



# 高速対応型快削鋼のエンドミル加工\*

—BN 添加鋼切削時の工具摩耗と切削温度—

田中隆太郎\*\* 山根八洲男\*\*\* 岡田 将人† 細川 晃\*\* 上田 隆司\*\*

End Milling of Free-machining Steel for High Speed Machining  
—Tool Wear and Cutting Temperature in Cutting BN Added Steels—

Ryutaro TANAKA, Yasuo YAMANE, Masato OKADA, Akira HOSOKA and Takashi UEDA

This paper deals with the machinability of BN added Steels in end milling. The cutting tests were carried out by end milling carbon steel JIS S45C, S55C and these BN added steels with carbide tool and TiAlN coated carbide tool. Tool wear, cutting temperature, and, surface roughness were measured and discussed. In end milling BN added steel with square end mill, the progress rate of flank wear width was decreased and fracture at corner was suppressed in comparison with that in machining standard steel. In case of ball end mill, flank wear in end milling BN added steels were smaller in comparison with standard steel. In case of S45C, boundary wear was observed, however it was not observed in end milling BN added steel. BN added showed almost the same surface roughness as standard steel. The temperature of flank wear part in turning work based S55C were 50 °C higher in comparison with S45C base work. The temperature of throw away end mill was higher 100°C in comparison with solid square end mill. There were not significant difference between the temperature in end milling standard steel and BN added steels.

**Key words:** end milling, BN, free-machining steel, carbide tool, TiAlN coated carbide, tool wear, cutting tool temperature, flank face, belag, two-color pyrometer, optical fiber

## 1. 結 論

金型加工など複雑な形状を創生する場合、欠かすことの出来ない加工にエンドミル加工がある。マシニングセンタの高出力化、主軸の高回転化が進み、従来にも増して高速・高能率加工への要求が高まっている。切削速度の高速化は切削温度の上昇を招き、急激な工具摩耗を引き起こす。

しかし、作業環境やコスト面からもミストやクーラントなどの切削油剤を使用しない乾式切削への移行の機運の高まりがある状況の中で高速切削を成し得るには、高温においても高硬度で化学的安定性に優れるコーテッド工具の使用が不可欠であると考えられる。

筆者らはこれまでに、新しく開発された BN 添加鋼について旋削加工および正面フライス加工について実験を行い快削化メカニズムの解明に努めてきた<sup>1)~4)</sup>。そこで本研究では、標準的な炭素鋼である S45C とプラスチック金型などに使用される高炭素鋼 S55C をベースとする BN 添加鋼について、超硬工具および耐熱性、耐摩耗性に優れる TiAlN コーテッド皮膜<sup>5)~7)</sup>を施した超硬工具によるエンドミル加工において工具摩耗、工具逃げ面温度および仕上げ面粗さの測定を行い、BN 添加鋼のエンドミル加工における適応性を評価した。

## 2. 実 験 方 法

表 1 に被削材の化学成分を示す。実験には標準鋼 S45C、

Table 1 Chemical composition of work material

	Chemical compositions of work material mass%							Hardness
	C	Si	Mn	S	Sol.Al	N	B	
S45C-1	0.43	0.25	0.73	0.018	0.020	30 ppm	-	162 HB
S45C-2	0.44	0.19	0.74	0.018	0.026	66ppm	-	211Hv
S55C	0.55	0.25	0.72	0.021	0.024	56 ppm	-	221Hv
S45C-BN1	0.44	0.21	0.74	0.024	0.026	125 ppm	63 ppm	214Hv
S45C-BN2	0.42	0.26	0.78	0.024	0.066	167 ppm	80 ppm	158HB
S55C-BN	0.55	0.24	0.73	0.036	0.057	112 ppm	58 ppm	231Hv

S45C-2 および S55C とこれらをベースとする BN 添加鋼を用いた。S45C-BN1, S45C-BN2 および S55C-BN は BN 添加鋼であり、適量の B, N を含有している。また、BN 添加鋼 S45C-BN2 と S55C-BN は、標準鋼と比べ Al 含有量が高めとなっている。これらの被削材は全て焼きならししてある。

表 2 に切削条件を示す。実験にはソリッドタイプとスローアウェイタイプのエンドミルを用いた。ソリッドエンドミルは直径 10mm、材質は超硬合金と TiAlN コーテッド超硬合金の 2 種類、ボールエンドミルは半径 5mm で材質は超硬合金である。スローアウェイタイプのエンドミルはノンコート超硬合金 P30 を用いた。工具形状は MDMM52R で、直径 25mm のホルダに取り付けて切削を行った。いずれの場合も乾式において側面削りをダウンカットで行った。

工具摩耗は、工具をホルダから任意の時間毎に取り外し、工具顕微鏡を用いて逃げ面摩耗幅の測定を行った。

仕上げ面粗さの測定は、触針式粗さ計を用い送り方向に測定を行った。

\* 原稿受付 平成 18 年 12 月 25 日  
\*\* 正 会 員 金沢大学大学院自然科学研究科 (金沢市角間町)  
\*\*\* 正 会 員 広島大学大学院工学研究科 (東広島市 1-4-1)  
† 正 会 員 福井工業高等専門学校 (福井県鯖江市下司町)

Table 2 Cutting conditions

Foe tool life test		
Square end mill ( $\phi$ 10mm)	Ball end mill (R=5mm)	Throw a way tip
TiAlN coated carbide	TiAlN coated carbide	P30 (MDMM52R)
$v=300\text{m/min}$	$v=276\text{m/min}$	$v=300, 450\text{m/min}$
$Ad=8\text{mm}, Rd=1\text{mm}$	$Ad=4\text{mm}, Rd=0.5$	$Ad=3\text{mm}, Rd=0.2$
$f=0.1\text{mm/tooth}$	$f=0.05\text{mm/tooth}$	$f=0.05\text{mm/tooth}$
dry	dry	dry
For cutting temperature measurement		
Tool: Square end mill (dir:10mm): Carbide, TiAlN coated carbide		
Throw a way tip: P30(MDMM52R)		
$v=100\sim 500\text{m/min}$		
$Ad=3\text{mm}, Rd=0.2\text{mm}$		
$f=0.05\text{mm/tooth}$		
dry		

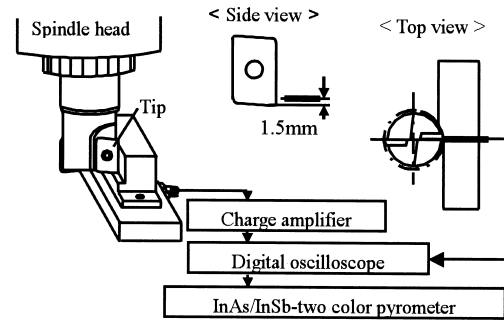


Fig.1 Schematic illustration of experimental arrangement

図1に切削温度の測定装置の概略図を示す。実験は圧電素子型工具動力計に取り付けられた被削材を、主軸に取り付けたエンドミルで加工する方法で行った。被削材には温度測定用の光ファイバ(コア径 300  $\mu\text{m}$ )を挿入するための貫通穴( $\phi$  1.1mm)が加工面に垂直に1個あけてある。外側面から加工面に向けて1本の光ファイバを挿入し、受光面が材料表面から0.5mmとなる位置で固定する。このファイバによって、切削中の工具刃先が小孔上を通過するとき刃先逃げ面から放射された赤外線を受光し、InAs/InSn2色温度計により温度の測定を行う。それぞれの素子の分光感度特性が異なるため、2つの素子の出力の比を算出することで温度へ換算が可能である。図2に出力比と温度の関係を示す。

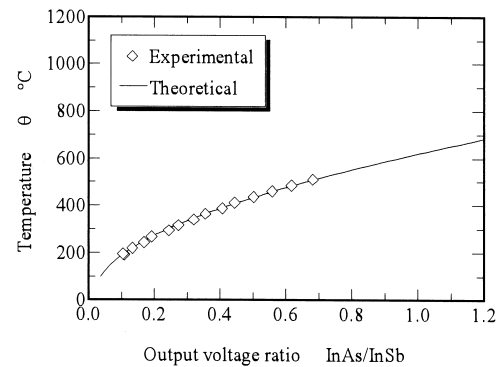


Fig.2 Calibration curve of InAs/InSb two-color pyrometer

図3は、温度計の周波数特性であるが、応答速度 400kHz まで安定した出力が得られており本実験において十分な感度を有していることが分かる。

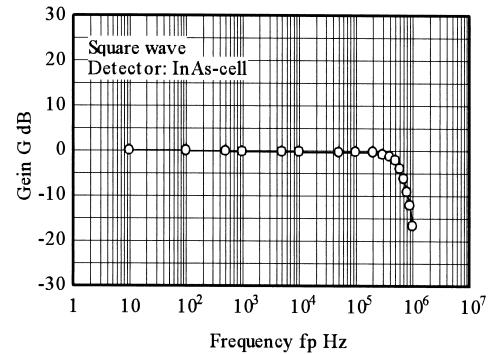


Fig.3 Frequency characteristics of InAs/InSb two-color pyrometer

図4にエンドミル切削時におけるInAs/InSn2色温度計の出力波形の一例を示す。実験に使用したスローアウェイチップ1枚刃であるため主軸1回転に相当する周期で各切れ刃からの出力が記録されており、温度計が各切削の切削毎の出力を明確に捕らえていることが分かる。工具逃げ面の温度は各パルスのピーク電圧の比より求める。切削温度の測定結果は連続した10パルス(2枚刃の場合は各切れ刃から10パルス)の温度の平均値をその切削条件における工具逃げ面温度とした。

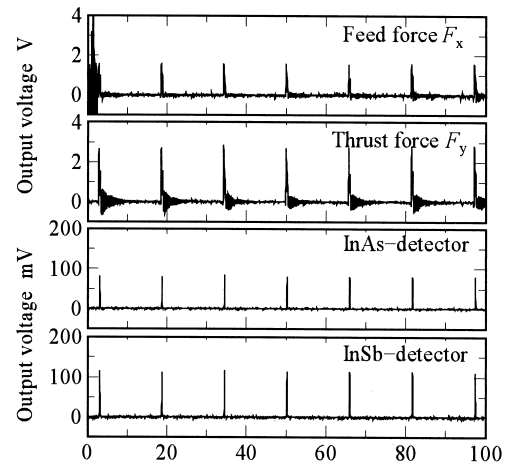


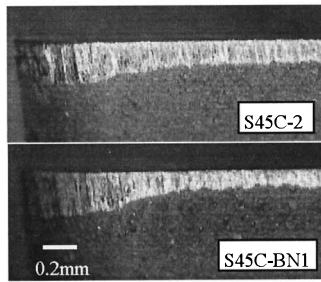
Fig.4 Typical output profiles of InAs/InSb two-color pyrometer and temperature of two cutting edges

### 3. 実験結果および考察

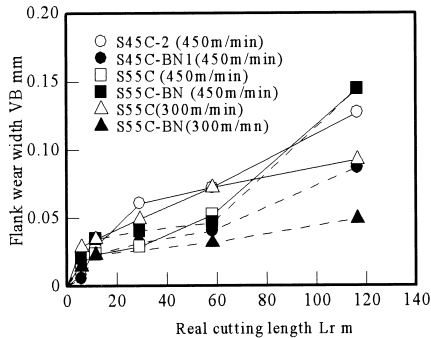
#### 3.1 スローアウェイチップによるエンドミル加工

図5に実切削距離50mにおけるスローアウェイチップの工具摩耗形態を示す。S45C, S45C-BNのいずれの被削材の切削を行った工具についても、工具刃先のコーナー部に相当する部分において刃先に近づくにつれて摩耗幅が大きいことが分かる。これはコーナー部における工具温度が高いこと<sup>8)</sup>が考えられる。また、軸方向切込みが大きい部分では摩耗幅は小さく、特異な摩耗は認められなかった。このためスローアウェイチップで切削時の被削材間の比較は工具温度の測定点である  $Ad=1.5\text{mm}$  における摩耗幅について比較を行った。後述する切削温度の測定もこの位置について行った。

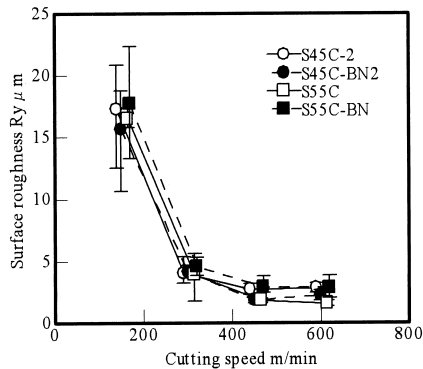
図6にS45CおよびS55CおよびこれらのBN添加鋼をエンドミル加工時の実切削距離とスローアウェイチップの切れ刃逃げ面の中央部における摩耗幅の関係を示す。切削速度 300m/min の場合、S55Cと比較しS55C-BNの摩耗の進行が遅いことが分かる。しかし、切削速度 450m/min になるとS55CとS55C-BNはほぼ同じ摩耗量を示している。S45C-BN切削時の逃げ面摩耗幅は切削速度 450m/min においてもS45Cと比較し小さく抑制さ



$v=450\text{m/min}$ ,  $A_d=3\text{mm}$ ,  $R_d=0.2\text{mm}$ ,  $f=0.05\text{mm/tooth}$ ,  $L_r=117\text{m}$ , dry  
 Fig.5 Wear patterns of throw away tip in end milling S45C and S45C-BN2



$A_d=3\text{mm}$ ,  $R_d=0.2\text{mm}$ ,  $f=0.05\text{mm/tooth}$ , dry  
 Fig.6 Wear progress curves of throw away endmill in end milling S45C and S45C-BN2



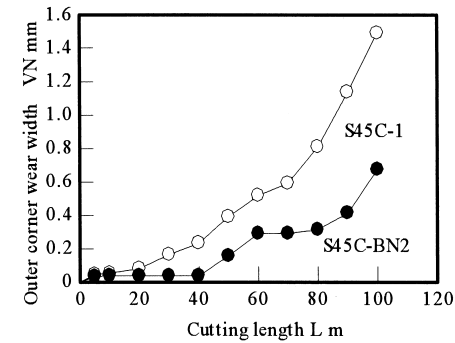
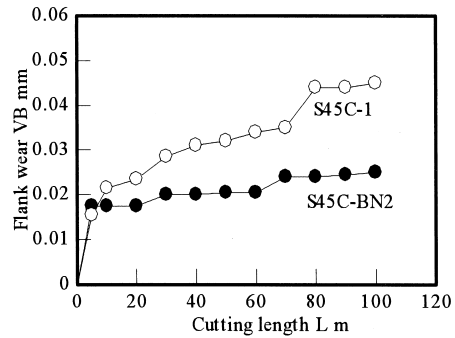
$A_d=3\text{mm}$ ,  $R_d=0.2\text{mm}$ ,  $f=0.05\text{mm/tooth}$ , dry  
 Fig.7 Wear progress curves of TiAlN coated carbide endmill in end milling S45C and S45C-BN2

れていることが分かる。切削速度 300m/min と 450m/min の逃げ面摩耗幅を同一切削距離、すなわち擦過距離が同じ場合において比較すると、切削速度 450m/min における摩耗の進行が早いことから、切削速度が大きいほど熱的な摩耗が占める割合が大きいこと<sup>9)</sup>が示唆される。

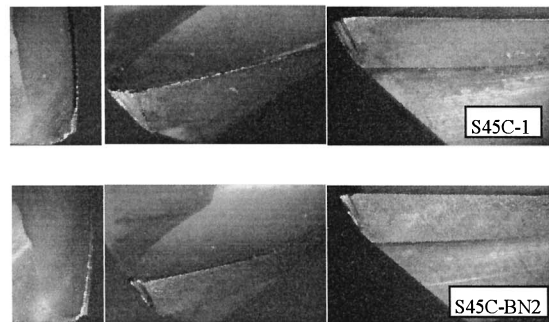
図 7 にエンドミル加工後の S45C, S55C およびこれらの BN 添加鋼の仕上げ面粗さを示す。切削速度が増加するにつれて粗さが減少し、切削速度 450m/min あたりではほぼ一定値を示すようになる。また、平均値において被削材間の差はほとんど認められない。

### 3.2 スクエアエンドミルによる切削時の工具摩耗

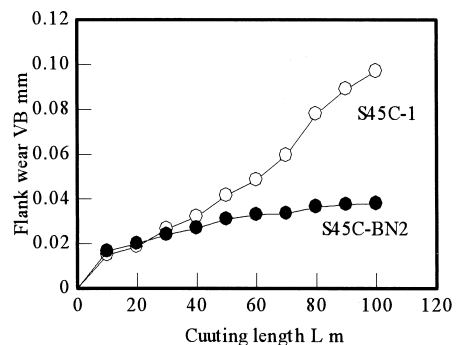
図 8 に S45C および S45C-BN 切削時の TiAlN コーティング処理したスクエアエンドミルの逃げ面およびコーナー部の摩耗幅と切削距離の関係を示す。逃げ面摩耗については切削距離が



$v=300\text{m/min}$ ,  $A_d=8\text{mm}$ ,  $R_d=1.0\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/tooth}$ , dry  
 Fig.8 Wear progress curves of TiAlN coated carbide squire endmill in end milling S45C and S45C-BN2

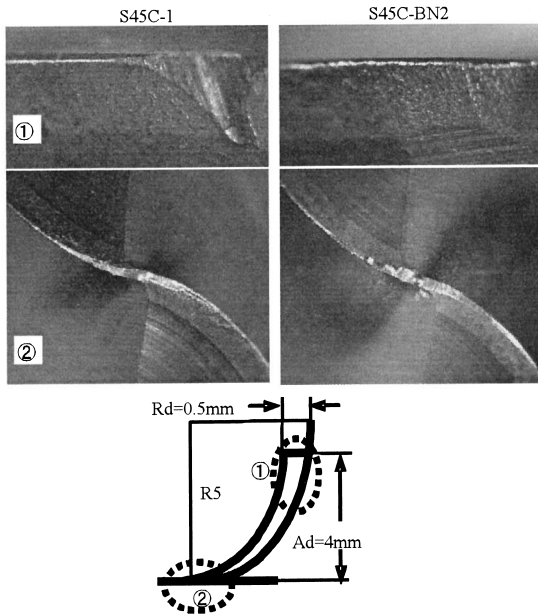


$v=300\text{m/min}$ ,  $A_d=8\text{mm}$ ,  $R_d=1.0\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/tooth}$ ,  $L=100\text{m}$ , dry  
 Fig.9 Wear patterns of TiAlN coated carbide ball endmill after end milling S45C and S45C-BN2



$v=276\text{m/min}$ ,  $A_d=4\text{mm}$ ,  $R_d=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.05\text{mm/tooth}$ , dry  
 Fig.10 Wear progress curves of TiAlN coated carbide ball endmill in end milling S45C and S45C-BN2

100m と短かったことから、どちらの被削材を切削した場合も摩耗が大きく進行することはなかったが、初期摩耗を除いた単位切削距離当りの摩耗進行速度で比べると S45C が  $3.11 \times 10^{-4} \text{mm/min}$ , S45C-BN2 が  $7.89 \times 10^{-5} \text{mm/min}$  と S45C-BN2



v=276m/min, Ad=4mm, Rd=0.5mm, f=0.05mm/tooth, L=100m, dry  
 Fig.11 Wear patterns of TiAlN coated carbide endmill after end milling S45C-1 and S45C-BN2

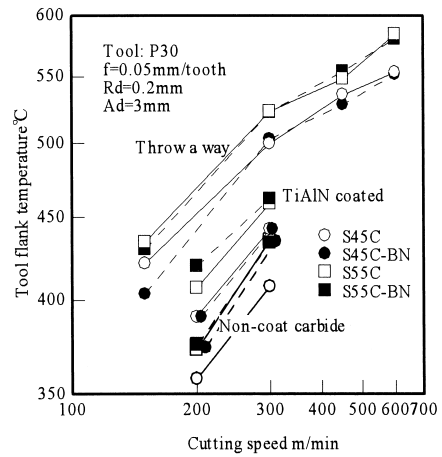
の方が約 1/4 となっており摩耗進行速度が大幅に小さくなっている。またコーナー部摩耗も S45C-1 切削時と比べ S45C-BN2 切削時の摩耗進行が明らかに遅くなっていることが分かる。

図 9 にスクエアエンドミルの切削長 100m における刃先付近の摩耗形態を示す。逃げ面平行部摩耗については大きな違いは認められない。コーナー部に両者ともチッピングがみられ、S45C 切削後では大きなチッピングとなっているのに対し S45C-BN2 の切削では S45C-1 切削時と比べ小さいチッピングとなっている。なおコーナー部でチッピングが発生したことから、負荷が大きい荒切削を行う場合にはラジラスエンドミルなどのコーナー部が欠けに強いエンドミルを使用することが望ましい。

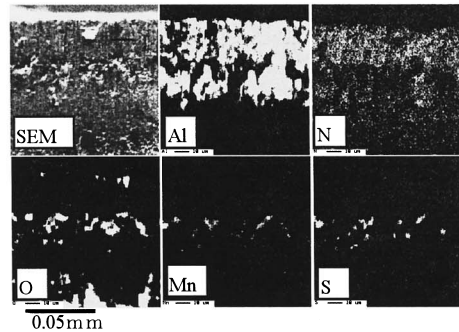
### 3.3 ボールエンドミルによる切削時の工具摩耗

図 10 に S45C および BN 添加鋼 S45C-BN を切削したときの切削距離と TiAlN コーティング処理したボールエンドミルの摩耗幅の関係を示す。切削条件は軸方向切り込み Ad=4.0 mm, 半径方向切り込み Rd=0.5mm, 送り 0.05mm/tooth であり、切削速度は最大切り込み深さ 4mm の位置において 276mm/min である。逃げ面摩耗の測定は図 11 に示す①の部分について行った。S45C 切削時は切削距離の増加に伴い摩耗が急激に進行している。一方、BN 添加鋼 S45C-BN 切削時は S45C 切削時と比べ摩耗の進行が非常になだらかであることが分かる。スクエアエンドミルで切削した場合と比べ同一切削長における摩耗の進行に大きな開きが見られたのは一刃あたりの送りがボールエンドミルの場合、スクエアエンドミルで切削した場合と比べ半分であることから、ボールエンドミルでは切削回数、つまり刃先の擦過距離がスクエアエンドミル切削時と比べ約 2 倍であるためと考えられる。

図 11 に切削距離 100m におけるボールエンドミルの摩耗形態を示す。S45C 切削時と比べ S45C-BN 切削時の摩耗幅が明らかに小さいことが分かる。また S45C 切削後では 2 枚の切れ刃のどちらにおいても大きな境界摩耗が発生しているが S45C-BN 切削後では全く生じていない。また底刃についてはどちらもコーテッド層が摩滅して母材が露出している部分が見られるが、



v=300m/min, Ad=3mm, Rd=0.2mm, f=0.05mm/tooth, dry  
 Fig.12 Tool flank temperature in end milling S45C and S45C-BN2



Tool: P10(SMNM120408), Cutter dir:100mm, Work: S45C-BN2, Work width:72mm, v=300m/min, f=0.20mm/tooth, d=1.0mm, t=10min, dry  
 Fig.13 Element distribution on the flank face of carbide tool P10 after face milling BN4

S45C 切削後と比べ S45C-BN 切削後の方がその量は小さく、切削速度が低い中心部付近においても BN 添加鋼の摩耗抑制効果が発揮されていることが分かる。このようにボールエンドミルを用いればスクエアエンドミル切削時のような刃先先端の欠けが起り難く、BN 添加鋼切削時は境界摩耗などの異常な摩耗が見られないことから、標準鋼と比べ大幅な高速・高効率加工が可能であると言える。

### 3.4 エンドミル切削時の工具逃げ面温度と工具摩耗

図 12 にエンドミル切削時における工具逃げ面温度を示す。スクエアエンドミルはノンコートと TiAlN コーティング処理済の 2 種類である。スローアウェイチップタイプはノンコートの超硬工具を用いた。スローアウェイチップでのエンドミル切削において、S45C ベースと S55C ベースの被削材を比較した場合、S55C ベースの方が約 30°C 高い切削温度を示すことが分かる。S45C, S55C ベースのいずれについても BN 添加鋼が標準鋼と比べ同等もしくははやや低い値を示した。

工具形状が同じで表面処理が異なるスクエアエンドミルで切削時においても S45C ベースと比べ S55C ベースの方が高い温度を示した。TiAlN コーテッド超硬エンドミルとノンコートの超硬エンドミルではノンコートの超硬エンドミルの方が低い値を示した。一般的に工具形状が同じであればコーテッド後の刃先丸みが大きくなるため切れ刃の鋭利さがやや低下したためと考えられる。S45C 切削時の切削温度が他の場合と比べ低い値を示

す。この原因として、詳細は明らかに出来ていないが、被削材の主成分である Fe や空転時において酸化された凝着物の摩擦特性の違いによるものと考えられる。また、スローアウェイチップで切削した場合と比較し、同一切削条件において約 100°C 低い逃げ面温度を示すことが分かる。これは、切削抵抗の値も低い値を示したことや、工具顕微鏡で確認したところ使用したスローアウェイチップは刃先のホーニング幅が約 0.02mm であるのに対し、ソリッドエンドミルの工具刃先においては約 0.005mm でありこの切れ刃形状の差もその一因であると考えられる。

エンドミル加工時の逃げ面摩擦抑制の原因について調べるため BN 添加鋼を断続切削した後の工具逃げ面について EPMA を用いて元素の分布を調べた。図 13 にその結果を示す。切れ刃に近い部分に Al と N が帯状に分布している。また、その外側に Mn, S, O などが見られる。このことから、断続切削においても連続切削時と同じように窒化物系の保護膜により逃げ面摩擦が抑制されたと考えられる。しかし、超硬 P30 のスローアウェイチップを用いたエンドミル加工において、切削速度が上昇し切削温度が上昇すると標準鋼と比較しほぼ同等の摩擦を示すことが認められた。連続切削においては切削速度 500m/min において逃げ面摩擦に明らかな摩擦抑制効果が認められている<sup>1)</sup>。工具形状や切削方式が異なるので単純な比較は難しいが、今回のエンドミル切削ではそれよりも低い切削速度、切り込み、送りにもかかわらず摩擦抑制効果が認められていない。これは、エンドミル加工が断続切削であることから、空転時における工具表面や凝着物の酸化の影響<sup>3)</sup>により窒化物系保護膜の組成の変化や高温による流動性の高まりにより工具表面に留まることが出来なくなったことがその一因であると考えられる。この保護膜の生成、付着は工具中の化学成分に影響を受けることが明らかとされていること<sup>3)4)</sup>から高効率な加工を行うためにはコーテッド工具を用いるなど適切な工具材種を選択することが肝要である。

#### 4. 結 論

標準鋼 S45C および S55C、またその BN 添加鋼を超硬工具および TiAlN コーテッド超硬工具を用いてエンドミル加工を行い、工具摩擦、切削温度、切削抵抗および仕上げ面あらさを測定し BN 添加鋼の快削効果について検討を行った結果、次の結論が得られた。

(1) スクエアエンドミルで切削した場合、逃げ面において若

干の摩擦進行速度の低下が見られ、コーナー部の欠けも低減された。

- (2) ボールエンドミルで切削した場合、標準鋼と比べ BN 添加鋼では逃げ面摩擦が大幅に抑制された。また S45C 切削時においては境界摩擦が見られたが、BN 添加鋼切削時において境界摩擦は認められなかった。
- (3) BN 添加鋼切削時の仕上げ面粗さは切削速度の増加につれ平均値およびばらつきが減少した。被削材間に大きな違いは見られなかった。
- (4) S45C ベースと S55C ベースの被削材を比較した場合、S55C ベースの方が高い切削温度を示す。標準鋼と BN 添加鋼に有意な差は見られなかった。また、刃先が鋭利なソリッドエンドミルがスローアウェイチップより低い工具温度を示した。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり多大なご支援いただきました JFE 条鋼および実験に使用する試料について便宜を図っていただきました広島県立西部工業技術センター生産技術アカデミー 山下 弘之氏に記して感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 山根八洲男, 田中隆太郎, 鳴瀧則彦: BN 添加鋼の被削性, 精密工学会誌, **64**, 9(1998) 1370.
- 2) 山根八洲男, 田中隆太郎, 関谷克彦, 鳴瀧則彦, 白神哲夫: BN 添加鋼の被削性(第 2 報)―被削材および工具中の化学成分の影響―, 精密工学会誌, **66**, 2(2000) 229.
- 3) 田中隆太郎, 山根八洲男, 関谷克彦, 鳴瀧則彦, 白神哲夫: BN 添加鋼の被削性(第 3 報)―断続切削における被削性―, 精密工学会誌 **68**, 5(2002) 705.
- 4) 田中隆太郎, 山根八洲男, 関谷克彦, 鳴瀧則彦, 白神哲夫: BN 添加鋼の被削性(第 4 報)―旋削加工におけるコーテッド工具およびセラミック工具の摩擦特性―, 精密工学会誌, **72**, 10(2006) 705.
- 5) H. Takaoka, E. Nakamura, T. Oshika, A. Nishiyama: Relationship between an affinity of (Ti1yx, Alx)N layer toward iron and its cutting performance Surface and Coatings Technology, **177-178** (2004) 306.
- 6) Jie Gu, Gary Barberb, Simon Tung, Ren-Jyh Gu: Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts, Wear, **225-229** (1999) 273.
- 7) G.E. D'Errico, E. Guglielmi: A comparative study of PVD coated cermet inserts for milling applications, Journal of Materials Processing Technology, **78** (1998) 48.
- 8) 細川 晃, 小田健作, 山田啓司, 上田隆司: 断続切削における工具逃げ面温度―高速エンドミル加工に関する研究(第 1 報)―, 精密工学会誌, **66**, 11(2000) 1786.
- 9) H.Opits: Metal Transformations, Gordon and Breach, New York (1968) 261.