

SUH 系耐熱鋼の切削における工具摩耗特性

森重 修一*・瀬戸 雅文*・田戸 保**・米澤 俊昭**

On Tool Wear Characteristics in Cutting of Heat Resisting Steel

Shuichi MORISHIGE*, Masafumi SETO*, Tamotu TADO** and
Toshiaki YONEZAWA**

Abstract

Heat-resisting steel bears the important role as a heat-resisting material in thermal power generation, nuclear power generation, space development and aircraft industry, and petrochemical industry at present. As for this steel, since the work hardening is remarkable, the machinability is bad, the thermal conductivity is low, the high temperature hardness is high and so on, it is considered to be the material which is hard to do cutting work.

So far, examination has been carried out on the wear characteristics of tools in the cutting work of high manganese steel (0.5C-17Mn-4Cr) which is one of the materials that are difficult to be cut.

In this report, in the conventonal turning of SUH series heat-resisting steel was carried out by using the tools of different materials, and while comparing with the carbon steel for mechanical structures S45C, from the viewpoint of wear mode, the state of advance of wear and the rate of wear, the effect due to the difference of tool materials was examined.

1. まえがき

耐熱鋼は、現在の火力発電や原子力発電、宇宙開発および航空機産業、また石油化学工業において、耐熱材料として重要な役割を担っている。この鋼は、加工硬化が著しく、被削性が悪く、また熱伝導率が低く、高温強度が高いなどのため切削加工の困難な材料とされている。

これまでに、難削材料の一つである高マンガン鋼(0.5C-17Mn-4Cr)の切削における工具摩耗特性について検討を行った。¹⁾²⁾

本研究では、材質の異なる工具を用いて SUH 系耐熱鋼の長手方向に対する旋削を行い、そして機械構造用炭素鋼 S45C 材と比較をしながら摩耗形態、摩耗の進行状態および摩耗率等の観点から工具材料の違いによる影響を調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験は大隈鉄工所製高速旋盤を使用した。被削材は、耐熱鋼(SUH 系)と比較材として機械構造用炭素鋼(S45C)を使用した。表 1 にその化学成分を示す。切削条件はいずれの被削材に対しても切込み 1.0mm, 送り 0.1mm / rev を一定にし切削速度を変化させ、すべて乾式切削で行った。

*宇部工業高等専門学校 機械工学科

**宇部工業高等専門学校 制御情報工学科

表1 被削材の化学成分

Wt%

被削材	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	熱伝導率 (w/m.k)
SUH35	0.54	0.13	8.76	0.033	0.006	3.66	20.71	0.38	(13.72)
S45C	0.42	0.21	0.71	0.003	0.005	—	—	—	58.15

表2 摩耗試験用工具の機械的・物理的性質

工具材料		硬さ (HRA)	抗折力 (kgf/mm ²)	圧縮強さ (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	熱伝導率 (cal/s.cm.k)	比重
超硬工具	TX20-P20	91.5	200	480	54000	0.08	11.9
	UX30-P30	91.0	230	500	56000	0.10	12.6
	TH10-K10	92.0	240	620	62000	0.19	14.7
サーメット工具	N308(TiC, TiN, TaC, WC系)	92.0	170	—	—	(0.07)	—
コーテッド工具	T802(Al ₂ O ₃ 系)	92.0	170	—	—	(0.05)	—

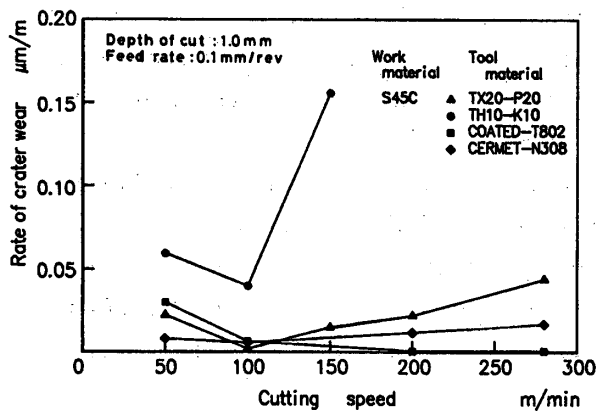


図1 切削速度とすくい面クレータ摩耗の関係

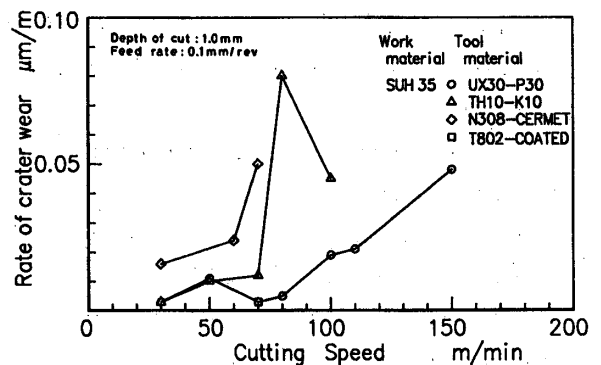


図2 切削速度とすくい面クレータ摩耗の関係

工具材料は3種類の超硬工具と主成分TiN系サーメット工具およびAl₂O₃系コーテッド工具を使用した。刃先形状は、(0, 0, 11, 11, 15, 15, 0.8)である。これらの工具材料の機械的および物理的性質を表2に示す。

工具摩耗は、工具各部の横逃げ面、横逃げ面境界、ノーズ部、前逃げ面および前逃げ面境界の摩耗帯幅を一定の切削距離ごとにそのつど切削を中断し、STM形工具顕微鏡(オリジパス製)を使用して測定した。すくい面のクレータ摩耗の測定には表面あらさ測定機サーフコム470A(東京精密製)を用いて切れ刃の形状を測定した。

また、工具摩耗形態を工具顕微鏡撮影装置(オリジパス製)を使用して観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 工具摩耗形態およびすくい面摩耗痕の変化

被削材S45Cを超硬工具P20, K10, TiN系サーメット、およびコーテッド工具で切削した場合の工具摩耗形態およびすくい面摩耗痕の変化については本誌巻末の資料に示す。

つぎに各工具の試験後のすくい面に発生したクレータ摩耗痕の最大深さを測定した結果を示す。被削材S45Cを切削した場合の切削速度とクレータ摩耗の関係を図1に示す。超硬工具P20では切削速度50m/min~100m/min

minで減少傾向を示し、中、高速切削域で再び増加傾向を示す。TiN系サーメット工具は低、中、高速度域ではほぼ一定値を示し、コーテッド工具は漸次減少しているのが分かる。K10は切削速度100m/min~150m/minにおいて急激な増加を示している。

つぎに耐熱鋼を切削した場合の切削速度とクレータ摩耗の関係を図2に示す。超硬工具P30は切削速度50m/min~70m/minにおいて減少し、中切削速度域では漸次増加傾向を示している。K10は切削速度70m/minから80m/minで急激に増加している。TiN系サーメットの低速度域におけるクレータ摩耗痕深さは他の工具材料に比べて大きいことが分かる。また、被削材S45CをTiN系サーメット工具で切削した場合のクレータ深さと比べて大きく、異なった傾向を示しており後で述べる工具逃げ面摩耗率とも対応している。

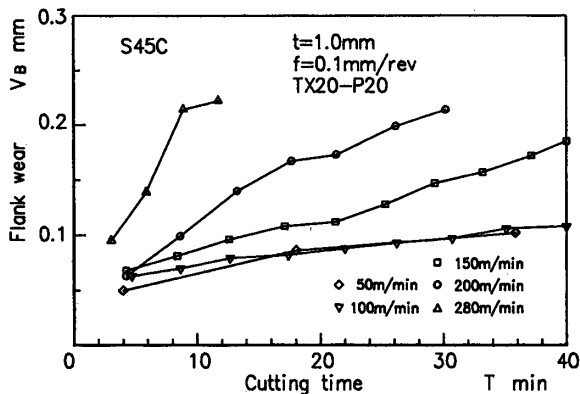


図3 横逃げ面摩耗進行曲線

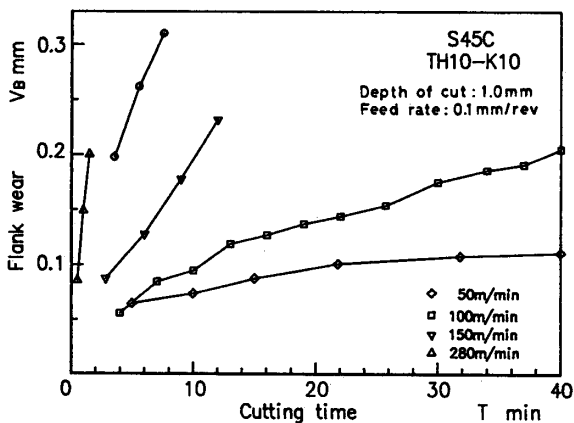


図4 横逃げ面摩耗進行曲線

3.2 工具の摩耗進行曲線

工具材料の異なる超硬工具、P30(P20)、K10、TiN系サーメット、コーテッド工具を用いてそれぞれの被削材を切削したときの各切削速度における切削時間と摩耗の関係を示す。

S45Cの場合の各工具材料の工具摩耗進行曲線を図3~図6に示す。

摩耗量は超硬工具P20、K10、TiN系サーメット、コーテッド工具いずれの場合も切削時間の増加につれてほぼ直線的に増加の傾向を示している。超硬工具P20、K10では高切削速度域で短い切削時間で摩耗幅0.2mmに到達している。TiN系サーメットは高切削速度280m/minで切削した場合、超硬工具P20とTiN系サーメットの工具逃げ面摩耗幅0.2mmに到達する時間を比べると、TiN

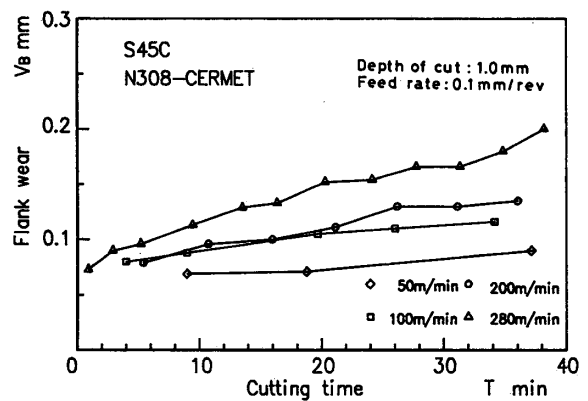


図5 横逃げ面摩耗進行曲線

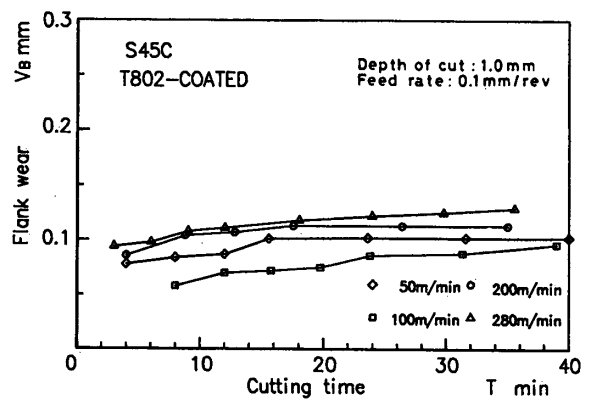


図6 横逃げ面摩耗進行曲線

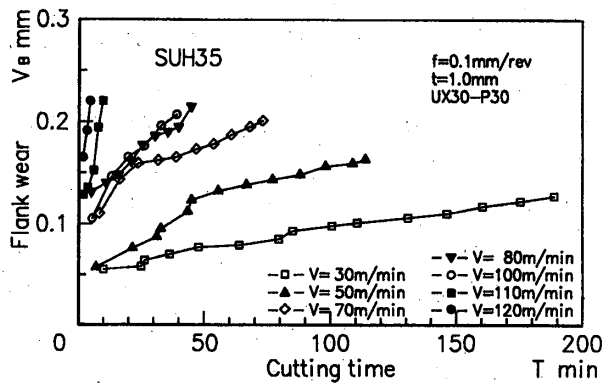


図7 横逃げ面摩耗進行曲線

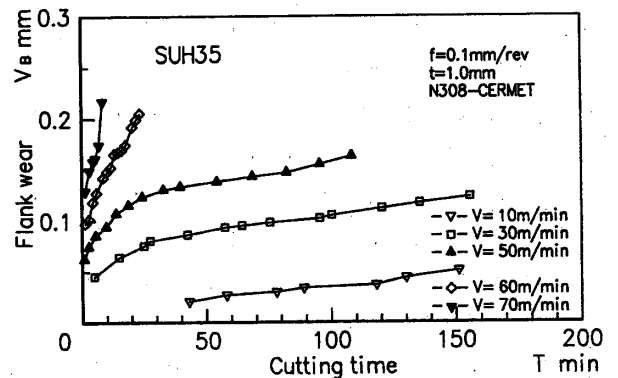


図9 横逃げ面摩耗進行曲線

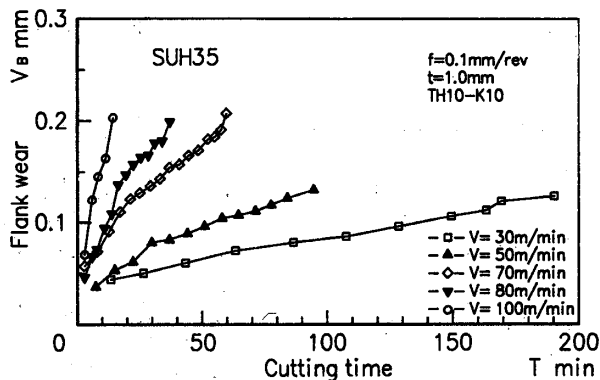


図8 横逃げ面摩耗進行曲線

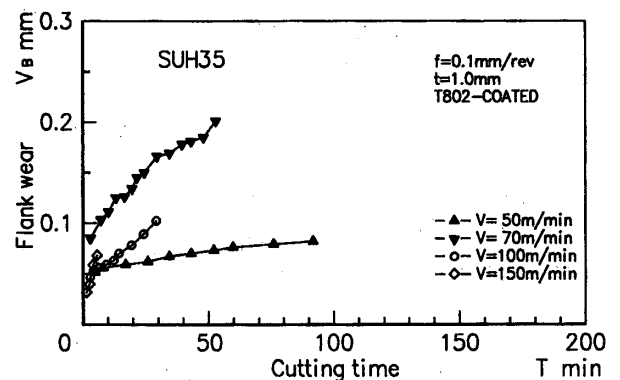


図10 横逃げ面摩耗進行曲線

系サーメットは超硬工具 P20 に比べて約 4 倍切削時間が延びていることが分かる。コーテッド工具の摩耗は切削速度 $50\text{m}/\text{min} \sim 280\text{m}/\text{min}$ の速度域では摩耗の進展が少ない。

SUH 系耐熱鋼の場合の各工具材料の工具摩耗進行曲線を図 7～図 10 に示す。

いずれの工具材料も S45C の場合と同様直線的な摩耗進行状態を示す。超硬工具 P30, K10 では切削速度 $80\text{m}/\text{min}$ および TiN 系サーメットでは切削速度 $60\text{m}/\text{min}$ を越えると初期摩耗は大きく、摩耗の進展も早まる。コーテッド工具は切削速度 $100 \sim 150\text{m}/\text{min}$ において工具ノーズ部が欠落し切削不能になる。つぎに、図 11 に切削速度 $70\text{m}/\text{min}$ で切削した場合の各工具の逃げ面摩耗幅が 0.2mm に達するまでの摩耗進行曲線を示す。超硬工具 P30, K10, コーテッド工具は類似した摩耗過程を示すが、TiN 系サーメットは初期摩耗が増大し、早期に摩耗幅 0.2mm に達する。このように工具材料の性質の違いおよび速度などにより摩耗の進行状態が大きく異なること

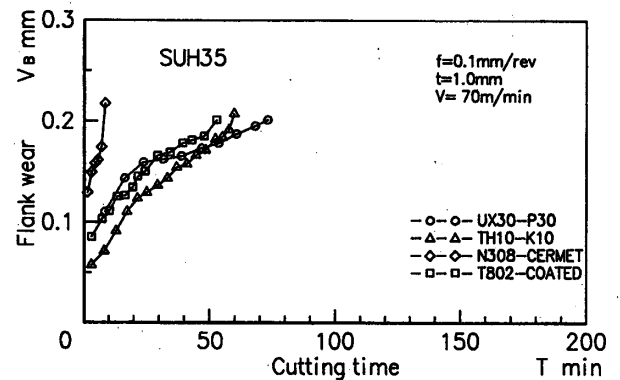


図11 横逃げ面摩耗進行曲線

が考えられる。そこで、摩耗の速度依存性を詳しく検討するために摩耗率³⁾で示す。

3.3 摩耗率

3.3-1 被削材 SUH 系耐熱鋼の場合

図 12 は超硬工具 P30, K10, TiN 系サーメット工具、

およびコーテッド工具でSUH系耐熱鋼を切削したときの工具横逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。超硬工具P30は切削速度30m/minから100m/minまではほぼ直線的に増加傾向を示し、100m/minを過ぎると急激に増加する。K10は切削速度30m/minから100m/minの低速度域において直線的に漸次増加傾向を示す。一方、コーテッド工具は50m/minから70m/minで急激に増加し、切削速度70m/minにおいてP30より高い摩耗率を示している。さらに、切削速度100m/minまでは減少し、中速度域で再び増加傾向を示す。つぎにTiN系サーメット工具は切削速度50m/minまで減少し、その後30m/minまでは一定値を示している。切削速度30m/minおよび50m/min付近に摩耗率の極小値があり、これらの速度以上では摩耗率が急激に増加している。このことは他の工具材料に比べて切削熱の発生による熱軟化が生ずるものと考えられる。これは、本誌巻末の資料に示す図7(写真、切削速度、50m/min、70m/min)の摩耗形態とも対応しているものと思われる。また、高マンガン鋼切削において超硬工具P30、コーテッド工具において見られたように切削速度の低下にともない摩耗率が増加するという同様な現象⁴⁾が上記速度以下の低速度域で起こっていることが分かる。図13に工具逃げ

面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。超硬工具P30、K10の横逃げ面境界の摩耗率は工具横逃げ面摩耗率に比べて一部の切削速度を除いて高い摩耗率を示すことが分かる。また、超硬工具P30、K10およびコーテッド工具は切削速度70m/minにおいて摩耗率の極小値がある。これまでに被削材SUH系耐熱鋼を超硬工具P30を使用して本実験と同一条件で切削を行い、加工表面硬さを測定した結果、低速度域から中速度域の切削速度において硬さの低下がみられ切削速度100m/minを越えると再び増加傾向にあることを確かめている。このことより、各工具材料の工具横逃げ面境界の摩耗率に加工硬化が影響しているものと思われる。図14に工具前逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。各工具材料の前逃げ面摩耗率は多少の違いはみられるが横逃げ面摩耗率に類似した傾向にあることが分かる。なお、切削速度30m/minにおいて高い摩耗率を示す順位はTiN系サーメット、P30、K10の順である。図15に前逃げ面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。超硬工具P30は切削速度30m/minから50m/minでは一定、K10では30m/minから50m/minで増加しておりその後100m/minまで変化が少ない。TiN系サーメットは切削速度50m/minから10m/minに減少すると摩耗率は逆に増大して

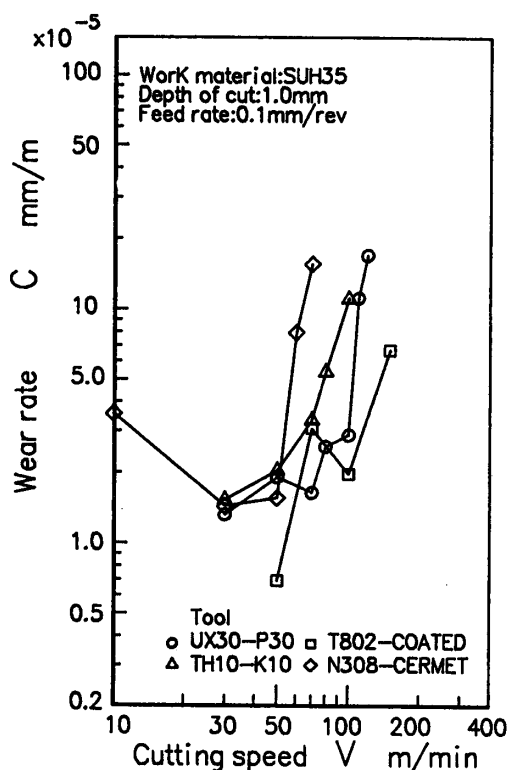


図12 工具横逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係

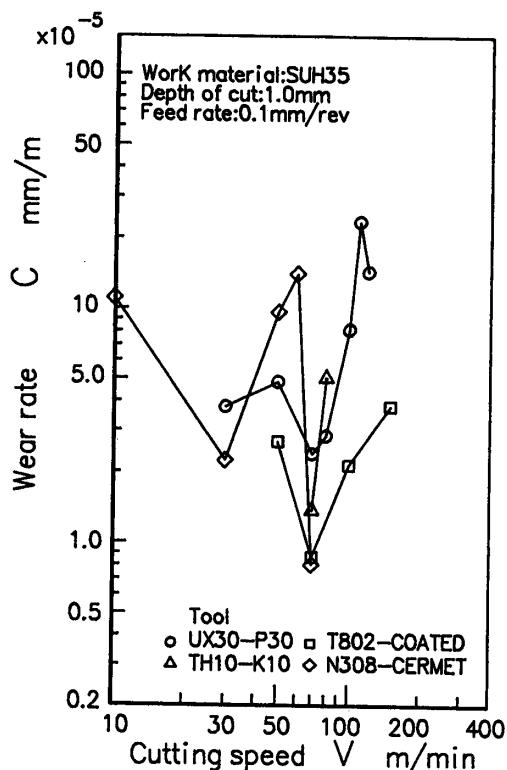


図13 工具横逃げ面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係

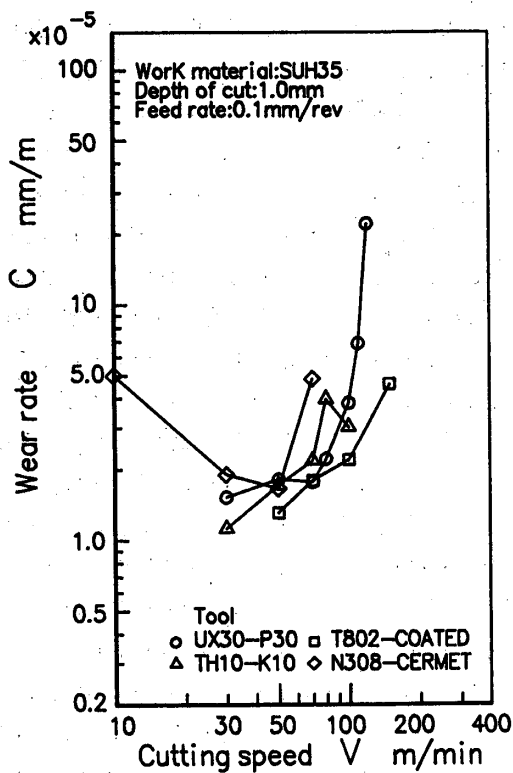


図14 工具前逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係

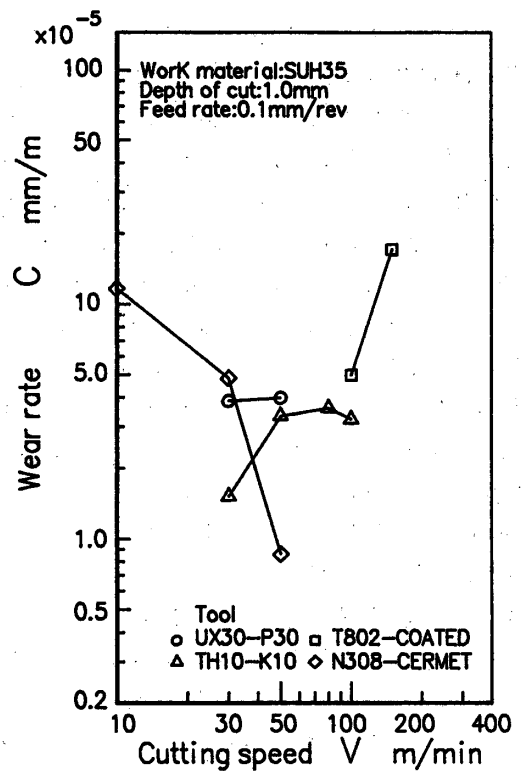


図15 工具前逃げ面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係

いる。コーテッド工具は切削速度 $50\text{m}/\text{min}$ から $150\text{m}/\text{min}$ で上昇し高い摩耗率であることが分かる。

3.3-2 被削材 S45C の場合

図 16 は炭素鋼 S45C を切削したときの工具横逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。使用した工具材料は超硬工具 P20 を使用したほかは、前述の SUH 系耐熱鋼切削に用いた同種類の工具材料を用いた。超硬工具 P20 は切削速度 $50\text{m}/\text{min}$ ~ $100\text{m}/\text{min}$ にかけて減少し、切削速度 $100\text{m}/\text{min}$ ~ $280\text{m}/\text{min}$ まで増大する。K10 は切削速度 $50\text{m}/\text{min}$ ~ $280\text{m}/\text{min}$ にかけて増加傾向を示す。TiN 系サーメット工具、コーテッド工具は高切削速度域において摩耗率が小さくなり、切削速度 $200\text{m}/\text{min}$ を越えると増加傾向がみられる。切削速度 $280\text{m}/\text{min}$ における低い摩耗率を示す工具材料はコーテッド工具、TiN 系サーメット工具 P30, K10 の順である。なお、このほかの工具摩耗面においてもこの順位は同じであった。これは工具材料の熱伝導率の値に対応していることが分かる。また、耐熱鋼を切削した場合の各工具材料の高い切削速度における摩耗率と比較すると被削材 S45C の場合のすべての工具材料の摩耗率のほうが低い値を示す。これは炭素鋼 S45C の機械的および物理的性質と合わせ

て、耐熱鋼の熱伝導率⁵⁾に比べて大きい熱伝導率を持つ被削材 S45C 材の切りくずへの熱流出が効果的に働き、工具の熱的摩耗を少なくしているものと思われる。また、高切削速度域において低い摩耗率を示す Al_2O_3 系コーテッド工具は前述の切りくずへの熱流出効果と併せて Al_2O_3 の高温硬度⁶⁾が高いことや、複層被膜の効果などが特に工具逃げ面摩耗部に有効に働いているものと考えられる。図 17 各工具材料に対する工具横逃げ面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。各々の工具材料の摩耗率曲線の屈曲点を過ぎると摩耗率は急激に増大し、いずれも高い摩耗率を示す。図 18 各工具材料に対する工具前逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。切削速度 $50\text{m}/\text{min}$ における摩耗率が異なっているほかは工具横逃げ面の摩耗率に類似していることが分かる。図 19 に各工具材料の工具前逃げ面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係を示す。超硬工具 P20, K10 は切削速度 $50\text{m}/\text{min}$ から $200\text{m}/\text{min}$ まで漸次減少し、切削速度 $200\text{m}/\text{min}$ を過ぎると再び摩耗率は増大する。超硬工具 K10 は切削速度 $100\text{m}/\text{min}$ の屈曲点を過ぎると切削速度 $280\text{m}/\text{min}$ まで増加傾向を示す。ここで TiN 系サーメット工具は被削材耐熱鋼を切削した場合の摩耗率の値と被削材 S45C の摩耗率の値が切削速度 $50\text{m}/\text{min}$ を過ぎて中速度域までの切

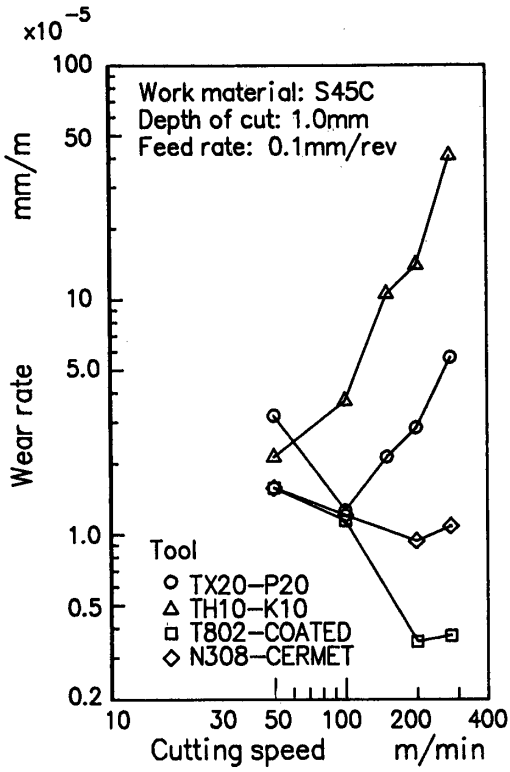


図16 工具横逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係

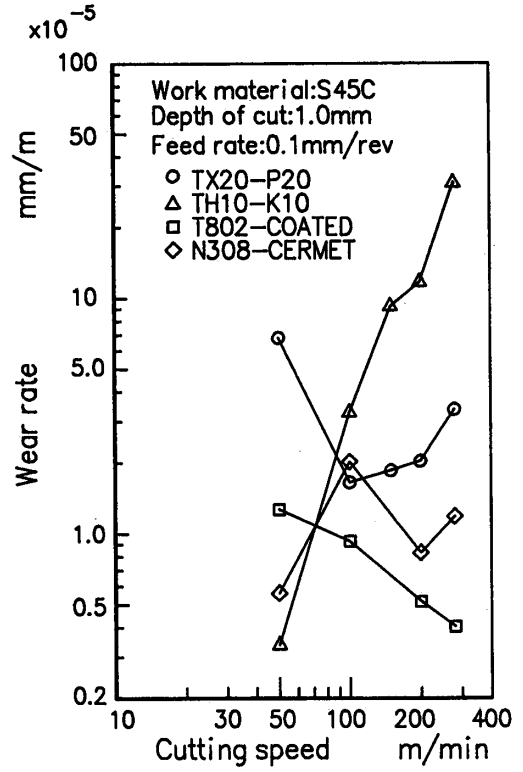


図18 工具前逃げ面摩耗の切削速度と摩耗率の関係

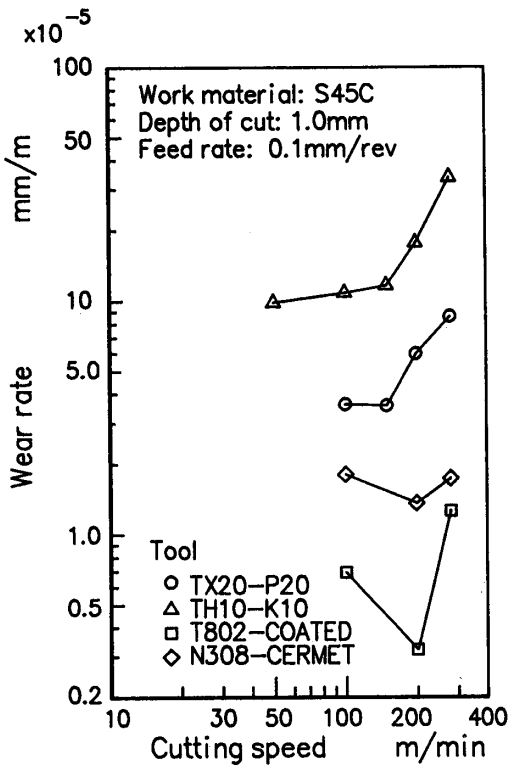


図17 工具横逃げ面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係

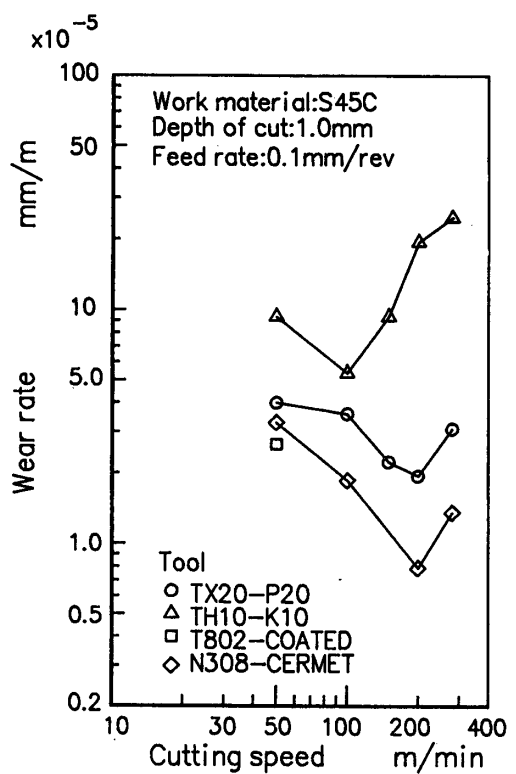
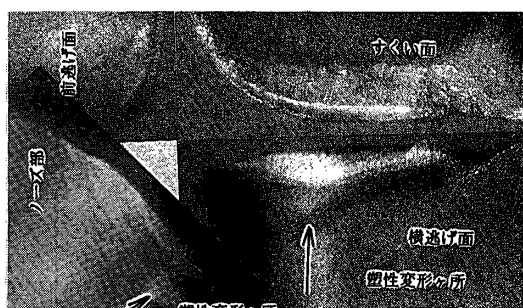


図19 工具前逃げ面境界摩耗の切削速度と摩耗率の関係



N308-Cermet tool
Cutting speed: 70m/min
Cutting time: 8.51min

Cutting material: SUH35
Depth of cut: 1.0mm
Feed rate: 0.1mm/rev

図20 TiN系サーメット工具のノーズ部の塑性変形

削速度範囲において大きく異なる。これは工具中の元素が被削材 SUH 系耐熱鋼に含まれる元素と拡散反応⁷⁾を起こし、拡散摩耗を誘発するためと思われる。また、耐熱鋼の元素 C 量, Mn 量が S45C 材に比べて多く含んでいるのもすくい面クレータ摩耗および摩耗率に影響しているのではないかと考える。図 20 に TiN 系サーメット工具のノーズ部の塑性変形を示す。ノーズ部の少し横逃げ面側を矢印で示した方向に測定した。図 21 に塑性変形形状を示す。同図(a)は未使用のノーズ部の形状を示す。同じく(b)に塑性変形形状を示すが、摩耗した工具刃先が盛り上がり変形しているのが分かる。このように耐熱鋼の持つ高い靱性、および切削熱と切削抵抗作用が工具に塑性変形⁸⁾を起こさせ TiN 系サーメット工具の摩耗率に影響するものと考えられる。

今後の課題としては、二次元切削の解析、被削材の物理的・機械的特性との関連などについてさらに詳細な検討が必要である。

最後に、実験に協力された本校卒業生、(平成 4 年 3 月卒業)片山昌文君、木村一也君、元永弘行君ならびに(平成 5 年 3 月卒業)古江健志君、大平昭彦君に深く感謝します。

4. むすび

SUH35 系耐熱鋼を主な被削材とし、長手切削を行い工具摩耗特性について検討を行った。本研究で得られた結果は次のとおりである。

1) TiN 系サーメット工具の主切れ刃の工具逃げ面摩耗率は切削速度が増加するにつれて減少し、臨界速度 50m

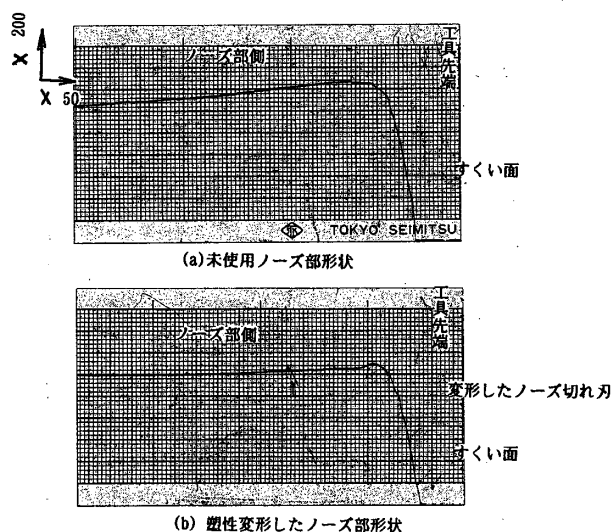


図21 TiN系サーメット工具の変形形状

／min を越えると再び増加する。

2) コーテッド工具は切削速度 100m / min ~ 150m / min においてノーズ部が切削の早期に欠損する。

3) 切削速度 70m / min において P30, コーテッド工具, K10, TiN 系サーメット工具の順序で高い摩耗率を示す。

4) S45C 材切削では高切削速度 280m / min において TiN 系サーメット工具の摩耗率は低く, SUH 系耐熱鋼を切削した場合の摩耗率と比べて大きい違いがある。

5. 文献

- 1) 森重, 瀬戸, 田戸: 宇部工業高等専門学校研究報告, 37, 7, (1991)
- 2) 森重, 瀬戸, 田戸: 宇部工業高等専門学校研究報告, 38, 11, (1992)
- 3) 佐久間, 瀬戸: 日本機械学会論文集 47-414, 211, (1981)
- 4) 森重, 瀬戸, 田戸, 佐久間: 平成 3 年度徳島地方学術講演会論文集 21 (1991)
- 5) 機械と工具: 6, 31, (1991)
- 6) 元島栖二: 機械の研究, 39-7, 40, (1987)
- 7) 機械加工学: 中島利勝, 鳴瀧則彦, コロナ社 86
- 8) 難削材の切削加工技術: 狩野勝吉 工業調査会 134 (平成 6 年 9 月 20 日受理)