験を行うことで加工条件の選定方法を試みた。第一段階で転写性を基本にオフラインによる最適化を行い、第二段階で簡易寿命試験を行い損失関数により工具寿命と加工能率を損失に変換し同次元として評価した。そこで、工具寿命と加工能率の関係から、加工目的に応じた最適な切削速度を求めることができた。

キーワード：損失関数、工具寿命、加工能率、切削速度、焼入鋼

## Select Way of Milling Cutting Condition for Hardened Steel

WAGO Takeshi, WAKATUKI Masaaki, HOTTA Masahiro,  
IIMURA Takashi and TADA Saburo

It is necessary to adjust cutting condition the purpose of working object by worker at every working time, because it is difficult to be optimization at the same time cutting precision, tool life span and cutting efficiency for cutting process. Here, I made two experiments base of two step design method which 1st step experiment is to use  $L_8$  orthogonal array on off-line optimization base of transcription, and 2nd step experiment at is tool life test to set several values of cutting speed and this result is evaluated to change same dimension for tool life span and cutting efficiency by loss function. We found conformable cutting speed to match working object thorough two experiments result.

key words : loss function, tool life span, cutting efficiency, cutting speed, hardened steel

### 1 結 論

#### 1-1 はじめに

近年、コーティング技術の進歩により焼入鋼など高硬度材が切削可能なエンドミルが市販され、高速切削工法により焼入鋼を直彫りする技術が注目を集めている。これは、従来の放電加工や研削加工工程を切削加工に置き換えることが可能で、加工能率の向上によるリードタイム短縮が期待できる。しかし、エンドミルによる焼入鋼切削では解決すべき問題点は多く、特に工具摩耗の進行が速く工具寿命が短いことから、ユーザは加工目的に応じた切削条件の設定に苦慮している。従来、品質工学での切削加工評価は指示値と加工値をみる転写性を基本と

して行われており<sup>1)</sup>、転写性は被削材に対する切削条件の把握では有効な最適化手法となる。しかし、転写性は一般に加工精度のみを信号として評価しており、工具寿命と加工能率(時間)を考慮した実験はあまり行われていない。ここでは、オフラインによる最適化と損失関数<sup>2)</sup>による調整として、二段階設計法を応用した異なる二回の実験を行った。

#### 1-2 二つの実験の考え方

切削加工における最適条件は、工具寿命、切削能率、加工精度などすべての項目において同時に最適化することは難しい。切削加工では、工具寿命と切削能率は相反

\* 高硬度難加工材のエンドミル加工技術の確立(第3報)(東北ブロック広域共同研究推進事業)

\*\* 電子機械部 \*\*\* 現 木工特産部

する関係であり、作業毎に作業者が加工目的に応じて適正な切削条件に調整することが必要であると考えられる。そこで、二段階設計法の考え方を応用して、第一段階としてオフラインによる最適化、第二段階として損失関数による調整として異なる二回の実験を行った。

1) 第一段階 オフラインによる最適化

転写性により因子間の効果の大きさを把握し、ばらつきを小さくするための割付実験を行った。転写性では信号として寸法を用いることにより、加工精度について評価する。

2) 第二段階 損失関数による調整

簡単な工具の寿命試験を行い、損失関数を用いて工具寿命と加工能率の関係をグラフ化する。グラフから損失を判断基準として加工目的に応じた切削速度を求める。

2 第一段階：オフラインによる最適化（転写性評価による割付実験）

2-1 基本機能及びテストピース

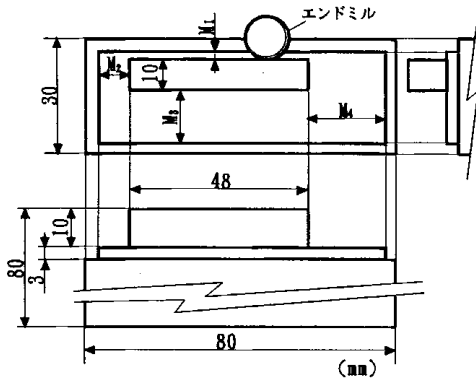


図1 切削加工後の形状

基本機能は転写性として、指示値と加工後の実測値が一致した関係が良いこととする。図1に、切削加工後のテストピースの形状を示す。SKD11(HRC50)を被削材とし、エンドミルによる側面削りで、80×30×80 (mm) ブロックからM<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>に定めた目標の寸法に加工する。工具は6枚刃 (Ti, Al) ノーティングエンドミルφ10 (mm)、加工機械は立型マシニングセンタを使用した。

2-2 因子の割り付け

信号因子はM<sub>1</sub>～M<sub>4</sub>の4水準とし、誤差因子は特に割り付けないが、エンドミルのたわみを誤差としてSN比を算出した。制御因子は、切削速度、一刃送り (mm/刃)、半径方向切込み、工具径の4因子、各3水準として、直交表L<sub>9</sub>に割り付けた。SN比は、寸法を特性値としてゼロ点比例式  $y = \beta M$  より、動特性のSN比  $\eta$  と感度  $\beta$  を求めた。

2-3 実験結果及び考察

図2にSN比と感度の要因効果図を示す。図2のSN比の要因効果図より最適条件は、A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>となるが、

因子BとCは因子AとDと比較して因子間の効果は小さいことから、因子AとDを有意とし、因子BとCは誤差eに含まれると判断した。そこで最適条件は、A<sub>3</sub>に対して切りくずが燃えず工具負荷が軽減されるA<sub>2</sub>、高切削能率B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>を考慮してA<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>とした。

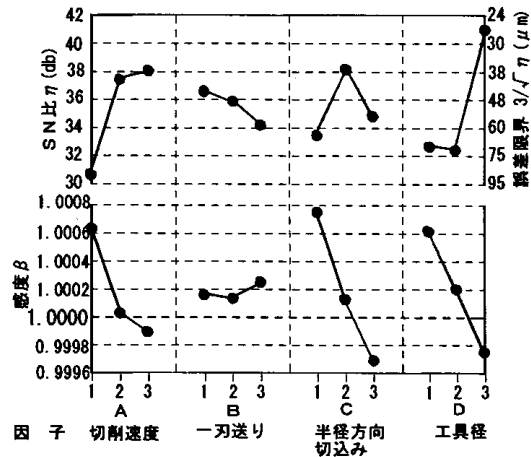


図2 要因効果図

2-4 確認実験

表1 確認実験の結果

		推定値	確認実験
最適条件	SN比 $\eta$ (db)	43.2	44.8
A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	感度 $\beta$	0.999580	1.000062
初期条件	SN比 $\eta$ (db)	28.1	34.7
A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	感度 $\beta$	1.001074	1.000081
利得	SN比 $\eta$ (db)	15.1	10.1

表1に確認実験の結果を示す。最適条件と初期条件の因子の組み合わせにより確認実験を行った結果、標準偏差で1/3の改善となった。

3 第二段階：損失関数による調整（損失関数によるオンライン加工実験）

3-1 実験の目的

損失関数による調整として、簡単な寿命試験を行い、損失関数から切削速度の相違による損失を算出し、加工目的に応じた切削速度を決める判断基準とする。

3-2 基本機能

代表的な寿命方程式としてテーラーの寿命方程式がある。テーラーの寿命方程式は、V：切削速度 (m/min)、T：切削時間 (min)、n、C：定数を用いて次式で表される。

$$V T^n = C$$

この式より切削速度と切削時間（工具寿命）は反比例の関係にあり、切削速度が工具寿命に影響が大きい因子といえる。また、切削速度と工具送り速度は比例関係にあり、切削速度を大きくすれば、工具送り速度も大きくなり加工能率が大きくなる。そこで、この切削速度を加工目的に応じて作業者が適宜設定することにより、「工

具寿命を重視」及び「加工能率を重視」の二つの場合分けができる。その他の加工条件である工具の一刃送り、半径方向切込みなどはオフラインでの実験結果に基づいて設定した。

3-3 工具寿命による損失関数評価

工具寿命までの切削長さから損失関数を求める。工具寿命までの切削長さが大きいほどエンドミルの性能は優れていると考えた。これは望大特性として、次式で表される。ここで、 $L_1$ : 損失 (円)、 $A_1$ : 加工にかかった経費 (円)、 $\Delta_1$ : 基準切削長さ (m)、 $y_1$ : 実際の工具寿命までの切削長さ (m) とした。

$$\text{望大特性 } L_1 = A_1 \Delta_1^2 \frac{1}{y_1^2}$$

3-4 切削能率による損失関数評価

切削能率から損失関数を求める。ここでの切削能率とは、単位長さ (1m) 当たりの切削時間とする。切削能率では単位長さ当たりの切削時間が小さいほど切削能率は大きく、切削能率が大きいほど良い切削条件と考えた。これは望小特性として、次式で表される。ここで、 $L_2$ : 損失 (円)、 $A_2$ : 加工にかかった経費 (円)、 $\Delta_2$ : 基準切削能率 (min/m)、 $y_2$ : 実際の切削能率 (min/m) とした。

$$\text{望小特性 } L_2 = \frac{A_2}{\Delta_2^2} y_2^2$$

3-5 加工目的に応じた切削速度の判断基準

図3に示した損失と切削速度の関係図より、工具寿命までの切削長さ $\Delta_1$ と切削能率 $\Delta_2$ と損失を目安に加工目的に応じた切削速度を決める判断基準とした。

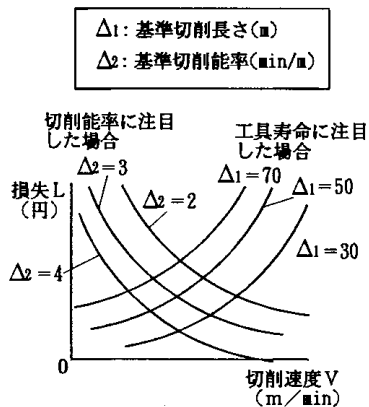


図3 損失と切削速度の関係図

3-6 実験方法

表2に主な切削条件、図4に実験での切削方式を示す。実験方法は、ブロック形状100×100×50 (mm) の被削材を側面削りで半径方向切込みの方向に一定のピックフィードを行い、エンドミルが工具寿命に達するまで切削を続ける。

表2 主な切削条件

切削条件	設定値
半径方向切込み	0.2mm
軸方向切込み	10mm
工具径	φ10mm
工具種	6枚刃(Ti, Al)コーティングエンドミル
冷却方式	エアブロー
切削方向	ダウンカット
被削材	焼入鋼SKD11(HRC60.5)

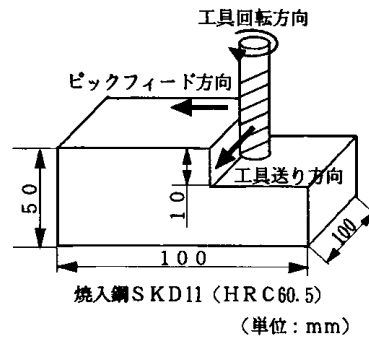


図4 寿命試験での切削方式

3-7 実験結果

表3に実験で得られた結果を示す。

表3 工具寿命までの切削長さ及び

切削時間、加工に要した電気料金

名称	切削長さ(m)	切削時間(min)	電気料金(円)
切削速度A	87.4	304.5	2,802
切削速度B	27.5	64.0	588
切削速度C	12.5	21.8	201
切削速度D	39.7	51.9	477
切削速度E	36.4	38.0	350
切削速度F	39.1	25.6	235
切削速度G	28.6	10.0	92

3-8 損失計算

工具寿命での損失計算例として切削速度Aの場合を示す。加工経費 (工具の値段+加工に要する電気料金  $A_1 = (21,800 + 2,802) = 24,602$  (円)、基準切削長さ  $\Delta_1 = 49$  (m)、実際の工具寿命までの切削長さ  $y_1 = 87.4$  (m) として、望大特性の式に代入する。

$$L_1 = 24,602 \times 49^2 \times (1/87.4^2) = 7,733 \text{ (円)}$$

3-9 考察

図5に基準切削長さ  $\Delta_1 = 12, 49, 87$  (m) を変えて計算した工具寿命までの切削長さについてのグラフを示す。図6に基準切削能率  $\Delta_2 = 0.3, 1.9, 3.5$  (min/m) を変えて計算した切削能率についてのグラフを示す。また、図7に工具寿命までの切削長さ $\Delta_1$ と切削能率 $\Delta_2$ の設定値の上限値と下限値は実際の実験で得られた最大値と最小値とした。図5より切削速度D、E、F、Gでは工具寿命までの切削長さによる損失は、Gで損失が少し大きいがこの4条件はほぼ同等である。また、図6において切削速度D、E、F、Gにおいて切削能率  $\Delta_2 = 1.9$  と  $\Delta_2 = 3.5$  では損失は等しいが、 $\Delta_2 = 0.3$  では

F、Gが損失が小さい。これは、基準切削能率 $\Delta_2$ を0.3に設定したことにより高切削速度設定での損失が小さくなったことによる。また、基準切削長さ $\Delta_1$ において切削速度Aが損失が最も小さい結果になっている。これは、切削速度Aは低速域での切削速度設定であり、基準切削能率 $\Delta_2 = 0.3$ で示すとおり切削能率の損失が大きくなっており、切削能率は無視するという加工目的に応じた状況判断をしっかりと行う必要がある。さらに特徴的な現象として、図5の基準切削長さ $\Delta_1$ において切削速度Cが隣接する条件と比較して突発的に損失が大きくなっている。このように工具寿命までの切削長さが短くなり損失が大きくなった原因として、切削条件と加工機械の剛性、固有振動モードの影響などが考えられるが、明確な原因は分からなかった。そこで、この被削材、加工機械を含めた加工条件では切削速度Cを設定すれば基準切削長さ $\Delta_1$ での損失が大きくなるので、切削速度Cの設定は避けるべきであることがわかった。

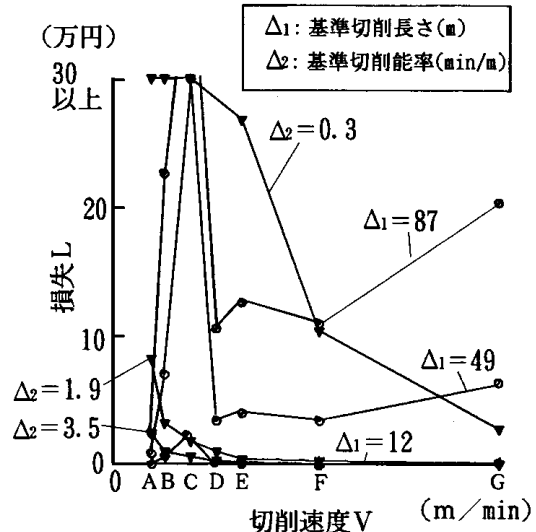


図7 工具寿命までの切削長さとして切削能率の二つを合わせたグラフ

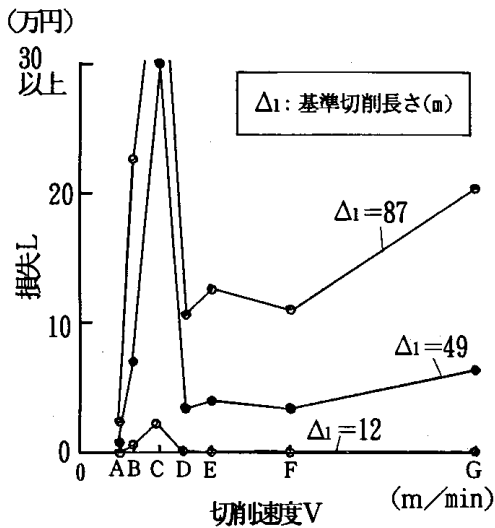


図5 工具寿命までの切削長さについてのグラフ

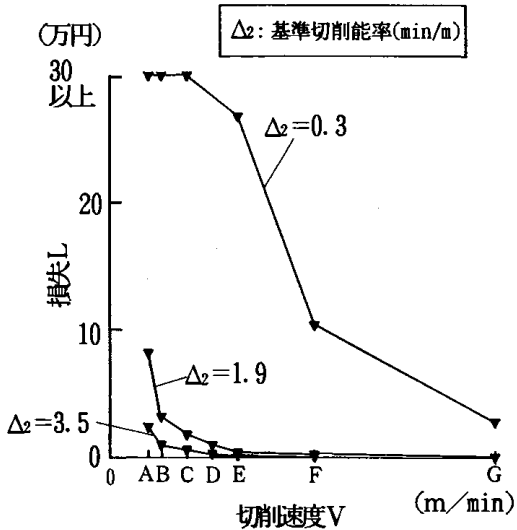


図6 切削能率についてのグラフ

#### 4 結論

エンドミルにより焼入鋼切削を行うための切削条件の最適化を目的に実験を行った。実験は第一段階としてオフラインによる最適化、第二段階として損失関数による調整を行い、以下の事項が明らかとなった。

- 1) オフラインによる最適化では、寸法精度を信号因子とした場合、高切削速度、工具径の大きな条件でSN比が大きくなった。
- 2) 損失関数による調整では、基準切削長さ $\Delta_1$ を注目した場合には、切削速度Aが他の切削速度より著しく損失が小さくなり、切削速度D、E、F、Gではほぼ同等の損失となっている。しかし、切削速度Cでは極端に損失が大きくなっていることから、この加工条件においては切削速度Cは回避すべきである。

以上より工具寿命と切削能率の関係から基準切削長さ $\Delta_1$ と基準切削能率 $\Delta_2$ を目安として、加工目的に応じた切削速度を設定することができた。

本研究を進めるにあたり、貴重なご意見を頂いた東北品質工学研究会の皆様へ感謝します。

#### 文献

- 1) 上野憲造：機能性評価による機械設計，日本規格協会，P187-198(1995)
- 2) 田口玄一他：品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学，日本規格協会，P27-51(1990)