琉球大学学術リポジトリ

コーティング工具による難削材二次元切削の摩耗プロセス

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2009-11-18 キーワード (Ja): キーワード (En): Orthogonal cutting, cutting forces, Cutting temperature, SEM, Plasma sprayed, coating tool, Microdestruction, Cutting tool life 作成者: 銘苅, 春榮, 福本, 功, 真喜志, 隆, 平井, 敏雄, Mekaru, Shunei, Fukumoto, Isao, Makishi, Takashi, Hirai, Toshio メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/13187

コーティング工具による難削材二次元切削の摩耗プロセス

銘苅春榮* 福本　功* 真喜志　隆* 平井敏雄**

Tool Life Processes in Orthogonal Cutting of Difficult-to-Machine Materials by Coating Tools

Shunei MEKARU* Isao FUKUMOTO* Takashi MAKISHI* Toshio HIRAI**

This paper presents quantitative information on coating tool wear, shape, structure and general behavior of the tool life process. The cutting of difficult-to-machine materials is essentially attributed to their particular material properities. where high hardness and strength of the materials require larger cutting forces, and such increased force needs greater tools and causer work deflection, increased work input and friction loss with greater heat generation and higher cutting temperature.

This subject was brought up as part of series of researches on the cutting of materials difficult to work. Suitable coating material and cutting condition were investigated and determined to improve remarkably the service life of the tools for cutting of stainless steel sus 304.

The displacement of cutting edge and cutting temperature distribution in the tool were calculated by using the Finite Element Method.

Key words: Orthogonal cutting, cutting forces, Cutting temperature, SEM, Plasma sprayed coating tool, Microdestruction, Cutting tool life.

1. 緒言

切削加工において被加工材料は切削工具より局部的に大きな塑性変形を受け，せん断破壊によって分離されることが多いので，むしろ破壊加工とも言うべきものである．切削加工現象は破壊現象が複雑であると同様に加工条件の多様性を考えると，それ以上に複雑多岐にわたるものと言えよう．被加工材料に起因する難切削加工では，被加工材料が硬いために切削工具が破損する．また粘い場合には凝着，チッピング，異常摩耗[1)2)3)]，を起こす．これらの場合には被加工材料に起因する難切削加工と言えよう．被加工材料が切削工具に及ぼす影響等については，被加工材料の種類と機械的性質によって当然異なってくる．

本報では，SS41鋼材にプラズマ溶射法により硬質材のコーティング層を形成して，切削工具を製作し，代表的難削材である高強度で延性材のSUS304，高硬度のSK3とSGPの切削試験を行った．

この種の材料の加工では切削による切削抵抗と工具の温度上昇が工具寿命と密接な関係があると考えられるため，切削抵抗と工具温度の変化を測定した．さらに，切削寿命試験を行い工具寿命への影響因子等についても明らかにする．

受理：1992年11月9日
*琉球大学工学部機械工学科
Dept. of Mechanical Eng., Fac. of Eng.
**東北大学金属材料研究所
Institute for Materials Research Tohoku University.

2. 実験方法

切削試験は池貝 ED－18型旋盤を用い，切削抵抗は佐藤工機製 AST 式切削動力計により測定した．切削工具の温度変化は切刃部近傍に放電加工機により小穴をあけ，クロメルーアルメルの熱電対をさし込み工具の温度変化を測定した．さらに，有限要素法により切削工具の温度解析を行い測定結果と比較検討した．

本研究ではコーティング工具による難削材切削における工具寿命向上の方策を明らかにすることに重きをおいているので，切削温度と工具摩耗がどのように変化していくかを見るため，無潤滑の条件で切削試験を行った．切削工具の摩耗量の測定は適当な切削量毎に形状測定機を用いて測定し，切り刃部の観察は日本電子 JSM－25S Ⅱ型電子顕微鏡を用いた．

3. 被加工材料

被加工材料は SUS 304 の冷間圧延鋼管と高炭素鋼 SK 3，炭素鋼管 SGP の三種を用いた．被加工材料の機械的特性を表 1 に示す．

4. 切削工具の製作

切削工具は一般構造用鋼 SS 41 とステンレス鋼 SUS 304 の二種のクローム系粉末 Cr_3C_2，CrB_2，Ni－Cr 等の粉末をプラズマを熱源として溶射した．プラズマガスは Ar＋He を使用した．溶射断面の代表的組織と硬度分布を図 1 に示す．同図（a）は SS 41 を母材として Cr_3C_2 粉末を溶射したもので，溶射皮膜厚さは約 0.21 mm である．SS 41 の硬度が HV 150 に対し，コーティング層の硬度が Hv 1450 と母材硬度の約 10 倍となっている．（b）は SS 41 を冷間圧延加工で表面硬度を Hv 250 にして CrB_2 粉末を溶射したものである．コーティング層は Hv 1000 程度である．（c）は溶射母材が被加工材料と同一の SUS 304 で溶射粉末は Ni－Cr 系の自溶合金の場合である．コーティング層の硬度は Hv 870 と前者に比べて低い．このごとくコーティング層の硬度は Cr_3C_2 が最も高く，ついで CrB_2 と Ni－Cr である．上記のコーティング材料を 12 mm×12 mm の正方形に切り出しコーティングチップとした．

5. 実験結果

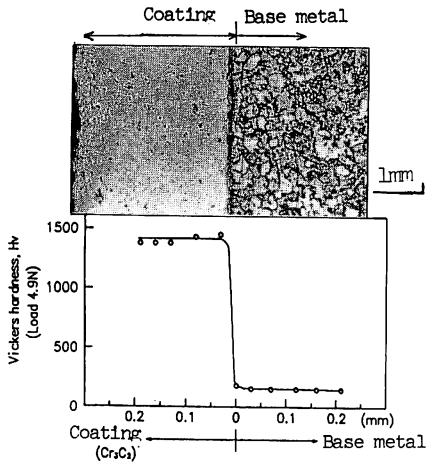
5.1 二次元切削におけるすくい角と切削抵抗の関係

ステンレス鋼等の切削における寿命因子を明らかにするため図 2 に示すように二次元問題としてパイプ端面の二次元切削を行った．工具刃先の温度は同図（b）のように刃先からすくい面上で 1 mm，逃げ面上で 0.75 mm の工具内部温度変化を測定した．

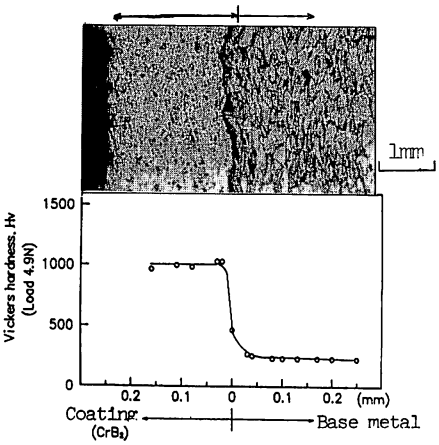
切削工具の刃先形状は切削抵抗に最も大きな影響を及ぼす．Merchant[4] によれば最小エネルギ法による解析で切削抵抗にもっとも大きな影響を及ぼすのはすくい角で，すくい角が増加すれば切削抵抗が減少すると報告されている．SUS 304 の二次元切削におけるすくい角の影響を明らかにするため，逃げ角を 6° と一定としてすくい角を 0° ～30° まで変化させて切削試験を行った．切削速度は 18.4 m/min，送り 0.1 mm/rev と一定とした．図 3（a）は高速度鋼 SKH 57 のすくい角を変えて切削距離と切削抵抗の関係をプロットし

Table 1. Mechanical properties of work material tested.

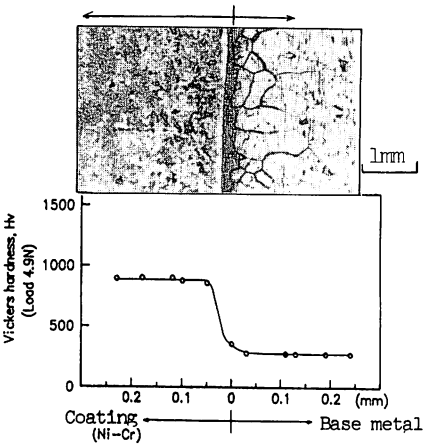
Mechnical propertis / Workpiece	Ultimate strength (Mpa)	Total elongation (%)	Vickers hardness (Hv)	Outside diameter (mm)	Thickness of pipe (mm)
SUS 304	739.4	41	265～275	38.0	1.6
SK 3	740	19	280～310	－	－
SGP	410	27.6	180～250	30.9	1.6



a) base metal SS41 coating powder Cr_3C_2

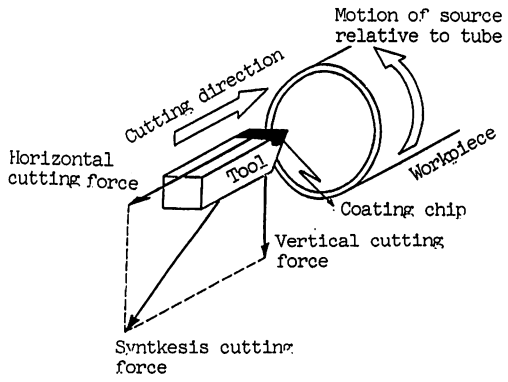


b) base metal SS41 coating powder CrB_2

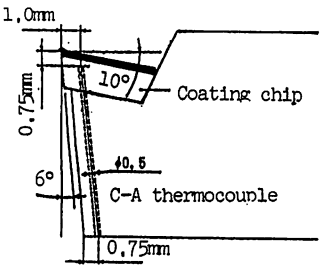


c) base metal SUS304 coating powder Ni-Cr

Fig 1. Photograph of cross section of plasma sprayed coating tools

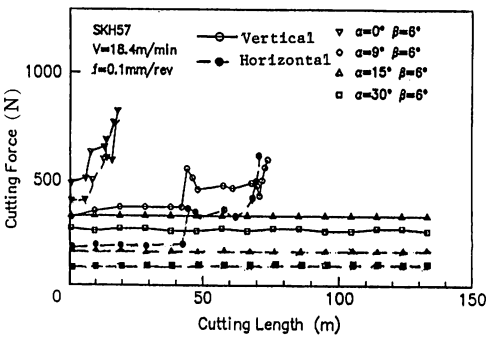


a) measurement of cutting force



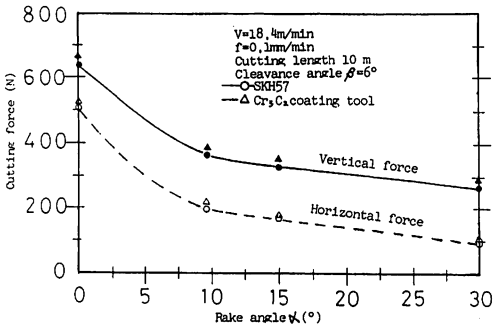
b) measurement of cutting tool temperature

Fig 2. Schematic illustration for orthogonal cutting of thin-walled tube



Effect of rake angle on cutting force and length relation of stainless steel, at depth of cut of 0.1 mm, and feed of 0.1mm/rev

a) cutting tool SKH57



b) cutting tools SKH57 and Cr_3C_2 coating

Fig 3. Effect of rake angle on cutting force workpiece of stainless steel at depth of cut of 0.1mm and feed of 0.1mm/rev cutting length 10m

た．同図のようにすくい角が小さい場合0°と10°では垂直分力，水平分力ともに大きい．すくい角0°では切削初期から両分力とも急激に増大し切削不能となった．しかし，すくい角15°と30°では両分力とも小さく130m切削後でも安定した切削状態を維持している．図(b)はコーティング工具と高速度鋼工具のすくい角の影響を明らかにするため，切削距離10mにおける切削抵抗の変化を比較した．同図のようにコーティング工具が高速度鋼よりも幾分切削抵抗が大きい．コーティング工具のすくい面は溶射したままの状態で表面アラサ R_{max} 50μm，高速度鋼は研削仕上で R_{max} 6μmとなっており，この表面アラサの差による影響と考えられる．垂直分力 F_V が水平分力 F_H の約2倍となっている．すくい角が小さい場合には F_V，F_H とも大きく，すくい角を大きくするにつれ減少する傾向を示す．

二次元によるSUS304の切削ではこのごとく，すくい角による影響が大きく，すくい角を大きくすると切削抵抗も低下するが，本報では工具寿命に及ぼす影響因子を明らかにすることに重さをおいているので過酷な条件としてすくい角10°，逃げ角6°と一定とした．

5.2　有限要素法による切削温度の解析

切削工具寿命への大きな影響因子の一つとして刃先の温度がまず挙げられる．通常の切削過程では切削の際に加えられた仕事量の大部分が熱となり，その一部が工具に流入し工具温度を上昇させる．実際の切削加工では発生した熱を潤滑油剤等で冷却し，工具の温度をある一定温度の平衡状態に保つことが行われているが，本実験では無潤滑による切削とした．切り刃先端部の温度を直接測定することは極めて困難を伴うので有限要素解析と直接測定による外挿法を採用した．

有限要素法による温度解析では，要素数が多いほど正確な解析ができるが，ここでは工具刃先近傍の要素分割を細かくし，刃先から離れたところでは大きな分割とした．工具の要素分割と計算で用いた機械的及び熱的諸定数を図4と表2に示す．

本解析において大気との熱伝導率を 3.3×10^{-9} kcal/mm^2. S. ℃，工具の熱伝導率 1.28×10^{-5} kcal/mm^2. S. ℃とした．

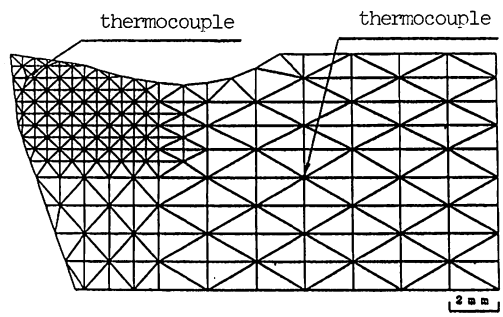


Fig 4. Geometry of the models for finite element analysis and position of thermocouples.

Table 2. Standard mechanical properties and thermal properties for the high speed tool.

Young's modulus (kg/mm)	Poisson's ratie	Thermal conductivity (kcal/mm. S. ℃)	Coefficient heattransfer (kcal/mm. S. ℃)	Thermal expansion (1/℃)	Specific heat (kcal/kg. ℃)	Density (kg/mm^3)
215×10^4	0.28	1.28×10^{-5}	3.3×10^{-9}	13.0×10^{-6}	1.2×10^{-1}	7.8×10^{-6}

実際の切削では工具に流入する熱はすくい面ばかりでなく逃げ面からも流入するが，ここではすくい面から図5のような三角要素の辺から流入する分布熱流束

とした．

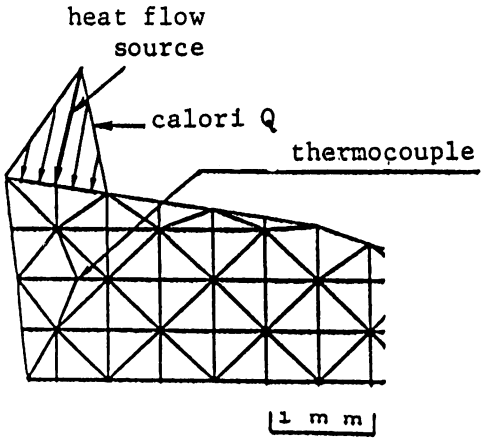


Fig5. Finite element analysis and heat flow source.

高速度鋼SKH57によるSUS304の切削特性は前報[5) 6) 7) 8) 9)]で述べたように切削開始から切削不能に至る経過は切削抵抗，工具温度とも2度の急激な上昇が見られる．切削開始から最初の上昇を第1ステージ，次の上昇を第2ステージとして分類した．熱電対による実測値と計算値を図6に示す．同図のように第1ステージの刃先温度は約260℃，第2ステージの刃先温度が470℃と推定できた．刃先部の温度解析の妥当性は前報[6) 7)]とほぼ一致した．

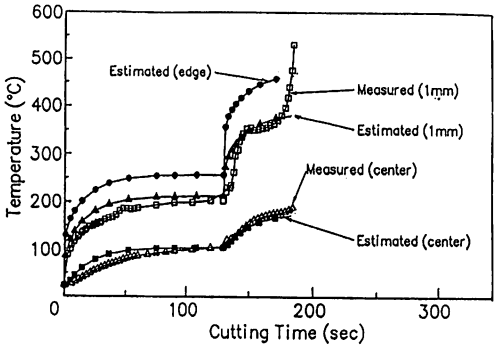
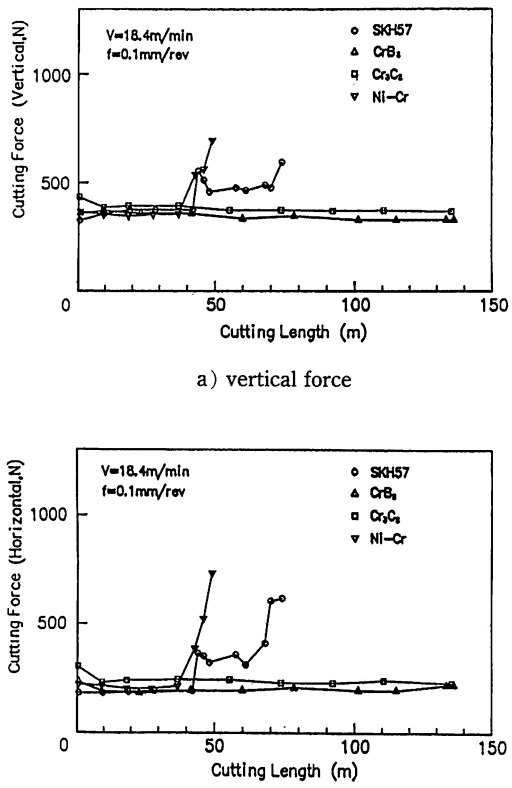


Fig 6. Measured and calculated values of tool temperature.

一般に高度鋼の高温硬さは500℃付近から急激に低下すると言われており，工具刃先部の温度上昇が工具寿命に大きな影響を及ぼす．

5.3　コーティング工具によるSUS304の切削試験

被加工材料と同等な材料SUS304とSS41にプラズマ溶射法で表面改質を行い切削工具を製作した．母材SS41は冷間圧延加工により表面硬度をHv150，200，250と硬度を変え硬度変化による影響を追究する．表面硬度の異なる三種の材料に同一条件でCr_3C_2粉末を溶射して，コーティング工具を製作し被加工材料SUS304の切削試験を行った．切削速度11.5m/minと18.4m/minでは130m切削後でも切削抵抗，切削温度の急激な増加もなく安定した切削状態であったが，切削速度28.7m/minでは硬度の異なる三種の工具とも切削距離28～31mで切削抵抗，切削温度の急激な増大によって切削不能となった．硬度変化Hv100程度では明瞭な差は認められなかった．図1に示したようなコーティング工具と高速度鋼を用いてSUS304の切削寿命試験を行った．垂直分力と水平分力の変化を図7に示す．Ni－Cr系のコーティングと高速度鋼SKH57



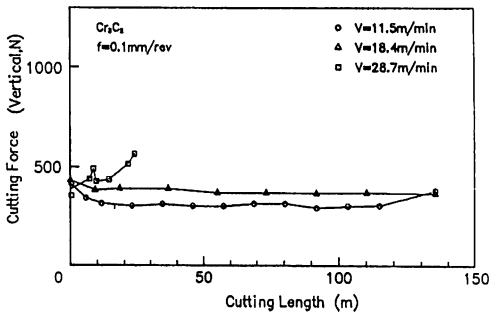
a) vertical force

b) horizontal force

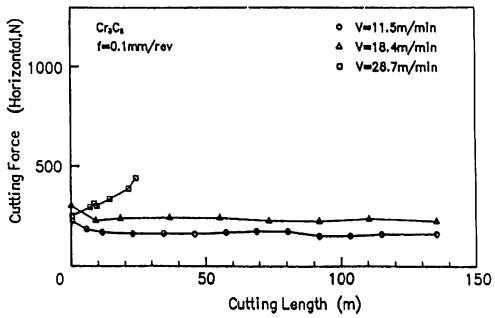
Fig 7. Tool life curve of coating tools in machinig of stainless steel at cutting speed of 18.4m /min

では40m切削後において急激な垂直分力と水平分力の増大と工具温度の増大により切削不能となった．これに対しCr_3C_2，CrB_2のコーティング工具では130m切削後でも安定した切削状態であり，同時に測定した工具温度の変化も130m切削後でも100℃以下と切削初期とほとんど変化がなく安定しておりコーティングの効果が顕著であることが分かる．SKH57では切削抵抗の変動が見られるのに対し，コーティング工具では切削抵抗の変動は認められない．このごとく，コーティング母材硬度が被加工材料の硬度よりも低くともコーティングによる表面硬化法により，被加工材料の硬度よりも高くすることで切削工具として十分使用可能であることが明らかとなった．

切削抵抗及び工具温度は切削速度と密接な関係のあることが明らかとなったので，切削速度を11.5m/min，18.4m/min，28.7m/minと変化させて切削寿命試験を行い，垂直分力と水平分力の変化をプロットした．図8はSS41(Hv150)にCr_3C_2粉末をコーティングして製作した工具である．切削速度が18.4m/min以下では135m切削後でも垂直分力，水平分力とも安定している．しかし，V＝28.7m/minでは切削量の増加にともない両分力とも急激に増大し，9.1m切削後にびびり振動を生じ，その後しばらく不安定な切削状態が続き23.5mで切削不能となった．切削温度の変化は図9に示すように，切削速度が18.4m/min以下では



a) vertical force



b) horizontal force

Fig 8. Tool life curve of Cr_3C_2 coating tools in machinig of stainless steel for cutting speed cutting force

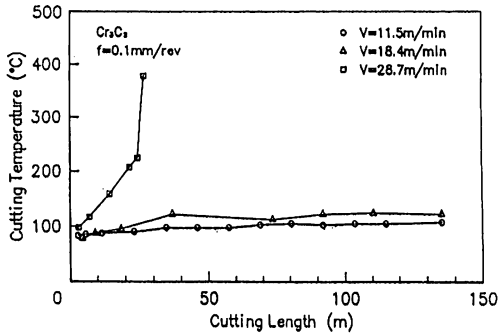


Fig 9. Tool life curve of Cr_3C_2 coating tools in machinig of stainless steel for cutting temperature

120℃程度と安定しているが，V＝28.7m/minは工具温度の増加率が1m当り6.5℃となっており，工具温度は安定した状態を示すことなく切削不能となった．このごとく工具寿命は工具温度による影響の大きいことが明らかとなった．

コーティング材料による工具寿命の差を明らかにするため，切削速度V＝28.7m/minでSUS304の切削寿命試験を行い，工具温度変化をプロットした．図10に示すようにいずれの工具とも温度の急激な増大によ

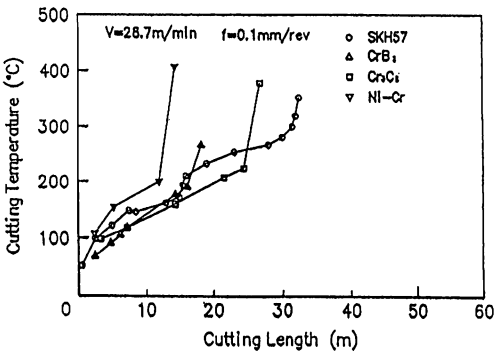
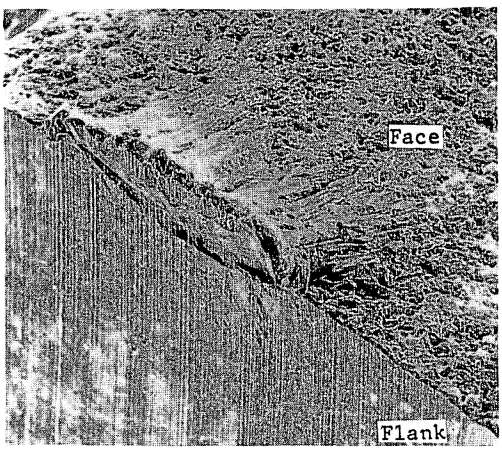


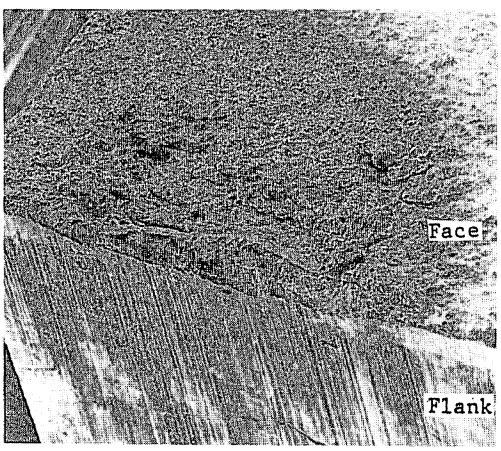
Fig 10. Tool life curve of coating tools in machinig of stainless steel for cutting temperature,cutting speed of 28.7m/min

って切削不能となった．

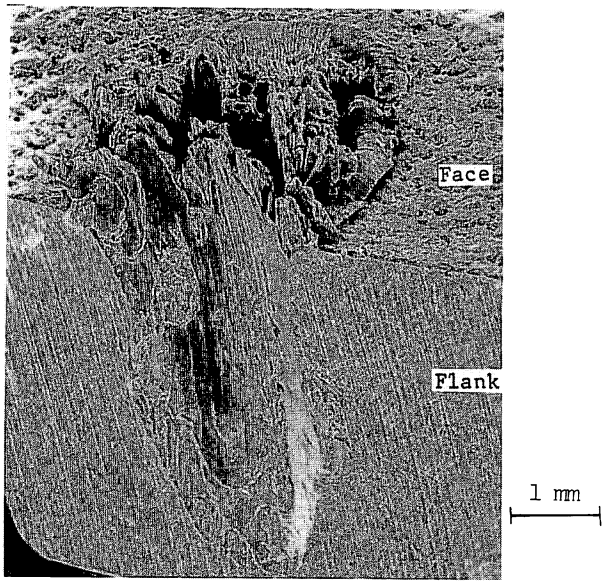
SUS304を切削速度 V＝28.7m/min で切削したところいずれの工具とも構成刃先が発生するが，Cr_3C_2 粉末をコーティングした工具について詳細に観察した．切削距離9.8m 近傍でコーティング切り刃部に構成刃先が発生し，これが成長，脱落する際にコーティング層の一部も剥ぎとり，切れ味の低下と工具温度の増大により母材の軟化による急激な切削抵抗の増大によって摩耗し，ついには母材表面が露出しすくい面から逃げ面にかけて大きくえぐられて切削不能となった．その摩耗プロセスを図11に示す．同図は SS41（Hv 150）の母材に Cr_3C_2 粉末をコーティングした工具である．同図（a）では切刃部に構成刃先が認められる．この構成刃先が成長し脱落する際に Cr_3C_2 コーティング材料と同時に持ち去るため，（b）のようにコーティング層がえぐられたようになっているのが観察できる．



a）built-up edge



b）falling of built-up edge



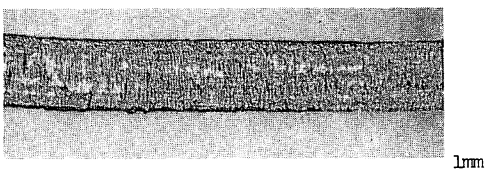
c）coating tool life

Fig 11. Typical wear patterns of plasma sprayed Cr_3Cr_3 coating tool in machining stainless steel at cutting speed of 28.7m/min depth of cut 0.1mm and feed of 0.1mm/rev.

ついには（c）のようにすくい面から逃げ面にかけて大きくえぐられたような状況を呈し工具寿命に至る．

5.4　切屑の形態

二次元切削の切屑生成は切れ刃と切削主運動の方向が互いに直角で，かつ主運動を含む切れ刃に直交する平面に平行に切屑が排出される．



a）cutting speed 18.4m/min

b）cutting speed 28.7m/min

Fig 12. Chips produced by dry-machinig the stainless steel with a Cr_3C_2 coating tool

被加工材料の幅と切削後の切屑の幅がほぼ同等なため，切屑生成は二次元的に行われる．Cr_3C_2のコーティング工具による切屑の状態を図12に示す．

同図（a）は典型的な流れ型の切屑形態で切屑は連続的なせん断すべり変形によって形成されている．この場合には図7と図8に示したように切削抵抗及び切削温度の変動がきわめて少なく工具寿命も長い．これに対し（b）は刃物の進行に伴って被加工材料が圧縮されて変形し，刃物の進行間隔が1.2mm～2.15mmで大きなせん断すべり変形を起こし，切屑が形成されている．この切屑形成では切削抵抗や切削温度とも図7と図9で示したように増加傾向にあることが認められた．

6. 結言

表面硬度の異なる三種の低炭素鋼SS41と被加工材料と同質のSUS304にプラズマ溶射法により硬質材の表面コーティング層を形成して切削工具を製作した．この方法で製作したコーティング工具の実用性・切削特性及び摩耗プロセス等について明らかにするため，SUS304の難削材を無潤滑による過酷な条件で切削性能評価を行った．以下に得られた主な結果を示す．

1) 二次元切削によるSUS304の切削抵抗はコーティング工具，高速度鋼工具ともすくい角による影響が大きい．垂直分力が水平分力より大きいがすくい角を大きくすると両分力とも減少する傾向を示す．

　コーティング層の剥離に重大な影響を及ぼすと考えられる水平分力と垂直分力を減少させるための工夫として工具剛性を考慮して可能なかぎりすくい角を大きくとることが望ましい．

2) コーティング母材SS41を冷間加工で表面硬度をHv150，200，250と変化させ，その表面にCr_3C_2のコーティング層を形成して，切削速度を変化させてSUS304の切削寿命試験を行った．Hv100程度の変化では明瞭な差は認められなかった．

3) SS41にCr_3C_2，CrB_2をコーティングして製作した工具は切削速度18.4m/min以下ではNi－Crをコーティングした工具やSKH57に比べて工具寿命も長い．しかし，切削速度を28.7m/minとすると切削抵抗，工具温度の急激な増大によって工具寿命はSKH57とほぼ同程度となった．

4) SUS304の切削で，切削速度を28.7m/minにすると，コーティング層の表面（すくい面上）に構成刃先が凝着し，これが脱落する際にコーティング層の一部も剥ぎとる．この現象が繰り返され，ついには母材表面が露出し，切れ味の低下と工具温度の増大によって軟化し，びびり振動を伴いすくい面から逃げ面にかけて大きくえぐられて切削不能となった．

5) SS41を母材として，クロム系粉末をプラズマ溶射法で切削工具を製作した．コーティングした表面硬度は被加工材料よりも3.2～5.4倍であった．無潤滑と過酷な切削条件であったが十分切削工具として使用可能であることを確認した．

おわりに，本研究を遂行した卒論学生，石原達也君（現，沖縄電力）および松留清人君（現，NTT九州）に感謝いたします．また，本研究は東北大学金属材料研究所との共同研究による成果の一部である．

参考文献

1) 鍵和田，全内，機論C86－1021（昭62－8）p1884
2) I.Han and N., Narataki., Tran, ASME, J. Eng.lnd (1973) p951
3) M.S.Lam and D., A. Dorfeld., Tran, ASME, J. Eng. lnd (1984) p111
4) Merchant, M. E., J., APP. Phys., 16－5 p1945
5) 銘苅，中山，池部，機講論No.848－3（昭58－11）p204
6) 銘苅，福本，中山，機論C53－496（昭62－8）p1884
7) 福本，銘苅，宮城，精機論（平1－11）p7
8) 銘苅，福本，真喜志，座波，精機シンポ（平2－11）p7
9) 銘苅，福本，真喜志，平井，佐々木，機講論（平4－11）p247