

フェロチックCのエンドミル切削(第1報)

泊 誠, 前野 一郎, 市来 浩一

End Milling of Powder Metallurgy Alloy(Ferrotic C) (I)

Makoto TOMARI, Ichiro MAENO and Koichi ICHIKI

粉末冶金法によってTiCを耐衝撃鋼マトリックス中で液相焼結したフェロチックCと呼ばれる材料を4種類のエンドミルで乾式切削を行い、次の結果を得た。

- (1) 超硬ソリッドエンドミルは高切削速度領域で優れた耐久性を示し、最もよい結果が得られた。
- (2) ハイス系エンドミルでは粉末ハイスコーティング (TiN) エンドミルが優れており最適切削速度領域があるが、標準ハイスエンドミルと粉末ハイスエンドミル間には耐久性の差はみられない。
- (3) 切削はマトリックスの切削とTiCの掘起こしが同時に起こっており仕上げ面粗さはかなり大きい。

1. はじめに

金型材料は金型の用途、耐久性等を考慮してSKS, SKH, SKD, 超硬合金等から選ばれている。金型加工において前三者は熱処理前の切削加工が比較的容易であるため金型材料として多用される。超硬合金は硬さ、耐摩耗性共に極めて優れた材料であるが、切削が極めて困難なため金型は放電加工、EWMあるいは研削により作られ特に耐摩耗性を重視する高精度量産部品用の金型として用いられている。一般の金型材料はこのような特質を持っているが、超硬合金と同様に、粉末冶金によってTiC(Hv3400)をSKS, SKD, SKH等の工具鋼マトリックスで液相焼結した商品名フェロチックと呼ばれる合金は、切削可能で熱処理によりHRC70程度の硬さを得ることができ、耐摩耗性が高いので抜き、曲げ、絞りをはじめとする金型部品に使用され、モーターコア用珪素鋼板等の打ち抜きあるいはステンレスの深絞り等に使用されている¹⁾。この材料は焼鈍硬さがHRC38~52ありTiCをかなり多量に含むため、加工において特に切削の場合TiCが工具に対し砥粒として作

用するので極めて困難な切削である。

金型加工においてはエンドミル加工が主となるため、この研究ではいくつかのエンドミルを用いてフェロチックの仕上げ切削を行い、工具の耐久性について比較検討したことについて報告する。

2. 実験方法

2.1 被削材

実験に用いた被削材は、耐衝撃鋼マトリックス(0.6% C, 2.5% Cr)に容積比45%TiCを含むフェロチックCと呼ばれる粉末冶金製品で、焼入れ、焼もどし等の熱処理が可能である。その特性を表1に示す。図1に本実験で用いた焼鈍材の組織を示す。組織中には5 μ m程度のTiC粒子が多数分布している。

実験では焼鈍材(HRC38~43)を切削幅10mm, 切削長さ100mmになるように調整した。このとき調整加工の仕方により被削材の表面硬さがかなり異なる傾向がみられたため、正面フライス切削と研削の場合について表面からの硬さ変化を調べた。その結果を図2に示す。正面フライス切削の場合には表面が加工硬化する傾向がみられたので被削材

の調整は正面フライス切削後研削仕上げした。

2.2 工具

使用したエンドミルは標準ハイス、粉末ハイス、粉末ハイス (TiNコーティング) (以下コーティングハイスという) 超硬ソリッドの4種類である。その工具緒言を表2に示す。

2.3 切削方法と切削条件

実験にはNCフライス盤 (株牧野フライス製作所 AG II UNC-85) を用いた。図3に切削時の工具と被削材の位置関係を示す。被削材のチャッキングは被削材の幅100mm方向とし、バイス端面からの被削材突き出

表1 フェロチックCの特性¹⁾

TiC容積比	Vol%	45%	
鋼マトリックスのタイプ	AISI規格	S7 (耐衝撃鋼) 0.6% C, 2.5% Cr	
熱処理条件	焼入れ	930℃ 油冷 (φ10空冷可) ステン箱	
	焼もどし	140~300℃ 空冷	
硬 さ	焼なまし	HRC	38~43
	焼入れ	HRC	70.0~72.0
	焼もどし	温度℃, HRC	140℃, 70.0 200℃, 68.5
最高使用温度	℃	300	
比 重	g /cc	6.60	
抗折力	焼なまし	kg/mm ²	130~150
	焼もどし	kg/mm ²	160~200

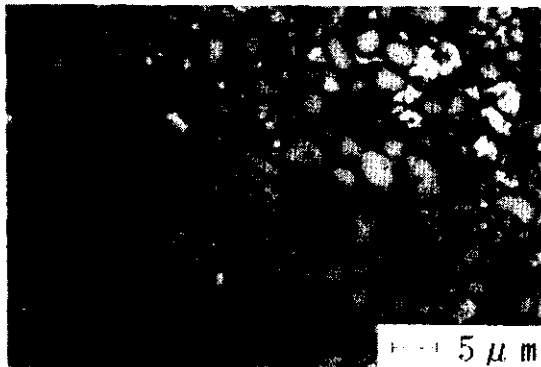


図1 フェロチックCの組織

し長さは10mmとした。エンドミル突き出し長さはミーリングチャック端面から30mmで、エンドミルの下から5~15mmの間で切削を行った。また常に一定位置で切削するためタッチセンサーにより上下の位置決めをした。実験は新しい切削条件にな

表2 工具緒言

呼 称	刃径 (mm)	刃長 (mm)	シャンク径 (mm)	ネジレ角 (°)	刃 数
標準ハイス	10	18	10	30	2
粉末ハイス	10	18	10	30	2
粉末ハイス コーティング (TiN)	10	18	10	30	2
超硬ソリッド	10	22	10	30	2

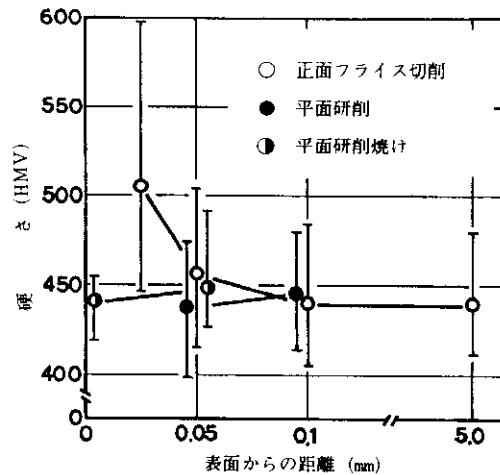


図2 加工方法と表面からの硬さ変化

フェロチックC
フライス切削, V=16.5m/min, f=0.1mm/tooth, t=0.2mm, dry, 工具Al₂O₃+TiCセラミックス,
平面研削, V=5m/min, t=0.003~0.005mm, wet, 砥石WA46Hm

表3 切削条件

切削速度	標準ハイス	2.4, 4.6, 9.1m/min
	粉末ハイス	2.4, 4.6, 9.1m/min
	粉末ハイス TiNコーティング	4.6, 9.1, 14.9, 18.7m/min
	超硬ソリッド	9.1, 18.7, 36.3m/min
	送り	0.08mm/tooth
切込み	10×1mm(軸方向切込み×半径方向切込み)	
加工形態	側面削り	
切削方向	下向き削り(X軸方向削り)	
切削油剤	乾式	
工具突出長	30mm	
被削材突出長	10mm	

平均値とし、境界摩耗幅は0.10mm位置での4カ所の平均値とした。

このほか各切削時間毎の仕上げ面粗さを表面粗さ測定機で測定した。

摩耗測定はエンドミルにねじれ角があるため、図4に示す治具を工具顕微鏡の測定テーブルに取り付けて測定した。図4においてマイクロメーター①は台上に固定されており、マイクロメーター②はマイクロメーター①とエンドミルの軸線に対し平行移動し、マイクロメーター③は台上を任意に移動

させることができる。この測定治具をマイクロメーター①及びエンドミルの中心線が工具顕微鏡の移動方向(左右方向)と平行になるように工具顕微鏡の測定テーブルに取り付け、マイクロメーター①により切れ刃の測定位置を調整(図で左右方向)し、マイクロメーター②または③にエンドミル

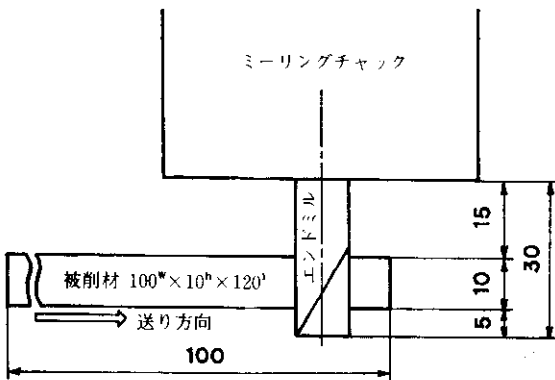


図3 切削時の工具と被削材の位置関係

る毎に超硬エンドミルで切削速度4.6m/min、切込み0.2mm、送り0.08mm/toothの条件で削除しこの後所定の切込みを与えた。

切削条件は表3に示すとおりである。なお切削時間は切削終了時に切れ刃の損傷を起こさないように切削長さ100mmの切削時間の整数倍にとった。

2.4 工具摩耗の測定と測定方法

工具の耐久性は、工具の逃げ面摩耗幅が $V_b = 0.2$ および 0.3 mmに達する時の寿命とした。工具摩耗の測定は逃げ面摩耗幅と境界摩耗幅を工具顕微鏡で測定した。逃げ面摩耗幅は2枚ある切れ刃の下から2.5, 5.0, 7.5mm位置における合計6カ所の

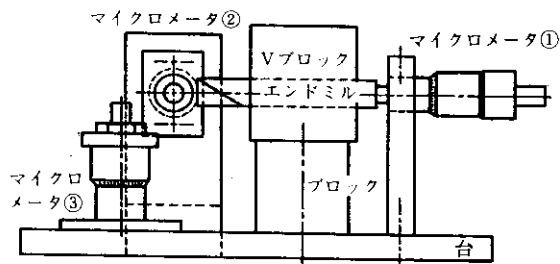


図4 測定治具

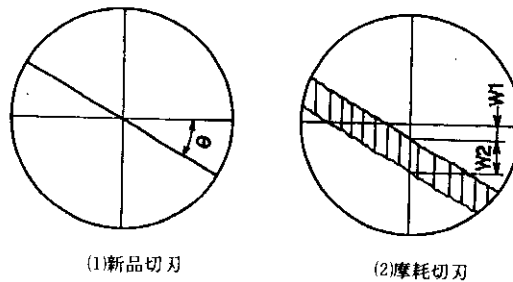


図5 工具顕微鏡の視野

のスクエアエンドを接触させることにより切れ刃のねじれ角を調整して測定位置が真上になるようにして摩耗量を測定する。

このようにして調整した切れ刃は顕微鏡視野内で図5のように見える。図5において

θ : エンドミルのねじれ角

W1 : 摩耗による切れ刃後退量

W2 : 逃げ面摩耗痕

とすると逃げ面摩耗幅Wは

$$W = (W1 + W2) \cos \theta$$

となる。本実験ではこのようにして逃げ面摩耗幅及び境界摩耗幅を測定した。

3. 結果と考察

エンドミルの切れ刃摩耗は加工誤差を生ずる²⁾ことが報告されているが、ここでは工具の耐久性について考察する。この実験ではφ10のエンドミルを使用し、半径方向切込みを1mmにして側面切削をしているため実際のエンドミルの正味切削時間は見かけの切削時間の約10%となる。このため実験結果は正味切削時間によってまとめてある。

3.1 エンドミル切れ刃の摩耗形態(2枚刃)

この実験はエンドミルを常用する状態で行ったので切れ刃間に摩耗経過の違いが生ずるかどうかが

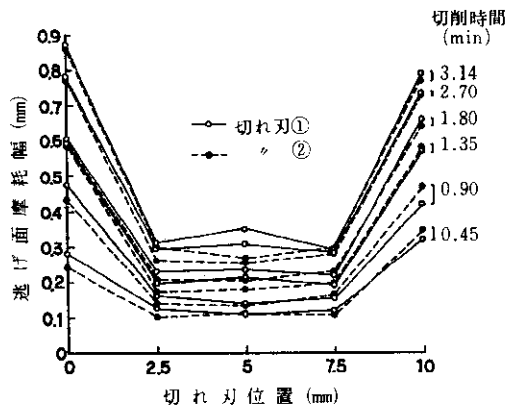


図6 標準ハイスエンドミルの摩耗形態
フェロチックC, V=4.6m/min,
t=1.0mm, f=0.08mm/tooth, dry

を調べた。図6～9に標準ハイス、粉末ハイス、コーティングハイス、超硬ソリッドの各エンドミルについて代表例を示している。これらの図で標準ハイス、粉末ハイス、コーティングハイスはエンドミル切れ刃の上下の部分に大きな境界摩耗が現れ、切れ刃の他の部分はほぼ均一な摩耗をしている。超硬ソリッドは切れ刃下部に境界摩耗が現れるが切れ刃上部には境界摩耗が現れずほぼ均一な摩耗をしている。また境界摩耗は切れ刃下部の方が大きく、境界摩耗部とそれ以外の均一摩耗部との差は切削速度が早いほど大きくなった。

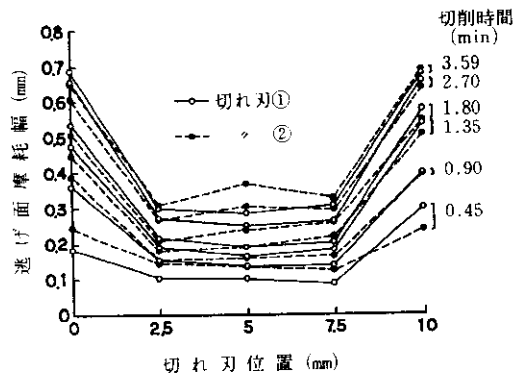


図7 粉末ハイスエンドミルの摩耗形態
フェロチックC, V=4.6m/min,
t=1.0mm, f=0.08mm/tooth, dry

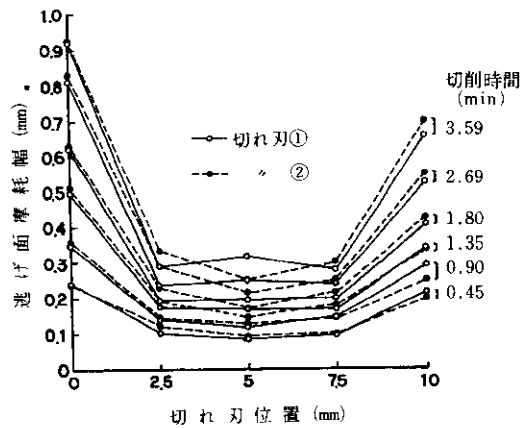


図8 粉末ハイコーティング (TiN) エンドミルの摩耗形態
フェロチックC, V=4.6m/min, t=1.0mm
f=0.08mm/tooth, dry

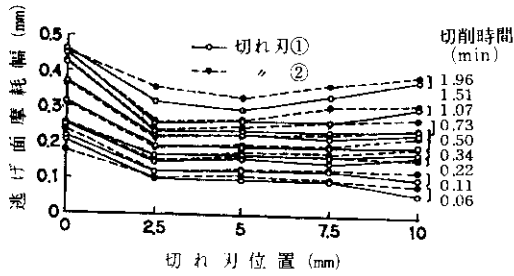


図9 超硬ソリッドエンドミルの摩耗形態
フェロチックC, $V=36.3\text{m/min}$,
 $t=1.0\text{mm}$, $f=0.08\text{mm/tooth}$, dry

どの工具材種においても2枚の切れ刃間には摩耗量の差がいくぶんあるが摩耗経過としては差はない。

3.2 工具摩耗と寿命

上述したように2枚の切れ刃間に摩耗量の大きな差がみられないので、以下2.4で述べたように工具摩耗は2枚の切れ刃の平均摩耗により検討した。

図10~13に各工具の逃げ面の摩耗経過を示す。図10の標準ハイスと図11の粉末ハイスの摩耗経過はわずかに粉末ハイスの方が摩耗は少ないがほぼ同様とみてよい。図12のコーティングハイスは切

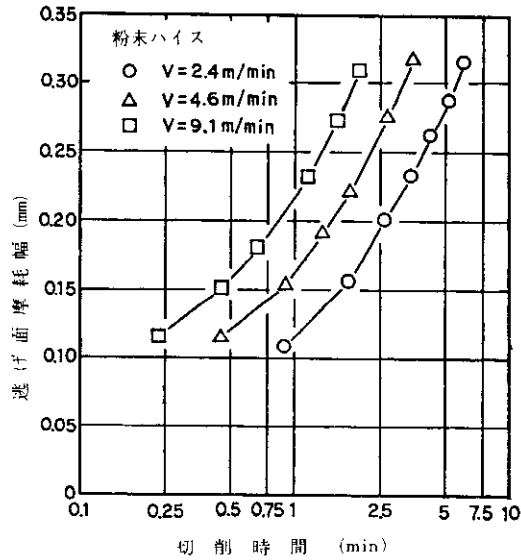


図11 粉末ハイスエンドミルの平均逃げ面摩耗経過

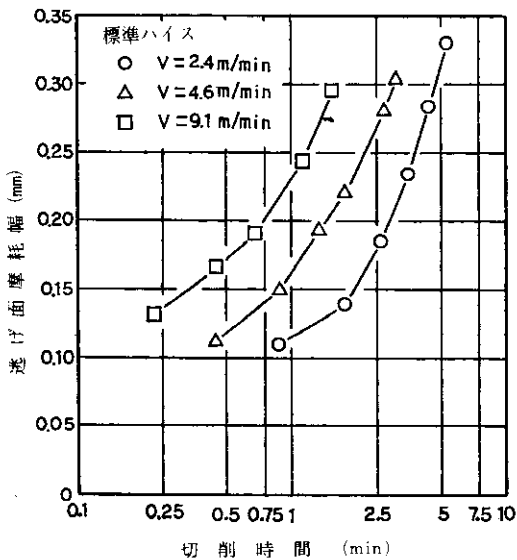


図10 標準ハイスエンドミルの平均逃げ面摩耗経過

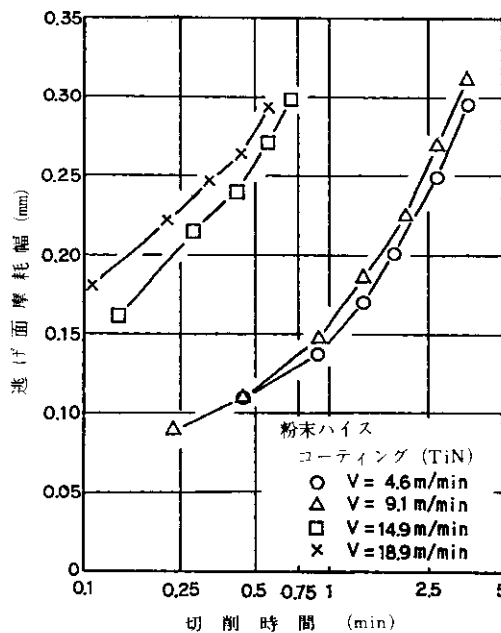


図12 粉末ハイスコーティング(TiN)エンドミルの平均逃げ面摩耗経過

削速度が 9.1m/min の場合は標準ハイスおよび粉末ハイスに比べ約2倍程度の耐摩耗性を示すが、切削速度が低い場合は標準ハイスおよび粉末ハイ

ストと変わらない。また切削速度が高くなると急激に摩耗が進行している。

このように標準ハイスおよび粉末ハイス間に顕著な摩耗量が見られないのは、被削材が硬いTiCを多量に含有するため、工具材の組成に差がない標準ハイスと粉末ハイスはこの被削材に対して有効な差がないということになる。またコーティングハイスの場合はコーティング層は数 μm 程度であり、逃げ面のコーティング層脱落后は通常の粉末ハイスとしての効果しかないため切削速度の高い領域では摩耗が早く進行し、切削速度の低い領域ではコーティング層が耐摩耗性を高めていると考えることができる。コーティングハイスのこの被削材に対する最適切削速度は9.1m/min付近にあると考えられる。

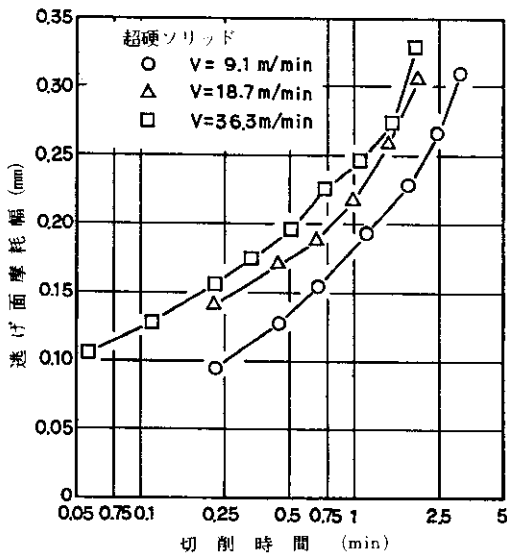


図13 超硬ソリッドエンドミルの平均逃げ面摩耗経過

図14~17に境界摩耗の経過を示す。境界摩耗は切削速度が高くなると小さくなる傾向にあるが、特にコーティングハイスの高い切削速度の場合が顕著である。摩耗量は標準ハイス、粉末ハイスおよびコーティングハイスの場合は逃げ面摩耗の2.5~3倍になる。超硬合金は下部境界摩耗のみであ

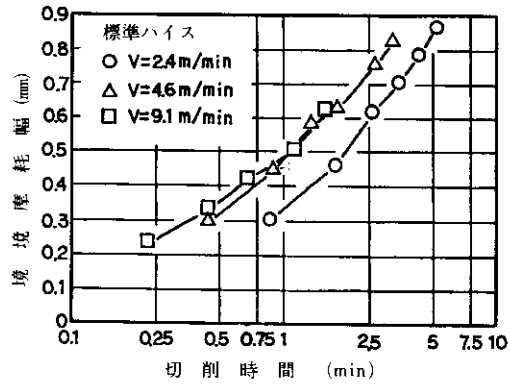


図14 標準ハイスエンドミルの境界摩耗経過

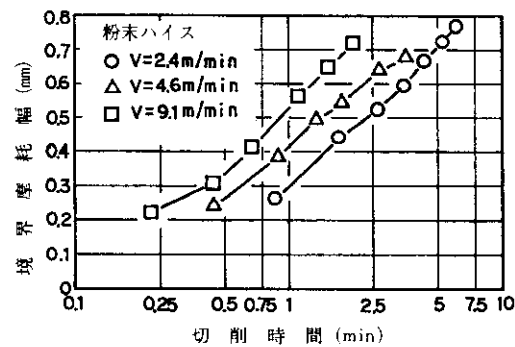


図15 粉末ハイスエンドミルの境界摩耗経過

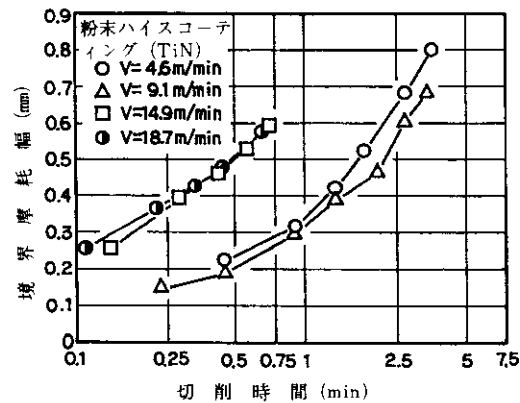


図16 粉末ハイスコーティング(TiN)エンドミルの境界摩耗経過

り逃げ面摩耗量と大差がないが切削速度が高いと摩耗量は小さくなる傾向はハイス系エンドミルと

同様である。

このように切削速度が高くなると境界摩耗が小さくなる理由は、切削速度が高くなるほど逃げ面摩耗が急激に進行するため境界摩耗との差が小さくなるためである。

図18に各種エンドミルの寿命曲線を示した。

図においてコーティングハイスの場合曲線が2つに分かれているが、この理由は前述した通りコーティングハイスは切削速度が高い領域では急激に摩耗が進むためであり、適正切削速度領域を越

表4 各種エンドミルの工具寿命方程式
切削条件 フェロチックC, $t=1.0\text{mm}$
 $f=0.08\text{mm/tooth, dry}$

工 具		$V_B=0.2\text{mm}$	$V_B=0.3\text{mm}$
標 準	ハ イ ス	$VT^{0.968}=6.8$	$VT^{1.339}=19.1$
粉 末	ハ イ ス	$VT^{1.253}=7.9$	$VT^{1.206}=19.4$
粉末ハイスコーティング(TiN)低速	"	$VT^{6.217}=168$	$VT^{5.132}=4304$
	高速	$VT^{0.500}=7.3$	$VT^{1.173}=10.2$
超 硬	ソ リ ッ ド	$VT^{1.677}=13$	$VT^{2.380}=107$

えている。図よりフェロチックCのエンドミル切削では高速切削の場合超硬合金が最も耐久性が高く、低速側ではコーティングハイスが優れているがコーティングハイスには最適切削速度の領域があり、先述したように9.1 m/min付近が最適と考えられる。表4に実験より得られた各種エンドミルの寿命方程式を示す。

3.3 工具の摩耗状況

図19に切削初期と $V_B=0.3\text{mm}$ 付近の工具の逃げ面摩耗状況を示す。また図20には $V_B=0.3\text{mm}$ 付近のすくい面の状況を示している。逃げ面摩耗では超硬ソリッド以外は両方の境界摩耗が大きく発達していることが特徴的である。それぞれの工具に微小チップングから発達したとみられる不規則な摩耗が見られるが、大略均一摩耗をしている。超硬ソリッドの切れ刃部が明瞭な直線となっていないのは切れ刃に溶着が生じているためである。

また図20のすくい面においては超硬ソリッド以外の工具で境界摩耗が大きく発達しており、すくい面も大きく摩耗している。特に標準ハイスの切削速度9.1m/minの $V_B=0.3\text{mm}$ の場合が大きい。これは切削速度が高いことによる欠損から生じた異常摩耗と考えられる。超硬ソリッドにおいては大きな境界摩耗はみられないが、切れ刃に溶着が生じている。この溶着は切削速度が高いほど大きくなる傾向がみられたが、このために欠損に至るようなことは観察されなかった。

すくい面への溶着は他の工具の場合は観察され

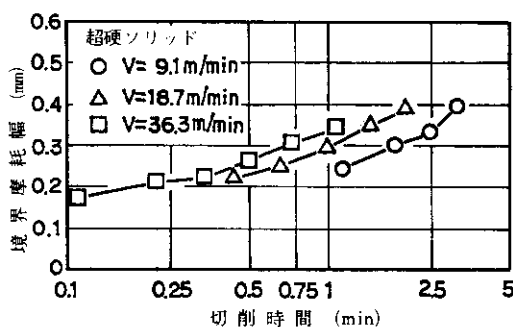


図17 超硬ソリッドエンドミルの境界摩耗経過

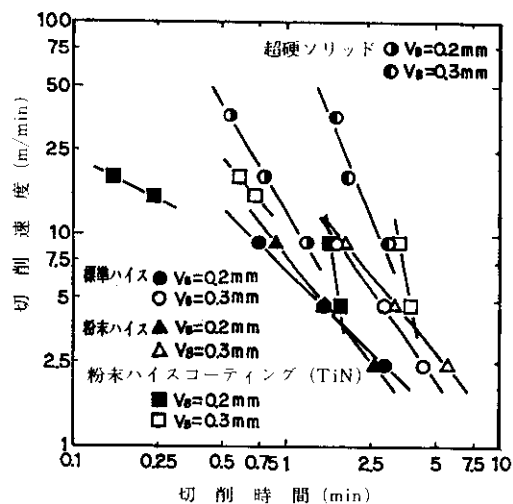


図18 各種エンドミルの寿命曲線
フェロチックC, $t=1.0\text{mm}$,
 $f=0.08\text{mm/tooth, dry}$

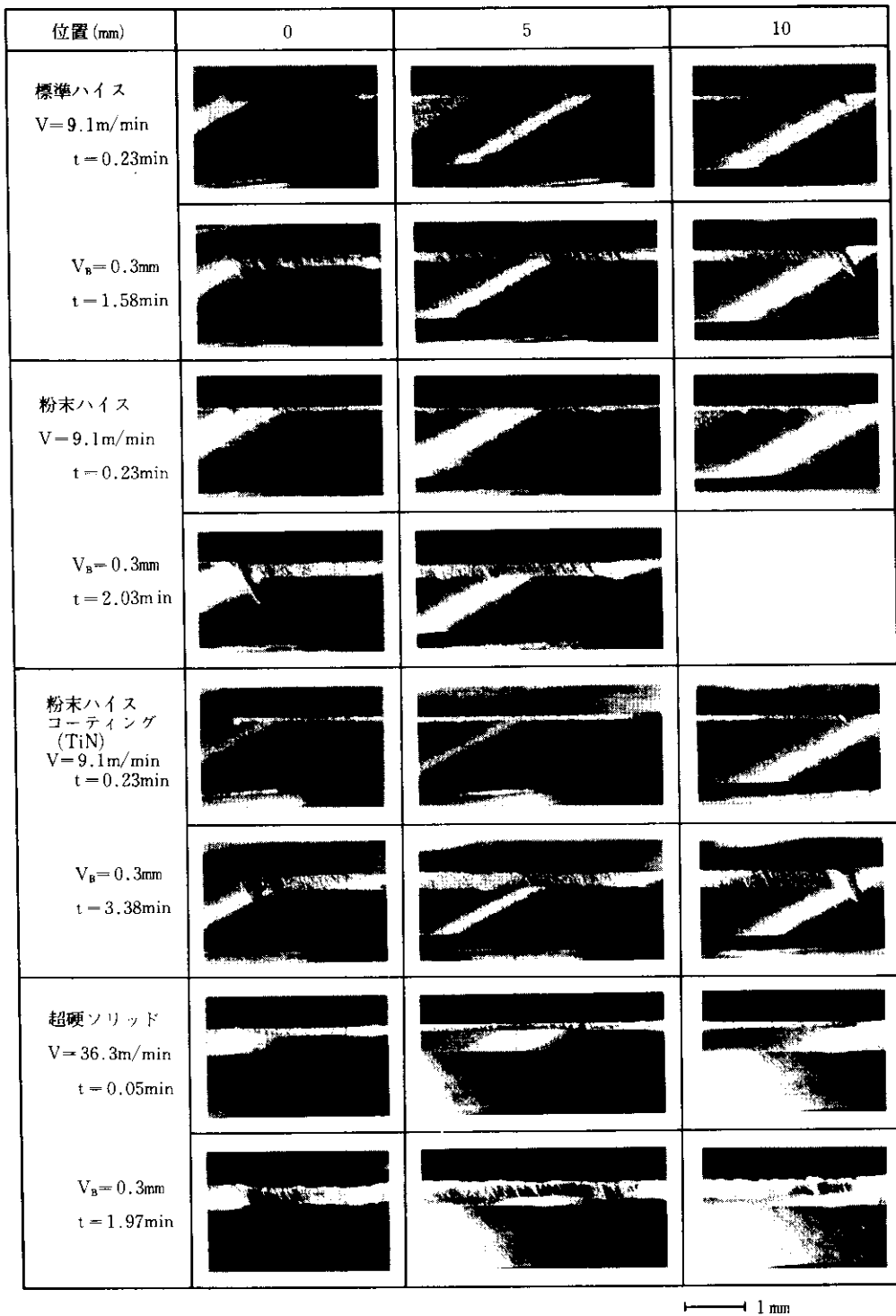


図19 逃げ面摩耗状況

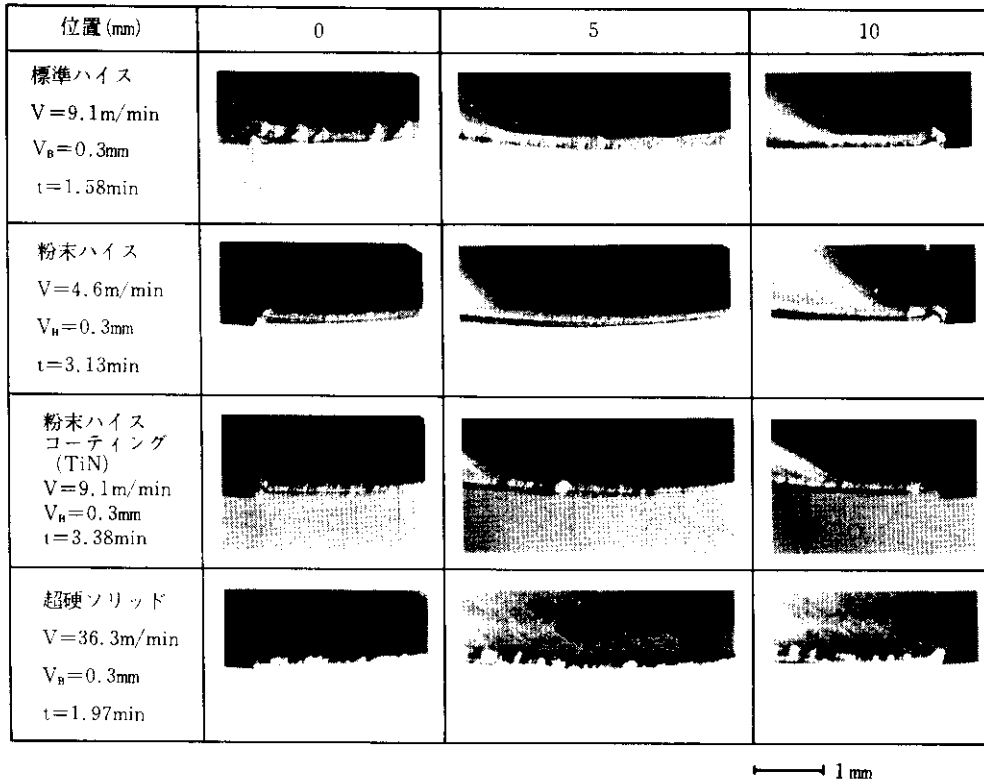


図20 すくい面摩耗状況

なかった。

3.4 仕上げ面粗さ

図21~24に各種工具による仕上げ面粗さの経過を示す。概ね10~20 μmの範囲にあるが、標準ハイスの切削速度9.1m/minと超硬合金の切削時間が長くなる領域においては20~35 μm程度になっている。

このことは次の理由による。標準ハイスの切削速度9.1m/minの場合は切削速度が高いため切れ刃に微小チップングが起こりこの部分の摩耗が促進されるため、切れ刃の後退が大きくなり部分的に大きく切り込まれることに仕上げ面粗さが大きくなる。また超硬合金の切削時間が長くなる領域

においては、被削材に多量のTiCが含まれるため工具材との親和性により切れ刃に溶着が起こり、この部分が大きな切込みを生ずることにより仕上げ面粗さが大きくなる。

このように仕上げ面粗さが一般の鋼切削に比べかなり大きいのは切削過程で被削材中のTiCが切削されずに掘起こされるためであり、実際の切削はマトリックスの切削とTiCの掘起こしが同時に起こっていると考えられる。図25にコーティングハイスの切削速度9.1m/min, 3.38min切削時と超硬ソリッドの切削速度36.3m/min, 1.97min切削時の仕上げ面の状態を示す。超硬ソリッドの場合は切れ刃欠損による切り残しが生じている。

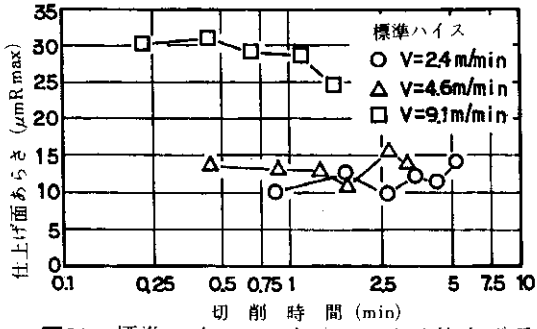


図21 標準ハイスエンドミルによる仕上げ面あらかの経過

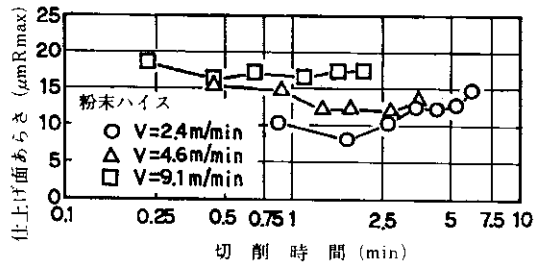


図22 粉末ハイスエンドミルによる仕上げ面あらかの経過

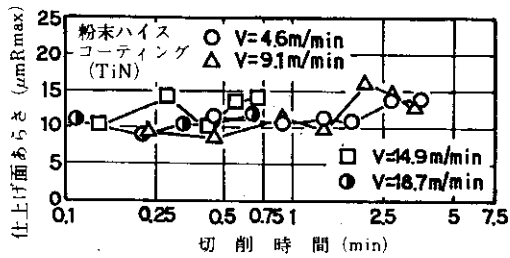


図23 粉末ハイスコーティング(TiN)エンドミルによる仕上げ面あらかの経過

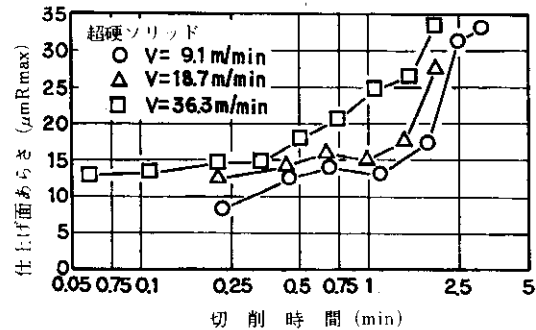
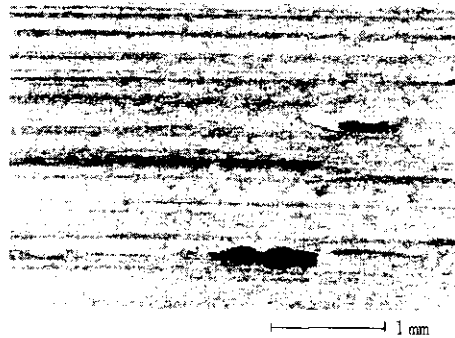


図24 超硬ソリッドエンドミルによる仕上げ面あらかの経過



(1)粉末ハイスコーティング(TiN)
V=9.1m/min, t=3.38min



(2)超硬ソリッド
V=36.3m/min, t=1.97min

図25 粉末ハイスコーティング(TiN),超硬ソリッドエンドミルによる仕上げ面状態

3.5 切り屑

切り屑は全ての実験条件で大略きれいにカールした切り屑が排出される。図26にその状態を示す。切り屑は $V_b=0.3\text{mm}$ 付近のちじれたカール状のものときれいにカールしたものの2つのパターンに分かれる。ちじれたカール状の切り屑は、被削材の切れ刃への溶着または切れ刃のチッピングによる切れ刃稜線の不揃いにより切り屑厚さが変化

しているためである。

4. まとめ

主として抜き型、曲げ型、絞り型等に使用され、耐衝撃鋼マトリックス (0.6% C, 2.5% Cr) 中に容積比45% TiCを含むフェロチックCと呼ばれる粉末冶金合金を、標準ハイスエンドミル、粉末ハイスエンドミル、粉末ハイスコーティングエンド

切削条件	切削開始付近	$V_B=0.2\text{mm}$ 付近	$V_B=0.3\text{mm}$ 付近
標準ハイス $V=2.4\text{m}/\text{min}$			
標準ハイス $V=9.1\text{m}/\text{min}$			
粉末ハイス $V=9.1\text{m}/\text{min}$			
粉末ハイス コーティング (TiN) $V=9.1\text{m}/\text{min}$			
超硬ソリッド $V=9.1\text{m}/\text{min}$			
超硬ソリッド $V=36.3\text{m}/\text{min}$			

→ 5 mm

図26 切り屑形態

ミル (TiN), 超硬ソリッドエンドミルを使って軽仕上げ切削実験を行い次の結果を得た。

(1)切削速度が高い場合は超硬ソリッドエンドミルが優れておりかなりの長寿命を示す。

(2)切削速度が低い領域においても超硬ソリッドエンドミルはハイス系エンドミルに比べて長寿命であるが、粉末ハイスコーティング (TiN) エンドミルは切削速度9.1m/min付近において超硬ソリッドエンドミルの寿命を幾分うわまわる。

(3)ハイス系エンドミルの場合は粉末ハイスコーティング (TiN) エンドミルが優れているが、標準ハイスエンドミルと粉末ハイスエンドミル間には差はみられない。

(4)超硬ソリッドエンドミルの場合は境界摩耗は

あまり発達しないが、他の材種の場合は境界摩耗が大きく発達する。

(5)超硬ソリッドエンドミルは溶着が大きいがこのために工具の損傷にいたることはない。

(6)切削においてはマトリックスの切削とTiCの掘起こしが同時に起こっていると考えられ、このため仕上げ面粗さはかなり大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 中外電気工業(株)カタログ
- 2) 藤井, 岩部, 鈴木: 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係(第1報), 精密機械, 43, 7, 808 (1977)