

## 焼入鋼切削でのエンドミルの寿命試験

和合 健<sup>..</sup>、若槻 正明<sup>..</sup>、堀田 昌宏<sup>..</sup>、  
飯村 崇<sup>..</sup>、多田 三郎<sup>..</sup>

5種類のエンドミルを使用し、被削材を焼入鋼SKD11(HRC60.5)としてエンドミルの寿命試験を行い、切削長さに対する逃げ面摩耗幅(VB)の摩耗経過曲線を作成した。また、品質工学の損失関数を用いて寿命試験を損失で評価する方法として、切削能率重視の場合の損失、工具寿命重視の場合の損失を示し、さらにこの損失を利用した最適切削速度選定方法を示した。  
キーワード：寿命試験、焼入鋼、エンドミル、品質工学、損失関数

## Life Span Test of Endmill for Hardened Steel Cutting

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

We make life span test of endmill an object of hardened steel SKD11(HRC60.5) using endmill of 5 kind, and make life span curve contrast cutting length with flank wear (VB). And we show loss in case of high efficiency and in case of long life span on life span test to use lost function of quality engineering. More we show how to optimization on cutting speed selection for loss.

key words : life span test, hardened steel, endmill, quality engineering, lost function

### 1 緒 言

近年、エンドミルで焼入鋼を直彫りして金型を製作する加工方法が注目を集めているが<sup>1) 2)</sup>、ユーザに対する基本的なデータは少なくデータ蓄積が必要となっている。第1報<sup>3)</sup>では、品質工学に基づいて6枚刃コーティングエンドミルにより焼入鋼SKD11(HRC50)について切削加工での最適化実験を行い、切削条件の組み合わせによる因子間の影響の大きさについて検討した。本報では、HRC60.5の焼入鋼SKD11を被削材としてエンドミルの工具寿命について、寿命に至る切削長さの把握や冷却方式による効果について検討した。さらに、品質工学における評価方法として、評価尺度を物理量からコストに変換して経済性の指針で判断する損失関数<sup>4)</sup>により最適な切削速度選定方法、寿命試験での各工具における損失について評価を行った。損失関数は、従来からの評価指標とは異なる加工コスト、損失など経済性からの視

点による新しい評価方法であり、ここでは1つの寿命試験評価方法として提案する。

### 2 実験装置

表1にマシニングセンタ(以下、MC)の主な仕様、図1に主な実験に使用したエンドミル形状を示す。エンドミルは6枚刃コーティング、6枚刃R付コーティング、1枚刃CBN、4枚刃コーティング、2枚刃ボールコーティングで外径φ10mmの5種類を使用した。なお、コーティングはPVD(物理蒸着)法による(AL,Ti)Nコーティングで、1枚刃CBNエンドミルは、スパイラル状(曲面形状)のCBN焼結体をシャンクにろう付けした工具である。MCは高切削速度に対応できるスピンドル回転がMAX20000rpmの高回転型で位置決め精度が±2.0μm以下である。また、切削抵抗測定に3成分工具動力計(型式:9257B、キスラー製)を用いた。

\* 高硬度難加工材のエンドミル加工技術の確立(第2報)

\*\* 電子機械部

表1 MCの主な仕様

立/横形の形式	立形マシニングセンタ(三井精機VS3A)
スピンドル回転	20000rpm(MAX)
送り速度	4000mm/min(MAX)
主轴モータ	スピンドル一体型高周波モータ
位置決め精度	±2.0μm以下

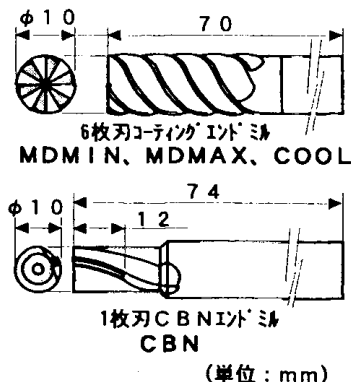


図1 主な使用エンドミル形状

### 3 実験方法

図2に実験での切削方式を示す。実験方法は、被削材として100×100×50 (mm) のブロック形状の焼入鋼SKD11 (HRC60.5) を側面切削により切削し、半径方向切り込みの方向に一定のピ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。工具寿命の判定は、振動、火花、切りくず、切削音、切削抵抗の変動などから総合的に判断する。また、評価データとして定期的にエンドミルの逃げ面摩耗幅 (VB) を測定顕微鏡で測定するとともに、工具動力計により切削抵抗を測定した。切削条件は、すべてにおいて半径方向切り込み0.2mm、軸方向切り込み10mmとし、切削速度、一刃送りは適宜設定した。特に、高加工能率を得るために切削速度の上限は300 (m/min) とした。実験の呼び名をMDMIN、MDMAX、RBMAX、CBN、COOL、4MC、BALLの全7つとし、個別の条件設定値は図3に示す。冷却方式はCOOL以外はすべてエアブローとした。

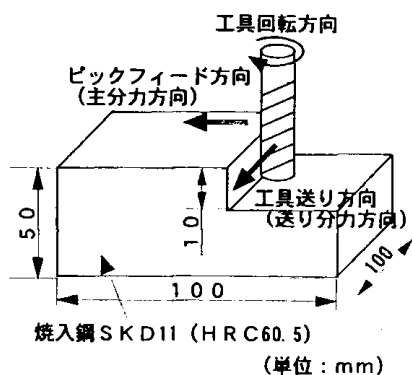


図2 寿命試験での切削方式

### 4 実験結果及び考察

#### 4-1 各条件での工具寿命について

図3に摩耗経過曲線を示す。MDMINとCBNで切削長さ50m付近でも切削継続可能であり、次いでMDMAXでは切削長さ39mで工具寿命と良い結果を示している。RBMAXは先端エッジ部をR形状に成形した工具でR形状による工具寿命延長が期待されたが、ノーマルの6枚刃コーティングエンドミルよりも工具寿命が短い結果となった。COOLは、水溶性切削液を使用した実験で、冷却方式をエアブローとしたときよりも極端に工具寿命が短い結果となった。4MC、BALLは一般的なエンドミル形状に高硬度用コーティング処理した工具で、本切削条件では工具寿命が5m以下となり実質的に切削不可能となっている。特にボールエンドミルは軸方向切り込みを10mmとしたために過負荷が働いたためと考えられる。4枚刃エンドミルは、1刃送りを0.1mm/刃と過大値に設定したためと、切れ刃のすくい面で被削材をすくい取る切削方式で設計されたエンドミル形状により高硬度材には不向きと考えられる。切削状況の観察よりコーティングエンドミルの寿命に至る過程は、通常の摩擦による工具摩耗が進みコーティング膜が薄くなった部分に加工の衝撃や振動によりチッピングが生じ、局部的にその部分から急速に工具摩耗が進み、急激な温度上昇から加速度的に工具寿命となる過程が観察された。HRC60以上のダイス鋼は従来から切削加工が難しい領域とされており、さらに切削速度300 (m/min) の高速域ではスピンドルの剛性不足による振動の発生、切削過程で切れ刃に生じる大きな衝撃などの要因から工具寿命が短くなったと思われる。

#### 4-2 水溶性切削液使用による工具寿命

写真1に水溶性切削液を使用した加工、写真2に切削液を使用した加工後の切りくずの堆積の様子を示す。切削状況は、切削液を乳白色のエマルジョンタイプを使用したために工具切れ刃付近の状況は目視で明確に確認できなかった。しかし、切削後の工具切れ刃の状態、切りくずの排出状況、堆積状況などから、切りくず排出性が悪く、切りくずポケットへの詰まり、切れ刃へのからみ付きなど正常切削の妨げとなることが推測された。さらに、急速加熱、急速冷却の繰り返しによる熱疲労などの影響により水溶性切削液では工具寿命が短くなると考えられる。

#### 4-3 切削抵抗評価

図4に6枚刃コーティングエンドミルと1枚刃CBNエ

エンドミルの切削抵抗の比較を示す。6枚刃のエンドミルの特徴は、刃数が6枚と多く、ねじれ角が45°と大きい。そのため被削材と接触している接点が多いので、切削開始直後の切削抵抗は3分力とも0(N)から一定方向に力がシフトしている状態で、力が被削材に対して途切れず働いている。これは、旋削加工と同様に連続切削で見られる切削抵抗の波形と類似しており、高硬度材切削用として開発されたエンドミル形状が有効に機能している結果と思われる。これに対し、1枚刃CBNエンドミルはCBN焼結体をシャンクにろう付けした工具で1枚刃の形状をしており、ねじれ角も13°と6枚刃コーティングエンドミルと比較して小さいねじれ角となっている。このため切削抵抗の波形は典型的な断続切削となっており0

(N)を中心に力がプラス方向とマイナス方向を交差して振動しているのがわかる。これは、エンドミル特有のものであり被削材と衝突する衝撃の力が切れ刃に働くことになりチッピングが発生しやすい。図5にCBNエンドミルのチッピング発生部を示す。図のとおり被削材の上端面エッジ部とエンドミルの切れ刃が接する部分でエンドミルのチッピングが発生している。これは、エンドミル特有の断続切削による被削材と切れ刃の衝突による衝撃力や振動が大きな原因と推測される。このことから、CBNのような硬い材料を工具として使用するだけでなく高硬度材切削に適したエンドミル形状の影響も大きいことがわかる。

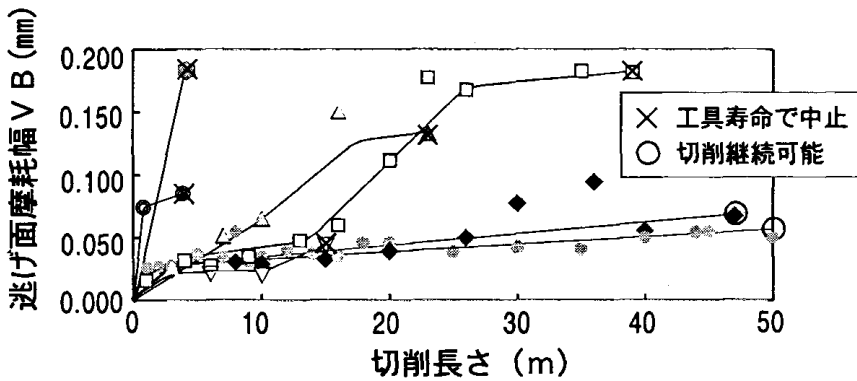


図3 摩耗経過曲線

●	MDMIN : 6枚刃コーティング	切削速度 30m/min	1刃送り0.03mm/刃
□	MDMAX : 6枚刃コーティング	切削速度300m/min	1刃送り0.07mm/刃
△	RBMAX : 6枚刃R付コーティング	切削速度300m/min	1刃送り0.07mm/刃
◆	CBN : 1枚刃CBN	切削速度300m/min	1刃送り0.07mm/刃
▽	COOL : 6枚刃コーティング	切削速度300m/min	1刃送り0.07mm/刃
	水溶性切削液 (エマルジョン)		
◎	4MC : 4枚刃コーティング	切削速度 50m/min	1刃送り0.1 mm/刃
○	BALL : 2枚刃ボール	切削速度 50m/min	1刃送り0.05mm/刃



写真1 水溶性切削液を使用した加工



写真2 切削液を使用した加工後の切りくずの堆積の様子

6枚刃(AI, Ti)Nコーティングエンドミル		1枚CBN刃エンドミル	
切削速度	300m/min	切削速度	300m/min
一刃当たりの送り	0.07mm/刃	一刃当たりの送り	0.07mm/刃
半径方向切り込み	0.2mm	半径方向切り込み	0.2mm
ねじれ角	45°	ねじれ角	13°
冷却方式	エアブロー	冷却方式	エアブロー

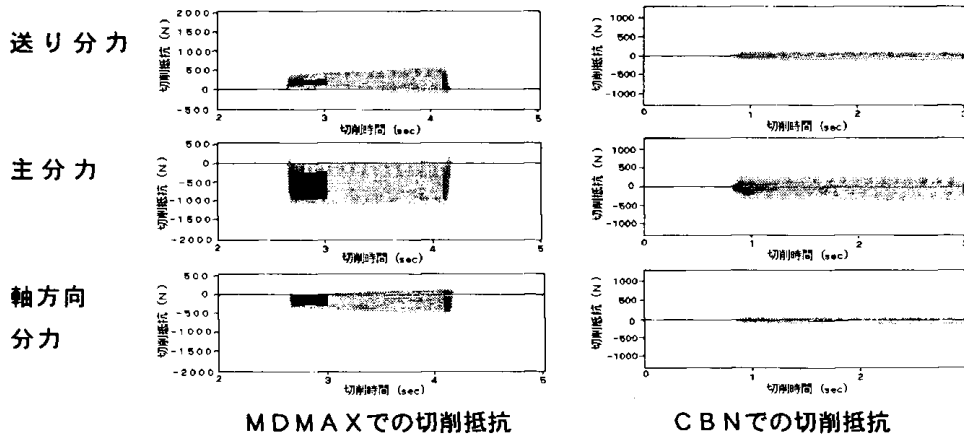


図4 切削抵抗の比較

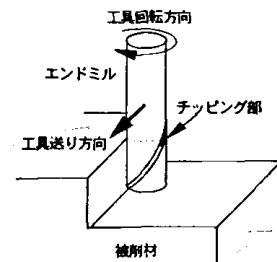


図5 1枚刃CBNエンドミルでのチッピング発生部

5 寿命試験の損失関数評価

5-1 損失関数とは

従来の寿命試験では、工具寿命までの切削時間に対する逃げ面摩耗幅 (VB) の変化量をグラフ化し、そのグラフの変化から工具寿命の評価を行っている。しかし、切削時間など単なる時間としての物理量では評価尺度として直感的なイメージとして判断しにくい。そこで、品質工学では評価尺度を汎用性をもつパラメータに置き換えることで分野を越えた議論を交わす観点から、損失関数という評価方法を用いる。損失関数は、実際の生産において重要な加工コストの観点からの評価であり、L: 損失 (円)、 $\Delta_0$ : 機能限界、 $A_0$ : 機能しなかったときの損失 (円)、 $\sigma^2$ : 分散を用いて式 (1) で表される。

$$L = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \sigma^2 \quad \dots \dots \text{式 (1)}$$

5-2 損失関数による最適切削速度選定方法

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: 定数を用いて式 (2) で表される。

$$VT^n = C \quad \dots \dots \text{式 (2)}$$

この式より工具寿命 (切削時間) に影響の大きい因子は、V: 切削速度 (m/min) となる<sup>5)</sup>。近年、コーティング技術の進歩により高切削速度での加工が可能となるエンドミルが多く市販され、ユーザにおける適正な切削速度選定方法が要求されている。そこで、以下により損失関数を用いた最適な切削速度選定方法並びに一刃送り選定方法、各工具の損失比較を示す。

エンドミル加工の基本機能は、エンドミルという工具で鋼材を指示形状に削り出すことで、工具寿命が長いこと、加工能率が大きいこと、加工精度が高いことが良い機能となる。しかし、エンドミルの性格上加工精度には限界があり、ここでは汎用的な加工精度を対象とし、加工精度により生じる損失は無視する。そこで、残りの工具寿命、加工能率の2つの条件において両者が均衡した関係が良い加工条件とここでは定義する。

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では切削長さが大きいほど工具寿命が長くエンドミルの性能は優れていると考える。これは望大特性と言い、式 (3) 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)

望大特性 
$$L_1 = A_1 \Delta_1^2 \frac{1}{y_1^2} \quad \dots \dots \text{式 (3)}$$

で表される。

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る。これは、望小特性と言い、式 (4) 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)

望小特性 
$$L_2 = \frac{A_2}{\Delta_2^2} y_2^2 \quad \dots \dots \text{式 (4)}$$

で表される。そこで、図7に示した最適切削速度の選定方法より工具寿命までの切削長さによる式 (3) と切削能率による式 (4) の2次関数の交点が、両者の均衡が取れた状態となり最適な切削速度となる。

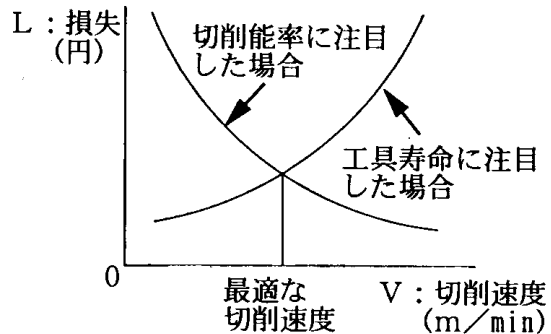


図7 最適切削速度の選定方法

また、式 (3)、(4) より全損失L (円) は、

$$L = L_1 + L_2 \quad \dots \dots \text{式 (5)}$$

と表される。L: 全損失は、寿命試験の結果より工具寿命までの切削長さ と切削能率の2つのパラメータを加算して損失 (円) に置き換えた評価指標である。

5-3 MDMINとMDMAXによる最適な切削速度及び一刃送りの計算例

(1) 工具寿命での損失計算

・MDMINの場合

加工経費 (エンドミルの値段+エアブローの電気代)  $A_1 = (21,800 + 740) = 22,540$  (円)、基準切削長さ  $\Delta_1 = 50$  (m)、実際の工具寿命までの切削長さ

$y_1 = 80$  (m) (実験では50mで中断したため予測値)

として、式(3)に代入する。

$$L_1 = 22,540 \times 50^2 \times (1/80^3) \\ = 8,804 \text{ (円)}$$

・MDMAXの場合

加工経費(エンドミルの値段+エアブローの電気代)  $A_1 = (21,800 + 25) = 21,825$  (円)、基準切削長さ  $\Delta_1 = 50$  (m)、実際の工具寿命までの切削長さ  $y_1 = 39$  (m) を、式(3)に代入する。

$$L_1 = 21,825 \times 50^2 \times (1/39^3) \\ = 35,872 \text{ (円)}$$

(2) 切削能率での損失計算

・MDMINの場合

加工経費(エンドミルの値段+エアブローの電気代)  $A_2 = (21,800 + 740) = 22,540$  (円)、基準切削能率  $\Delta_2 = 3$  (min/m)、実際の切削能率  $y_2 = 5.8$  (min/m) を、式(4)に代入する。

$$L_2 = (22,540/3^2) \times 5.8^2 \\ = 84,249 \text{ (円)}$$

・MDMAXの場合

加工経費(エンドミルの値段+エアブローの電気代)  $A_2 = (21,800 + 25) = 21,825$  (円)、基準切削能率  $\Delta_2 = 3$  (min/m)、実際の切削能率  $y_2 = 0.2$  (min/m) を、式(4)に代入する。

$$L_2 = (21,825/3^2) \times 0.2^2 \\ = 97 \text{ (円)}$$

以上に従い基準切削長さ  $\Delta_1 = 50, 60, 70, 80, 90, 100$  (m)、基準切削能率  $\Delta_2 = 2, 3, 4, 5$  (min/m) を変えて計算しグラフ化する。図8に実験データからの最適切削速度算出例、図9に一刃送りの選定方法を示す。

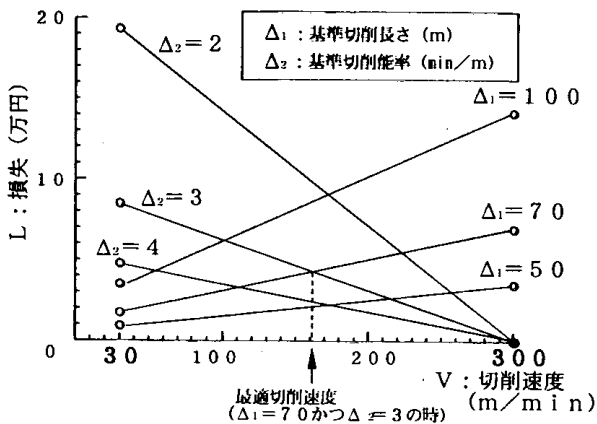


図8 実験データからの最適切削速度算出例

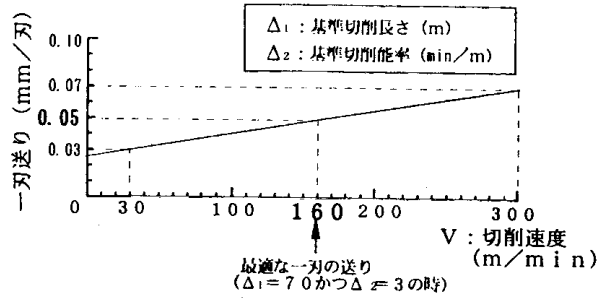


図9 一刃送りの選定方法

図8より基準切削長さ  $\Delta_1 = 70$  (m)、基準切削能率  $\Delta_2 = 3$  (min/m) と定義したときの最適切削速度は160 (m/min) が選択される。

図7では2次曲線の交点を最適な切削速度と定義しているが、図8では1次直線の交点を最適切削速度と定義している。2次曲線では多数個のデータ点数が必要とされるが、1次直線では最低2点で直線が決定される。ここでは、損失と切削速度の関係が線形性の範囲内で、切削速度の上限値と下限値の2回の前試験による2点データのみから最適切削速度を求められる方法を示している。このように2回の簡単な実験だけで最適切削速度が求められることは企業における実験の速効性に有効と考えられる。今後、2次曲線と1次直線の誤差の大きさ、最適切削速度の正確性について検証実験が必要と考えられる。

また、一刃送りを決定することは切削速度の決定と同様に重要である。理論上、一刃送りが一定のとき切削速度の変動により工具送り速度が追従し変動する。しかし、切削速度の設定値により工具に働く切削力、衝撃力やスピンドルに働くモーメントは変化し切削速度の設定に対して一刃送りが追従できない状況が生じる。そこで、一刃送りも切削速度と共に切削状況に応じた適正值に変更することが重要となる。ここでは図9に示すように一次比例式から最適な一刃送り選定方法を提案する。一次比例式は実験での経験値より適当と思われ設定したが、今後実験データの蓄積からさらに適正な関数を導き、実験データとの正確な整合性が必要と考える。

5-4 寿命試験での各工具の損失計算

式(5)より寿命試験での各工具における損失を求める。式(3)において基準切削長さ  $\Delta_1 = 50$  (m)、式(4)において基準切削能率  $\Delta_2 = 2$  (min/m) としてMDMINについて計算すると、 $L_1 = 8,804$  (円)、 $L_2 = 84,249$  (円) となり全損失は式(5)より、

$$L = L_1 + L_2$$

$$= 8,804 + 84,249$$

$$= 93,053 \text{ (円)}$$

となり、基準切削長さ  $\Delta_1 = 50$  (m) かつ基準切削能率  $\Delta_2 = 2$  (min/m) の条件では全損失  $L$  は 93,053 (円) となる。この評価方法により、例えば加工コストに重点をおき工具寿命を重視した場合の損失、または切削能率を重視して加工コストは高くても早く製品を仕上げたい場合の損失が基準切削長さ  $\Delta_1$ 、基準切削能率  $\Delta_2$  の値を適当に変更することにより算出できる。表2に工具寿命を重視した場合の損失、表3に切削能率を重視した場合の損失を示す。

表2 工具寿命重視の場合の損失

$\Delta_1 = 70$  (m)、 $\Delta_2 = 8$  (min/m) の場合 (単位: 円)

条件	$L_1$ : 工具寿命での損失	$L_2$ : 能率での損失	L: 全損失
MDMIN	17,601	12,145	29,746
MDMAX	69,735	21	69,756
RBMAX	344,832	33	344,865
CBN	35,592	1,624	37,216
COOL	513,153	24	513,177
4MC	5,580,856	729	5,581,584
BALL	7,407,856	15,360	7,423,216

表3 切削能率重視の場合の損失

$\Delta_1 = 40$  (m)、 $\Delta_2 = 1$  (min/m) の場合 (単位: 円)

条件	$L_1$ : 工具寿命での損失	$L_2$ : 能率での損失	L: 全損失
MDMIN	5,747	777,308	783,055
MDMAX	22,771	1,356	24,127
RBMAX	112,598	2,119	114,717
CBN	11,622	103,934	115,556
COOL	167,560	1,542	169,102
4MC	1,822,320	46,651	1,868,972
BALL	2,418,892	983,053	3,401,945

表2より工具寿命重視の場合、MDMINはMDMAXに対して69,756円-29,746円=40,010円の利得がある。また、表3より切削能率重視の場合、MDMAXはMDMINに対して783,055円-24,127円=758,928円の利得がある。この損失は相対値であり、今後絶対値との整合性が必要になると思われる。

## 6 結 論

5種類のエンドミルを用い、被削材を焼入鋼SKD11 (HRC60.5) としてエンドミルの寿命試験を行った結果以下の事項が明らかとなった。

- ・6枚刃コーティングエンドミルを使用し、切削速度300 (m/min) と切削速度30 (m/min) と2つの条件では切削速度30 (m/min) の方が工具寿命は長い。この原因として切削速度の影響と、スピンドルの高回転

による工具の振れ誤差や主軸剛性不足による振動の影響が考えられる。

- ・6枚刃コーティングエンドミルを使用し、冷却方式をエアブローと水溶性切削液とした場合、エアブローの方が工具寿命は長く、これは水溶性切削液の場合は切りくずの排出性が悪いこと、熱疲労などが原因と考えられる。
- ・1枚刃CBNエンドミルによる寿命試験では、被削材の上面エッジ部とエンドミルの切れ刃が接する部分からチッピングが生じやすい。
- ・6枚刃コーティングエンドミルでは連続切削と類似した切削抵抗波形、1枚刃CBNエンドミルでは断続切削の抵抗波形が見られた。両者の比較より高硬度材切削には連続切削的な切削抵抗の波形が望ましく、工具形状は高硬度材切削で重要な因子と考えられる。
- ・新しい工具寿命評価方法として、物理量を損失(加工コスト)に変換し経済性の指針で評価を行う損失関数を用いて、工具寿命を重視した場合の損失、切削能率を重視した場合の損失を示した。さらにこの2つの損失から最適な切削速度及び一刃送りを選定する方法を示した。

本研究は、平成8年度から3年間国庫補助事業東北ブロック広域共同研究岩手県分担テーマ「高硬度難加工金属材料の高精度加工技術の開発」の小テーマとして実施している。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導頂いた宮城教育大学技術科小野元久助教授、工技院機械技術研究所生産情報研究室碓井雄一主任研究官及び澤井信重主任研究官に感謝します。

## 文 献

- 1) 松岡甫稔他：講習会教材・高速・高精度加工の最前線、(社)日本機械学会(1997)
- 2) 中川威雄他：高速加工に関する技術講習会、(社)精密工学会(1997)
- 3) 和合 健他：品質工学に基づくエンドミルによる焼入鋼切削の最適化、(社)精密工学会東北支部郡山地方講演会108(1997)
- 4) 田口玄一他：品質工学講座1 開発・設計段階の品質工学、(財)日本規格協会(1990)
- 5) 例えば中山一雄、上原邦雄：機械加工、朝倉書店(1991)